



# Potenziale der CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion durch digitales und durchgängiges Engineering bei industriellen Produktionssystemen

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur (Dr.-Ing.)** 

von M.Sc. Roman Mader geb. am 27.04.1994 in Deggendorf

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg Gutachter:

- Prof. Dr.- Ing. habil. Arndt Lüder
- Prof. Dr. rer. nat. Michael Scheffler

Promotionskolloquium am 23.07.2025

# I Kurzfassung

Die Industrie spielt eine entscheidende Rolle bei der Erfüllung gesellschaftlicher Bedürfnisse, muss jedoch kontinuierlich effizienter und nachhaltiger werden. Die Bedeutung von nachhaltigen Produktionssystemen nimmt immer mehr zu, da die vorhandenen natürlichen Ressourcen nicht unendlich verfügbar sind und ein verantwortungsvoller Umgang mit ihnen von grundlegender Bedeutung ist. Digitale Technologien und Prozessverbesserungen bieten das Potenzial, die Nachhaltigkeit im gesamten Entstehungsprozess von Produktionsanlagen in der Industrie zu verbessern.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Bedeutung eines digitalen und durchgängigen Engineerings von industriellen Produktionsanlagen unter Berücksichtigung neutraler Austauschformate als Grundlage der Nachhaltigkeit zu untersuchen. Hierzu wurde der Fokus auf die Entwicklung und Validierung einer Methode zur systematischen Bewertung der CO<sub>2</sub> -Emissionen im Engineering Prozess gelegt.

Die ECEE-Methode (Evaluation of Carbon Emissions in Engineering) identifiziert relevante Emissionsquellen im Engineering und quantifiziert deren  $CO_2$ -Massenkoeffizienten. Darauf aufbauend werden Formeln entwickelt, die es ermöglichen, die Gesamtemissionen, deren Kosten und den Anteil an den Gesamtkosten des Engineerings zu berechnen. Ein wesentlicher Aspekt der Methode ist, dass neben den Kosten für  $CO_2$ -Zertifikate auch optional die Kosten für  $CO_2$ -Filterung in die Bewertung einfließen können, mit dem Ziel, einen Anreiz zur Emissionsreduktion zu schaffen.

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit wurde die ECEE-Methode anhand von Use Cases aus den Bereichen Montage und Lackierung validiert. Es wurden verschiedene Szenarien in den Prozessen der Virtuellen Inbetriebnahme und der digitalen Energiesimulation untersucht. Zur einfacheren praktischen Umsetzung und Anwendung wurde in diesem Zuge auch eine Web-Software in Python entwickelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein durchgängig digitaler Engineeringprozess auf Basis neutraler Datenstandards den CO<sub>2</sub> -Ausstoß signifikant reduzieren kann. Durch die Digitalisierung lassen sich Produktionsanlagen effizienter planen, konstruieren und betreiben, wodurch Energieverbrauch und Emissionen verringert werden. Zudem ermöglicht der nahtlose Datenaustausch zwischen Beteiligten eine Vermeidung von Medienbrüchen und redundanter Datenhaltung, was Fehlerquellen und Abstimmungsaufwand reduziert.

Insgesamt bietet ein digitaler Engineeringprozess vielfältige Möglichkeiten, die CO<sub>2</sub> - Emissionen über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu senken - von der Konzeption bis zur Produktionsunterbrechung. Die ECEE-Methode ermöglicht eine realitätsnahe Bewertung der CO<sub>2</sub> -Emissionen im Engineering und dient Unternehmen als Instrument, um wesentliche Emissionsquellen zu identifizieren und Einspar- sowie Effizienzmaßnahmen einzuleiten. Sie zeigt, dass ein digitaler Engineering Prozess ein wirksames Mittel ist, damit der CO<sub>2</sub> -Ausstoß im Engineering gesenkt werden kann.

# **II Abstract**

Industry plays a crucial role in meeting societal needs but must continuously become more efficient and sustainable. The importance of sustainable production systems is growing, as existing natural resources are not infinitely available and their responsible use is essential. Digital technologies and process improvements offer the potential to improve sustainability throughout the development process of industrial production plants.

The aim of this work is to investigate the importance of digital and continuous engineering of industrial production plants, considering neutral exchange formats as a basis for sustainability. For this purpose, the focus was on the development and validation of a method for the systematic evaluation of CO<sub>2</sub> emissions in the engineering process.

The ECEE method (Evaluation of Carbon Emissions in Engineering) identifies relevant emission sources in engineering and quantifies their CO<sub>2</sub> mass coefficients. Based on this, formulas are developed to calculate total emissions, their costs and the share of the total costs of engineering. An important aspect is that, in addition to the costs of CO<sub>2</sub> certificates, the costs of CO<sub>2</sub> filtering can also optionally be included in the evaluation in order to create an incentive to reduce emissions.

To verify practicality and applicability, the ECEE method was validated using use cases from the areas of assembly and painting. Various scenarios in the processes of virtual commissioning and energy simulation were investigated. For easier practical implementation and use, web software in Python was also developed in this context.

The results show that a continuous digital engineering process based on neutral data standards can significantly reduce CO<sub>2</sub> emissions. Digitalization makes it possible to plan, design and operate production plants more efficiently, reducing energy consumption and emissions. In addition, the seamless exchange of data between participants makes it possible to avoid media breaks and redundant data storage, which reduces sources of error and coordination costs.

Overall, a digital plant development process offers a wide range of opportunities to reduce CO<sub>2</sub> emissions over the entire life cycle — from initial design to production interruption. The ECEE method enables a realistic assessment of CO<sub>2</sub> emissions in engineering and serves as a tool for companies to identify significant sources of emissions and initiate saving and efficiency measures. It shows that a digital engineering process is an effective means of significantly reducing CO<sub>2</sub> emissions in engineering.

# III Inhalt

II Abstract	ΙΚι	ırzfas	ssung	I
IV Abbildungsverzeichnis         V           V Tabellenverzeichnis         VIII           VII Formelzeichenverzeichnis         VIII           VII Abkürzungsverzeichnis         XI           VIII Glossar         XIII           1. Einleitung         -1 -           1.1. Problemstellung und Motivation         -1 -           1.2. Vorgehen und Aufbau         - 2 -           2. Grundlagen der Nachhaltigkeit         - 4 -           2.1. Begriff "Nachhaltigkeit"         - 4 -           2.2. Triple-Bottom-Line         - 5 -           2.3. Ganzheitliche nachhaltige Entwicklung in Europa         - 8 -           2.4. Grundlagen der CO <sub>2</sub> -Bilanzierung         - 10 -           2.5. CO <sub>2</sub> -Neutralität und Emissionsfaktoren         - 15 -           3. Stand der Technik: Prozess- und Datenstandards         - 17 -           3.1. Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen         - 17 -           3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess         - 22 -           3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten"         - 22 -           3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung"         - 24 -           3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)         - 27 -           3.2.4. Digitale Energiesimulation         - 30 -           3.3. Industriestandard Auto	II A	bstra	ct	
V Tabellenverzeichnis         VIII           VI Formelzeichenverzeichnis         VIII           VII Abkürzungsverzeichnis         XI           VIII Glossar         XI           1. Einleitung         -1 -           1.1. Problemstellung und Motivation         -1 -           1.2. Vorgehen und Aufbau         -2 -           2. Grundlagen der Nachhaltigkeit         -4 -           2.1. Begriff "Nachhaltigkeit"         -4 -           2.2. Triple-Bottom-Line         -5 -           2.3. Ganzheitliche nachhaltige Entwicklung in Europa         -8 -           2.4. Grundlagen der CO <sub>2</sub> -Bilanzierung         10 -           2.5. CO <sub>2</sub> -Neutralität und Emissionsfaktoren         15 -           3. Stand der Technik: Prozess- und Datenstandards         -17 -           3.1. Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen          -17 -           3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess von industriellen Anlagen         -17 -           3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten"         -22 -           3.2.1. Definition "Digitale Fabrikplanung"         -22 -           3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung"         -22 -           3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)         -27 -           3.3.1. Ziele         -37 -           3.3.2. Aufbau	III lı	nhalt		III
VI Formelzeichenverzeichnis         VIII           VIII Abkürzungsverzeichnis         XI           VIII Glossar         XIII           1. Einleitung         - 1 -           1.1. Problemstellung und Motivation         - 1 -           1.2. Vorgehen und Aufbau         - 2 -           2. Grundlagen der Nachhaltigkeit         - 4 -           2.1. Begriff "Nachhaltigkeit"         - 4 -           2.2. Triple-Bottom-Line         - 5 -           2.3. Ganzheitliche nachhaltige Entwicklung in Europa         - 8 -           2.4. Grundlagen der CO <sub>2</sub> -Bilanzierung         - 10 -           2.5. CO <sub>2</sub> -Neutralität und Emissionsfaktoren         - 15 -           3. Stand der Technik: Prozess- und Datenstandards         - 17 -           3.1. Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen         - 17 -           3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess         - 22 -           3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten"         - 22 -           3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung"         - 24 -           3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)         - 27 -           3.3.1. Ziele         - 37 -           3.3.2. Aufbau         - 38 -           3.3.3. Anwendung         - 39 -           3.4. Industriestandard Asset Administration Shell	IV A	Abbild	dungsverzeichnis	V
VII Abkürzungsverzeichnis         XI           VIII Glossar         XIII           1. Einleitung         - 1 -           1.1. Problemstellung und Motivation         - 1 -           1.2. Vorgehen und Aufbau         - 2 -           2. Grundlagen der Nachhaltigkeit         - 4 -           2.1. Begriff "Nachhaltigkeit"         - 4 -           2.2. Triple-Bottom-Line         - 5 -           2.3. Ganzheitliche nachhaltige Entwicklung in Europa         - 8 -           2.4. Grundlagen der CO <sub>2</sub> -Bilanzierung         - 10 -           2.5. CO <sub>2</sub> -Neutralität und Emissionsfaktoren         - 15 -           3. Stand der Technik: Prozess- und Datenstandards         - 17 -           3.1. Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen         - 17 -           3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess         - 22 -           3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten"         - 22 -           3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung"         - 24 -           3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)         - 27 -           3.2.4. Digitale Energiesimulation         - 30 -           3.3.1. Ziele         - 37 -           3.3.2. Aufbau         - 38 -           3.3.3. Anwendung         - 39 -           3.4. Industriestandard Asset Administration Shel	V T	abell	enverzeichnis	VIII
VIII Glossar       XIII         1. Einleitung       - 1 -         1.1. Problemstellung und Motivation       - 1 -         1.2. Vorgehen und Aufbau       - 2 -         2. Grundlagen der Nachhaltigkeit       - 4 -         2.1. Begriff "Nachhaltigkeit"       - 4 -         2.2. Triple-Bottom-Line       - 5 -         2.3. Ganzheitliche nachhaltige Entwicklung in Europa       - 8 -         2.4. Grundlagen der CO <sub>2</sub> -Bilanzierung       - 10 -         2.5. CO <sub>2</sub> -Neutralität und Emissionsfaktoren       - 15 -         3. Stand der Technik: Prozess- und Datenstandards       - 17 -         3.1. Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen       - 17 -         3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess       - 22 -         3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten"       - 22 -         3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung"       - 24 -         3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)       - 27 -         3.2.4. Digitale Energiesimulation       - 30 -         3.3.1. Ziele       - 37 -         3.3.2. Aufbau       - 38 -         3.3.3. Anwendung       - 39 -         3.4. Industriestandard Asset Administration Shell       - 45 -	VI F	orme	elzeichenverzeichnis	VIII
1. Einleitung	VII .	Abkü	rzungsverzeichnis	XI
1.1.       Problemstellung und Motivation	VIII	Glos	sar	XIII
1.2. Vorgehen und Aufbau	1.	Einl	eitung	1 -
2. Grundlagen der Nachhaltigkeit       - 4 -         2.1. Begriff "Nachhaltigkeit"       - 4 -         2.2. Triple-Bottom-Line       - 5 -         2.3. Ganzheitliche nachhaltige Entwicklung in Europa       - 8 -         2.4. Grundlagen der CO <sub>2</sub> -Bilanzierung       - 10 -         2.5. CO <sub>2</sub> -Neutralität und Emissionsfaktoren       - 15 -         3. Stand der Technik: Prozess- und Datenstandards       - 17 -         3.1. Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen       - 17 -         3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess       - 22 -         3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten"       - 22 -         3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung"       - 24 -         3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)       - 27 -         3.2.4. Digitale Energiesimulation       - 30 -         3.3. Industriestandard AutomationML       - 35 -         3.3.1. Ziele       - 37 -         3.3.2. Aufbau       - 38 -         3.3.3. Anwendung       - 39 -         3.4. Industriestandard Asset Administration Shell       - 45 -	1	.1.	Problemstellung und Motivation	1 -
2.1. Begriff "Nachhaltigkeit" 4 - 2.2. Triple-Bottom-Line 5 - 2.3. Ganzheitliche nachhaltige Entwicklung in Europa 8 - 2.4. Grundlagen der CO <sub>2</sub> -Bilanzierung 10 - 2.5. CO <sub>2</sub> -Neutralität und Emissionsfaktoren 15 - 3. Stand der Technik: Prozess- und Datenstandards 17 - 3.1. Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen 17 - 3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess 22 - 3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten" 22 - 3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung" 24 - 3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) 27 - 3.2.4. Digitale Energiesimulation 30 - 3.3. Industriestandard AutomationML 35 - 3.3.1. Ziele 37 - 3.3.2. Aufbau 38 - 3.3.3. Anwendung 39 - 3.4. Industriestandard Asset Administration Shell 45 -	1	.2.	Vorgehen und Aufbau	2 -
2.2. Triple-Bottom-Line 5 - 2.3. Ganzheitliche nachhaltige Entwicklung in Europa 8 - 2.4. Grundlagen der CO₂-Bilanzierung 10 - 2.5. CO₂-Neutralität und Emissionsfaktoren 15 - 3. Stand der Technik: Prozess- und Datenstandards 17 - 3.1. Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen 17 - 3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess 22 - 3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten" 22 - 3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung" 24 - 3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) 27 - 3.2.4. Digitale Energiesimulation 30 - 3.3. Industriestandard AutomationML 35 - 3.3.1. Ziele 37 - 3.3.2. Aufbau 38 - 33.3. Anwendung 39 - 3.4. Industriestandard Asset Administration Shell 45 -	2.	Gru	ndlagen der Nachhaltigkeit	4 -
2.3. Ganzheitliche nachhaltige Entwicklung in Europa	2	.1.	Begriff "Nachhaltigkeit"	4 -
2.4. Grundlagen der CO <sub>2</sub> -Bilanzierung 10 - 2.5. CO <sub>2</sub> -Neutralität und Emissionsfaktoren 15 - 3. Stand der Technik: Prozess- und Datenstandards 17 - 3.1. Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen 17 - 3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess 22 - 3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten" 22 - 3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung" 24 - 3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) 27 - 3.2.4. Digitale Energiesimulation 30 - 3.3. Industriestandard AutomationML 35 - 3.3.1. Ziele 37 - 3.3.2. Aufbau 38 - 3.3.3. Anwendung 39 - 3.4. Industriestandard Asset Administration Shell 45 -	2	.2.	Triple-Bottom-Line	5 -
2.5. CO <sub>2</sub> -Neutralität und Emissionsfaktoren	2	.3.	Ganzheitliche nachhaltige Entwicklung in Europa	8 -
3.1. Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen 17 - 3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess 22 - 3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten" 22 - 3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung" 24 - 3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) 27 - 3.2.4. Digitale Energiesimulation 30 - 3.3. Industriestandard AutomationML 35 - 3.3.1. Ziele 37 - 3.3.2. Aufbau 38 - 3.3.3. Anwendung 39 - 3.4. Industriestandard Asset Administration Shell 45 -	2	.4.	Grundlagen der CO <sub>2</sub> -Bilanzierung	10 -
3.1. Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen - 17 - 3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess - 22 - 3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten" - 22 - 3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung" - 24 - 3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) - 27 - 3.2.4. Digitale Energiesimulation - 30 - 3.3. Industriestandard AutomationML - 35 - 3.3.1. Ziele - 37 - 3.3.2. Aufbau - 38 - 3.3.3. Anwendung - 39 - 3.4. Industriestandard Asset Administration Shell - 45 -	2			
3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess	3.	Star	nd der Technik: Prozess- und Datenstandards	17 -
3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten" - 22 - 3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung" - 24 - 3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) - 27 - 3.2.4. Digitale Energiesimulation - 30 - 3.3. Industriestandard AutomationML - 35 - 3.3.1. Ziele - 37 - 3.3.2. Aufbau - 38 - 3.3.3. Anwendung - 39 - 3.4. Industriestandard Asset Administration Shell - 45 -	3	.1.	Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen	17 -
3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung"       - 24 -         3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)       - 27 -         3.2.4. Digitale Energiesimulation       - 30 -         3.3. Industriestandard AutomationML       - 35 -         3.3.1. Ziele       - 37 -         3.3.2. Aufbau       - 38 -         3.3.3. Anwendung       - 39 -         3.4. Industriestandard Asset Administration Shell       - 45 -	3	.2.	Digitaler Fabrikplanungsprozess	22 -
3.2.3.       Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)       - 27 -         3.2.4.       Digitale Energiesimulation       - 30 -         3.3.       Industriestandard AutomationML       - 35 -         3.3.1.       Ziele       - 37 -         3.3.2.       Aufbau       - 38 -         3.3.3.       Anwendung       - 39 -         3.4.       Industriestandard Asset Administration Shell       - 45 -				
3.2.4. Digitale Energiesimulation       - 30 -         3.3. Industriestandard AutomationML       - 35 -         3.3.1. Ziele       - 37 -         3.3.2. Aufbau       - 38 -         3.3.3. Anwendung       - 39 -         3.4. Industriestandard Asset Administration Shell       - 45 -			" 0 I 0	
3.3.1. Ziele		3.2.4	, ,	
3.3.2. Aufbau	3	.3.	Industriestandard AutomationML	35 -
3.3.3. Anwendung 39 - 3.4. Industriestandard Asset Administration Shell 45 -				
3.4. Industriestandard Asset Administration Shell 45 -				
	2		· ·	
4.				
5. Erfassung und Berechnung von CO₂.Emissionen im Engineering mithilfe der				
ECEE-Methode 51 -				
5.1. Auswahl relevanter Emissionsquellen im Engineering 51 -	5	.1.	Auswahl relevanter Emissionsquellen im Engineering	51 -
5.1.1. Lean Engineering als Grundlage für Emissionsquellen 52 -				
5.1.2. Auswahl relevanter Emissionsquellen im Engineering			1 3 3	

	5.2.	Quantifizierung der CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizienten	58 -
	5.3.	Berechnung der CO <sub>2</sub> -Gesamtmassenäquivalente im Engineering	66 -
	5.4.	Zusammenfassung der Methodik	66 -
6.	Aktı	uelle Grenzen der Methode und Erweiterungsprozess	68 -
7. aı		luierung und Validierung der ECEE-Methode anhand praxisnaher Use Cas Fabrikplanungsprozesses	
	7.1.	Entwicklung einer Web-Applikation zur Validierung der ECEE-Methode	
	7.2.	Virtuelle Inbetriebnahme im Engineering einer Produktionsanlage unter htung verschiedener realistischer Szenarien	
	7.2.1		
		mobilproduktion	
	7.2.2 7.2.3	9	
	7.2.4		
	Auto	mationML	- 89 -
	7.3.	Digitale Energieplanung- und Simulation auf Basis von AutomationML	95 -
	7.3.1	J I	
	Auto 7.3.2	mobilproduktion	
	7.3.3		
	7.3.4		
		AutomationML Strukturen	
	7.4.	Beantwortung der Forschungsfragen und Zusammenfassung der Validierung-	
8.		blick und weiterführender Forschungsbedarf	
9.		erences	
1(		ang	
	10.1.	Anhang 1: Preisentwicklung der CO <sub>2</sub> -Zertifikate	xi
	10.2.	Anhang 2: CO <sub>2</sub> -Emissionen des Flugverkehrs	xi
	10.3.	Anhang 3: Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung	xii
	10.4.	Anhang 4: Automatische Modellgenerierung der VIBN	xiii
	10.5.	Anhang 5: Parameter des Engineerings	xiii
	10.6.	Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases VIBN	xvi
	10.7.	Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation	. xxvi
	10.8.	Anhang 8: Input Template für Web-Applikation	xxxii

# IV Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Aufbau und Struktur der Thesis 3 -
Abbildung 2 Die bekanntesten Modelle des Triple-Bottom-Line-Ansatzes, in Anlehnung an [37, pp. 20-21]6 -
Abbildung 3: Überblick über die Scopes der Emissionen gemäß dem GHG-Protokoll [56]- 12 -
Abbildung 4 Überblick über die Bilanzierungsansätze des Product Carbon Footprints nach [59] und [44] 13 -
Abbildung 5 Klassische Prozesskette im Planungsprozess von Anlagen in der Automobilindustrie [70] 17 -
Abbildung 6 Fabrikplanungsprozess über 5 Phasen [6] 19 -
Abbildung 7 Datenfluss im digitalen Modell, Schatten und Zwilling [80, p. 777] 23 -
Abbildung 8 Schema des digitalen Fabrikplanungsprozesses (vereinfacht) 25 -
Abbildung 9 Verschiebung der Anlaufkurve durch die VIBN [45]28 -
Abbildung 10 Projektablauf mit VIBN (unten) und ohne VIBN (oben) nach [92, p. 284] mit Untergliederung der VIBN in die drei Teilschritte Analyse, Modellaufbau sowie Testphase in Anlehnung an [98, p. 69]
Abbildung 11 Generische Vorgehensweise bei der Modellbildung mithilfe von Modelica [109, p. 56]35 -
Abbildung 12 Top Level- Architektur von AutomationML [112] 38 -
Abbildung 13 Anzahl von Schnittstellen bei einem bilateralen Datenaustausch oder offenen Dateiformat [70] 40 -
Abbildung 14 AutomationML Attributsatz für den Anwendungsbereich Energie 41 -
Abbildung 15 AutomationML Rollenklassenbibliothek "Energie" 42 -
Abbildung 16 InterfaceClass Library zur Beschreibung der energetischenVerbindungen - 43 -

Abbildung 17 AutomationML InstanceHierachy einer Lackieranlage 44 -
Abbildung 18 Asset-Administrations-Shells eines Schaltschranks und der integrierten Produkte [115, p. 11]46 -
Abbildung 19 Exemplarische Zuliefererkette für ein Produkt gemäß ZVEI Use Case "Product Carbon Footprint" [115]48 -
Abbildung 20 End to End-Prozess einer Produktionsanlage [73] 49 -
Abbildung 21 Emissionsquellen im Engineering 56 -
Abbildung 22 Schema der ECEE-Methode 67 -
Abbildung 23 Abgrenzung der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit 68 -
Abbildung 24 Abgrenzung der Betriebs- und Abbauphase 68 -
Abbildung 25 Startseite der Web-Applikation 70 -
Abbildung 26 Konzept der Streamlit Applikation zur Berechnung der CO2-Emissionen mithilfe der ECEE-Methodik 71 -
Abbildung 27 Eingabemaske für Input Parameter in der Applikation 72 -
Abbildung 28 UI zur Ausgabe der CO <sub>2</sub> Emissionen 72 -
Abbildung 29 Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung im Bereich der Fahrzeugmontage - 74 -
Abbildung 30 Virtuelles Modell der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung 74 -
Abbildung 31 Prozentuale Verteilung der CO <sub>2</sub> -Massenäquivalente (Szenario 1.1); 81 -
Abbildung 32 Prozentuale Verteilung der CO <sub>2</sub> -Massenäquivalente (Szenario 1.2), Quelle: eigen81 -
Abbildung 33 Prozentuale Verteilung der CO <sub>2</sub> -Massenäquivalente (Szenario 2.2); Quelle: eigen 88 -
Abbildung 34 : Prozentuale Verteilung der CO <sub>2</sub> -Massenäquivalente (Szenario 2.1); Quelle:

Abbildung 35 Prozentuale Verteilung der CO2-Massenäquivalente (Szenario 3.2); Quelle: eigen 95 -
Abbildung 36 Prozentuale Verteilung der CO2-Massenäquivalente (Szenario 3.1); Quelle: eigen 95 -
Abbildung 37 Use-Case Trockenabscheidung in der Lackiererei [150] 96 -
Abbildung 38 Prozentuale Verteilung der CO2-Massenäquivalente in Szenario 4.1 100 -
Abbildung 39 Energieplanung nach ISO 50001:2018 [151, p. 31] 101 -
Abbildung 40 Prozentuale Verteilung der CO2-Massenäquivalente in Szenario 4.2 105 -
Abbildung 41 Schematische Darstellung der Datenflüsse der digitalen Energiesimulation- 107
Abbildung 42 AutomationML Strukturbaum der Lackieranlage für Energiesimulation 108 -
Abbildung 43 Prozentuale Verteilung der CO2-Massenäquivalente in Szenario 4.3 112 -
Abbildung 44 : Preisentwicklung der CO <sub>2</sub> -Zertifikate gemäß dem Umweltbundesamt und der Deutschen Emissionshandelsstelle [134]xi
Abbildung 45 CO <sub>2</sub> -Emissionen des Flugverkehrs nach dem Öko-Institut e. V. [131] xi
Abbildung 46 Beförderung der HVS in Werkstückträgern auf Rollenförderern zum Verbauort, Quelle: OEM internxii
Abbildung 47 Vogelperspektive des virtuellen Modells der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung mit der Anlieferungs- und Abholungszone rechts und der Verbauzone links; Quelle: OEM internxiii
Abbildung 48 Parameter des Engineerings bei einem standortnahen Lieferanten, Quelle: eigen/Interviews innerhalb eines OEMSxiv
Abbildung 49 Parameter des Engineerings bei einem Lieferanten in Europa; Quelle: eigen/Interviews innerhalb eines OEMSxv

# **V** Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Die Grundaspekte der Nachhaltigkeit in Bezug auf Unternehmen (selbst erstellt, Quelle Inhalt: [40] ) 7 -
Tabelle 2 Begriffsdefinitionen klimaneutral, CO2-frei, CO2-neutral [Quelle: eigen] 16 -
Tabelle 3 Emissionsfaktoren der im Kyoto-Protokoll definierten Treibhausgase mit einem Bezugszeitraum von 100 Jahren gemäß Myhre et al. [68]und Ergänzung der Verweilzeit von CO <sub>2</sub> gemäß dem Umweltbundesamt [69] 17 -
Tabelle 4 Entscheidungstabelle zur Softwareauswahl für die digitale Energiesimulation [110] [111]
Tabelle 5 CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizienten der Emissionsquellen im Engineering 61 -
Tabelle 6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Validierung 114 -

# VI Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Benennung
$\mu_{P_{el}}$	$\frac{t\ CO_2e}{kWh}$	CO2-Massenkoeffizient elektrische Energie
$\mu_{car}$	t CO <sub>2</sub> e Pkm	CO2-Massenkoeffizient PKW
$\mu_{rail}$	$\frac{t \ CO_2e}{Pkm}$	CO2-Massenkoeffizient Bahn
μ <sub>airplane</sub>	t CO <sub>2</sub> e Pkm	CO2-Massenkoeffizient Flugzeug
$\mu_{laptop_s}$	$\frac{t \ CO_2e}{a}$	CO2-Massenkoeffizient Standard-Laptop
$\mu_{laptop_{h-p}}$	$\frac{t \ CO_2e}{a}$	CO2-Massenkoeffizient high-performance Laptop

$\mu_{monitor}$	$\frac{t \ CO_2e}{a}$	CO2-Massenkoeffizient Monitor
μ <sub>desktop</sub>	$\frac{t \ CO_2e}{a}$	CO2-Massenkoeffizient Desktop
μ <sub>smartphone</sub>	$\frac{t \ CO_2e}{a}$	CO2-Massenkoeffizient Diensthandy
$\mu_{router}$	$\frac{t \ CO_2e}{a}$	CO2-Massenkoeffizient Router
<sup>µ</sup> videoconference	$\frac{t CO_2e}{part. \cdot h}$	CO2-Massenkoeffizient Videokonferenz
µdatatransfer	$\frac{t \ CO_2e}{a}$	CO2-Massenkoeffizient Datenübertragung
μ <sub>mail</sub>	$\frac{t \ CO_2e}{mail}$	CO2-Massenkoeffizient E-Mail
$\mu_{storage}$	$\frac{t \ CO_2e}{TB}$	CO2-Massenkoeffizient Datenspeicherung
µ <sub>hotel</sub>	$\frac{t \ CO_2e}{night}$	CO2-Massenkoeffizient Hotelübernachtung
$\mu_{office}$	$\frac{t \ CO_2 e}{m^2 \cdot a}$	CO2-Massenkoeffizient Bürogebäude
$m_{t_{CO_2}}$	t CO <sub>2</sub> e	CO2-Massenäquivalent Personentransport
$m_{D_{el_{CO_2}}}$	t CO <sub>2</sub> e	CO2- Massenäquivalente elektronische Geräte
$m_{ict_{CO_2}}$	t CO <sub>2</sub> e	CO2- Massenäquivalente Informations- und Kommunikationstechnologien
$m_{hotel_{CO_2}}$	t CO <sub>2</sub>	CO2- Massenäquivalente Hotel
$m_{office_{CO_2}}$	t CO <sub>2</sub> e	CO2- Massenäquivalente Bürogebäude
$m_{Eng_{CO_2}}$	t CO <sub>2</sub> e	CO2-Gesamtmassenassenäquivalente im Engineering
$k_{CO_2}$	$\frac{\epsilon}{t  co_2 e}$	Kosten der CO2-Emissionen
$k_{CO_2-C}$	$\frac{\epsilon}{t  co_2}$	Preis CO2-Zertifikat

$k_{CO_2-F}$	$\frac{\epsilon}{t  co_2 e}$	Preis CO2-Filterung
$c_{co_2}$	€	Kosten CO2-Gesamtmassenäquivalente
$C_{TC}$	€	Gesamtkosten des Engineerings
$C_{Eng}$	€	Kosten des Engineerings
$P_{\frac{C_{CO_2}}{c_{TC}}}$	€	Anteil der Kosten der CO2-Gesamtmassenäquivalenten and den Gesamtkosten des Engineerings
s	km	Zurückgelegte Strecke
TEC	kWh	Jährlicher Stromverbrauch (Total Energy Consumption)
$n_a$	Jahr	Nutzungsdauer
$n_{mail}$		Anzahl gesendeter E-Mails
$n_{night}$		Anzahl Hotelübernachtung
а		Jahr
ICT		Information and Communication Technology
h		Stunde
kWh		Kilowattstunde
$m^2$		Quadratmeter
part.		Teilnehmer
Pkm		Personenkilometer
TB		Terabyte

# VII Abkürzungsverzeichnis

**BEHG** Brennstoffemissionshandelsgesetz

BMZ Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung

**CCF** Corporate Carbon Footprint

CDIAC Carbon Dioxide Information Analysis Center

CH₄ Methan

CO₂ KohlenstoffdioxidCO₂e CO₂-ÄquivalentDAC Direct Air Capture

dena Deutsche Energie-Agentur

Destatis Statistische Bundesamt

**DIAMOND** Digitale Anlagenmodellierung mit neutralen Datenformaten

**DIN** Deutsche Institut für Normung

**EN** Europäische Norm

**ECEE** Evaluation of Carbon Emissions in Engineering

**FKW/PFC** Perfluorierte Kohlenwasserstoffe

**GHG** Greenhouse Gas

**GWP** Global Warming Potential

H-FKW/HFC Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe

**HMI** Human-Machine Interface

HVS Hochvoltspeicher
IBN Inbetriebnahme

ICT Information and Communication Technology

**ISO** International Standards Organization

KI Künstliche Intelligenz

**KMU** Kleine und mittlere Unternehmen

**LECO** Life Cycle Engineering Carbon Optimization

N<sub>2</sub>O Distickstoffoxid

**OEM** Original Equipment Manufacturer

PCF Product Carbon Footprint

PKW Personenkraftwagen
RQ Research Question

SBTi Science Based Targets Initiative
SDG Sustainable Development Goal

SF<sub>6</sub> Schwefelhexafluorid
SOP Start of Production

**SPS** Speicherprogrammierbare Steuerung

TBL Triple Bottom Line
UN United Nations

UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change

**US EPA** United States Environmental Protection Agency

**VDI** Verein Deutscher Ingenieure

**VDE** Verband der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik

**VDR** Verband Deutsches Reisemanagement

**VDMA** Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

**VIBN** Virtuelle Inbetriebnahme

## **VIII Glossar**

#### **Anlaufkurve**

Die Anlaufkurve beschreibt das Produktionsvolumen pro Zeiteinheit, d. h. den zeitlichen Verlauf der Produktionsleistung. Der Verlauf wird beeinflusst durch die Lerneffekte des Personals, dem technischen Fortschritt und der anfänglichen mangelnden Beherrschung der Produktionsqualität. [1, p. 1436]

#### CO<sub>2</sub>-Zertifikat

Das Bundesregierung 1. 2021 von deutschen am Januar eingeführte Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) besagt, dass Unternehmen, die fossile Rohstoffe, in Umlauf bringen, für jede Tonne CO2, die durch deren Verbrennung entsteht, ein Emissionszertifikat erwerben müssen. Die dadurch entstehenden Mehrkosten für Unternehmen werden durch höhere Preise für Heizöl, Gas, Benzin und Diesel an die Verbraucher/-innen weitergegeben, sodass für diese ein Anreiz entsteht klimafreundliche Produkte zu konsumieren oder in energieeffizientere Technologien, z. B. Wärmepumpen, zu investieren. Auch für Unternehmen stellt das BEHG einen Anreiz dar Innovationen voranzutreiben und energieeffizienter Technologien zu entwickeln und einzusetzen. [2]

#### **DAC-Verfahren**

Ziel des Direct Air Capture (DAC) Verfahrens ist es, der Atmosphäre CO<sub>2</sub> zu entziehen und dieses zu speichern, da so Negativemissonen erzeugt werden, um eine bilanzielle CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen. Das CO<sub>2</sub> wird zunächst aus der Atmosphäre herausgefiltert und chemisch an ein Trägermaterial gebunden. Anschließend wird bei erhöhter Temperatur das an das Trägermaterial gebundene CO<sub>2</sub> von diesem getrennt, sodass das CO<sub>2</sub> in seiner Reinform gewonnen werden kann. [3] Das gewonnene CO<sub>2</sub> kann für die Produktion synthetischer Kraftstoffe genutzt, in Baustoffen oder geologisch gespeichert werden. [4]

#### **Deutscher Strommix**

Der deutsche Strommix gibt an, aus welchen Energieträgern, z. B. fossile Rohstoffe (z. B. Kohle, Erdgas, Erdöl) oder erneuerbaren Energien (z. B. Photovoltaik, Windkraft, Biogas) der in Deutschland verbrauchte Strom stammt. [5]

#### **Engineering**

Engineering beschreibt die ganzheitliche und detaillierte technische Entwicklung einer Anlage [6, p. 9] und "umfasst das Erarbeiten von technologisch-technischen sowie organisatorisch-administrativen Unterlagen (Dokumenten), die für die Beschaffung, Errichtung, den bestimmungsgemäßen Betrieb und die Instandhaltung von Anlagen benötigt werden" [6, p. 2]. Während des Engineerings arbeiten mehrere Disziplinen zusammen, mit dem Ziel aus einer Vielzahl an Varianten die beste Lösung zu entwickeln. Dabei ist neben einem fundierten Fachwissen auch ausreichend Erfahrung notwendig. [6]

#### HMI

HMI (Human-Machine Interface) beschreibt die Schnittstelle zwischen Menschen und Maschine. Durch z.B. Bedienpanels kann der Mensch mit der Maschine interagieren und aktiv in deren Prozesse eingreifen. [7, pp. 169-170]

#### Modell

"Ein Modell ist ein vereinfachtes Abbild der Realität, welches erstellt wird, damit Erkenntnisse über ein betrachtetes System gewonnen werden können." [8, p. 373]

#### Modelica

Modelica ist eine Sprache für die Modellierung von cyber-physischen Systemen. Es bietet objektorientierte Konstrukte, die die Wiederverwendung von Modellen erleichtern, und kann bequem zum Modellieren komplexer Systeme verwendet werden, die z. B. mechanische, elektrische, thermische, steuerungs-, oder prozessorientierte Unterkomponenten enthalten. Aufgrund der Eigenschaften von Modelica ist es inzwischen im Bereich der komplexen Systemsimulation etabliert. Modelica wird auch zunehmend für die Simulation von Thermofluid- und Energiesystemen eingesetzt. [9, p. 1]

#### Produktionsanlage

"Unter einer Produktionsanlage wird die Gesamtheit der technischen Einrichtungen verstanden, die in einer definierten Art und Weise auf einen technischen Prozess einwirken. Dieser Prozess dient der Stoffumwandlung und Stoffumformung, der Materialbearbeitung oder der Energieumwandlung." [10, p. 8]

#### **Produktlebenszyklus**

Der Produktlebenszyklus erstreckt sich über die gesamte Wertschöpfungskette, von der Herstellung. Gewinnung und dem Transport der Rohstoffe, der Produktion und Distribution bis zur Nutzung und abschließenden Entsorgung. [11, p. 149]

#### **Produktionssystem**

Ein Produktionssystem umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher oder gleicher Prozesse, die nicht zwingend am gleichen Standort ablaufen müssen, deren Ziel die Wertschöpfung durch die Erstellung materieller oder immaterieller Güter durch die Transformation von auf den Beschaffungsmärkten erworbenen Inputobjekten zu auf den Absatzmärkten nachgefragten Outputobjekten ist. [12, p. 3] Ein Produktionssystem umfasst das betriebsnotwendige Personal, Equipment, Fabrikgebäude und Unterstützungssysteme für z. B. Qualitätssicherung. [13, p. 17] Kennzeichen eines Produktionssystems ist das Zusammenspiel von Organisation, Mensch und Maschine, [14, p. 3] die durch einen Material- und Informationsfluss miteinander verbunden sind. [12, 3ff]

#### **Prozess**

"Ein Prozess ist eine Folge von Aktivitäten mit eventuell parallelen und alternativen Aktivitäten, die Eingangsdaten in Ausgangsdaten transformieren. Die einzelnen Aktivitäten werden gegebenenfalls hierarchisch weiter zerlegt." [8, p. 375]

#### Ressource

"Als Ressource wird die Gesamtheit der vorhandenen Hilfsmittel (Geldmittel, Rohstoffe, Energie, Maschinen etc.) und Personen bezeichnet, die vorhanden sind, damit eine bestimmte Aufgabe erfüllt werden kann." [8, p. 377]

#### Simultaneous Engineering

Simultaneous Engineering ist die interdisziplinäre zeitliche Parallelisierung von Tätigkeiten in der Produkt- und Prozessgestaltung mit dem Ziel die Produktqualität zu steigern, die time-to-market und den Entwicklungs- und Planungsprozess zu verkürzen, damit Kosten reduziert werden können. Neben der Produkt- und Prozessgestaltung, umfasst das Simultaneous Engineering auch die Produktionsmittelgestaltung. [15, p. 8]

#### Simulation

"Nachbildung eines Systems mithilfe eines Modells, wobei die mit dem Modell gewonnenen Ergebnisse möglichst mit denen des ursprünglichen Systems übereinstimmen sollen" [16, p. 335]

#### Simulationsmodell

Im Kontext der VIBN beschreibt das Simulationsmodell ein Verhaltensmodell, wobei unter anderem Interaktionen zwischen verschiedenen Automatisierungskomponenten abgebildet werden. Dabei berücksichtigt die Simulationsumgebung physikalische und zeitlich Aspekte. [17, p. 16]

#### System

"Ein System ist ein beliebiger Gegenstand des Denkens, der gegenüber der Umgebung abgrenzbar (Systemgrenze) ist. Jedes System besitzt bestimmte Funktionen sowie bestimmte Eigenschaften und setzt diese zueinander in Beziehung. Fast jeder Ausschnitt der Realität kann als ein System angesehen werden, z.B. ein Unternehmen, die Gesellschaft oder eine Maschine." [8, p. 381]

#### Time-to-Market

Time-to-Market ist die Zeit, die zwischen einer Produktidee und der Einführung dieses Produkts auf dem Markt, verstreicht. Während der Time-to-Market wird unter anderem das Produkt entwickelt, Marktforschungen durchgeführt und ein Prototyp erstellt. [18]

#### Treibhauseffekt

"Die Erdatmosphäre enthält Gase, die kurzwellige Sonnenstrahlung zum großen Teil passieren lassen, (langwellige) Wärmestrahlung jedoch absorbieren und damit das System erwärmen. [Durch menschenverursachten Emissionen erhöht sich die atmosphärische Konzentration der Trreibhausgase.] Durch diesen anthropogenen [...] <u>Treibhauseffekt</u> verringert sich die in den Weltraum abgegebene Wärmestrahlung und das System Erdoberfläche / <u>Atmosphäre</u> erwärmt sich." [19]

#### **Quality Gates**

Quality gates können als Meilensteine beschrieben werden und stellen Überprüfungspunkte am Ende einer Phase des Engineering-Prozesses dar. [20, p. 22]

#### Verhaltensmodell

Entlang verschiedener Engineering-Phasen von Produktionsanlagen existiert eine Vielzahl an Verhaltensmodellen, welche das Verhalten von Prozessen, Ressourcen oder Geräten abbilden [21, p. 215]. Im Kontext der VIBN sind hierbei Modelle der Anlagenphysik zu nennen [21, p. 216]. Im Verhaltensmodell wird die Antwort oder Reaktion einer Komponente auf Ablaufinformationen oder externe Interaktionen abgebildet [17, p. 16].

#### **VIBN-Tool**

Ein VIBN-Tool wird zur Erstellung des Simulationsmodells und der Simulation verschiedener Testszenarien zur Überprüfung des Steuerungssystems angewandt. Kommerzielle Werkzeuge für diese Simulation sind WinMOd (Mewes & Partner), SIMIT (Siemens) oder DELMIA (Dessault Systémes). [22, p. 3]

# 1. Einleitung

"Bei allem, was man tut, das Ende zu bedenken, das ist Nachhaltigkeit." – Eric Schweitzer [23]

Die Industrie ist ein wichtiger Eckpfeiler in der heutigen Welt und spielt eine entscheidende Rolle bei der Erfüllung der Bedürfnisse der Gesellschaft in Bezug auf Produkte und Dienstleistungen. Die stetig wachsenden Anforderungen und Herausforderungen erfordern jedoch, dass kontinuierlich Verbesserungen und Innovationen in Produktionstechnik und Prozessen vorangetrieben werden

Ein wesentliches Element dabei ist die Nachhaltigkeit. Die Bedeutung von nachhaltigen Produktionssystemen nimmt immer mehr zu, da die vorhandenen natürlichen Ressourcen nicht unendlich verfügbar sind und ein verantwortungsvoller Umgang mit ihnen von grundlegender Bedeutung ist. Auch die Berücksichtigung von Umwelt- und Gesellschaftsverantwortung spielt eine primäre Rolle in diesem Zusammenhang.

In diesem Kontext gewinnen digitale Technologien zunehmend an Bedeutung, damit die Nachhaltigkeit in der Produktion verbessert werden kann. Das Ziel dieser Thesis ist es, die Bedeutung von digitalem und durchgängigem Engineering von Produktionsanlagen unter Berücksichtigung neutraler Austauschformate als Grundlage der Nachhaltigkeit zu untersuchen.

# 1.1. Problemstellung und Motivation

Seit dem Beginn der industriellen Revolution im Jahr 1751 hat der Mensch über 400 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> freigesetzt. Die dadurch erhöhte Anzahl der CO<sub>2</sub>-Teilchen in der Atmosphäre verstärkt den anthropogenen Klimawandel, da die von der Erde abgestrahlte Wärme nicht in das Weltall entweichen kann. Dadurch ist die Erdtemperatur bereits rund 1°C im Vergleich zu dem vorindustriellen Temperaturniveau gestiegen. [24, p. 4]

Dies bedingt extreme Wettersituationen wie Hitzewellen oder Überschwemmung und verursacht darüber hinaus das Schmelzen von Gletschern, den Anstieg der Meeresspiegel und eine Reduzierung der Artenvielfalt. Neben Veränderungen in der Umwelt, hat der Klimawandel auch gesellschaftliche Auswirkungen. Der Klimawandel erhöht die globale Armut, da vor allem Inselstaaten und Entwicklungsländer, die nicht über die finanziellen, technischen und institutionellen Mittel verfügen, davon betroffen sind. Zur Eindämmung des Klimawandels, verpflichteten sich im Jahr 2015 im Rahmen des "Übereinkommen von Paris" 195 Staaten die durchschnittliche globale Erderwärmung möglichst auf 1,5°C, jedoch jedenfalls auf deutlich unter 2°C im Vergleich zu dem vorindustriellen Temperaturniveau, zu beschränken. Dadurch soll das Risiko irreversibler Schäden an der Umwelt minimiert werden. [25]

Dennoch wurden Stand 2020 deutschlandweit 2.317 Terawattstunden Endenergie verbraucht. Die Sektoren wiesen folgende Anteile auf: Industrie 28,3 Prozent (657 TWh), Verkehr 27,5 Prozent (637 TWh), private Haushalte 28,9 Prozent (670 TWh) und Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen 15,3 Prozent (354 TWh). [26] [27, pp. 22-23]

Bezogen auf den Energieträger verbrauchen Handel, Dienstleistungen sowie Industrie und Gewerbe zusammen 70 Prozent des gesamten Stroms in Deutschland. Die Industrie benötigt allein 45 Prozent. Die Reduzierung der Emissionen aus industriellen Prozessen ist ein entscheidender Schritt zur Erreichung der globalen Klimaschutzziele, da dieser Sektor einen wichtigen Beitrag zu den globalen Emissionen leistet [28]. Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, seine Emissionen aus der Industrieproduktion bis 2030 um mindestens 20% zu reduzieren [29]. Damit diese Ziele erreicht werden können, sind innovative Technologien erforderlich, die den Weg für nachhaltige industrielle Produktionssysteme ebnen.

Die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in industriellen Prozessen ist ein mittlerweile häufig angewandtes Instrument und soll durch den Umstieg auf erneuerbare Energien sowie durch die Entwicklung treibhausgasneutraler und ressourceneffizienter Technologien und Produktionsprozesse geschehen. Im Fokus der Industrie steht die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Beschaffung, Produktion und der Nutzungsphase.

Flankierend zu diesen Bestrebungen bieten auch digitale Technologien neue Möglichkeiten, den Energie- und Ressourcenverbrauch zu analysieren und datengestützte Verbesserungen abzuleiten, die zum Klimaschutz beitragen. Die Nachfrage nach Lösungen zur Rückverfolgbarkeit bis hin zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Produkten und digitalen Produktpässen hat seit der Verabschiedung der EU-Vorschriften zugenommen. Zur Sättigung dieser Nachfrage erweisen sich dafür digitale Technologien als leistungsstarkes Instrument. [30]

Als weiteren Maßnahmenschritt sollen bereits während des Produktdesigns die zukünftigen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Produkts möglichst geringgehalten werden. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die während der technischen Entwicklung (Engineering) von Produktionsanlagen, von der initialen Idee, über Konstruktion bis hin zur Inbetriebnahme, bleiben hierbei jedoch unberücksichtigt. Ein Grund hierfür ist, dass in der bisher erfassten Literatur wenig Ansatzpunkte bezüglich der Emissionen im Engineering industrieller Produktionsanlagen zu finden sind und der Fabrikplanungsprozess bisher nach monetären und zeitlichen Kriterien bewertet wird. Es fehlt somit an einem Ansatz zur ganzheitlichen Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering.

# 1.2. Vorgehen und Aufbau

Diese Arbeit ist in drei Hauptteile gegliedert. Der erste Teil konzentriert sich auf der einen Seite auf die Grundlagen der Herangehensweise beim Engineering von Produktionsanlagen. Es werden verschiedene Technologien, Prozesse und Standards vorgestellt, die für eine durchgängige Entwicklung von Produktionsanlagen genutzt werden können.

Hierbei werden die Vorteile und Herausforderungen bei der Verwendung neutraler Austauschformate erörtert und Lösungen vorgestellt. Auch die Umsetzung und Anwendung neutraler Austauschformate in der Praxis wird diskutiert. Auf der anderen Seite wird das Basiswissen im Gebiet der Nachhaltigkeit und CO<sub>2</sub>- Bilanzierung betrachtet. Die relevanten Kriterien und Indikatoren werden vorgestellt und auf ihre Anwendbarkeit in der Praxis untersucht. Aus den Kapiteln 1 bis 3 wird in Kapitel 4 der entsprechende Handlungsbedarf ermittelt. Dieser Handlungsbedarf führt direkt zu den konkreten Forschungsfragen, die mit dieser Arbeit beantwortet werden.

Der zweite Teil der Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung einer Methodik, welche die Fragestellung beantworten soll, wie die Nutzung von Ressourcen im Engineering ganzheitlich hinsichtlich Ressourcennutzung und CO<sub>2</sub> Emissionen bewertet werden können. Dies soll es ermöglichen den Einfluss des Engineerings auf die Lebenszyklusbewertung von Produktionssystemen und Produkten zu verfeinern und Anreize für eine Optimierung von Engineeringprozessen setzen. Dabei werden auch relevante Kennzahlen und Indikatoren berücksichtigt, um eine ausgeglichene Bewertung aus ökonomischer, ökologischer und sozialer Sicht zu ermöglichen.

Im dritten und letzten Teil wird die vorher entwickelte Methode nun anhand praxisorientierter Szenarien betrachtet und mit realistischen Kennzahlen validiert. Diese Validierung ermöglicht eine einfachere Übertragung der Methodik in eine industrielle Anwendung bei der Planung, Vergabe und Entstehung einer Produktionsanlage oder gar eines ganzen Produktionssystems.

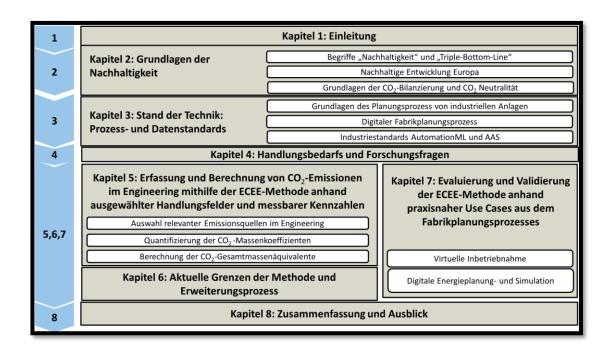


Abbildung 1 Aufbau und Struktur der Thesis

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Thesis dazu beitragen wird, das Konzept der Nachhaltigkeit im Engineering von Produktionsanlagen konkret sichtbar und bewertbar zu machen, indem digitales und durchgängiges Engineering von Produktionsanlagen unter Berücksichtigung neutraler Austauschformate genutzt werden kann. Es wird gezeigt, dass diese Ansätze und Methoden dazu beitragen können, ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Gesellschaftsverantwortung in der Produktionsindustrie zu erreichen.

# 2. Grundlagen der Nachhaltigkeit

Um zunächst ein Grundverständnis über den Nachhaltigkeitsbegriff schaffen zu können, wird in den ersten beiden Kapiteln auf dem Begriff "Nachhaltigkeit" und dem wichtigen "Triple-Bottom-Line Konzept" der Schwerpunkt gelegt. Anschließend fokussiert die Arbeit auf die nachhaltige Entwicklung in Europa und mit ihren ihre Folgen und Grundlagen für die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung. Im abschließenden Kapitel liegt dann der Schwerpunkt auf CO<sub>2</sub>-Neutralität und den Faktoren, welcher zur Emissionsberechnung genutzt werden.

# 2.1. Begriff "Nachhaltigkeit"

Der Begriff "Nachhaltigkeit" hat seinen Ursprung in der Forstwirtschaft: Es soll nur so viel Holz eingeschlagen werden, wie auch nachwachsen kann. Verallgemeinert: vom Ertrag – nicht von der Substanz leben. Mit Blick auf die Gesellschaft bedeutet Nachhaltigkeit, dass jede Generation ihre Aufgaben selbst löst und sie nicht den nachkommenden Generationen aufbürdet. [31]

Der deutsche Duden beschreibt das Wort Nachhaltigkeit als "längere Zeit anhaltende Wirkung" [32]. Erstmals 1713 wurde der Begriff Nachhaltigkeit in diesem Zusammenhang durch Hans Carl von Carlowitz geprägt, der sich dafür aussprach, achtungsvoll mit den vorhandenen Ressourcen im Wald umzugehen [33]. Zu dieser Zeit wurden in Sachsen mehr Bäume gerodet als wieder durch die Natur bereitgestellt werden konnten [33]. Diese Regel des ressourcenschonenden Umgangs kann auf die Ökologie übertragen werden und beschreibt in diesem Sinne, dass nicht mehr konsumiert werden darf als wieder nachgebildet und bereitgestellt werden kann [32].

Ein weiteres Verständnis des Begriffes beschreibt nachhaltiges Handeln so, dass die derzeitigen Bedürfnisse erfüllt werden, ohne die Zukunft der nachfolgenden Generationen zu behindern. Nachhaltigkeit besteht aus drei gleichgestellten Säulen: Soziales, Ökonomie und Ökologie, welche gleichermaßen erfüllt werden müssen. [34]

Hierzu folgt im nächsten Kapitel eine detaillierte Betrachtung.

# 2.2. Triple-Bottom-Line

Der Begriff "Triple-Bottom-Line" wurde von John Elkington, einem Vordenker im Sinne der Nachhaltigkeit, im Jahre 1994 erstmals verwendet [35, pp. 3-4]. Seine Idee war eine ganzheitliche Ausrichtung und eine selbstverständlich vorliegende Bereitschaft zu diesen Themen, die nicht nur durch Auflagen zutage gebracht werden sollte.

Der dahinterstehende Grundgedanke kann jedoch keiner einzelnen Autorin oder keinem einzelnen Autor eindeutig zugesprochen werden, da dieser Ansatz historisch gereift und schon teils in früheren Schriften nachzuweisen ist [36, pp. 5-6]. Triple-Bottom-Line beruht auf dem Gedanken der Ausgewogenheit zwischen der ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension [35, pp. 30-31].

Die soziale Dimension der Nachhaltigkeit bezieht sich auf den Einfluss, den ein Unternehmen oder Projekt auf die Menschen innerhalb und außerhalb der Organisation hat. Dazu gehören Themen wie der Schutz und die Unterstützung der Mitarbeiter, die Einhaltung von Menschenrechten und eine positive Wirkung auf die Gemeinschaften, in denen das Unternehmen tätig ist. Auch die Förderung von Vielfalt und Inklusion sowie die Verantwortung gegenüber Kunden sind wichtige Aspekte der sozialen Nachhaltigkeit. Ein Beispiel für eine erfolgreiche Umsetzung sozialer Nachhaltigkeit wäre das Engagement von Unternehmen für die Verbesserung der Arbeitsbedingungen und die Integration von Arbeitnehmern aus verschiedenen kulturellen Hintergründen. Es geht auch darum, sicherzustellen, dass die Geschäftspraktiken und Produkte ethischen Standards entsprechen und dadurch einen positiven Einfluss auf die Gesellschaft haben.

Die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit bezieht sich auf die finanzielle Leistungsfähigkeit des Unternehmens oder Projekts. Das Ziel sollte nicht allein die Gewinnmaximierung sein, sondern auch die Schaffung von Arbeitsplätzen und die Förderung der regionalen Wirtschaft. Durch verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen kann eine Organisation ihren ökologischen Einfluss reduzieren und finanzielle Stabilität sicherstellen. Ein Beispiel für erfolgreiche ökonomische Nachhaltigkeit ist die Schaffung von Arbeitsplätzen durch die Entwicklung neuer Produkte oder Technologien sowie die Nutzung von erneuerbaren Ressourcen, die die Geschäftsentwicklung fördern, ohne den Planeten zu belasten.

Die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit zielt darauf ab, die Auswirkungen eines Unternehmens oder Projekts auf die Umwelt zu reduzieren. Dies umfasst den Schutz natürlicher Ressourcen, die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, den Einsatz von erneuerbaren Energien und die Schaffung von Kreislaufwirtschaftssystemen. Ein Beispiel für erfolgreiche Umsetzung von ökologischer Nachhaltigkeit ist das Engagement von Unternehmen für die Reduzierung von Abfall und die Einführung von recycelten Materialien in der Produktion. Auch die Unterstützung von Umweltorganisationen oder Förderung von erneuerbaren Energien tragen zur ökologischen Nachhaltigkeit bei.

Vom Triple-Bottom-Line-Ansatz sind viele weitere Modelle abgeleitet. Zu den bekanntesten zählen das Drei-Säulen-Modell, das integrative Modell der Nachhaltigkeit und das Vorrangmodell. Die jeweilige verbreitete Darstellungsweise kann Abbildung 2 entnommen werden.

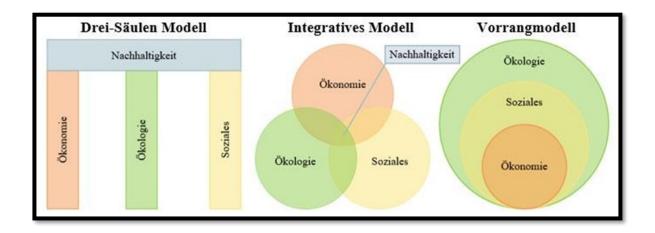


Abbildung 2 Die bekanntesten Modelle des Triple-Bottom-Line-Ansatzes, in Anlehnung an [37, pp. 20-21]

Das Drei-Säulen-Modell legt den Anspruch auf die Gleichgewichtung und Ausgewogenheit der drei Nachhaltigkeitsdimensionen. Das integrative Modell berücksichtigt darüber hinaus die Wechselwirkungen, die in der Schnittmenge der Dimensionen vorzufinden sind. Damit soziale und ökologische Maßnahmen finanziert werden können, bedarf es ökonomischen Erfolg. Dieser ist allerdings nur in einem stabilen sozialen Umfeld möglich, dessen Voraussetzung wiederum eine gesunde Umwelt erfordert.

Der Gegensatz zu den beiden bereits genannten Modellen stellt das Vorrangmodell dar. Hierbei wird keine Gleichgewichtung, sondern eine Voranstellung einer Dimension vorgesehen. Dieser Ansatz wird oftmals im Unternehmenskontext gelebt. In der Regel wird die ökonomische Dimension über die soziale und ökologische Dimension gestellt, da die hauptsächlichen Unternehmensziele, wie Umsatzsteigerung, Sicherung und Vergrößerung des Marktanteils und Kostensenkung, unmittelbar mit dem ökonomischen Aspekt einhergehen. Dementsprechend ergreifen Unternehmen primär dann soziale und ökologische Maßnahmen, wenn sie zugleich die angestrebten ökonomischen Ziele positiv beeinflussen. Im Konfliktfall entscheidet demnach die Ökonomie. Diese Art von Vorrangmodell ist auch als ökonomischer Triple-Bottom-Line-Ansatz bekannt. [37, pp. 20-21, 38, pp. 13-15]

Grundsätzlich wird die Frage der Gleichgewichtung oder Vorrangstellung sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis kontrovers diskutiert. Bei der Beurteilung und Interpretation gilt es demnach auch einen Blick auf die organisationsspezifischen Rahmenbedingungen, z. B. die Branche, zu werfen [39, p. 28].

Das Konzept der Triple Bottom Line nach ibm beschreibt diese drei Säulen als drei Ps, nämlich People (Menschen), Profit (Gewinn) und Planet (Planet).

Es richtet sich an Unternehmen und besagt, dass ein Streben lediglich nach Gewinn nicht ausreichend und nicht langfristig zum gesamtheitlichen Erfolg des Unternehmens beiträgt. Der Planet und die Menschen müssen gleichermaßen berücksichtigt werden und positive Erfolge in diesen Bereichen angestrebt werden. [40]

Nachhaltigkeit				
<u>"Planet"</u>	"Profit"	<u>"People"</u>		
Negative Auswirkungen auf ökologische Systeme und die natürliche Umwelt sollen so gering wie möglich sein, das Handeln soll dennoch maximalen Nutzen bringen.	Profit kann auch mit "Wohlstand" gleichgesetzt werden und bezeichnet den gesamtwirtschaftlichen Nutzen durch ein Unternehmen. Nicht nur typische betriebswirtschaftliche Kennzahlen wie Gewinn sollen maximiert werden, auch die Wirkungen des Unternehmens auf die Volkswirtschaft (wie beispielweise die Schaffung von Arbeitsplätzen) werden betrachtet.	Nachhaltiges Handeln im Bereich People schafft positive Auswirkungen auf Menschen, besonders die Stakeholder des Unternehmens inklusive nachfolgender Generationen.		

Tabelle 1 Die Grundaspekte der Nachhaltigkeit in Bezug auf Unternehmen (selbst erstellt, Quelle Inhalt: [40] )

Nachhaltigkeit in Unternehmen trägt aus den drei Blickwinkeln Planet, People und Profit zu einer zukunftsfähigen Entwicklung intern und extern bei. Nachhaltige Handlungen von Unternehmen erfreuen sich wachsender Beliebtheit bei Kund/innen und Investor/innen. Die Hälfte der Verbraucher/innen ist bereit, für nachhaltige Produkte oder Marken mehr zu zahlen. Gesetze zur Förderung von Umwelt- und Sozialverträglichkeit, wie die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), werden weltweit forciert. [40]

Zusammenfassend können alle drei Säulen der Nachhaltigkeit Handlungsempfehlungen und Methoden zum Aufbau von umweltbewussten Unternehmen liefern. Eine Balance zwischen sozialer, ökonomischer und ökologischer Nachhaltigkeit ist für das langfristige Wachstum und Überleben eines Unternehmens entscheidend. Eine Verletzung einer oder mehrerer der Säulen kann zu einem Verlust des Vertrauens und Unterstützung von Kunden und Geschäftspartner führen. Unternehmen und Organisationen sollten sich daher auf das Erreichen einer nachhaltigen und ausgewogenen Triple-Bottom-Line-Lösung konzentrieren, die den Ansprüchen und Bedürfnissen der Gesellschaft entspricht.

# 2.3. Ganzheitliche nachhaltige Entwicklung in Europa

Die Europäische Union (EU) hat sich der Förderung nachhaltiger Entwicklung verschrieben, indem sie eine umfassende Strategie zur Integration von Nachhaltigkeitszielen in ihre politischen Prozesse und Praktiken implementiert. Diese EU Nachhaltigkeitsziele sind eng an die globalen Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs) der Agenda 2030 der Vereinten Nationen angelehnt. Das im vorangegangenen Kapitel dargelegte Triple-Bottom-Line-Konzept (TBL) liefert ein Gerüst, Nachhaltigkeit entlang der drei Säulen Ökonomie, Ökologie und Soziales zu bewerten.

Die Agenda 2030 der Vereinten Nationen und die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs) bieten einen globalen Rahmen für Nachhaltigkeit, den die EU in ihren eigenen Nachhaltigkeitsbestrebungen reflektiert und unterstützt. Die SDGs sind in ihrer Natur interdisziplinär und umfassen ökonomische, ökologische und soziale Aspekte, was sie mit dem Triple-Bottom-Line-Ansatz kompatibel macht. [41]

#### Integration der SDGs in die EU-Politik

Die EU hat die SDGs in ihre Politikgestaltung integriert, damit eine nachhaltige Entwicklung sowohl innerhalb der Mitgliedstaaten als auch in ihrer Außenpolitik gefördert werden kann. Dies geschieht durch: [42]

- Politische Ausrichtung: Die EU richtet ihre Politikbereiche und Gesetzgebungsakte an den SDGs aus, sodass nachhaltige Lösungen in Bereichen wie Klimaschutz, Energie, Landwirtschaft und soziale Gerechtigkeit gefördert werden.
- **Finanzierung und Investitionen**: Die EU nutzt finanzielle Instrumente, Investitionen in nachhaltige Projekte zu lenken, die zur Erreichung der SDGs beitragen.
- Förderung von Partnerschaften: Die EU baut Partnerschaften mit Ländern außerhalb der EU-Grenzen auf, damit die SDGs weltweit vorangetrieben und gemeinsame Herausforderungen angegangen werden.

Die EU hat sich durch verschiedene Politiken und Initiativen, wie den Europäischen "Green Deal" und die Strategie "Europa 2020", zu den Nachhaltigkeitszielen bekannt. Diese Ziele umfassen:

- **Bekämpfung des Klimawandels**: Reduzierung der Treibhausgasemissionen, Förderung erneuerbarer Energien und Verbesserung der Energieeffizienz.
- Schutz natürlicher Ressourcen: Nachhaltige Nutzung von Ressourcen, Reduzierung der Umweltverschmutzung und Schutz der Meere und Ozeane.
- **Förderung sozialer Inklusion**: Verringerung von Armut und sozialer Ausgrenzung, Bereitstellung von Bildung und Ausbildung sowie Förderung von Gleichstellung und Diversität. [43]

#### Triple-Bottom-Line und SDGs als komplementäre Ansätze

Während die SDGs einen umfassenden Satz von Zielen darstellen, bietet der TBL-Ansatz ein dreidimensionales Modell zur Messung und Berichterstattung von Nachhaltigkeit. Ihre Verknüpfung ermöglicht.

- Harmonisierte Messung: Durch die Anwendung von TBL-Prinzipien können Unternehmen und Organisationen ihre Beiträge zu den SDGs quantifizieren und ihre Auswirkungen in einem breiteren Kontext verstehen.
- Strategische Ausrichtung: Organisationen können ihre Strategien an den SDGs ausrichten und mit TBL als Leitfaden eine Balance zwischen Profitabilität und nachhaltiger Entwicklung erreichen.
- **Transparente Kommunikation**: TBL bietet eine Struktur für Unternehmen, mit dem Ziel, transparent über ihre Nachhaltigkeitsleistungen zu berichten, was wiederum die Glaubwürdigkeit und das öffentliche Vertrauen stärkt.

Die Verbindung der EU-Nachhaltigkeitsziele mit dem Triple-Bottom-Line-Ansatz bietet einen ganzheitlichen Rahmen für nachhaltiges Handeln. Zugleich setzt die EU mit ihrem Engagement für Nachhaltigkeit und durch die Förderung des TBL-Ansatzes ein starkes Zeichen für eine umfassende und nachhaltige Entwicklung in Europa und darüber hinaus.

Die Nachhaltigkeitsziele der EU und die Agenda 2030 der Vereinten Nationen unterstreichen die Dringlichkeit, den Klimawandel zu bekämpfen und die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Ein entscheidendes Instrument zur Erreichung dieser Ziele ist die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung, welche die Messung und Analyse von Treibhausgasemissionen ermöglicht. Das Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) stellt dabei den weltweit am meisten genutzten Standard für die Erfassung und das Management von Treibhausgasemissionen dar und bildet somit die methodische Grundlage für transparente und vergleichbare CO<sub>2</sub>-Bilanzen.

# 2.4. Grundlagen der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung

Dieses Unterkapitel vermittelt einen Überblick über die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung, wobei zunächst die CO<sub>2</sub>-Bilanz definiert und deren Bedeutung erläutert wird. Anschließend erfolgt ein Einblick in das Greenhouse Gas Protocol und die Differenzierung zwischen Corporate Carbon Footprint und Product Carbon Footprint. Eine Erläuterung der Emissionsfaktoren erfolgt abschließend.

#### **Definition CO<sub>2</sub>-Bilanz**

Die CO<sub>2</sub>-Bilanz, häufig auch als "Carbon Footprint" bezeichnet, umfasst den Ist-Zustand aller Emissionen, die sowohl direkt als auch indirekt von einem Bilanzierungsobjekt, wie Anlagen, Unternehmen, Produkte, Dienstleistungen und Supply Chains, verursacht werden. [44, p. 32] Wiedmann und Minx definieren die CO<sub>2</sub>-Bilanz als "a measure of the exclusive total amount of carbon dioxide emissions that is directly and indirectly caused by an activity or is accumulated over the life stages of a product" [45, p. 4].

Gemäß der Wortbedeutung und der Definition nach Wiedmann und Minx umfasst die CO<sub>2</sub>-Bilanz ausschließlich das Treibhausgas CO<sub>2</sub> [46, p. 1]. Jedoch werden in der betrieblichen Praxis und im sprachlichen Gebrauch je nach Bedarf auch die im Rahmen des Kyoto-Protokolls von 1997 definierten Treibhausgase Methan (CH4), Distickstoffoxid (N2O), Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC) und Schwefelhexafluorid (SF6) in die CO<sub>2</sub>-Bilanz miteinbezogen [47, p. 22]. Im Rahmen dieser Arbeit umfasst die CO<sub>2</sub>-Bilanz alle im Kyoto-Protokoll definierten Treibhausgase.

#### Bedeutung der CO<sub>2</sub>-Bilanz

Die CO<sub>2</sub>-Bilanz dient als Identifizierungshilfe wesentlicher Emissionsquellen und zeigt Bereiche auf, in denen großes Potential für Einsparungs- und Effizienzmaßnahmen liegen. [48, pp. 21-24] Somit steigert die CO<sub>2</sub>-Bilanz die Energieeffizienz und mindert Material- und Rohstoffkosten, wodurch die gesamten Betriebskosten nachhaltig gesenkt werden können. Zudem fördert die CO<sub>2</sub>-Bilanz Innovationen, da zur Erreichung einer erhöhten Energieeffizienz kontinuierliche technologische Weiterentwicklungen erforderlich sind. [49, pp. 9-10]

Die Verbesserung der CO2-Bilanz durch eine erhöhte Energieeffizienz trägt direkt zum Umweltschutz und zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen bei, was der ökologischen Säule der Nachhaltigkeit entspricht. Durch die Senkung der Material- und Rohstoffkosten sowie der Betriebskosten insgesamt, werden die wirtschaftlichen Aspekte positiv beeinflusst, was der ökonomischen Säule der Nachhaltigkeit zuzuordnen ist.

Die Förderung von Innovationen zur Steigerung der Energieeffizienz kann langfristig auch soziale Auswirkungen haben, beispielsweise durch die Schaffung von "grünen" Arbeitsplätzen.

Somit wird indirekt auch die soziale Säule der Nachhaltigkeit berücksichtigt. Durch die Verknüpfung von Umweltschutz, wirtschaftlicher Effizienz und sozialen Aspekten wird ein ganzheitlicher Ansatz der Nachhaltigkeit deutlich.

Darüber hinaus achten Kunden verstärkt auf umweltgerechte Produkte und beziehen Nachhaltigkeitsaspekte in ihre Kaufentscheidung mit ein. Die Veröffentlichung der CO<sub>2</sub>-Bilanz im Rahmen des Nachhaltigkeitsberichts (Corporate Social Responsibility Report) schafft Transparenz und Vertrauen verschiedener Stakeholdergruppen, z.B. Kunden oder Investoren. Dadurch generiert ein innovatives und nachhaltiges Unternehmen ein "grünes Image", was zu Wettbewerbsvorteilen durch Differenzierung am Markt und einer Steigerung des Unternehmenswerts führen kann. [50, p. 1]

Die CO<sub>2</sub>-Bilanz dient somit als wichtiges Entscheidungskriterium für Kunden aber auch Investoren, da hohe Emissionen als Investitionsrisiko wahrgenommen werden. [51, p. 2]

#### **Greenhouse Gas Protocol**

International existiert eine Vielzahl an Standards zur CO<sub>2</sub>-Bilanzierung, die eine Vergleichbarkeit der CO<sub>2</sub>-Bilanzen ermöglichen. Die gängigsten Standards zur CO<sub>2</sub>-Bilanzierung sind das GHG-Protokoll [52], die ISO-Norm 14064-1 [53] und der PAS 2050-Standard [54]. Daneben gibt es weitere Methoden wie den Bilan Carbone, den Ecological Footprint und die Science Based Targets Initiative (SBTi), die sich teilweise auf spezifische Aspekte wie die Lieferkette oder wissenschaftsbasierte Ziele fokussieren. [55]

Das GHG-Protokoll ist der umfassendste und international anerkannteste Standard zur Treibhausgasbilanzierung, da er detaillierte Vorgaben für die Erfassung und Berichterstattung auf Organisations-, Produkt- und Wertschöpfungsketten-Ebene bietet [55]. Im Vergleich dazu sind die ISO-Norm 14064-1 und der PAS 2050-Standard spezifischer auf die Organisationsbzw. Produktebene ausgerichtet und weniger detailliert in ihren Vorgaben. Das GHG-Protokoll hat sich daher als Industriestandard etabliert und wird von den meisten Unternehmen als Referenz genutzt. [55]

Ziel des GHG-Protokolls ist es international akzeptierte Standards und Tools zur Bilanzierung von Treibhausgasemissionen zu entwickeln mit dem Ziel eine weltweit emissionsarme Wirtschaft zu erreichen. [56, p. 4] Im Rahmen des GHG-Protokolls werden alle im Kyoto-Protokoll definierten Treibhausgase berücksichtigt. Das GHG-Protokoll erfasst die Emissionen aller Unternehmensbereiche und gliedert diese in unterschiedliche Kategorien (Scopes), wie in Abbildung 3 sehr anschaulich zusammengefasst.

**Scope 1** Emissionen sind die direkten Treibhausgasemissionen, die von Quellen stammen, die sich im Besitz oder unter der Kontrolle des Unternehmens befinden. Dazu zählen zum Beispiel Emissionen aus der Verbrennung von Brennstoffen in stationären Anlagen wie Heizungen oder aus der Nutzung von Firmenwagen und anderen betriebseigenen Fahrzeugen. Auch Emissionen aus industriellen Prozessen, die im Unternehmen stattfinden, fallen unter Scope 1. [56, p. 28]

**Scope 2** Emissionen sind indirekte Emissionen, die durch den Konsum von eingekaufter Energie wie Strom, Wärme oder Dampf entstehen. Diese Emissionen finden also nicht direkt im Unternehmen statt, sondern bei den Energieversorgern, die diese Energie erzeugen. Scope 2 Emissionen können somit durch den Wechsel zu Ökostrom oder die Nutzung erneuerbarer Energien im Unternehmen reduziert werden. [57, p. 34]

**Scope 3** Emissionen sind alle anderen indirekten Treibhausgasemissionen, die in der Wertschöpfungskette des Unternehmens auftreten, aber nicht unter Scope 2 fallen. Dazu gehören zum Beispiel Emissionen, die bei der Herstellung eingekaufter Güter und Dienstleistungen, bei Geschäftsreisen der Mitarbeiter oder bei der Entsorgung von Produkten entstehen. Diese Scope 3 Emissionen können oft einen großen Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen eines Unternehmens ausmachen. [56, p. 27]

Die Unterscheidung in diese drei Scope-Kategorien ermöglicht es Unternehmen, ihre Emissionen größtenteils zu erfassen und geeignete Maßnahmen zur Reduzierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu identifizieren

Die Scope 1- und Scope 2-Emissionen müssen verpflichtend erfasst werden, wobei die Erfassung der Scope 3- Emissionen optional ist. [51, p. 3]

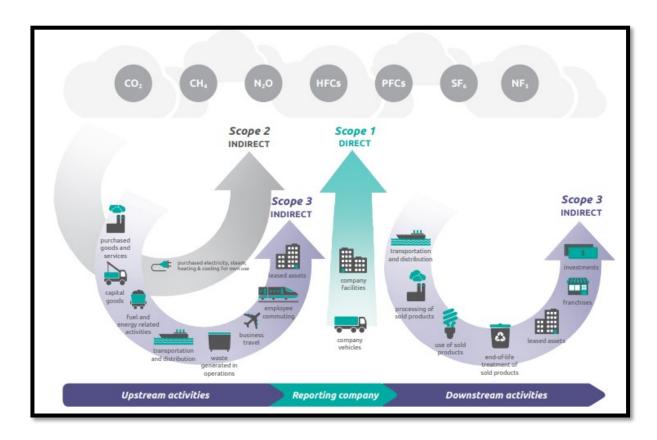


Abbildung 3: Überblick über die Scopes der Emissionen gemäß dem GHG-Protokoll [56]

Neben der Unterscheidung in Scope 1, 2 und 3 Emissionen kennt das GHG-Protokoll auch die Konzepte des Corporate Carbon Footprints und des Product Carbon Footprints.

Der Corporate Carbon Footprint erfasst die gesamten Treibhausgasemissionen, die einer Organisation über ihre Wertschöpfungskette hinweg zuzurechnen sind. Der Product Carbon Footprint hingegen betrachtet die Treibhausgasemissionen, die über den gesamten Lebenszyklus eines bestimmten Produkts oder einer Dienstleistung entstehen - von der Rohstoffgewinnung über die Produktion bis hin zur Nutzung und Entsorgung.

Während der Corporate Carbon Footprint das Emissionsprofil eines gesamten Unternehmens abbildet, ermöglicht der Product Carbon Footprint eine detailliertere Analyse und Optimierung der Umweltauswirkungen einzelner Produkte.

#### **Corporate Carbon Footprint**

Bei der Erstellung der CO<sub>2</sub>-Bilanz für ein gesamtes Unternehmen, auch Corporate Carbon Footprint (CCF) genannt, sind zunächst die organisatorischen und operativen Systemgrenzen festzulegen, d.h. es ist sicherzustellen, dass alle relevanten Geschäftstätigkeiten erfasst werden und keine bedeutenden Emissionsquellen außerhalb der definierten Bilanzgrenzen liegen. [48, pp. 25-26]

Innerhalb der organisatorischen Systemgrenzen ist festzulegen welche Unternehmensstandorte und deren entsprechende CO<sub>2</sub>-Emissionen in der CO<sub>2</sub>-Bilanz erfasst werden sollen. Innerhalb der operativen Systemgrenzen sind alle direkten und indirekten Emissionen resultierend aus den Aktivitäten und Prozessen eines Unternehmens zu erfassen. [58, pp. 17-18]

## **Product Carbon Footprint**

Die CO<sub>2</sub>-Bilanz eines Produktes, auch Product Carbon Footrpint (PCF) genannt, gibt die gesamten Emissionen an, die während des Produktlebenszyklus entstehen. [11, p. 149] Dabei werden bei der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung des PCFs drei Ansätze unterschieden, die in Abbildung 4 visualisiert sind.

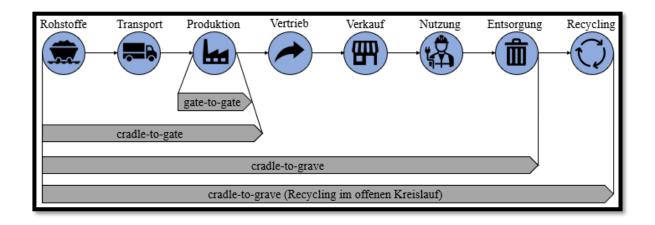


Abbildung 4 Überblick über die Bilanzierungsansätze des Product Carbon Footprints nach [59] und [44]

Der **gate-to-gate** Ansatz bilanziert alle direkten Emissionen, die während des Produktionsprozesses enstehen. [44, p. 34]

Der **cradle-to-gate** Ansatz umfasst alle Emissionen, die in den vorgelagerten Prozessen der Wertschöpfungskette und während des Produktionsprozesses entstehen. [44, p. 34]

Im **cradle-to-grave** Ansatz werden die Emissionen, die über die gesamte Wertschöpfungskette entstehen, erfasst, einschließlich der Emissionen der nachgelagerten Prozesse, wie Verkauf, Nutzung und Entsorgung. Die Emissionen, die durch das Recycling des Produkts entstehen, können ebenfalls betrachtet werden. [59, p. 13]

### **LECO-Kennzahl**

Die LECO-Kennzahl (Life Cycle Engineering Carbon Optimization) ist ein wichtiges Instrument, um die Umweltauswirkungen von Engineeringprojekten ganzheitlich zu erfassen und zu bewerten. Sie setzt die im Rahmen des Engineerings entstehenden CO2-Emissionen ins Verhältnis zu den Gesamtemissionen über den gesamten Lebenszyklus des Produkts oder der Anlage. [60]

$$LECO = \frac{CO_2\text{-Emissionen Engineering}}{CO_2\text{-Emissionen Lebenszyklus}} \times 100$$

Durch diese Kennzahl wird deutlich, wie relevant die Optimierung des Engineering-Prozesses für die Minimierung der Umweltbelastungen ist. Je niedriger der LECO-Wert, desto größer ist der Hebel, den Engineeringmaßnahmen auf die Gesamtemissionen haben.

Mithilfe der LECO-Kennzahl lassen sich wichtige Erkenntnisse gewinnen, die Ingenieurleistungen zielgerichtet auf Nachhaltigkeit auszurichten und die bedeutendsten Hebel für Emissionsreduktionen zu ermitteln. Sie ist daher ein zentraler Bestandteil des ganzheitlichen Ansatzes zur Bewertung und Optimierung der Umweltauswirkungen von Engineeringprojekten. [60]

#### Zusammenfassung

Die Erstellung der CO<sub>2</sub>-Bilanz ist eine komplexe Aufgabe, bei der viele verschiedene Faktoren berücksichtigt werden müssen. Mit der 2024 in Kraft tretenden Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) der Europäischen Union wird die Berichterstattung zu Nachhaltigkeitsthemen für Unternehmen jedoch verpflichtend [61]. Die neue Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) der Europäischen Union wird ab dem Geschäftsjahr 2024 schrittweise in Kraft treten und Unternehmen unterschiedlicher Größen betreffen [62]:

- Ab 2024 müssen alle börsennotierten Unternehmen (außer KMUs) ihre Nachhaltigkeitsleistung nach CSRD-Vorgaben berichten.
- Ab 2025 erweitert sich die Berichtspflicht auf alle großen Unternehmen mit mehr als 250 Mitarbeitern und 40 Millionen Euro Umsatz oder 20 Millionen Euro Bilanzsumme.
- Ab 2026 werden auch mittelgroße Unternehmen in die CSRD-Berichterstattung einbezogen. [62]

Dazu gehört auch die Offenlegung von Treibhausgasemissionen nach den Vorgaben des GHG-Protokolls. Die CSRD baut dabei direkt auf den bewährten Standards und Methoden des GHG-Protokolls auf. Unternehmen müssen künftig ihre Scope 1, 2 und 3 Emissionen umfassend erfassen und in ihren Nachhaltigkeitsberichten transparent darlegen. [63]

Dies schafft mehr Vergleichbarkeit und Verlässlichkeit bei der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung über Unternehmensgrenzen hinweg. Durch die Verknüpfung von gesetzlicher Berichtspflicht und etabliertem GHG-Protokoll erhalten Unternehmen einen klaren Rahmen, zu dem Zweck, ihre Treibhausgasemissionen systematisch zu managen und Fortschritte bei der Dekarbonisierung ihrer Geschäftstätigkeit nachzuweisen.

# 2.5. CO<sub>2</sub>-Neutralität und Emissionsfaktoren

Da keine gesetzlich verbindliche Definition der Ausdrücke "CO<sub>2</sub>-frei" und "CO<sub>2</sub>-neutral" festgelegt ist, müssen diese Formulierungen in Hinblick auf die BMW Group definiert werden. Beide Begriffe betrachten den Ausstoß von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Im Gegensatz dazu steht der Begriff "klimaneutral", bei welchem alle Emissionen miteinbezogen werden. Generell kann gesagt werden, dass der Ausdruck "neutral" implizieren kann, dass Emissionen verursacht werden. Diese werden jedoch angemessen ausgeglichen, damit die Bilanz null ergibt.

Bei der Bezeichnung "CO<sub>2</sub>-frei" wird über den gesamten betrachteten Prozess kein Kohlenstoffdioxid ausgestoßen. So wäre die Stromproduktion mittels PV-Anlage CO<sub>2</sub>-frei. Biomasse und Biogas gelten als CO<sub>2</sub>-neutral, da als Bilanz genau so viel Kohlenstoffdioxid bei der Verbrennung frei wird, wie die Pflanzen über ihren Lebenszyklus aufgenommen haben. [64] Eine Zusammenfassung und Erklärung der Begriffe ist in Tabelle 2 zu sehen.

Klimaneutral	CO2-Neutral (Net zero)	CO2-Frei
Fokus auf <b>alle</b> Emissionen.	Fokus auf CO2.	Fokus auf CO2.
Emissions-Fußabdruck wird gemessen/berechnet, reduziert und ausgeglic hen.	Es wird kein zusätzliches CO2 emittiert bzw. CO2-Emissionen werden vollständig kompensiert. Dies bedeutet, dass CO2-Emissionen so kompensiert sein können, dass netto kein CO2 der Atmosphäre zugeführt wird, weil anderswo oder zu einer anderen Zeit CO2 absorbiert wird.	Produkte/Dienstleistungen/Unternehmen deren Herstellung/Arbeitsvorgang <b>keine CO2</b> - Emissionen <b>verursacht</b> .
Beispiel: In der Produktion fallen Emissionen wie z.B. CO2, Methan oder Lachgas an. Um das Produkt als "klimaneutral" verkaufen zu dürfen, müssen die berechneten Emissionen reduziert und der Rest kompensiert werden.	Beispiel: Bei der Verbrennung von Biomasse/Biogas wird soviel Kohlenstoff freigesetzt, wie die Pflanzen vorher aufgenommen haben, daher gilt Biomasse/Biogas als CO2 neutral.	Beispiel: PV, Wind, Geothermie setzen im Betrieb <b>keine CO2</b> Emissionen <b>frei.</b> In diesem Fall spricht man von CO2 frei.

Tabelle 2 Begriffsdefinitionen klimaneutral, CO2-frei, CO2-neutral [Quelle: eigen]

CO<sub>2</sub>-Emissionen stellen die freigesetzte Menge an CO<sub>2</sub> dar. Mit CO<sub>2</sub>-Äquivalenten können die Emissionen verschiedener Treibhausgasemissionen verglichen werden. Diese Methode wird detailliert in folgenden Abschnitt Emissionsfaktoren beschrieben. [65]

#### **Emissionsfaktoren**

Allgemein definiert, quantifiziert ein Emissionsfaktor die Treibhausgasemissionen, die infolge einer Aktivität oder eines Prozesses durch den Einsatz einer definierten Menge eines Energieträgers in die Atmosphäre emittiert werden. [66] Da die verschiedenen Treibhausgase unterschiedliche Verweilzeiten in der Atmosphäre vorweisen und unterschiedlich stark auf den Treibhauseffekt einwirken, werden sie auf das Global Warming Potential (GWP) ungerechnet, dessen Einheit CO<sub>2</sub>-Äquivalent (CO<sub>2</sub>e) ist. Dadurch kann die Wirkung der einzelnen Treibhausgase auf den Klimawandel zusammengefasst und verglichen werden. [67]

Die Werteeinheit der CO<sub>2</sub>-Bilanz ist somit CO<sub>2</sub>e im Gegenteil zu monetären Werteeinheiten wie in buchhalterischen Bilanzen. [44, p. 34] Das GWP normiert die Wirkung der Treibhausgase innerhalb eines festgelegten Zeitraums bezogen auf die Wirkung von CO<sub>2</sub>.

CO<sub>2</sub> erhält den Wert 1 und den anderen Treibhausgasen wird ein entsprechendes Äquivalent zugeordnet. Bei der Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Äquivalenten muss neben der Verweilzeit der Treibhausgase in der Atmosphäre auch die Konzentration der jeweiligen Treibhausgase, die sich bereits in der Atmosphäre befinden, berücksichtigt werden. [67]

Tabelle 3 verschafft einen Überblick über die CO<sub>2</sub>-Äquivalente der im Kyoto-Protokoll definierten Treibhausgase, wobei ein Bezugszeitraum von 100 Jahren angenommen wird. [68, pp. 731-737] Durch die Umrechnung der Treibhausgase in CO<sub>2</sub>e kann die Wirkung nahezu jedes Prozesses, Produkts oder Aktivität auf den Treibhauseffekt berechnet werden.

Treibhausgas	Verweilzeit in der Atmosphäre in Jahren	GWP in CO₂e bezogen auf 100 Jahre
Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> )	> 100.000[69]	1
Methan (CH₄)	12,4	28
Distickstoffoxid (N₂O)	121	265
Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC)	0,4 – 242	4 – 12.400
Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC)	2.000 – 50.000	6.630 – 11.100
Schwefelhexafluorid (SF <sub>6</sub> )	3.200	23.500

Tabelle 3 Emissionsfaktoren der im Kyoto-Protokoll definierten Treibhausgase mit einem Bezugszeitraum von 100 Jahren gemäß Myhre et al. [68]und Ergänzung der Verweilzeit von CO₂ gemäß dem Umweltbundesamt [69]

## 3. Stand der Technik: Prozess- und Datenstandards

# 3.1. Grundlagen des Planungsprozess von industriellen Anlagen

Die Planung von industriellen Anlagen ist ein sehr komplexer Ablauf zwischen sehr vielen unterschiedlichen Berufsgruppen. Eine sehr gute Zusammenarbeit dieser verschiedenen Gewerke und Bereiche ist die wichtigste Grundlage des Planungsprozesses.

Aufgrund dieser Zusammenarbeit und der zunehmenden Arbeitsteilung wurde der Planungsprozess in separate Phasen unterteilt. Die Anordnung der einzelnen Phasen am Beispiel der Automobilindustrie lässt sich wie in Abbildung 5 darstellen.



Abbildung 5 Klassische Prozesskette im Planungsprozess von Anlagen in der Automobilindustrie [70]

In den gelb gekennzeichneten Überschriften sind die groben Planungsphasen dargestellt und die jeweiligen Prozesse der Phase sind darunter aufgelistet. Neu entwickelte Werkzeuge verbessern diese Prozesse und Planungsphasen aufgrund fortschreitender Technologien. Diese neuen leistungsfähigen Werkzeuge lassen jedoch auch den Anreicherungsgrad der gesammelten Daten immer weiter steigen. All diese Daten sowohl zur Anlage als auch zum Produkt sollten dann jederzeit verfügbar und nutzbar sein.

Am Anfang des Planungsprozesses sind topologische Gruppierungen und Zusammenhänge von Anlagenkomponenten sehr wichtig. Hierzu zählen Eigenschaften, Schnittstellen, Anforderungen und Beschreibungen von den einzelnen Komponenten. Zum Beispiel ist es wichtig, die räumliche Anordnung und Verbindungen zwischen Förderbändern, Montagestationen, Lagerbereichen und Prüfständen zu definieren. Ebenso müssen Schnittstellen wie die Stromversorgung, Druckluft und Datenleitungen berücksichtigt werden. Weitere Beschreibungen umfassen die Leistungsparameter, Abmessungen und Gewichte der einzelnen Komponenten.

Darüber hinaus sind die spezifischen Anforderungen an die Produktionsanlage, wie Taktzeiten, Durchsatzmengen und Qualitätsstandards, zu definieren. Diese Informationen bilden die Grundlage für den detaillierten Planungsprozess.

Geometrische und kinematische Informationen werden zur Konstruktion von Komponenten verwendet. Aber auch komplette Fabrikhallen mit fixen Einrichtungen wie Wänden und Pfeilern, sowie das Produkt selbst müssen dargestellt werden. Die einzelnen Komponenten verfügen über ungesteuertes Verhalten, das mit Zustandsdiagrammen beschrieben werden kann. Zusätzlich werden Sequenzbeschreibungen verwendet, damit Prozessinformationen und kinematische Prozesse dargestellt werden können. [71]

Damit eine durchgängige Qualitätsabsicherung, wie durch eine virtuelle Inbetriebnahme oder weitere Simulationen, garantiert werden kann, ist eine durchgehende Konsistenz der Anlagendaten notwendig. Diese stetige Datenqualität ist jedoch aufgrund der Inkompatibilität der verschiedenen Werkzeuge nicht möglich. Damit der Planungsprozess als effizient angesehen werden kann, ist allerdings diese durchgehende Datenkonsistenz essenziell. Nur so kann eine vollständig digitale Anlage und eine durchgängige digitale Engineering Prozesskette erreicht werden. Wenn dieses Ziel letztendlich erreicht wird, steht einer komplett PC-gesteuerten Planung von Produktionsanlagen nichts mehr im Weg. Der gesamte geometrische, elektrische und mechanische Aufbau und Ablauf könnten so exakt geplant, simuliert und in Betrieb genommen werden. So können die kurzen Entwicklungszyklen von weniger als fünf Jahren vom Beginn der Produktentwicklung bis zur Serienfertigung eingehalten werden [71].

In der bisher erfassten Literatur sind eine Vielzahl an Ansätzen zur Untergliederung des Fabrikplanungsprozesses in einzelne Phasen zu finden. [72] Die Planungsphasen sind nicht standardisiert, da jedes Unternehmen spezifische Anforderungen, Organisationsstrukturen und Verfahrensabläufe vorweist. Lüder und Schmidt unterteilen das Engineering in fünf Phasen, s. Abbildung 6.

Die einzelnen Phasen des Engineerings werden dabei sequenziell durchlaufen und bauen aufeinander auf. [73, 218 ff.] Zwar beziehen sie den Entwicklungsprozess auf das Engineering von Produktionssystemen, im Sinne dieser Arbeit kann dieser jedoch auf das Engineering von Produktionsanlagen übertragen werden. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen näher erläutert:

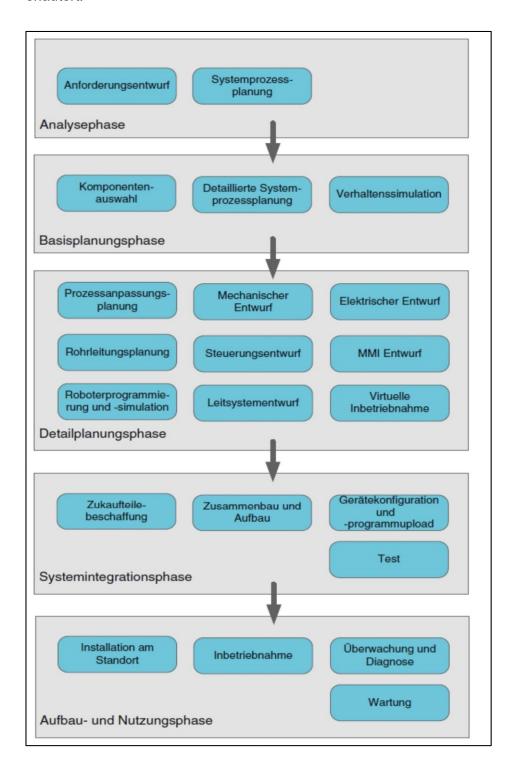


Abbildung 6 Fabrikplanungsprozess über 5 Phasen [6]

Innerhalb der **Analysephase** analysiert die Machbarkeitsstudie betriebswirtschaftliche und marktwirtschaftliche Rahmenbedingungen und deren Auswirkungen auf das Unternehmen und untersucht die Rentabilität des Anlagenprojekts, den optimalen Ressourceneinsatz und die Auswirkung auf die Stärkung der Ertragskraft des Unternehmens und dient somit als Entscheidungshilfe für die Geschäftsleitung. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse setzt den Ertrag mit den dafür eingesetzten Mitteln in Relation. Dies gibt an, ob das Anlagenprojekt realisierbar, effizient und wirtschaftlich ist.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse dient dazu, mehrere gleichwertige funktionale Alternativen gegenüberzustellen und zu bewerten. [74, 145 ff.] Anhand des Vergleichs der Analyseergebnisse wird die optimale Investitionsentscheidung getroffen.[75, 65 ff.] Darüber hinaus müssen Anforderungen wie rechtliche Rahmenbedingungen, ökonomische Forderungen und Umweltschutzstandards berücksichtigt werden [73, 218 ff.].

Im Anforderungsentwurf erfolgt die Sammlung, Klassifizierung und Beschreibung aller detaillierter *Anforderungen* an die zu entwerfende Anlage, ausgehend von dem zu produzierenden Produkt und die dafür notwendigen Produktionsprozesse gemäß dem Konzept des *Simultaneous Engineerings*. Die Systemprozessplanung beschreibt alle Prozesse inklusive Herstellungs- und Unterstützungsprozesse. Das Ergebnis der Analysephase beinhaltet das fertige Planungskonzept sowie eine detaillierte Prozessbeschreibung und die den einzelnen Prozessen zugeordneten Anforderungen. [73, 218 ff.]

Basierend auf den Vorplanungen der Analysephase, wird in der **Basisplanungsphase** die Anlagengrobplanung erstellt. Die *Komponenten*, die die technischen Mittel darstellen, die zur Ausführung der einzelnen Prozesse notwendig sind, werden ausgewählt. Ausgehend davon und auf Basis der Zielgrößen für Produktionsmenge und –qualität erfolgt die detaillierte Systemprozessplanung. Die Verhaltenssimulation dient zur Validierung der ökonomischen Anforderungen an die Produktionsanlage, da hier die Prozesse auf den technischen Mitteln simuliert werden. Das Ergebnis dieser Planungsphase bildet die Beschreibung aller notwendigen Produktionsressourcen und die detaillierte Prozessspezifikation.Diese Spezifikationen hält der Auftraggeber in einem *Lastenheft* für den Auftragnehmer fest.[76, p. 5]

In der **Detailplanungsphase** wird der detaillierte Entwurf der Produktionsanlage erstellt. Alle Realisierungsdetails und Planungsunterlagen, die für den Aufbau und die Inbetriebnahme der Anlage notwendig sind, werden hier entwickelt. Bestandteil dieser Phase ist der mechanische Entwurf, bei dem die zur Ausführung des Produktionsprozesses notwendigen mechanischen Komponenten einschließlich Sensoren und Aktoren ausgewählt und in der Anlage positioniert werden.

Innerhalb des elektrischen Entwurfs wird das elektrische System der Produktionsanlage, das das Kommunikationssystem und die elektrische Verkabelung umfasst, entworfen. Die Rohrleitungsplanung detailliert das Rohrleitungssystem und -anschlüsse.

Ziel des Steuerungsentwurfs ist es den Steuerungsprogrammcode für die *SPS* sicherzustellen und zu implementieren, um einen sicheren, effizienten und optimierten Prozessablauf zu gewährleisten. Die Roboterprogrammierung und -simulation validiert durch eine *Simulation* das Bewegungsverhalten der Roboter durch den zuvor erstellten Robotersteuerungscode. Die Planung des *HMI* einschließlich der Erstellung des Programmcodes für die notwendigen Gerätetechnik erfolgt im HMI-Entwurf.

Parallel zu den Aktivitäten in der Detailplanungsphase erfolgt die Prozessanpassungsphase, bei der Anpassungen an die sich ändernden Anforderungen an die Produktionsanlage, die sich während der vorhergehenden Aktivitäten ergeben, vorgenommen werden. Abschließend werden mit Hilfe der VIBN durch eine Simulation die *Schnittstellen* und der Steuerungscode überprüft. Näheres zur VIBN findet sich im Kapitel 3.2.3 "Virtuelle Inbetriebnahme".

Am Ende der Detailplanungsphase muss die Planung soweit abgeschlossen sein, dass keine Änderungen mehr vorgenommen werden müssen.[73, 218 ff.] Die aus dieser Phase resultierenden Spezifikationen müssen für den Anlagenlieferanten in einem *Pflichtenheft* festgehalten werden [76, p. 6].

Die **Systemintegrationsphase** erfolgt auf dem Gelände des Auftragnehmers. Hier wird die Anlage komponentenweise basierend auf den in der Detailplanungsphase erarbeiteten Unterlagen installiert. Die Beschaffung aller notwendigen technischen Mittel sowie der Aufund Zusammenbau der einzelnen Komponenten erfolgt. Der Programmcode der SPS wird geladen und die Anlagenkomponenten werden getestet. Ziel der Phase ist eine installierte, in Betrieb genommene und vom Auftraggeber abgenommene Produktionsanlage. [73, 218 ff.]

Anschließend wird in der finalen **Aufbau- und Nutzungsphase** die Anlage wieder abgebaut und an der Produktionsstätte des Auftraggebers installiert. Es erfolgt die Inbetriebnahme der Anlage, wobei eine Anfahrtsserie produziert wird. Ist diese fehlerfrei, kann die Anlage in den bestehenden Produktionsprozess integriert werden. Während des Betriebs der Anlage erfolgt eine kontinuierliche Überwachung des Betriebs sowie Instandhaltungsmaßnahmen. [73, 218 ff.]

#### Zusammenfassung

Das Engineering von Produktionsanlagen ist ein komplexer Prozess, bei dem mehrere Disziplinen für einen erfolgreichen Projektabschluss zusammenarbeiten. Trotz der fehlenden Standardisierung der einzelnen Planungsphasen ist die unternehmensspezifische Phaseneinteilung essenziell, um das Risiko komplexer Aufgaben zu minimieren und den Bedarf an finanziellen Mitteln besser abschätzen zu können. Zudem verdeutlicht dieses Unterkapitel, dass in der Praxis und in der bisher erfassten Literatur der Fabrikplanungsprozess nach den bewährten Kriterien Kosten, Zeit, Qualität und Flexibilität bewertet wird. Die emissionsbasierte Bewertung findet hier keine Berücksichtigung. Im nachfolgenden Kapitel wird nun anfangs der Fokus auf die Begriffsklärung und Unterscheidung der Begriffe "Digitaler Schatten" und "Digitaler Schatten" gelegt. Im weiteren Verlauf wird spezifisch der digitale Fabrikplanungsprozess erklärt und Detailbeschreibungen erweitert.

# 3.2. Digitaler Fabrikplanungsprozess

# 3.2.1. Definition "Digitales Modell", "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten"

Da der digitale Fabrikplanungsprozess noch ein unbeschriebenes Blatt ist, stecken große Teile des Prozesses noch in der Entwicklungsphase.

Zuerst sollte jedoch definitiv der Begriff "Digitaler Fabrikplanungsprozess" von anderen Ausdrücken wie "Digitaler Zwilling" oder "Digitaler Schatten" abgegrenzt werden, da diese Begriffe in der Praxis sehr oft untereinander vertauscht und verwechselt werden. Auf Grundlage der analysierten Definitionen des digitalen Zwillings haben Kritzinger et al in ihrer Analyse herausgearbeitet, dass man den digitalen Zwilling in jedem Kontext als digitale Gegenstücke zu physischen Objekten identifizieren kann.

Innerhalb dieser allgemeinen Definition werden die Begriffe **Digitales Modell**, **Digitaler Schatten** und **Digitaler Zwilling** oft synonym verwendet. Allerdings unterscheiden diese sich jedoch in der Ebene der Datenintegration zwischen dem physischen und dem digitalen Gegenstück.

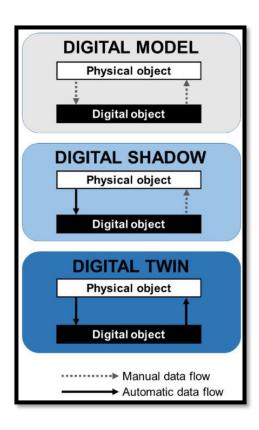
Einige digitale Abbildungen werden manuell modelliert und sind nicht mit einem existierenden physischen Objekt verbunden, während andere vollständig in den Echtzeit-Datenaustausch integriert sind. Deshalb wird in der Studie eine Klassifizierung des digitalen Zwillings in die drei genannten Begriffe digitales Modell, digitaler Schatten und digitaler Zwilling in Abhängigkeit des Grades der Datenintegration vorgeschlagen. [77, p. 1017]

Das **digitale Modell** ist eine digitale Repräsentation des physischen Objekts ohne automatisierten Datenaustausch zwischen den physischen und digitalen Objekten. Digitale Daten bestehender physischer Objekte und Systeme können für die Entwicklung solcher Modelle verwendet, aber der gesamte Datenaustausch erfolgt auf manuelle Weise. Eine Zustandsänderung des physischen Objekts hat keine direkte Auswirkung auf das digitale Objekt und umgekehrt. [77]

Der Begriff "**Digitaler Zwilling**" ist ein digitales Modell, das sein reales Pendant während dessen gesamten Lebenszyklus begleitet. Sowohl Änderungen der Betriebsparameter in der Realität werden automatisch in den digitalen Zwilling überführt, als auch umgekehrt werden Modifikationen am digitalen Modell dann an der realen Anlage korrigiert [78] .

Hingegen bei einem "Digitalen Schatten" werden Daten aus diversen Quellen, die nach gewissem Ermessen mit der realen Anlage verknüpft sind, in einem oder mehreren Datenobjekten zusammengefasst. Die Auswertung dieser Daten unter Verwendung moderner Analysemethoden dient dazu, unbekannte Zusammenhänge zu identifizieren und daraus resultierenden Mehrwert sowie Nutzen zu generieren [79].

Im Gegensatz zum digitalen Zwilling ist der digitale Schatten ein rein datenbasiertes, aus der Datenerfassung erstelltes Modell. Der Zusammenhang zwischen diesen drei Begriffen wird in Abbildung 7 veranschaulicht:



#### Abbildung 7 Datenfluss im digitalen Modell, Schatten und Zwilling [80, p. 777]

Wie durch die durchgehenden Pfeile in Abbildung 7 erklärt, benötigt also der digitale Zwilling den direkten Datenaustausch mit der realen Anlage (Physical Object). Im Gegensatz dazu ist der digitale Schatten ein potenzielles Abfallprodukt aus dem digitalen Zwilling und der Daten des Produkts, angedeutet durch die gestrichelten Pfeile.

# Zusammenfassung

Die Literatur unterscheidet zwischen dem Digitalen Zwilling und dem Digitalen Schatten. Obwohl die allgemeine Definition ähnlich ist, gibt es im Detail Unterschiede in der Abgrenzung. Die Begriffe sorgen vermehrt für Verwirrung im Management der Unternehmen. Für die weitere Betrachtung werden die Begriffe "Digitaler Zwilling" und "Digitaler Schatten" nicht weiterverwendet. Stattdessen wird von einem **digitalen Abbild** gesprochen.

# 3.2.2. Prozess "Digitale Fabrikplanung"

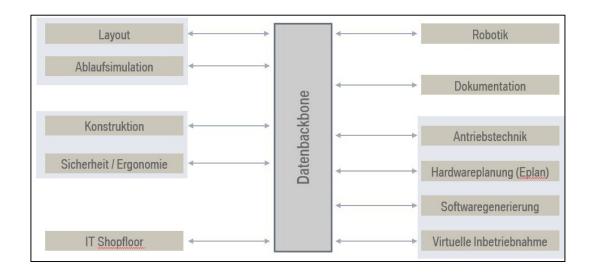
Infolge der Globalisierung, der erhöhten Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten und kurzen Innovationszyklen steigt die Relevanz einer flexiblen und gleichzeitig wirtschaftlichen Produktion [20, p. 115]. Des Weiteren wächst die Komplexität der angebotenen Produkte, da diese zunehmend im Funktionsumfang erweitert, optimiert und intelligent gestaltet werden [81, p. 1]. In der Herstellung bedarf dieser Trend aufwendiger Produktionsanlagen, welche über ein geeignetes Zusammenspiel von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik umgesetzt werden.

Dies erschwert eine schnelle, reibungslose Anpassung oder Neuentwicklung der Anlagen und Abläufe, wodurch Verzögerungen in der Inbetriebnahme (IBN)-Phase entstehen. [81, p. 1]

Zur Unterstützung in diesem Bereich dient die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN), welche eine der IBN vorgelagerte Absicherung der Steuerungssoftware parallel zur Fertigung und zum Aufbau der realen Produktionsanlage ermöglicht [82, p. 10]. Eine späte Fehlerbeseitigung ist mit großem Aufwand und hohen Kosten verbunden [81, p. 2].

Laut der VDI-Richtlinie 4499 sind durchgängige CAx-Prozessketten eine wesentliche Voraussetzung für eine ganzheitliche digitale Planung [82]. Dies ermöglicht es, die Ergebnisse vorheriger Planungs- und Engineeringphasen in Form von Daten oder Modellen direkt in nachfolgende Planungs- oder Engineeringstufen zu übernehmen. Darüber hinaus ist es erforderlich, dass die von den einzelnen Fachbereichen generierten Informationen und Modelle allen Beteiligten zur Verfügung gestellt werden, damit manuelle, nicht-wertschöpfende Aktivitäten und daraus resultierende Fehler verringert werden [82].

Unter dem digitalen Fabrikplanungsprozess versteht man jedoch die Vernetzung, der bei der Anlagenentstehung beteiligten Tools, über einen gemeinsamen Datenbackbone, wobei der Zugriff auf die gemeinsamen Daten bidirektional sein muss. Dieses Verhalten wird in Abbildung 8 nochmal verdeutlicht und für einzelnen Planungsprozesse dargestellt. Zusätzliche Simulationen wie eine VIBN oder eine Energiesimulation sind direkt mit dem digitalen Fabrikplanungsprozess verknüpft. Dieses Modell ist zwar dem digitalen Abbild sehr ähnlich, doch letztendlich ist dieses digitale Modell nicht übergreifend über alle Produktlebensphasen [83].



#### Abbildung 8 Schema des digitalen Fabrikplanungsprozesses (vereinfacht)

Dafür müssen auch Daten aus der Gebäudeplanung einschließlich der Technischen Gebäudeausrüstung, gescannte Punktwolken, Fabriklayouts und Detailkonstruktionen von Anlagenzellen in einer gemeinsamen Datenbasis integriert werden. Diese Fortschritte verdeutlichen auch den dringenden Handlungsbedarf in Bezug auf die Datenintegration im Hinblick auf das Zielbild eines digitalen Fabrikplanungsprozesses:

- Standardisierung von Austauschformaten wie AutomationML oder Asset Administration Shell (Syntax und Semantik)
- Neutrale Verhaltensbeschreibungen für Systeme/Komponenten
- Überwindung von technischen und organisatorischen Brüchen während des Fabrikplanungsprozess [83]

Im Zuge dieser Arbeit liegt der Fokus nun speziell auf den beiden Simulationsarten Virtuelle Inbetriebnahme und Energiesimulation, da beide Prozesse die Handlungsbedarfe und somit auch die Vorteile des digitalen Fabrikplanungsprozess aufzeigen können.

Am Beispiel dieser beiden exemplarischen Prozesse werden diese Handlungsbedarfe nun detaillierter erläutert:

Zur Durchführung einer VIBN oder einer Energiesimulation werden Simulationsmodelle der Produktionsanlagen vorausgesetzt [84, p. 1],welche mit zunehmender Bedeutung der digitalen Fabrik weiter an Interesse gewinnen. Hierfür gilt es, Komponenten und deren Zusammenspiel in der Anlagenstruktur virtuell abzubilden [85, p. 72]. Dies ist derzeit mit großem manuellem Arbeitsaufwand verbunden [20], da das Verhalten jeder Automatisierungskomponente in spezifischen Bibliotheken der verschiedenen Simulations-Tools zu hinterlegen ist [86, p. 4]. Existierende Modelle der Komponentenhersteller werden nicht in den Prozess integriert.

Der zeitintensive Aufbau von proprietären Bibliotheken verursacht aktuell eine Abhängigkeit von den dabei genutzten Engineering-Werkzeugen [71, p. 28]. Ursachen der fehlenden Datendurchgängigkeit bilden primär die Heterogenität in den Datenformaten und die Vielzahl an verwendeten Engineering-Tools [87, p. 147].

Die aktuelle Situation führt zu Qualitätsverlusten in den Komponenten-Modellen, welche mithilfe von Handbüchern spezifisch für die jeweiligen Simulations-Tools erstellt werden müssen [88, p. 3]. Das Fehlen von generalisierten Verhaltensmodell-Bibliotheken begründet sich zudem darin, dass derzeit noch nicht geklärt ist, welche Granularitätsstufe die Simulationsmodelle vorzuweisen haben. Es ist nicht zielführend, in jedem Fall eine möglichst große Realitätsnähe anzustreben. Vielmehr gilt es, ein optimiertes Aufwand-Nutzen-Verhältnis zu erzielen.

Aufgrund der Heterogenität sind Komponentenhersteller nicht in der Lage, den Anlagenherstellern virtuelle Modelle in verschiedensten proprietären Formaten und Detaillierungsgraden zur Verfügung zu stellen. Diese Problematik kann durch standardisierte Austausch- und Datenformate behoben werden [89, p. 61], welche, neben einer Effizienzsteigerung im Engineeringprozess, Kosteneinsparungen und eine höhere Modellqualität ermöglichen [71, p. 28].

Obwohl derartige Formate in den vergangenen Jahren bereits entwickelt, spezifiziert, versioniert sowie in Normen und Richtlinien verankert wurden, finden diese, speziell in der Automobilbranche, derzeit nur vereinzelt Anwendung [89, p. 54].

# Zusammenfassung

Die detaillierten Herausforderungen, Ziele und Vorgehensbeschreibungen bei den in dieser Dissertation betrachteten Prozesse "Virtuelle Inbetriebnahme" und "Digitale Energiesimulation" werden in den nachfolgenden beiden Kapiteln beschrieben, umso die Grundlage für die weiteren CO<sub>2</sub>-Bilanzierungen validieren zu können. Diese beiden exemplarischen Prozesse eignen sich am besten zum Vergleich der "klassischen" und der "digitalen" Fabrikplanung aufgrund der wachsenden Komplexität und Relevanz im Zuge der zunehmenden Durchdringung der Digitalisierung. Zugleich entwickeln sich beide Prozesse mithilfe technischer Innovationen stetig weiter, welche die Grundlage für die weiteren CO<sub>2</sub>-Bilanzierungen ab Kapitel 5 legt.

# 3.2.3. Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)

#### **Definition VIBN**

Die Zielsetzung der VIBN besteht darin, eine Produktionsanlage virtuell in Betrieb zu nehmen. Hierfür bedarf es eines Anlagenmodells, welches die Gewerke Mechanik, Elektrik und Informationstechnik beinhaltet. [90] In der VIBN werden meist reale Bestandteile, wie insbesondere Steuerungen oder Bedienpanels, angebunden [90]. Sie findet zeitlich vor der realen IBN statt [90]. Neben dem Test von Steuerungssoftware und der Bewertung des Maschinenverhaltens dient die VIBN unter anderem zur Absicherung von Planungsergebnissen (z.B. Taktzeiten, Verfügbarkeit) [90].

#### Allgemeines Vorgehen

Das Vorgehen bei der VIBN beschreibt ein schrittweises Erproben von Funktionen und Abläufen anhand eines virtuellen Modells der Produktionsanlage [89]. Dabei gilt es die Steuerungssoftware auf Fehlerfreiheit und korrekte Aufgabenerfüllung zu überprüfen. So wird die Reaktion auf einen Testimpuls mit dem erwarteten Verhalten der Prozessumgebung verglichen. Durch die verschiedenen Situationen werden auftretende Abweichungen deutlich. Diese dienen als Hinweise auf mögliche Probleme im Steuerungscode [91]. Da während der VIBN das virtuelle Modell unabhängig von der realen Anlage agiert, können beliebige Testszenarien durchgeführt werden.

Es wird die Möglichkeit geschaffen, einzelne Tests und Untersuchungen systematisch zu wiederholen und aufzuzeichnen [92]. Zusätzlich ermöglicht eine ergänzende 3D-Visualisierung weitere Absicherungen [93].

#### **Motivation**

Die VIBN fördert ein paralleles Engineering und die interdisziplinäre, kommunikative Zusammenarbeit. Dadurch werden Effizienz und Durchgängigkeit gesteigert. [94] Es resultiert eine Verkürzung der realen IBN und die damit verbundene Zeiteinsparung im Entwicklungsprojekt. Die Anzahl an Projektverschiebungen und nicht eingehaltenen Zeitfenstern wird deutlich reduziert [92]. Verantwortlich hierfür ist die erhöhte Softwarequalität zum Zeitpunkt der IBN. [88, p. 1] [95, p. 123] Fehler im Ablauf und in der Software sind auszuschließen und vorrangig in der Mechanik oder Elektrik zu suchen [89, p. 59]. Insgesamt trägt die VIBN dazu bei, die Zeit bis zur Markteinführung neuer Produkte zu verkürzen [94]. Des Weiteren verringert die VIBN durch zusätzliche Tests das Risiko für Ausfälle während der Produktion. [92, p. 275]

Die VIBN ermöglicht eine steilere *Anlaufkurve*, da die erhöhte Qualität der Steuerungssoftware zum Zeitpunkt der realen IBN diese und die Anlaufphase deutlich verkürzt. Dadurch verkürzt sich die Zeit der Markteinführung neuer Produkte (time-to-market), wodurch ein Wettbewerbsvorteil entsteht, da die Anlage früher Umsatz generieren kann, [96, p. 14] s. Abbildung 9.

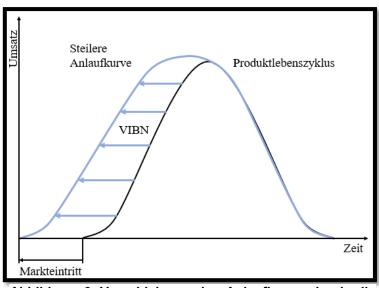


Abbildung 9 Verschiebung der Anlaufkurve durch die VIBN [45]

Die VIBN ermöglicht es, kritische, riskante Situationen ohne Schäden durch Kollisionen oder Gefahr für den Anlagenbediener zu analysieren [17, p. 29] [95, p. 123].

So werden etwa Roboter und die gesteuerte Mechanik vorab virtuell auf Zusammenstöße untersucht. [86, p. 2, 89, p. 57]

Zusätzlich wird dem Anlagenbetreiber die Möglichkeit geboten, die Software bereits vor IBN auf die Einhaltung der Anforderungen und Spezifikationen zu kontrollieren [88, p. 1], wodurch Design-Probleme frühzeitig aufgedeckt werden [94]. So zeigt sich unter anderem, ob die geforderte Taktzeit erreicht wird. Auf diese Weise werden zeit- und kostenintensive Änderungen in der Mechanik, Elektrik und Steuerungstechnik vorgebeugt. [95, p. 123] Neben dem Steuerungssoftware kann auch die Mensch-Maschine Schnittstelle (HMI) durch Anbindung von Bedienfeldern und Anzeigen abgesichert werden [94].

Das erstellte Simulationsmodell ermöglicht eine virtuelle Analyse bei nachträglichen Konstruktionsänderungen am Produkt oder bei Neuentwicklungen [88, p. 1]. Weitere Anwendungsbereiche bilden virtuelle Schulungen, das Training oder die Einweisung von Betriebs- und Instandhaltungspersonal [92, pp. 275-277]. Die Verwendung für Abnahmen, wie der Werksabnahme (FAT), stellt einen weiteren Nutzen des Simulationsmodells dar [92, p. 277].

#### Herausforderungen

Eine zentrale Herausforderung besteht im großen Aufwand bei der erstmaligen Durchführung eines VIBN-Projektes [92, p. 285]. Es gilt Daten aus separaten Bereichen und Planungsphasen unter anspruchsvollen technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen zusammenzuführen [89, p. 53]. Die existierenden Modelle entspringen unterschiedlicher physikalischer Disziplinen (z.B. Mechanik, Elektrik, Thermodynamik) [85, p. 73, 97, p. 706]. Die Erstellung des Anlagenmodells fordert somit die Modellierung und Parametrierung von Teilmodellen und deren Kopplung zum Gesamtanlagenmodell (HÄRLE etal. 2020, S. 73). Zudem gilt es Bibliotheken in VIBN-Tools zu erstellen oder anzupassen. Diesen Aufwänden schließt sich eine erstmalige Implementierung von Schnittstellen zwischen Simulator und Steuerung an. [92, p. 285] Die VIBN stellt in Anbetracht dieser Aspekte keine universelle Out-of-the-box-Lösung dar [89, p. 60].

Sind die Hürden durch eine erstmalige Anwendung von VIBN überwunden, ergeben sich bei wiederholter Nutzung Skalen- und Erfahrungseffekte, welche den Aufwand und die Durchführungszeit weiterer Projekte signifikant reduzieren [89, p. 60] [92, p. 285]. Als Faustregel für die wirtschaftliche Rentabilität hat nach [89, p. 57] die Zeit zur Modellerstellung der virtuellen Anlage, die Nutzungsdauer des Simulationsmodells zur Steuerungs-Absicherung deutlich zu unterschreiten.

### Zeitliche Einordnung in das Engineering des Fabrikplanungsprozesses

Abbildung 10 zeigt eine Gegenüberstellung des klassischen Projektablaufs (ohne VIBN) und des durch die VIBN verkürzten Prozesses. Ein signifikanter Unterschied besteht im Zeitpunkt, an welchem die Eingangsdaten einzureichen sind. Diesen werden unter anderem Ergebnisse aus der Steuerungstechnik, Konstruktion oder Elektroplanung zugeordnet.

Die Eingangsdaten können im Ablauf ohne VIBN spätestens bis zum Start der IBN vorgelegt werden. Bei der VIBN gilt es diese Daten bereits während der Konstruktion bereitzustellen. [92, 284, 276]

Der Anwendungszeitpunkt der VIBN ist individuell festzulegen und gilt als erfolgsentscheidend, da eine voreilige Durchführung nachträgliche Änderungen nicht einbezieht. Wird der geeignete Moment verpasst, kann die VIBN unter Umständen aus Zeitgründen entfallen. Die Steuerungskomponenten werden in diesem Fall direkt an der mittlerweile existierenden, realen Anlage in Betrieb genommen (IBN) [89, p. 60].

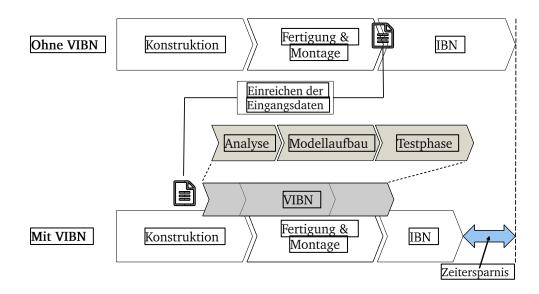


Abbildung 10 Projektablauf mit VIBN (unten) und ohne VIBN (oben) nach [92, p. 284] mit Untergliederung der VIBN in die drei Teilschritte Analyse, Modellaufbau sowie Testphase in Anlehnung an [98, p. 69]

Die VIBN ist zeitlich zwischen der Konstruktions- und der Inbetriebnahme-Phase einzuordnen [98, p. 69]. Puntel und Fay untergliedern die VIBN in drei aufeinander aufbauende Teilschritte. Diese Aufteilung ist ebenfalls in Abbildung 10 integriert. Der Testphase, welche häufig der VIBN gleichgesetzt wird, ist eine aufwendige Analyse- und Modellierungs-Phase vorgelagert [92, pp. 277-284] [98, p. 69]. Das aus diesen Phasen resultierende, experimentierfähige Modell stellt die Basis für die Testphase dar [92, p. 27]

Im Folgenden ist beispielhaft der Ablauf zur Absicherung einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) aufgeführt. Das Engineering des Fabrikplanungsprozesses beginnt mit der 3D-Layoutplanung, welche die Anlagenstruktur über verschiedene Funktionseinheiten inklusive deren Geometrie im Layout abbildet und den Materialfluss darstellt. Im nächsten Schritt folgt die Materialflusssimulation. Hierbei wird das Verhalten des Materials entlang des Anlagenflusses untersucht. Die Elektroplanung definiert die elektrische Ausführung sowie die Automatisierungskomponenten und dokumentiert die Struktur anhand eines Schaltplanes. Im vierten Schritt, der SPS-Programmierung, wird der Steuerungscode erstellt. Dieser ist im Rahmen der VIBN an der virtuellen Nachbildung der Produktionsanlage zu testen und auf Fehler zu untersuchen. [99, p. 380]

# 3.2.4. Digitale Energiesimulation

Eine wichtige Anwendung der Digitalisierung im Bereich des Fabrikplanungsprozesses ist die digitale Energiesimulation. Die Digitale Energiesimulation ist eine Technologie, die es ermöglicht, die Energieeffizienz von Gebäuden und Prozessen vorherzusagen und zu optimieren. Mithilfe von Computerprogrammen und Modellen können komplexe Energieverbrauchssysteme im Vorfeld analysiert und auf ihre Effizienz sowie Wirtschaftlichkeit hin beurteilt werden. Die Technologie hat sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt und wird in verschiedenen Bereichen eingesetzt, wie zum Beispiel in der Gebäudeplanung und - verwaltung, der Industrie und der Stromversorgung.

In diesem Kapitel werden die Vorteile der Digitalen Energiesimulation sowie die führenden Quellen, die diese Technologie unterstützen, vorgestellt.

Eine der wichtigsten Vorteile der Digitalen Energiesimulation ist ihre Fähigkeit, Energiebedarf und -verbrauch in Echtzeit zu messen und zu analysieren. Durch Simulieren von Energieverbrauchssystemen können Schwachstellen identifiziert werden, so dass Ingenieure und Planer geeignete Maßnahmen zur Optimierung ergreifen können. Dies führt zu signifikanten Einsparungen an Energiekosten und reduziert die Umweltauswirkungen von Gebäuden und Prozessen. [100, pp. 475-487]

Zudem besteht bei der Digitalen Energiesimulation die Möglichkeit, verschiedene Energiesysteme miteinander zu vergleichen, um das effizienteste und wirtschaftlichste System zu identifizieren. Durch die Anwendung von Simulationssoftware können Planer und Ingenieure verschiedene Optionen bewerten, bevor eine Entscheidung getroffen wird. Die Technologie ermöglicht auch die Bewertung von Skalierbarkeit, so dass Unternehmen ihre Energieeffizienzstrategien entsprechend anpassen können. [101]

In der Literatur finden sich bereits verschiedene relevante Ansätze wieder, welche sich mit der Energiesimulation von Produktionsanlagen und ganzen Produktionsfabriken beschäftigen.

- Der Ansatz von Thiede und Hermann betrachtet sämtliche Energieflüsse in einem Produktionssystem zur Optimierung des Betriebs, jedoch ohne Fokus auf die Simulation automatisierter Produktionsanlagen. [102, p. 225]
- Der Ansatz von Wolff et al. integriert Energieverbräuche in die diskrete Ereignissimulation, indem jeder Betriebszustand einem Energiezustand zugeordnet wird. [103, p. 66]
- Die Methodik von Bleicher, Heinzl et al. ermöglicht die Planung energieeffizienter Produktionseinrichtungen durch eine Co-Simulation der gesamten Produktionseinrichtung mit verschiedenen Simulationsansätzen. [104, p. 442]
- Die Methode von März et al. Setzt ihren Fokus darauf, einen Entscheidungsprozess zu unterstützen, bei dem mehrere Systemvarianten analysiert werden soll. [105, pp. 13-14]

Die verschiedenen Ansätze zur Simulation des Energieverbrauchs von Produktionsanlagen haben spezifische Grenzen hinsichtlich der Anwendbarkeit und den Anforderungen an die Datenbasis und Modellbildung.

Besonders die zeitliche Auflösung und Genauigkeit der Energiesimulation ist bei vielen Ansätzen noch unzureichend, obwohl sie für die Optimierung automatisierter Produktionsanlagen unerlässlich ist. Die meisten Ansätze nutzen Energiemodelle auf Basis diskreter Zustände, was Raum für Verbesserungen lässt. Einige Konzepte beziehen die Modellierung schon in der Planungsphase ein, aber diese Ansätze basieren meist auf Messungen oder Erfahrungswerten aus der Betriebsphase, was für viele Anwendungsfälle ungeeignet ist. Die Konfiguration der Modelle erfordert oft noch manuellen Aufwand und eigens entwickelte Lösungen.

Es wurden neutrale Datenaustauschformate wie AutomationML gefunden, die eine gute Adaption der Ansätze ermöglichen. Ein vielversprechender Ansatz zur Energiemodellierung von Komponenten ist das Functional Mock-up Interface (FMI). [106, p. 89]

Für einen Anwendungsfall in der Produktion wie z.B. der Automobilindustrie überwiegen die Vorteile des Ansatzes von März et al. [105]. Es stellt sich die Frage nach dem geeigneten Simulationstool. Für die Auswahl können verschiedene Kriterien wie die Marktbedeutung, die Integrationsfähigkeit, die anwendungsgerechte Modellbildung oder die Kommunikation betrachtet werden. Daher wird bei der Auswahl des Simulationstools neben anwendungsrechte Modellbildung besonders auf die Integrationsfähigkeit Einbindungsmöglichkeiten in andere Systeme geachtet. Für die Modellierung der Prozesse in der Produktionsindustrie stehen verschiedene Systeme bzw. Softwarelösungen zur Auswahl:

- Die Software TRNSYS ist eine flexible, grafisch basierte, modulare Softwareumgebung, die es ermöglicht das Verhalten transienter Systeme zu simulieren. Die Möglichkeiten der Verwendung erstecken sich von der dynamischen Berechnung einer einfachen Solaranlage bis hin zu komplexen Gebäuden und Systemen zur rationellen Energienutzung [107].
- IDA ICE ist eine detaillierte, dynamische und multizonale Simulationsanwendung für die Beurteilung des Innenraumklimas und des Energieverbrauchs ganzer Gebäude. Mit einer Vielzahl von thermisch verbundenen Zonen eignet sich IDA ICE auch zur Raumlastberechnung oder zur Ermittlung eines exakten Jahreslastprofils eines Gebäudes. Das Programm bietet eine kombinierte Gebäude-, Anlagen- und Regelungsmodellierung, adaptive Zeitschritte für schnelle und hochauflösende Simulationen, BIM-Import über IFC, sowie eine interaktive 3D-Ansicht mit Visualisierung der Eingabedaten und Ergebnisdarstellungen [108].
- Modelan Impact AB: zeichnet sich durch seinen ganzheitlichen Ansatz in der Gebäude- und Energiesimulation aus. Im Gegensatz zu vielen anderen Softwarelösungen, die sich auf Teilaspekte wie Heizung, Wasser oder Stromverbrauch fokussieren, bietet Modelan Impact AB eine integrierte Plattform, die alle relevanten Systemkomponenten eines Produktionssystem berücksichtigt. Darüber hinaus ermöglichet die Software mit variabler Schrittgröße, und die Möglichkeit, Anfangswerte für die Zustandsvariablen bereitzustellen, bestimmte Steuerungsdesigns und analysen, welche mit anderen Programmen nicht möglich sind. Die hierarchische Struktur erleichtern außerdem das Debugging und die Wiederverwendung von Untermodellen. [109, p. 7]
- DYMOLA, entwickelt von Dassault Systems, zeichnet sich durch seine leistungsstarke Modellierungsumgebung und Simulationsengine aus. Im Gegensatz zu vielen anderen Softwarelösungen, die auf vorgefertigte Komponenten und Bibliotheken setzen, bietet DYMOLA Anwendern die Möglichkeit, eigene Modelle und Systemkomponenten zu erstellen. Durch die Verwendung der objektorientierten Modellierungssprache Modelica können Nutzer komplexe physikalische Systeme präzise abbilden und deren

Verhalten unter verschiedensten Bedingungen simulieren. Darüber hinaus überzeugt DYMOLA durch seine Skalierbarkeit, die es erlaubt, selbst große und detaillierte Modelle effizient zu berechnen.

Die Software verfügt außerdem über einen Modelica-Übersetzer, der alle notwendigen symbolischen Transformationen für große Systeme sowie für Echtzeitanwendungen durchführen kann. Ein grafischer Editor zum Bearbeiten und Durchsuchen von Modellen sowie eine Simulationsumgebung sind enthalten. [110]

Die Auswahl auf die passende Software für unseren Anwendungsfall wurde anhand folgender Entscheidungstabelle getroffen:

Kriterium	TRNSYS	IDA ICE	DYMOLA	Modelan
				Impact AB
Funktionsumfang	<b>///</b>	<b>///</b>	<b>///</b>	<b>/</b> /
Benutzerfreundlichkeit	<b>√</b> √	<b>//</b>	<b>/</b> /	<b>///</b>
incl.				
Visuelle Oberfläche				
Modellierungstiefe	<b>///</b>	<b>///</b>	<b>///</b>	<b>///</b>
3D-Visualisierung des	<b>/</b> /	<b>///</b>	<b>/</b> /	<b>//</b>
Modells				
Open Source Code	<b>///</b>	✓	✓	<b>///</b>
Interaktion mit	<b>///</b>	✓	<b>///</b>	<b>///</b>
anderenTools				
Materialbibliothek	<b>//</b>	<b>/</b> /	<b>V V</b>	<b>/</b> /
Dokumentation	<b>///</b>	<b>///</b>	<b>/</b> /	<b>√</b> √
Kosten	<b>//</b>	<b>///</b>	<b>V</b>	<b>/ / /</b>

Tabelle 4 Entscheidungstabelle zur Softwareauswahl für die digitale Energiesimulation [110] [111]

#### Legende:

- √√√√√ = sehr gut
- √√√√= gut
- √√= weniger gut
- √= unzureichend

Für den Use Case in Kapitel 7.3.4 wird auf das Simulationssystem **Modelan Impact AB** mit Modellierungsprache **Modelica** gesetzt, da es einfach und benutzerfreundlich ermöglicht, sehr große Modelle zu konstruieren und simulieren [110], welches für uns ein essentielles Kernfeature aufgrund der enormen Dimension des Modells der Lackieranlage ist.

Die Modellierungsprache Modelica wird durch die im Jahr 1996 gegründete Modelica Association gewartet und stetig erweitert. Sie baut auf den Erfahrungen vieler Versuche der Definition einer objektorientierten Modellierungssprache auf.

Zusätzlich erstellt und wartet die Modelica Association die Modelica Standard Library (MSL), welche viele der grundlegenden Elemente für die Modellierung technischer Systeme zur Verfügung stellt. [109, p. 282]

Es bietet objektorientierte Konstrukte, die die Wiederverwendung von Modellen erleichtern, und kann bequem zum Modellieren komplexer Systeme verwendet werden, die z. B. mechanische, elektrische, thermische, steuerungs-, oder prozessorientierte Unterkomponenten enthalten. Aufgrund der Eigenschaften von Modelica ist es inzwischen im Bereich der komplexen Systemsimulation etabliert. Modelica wird auch zunehmend für die Simulation von Thermofluid- und Energiesystemen eingesetzt. [108, p. 1]

Ein wichtiger Aspekt bei der Modellerstellung mithilfe von Modelica ist die richtige Parametrierung. Je nach gewünschter Modellgenauigkeit kann die Anzahl und der Aufwand der zu ermittelten Parameter sehr hoch sein. Der Detaillierungsgrad von Modellen wird in der Regel bei der Modellabstraktion bestimmt. Es ist ratsam, zunächst ein einfaches Modell zu verwenden, damit das grundlegende Verhalten zunächst verstanden wird.

Anschließend kann der Genauigkeitsgrad und damit die Komplexität schrittweise gesteigert werden. Die notwendigen Parameter eines existierenden Systems können üblicherweise aus Datenblättern und anderen technischen Unterlagen von Herstellern extrahiert werden. Sind nicht alle Modellparameter aus den Datenblättern ersichtlich, so besteht die Möglichkeit sich diese aus bekannten Informationen auf Grundlage physikalischer Gesetzmäßigkeiten zu ermitteln. Eine weitere Möglichkeit ist die messtechnische Ermittlung unter der Voraussetzung, dass das reale System des zu erstellenden Modells existiert. Ist keine dieser Möglichkeiten vorhanden, so bleibt noch die iterative Ermittlung durch Variation der Parameter innerhalb eines Wertebereichs in einem Simulationsmodell. [109, pp. 22-27]

Der generische Ablauf zur Vorgehensweise bei der Modellerstellung in seinen einzelnen Schritten ist in Abbildung 11 dargestellt. Im ersten Schritt, der Systemabstraktion wird das reale System mit grundlegen technischen Elementen beschrieben. In vielen Fällen wird hier nach der sogenannten Top-down Methode vorgegangen: Man entwirft in einem ersten Schritt ein einfaches, oft lineares Modell des physikalischen Systems, wobei dann die Komplexität schrittweise erhöht wird. Wie bereits beschrieben ist dabei Parametrisierung ein wichtiger Schritt. [109, pp. 56-57]

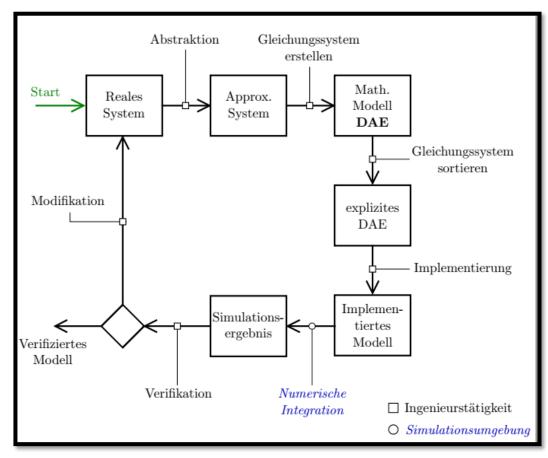


Abbildung 11 Generische Vorgehensweise bei der Modellbildung mithilfe von Modelica [109, p. 56]

#### 3.3. Industriestandard AutomationML

Um den digitalen Fabrikplanungsprozess wirtschaftlicher zu gestalten, soll AutomationML als Datenbasis zur Modellgenerierung der virtuellen Welt dienen. Ein großes Problem ist momentan die fehlende Standardisierung der zu übertragenden Inhalte. Die Struktur von AutomationML inklusive der Semantik ist weitestgehend definiert und standardisiert. Die von AutomationML e.V. standardisierten Bibliotheken dagegen sind nur sehr abstrakt gehalten. Zur globalen Ausbreitung von AutomationML sind diese Bibliotheken enorm wichtig, da ansonsten jeder Anwender seine individuellen Bibliotheken entwickelt und so keine Standardisierung zu Stande kommen wird.

Aufgrund der zunehmenden Anzahl an digitalen Prozessen in der Steuerungs- und Automatisierungstechnik werden nun die Schnittstellen zwischen Prozessen und Werkzeugen immer wichtiger. Bei Betrachtung des gesamten Prozesses der Produktentwicklung bis zur Qualitätssicherung fällt auf, dass dieselben Daten durch den gesamten Prozess hindurch benötigt und geschleust werden. Die aktuell vorhandenen Werkzeuge haben jedoch zu viele Unterschiede in ihren Systemen und Standardisierungen, sodass ein gemeinsamer bidirektionaler Datenaustausch so nicht möglich ist.

AutomationML (AML) will jedoch diesen bidirektionalen Datenaustausch entscheidend erleichtern [112]. AML ist ein offenes Dateiformat, das 2006 von einem Industriekonsortium ins Leben gerufen wurde. 2009 gründete sich daraus ein eingetragener Verein, der AutomationML e.V. Dieser betreibt auch die Internetseite www.automationml.org und besteht aus mehreren industriellen Vertretern. Der AutomationML e.V. regelt die Standardisierungen und stellt seinen Mitgliedern eine offene Wiki-Plattform zur Verfügung. Somit können Daten und das Know-how öffentlich zugänglich gemacht werden, mit dem Ziel auch die Entwicklung von AML voranzutreiben.

AML dient der Beschreibung von industriellen Anlagen und Prozessen und soll den Datenaustausch der verschiedenen Engineering-Tools ermöglichen. In der produzierenden Industrie sind lange Entwicklungswege üblich, da Neuerungen erst etabliert werden müssen, bevor eine stabile und effektive Produktion gewährleistet werden kann. Gerade in der Automobilindustrie und der damit verbundenen Fließbandtechnik ist Stabilität und Ausfallsicherheit oberstes Gebot. Bei AutomationML werden bereits am Markt bekannte Standards eingesetzt, damit eine hohe Akzeptanz in der Industrie erreicht werden kann.

AML stützt sich so auf XML-basierte Formate. Als Dachformat, und zur Darstellung der hierarchischen Struktur einer Produktionsanlage, wird das Format CAEX (Computer Aided Engineering Exchange) nach der Norm IEC 62424 verwendet. Dies ist ein neutrales Datenformat zur Speicherung von hierarchischen Objektinformationen. Es soll sowohl die Hardwarestruktur, aber auch die logische Struktur der Anlage abbilden [71]. Als Beispiel wäre hier ein Netzwerkkabel anzuführen, welches in der Realität zwei Teilnehmer über Ports verbindet. Logisch dagegen besteht eine Verbindung der Teilnehmer, welche über die IP-Adressen verbunden sind. CAEX unterstützt dabei weitere Konzepte wie Klassen, Vererbungen, Relationen, Instanzen oder Bibliotheken.

Um komplexere Anlagendaten wie CAD Daten oder logisches Verhalten darzustellen, werden aus AML externe Datenformate referenziert. Für Geometrie und Kinematik wird COLLADA in der momentanen Version 1.5.0 verwendet. Damit ein Austausch zwischen diversen 3D-Programmen möglich ist, wird COLLADA (Collaborative Design Activity), ebenfalls XML-basiert, auch unterstützt. So können Daten und Einstellungen von diversen Modellen zwischen den einzelnen Programmen transferiert werden. Somit ist eine Darstellung von kinematisierten CAD-Daten möglich.[71]

Das ungesteuerte Verhalten von Bauteilen, wie z.B. Sensoren oder Frequenzumrichter, kann mit PLCopenXML dargestellt werden. Von der AML -Datei aus, wird dann über ID's auf die jeweilige Stelle im PLCopenXML-file referenziert und so das Verhalten ausgelesen. PLCopenXML 2.0 ist nach IEC 61131 standardisiert [71].

#### 3.3.1. Ziele

Der eigentliche Hauptgrund für die Entwicklung von AML war im Grunde genommen, dass eine Vereinfachung beim Entwerfen von Produktionssystemen und deren Inbetriebnahme geschaffen werden sollte. Bei der Planung von Anlagen, Werken oder Fabriken erkennt man auf den ersten Blick keinen Unterschied zwischen den Prozessen, doch bei näherer Betrachtung weisen die verschiedenen Entwurfsprozesse leichte Unterschiede auf.

AML soll diese Daten, die über die verschiedenen Phasen entstehen, abbilden. So werden die Daten im Laufe des Planungsprozesses mit Informationen angereichert und immer weiter verfeinert. Durch diese durchgängige Datenerhaltung kann der Planungsaufwand und die Planungsqualität erheblich gesteigert werden.

Abstrakt betrachtet hat das Datenformat AML die folgenden Ziele [71]:

- **Offenheit**: AutomationML soll keine Lizenzkosten verursachen, sondern für die Industrie und Forschung frei zur Verfügung stehen.
- **Datenaustausch im Engineering**: Über alle Phasen der gesamten Prozesskette des Engineerings soll AutomationML durchgängig als Basis eintreten. So soll ein einheitlicher

Datenaustausch zwischen verschiedenen Werkzeugen in einer Projektplanungsphase möglich sein.

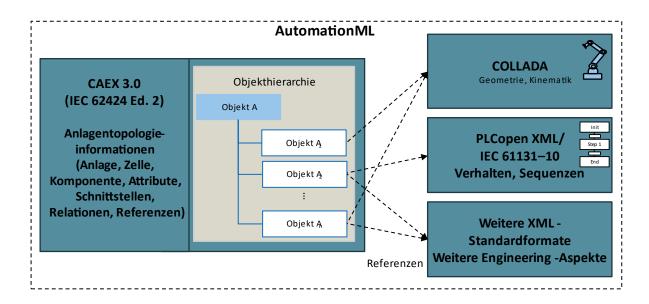
- **Hoher Abdeckungsgrad**: Von der Basisplanung bis zur Inbetriebnahme sollen sowohl einfache Anlagenkomponenten, aber auch komplette Anlagen und Modelle digital definiert und spezifiziert werden.
- **Hohe Marktdurchdringung**: Vorhandende Werkzeuge, die am Markt verbreitet sind, sollen nicht ersetzt werden, sondern integriert werden, damit die Prozesskette durchgängig wird.
- **Aufgreifen bewährter Datenformate**: Damit AML schneller am Markt integriert werden kann und es zu keiner Konkurrenzsituation kommt, sollen bereits vorher genannte und bewährte Austauschformate (COLLADA, CAEX...) für die jeweiligen Prozesse verwendet werden.
- **Erweiterbarkeit und Modularität**: Aufgrund des langfristigen und breiten Nutzungsspektrums ist AML so aufgebaut, dass zukünftig einer Erweiterung nichts im Wege steht. Diese Erweiterbarkeit kann nur durch einen modularen Aufbau garantiert werden. Bei der Integration eines neuen Formats fällt der Aufwand, eine Anbindung an bestehende Schnittstellen zu realisieren, gering aus. [71].

#### 3.3.2. Aufbau

Innerhalb der AutomationML Datei an sich selbst kann auf mehrere unterschiedlichen Dateien referenziert werden. Die notwendigen semantischen Inhalte werden durch Rollen und Schnittstellen realisiert. In diesem Kapitel wird erklärt, wie sich eine Anlage objektorientiert darstellen lässt.

Den Ausgangspunkt für AML bildet die Abbildung der Struktur bzw. Topologie des Produktionssystems in CAEX. Darin enthalten ist die hierarchische Strukturierung der Anlagenobjekte, die jeweils durch individuelle Datenobjekte repräsentiert werden. Dabei wird die Anlage bis zu einem gewissen Detaillierungsgrad untergliedert.

Für jedes Objekt der Anlage werden die notwendigen Austauschinformationen als Objekteigenschaften abgebildet. Zusammenhänge zwischen Anlagenobjekten werden über Relationen repräsentiert [112].



#### Abbildung 12 Top Level- Architektur von AutomationML [112]

In Abbildung 12 wird dargestellt, wie sich eine typische Hierarchie zusammensetzen könnte. Dabei werden am Basisobjekt A mehrere Unterobjekte A<sub>1</sub> etc. erzeugt. Diese wiederum können weitere Objekte beinhalten. In AutomationML werden alle Objekte als Typ "Internal Element" erzeugt, sowohl Basisobjekt, als auch Unterobjekte. Zur Abbildung von Konstruktionsdaten wird auf die externe COLLADA-Datei referenziert [112] .

Hier werden in Abbildung 12 unter Objekt A<sub>1</sub> als Beispiel die geometrischen Daten eines Roboters dargestellt. Das Verhalten einer anderen Komponente wird in PLCopenXML dargestellt, welches in Objekt A<sub>2</sub> referenziert wird. Genauso kann auf weitere Daten wie Dokumentationen verwiesen werden.

Die gesamte Hierarchie wird vom Basisobjekt abgeleitet. Zur konsistenten Strukturierung und eindeutigen Zuordnung der Daten wird in AutomationML auf oberster Ebene bei der Firma begonnen. Diese Strukturierung ist vom AutomationML e.V. als "BestPractice" vorgegeben. So ergibt sich die obere Struktur aus Firma -> Standort -> Bereich -> Anlage -> Anlagenteile etc.

Neben der Hierarchie werden in CAEX auch Abhängigkeiten dargestellt. Mittels "Internal Link" kann auf andere Objekte oder Schnittstellen innerhalb der AutomationML-Datei verwiesen werden. Dadurch sind die folgenden Relationen realisierbar [71]:

#### Vater-Kind-Relation:

Zwischen Objektinstanzen - Zwischen Klassen gleichen Typs

# Vererbungsbeziehungen:

Zwischen Klassen gleichen Typs

# Klassen-Instanz-Relation:

- Zwischen einer <SystemUnitClass> und einer Objektinstanz
- Zwischen einer <RoleClass> und einer Objektinstanz
- Zwischen einer <InterfaceClass> und einer Interface-Instanz

#### <u>Instanz-Instanz-Relation:</u>

- Zwischen Objektinstanzen
- Zwischen außerhalb von CAEX gespeicherten Daten

# 3.3.3. Anwendung

#### Generelle Anwendung

Da AML auf XML basiert, kann die Datei im Text-Editor betrachtet und verändert werden. In der Praxis wird AML zusammen immer mit verschiedenen Schnittstellen zu den bereits vorhandenen Werkzeugen verwendet werden. So müssen diese Schnittstellen XML interpretieren können. Hier wird in der Praxis eine AML-Datei aus einem Planungswerkzeug exportiert und in ein anderes Planungswerkzeug importiert.

Um die Programmierung dieser Tools zu erleichtern, wird vom AutomationML e.V. die AutomationML Engine zur Verfügung gestellt. Die Engine ist ein "Baukasten" für C#, in dem verschiedene Funktionen implementiert sind, womit AML-Dateien ausgelesen, ausgewertet und erzeugt werden können.

Hier kann der Entwickler eine eigene Schnittstelle für sein Planungswerkzeug programmieren, damit eine AML-Datei exportiert bzw. importiert werden kann. Diese Import-/Export-Schnittstellen sind für einen automatisierten Datenaustausch essenziell. Das native Datenformat eines individuellen Software-Tools kann durch diese Schnittstelle in ein AML-File exportiert werden bzw. die Schnittstelle importiert das XML-format aus AML mit den externen Zusatzdateien und wandelt dieses in das native Format um.

Für die Realisierung eines durchgängigen Datenaustausches stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Ein häufig benutzter Ansatz verfolgt die Theorie, dass sämtliche Werkzeuge mit Schnittstellen ausgestattet werden sollen, sodass ein Austausch untereinander möglich ist. Mit diesem Ansatz können zwar sehr schnell Ergebnisse vorgelegt werden, aber auf der anderen Seite steigt hier auch die Anzahl der benötigten Schnittstellen aufgrund der vielen verschiedenen unterstützten Formaten exponentiell an.

So müssten bei drei Software-Tools drei Konverter programmiert werden, bei sechs Tools werden dagegen bereits 15 Konverter benötigt, welche stetig gepflegt und aktualisiert werden müssen. In der linken Grafik aus Abbildung 13 ist dieser Zusammenhang bei einem bilateralen Datenaustauschs schematisch dargestellt. Aufgrund dieses enormen Aufwands zur Entwicklung der Schnittstellen und Konverter wird dieser Ansatz letztendlich abgelehnt [71].

Hingegen dazu sind in dem rechten Teil der Grafik aus Abbildung 13 die Anzahl der Schnittstellen bei einem offenen Dateiformat dargestellt. Hier erkennt man auf den ersten Blick, wie sich durch den Einsatz eines offenen Datenformates die Zahl der Konverter der verwendeten Werkzeuge im Vergleich zu dem bilateralen Datenaustausch reduziert. Im idealen Fall muss das Werkzeug lediglich sein eigenes und das offene Format unterstützen.

So kann vor allem der Anwender selbst sein Werkzeug optimieren und mit einer geeigneten Schnittstelle ausstatten. Außerdem können nun auch Hersteller von weniger bekannten Engineering-Tools teilnehmen, ohne enormen Kostenaufwand für die Integration bekannter Datenformate aufwenden zu müssen [71].

#### **Bilateraler Datenaustausch**

#### **Offenes Dateiformat**

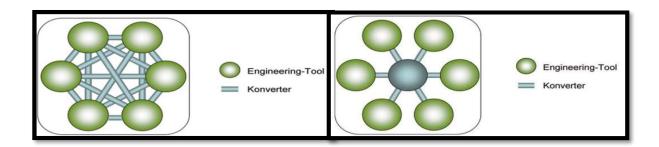


Abbildung 13 Anzahl von Schnittstellen bei einem bilateralen Datenaustausch oder offenen Dateiformat [70]

Aufgrund der Vorteile beim Aufwand und der Pflege der Konverter im Vergleich zu dem Ansatz eines bilateralen Dateiformats ist diesem Konzept mit einem offenen Dateiformat zugestimmt worden. Letztendlich soll die so generierte AML-Datei als Datengrundlage für Prozesse wie z.B. die digitale Energiesimulation dienen.

#### Anwendung in der digitalen Energiesimulation

Zunächst können grundlegende Energiedaten wie Stromverbrauch, Wärmebedarf oder Treibstoffverbräuche auf Komponentenebene hinterlegt werden. AML nutzt dafür die sogenannten "Attribute", also benannte Datenpunkte, die verschiedenste Eigenschaften eines Anlagenteils beschreiben. So lässt sich beispielsweise für einen Motor neben technischen Spezifikationen auch sein Stromverbrauch unter Volllast vermerken. Durch die beliebige Erweiterbarkeit dieser Attribute können auch spezifische Energiekennwerte aufgenommen werden.

In unserem Beispiel Use Case aus der Lackiererei wurden hier die Attribute für einen Energiekonsumenten wie z.B. Lackiertrockner, Kabine, Aufheizzonen innerhalb der Anlage wie in folgender Abbildung 14 zu sehen, festgelegt:

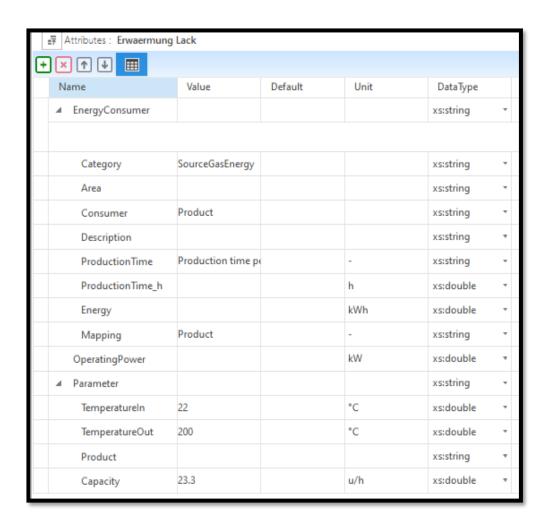


Abbildung 14 AutomationML Attributsatz für den Anwendungsbereich Energie

Fokus liegt hier auf einer sehr allgemeinen Beschreibung eines Konsumenten über Attribute wie Produktionszeit, Temperaturangaben, Leistungsangaben, Produktionskapazität und letztendlich auf dem Energieträger, welcher verbraucht wird.

Darüber hinaus ermöglicht AML die Verknüpfung von Energiedaten mit Geometrie- und Topologieinformationen der Anlage. Über sogenannte "Rollenklassen" können Komponenten in Beziehung zueinander gesetzt und deren Energieflüsse abgebildet werden. So lässt sich etwa der Wärmeaustausch zwischen Maschinen oder die Verteilung von Druckluft innerhalb einer Fertigungslinie modellieren. Die Rollenklassen für die benötigten Energieträger Wärme, Druckluft, Strom, Kaltwasser und Gas sind in dieser Rollenklassenbibliothek "EnergyRoleClassLib" wie in Abbildung 15 zu sehen, abgebildet.

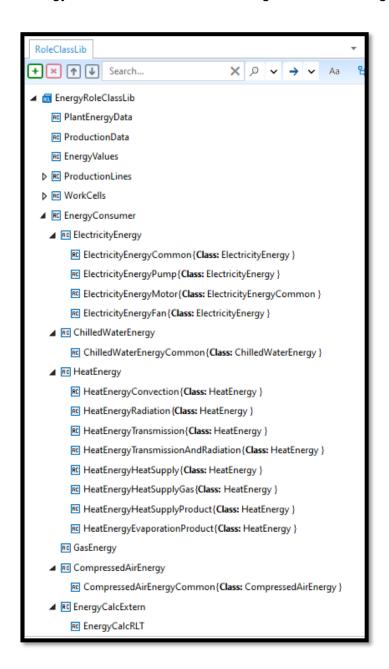
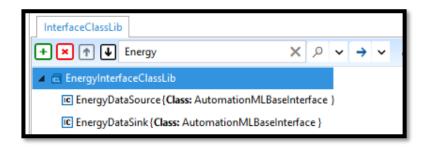


Abbildung 15 AutomationML Rollenklassenbibliothek "Energie"

Die dafür benötigten Verbindungen "Source" und "Sink" sind in der InterfaceClassLib "EnergyInterfaceClassLib" in Abbildung 16 abgebildet.



#### Abbildung 16 InterfaceClass Library zur Beschreibung der energetischenVerbindungen

Durch die Verknüpfung von Energie-, Emissions- und Strukturdaten in AML entsteht somit ein umfassendes digitales Abbild der Anlage, das Betreiber bei der Optimierung von Energieeffizienz und Nachhaltigkeit unterstützt. Für den Use-Case der Lackieranlage ist hier in Abbildung 17 die sog. "InstanceHierachy" mit allen Objekten, Relationen und Attributen dargestellt. Die Verbindungen zwischen Produkt, Prozess und Ressource sind als "Internal Links" modelliert. Hier ist beispielweise eine Verbindung des sog. Ressource "KTL-Trockner" mit dem Produkt "M1" dargestellt, da dieses Produkt in der Anlage "KTL-Trockner" lackiert wird.

Mithilfe der zweiten dargestellten Verbindung ist die Materialwahl "Ecoatpaint" dargestellt mit welche das Produkt in dieser Lackieranlage lackiert wird. Die Modelle können als Grundlage für Simulationen, Analysen und Entscheidungsfindungsprozesse dienen und so einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung des CO<sub>2</sub> -Fußabdrucks in der industriellen Produktion leisten.

Um die wichtigsten Nachhaltigkeitsaspekte vollständig abzubilden, bietet AML auch die Möglichkeit, CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren in das Modell zu integrieren. Diese können sowohl auf Komponentenebene als auch auf Ebene ganzer Energieströme hinterlegt werden. Dadurch können Anwender nicht nur den Energieverbrauch, sondern auch die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen analysieren und bewerten. Beispielsweise könnten für einen Kompressor neben dem Stromverbrauch auch die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro kWh Strom erfasst werden. Oder auf Anlagenebene ließen sich die Gesamtemissionen berechnen, die durch den Einsatz verschiedener Energieträger entstehen.

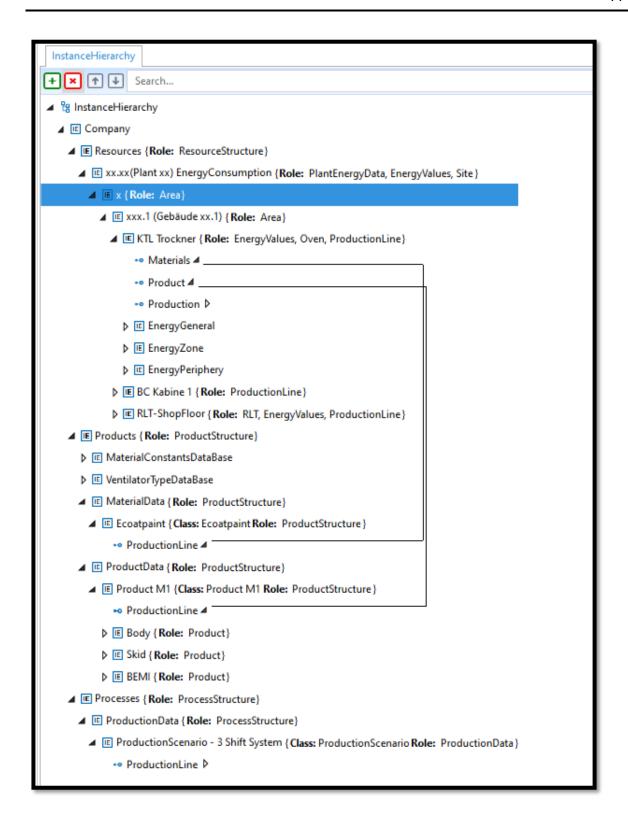


Abbildung 17 AutomationML InstanceHierachy einer Lackieranlage

# 3.4. Industriestandard Asset Administration Shell

Die Asset Administration Shell (AAS), auch Verwaltungsschale genannt, ist ein digitales Modell, das entwickelt wurde, um alle relevanten Informationen eines physischen Industrieassets (wie einer Maschine, Anlage oder Komponente) in einer standardisierten und interoperablen Form zu repräsentieren. Die AAS ist ein zentraler Bestandteil der Industrie 4.0-Initiative, die darauf abzielt, die Digitalisierung in der Fertigungsindustrie voranzutreiben. [113]

Mithilfe dieses standardisiertes Informationsmodell können die Eigenschaften und das Verhalten einer Industrieanlage beschreiben werden. Es bietet eine Möglichkeit, Informationen über Anlagen darzustellen und auszutauschen, wodurch Interoperabilität und Integration zwischen verschiedenen Systemen und Organisationen ermöglicht werden. [114]

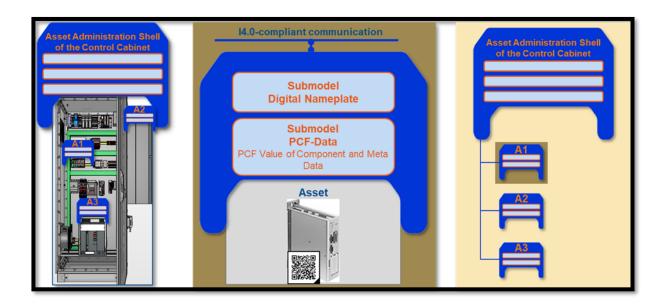
Die Hauptfunktion der AAS ist es, als eine Art digitales Abbild zu fungieren, der die physischen und funktionalen Eigenschaften eines Assets über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg abbildet. Dies beinhaltet Informationen über Design, Herstellung, Betrieb bis hin zur Wartung und Entsorgung.

## Die AAS ermöglicht:

- 1. **Interoperabilität**: Sie erleichtert den Datenaustausch zwischen verschiedenen Systemen und Akteuren in der Wertschöpfungskette, indem sie eine gemeinsame Sprache und Struktur für Daten bereitstellt.
- 2. **Integration**: Sie integriert Informationen aus verschiedenen Quellen und ermöglicht so ein umfassendes Verständnis des Assets.
- 3. **Transparenz**: Sie macht Informationen leicht zugänglich und sorgt für Transparenz über den Zustand und die Leistung des Assets.
- 4. **Effizienz**: Sie unterstützt die Optimierung von Betriebs- und Wartungsprozessen durch den Zugriff auf aktuelle und vollständige Informationen.
- 5. **Sicherheit**: Sie kann dazu beitragen, Sicherheitsstandards zu verbessern, indem sie sicherstellt, dass alle relevanten Informationen über ein Asset verfügbar und aktuell sind.

Die AAS besteht aus verschiedenen Modulen, die verschiedene Aspekte des Assets abdecken, wie z.B. Identitätsdaten, Zustandsüberwachung, Dokumentation und historische Daten. Durch die Nutzung von Technologien wie dem Internet der Dinge (IoT) und fortgeschrittenen Analysemethoden kann die AAS dabei helfen, die Effizienz zu steigern, Kosten zu senken und die Nachhaltigkeit zu verbessern.

Alle Produkte und Komponenten einschließlich ihrer Asset Administration Shells können von den Produktherstellern an den Systemintegrator (Hersteller des Gesamtprodukts) geliefert werden, der dann eine übergreifende Asset Administration Shell aufbauen kann, wie in Abbildung 18 dargestellt. [115, p. 10]. Diese kann dann für diverse UseCases wie z.B. Berechnung des CO<sub>2</sub>. Fußabdrucks oder Energy Monitoring genutzt werden.



# Abbildung 18 Asset-Administrations-Shells eines Schaltschranks und der integrierten Produkte [115, p. 11]

Insgesamt ist die Asset Administration Shell ein wichtiges Werkzeug für die Realisierung von Industrie 4.0, da sie es ermöglicht, die physische und die digitale Welt in der Produktion miteinander zu verknüpfen.

#### Fokus Submodel "Carbon Footprint" für den Betrieb

Ein wichtiger Aspekt dabei ist die Berücksichtigung von Umweltaspekten, insbesondere des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Produkten. Aus diesem Grund hat die IDTA das Submodel "Carbon Footprint" entwickelt [116]. Das Submodel Carbon Footprint ist ein Teil des digitalen Abbilds eines Produkts, der den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Produkts berechnet und visualisiert. Dabei werden alle relevanten Faktoren berücksichtigt, die zur Emission von Treibhausgasen beitragen, angefangen bei der Rohstoffgewinnung über die Produktion bis hin zur Entsorgung des Produkts. Das Submodel nutzt dabei Daten aus verschiedenen Quellen, wie zum Beispiel Sensoren in der Produktion oder Informationen über die Herkunft der Rohstoffe.

Das Ziel des Submodels "Carbon Footprint" ist es, Unternehmen dabei zu unterstützen, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck ihrer Produkte zu reduzieren. Die Visualisierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks ermöglicht es Unternehmen, die Emissionen ihres Produkts besser zu verstehen und gezielte Maßnahmen zur Emissionsreduktion zu ergreifen. Dabei können sie zum Beispiel auf alternative Rohstoffe oder Produktionsprozesse umsteigen oder den Einsatz erneuerbarer Energien erhöhen.

Ein weiteres Ziel des Submodels ist es, die Transparenz entlang der Lieferkette zu erhöhen. Indem Unternehmen den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck berechnen, können sie die Emissionen ihrer Zulieferer genauer erfassen. Darauf aufbauend können sie mit den Zulieferern an konkreten Maßnahmen zur Emissionsreduktion arbeiten. Dadurch können Unternehmen nicht nur ihre eigenen Emissionen reduzieren, sondern auch die Emissionen ihrer Lieferanten.

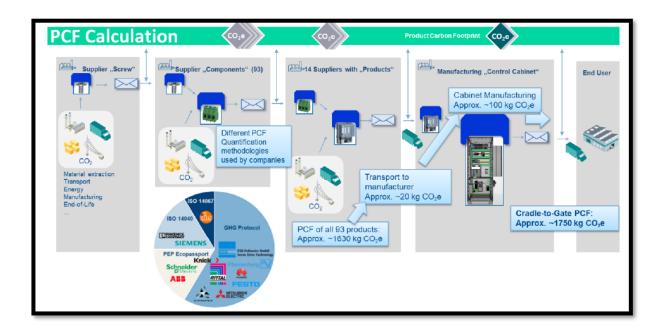
Das ZVEI-Whitepaper "Product Carbon Footprint Calculation of a Control Cabinet using the Asset Administration Shell" beschäftigt sich mit der Berechnung des Produkt-Carbon Footprints (PCF) eines Schaltschranks [115]. Der Fokus liegt auf der Verwendung der Asset Administration Shell (AAS), einer digitalen Repräsentation von Produktdaten. Damit sollen die Umweltauswirkungen, insbesondere die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die mit der Herstellung und dem Lebenszyklus eines Schaltschranks verbunden sind, erfasst und berechnet werden.

Das Whitepaper erläutert, wie die AAS genutzt werden kann, um den PCF zu berechnen, indem sie detaillierte Informationen über Materialien, Herstellungsprozesse, Transport, Nutzung und Entsorgung des Schaltschranks enthält. Durch die Analyse dieser Daten können Unternehmen die Umweltauswirkungen ihrer Produkte besser verstehen und Maßnahmen zur Reduzierung des Carbon Footprints ergreifen.

Das Dokument diskutiert auch die Herausforderungen bei der Berechnung des PCF, wie die Verfügbarkeit und Qualität der erforderlichen Daten sowie die Notwendigkeit, standardisierte Methoden für die Berechnung zu entwickeln. Es wird betont, dass die Zusammenarbeit innerhalb der Industrie und mit anderen Stakeholdern entscheidend ist, um eine einheitliche Methodik zu etablieren und die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der PCF-Berechnungen zu verbessern. [115]

In diesem Whitpaper geht es insbesondere darum, die Machbarkeit der Verwendung von DPP4.0 zur Berechnung des PCF eines integrierten Produkts oder Systems in der gesamten Lieferkette nachzuweisen, wie in Abbildung 19 dargestellt. Für den Demonstrator auf der Hannover Messe 2022 wird nur die Tier-1-Beziehung zwischen Produkthersteller und Hersteller des Schaltschranks untersucht. [115]

In Abbildung 19 sind die im Showcase verwendeten PCF-Berechnungsmethoden und die jeweiligen ungefähren Ergebnisse dargestellt. Jeder Partner berechnete die PCF-Werte seiner Produkte und Komponenten nach einem "Cradle-to-Gate" -Ansatz, der unter den teilnehmenden Unternehmen als Best-Practice-Ansatz festgelegt wurde. [115]



# Abbildung 19 Exemplarische Zuliefererkette für ein Produkt gemäß ZVEI Use Case "Product Carbon Footprint" [115]

Zusammenfassend stellt das ZVEI-Whitepaper einen Ansatz vor, wie die Digitalisierung und speziell die Asset Administration Shell dazu beitragen können, den Produkt-Carbon Footprint von industriellen Produkten wie Schaltschränken zu berechnen und zu optimieren. Dies ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Industrieproduktion und kann Unternehmen dabei unterstützen, ihre Umweltziele zu erreichen.

Um diese Ziele zu erreichen, arbeitet die IDTA eng mit Unternehmen und anderen Organisationen zusammen. Sie bietet Schulungen und Workshops an, damit Unternehmen bei der Implementierung des Submodels unterstützt werden. Darüber hinaus arbeitet sie an der Weiterentwicklung des Submodells, mit dem Ziel, es noch präziser und effektiver zu gestalten.

Insgesamt ist das Submodel "Carbon Footprint" ein wichtiger Beitrag zur Nachhaltigkeit in der Industrie. Es hilft Unternehmen dabei, ihre Emissionen zu reduzieren und gleichzeitig ökonomische Vorteile zu erzielen. Durch die Zusammenarbeit von Unternehmen und Organisationen wie der IDTA kann der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Produkten langfristig reduziert werden. Fokus dieses Submodels liegt jedoch nicht direkt auf dem Engineering, sondern mehr auf die Verwendung der Informationen im Betrieb von Produktionssystemen.

# 4. Handlungsbedarfs und Forschungsfragen

Die Kapitel 2 und 3 haben gezeigt, dass einerseits sich in der bisher erfassten Literatur kaum nennenswerte Bezüge zwischen dem Thema Engineering Prozess von Produktionsanlagen und dem Thema Nachhaltigkeit finden, aber andererseits auch hierzu keine Lösungen entwickelt werden, die einen industriellen Einsatz zulassen. Unternehmen z.B. aus der Automobilindustrie treiben die Transformation mit dem Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zwar konsequent voran, legen jedoch den Fokus stark auf die Themen Kreislaufwirtschaft und nachhaltige Produktion mit all deren Gesichtspunkten wie Energieeffizienz, Ressourcenschonung und Abfallvermeidung [117].

Zusätzlich werden in der aktuellen Zeit Technologien und Produkte in immer kürzeren Zeitintervallen entwickelt und stehen in einem fortlaufenden Veränderungsprozess. Bei der Einführung neuer Produkte müssen die Produktionssysteme erweitert oder verändert werden. Von neuen Produkten leiten sich neue Fertigungsprozesse ab, welche entweder manuell oder durch Anlagentechnik umgesetzt werden. Das Engineering der Anlagentechnik muss sich an komplexen Anforderungen und Vorgaben orientieren (Legal, Prämissen, Gebäude, CO<sub>2</sub>-Footprint...) die kontinuierlich in den jeweiligen Prozessen geprüft werden müssen.

Der Entstehungsprozess einer Produktionsanlage, der in diesem Kapitel fokussiert wird, lässt sich in den Gesamtprozess eines Produkts einordnen. Der End to End-Gesamtprozess einer Produktionsanlage ist nämlich ein komplexer, mehrstufiger Vorgang, der verschiedene Phasen umfasst, wie in Abbildung 20 dargestellt.



# Abbildung 20 End to End-Prozess einer Produktionsanlage [73]

Der hier aufgeführte Engineering Prozess besteht aus einer Vielzahl von einzelnen Detail-Engineering Prozesse, wie in Kapitel 3.2 erklärt. Diese Engineering-Prozess werden sich vor allem im Zuge der Entwicklung des Digitalen Fabrikplanungsprozess verändern, siehe Kapitel 3.2.

Mit der Entwicklung eines digitalen "Common Data Models" möchten Standardisierungsvereine wie der AutomationML.e.V. oder Industrial Digital Twin Association IDTA diesem Wandel und den sich daraus bietenden Chancen gerecht werden. Hierbei liegt der Fokus auf dem Fabrikplanungsprozess mit allen relevanten Verbindungen zur Frühen Phase Planung, sowie des Betriebsphase und den weiteren Prozessdisziplinen. Die Details dazu wurden bereits im Kapitel 3.3 und 3.4 erklärt.

Die enormen Umbrüche, die die Produktion derzeit erlebt, sollen nicht nur bewältigt werden, sondern die Branche als Ganzes bestärkt aus dem Strukturwandel herausgehen. Als virtuelles Abbild der realen Produktion sollte das digitale Abbild sein reales Vorbild über dessen gesamten Lebenszyklus begleiten und mit Echtzeitdaten laufend aktualisiert werden. Damit kann entscheidend zu einer ressourceneffizienten und nachhaltigen Produktion beigetragen werden. So werden Abteilungs- und Unternehmensgrenzen aufgebrochen und eine neue Transparenz über alle an der Wertschöpfungskette angeschlossenen Prozesse ermöglicht. [118]

Dafür ist eine ganzheitliche Veränderung notwendig, die alle Phasen und Prozessschritte digital und durchgängig miteinander verknüpft und auch Zulieferer anbindet, damit dieses Prozesszielbild erreicht werden kann [119]. Die wissenschaftliche Unterstützung der ganzheitlichen Prozessveränderung des Fabrikplanungsprozesses wird dadurch erschwert, dass in der Praxis messbare und belegbare Argumente oftmals fehlen. Zugleich fehlt oft der Bezug zur Nachhaltigkeit, welcher in der bisherigen Literatur noch wenig, bis keine Rolle spielt. Durch die Verbindung der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung mit der Prozessveränderung des digitalen Fabrikplanungsprozesses soll in dieser Arbeit die Lücke in der bisherigen Betrachtungsweise geschlossen werden. Ein weiteres Potential im Rahmen dieser Prozessveränderung liegt in der im Kapitel 2.4 erwähnten LECO-Kennzahl, welches die Verbindung zwischen dem Engineeringprozess und gesamten Lebenszyklus einer Produktionsanlage darstellt.

Zur Lösung dieses identifizierten Handlungsbedarfs wird die Entwicklung einer Methode angestoßen, welche eine systematische und ganzheitliche Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering industrieller Produktionsanlagen, von der initialen Idee bis hin zur Produktionsunterbrechung, ermöglicht. Dabei wird die Methode so gestaltet, dass auch die Emissionen einzelner Tätigkeiten während des Engineerings, wie z. B. die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN), bewertet werden können. Durch die Validierung der Methode anhand von drei Use Cases soll ein effizienter Einsatz in der Praxis sichergestellt werden. Durch die Verknüpfung der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung mit der Prozessveränderung soll ein ganzheitlicher Ansatz entwickelt werden, der es Unternehmen ermöglicht, ihre Fabrikplanungsprozesse unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten zu optimieren.

Durch die Validierung anhand realer Prozesse aus der Praxis soll sichergestellt werden, dass der entwickelte Ansatz praxistauglich ist und inwieweit der digitale Fabrikplanungsprozess zu einer Verbesserung im Sinne der Nachhaltigkeit führen kann. Somit soll diese Arbeit einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die Lücke zwischen Theorie und Praxis in Bezug auf die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten in Fabrikplanungsprozessen zu schließen.

Ziel dieser Arbeit ist es durch die entwickelte Methode und die darauf basierende Validierung folgende Forschungsfragen zu beantworten:

RQ1: Lässt sich der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck im Engineeringprozess von industriellen Produktionsanlagen quantifizieren und evaluieren?

RQ2: Inwiefern kann ein durchgängig digitaler Engineeringprozess basierend auf neutralen Datenstandards, von der initialen Idee bis zur Produktionsunterbrechung, zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen?

RQ3: Können die CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch die CO<sub>2</sub> bezogenen Kosten im Engineering von Produktionsanlagen durch einen digitalen Fabrikplanungsprozess reduziert werden?

# 5. Erfassung und Berechnung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering mithilfe der ECEE-Methode

Die im folgenden Kapitel 5 entwickelte ECEE (Evaluation of Carbon Emissions in Engineering) - Methode dient dazu, die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den einzelnen Schritten des Engineerings des übergeordneten Fabrikplanungsprozesses zu erfassen, zu analysieren und Optimierungspotenziale zu identifizieren. Auf diese Weise können messbare und belegbare Argumente für eine Prozessveränderung hin zu mehr Nachhaltigkeit geschaffen werden.

# 5.1. Auswahl relevanter Emissionsquellen im Engineering

In diesem Unterkapitel erfolgt die Auswahl der für die Entwicklung der ECEE-Methode relevanten Emissionsquellen im Engineering. Zudem erfolgt eine Auflistung der zu quantifizierende Werten der Faktoren, die einen Einfluss auf die Höhe der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Engineerings haben und die vor der Anwendung der ECEE-Methode unternehmens- und anwendungsfallspezifisch zu ermitteln sind. Diese Auswahl soll die Grundlage dafür legen, dass die RQ1 beantwortet werden kann.

# 5.1.1. Lean Engineering als Grundlage für Emissionsquellen

Die Auswahl relevanter Emissionsquellen im Engineering-Prozess des Planungsprozess einer Produktionsanlage wurde auf Basis von Umfragen im Lean Engineering Kontext mit Experten ermittelt. Lean Engineering ist ein Konzept, das darauf abzielt, Verschwendung in Entwicklungsprozessen zu reduzieren und die Effizienz zu steigern. Im Rahmen dieses Ansatzes wurden Experten aus der Praxis befragt, um die wichtigsten Emissionsquellen im Engineering zu identifizieren.

Die Einbeziehung der Expertenperspektive aus dem Lean Engineering Kontext ermöglicht es, die tatsächlich bedeutsamen und direkten Emissionsquellen zu erfassen und in der Analyse zu berücksichtigen [120]. Die nachfolgenden Verschwendungsarten sind das Ergebnis einer Online-Umfrage innerhalb des Forschungsprojekts DIAMOND. Die Grundlage für die detaillierte Betrachtung der Emissionsquellen im Engineering von Produktionsanlagen bilden die entsprechenden Standardisierungstätigkeiten einiger Partner im Forschungsprojekt DIAMOND. [121]

Dieses Forschungsprojekt DIAMOND hat zum Ziel, die Prozesse in der Planung und dem Engineering von Produktionsanlagen zu standardisieren. Die im Projekt erarbeiteten Standards und Erkenntnisse stellen somit eine wichtige Basis für die Beschreibung und Analyse der relevanten Emissionsquellen dar. [121]

Durch die Einbeziehung dieser Standardisierungstätigkeiten aus dem DIAMOND-Projekt kann sichergestellt werden, dass die Erfassung und Bewertung der Emissionsquellen auf einer fundierten Grundlage erfolgt. Die im Projekt entwickelten Prozessmodelle und Methoden bilden die Basis, um die tatsächlich bedeutsamen und direkten Emissionsquellen im Engineering zu identifizieren und in der weiteren Analyse zu berücksichtigen. Somit stellt das Forschungsprojekt DIAMOND eine wichtige Grundlage für die detaillierte Betrachtung der Emissionsquellen dar, die in die Entwicklung der ECEE-Methode einfließen wird. Durch diese Expertenbefragungen konnten die relevantesten Verschwendungs-arten eingegrenzt werden und in die Untersuchung einbezogen werden:

- (1) Misinformation Verschwendung kann in der Quantität und Qualität von Daten für den spezifischen Zweck sowie im Prozess der Datenerhebung liegen. Eine nicht an den Bedürfnissen des Kunden orientierte Datenauswahl zieht weitere Arten der Verschwendung hinterher.
- (2) **Warte- und Suchzeit** Das Warten auf Daten, Informationen, Prozesse, Entscheidungen, Softwaretools, Geräte oder Kollegen und Suchaufwand sind Verschwendung.
- (3) **Daten und Informationstransfer** Bei einer Datenübertragung entsteht kein Mehrwert. Fehlinformationen oder Fehler können durch die Art der Datenübertragung (manuell oder automatisiert) oder die Konvertierung der Daten entstehen.
- (4) **Inkompatible Workflows** Ein Arbeitsablauf basiert auf einer chronologischen Abfolge verschiedener Aktivitäten. Wenn diese Abläufe unklar oder schwierig zu handhaben sind oder nicht synchronisiert sind, kann es zu Verschwendung kommen. [122]

Es wurde bewusst der Fokus auf die direkten Emissionsquellen und nicht auf indirekte Emissionsquellen gelegt, wie z.B. vorherige Schulungen und deren Anreise, welche zur Durchführung des jeweiligen Prozessschritts notwendig sind. Dieser Ansatz ermöglicht es, den Fokus gezielt auf die wesentlichen Emissionsquellen zu richten und Nebeneffekte oder indirekte Faktoren, die oft nur einen geringen Beitrag leisten, außen vor zu lassen. Die einzelnen Emissionsquellen bzw. Emissionsarten können nicht einer einzelnen Verschwendungsart zugeordnet werden, da jede einzelne Emission auf mehreren Verschwendungsarten basiert.

Als Beispiel sind hier die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Personentransport anzuführen. Hier kann die Verschwendung und zugleich CO<sub>2</sub>-Emission sowohl auf Misinformation durch schlechte Datenqualität, welche zu Anwesenheit führt. Als auch auf verschwenderischen Informationstransfer und zusätzlich inkompatible Workflows aufgrund fehlender synchroner Prozesse und schlechte Datenübertragung entstehen.

# 5.1.2. Auswahl relevanter Emissionsquellen im Engineering

Die nachfolgenden Emissionsquellen wurden auf Basis dieser 4 Verschwendungsarten aus dem vorherigen Kapitel 5.1.1 im Kontext des Projekts DIAMOND durch Expertenbefragungen gesammelt: [121]

# 1. CO2-Emissionen durch die Nutzung elektronischer Geräte

Eine wichtige Emissionsquelle im Engineering-Kontext sind die CO2-Emissionen, die durch den Einsatz elektronischer Geräte wie Laptops entstehen. Dabei sind insbesondere zwei Aspekte zu berücksichtigen:

#### Standardmäßige Laptops

Für die üblichen administrativen und entwicklungstechnischen Tätigkeiten im Engineering, wie z.B. Layoutplanung, Dokumentation und Kommunikation, kommen in der Regel Standardlaptops zum Einsatz. Diese Geräte verursachen durch ihren Energieverbrauch und die Herstellung gewisse CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in die Analyse einbezogen werden müssen.

# **High-Performance-Laptops**

In manchen Fällen, z.B. beim Einsatz von komplexen Simulationstools wie der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN), sind leistungsfähigere High-Performance-Laptops erforderlich. Diese Geräte haben einen deutlich höheren Energieverbrauch und Ressourcenverbrauch in der Herstellung, was zu erhöhten CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Daher müssen diese Emissionen ebenfalls berücksichtigt werden.

# 2. CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Beschaffung von zusätzlichem Material

Neben den Emissionen durch die Nutzung elektronischer Geräte spielen auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen eine Rolle, die durch die Beschaffung von Material für den Anlagenbau entstehen. Hierbei sind zwei Aspekte zu unterscheiden.

#### Materialbedarf für den zusätzlichen Anlagenbau

Der Materialbedarf für den eigentlichen Bau der Produktionsanlage führt zu CO<sub>2</sub>-Emissionen, die bei der Herstellung, dem Transport und der Verarbeitung des Materials anfallen. Diese Emissionen müssen in die Analyse jedoch nicht mit einbezogen werden, da diese in jedem Fall anfallen. Die ist unabhängig vom Engineering Prozess und erstmal nicht beeinflussbar. Die eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche jedoch durch verringerten Materialbedarf z.B. im Rahmen einer Energieplanung eingespart werden, müssen in die Gesamtbetrachtung einfließen.

#### Materialbedarf für Prototypen und Anfahrtsserie

Häufig werden im Rahmen des Engineerings auch Prototypen der Produktionsanlage erstellt. Auch hierfür fällt ein gewisser Materialbedarf an, der zu zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Diese Emissionen sind jedoch in der Analyse nicht zu berücksichtigen, da eine Abschätzung sehr produktabhängig und nicht generalistisch getroffen werden kann.

# 3. CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Transport

#### Transport der Anlage bzw. Anlagenteile

Ein weiterer relevanter Faktor sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch den Transport der fertigen Produktionsanlage bzw. Anlagenteile vom Lieferanten zum Auftraggeber entstehen. Dieser Transportvorgang verursacht Treibhausgasemissionen, die jedoch nicht in die Gesamtbetrachtung einfließen müssen, da diese nicht direkt vom Engineering beeinflusst werden können.

#### Personentransport durch PKW, Bahn oder Flugzeug

Neben den Emissionen durch die Nutzung elektronischer Geräte und die Beschaffung von Material spielen auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen eine Rolle, die durch den Transport der Mitarbeiter im Rahmen des Engineering-Prozesses entstehen. Hierbei sind verschiedene Transportmittel zu berücksichtigen:

### • PKW-Transport

Wenn Mitarbeiter mit dem privaten PKW zu Besprechungen, Vor-Ort-Terminen oder anderen Engineering-Aktivitäten fahren, verursacht dies CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in die Analyse einbezogen werden müssen.

### Bahn-Transport

Der Einsatz der Bahn als umweltfreundlicheres Transportmittel kann die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum PKW-Transport deutlich reduzieren. Dennoch müssen auch diese Emissionen berücksichtigt werden.

### Flugverkehr

In manchen Fällen, z.B. bei internationalen Projekten, ist auch der Einsatz von Flugzeugen für den Personentransport notwendig. Aufgrund der deutlich höheren CO<sub>2</sub>-Intensität des Flugverkehrs müssen diese Emissionen ebenfalls in die Gesamtbetrachtung einfließen.

Im Gegensatz zu den Emissionen durch den Transport der fertigen Produktionsanlage vom Lieferanten zum Auftraggeber, können die Emissionen durch den Personentransport im Engineering-Prozess direkt vom Engineering-Team beeinflusst werden. Daher ist es wichtig, diese Emissionsquelle in die Analyse einzubeziehen und Möglichkeiten zur Reduktion zu identifizieren.

### 4. CO<sub>2</sub>-Emissionen durch ICT-Aktivitäten

Neben den direkten Emissionsquellen durch Geräte und Materialien spielen auch die indirekten Emissionen eine Rolle, die durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie (ICT) im Engineering-Prozess entstehen. Hierzu zählen insbesondere:

### Videokonferenzen

Videokonferenzen ermöglichen zwar eine effiziente Zusammenarbeit über räumliche Distanzen hinweg, verursachen aber durch den Energieverbrauch der Geräte und Infrastruktur gewisse CO<sub>2</sub>-Emissionen.

### Datenübertragung

Der Austausch großer Datenmengen, z.B. im Rahmen der Layoutplanung oder Simulationen, führt ebenfalls zu CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Energieverbrauch der Netzwerktechnik und Rechenzentren.

### E-Mail-Kommunikation

Auch die E-Mail-Kommunikation, die im Engineering-Kontext eine wichtige Rolle spielt, verursacht durch den Energieverbrauch der Server und Endgeräte CO<sub>2</sub>-Emissionen.

### **Datenspeicherung**

Die Speicherung und Archivierung von Dokumenten, Plänen und anderen Daten im Engineering-Prozess bedingt einen gewissen Energieverbrauch in Rechenzentren, der ebenfalls zu Emissionen führt.

Diese verschiedenen ICT-bezogenen Emissionsquellen werden in der Analyse unter der Kategorie "ICT" zusammengefasst.

### 5. Weitere Emissionsquellen

### Emissionen durch Bürogebäude

Die Ingenieure und Planer im Engineering-Prozess führen einen Großteil ihrer Tätigkeiten in Bürogebäuden durch. Dabei verursacht der Betrieb dieser Büros, insbesondere durch den Energieverbrauch für Heizung, Kühlung, Beleuchtung und Stromversorgung, CO<sub>2</sub>-Emissionen.

### Emissionen durch Hotelübernachtungen

Häufig erfordern Engineering-Aktivitäten auch Reisen zu Standorten des Kunden oder Zulieferers. In solchen Fällen fallen zusätzliche Emissionen durch Hotelübernachtungen der Mitarbeiter an. Insgesamt stellen die Emissionen durch Bürogebäude und Hotelübernachtungen weitere relevante Faktoren dar, die in die Gesamtbetrachtung der Emissionsquellen im Engineering-Kontext einfließen müssen. Nur so kann ein umfassendes Bild der Umweltauswirkungen geschaffen werden, das als Grundlage für die Entwicklung der ECEE-Methode dient.

Elektronische Geräte	Transport	ICT	Material	Weitere Emissionsquelle
Standard-Laptop	Pkw (Personentransport)	Videokonferenz	Zusätzlicher oder verringerter Materialbedarf Anlagenbau	Bürogebäude
High-Performance Laptop	Bahn (Personentransport)	Datenübertragung	Materialbedarf Prototyp	Hotelübernachtung
Desktop PC	Flugzeug (Personentransport)	E-Mail	Materialbedarf Serie	Arbeitsweg der Mitarbeiter
Monitor	Lkw (Transport der Anlage vom Lieferanten zur Produktionsstätte)	Datenspeicherung		Verpflegung (z.B Kantine
Diensthandy	Lkw (Versand der Anlagenteile)			
Router				
Drucker				

### Zusammenfassung

Insgesamt ergibt sich somit ein umfassendes Bild der relevanten Emissionsquellen im Engineering von Produktionsanlagen, die es bei der Entwicklung der ECEE-Methode zu berücksichtigen gilt. Dabei liegt der Fokus auf den direkten Emissionsquellen, während indirekte Faktoren wie Anreisen oder Verpflegung der Mitarbeiter nicht berücksichtigt werden. Abbildung 21 verschafft einen Überblick über die einzelnen Emissionsquellen im Engineering, aufgeteilt in einzelne Kategorien. Die in Abbildung 21 kursiv geschriebenen Emissionsquellen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, da der Fokus dieser Arbeit auf den administrativen und entwicklungstechnischen Tätigkeiten des Engineerings liegt.

### 5.1.3. Definition der Engineering-Parameter für die ECEE-Methode

Zur umfassenden Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering-Prozess anhand der ECEE-Methode müssen neben den zuvor beschriebenen Emissionsquellen auch eine Reihe von unternehmens- und anwendungsfallspezifischen Input-Variablen definiert und festgelegt werden. Die nachfolgenden allgemeinen Engineering-Parameter wurden auch im Kontext des Projekts DIAMOND durch Expertenbefragungen gesammelt: [121]

### Projektdauer

Die Dauer des jeweiligen Engineering-Projekts ist ein wesentlicher Faktor, da viele Emissionsquellen wie Geräte, Büroflächen oder Videokonferenzen von der Projektlaufzeit abhängen.

### Kosten des Engineerings

Hierzu zählen beispielsweise Lizenzkosten für Software, Lohnkosten für das Ingenieurpersonal sowie Energiekosten für den Betrieb der Büroinfrastruktur. Diese Kostenfaktoren korrelieren ebenfalls mit den verursachten Emissionen.

### • Anzahl der Projektbeteiligten

Sowohl auf Seiten des Anlagenlieferanten als auch des Auftraggebers ist die Anzahl der am Engineering-Prozess beteiligten Mitarbeiter relevant, da diese die Nutzung von Geräten, Büroflächen und Reisen beeinflussen.

### • Entfernung zwischen Anlagenlieferant und Auftraggeber

Die räumliche Distanz zwischen den Standorten des Anlagenlieferanten und des Auftraggebers hat einen direkten Einfluss auf die Emissionen durch Personentransporte.

### Transportmittel f ür Vor-Ort-Meetings

Ob die Mitarbeiter für Besprechungen und Vor-Ort-Termine per PKW, Bahn oder Flugzeug reisen, hat erhebliche Auswirkungen auf die resultierenden Treibhausgasemissionen.

### Anzahl und Dauer der Vor-Ort-Meetings und Hotelübernachtungen

Die Häufigkeit und Länge der notwendigen Vor-Ort-Termine sowie die daraus resultierenden Hotelübernachtungen beeinflussen die Emissionen durch Personentransport und Hotelbetrieb.

### Anzahl, Dauer und Teilnehmerzahl von Videokonferenzen

Als Alternative zu Präsenzveranstaltungen können Videokonferenzen die Emissionen deutlich reduzieren. Daher sind diese Faktoren ebenfalls zu berücksichtigen.

### Kommunikationsaufkommen per E-Mail

Die Anzahl der internen und externen E-Mails im Engineering-Projekt hat Auswirkungen auf den Energieverbrauch für Datenspeicherung und -übertragung.

### Nutzung elektronischer Geräte

Dauer und Anzahl der eingesetzten Geräte wie PCs, Laptops oder Drucker bestimmen den Stromverbrauch und die damit verbundenen Emissionen.

### Datenspeicherung

Der benötigte Speicherplatz für Projektdaten ist ein weiterer relevanter Faktor für die Emissionsberechnung.

### Bürofläche pro Mitarbeiter

Die Größe der genutzten Bürofläche pro Mitarbeiter beeinflusst die Emissionen durch den Betrieb der Bürogebäude.

Die genaue Erfassung und Festlegung dieser Input-Parameter sind entscheidend, damit die ECEE-Methode zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering-Kontext präzise und aussagekräftig angewendet werden kann. Nur so können die tatsächlichen Umweltauswirkungen des einzelnen Engineering-Prozesses umfassend abgebildet werden.

### 5.2. Quantifizierung der CO2-Massenkoeffizienten

In diesem Unterkapitel erfolgt zunächst die Beschreibung des methodischen Vorgehens, gemäß dem die CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten der in Kapitel 5.1 ausgewählten Emissionsquellen quantifiziert werden. Anschließend werden diese quantifiziert und die Formeln zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente aufgestellt.

### Methodisches Vorgehen zur Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten

Um die CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten, der in Kapitel 5.1 bestimmten Emissionsquellen zu quantifizieren, wurde eine ausgiebige Literaturrecherche, sowohl in der deutsch- als auch englischsprachigen Literatur, betrieben. Ergebnis der Recherche war, dass eine Vielzahl an unterschiedlichen Angaben zu Emissionsdaten der einzelnen Emissionsquellen existieren. Verschiedene Werte wurden verglichen, woraufhin möglichst aktuelle Werte ausgewählt wurden, die im Rahmen dieser Arbeit als sinnvoll betrachtet werden und repräsentativ für die Emissionsdaten der einzelnen Emissionsquellen stehen.

Der Großteil der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten wurde basierend auf Studien, die innerhalb Deutschlands durchgeführt wurden, quantifiziert. Hierbei wurden die Werte primär Berichten des Umweltbundesamts bzw. Berichten im Auftrag des Umweltbundesamts entnommen, sowie ebenfalls Berichten im Auftrag der Deutschen Energie-Agentur (dena). [123] [124, p. 107]. Beispielhaft ist hier der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizient eines PKWs anzuführen, welcher einen Kraftstoff wie Benzin, mit viel Oktan und frei von Blei, als Basis für den Verbrauch im Betrieb verwendet [125].

Einzige Ausnahme stellt hier der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizient einer E-Mail dar, der einer Studie des britischen Professors Berners-Lee entnommen wurde. [126, p. 15] Ebenfalls basiert der Wert des CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten einer Hotelübernachtung auf Berechnung der britischen Behörde DEFRA und bezieht sich somit auf britische Hotels. [127, p. 15] Im Sinne dieser Arbeit kann der Wert jedoch repräsentativ für Hotels in Europa angenommen werden.

Spezifische Werte elektronischer Geräte wurden direkt aus den Angaben des Herstellers des jeweiligen Modells entnommen, wobei die ausgewählten Modelle repräsentativ für die in Unternehmen gewöhnlich verwendeten Geräte sind. Der Wert des CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten der Datenspeicherung, womit im Rahmen dieser Arbeit die Datenspeicherung auf Servern in Rechenzentren beschrieben wird, basiert auf Berechnungen des Umweltbundesamts zu CO<sub>2</sub>-Emissionen der Cloud-Speicherung. [124, p. 107] Da es zu CO<sub>2</sub>-Emissionen der Datenspeicherung auf Servern in Rechenzentren in der Literatur keine eindeutigen Angaben zu finden sind, kann der Wert der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Cloud-Speicherung im Rahmen dieser Arbeit als Wert des CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten der Datenspeicherung angenommen werden.

### CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten

Nachdem in Kapitel 5.1 die relevanten Emissionsquellen im Engineering ausgewählt wurden und im vorhergehenden Abschnitt das methodische Vorgehen zur Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten der Emissionsquellen beschrieben wurde, schafft folgende Tabelle 5 einen Überblick über die aus der Literatur ausgewählten und quantifizierten CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten.

CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient		Wert	Einheit
Preis CO₂-Zertifikat[128]	$k_{CO_2-C}$	30	$\frac{\epsilon}{t  CO_2}$
Preis CO <sub>2</sub> -Filterung[4]	$k_{CO_2-F}$	696	€ t CO <sub>2</sub> e
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient elektrische Energie[129]	$\mu_{P_{el}}$	420 · 10 <sup>-6</sup>	$\frac{t\ CO_2e}{kWh}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Pkw[123]	$\mu_{car}$	163 · 10 <sup>-6</sup>	$\frac{t \ CO_2e}{Pkm}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Bahn[130]	$\mu_{rail}$	46·10 <sup>-6</sup>	$\frac{t \ CO_2e}{Pkm}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Flugzeug[131]	µ <sub>airplane</sub>	185 · 10 <sup>-6</sup>	$\frac{t \ CO_2e}{Pkm}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Standard-Laptop (Berechnung siehe folgende Seiten)	$\mu_{laptop_S}$	9.618 · 10 <sup>-6</sup>	$\frac{t \ CO_2e}{a}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient high- performance Laptop (Berechnung <i>siehe folgende</i> <i>Seiten</i> )	$\mu_{laptop_{h-p}}$	13.330,8 · 10 <sup>-6</sup>	$\frac{t \ CO_2e}{a}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Monitor (Berechnung siehe folgende Seiten)	$\mu_{monitor}$	13.398 · 10 <sup>-6</sup>	$\frac{t \ CO_2e}{a}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Desktop PC (Berechnung siehe folgende Seiten)	µ <sub>desktop</sub>	73.017 · 10 <sup>-6</sup>	$\frac{t \ CO_2e}{a}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Diensthandy (Berechnung siehe folgende Seiten)	$\mu_{smartphone}$	1,5 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{t \ CO_2e}{a}$

CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Router[132, p. 32]	$\mu_{router}$	$53 \cdot 10^{-3}$	$\frac{t CO_2e}{a}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Videokonferenz[124, p. 130]	$\mu_{videoconference}$	1,93 · 10 <sup>-6</sup>	$\frac{t \ CO_2 e}{part. \cdot h}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Datenübertragung[124, pp. 119-120]	$\mu_{datatransfer}$	1 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{t \ CO_2e}{a}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient E-Mail[126, p. 15]	$\mu_{mail}$	17·10 <sup>-6</sup>	t CO2e mail
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Datenspeicherung[124, p. 107]	$\mu_{storage}$	211 · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{t \ CO_2e}{TB}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Hotelübernachtung[127, p. 15]	$\mu_{hotel}$	22,62 · 10 <sup>-3</sup>	t CO <sub>2</sub> night
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Bürogebäude (Berechnung siehe folgende Seiten)	$\mu_{office}$	56.028 · 10 <sup>-6</sup>	$\frac{t \ CO_2e}{m^2 \cdot a}$
CO <sub>2</sub> -Massenkoeffizient Materialbedarf (hier Konverter Stahl )[133, p. 15]	µ <sub>Stahl</sub>	2,18	$\frac{t \ CO_2e}{t \ (Stahl)}$

Tabelle 5 CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten der Emissionsquellen im Engineering

### Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering

Die monetäre Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering  $(k_{CO_2})$  erfolgt im Rahmen der ECEE-Methode anhand der Kosten für  $CO_2$ -Zertifikate  $(k_{CO_2-C})$  und CO<sub>2</sub>-Filterung durch das DAC-Verfahren  $(k_{CO_2-F})$ .

Die CO₂-Zertifikate, die im Rahmen des BEHGs erworben werden können, starteten in der Einführungsphase zunächst mit einem Festpreis von 25 € pro Tonne CO₂ im Jahr 2021, der bis auf 45 € pro Tonne CO₂ im Jahr 2025 erhöht wurde.

Ab 2026 beginnt die Versteigerungsphase, bei der der Preis eines CO₂-Zertifikats sich gemäß der Nachfrage am Markt bildet. Der Mindestpreis beläuft sich hierbei auf 55 € pro Tonne CO₂ und der Höchstpreis auf 65 € pro Tonne CO₂ [134]. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein relativ niedriger Preis von 30 € pro Tonne CO₂ im Jahr 2023 angenommen. Ein Überblick über die jährlichen Preise der CO₂-Zertifikate ist im Anhang 1: Preisentwicklung der CO₂-Zertifikate zu finden. Die Einheit des Preises für CO₂-Zertifikate ist  $\frac{€}{t\ co₂}$ , jedoch kann im Rahmen der ECEE-Methode dieser ebenfalls zur Berechnung der Kosten der CO₂e-Emissionen verwendet werden.

Das DAC-Verfahren ist ein äußerst energieintensives Verfahren, das 1400 bis 2500 kWh (erneuerbarer) Energien zur Filterung einer Tonne CO₂ aus der Atmosphäre benötigt. [3] In der Literatur sind unterschiedliche Angaben zu den Kosten des DAC-Verfahrens zu finden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Wert von 696 € pro aus der Atmosphäre gefilterter Tonne CO₂ angenommen. [4, p. 34]

Gemäß den in den zwei vorhergehenden Absätzen festgelegten Kosten für CO<sub>2</sub>-Zertifikate  $(k_{CO_2-C})$  und CO<sub>2</sub>-Filterung  $(k_{CO_2-F})$ , lassen sich die Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen  $(k_{CO_2})$  anhand folgender Formel berechnen:

$$k_{CO_2} = k_{CO_2 - C} + k_{CO_2 - F} (3.1)$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

Im Zuge der Anlagenentwicklung können Vorort-Meetings, sowohl am Standort des Anlagenlieferanten als auch am Standort des Auftraggebers, notwendig sein, zu denen die Teilnehmer mit Pkw, Bahn oder Flugzeug anreisen können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass Pkw s durch die fossilen Brennstoffe Benzin und Diesel angetrieben werden. CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Biokraftstoffe und indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Elektromobilität fließen nicht in die Bewertung mit ein.

Ebenso wird angenommen, dass der von der Bahn bezogene Strom aus dem *deutschen Strommix* stammt und die Bahn nicht ausschließlich mit Ökostrom betrieben wird. Der in dieser Arbeit verwendete CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizient der Bahn basiert auf dem Wert des Schienenfernverkehrs, da angenommen wird, dass eine Bahnreise im Zuge der Anlagenentwicklung die Reisedauer einer Stunde und eine Reisestrecke von 50 km überschreitet. [135, Absatz 1 Satz2]

Der Wert des CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten eines Flugzeugs basiert auf der Annahme, dass die zurückgelegte Reisestrecke im Zuge der Anlagenentwicklung zwischen 1.000 km und 2.000 km beträgt. Ein Überblick über weitere Werte der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten eines Flugzeugs abhängig von der zurückgelegten Reisestrecke ist im Anhang 2: CO<sub>2</sub>-Emissionen des Flugverkehrs zu finden.

Unter Berücksichtigung der vorhergehenden Annahmen, können anhand nachfolgender Formel die  $CO_2$ -Massenäquivalente des Personentransports  $(m_{t_{CO_2}})$  im Zuge der Anlagenentwicklung unter Berücksichtigung der zurückgelegten Strecke (s) in km berechnet werden:

$$m_{t_{CO_2}} = \mu_{car} \cdot s_{car} + \mu_{rail} \cdot s_{rail} + \mu_{airplane} \cdot s_{airplane}$$
 (3.2)

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

Im Rahmen dieser Arbeit wird es als sinnvoll betrachtet die  $CO_2$ -Massenkoeffizienten eines Laptops (standard/high-performance), Desktop PCs, Monitors und Servers anhand des jährlichen Stromverbrauchs (TEC) zu ermitteln. Dies erfolgt durch die Multiplikation des TECs des jeweiligen Modells mit dem  $CO_2$ -Massenkoeffizienten der elektrischen Energie ( $\mu_{Pel}$ ), folglich:

$$\mu_x = TEC_x \cdot \mu_{P_{el}}$$

### Standard-Laptop

Modell: HP EliteBook 840 G6 Notebook PC  $(TEC_{laptop_s}: 22.9 \frac{kWh}{a})$  [136]

$$\mu_{laptop_s} = 22.9 \frac{kWh}{a} \cdot \left(420 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{kWh}\right) = 9.618 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{a}$$

### **High-Performance Laptop**

Modell: HP ZBook Fury 17 G7 ( $TEC_{laptop_{h-p}}$ : 31,74  $\frac{kWh}{a}$ ) [137, p. 2]

$$\mu_{laptop_{h-p}} = 31,74 \frac{kWh}{a} \cdot \left(420 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{kWh}\right) = 13.330,8 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{a}$$

### **Monitor**

Modell: HP E22 G4 FHD Monitor ( $TEC_{monitor}$ : 31,9  $\frac{kWh}{a}$ ) [138, p. 2]

$$\mu_{monitor} = 31.9 \frac{kWh}{a} \cdot \left(420 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{kWh}\right) = 13.398 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{a}$$

### Desktop PC

Modell: HP Pavilion Desktop PC TP01 ( $TEC_{desktop}$ : 173,85  $\frac{kWh}{a}$ ) [139, p. 2]

$$\mu_{desktop} = 173,85 \frac{kWh}{a} \cdot \left(420 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{kWh}\right) = 73.017 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{a}$$

Der  $CO_2$ -Massenkoeffizient eines Diensthandys ( $\mu_{smartphone}$ ) wurde in dieser Arbeit auf Basis des PCF des iPhone SE (3. Generation) berechnet. Laut dem Hersteller Apple beträgt der PCF des iPhone SE (3. Generation) 46 kg  $CO_2$ e, wobei 13% davon in der Nutzungsphase entstehen und eine durchschnittliche Nutzungsdauer von vier Jahren angenommen wird. [140] Somit ergibt sich folgender Wert für den  $CO_2$ -Massenkoeffizienten eines Diensthandys:

$$\mu_{smartphone} = \frac{46 \, kg \, CO_2 e \, \cdot \, 0{,}13}{4 \, Jahre} \, \approx 1{,}5 \, \frac{kg \, CO_2 e}{a}$$

Die  $CO_2$ -Massenäquivalente elektronischer Geräte ( $m_{D_{el_{CO_2}}}$ ) ergeben sich aus der Addition der  $CO_2$ -Massenkoeffizienten der eingesetzten Geräte, die mit der jeweiligen Nutzungsdauer ( $n_a$ ) angegeben in Jahren multipliziert werden:

$$m_{D_{el_{CO_2}}} = \mu_{laptop_s} \cdot n_a + \mu_{laptop_{h-p}} \cdot n_a + \mu_{monitor} \cdot n_a +$$
 (3.3)

$$\mu_{desktop} \cdot n_a + \mu_{smartphone} \cdot n_a + \mu_{router} \cdot n_a$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

Unter Datenübertragung ist in dieser Arbeit der kontinuierliche Austausch von Daten zwischen Laptop bzw. Desktop PC und dem Rechenzentrum zu verstehen [132, p. 119]. Des Weiteren umfasst der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizient der Datenspeicherung die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch den Strombedarf der Server in den Rechenzentren, auf denen die Daten gespeichert werden, die dafür notwendige Infrastruktur und das Netzwerk zur Betreibung der Rechenzentren, entstehen.

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente durch ICT ergeben sich aus der Addition der einzelnen CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten. Dabei wird der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizient der Videokonferenz ( $\mu_{videoconference}$ ) mit der Anzahl der Teilnehmer (part.) und der Dauer (h) in Stunden der Videokonferenz multipliziert.

Der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizient der Datenübertragung ( $\mu_{datatransfer}$ ) wird mit der Nutzungsdauer ( $n_a$ ) in Jahren multipliziert.

Der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizient der E-Mail wird mit der Anzahl der gesendeten E-Mails ( $n_{mail}$ ) multipliziert und der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizeint der Datenspeicherung ( $\mu_{storage}$ ) mit den gespeicherten Terabytes (TB):

$$m_{ict_{CO_2}} = \mu_{videoconference} \cdot part. \cdot h + \mu_{datatransfer} \cdot n_a +$$
 (3.4)  
 $\mu_{mail} \cdot n_{mail} + \mu_{storage} \cdot TB$ 

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Hotelübernachtung

Die Einheit des  $CO_2$ -Massenkoeffizienten einer Hotelübernachtung ist  $\frac{t \ CO_2}{night}$ . Im Rahmen der ECEE-Methode kann dieser jedoch mit den  $CO_2$ -Massenkoeffizienten, die die Einheit  $CO_2$ e besitzen, verrechnet werden.

Durch die Multiplikation des  $CO_2$ -Massenkoeffizienten einer Hotelübernachtung ( $\mu_{hotel}$ ) mit der Anzahl der Übernachtungen ( $n_{night}$ ), ergeben sich die  $CO_2$ -Massenäquivalente der im Zuge der Anlagenentwicklung notwendigen Hotelübernachtungen ( $m_{hotel_{CO_2}}$ ):

$$m_{hotel_{CO_2}} = \mu_{hotel} \cdot n_{night} \tag{3.5}$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

Basierend auf dem jährlichen Stromverbrauch eines Standard-Bürogebäudes ( $TEC_{office} = 133,4 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ ) [141, p. 3], kann der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizient eines Bürogebäudes ( $\mu_{office}$ ) durch die Multiplikation mit dem CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizient der elektrischen Energie ( $\mu_{Pel}$ ) berechnet werden:

$$\mu_{office} = 133,4 \frac{kWh}{m^2 \cdot a} \cdot (420 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{kWh}) = 56.028 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{m^2 \cdot a}$$

Somit ergeben sich die  $CO_2$ -Massenäquivalente eines Bürogebäudes  $(m_{office_{CO_2}})$  aus der Multiplikation des  $CO_2$ -Massenkoeffizienten  $(\mu_{office})$  mit der beanspruchten Fläche  $(m^2)$  in Quadratmeter und der Nutzungsdauer  $(n_a)$  angegeben in Jahren:

$$m_{office_{CO_2}} = \mu_{office} \cdot m^2 \cdot n_a \tag{3.6}$$

## 5.3. Berechnung der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

In diesem Unterkapitel wird die Formel zur Berechnung der Gesamtemissionen im Engineering aufgestellt. Zudem erfolgt die Aufstellung der Formeln anhand denen die Kosten der Gesamtemissionen im Engineering und deren Anteil an den Gesamtkosten des Engineerings berechnet werden können.

### CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente, die im Engineering von Produktionsanlagen entstehen  $(m_{Eng_{CO_2}})$ , ergeben sich aus der Addition der einzelnen CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente:

$$m_{Eng_{CO_2}} = m_{t_{CO_2}} + m_{Del_{CO_2}} + m_{ict_{CO_2}} + m_{hotel_{CO_2}} + m_{office_{CO_2}}$$
 (3.7)

### Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenkoeffizienten im Engineering

Die Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering ( $C_{CO_2}$ ) ergeben sich aus der Multiplikation der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering ( $m_{Eng_{CO_2}}$ ) mit den Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen ( $k_{CO_2}$ ):

$$C_{CO_2} = m_{Eng_{CO_2}} \cdot k_{CO_2} \tag{3.8}$$

Durch die Addition der Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente ( $C_{CO_2}$ ) mit denen des Engineerings ( $C_{Eng}$ ) können die Gesamtkosten des Engineerings ( $C_{TC}$ ) berechnet werden:

$$C_{TC} = C_{CO_2} + C_{Eng} \tag{3.9}$$

Die Berechnung des prozentualen Anteils der Kosten der CO₂-Emissionen an den Gesamtkosten des Engineerings erfolgt gemäß folgender Formel:

$$P_{\frac{C_{CO_2}}{C_{TC}}} = \frac{c_{CO_2}}{c_{TC}} \cdot 100\% \tag{3.10}$$

### 5.4. Zusammenfassung der Methodik

Anhand der in diesem Kapitel entwickelten ECEE-Methode kann der Engineering-Prozess nahezu aller Produktionsanlagen bzw. Produktionssysteme emissionsbasiert quantitativ messbar bewertet werden. Das Schema der ECEE-Methode ist zusammenfassend in

Abbildung 22 visualisiert. Die ECEE-Methode dient dazu, wesentliche Emissionsquellen im Engineering aufzudecken, was dann die Umsetzung geeigneter Einspar- und Effizienzmaßnahmen zur Ressourcenschonung ermöglicht. Vorteil der ECEE-Methode ist, dass neben den zu berücksichtigten Kosten für CO<sub>2</sub>-Zertifikate ebenfalls die Kosten für die Filterung der freigesetzten CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Bewertung miteinbezogen werden. Dadurch entsteht für Unternehmen ein Anreiz die CO<sub>2</sub>-Emissionen und dadurch die Kosten nachhaltig zu senken.

Zudem müssen die Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen bereits in der Analysephase des berücksichtigt werden Kalkulationen Fabrikplanungsprozesses und in die der um eine Machbarkeitsstudie und Wirtschaftlichkeitsanalyse miteinbezogen werden, ganzheitliche Bewertung des effizienten Ressourceneinsatzes und der Rentabilität des Anlagenprojekts zu ermöglichen. Unternehmens- und anwendungsfallspezifisch sind einige CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten variabel, z. B. die der elektronischen Geräte. Ebenfalls sind die einzelnen Werte, die zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, wie Projektlaufzeit, Anzahl gesendeter E-Mails usw., unternehmensspezifisch zu ermitteln und festzulegen. Dennoch ist zu erwähnen, dass die CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten aufgrund gesellschaftlicher, politischer oder globaler Ereignisse, z. B. durch Pandemien und ein damit einhergehendes verändertes Nutzungsverhalten, sich fortlaufend und signifikant verändern können.

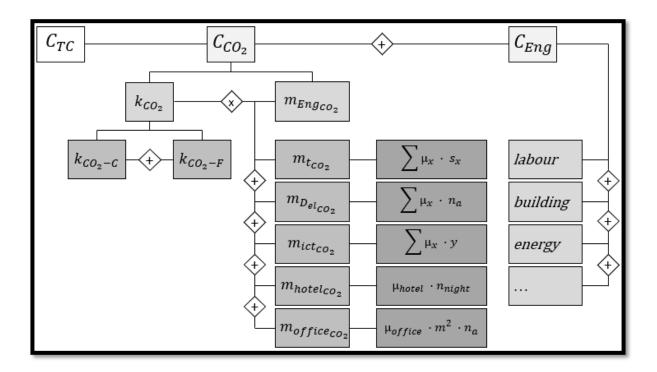


Abbildung 22 Schema der ECEE-Methode

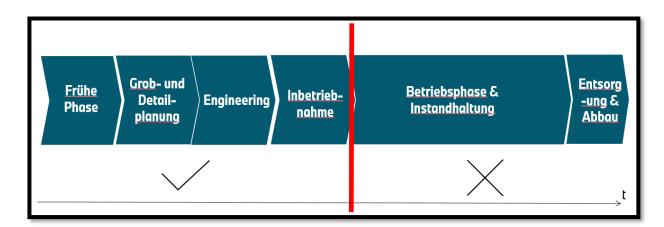
### 6. Aktuelle Grenzen der Methode und Erweiterungsprozess

Der Triple Bottom Line Ansatz aus Kapitel 2.2 ist ein ganzheitliches Konzept zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Unternehmen und Organisationen. Dieser Ansatz umfasst neben der ökologischen und ökonomischen Dimension auch eine soziale Dimension. Indem in dieser Arbeit die soziale Dimension ausgeklammert wird, liegt der Fokus ausschließlich auf den ökologischen und ökonomischen Auswirkungen des untersuchten Themas. Dies ermöglicht eine tiefere Analyse dieser beiden Dimensionen, lässt aber die sozialen Aspekte außen vor. Durch diesen Ansatz kann sich die Arbeit auf die Kernaspekte ihrer Fragestellung konzentriere und die Berücksichtigung der sozialen Dimension würde den Rahmen der Arbeit sprengen.



### Abbildung 23 Abgrenzung der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit

Des Weiteren beschränkt sich diese Arbeit zur Entwicklung einer Methode zur monetären Bewertung der CO<sub>2</sub> Emissionen auf die Phase von der Frühen Phase Planung bis zur Inbetriebnahme der Produktionsanlage. Das bedeutet, dass weder die Betriebs- noch die Abbauphase der Anlage in die Untersuchung einbezogen werden.



### Abbildung 24 Abgrenzung der Betriebs- und Abbauphase

Indem in dieser Arbeit nur die Entstehungsphase der Produktionsanlage betrachtet wird, liegt der Fokus auf den Emissionen, die bei Planung, Konstruktion und Errichtung der Anlage anfallen.

Diese für die Arbeit relevanten Emissionsquellen sind in Kapitel 5.1 detailliert beschrieben. Die Betriebs- und Abbauphase der Anlage, in denen ebenfalls relevante Treibhausgasemissionen entstehen können, werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Dies grenzt den Untersuchungsrahmen ein und ermöglicht eine detaillierte Analyse der Entstehungsphase.

# 7. Evaluierung und Validierung der ECEE-Methode anhand praxisnaher Use Cases aus dem Fabrikplanungsprozesses

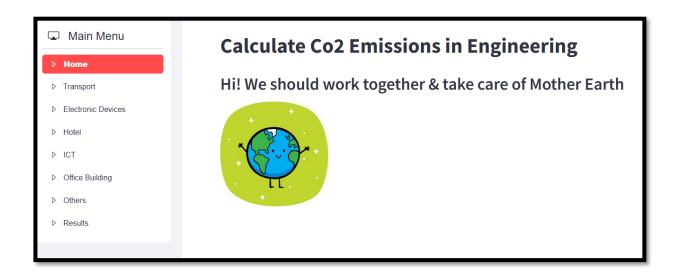
Um die Eignung der in Kapitel 5 entwickelten ECEE-Methode für den Praxisgebrauch zu überprüfen, wird die ECEE-Methode in diesem Kapitel anhand zweier Use-Cases validiert. Dabei wird zunächst der Fokus auf die Entwicklung einer Web-Applikation zur anwenderfreundlichen Validierung gelegt (Kapitel 7.1). Anschließend wird die Differenz der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering anhand der ECEE-Methode in jeweils zwei unterschiedlichen Szenarien untersucht, sowohl für die virtuelle Inbetriebnahme als auch für die digitale Energiesimulation. Abschließend werden die Ergebnisse der Use Cases ausgewertet und zusammengefasst und es erfolgt die Beantwortung, der in Kapitel 1.2 aufgestellten Forschungsfragen (Kapitel 7.4).

## 7.1. Entwicklung einer Web-Applikation zur Validierung der ECEEMethode

Unter Validierung wird ein Prozess verstanden, der auswertet, ob ein Produkt, System oder eine Methode, die eingangs definierter Anforderungen erfüllt und somit für den Einsatzzweck in der Praxis geeignet ist. [142, p. 7] Dementsprechend stellt die Validierung einen formalen Abgleich zwischen dem Produkt, System oder der Methode und den Anforderungen dar [143, p. 542]. Zudem bietet die Validierung einen objektiven Nachweis, dass die Anforderungen für einen spezifischen Gebrauch erfüllt worden sind. Der objektive Nachweis kann z. B. durch die Ausführung unterschiedlicher Berechnungen erbracht werden. [144]

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Validierung als Bewertungsmethode der ECEE-Methode als sinnvoll betrachtet, da durch die Anwendung der ECEE-Methode an den Praxisbeispielen der Use Cases untersucht werden kann, ob die Methode den zuvor spezifizierten Anforderungen entspricht. Dabei ist zu untersuchen, ob die Methode die Anforderung eine aussagekräftige und realitätsnahe Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering von Produktionsanlagen bzw. Produktionssystemen zu ermöglichen, erfüllt, und ob die Bewertung einzelner Engineering-Tätigkeiten anhand der ECEE-Methode möglich ist. Der objektive Nachweis wird hierbei durch die Berechnung der verschiedenen Szenarien erbracht. Zusätzlich zur Validierung der ECEE-Methode durch die Berechnung verschiedener Szenarien wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Web-Applikation entwickelt. Diese Web-Applikation dient der praktischen Umsetzung und Anwendung der theoretischen ECEE-Methode.

Mit Hilfe dieser Web-Applikation können Nutzer die ECEE-Methode für ihre spezifischen Anwendungsfälle und Szenarien einsetzen. Die Applikation bietet eine benutzerfreundliche Oberfläche, über die relevante Eingabeparameter wie Produktionsschritte, Energieverbräuche und weitere Einflussfaktoren definiert werden können.



### Abbildung 25 Startseite der Web-Applikation

Basierend auf diesen Nutzereingaben führt die Web-Applikation dann die eigentliche Berechnung der CO2-Emissionen nach der ECEE-Methode durch. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden dem Nutzer übersichtlich dargestellt, sodass eine Bewertung und Analyse der CO2-Bilanz möglich sind. Durch die Entwicklung dieser Web-Applikation wird die ECEE-Methode einem breiten Nutzerkreis zugänglich gemacht. Anwender können die Methode so einfach in ihrer täglichen Praxis einsetzen und die Validität und Praxistauglichkeit der ECEE-Methode weiter untersuchen. Insgesamt dient die Web-Applikation also dazu, die theoretische ECEE-Methode in eine anwendbare, softwarebasierte Lösung zu überführen und damit die Validierung der Methode zu unterstützen.

Die Web-Applikation zur Anwendung der ECEE-Methode wurde mithilfe der Python-Bibliothek Streamlit entwickelt. Streamlit ist ein Open-Source-Framework, das es ermöglicht, interaktive Web-Anwendungen ohne umfangreiches Frontend-Entwicklungs-Wissen zu erstellen. [145]

Der Programmcode der Web-Applikation basiert vollständig auf Python [146]. Zunächst wurden die zentralen Berechnungslogiken der ECEE-Methode in Python-Funktionen implementiert. Diese Funktionen übernehmen die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen basierend auf den vom Nutzer eingegebenen Parametern. Um diese Berechnungsfunktionen in eine interaktive Web-Anwendung zu überführen, kam Streamlit zum Einsatz. Streamlit ermöglicht es, Python-Code direkt in interaktive Web-Oberflächen zu überführen. Dafür wurden im Python-Skript der Applikation Streamlit-Komponenten wie Textfelder, Dropdown-Menüs und Schaltflächen definiert. Diese Komponenten ermöglichen es dem Nutzer, die erforderlichen Eingaben für die ECEE-Berechnungen vorzunehmen.

In Echzeit ruft die Streamlit-Anwendung dann die zuvor implementierten Python-Funktionen auf, welche die CO<sub>2</sub>-Emissionsberechnungen durchführen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden sofort in der Web-Oberfläche übersichtlich dargestellt, sodass der Nutzer die Resultate einfach interpretieren und analysieren kann. Durch den Einsatz von Streamlit konnte die Web-Applikation ohne aufwendige Frontend-Entwicklung realisiert werden. Der gesamte Programmcode basiert auf Python und ermöglicht so eine effiziente Umsetzung der ECEE-Methode in einer praxistauglichen, webbasierten Anwendung. Das finale Konzept der Softwareentwicklung ist hier in folgender Abbildung 26 zu sehen:

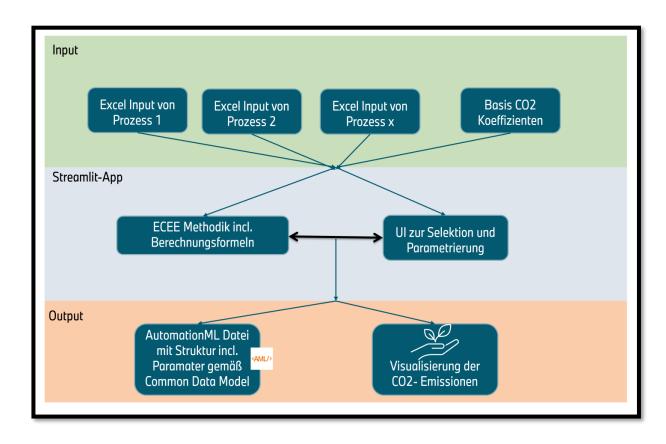


Abbildung 26 Konzept der Streamlit Applikation zur Berechnung der CO2-Emissionen mithilfe der ECEE-Methodik

Das Konzept und der Ablauf der Web-Applikation sind in 3 Kernbereiche unterteilt: Input, die eigentlich Applikation und den Output. Als Input wird hier ein beispielhafter Excel Input gemäß den Templates in Anhang 8 erwartet. Hier können Parameter wie Distanz, Mitarbeiteranzahl, PCs usw. angegeben werden und hochgeladen werden. In der Applikation sieht es für den Benutzer wie hier zu sehen in Abbildung 27 aus:



### Abbildung 27 Eingabemaske für Input Parameter in der Applikation

Es können auch mehrere unterschiedliche Szenarien hochgeladen werden, um versch. Szenarien und Prozesse miteinander zu vergleichen. Im nächsten Schritt kann der Benutzer auch seine notwendigen CO<sub>2</sub> Koeffizienten via Excel hochladen. In der Streamlit App selbst sind bereits der wesentlichen methodisch notwendigen Formeln hinterlegt, können jedoch bei Bedarf jederzeit erweitert werden. Zugleich kann der Benutzer fix hinterlegte Parameter als auch seine hochgeladenen Parameter in der UI beliebig korrigieren und anpassen.

Nun gibt es im letzten Schritt zur Ausgabe für den Benutzer zwei Möglichkeiten die Ergebnisse der Validierung zu plausibilisieren. Zum einen sind die Ergebnisse in einer benutzerfreundlichen grafischen Oberfläche in Form unterschiedlicher Diagramme wie Kreis, Säulen, Stapel und klassisch tabellarisch einsehbar. In folgender Abbildung 28 sieht man zur Laufzeit eine exemplarisch generiertes Säulendiagramm mit den unterschiedlichen CO<sub>2</sub> Quellen.

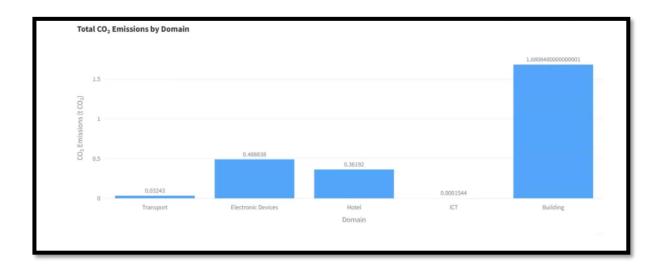


Abbildung 28 UI zur Ausgabe der CO<sub>2</sub> Emissionen

Zum anderen sind die Ergebnisse in Form eines AutomationML Files downloadbar. Hierzu wurden mithilfe der abhängigkeitsbasierten Modellierung in AutomationML die Informationen in ein Datenmodell gebracht. [147] In diesem AutomationML File finden sich daher nicht nur die finalen Ergebniswerte der CO2 Emissionen wieder, sondern eben auch die notwendigen Formeln mit den verlinkten Parametern.

Somit kann dieser digitale Energie Zwilling für den Engineeringprozess in AutomationML ausgegeben werden. In der Zukunft kann diese AML-Modellierungstechnik auch für weitere Prozessschritte wie z.B. Betrieb, Wartung, Reparatur oder Abbau genutzt werden. Darüber hinaus kann das AML-Modell als Grundlage für den digitalen Energiepass dienen, indem es detaillierte Informationen zu Energieverbrauch, Ressourceneffizienz und Umweltauswirkungen des Anlagensystems bereitstellt. Auf diese Weise kann das AML-Modell des digitalen Abbilds über den gesamten Lebenszyklus hinweg eingesetzt werden und so die Planung, den Betrieb und die Optimierung der Energiesysteme unterstützen.

## 7.2. Virtuelle Inbetriebnahme im Engineering einer Produktionsanlage unter Betrachtung verschiedener realistischer Szenarien

## 7.2.1. Beschreibung eines exemplarischen Use-Case aus der Fahrzeugmontage in der Automobilproduktion

Die Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung, die exemplarisch für den Use Case verwendet wird, wird im Folgenden näher beschrieben und ist in Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellt. Bei der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung werden zunächst die auf speziellen Werkstückträgern gestapelten Hochvoltspeicher von einem Lkw angeliefert. Die in dem Lkw vorinstallierte Fördertechnik wird mit der der Anlage verbunden und die HVS werden entladen.

Die Hochvoltspeicher werden entstapelt und durch einen Drehtisch richtig positioniert. Über einen Hubtisch werden die HVS auf eine höhere Ebene befördert und durch Rollenförderer zum Verbauort transportiert. Anschließend werden die HVS wieder auf die Hauptebene abgesenkt, wo der HVS von einem Roboter aus dem Werkstückträger entnommen und verbaut wird. Der leere Werkstückträger wird erneut auf eine höhere Ebene befördert und über eine Förderstrecke zum Abholbereich transportiert. Hier werden die leeren Werkstückträger gestapelt und anschließend von einem Lkw abgeholt.



Abbildung 29 Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung im Bereich der Fahrzeugmontage



### Abbildung 30 Virtuelles Modell der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung

In diesem Unterkapitel wird die ECEE-Methode anhand dreier Szenarien validiert.

Das Szenario 1 fokussiert auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei einem Voraufbau der Produktionsanlage direkt beim Lieferanten ohne VIBN. Das Szenario 2 untersucht, ob die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering durch den Einsatz der VIBN reduziert werden können. In Szenario 3 werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch die Durchführung der VIBN online inklusive automatischer Modellgenerierung entstehen, bewertet. In jedem dieser Szenarien wird zwischen einem standortnahen und einem Lieferanten innerhalb Europas unterschieden.

Für die Use Cases wurde ein OEM mit Standort in Regensburg und ein standortnaher Lieferant ein Anlagenbauer mit Hauptsitz in Fulda in Deutschland, und somit einer Entfernung von ca. 316 km von Regensburg mit dem Bau der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung als Beispiellieferant angenommen[148]. Für einen Lieferanten innerhalb Europas wurde ein Standort in Lublin, Polen, und somit einer Entfernung von ca. 1.129 km von Regensburg zum Vergleich benutzt [149].

Rahmenbedingung aller drei Szenarien ist eine Gesamtprojektlaufzeit von ca. 12 Monaten und somit insgesamt 220 Arbeitstage. Seitens OEM und seitens des Lieferanten sind jeweils acht Mitarbeiter an der Anlagenentwicklung beteiligt.

Unter Einsatz der VIBN wird das bestehende Projektteam durch jeweils zwei VIBN-Experten unterstützt. Weitere in den Use Cases verwendete Parameter des Engineerings sind in "Anhang 5: Parameter des Engineerings" zu finden.

### 7.2.2. Szenario1: Voraufbau der Anlage beim Lieferanten

In diesem Szenario entwickelt der Lieferant die Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung gemäß den allgemeinen Spezifikationen im Automobilbereich. Das Engineering der Anlage erfolgt gemäß dem Kapitel 3.2, jedoch ohne Einsatz der VIBN. Da die VIBN entfällt wird die Anlage vorab auf dem Gelände des Lieferanten aufgebaut und getestet. Sind die Tests erfolgreich, erfolgt die Abnahme der Anlage durch OEM. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in diesem Szenario durch die Beauftragung eines standortnahen bzw. eines Lieferanten in Europa entstehen, werden im Folgenden anhand der ECEE-Methode berechnet.

### Szenario 1.1: Standortnaher Lieferant innerhalb Deutschlands

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

Während des Engineerings der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung, reisen insgesamt sechs\_OEM-Mitarbeiter des Standorts Regensburg fünfzig zu einem Vorort-Meeting nach Fulda mit einem Pkw als Transportmittel. Die dadurch entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen belaufen sich auf 30,9048 t CO<sub>2</sub> e:

$$m_{t_{CO_2}}{}^{OEM-DE} \approx 30{,}9048~t~CO_2e$$

Die Berechnungen  $m_{t_{CO_2}}{}^{OEM-DE}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

Zudem reisen im Zuge des Engineerings der Anlage vier Lieferanten-Mitarbeiter für 30 Vorort-Meetings innerhalb der Projektlaufzeit zu dem OEM mit einem Pkw als Transportmittel. Die dadurch verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen 12,3619 t CO<sub>2</sub>e:

$$m_{t_{CO_2}}^{DE-OEM} \approx 12,3619 \ t \ CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{t_{CO_2}}{}^{DE-OEM}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

Die gesamten CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports im Engineering ergeben sich somit gemäß der nachfolgenden Berechnung:

$$m_{t_{CO_2}}^{1.1} = 30,9048 t CO_2 e + 12,3619 t CO_2 e = 43,26672 t CO_2 e$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

Für diese Validierung wird eine durchschnittliche tägliche Nutzungsdauer der elektronischen Geräte von sieben Stunden angenommen. Zudem wird angenommen, dass jeder Mitarbeiter zwei Monitore verwendet und jeweils ein Router bei dem OEM und ein Router bei dem Lieferanten eingesetzt wird. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der einzelnen elektronischen Geräte, die im Engineering in diesem Szenario zum Einsatz kommen, sind nachfolgende aufgelistet:

$$m_{laptops}^{1.1} \approx 0.1539 t CO_2 e$$
 $m_{monitor}^{1.1} \approx 0.4287 t CO_2 e$ 
 $m_{smartphone}^{1.1} \approx 0.024 t CO_2 e$ 
 $m_{router}^{1.1} \approx 0.106 t CO_2 e$ 

Die Berechnungen zu " $m_{laptop_s}^{1.1}$ ", " $m_{monitor}^{1.1}$ ", " $m_{smartphone}^{1.1}$ ", und " $m_{router}^{1.1}$ " sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases der VIBN im Abschnitt Szenario 2.1 finden.

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der elektronischen Geräte ergeben sich gemäß nachfolgender Berechnung:

$$m_{D_{el_{CO_2}}}^{1.1} = 0,1539 \ t \ CO_2 e + 0,4287 \ t \ CO_2 e + 0,024 \ t \ CO_2 e \ + 0,106 \ t \ CO_2 e \ = 0,7126 \ t \ CO_2 e$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

Für das Engineering der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung sind insgesamt 138 Videokonferenzen á 1,5 Stunden mit vier Teilnehmern seitens OEM und vier Teilnehmern seitens Lieferanten notwendig. Zudem werden pro Arbeitstag fünf E-Mails bei dem OEM intern, zehn E-Mails bei einem Lieferanten intern und fünf E-Mails zwischen OEM und Lieferant verschickt. Insgesamt entstehen während des Engineerings 60 GB an Daten, die auf Servern in Rechenzentren gespeichert werden. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der ICT sind wie folgt:

$$m_{videoconference}^{1.1} \approx 0,0032 t CO_2 e$$
 $m_{datatransfer}^{1.1} = 0,016 t CO_2 e$ 
 $m_{mail}^{1.1} == 0,4675 t CO_2 e$ 
 $m_{storage}^{1.1} =\approx 0,013 t CO_2 e$ 

Die Berechnungen " $m_{videoconference}^{1.1}$ ", " $m_{datatransfer}^{1.1}$ ", " $m_{mail}^{1.1}$ ", und " $m_{storage}^{1.1}$ " sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

Dementsprechend ergeben sich die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT gemäß folgender Berechnung:

$$m_{ict_{CO_2}}\ ^{1.1} = 0,0032\ t\ CO_2e + 0,016\ t\ CO_2e + 0,4675\ t\ CO_2e + 0,013\ t\ CO_2e = 0,4997\ t\ CO_2e$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

Pro Mitarbeiter wird eine Bürofläche von 5 m² benötigt. Dadurch werden CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 4,4822 t CO<sub>2</sub>e verursacht:

$$m_{office_{CO_2}}^{1.1} \approx 4,4822 \ t \ CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{office}^{1.1}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

### CO2-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Durch die vorhergehenden Berechnungen der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der einzelnen Emissionsquellen, können die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering gemäß

nachfolgender Berechnung berechnet werden:

$$m_{Eng_{CO_2}}^{1.1} = 43,26672 t CO_2 e + 0,7126 t CO_2 e + 0,4997 t CO_2 e + 4,4822 t CO_2 e$$
  
= **48,96094008** $t$  **CO**2 $e$ 

### Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Die Kosten, der durch das Engineering verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen werden anhand nachfolgender Berechnung ermittelt:

$$C_{CO_2}^{1.1} = 48,9609 \ t \ CO_2 e \cdot \left(30 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2} + 696 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2 e}\right) \approx 35545,64 \ \epsilon$$

Die Gesamtkosten für das Engineering dieses Use Cases wurden nach Rücksprache mit Experten auf ca. 400.000€ abgeschätzt. Dementsprechend ergibt sich der Anteil der Kosten der CO₂-Emissionen im Engineering an den Gesamtkosten des Engineerings wie folgt:

### Szenario 1.2: Lieferant innerhalb Europas

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

Aufgrund der Entfernung von 1.129 km fahren sechs OEM-Mitarbeiter während der Projektlaufzeit 20-mal zu einem viertägigem Vorort-Meeting zum Standort nach Polen. Die dadurch entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen 44,1665 t CO<sub>2</sub>e:

$$m_{t_{CO_2}}{}^{OEM-EU} \approx 44{,}1665~t~CO_2e$$

Die Berechnungen  $m_{t_{CO_2}}{}^{OEM-EU}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

Aufgrund der Entfernung finden zehn Vorort-Meetings am Standort Regensburg mit drei Lieferanten-Mitarbeitern und einer Dauer von vier Tagen statt. Die daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen belaufen sich auf 14,72216 t CO<sub>2</sub>e:

$$m_{t_{CO_2}}{}^{EU-OEM}\approx 14{,}7222\,t\,CO_2e$$

Die Berechnungen  $m_{t_{CO_2}}{}^{EU-OEM}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalete des Personentransports durch die Beauftragung eines Lieferanten in Europa ergeben sich somit gemäß der nachfolgenden Berechnung:

$$m_{t_{CO_2}}{}^{1.2} = 44{,}1665\,t\,CO_2e + 14{,}7222t\,CO_2e = 58{,}8886\,t\,CO_2e$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

Durch die Beauftragung des Lieferanten innerhalb der EU bleiben die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der im Zuge des Engineerings verwendeten elektronischen Geräte identisch im Vergleich zur Beauftragung im Szenario 1.1, da die Nutzungsdauer der elektronischen Geräte und die Anzahl der Mitarbeiter unverändert bleibt. Somit:

$$m_{D_{el_{CO_2}}}^{\quad \ 1.2} = m_{D_{el_{CO_2}}}^{\quad \ 1.1} = 0.7126 \, t \, CO_2 e$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

Die Beauftragung des Lieferanten innerhalb der EU beeinflusst die Höhe der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT im Vergleich zur Beauftragung innerhalb Deutschlands nicht, da alle Parameter unverändert bleiben. Somit:

$$m_{ict_{CO_2}}^{1.2} = m_{ict_{CO_2}}^{1.1} = 0,4997 \ t \ CO_2 e$$

### CO2-Massenäquivalente Hotelübernachtung

Im Zuge der 20 viertägigen Vorort-Meetings bei dem Lieferanten, sind jeweils drei Hotelübernachtungen für die sechs OEM-Mitarbeiter notwendig. Dadurch ergeben sich CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 10,8576 t CO<sub>2</sub>:

$$m_{hotel_{CO_2}}{}^{OEM-EU} pprox 10,8576~t~CO_2$$

Die Berechnungen  $m_{hotel_{CO_2}}{}^{OEM-EU}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

Durch die 10 dreitägigen Vorort-Meetings bei dem OEM sind jeweils drei Hotelübernachtungen für die vier Lieferanten-Mitarbeiter notwendig. Die daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen 2,7144t CO<sub>2</sub>:

$$m_{hotel_{CO_2}}{}^{EU-OEM} \approx 2,7144~t~CO_2$$

Die Berechnungen  $m_{hotel_{CO_2}}{}^{EU-OEM}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente durch die im Zuge des Engineerings notwendigen Hotelübernachtungen ergeben sich somit gemäß der nachfolgenden Berechnung:

$$m_{hotel_{CO_2}}{}^{1.2} = 10,8576\ t\ CO_2 + 2,7144\ t\ CO_2 = 13,572\ t\ CO_2$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

Die benötigte Bürofläche ist unabhängig der Beauftragung des Lieferanten, da die Anzahl der Projektbeteiligten unverändert bleibt. Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der Bürogebäude

bleiben, verglichen mit dem Szenario 1.1, identisch. Somit:

$$m_{office_{CO_2}}^{1.2} = m_{office_{CO_2}}^{1.1} \approx 4,4822 t CO_2 e$$

### CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering bei Beauftragung des Lieferanten innerhalb Europas ergeben sich aus der Addition der zuvor berechneten CO<sub>2</sub>-Massenäquivalenten der einzelnen Kategorien:

$$m_{Eng_{CO_2}}^{1.2} = 58,8886 \ t \ CO_2 e + 0,7126 \ t \ CO_2 e + 0,4997 \ t \ CO_2 e + 13,572 \ t \ CO_2 e + 4,4822 \ t \ CO_2 e = 78,1549 \ t \ CO_2 e$$

### Kosten der CO2-Gesamtmassenäquivalente des Engineerings

Anhand der nachfolgenden Berechnung können die Kosten, der durch das Engineering verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen, ermittelt werden:

$$C_{CO_2}^{1.2} = 78,1549 \ t \ CO_2 e \cdot \left(30 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2} + 696 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2 e}\right) \approx 56740,43 \ \epsilon$$

Der Anteil der Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen an den Gesamtkosten wird nachfolgend berechnet:

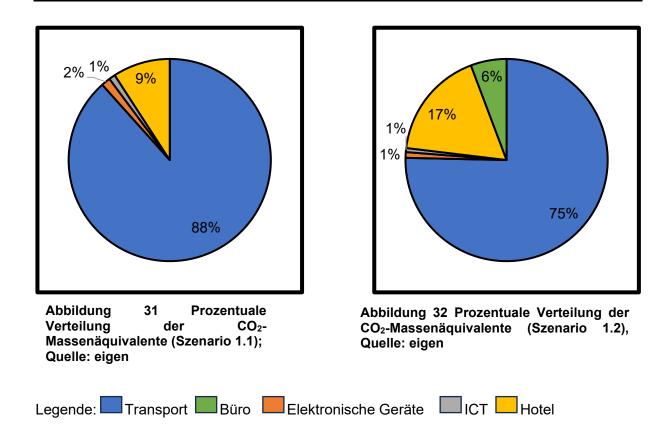
$$P_{\frac{C_{CO_2}}{C_{TC}}}^{1.2} = \frac{56740,43 \in }{56740,43 \in +400.000 \in } \cdot 100 \% = \mathbf{12,42} \%$$

### Zusammenfassung

Insgesamt ist festzustellen, dass die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering durch die Auftragsvergabe an einen Lieferanten in Europa um 29,1939 t CO<sub>2</sub>e höher sind im Vergleich zu der Auftragsvergabe an einen standortnahen Lieferanten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die mehrtägigen Vorort-Meetings bei der Auftragsvergabe an einen Lieferanten in Europa die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Hotelübernachtungen in Höhe von insgesamt 13,572 t CO<sub>2</sub> zu berücksichtigen sind.

Außerdem steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Personentransportes um 15,6219 t CO<sub>2</sub>e, obwohl die Anzahl der Vorort-Meetings von insgesamt 80 auf 30 reduziert wird, da bei gleichbleibender Anzahl an Vorort-Meetings 121,4578 t CO<sub>2</sub>e emittiert werden würden. Die Berechnungen  $m_{t_{CO_2}}^{1.1\,(a)}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

Die Kosten der CO₂-Emissionen im Engineering erhöhen sich um 21.194,79 € durch die Beauftragung eines Lieferanten in Europa. In Szenario 1.1 entsprechen die Kosten der CO₂-Emissionen 8,16 % der Gesamtkosten des Engineerings und in Szenario 1.2 12,42 %. Abbildung 31 und Abbildung 32 verschaffen einen Überblick über die prozentualen Anteile der CO₂-Massenäquivalente der einzelnen Kategorien an den CO₂-Gesamtmassenäquivalenten im Engineering, wobei der Personentransport mit Abstand sich als die größte Emissionsquelle in Engineering darstellt.



### 7.2.3. Szenario2: Klassische VIBN beim Lieferanten

In diesem Szenario wird die Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung durch den Lieferanten, gemäß dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Fabrikplanungsprozess entwickelt. Zudem erfolgt in den letzten sechs Monaten des Anlagenprojekts der Einsatz der VIBN, um die Steuerungssoftware vorab zu testen, wodurch der Voraufbau der Anlage auf dem Gelände des Lieferanten entfällt.

Jedoch ist am Ende der Entwicklungsphase der VIBN ein dreitägiges Vorort-Meeting auf dem Gelände des Lieferanten notwendig, bei dem die Durchführung der VIBN erfolgt. Ist diese erfolgreich, erfolgt die Abnahme der VIBN seitens OEM. Die Entwicklung der Anlage und der dazugehörigen VIBN erfolgt durch den Lieferanten gemäß den Spezifikationen des OEMs.

Durch den Einsatz der VIBN sind zusätzlich jeweils zwei VIBN-Experten seitens OEM und seitens des Lieferanten notwendig. Dieses Szenario untersucht die Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz der VIBN.

#### Szenario 2.1: Standortnaher Lieferant innerhalb Deutschlands

### CO<sub>2</sub>-Massenäguivalente des Personentransports

Während des Engineerings der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung, reisen insgesamt sechs OEM-Mitarbeiter des Standorts Regensburg 20-mal zu einem Vorort-Meeting nach Fulda mit einem Pkw als Transportmittel. Die dadurch entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen belaufen sich auf 12,3619t CO<sub>2</sub> e:

$$m_{t_{CO_2}}{}^{OEM-DE} pprox$$
 12,3619  $t$   $CO_2e$ 

Die Berechnungen zu  $m_{t_{CO_2}}{}^{OEM-DE}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases im Abschnitt Szenario 2.1 finden.

Zudem reisen im Zuge des Engineerings der Anlage vier Lieferanten-Mitarbeiter für zwanzig Vorort-Meetings innerhalb der Projektlaufzeit zu dem OEM mit einem Pkw als Transportmittel. Die dadurch verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen 8,2413 t CO<sub>2</sub>e:

$$m_{t_{CO_2}}^{DE-OEM} \approx 8,2413 \ t \ CO_2 e$$

Die Berechnungen zu  $m_{t_{CO_2}}{}^{FFT-OEM}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases im Abschnitt Szenario 2.1 zu finden.

Am Ende der Entwicklungsphase der VIBN ein dreitägiges Meeting auf dem Gelände des Lieferanten zur Durchführung und Abnahme der VIBN notwendig ist. Hierfür reisen fünf OEM-Mitarbeiter täglich zum Standort des Lieferanten.

$$m_{t_{CO_2}}{}^{OEM-DE\;(VIBN)}~\approx 1{,}5453\;t\;CO_2e$$

Die Berechnungen zu  $m_{t_{CO_2}}^{OEM-DE\ (VIBN)}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases im Abschnitt Szenario 2.1 zu finden.

Die gesamten CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports im Engineering + VIBN ergeben sich somit gemäß der nachfolgenden Berechnung:

$$m_{t_{CO_2}}^{2.1} = 8,2413 \ t \ CO_2 e + 12,3619 \ t \ CO_2 e + 1,5453 \ t \ CO_2 e = 22,1484 \ t \ CO_2 e$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

Die in den letzten sechs Monaten am Anlagenprojekt beteiligten VIBN-Experten benötigen die elektronischen Geräte in gleichem Ausmaß wie die regulären Projektbeteiligten. Jedoch benötigt jeder VIBN-Experte drei anstatt zwei Monitore. Zusätzlich benötigt jeder VIBN-Experte einen Desktop PC, da die VIBN auf diesem, aufgrund des leistungsfähigeren Prozessors, abläuft. Dennoch benötigt jeder VIBN-Experte ebenfalls einen Standard-Laptop für z. B. die Teilnahme an Videokonferenzen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der eingesetzten elektronischen Geräte sind nachfolgend aufgelistet:

$$m_{laptop_s}^{2.1} \approx 0.1731 \, t \, CO_2 e$$
 $m_{monitor}^{2.1} \approx 0.5091 \, t \, CO_2 e$ 
 $m_{desktop}^{2.1} \approx 0.146 \, t \, CO_2 e$ 
 $m_{smartphone}^{2.1} \approx 0.027 \, t \, CO_2 e$ 
 $m_{router}^{2.1} = \approx 0.106 \, t \, CO_2 e$ 

Die Berechnungen zu " $m_{laptop_s}^{2.1}$ ", " $m_{monitor}^{2.1}$ ", " $m_{desktop}^{2.1}$ ", " $m_{smartphone}^{2.1}$ ", und " $m_{router}^{2.1}$ " sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der in diesem Szenario verwendeten elektronischen Geräte ergeben sich gemäß der nachfolgenden Berechnung:

$$m_{D_{el_{CO_2}}}^{2.1} = 0,1731 \ t \ CO_2 e + 0,5091 \ t \ CO_2 e + 0,146 \ t \ CO_2 e + 0,027 \ t \ CO_2 e \ + 0,106 \ t \ CO_2 e$$
 
$$= 0,9612 \ t \ CO_2 e$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

Zusätzlich zu den regulären 138 Videokonferenzen sind für die VIBN 20 Videokonferenzen á einer Stunde in den letzten sechs Monaten des Anlagenprojekts notwendig. Neben den regulären acht Teilnehmern nehmen an den zusätzlichen 20 Videokonferenzen zusätzlich jeweils ein VIBN-Experte seitens OEM und ein VIBN-Experte seitens des Lieferanten teil. Durch die VIBN erhöht sich ebenfalls die Anzahl der bei dem OEM intern gesendeten E-Mails um 0,1, bei dem Lieferanten intern um 0,2 und die Anzahl der gesendeten E-Mails zwischen OEM und dem Lieferanten um 0,1 in den letzten sechs Monaten des Anlagenprojekts.

Zudem entstehen durch die VIBN zusätzlich 5 GB an Daten, sodass insgesamt 65 GB an Daten auf Servern in Rechenzentren gespeichert werden müssen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der ICT setzen sich wie folgt zusammen:

$$m_{videoconference}^{2.1} \approx 0,0036 \ t \ CO_2 e$$
  $m_{datatransfer}^{2.1} = 0,018 \ t \ CO_2 e$   $m_{mail}^{2.1} \approx 0,4688 \ t \ CO_2 e$   $m_{storage}^{2.1} \approx 0,0137 \ t \ CO_2 e$ 

Die Berechnungen zu " $m_{videoconference}^{2.1}$ ", " $m_{datatransfer}^{2.1}$ ", " $m_{mail}^{2.1}$ ", und " $m_{storage}^{2.1}$ " sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT ergeben sich somit gemäß nachfolgender Berechnung:

$$m_{ict_{CO_2}}^{2.1} = 0.0036 \ t \ CO_2 e + 0.018 \ t \ CO_2 e + 0.4688 \ t \ CO_2 e + 0.0137 \ t \ CO_2 e = 0.5041 \ t \ CO_2 e$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

Die VIBN-Experten benötigen in den letzten sechs Monaten des Anlagenprojekts ebenfalls jeweils 5 m2 an Bürofläche. Die durch die Benutzung der Bürogebäude entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen 5,0425 t CO<sub>2</sub> e:

$$m_{office_{CO_2}}^{2.1} \approx 5,0425 \ t \ CO_2 e$$

Die Berechnungen zu  $m_{office_{CO_2}}^{2.1}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

### CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Durch die vorhergehende Berechnung der einzelnen CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente, können gemäß der nachfolgenden Berechnung die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente des Engineerings ermittelt werden:

$$m_{Eng_{CO_2}}^{2.1} = 22,1484 t CO_2 e + 0,9612 t CO_2 e + 0,5041 t CO_2 e + 5,0425 t CO_2 e$$
  
= 28,6563 t CO\_2 e

### Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente des Engineerings

Anhand nachfolgender Berechnung werden die Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering berechnet:

$$C_{CO_2}^{2.1} = 28,6563 \ t \ CO_2 e \ \cdot \left(30 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2} + 696 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2 e}\right) \approx \mathbf{20.804}, \mathbf{51} \in$$

Gemäß der nachfolgenden Berechnung wird der Anteil der Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen an den Gesamtkosten des Engineerings ermittelt:

$$P_{\frac{C_{CO_2}}{C_{TC}}}^{2.1} = \frac{9.735,59 \in 9.735,59 \in 4,94 \%}{9.735,59 \in 4,400.000 \in +25.000 \in 9} \cdot 100 \% = 4,94 \%$$

### Szenario 2.2: Lieferant innerhalb Europas

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

Während des Engineerings der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung, reisen insgesamt sechs OEM-Mitarbeiter des Standorts Regensburg zehnmal zu einem Vorort-Meeting zu dem Lieferanten mit einem Pkw als Transportmittel. Die dadurch entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen belaufen sich auf 22,08324 t CO<sub>2</sub> e:

$$m_{t_{CO_2}}{}^{OEM-EU}\approx 22{,}08324t\ CO_2e$$

Die Berechnungen zu  $m_{t_{CO_2}}{}^{OEM-EU}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases im Abschnitt Szenario 2.2 zu finden.

Zudem reisen im Zuge des Engineerings der Anlage vier Mitarbeiter des Lieferanten für fünfzehn Vorort-Meetings innerhalb der Projektlaufzeit zu dem OEM mit einem Pkw als Transportmittel. Die dadurch verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen 22,08324 t CO<sub>2</sub>e:

$$m_{t_{CO_2}}^{EU-OEM} \approx 22,08324 t CO_2 e$$

Die Berechnungen zu  $m_{t_{CO_2}}{}^{EU-OEM}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases im Abschnitt Szenario 2.2 zu finden.

Am Ende der Entwicklungsphase der VIBN ein dreitägiges Meeting auf dem Gelände des Lieferanten zur Durchführung und Abnahme der VIBN notwendig ist. Hierfür reisen fünf OEM-Mitarbeiter täglich zum Standort des Lieferanten nach Polen.

$$m_{t_{CO_2}}^{OEM-EU\,(VIBN)} \approx 1,84027\;t\;CO_2e$$

Die Berechnungen zu  $m_{t_{CO_2}}^{OEM-EU\;(VIBN)}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases im Abschnitt Szenario 2.2 zu finden.

Die gesamten CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports im Engineering + VIBN ergeben sich somit gemäß der nachfolgenden Berechnung:

$$m_{t_{CO_2}}^{2.2} = 22,0832 \ t \ CO_2 e + 22,0832 \ t \ CO_2 e + 1,8403 \ t \ CO_2 e = 46,0068 \ t \ CO_2 e$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

Die Beauftragung eines Lieferanten mit dem Engineering der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung und der dazugehörigen VIBN ist standortunabhängig und hat keinen Einfluss auf eine Veränderung der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der elektronischen Geräte, da diese in beiden Fällen in gleichem Ausmaß eingesetzt werden. Somit:

$$m_{D_{elCO_2}}^{2.2} = m_{D_{elCO_2}}^{2.1} = 0.9612 \, t \, CO_2 e$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT sind identisch zu den CO<sub>2</sub>-Massenäquivalenten aus Szenario 2.1. Somit:

$$m_{ict_{CO_2}}^{2.2} = m_{ict_{CO_2}}^{2.1} = 0,5041 t CO_2 e$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Hotelübernachtung

Im Zuge der 10 viertägigen Vorort-Meetings in Polen, sind jeweils vier Hotelübernachtungen für die sechs OEM-Mitarbeiter notwendig. Dadurch ergeben sich CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 5,4288 t CO<sub>2</sub>:

$$m_{hotel_{CO_2}}^{OEM-EU~2.2} \approx 5,4288t~CO_2$$

Die Berechnungen  $m_{hotel_{CO_2}}{}^{OEM-EU\;2.2}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

Durch die 15 dreitägigen Vorort-Meetings bei dem OEM sind jeweils drei Hotelübernachtungen für die vier Lieferanten-Mitarbeiter notwendig. Die daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen 4,0716t CO<sub>2</sub>:

$$m_{hotel_{CO_2}}{}^{EU-OEM~2.2}~pprox$$
 4,0716 t  $CO_2$ 

Die Berechnungen  $m_{hotel_{CO_2}}{}^{EU-OEM\;2.2}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases zu finden.

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente durch die im Zuge des Engineerings notwendigen Hotelübernachtungen ergeben sich somit gemäß der nachfolgenden Berechnung:

$$m_{hotel_{CO_2}}{}^{2.2} = 4{,}0716\ t\ CO_2 + 5{,}4288\ t\ CO_2\ + 0{,}3393\ t\ CO_2 = 9{,}8397\ t\ CO_2$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

Die benötigte Bürofläche bei Beauftragung des Lieferanten in Europa mit dem Engineering der Anlage und der Entwicklung der VIBN weicht nicht von der benötigten Bürofläche aus Szenario 2.1 ab. Die Höhe CO<sub>2</sub>-Massenäquivalent der Bürogebäude bleiben daher unverändert. Somit:

$$m_{office_{CO_2}}^{2.2} = m_{office_{CO_2}}^{2.1} \approx 5,0425 t CO_2 e$$

### CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Gemäß den zuvor ermittelten CO<sub>2</sub>-Massenäquivalenten werden nachfolgend die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung inklusive VIBN bei Beauftragung des Lieferanten innerhalb Europa berechnet:

$$m_{Eng_{CO_2}}^{2.2} = 46,0068t CO_2 e + 0,9612 t CO_2 e + 0,5041 t CO_2 e + 5,0425 t CO_2 e + 9,8397 t CO_2 = 62,3544 t CO_2 e$$

### Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Die Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering ergeben sich gemäß nachfolgender Berechnung:

$$C_{CO_2}^{2.2} = 62,3544 \ t \ CO_2 e \cdot \left(30 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2} + 696 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2 e}\right) = 45.269, 26 \ \epsilon$$

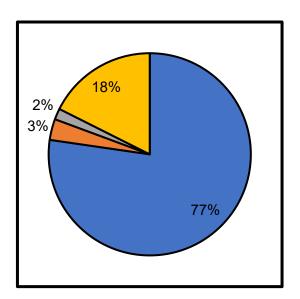
Der Anteil der Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen an den Gesamtkosten des Engineerings wird nachfolgend berechnet:

$$P_{\frac{C_{CO_2}}{C_{TC}}}^{2.2} = \frac{10.639,09 \in \{0.639,09 \in \{0.639$$

### Zusammenfassung

Durch den Einsatz der VIBN in den letzten sechs Monaten des Anlagenprojekts verringern sich die CO2-Gesamtmassenäquivalente in Szenario 2.1 um 20,30 t CO2e und in Szenario 2.2 um 15,80 t CO2e verglichen mit Szenario 1.1 und Szenario 1.2. Dies ist auf die deutliche Verringerung der CO2-Massenäquivalente der notwendigen CO2-Massenäquivalente des Personentransports zurückzuführen.

Die Kosten der CO2-Gesamtmassenäquivalente verringern sich dem zu Folge auch um 14.741,13 € in Szenario 2.1 und um 11.471,16 € in Szenario 2.2 durch den Einsatz der VIBN. Der Anteil der Kosten der CO2-Emissionen an den Gesamtkosten des Engineerings beläuft sich in Szenario 2.1 auf 4,94 % und in Szenario 2.2 auf 10,17 %. Abbildung 34 und Abbildung 33 visualisieren die prozentualen Anteile der CO2-Massenäquivalente der einzelnen Kategorien an den CO2-Gesamtmassenäquivalenten im Engineering.





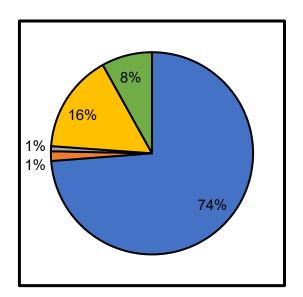


Abbildung 33 Prozentuale Verteilung der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente (Szenario 2.2); Quelle: eigen



### 7.2.4. Szenario 3: VIBN online inklusive automatischer Modellgenerierung mithilfe von AutomationML

In diesem Szenario erfolgt das Engineering der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung gemäß dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Ablauf des Fabrikplanungsprozesses. Zusätzlich erfolgt der Einsatz der VIBN und deren Durchführung online, d. h. die Durchführung der VIBN erfolgt virtuell in einer dreitägigen Videokonferenz, sodass die Anreise der fünf OEM-Mitarbeiter zum Standort des Lieferanten für die Durchführung und Abnahme der VIBN entfällt.

Außerdem erfolgt die Generierung des virtuellen Modells in diesem Szenario automatisch. Ziel der automatischen Modellgenerierung ist es den Aufwand der erstmaligen Modellerstellung zu reduzieren, da hier Engineering-Daten unterschiedlicher Disziplinen unter einem hohen technischen und organisatorischen Aufwand zusammengeführt werden müssen. Hierfür werden die Engineering-Daten der einzelnen Disziplinen digital gesammelt, weiterverarbeitet und für die weitere Nutzung dem *VIBN-Tool* zur Verfügung gestellt. Diese Engineering Daten sind im neutralen Austauschformat AutomationML beschrieben und strukturiert. Das VIBN-Tool zieht nun automatisch aus den zur Verfügung gestellten Engineering-Daten die richtigen Verhaltensmodelle an, bezeichnet diese korrekt und legt die dazugehörigen Ein- und Ausgangssignale der SPS an.

Durch die automatische Modellgenerierung wird der Aufwand der Modellerstellung um 50 – 80% reduziert im Vergleich zu der in Szenario 2 eingesetzten VIBN, da der Aufwand der manuellen Modellerstellung entfällt. Wie in Kapitel 10.4 Anhang 4 beschrieben, wird in diesem Szenario angenommen, dass sich die Zeit der Modellerstellung und der daraus resultierenden automatischen Modellgenerierung um 50% reduziert. Somit beträgt die Projektlaufzeit der VIBN drei Monate gegen Ende des Engineerings der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung. Dennoch sind, wie in Szenario 2, jeweils zusätzlich zwei VIBN-Experten seitens OEM und seitens des Lieferanten notwendig.

Im Folgenden erfolgt die Berechnung der Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Durchführung der VIBN online inklusive automatischer Modellgenerierung.

### Szenario 3.1: Standortnaher Lieferant innerhalb Deutschlands

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

Während des Engineerings der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung, reisen insgesamt sechs OEM-Mitarbeiter des Standorts Regensburg zweimal zu einem Vorort-Meeting zu dem Lieferanten in Fulda mit einem Pkw als Transportmittel. Die dadurch entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen belaufen sich auf 1,2362 t CO<sub>2</sub>e:

$$m_{t_{CO_2}}^{OEM-DE} \approx 1,2362 t CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{t_{CO_2}}{}^{OEM-DE}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases im Abschnitt Szenario 3.1 zu finden.

Zudem reisen im Zuge des Engineerings der Anlage vier Mitarbeiter des Lieferanten für zehn Vorort-Meetings innerhalb der Projektlaufzeit zu dem OEM mit einem Pkw als Transportmittel. Die dadurch verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen 4,1206 t CO<sub>2</sub>e:

$$m_{t_{CO_2}}^{DE-OEM} \approx 4,1206 t CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{t_{CO_2}}^{\ \ DE-OEM}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases im Abschnitt Szenario 3.1 zu finden.

Die gesamten CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports im Engineering ergeben sich somit gemäß der nachfolgenden Berechnung:

$$m_{t_{CO_2}}^{3.1} = 1,2362 \ t \ CO_2 e + 4,1206 \ t \ CO_2 e = 5,3568 \ t \ CO_2 e$$

### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

Die VIBN-Experten benutzen die elektronischen Geräte im gleichen Ausmaß wie in Szenario 2.1, jedoch lediglich in den letzten drei Monaten des Anlagenprojekts. Dadurch ergeben sich nachfolgende Werte der CO<sub>2</sub>-Emissionen der elektronischen Geräte:

$$m_{laptop_s}^{3.1} \approx 0.1635 t CO_2 e$$
 $m_{monitor}^{3.1} \approx 0.4689 t CO_2 e$ 
 $m_{desktop}^{3.1} \approx 0.073 t CO_2 e$ 
 $m_{smartphone}^{3.1} \approx 0.0255 t CO_2 e$ 
 $m_{router}^{3.1} \approx 0.106 t CO_2 e$ 

Die Berechnungen zu  $m_{laptop_s}^{3.1}$  " $m_{monitor}^{3.1}$ ", " $m_{desktop}^{3.1}$ ", " $m_{smartphone}^{3.1}$ ", und " $m_{router}^{3.1}$ " sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases im Abschnitt Szenario 3.1 zu finden.

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der elektronischen Geräte werden anhand nachfolgender Berechnung ermittelt:

$$m_{D_{el_{CO_2}}}^{3.1} = 0,1635 \ t \ CO_2 e + 0,4689 \ t \ CO_2 e + 0,073 \ CO_2 e + 0,0255 \ t \ CO_2 e + 0,106 \ t \ CO_2 e$$

$$= 0,8369 \ t \ CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

Durch den Einsatz der VIBN und der automatischen Modellgenerierung sind zu den regulären 138 Videokonferenzen zusätzlich zehn Videokonferenzen á einer Stunde notwendig. Zusätzlich ist durch die Durchführung der VIBN online am Ende der Entwicklungsphase ein dreitägiges virtuelles Meeting á sieben Stunden pro Tag notwendig. Die Anzahl der Teilnehmer der Videokonferenzen bleibt dabei identisch zu der in Szenario 2. Zudem bleibt der benötigte Speicherplatz von 65 GB sowie die Anzahl der zusätzlich gesendeten E-Mails im Vergleich zu Szenario 2 unverändert. Die Höhe der CO<sub>2</sub>-Emissionen der ICT sind nachfolgend aufgelistet:

$$m_{videoconference}^{3.1} \approx 0,0038 t CO_2 e$$
  $m_{datatransfer}^{3.1} = 0,017 t CO_2 e$   $m_{mail}^{3.1} = 0,4682 t CO_2 e$   $m_{storage}^{3.1} \approx 0,0137 t CO_2 e$ 

Die Berechnungen zu " $m_{videoconference}$  3.1", " $m_{datatransfer}$  3.1, " $m_{mail}$  3.1", und " $m_{storage}$  3.1" sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases im Abschnitt Szenario 3.1 zu finden.

Die durch die ICT entstehenden CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente werden anhand nachfolgender Berechnung ermittelt:

$$m_{ict_{CO_2}}{}^{3.1} = 0,0038\ t\ CO_2e + 0,017\ t\ CO_2e + 0,4682\ t\ CO_2e + 0,0137\ t\ CO_2e = 0,5027\ t\ CO_2e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

In den letzten drei Monaten des Anlagenprojekts benötigen die insgesamt vier VIBN-Experten ebenfalls jeweils 5 m² an Bürofläche. Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der Nutzung der Bürogebäude sind wie folgt:

$$m_{office_{CO_2}}^{3.1} \approx 4,7624 t CO_2 e$$

Die Berechnungen zu " $m_{office_{CO_2}}$ <sup>3.1</sup> sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases im Abschnitt Szenario 3.1 zu finden.

#### CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente des Engineerings ergeben sich gemäß der nachfolgenden Berechnung:

$$m_{Eng_{CO_2}}^{3.1} = 5,3568 t CO_2 e + 0,8369 t CO_2 e + 0,5027 t CO_2 e + 4,7624 t CO_2 e$$
  
= 11,4588  $CO_2 e$ 

#### Kosten der CO2-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Entsprechend der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente des Engineerings werden die Kosten dieser im Folgenden ermittelt:

$$C_{CO_2}^{3.1} = 11,4588 \ t \ CO_2 e \ \cdot \left(30 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2} + 696 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2 e}\right) = 8.319,09 \ \epsilon$$

In der nachfolgenden Berechnung wird der Anteil der Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen an den Gesamtkosten des Engineerings ermittelt:

$$P_{\frac{C_{CO_2}}{C_{TC}}}^{3.1} = \frac{8.319,09 \in \mathbb{R}}{8.319,09 \in \mathbb{R} + 400.000 \in \mathbb{R}} \cdot 100 \% = 2,04 \%$$

#### Szenario 3.2: Lieferant innerhalb Europas

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

Die Anzahl der Vorort-Meetings und die Anzahl der Teilnehmer bleiben bei der Durchführung der VIBN online im Vergleich zu Szenario 3.1 identisch. Somit:

$$m_{t_{CO_2}}^{3.2} = m_{t_{CO_2}}^{3.1} = 5,1527 \ t \ CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

Der Wert der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der elektronischen Geräte wird von der Beauftragung des Lieferanten innerhalb Europas im Vergleich zur Beauftragung des Lieferanten in Szenario 3.1 nicht beeinflusst, da die elektronischen Geräte in beiden Fällen im gleichen Ausmaß eingesetzt werden. Somit:

$$m_{D_{el_{CO_2}}}^{\phantom{D_{el_{CO_2}}}3.2}=m_{D_{el_{CO_2}}}^{\phantom{D_{el_{CO_2}}}3.1}=0.8369~t~CO_2e^{-3.2}$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT entsprechen bei Beauftragung des Lieferanten in Szenario 3.2 dem der bei Beauftragung des Lieferanten in Szenario 3.1. Somit:

$$m_{ict_{CO_2}}^{}{}^{3.2} = m_{ict_{CO_2}}^{}{}^{3.1} = 0,5027 \ t \ CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Hotelübernachtung

Im Zuge des viertägigen Vorort-Meetings bei dem Lieferanten in Polen, sind jeweils drei Hotelübernachtungen für die sechs OEM-Mitarbeiter notwendig. Dadurch ergeben sich CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 0,5429 t CO<sub>2</sub>:

$$m_{hotel_{CO_2}}{}^{OEM-EU} \approx 0,5429 t CO_2$$

Die Berechnungen zu  $m_{hotel_{CO_2}}{}^{OEM-EU}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases im Abschnitt Szenario 3.2 zu finden.

Durch die zwei dreitägigen Vorort-Meetings bei dem OEM sind jeweils drei Hotelübernachtungen für die vier Mitarbeiter des Lieferanten notwendig. Die daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen 0,2714 t CO<sub>2</sub>:

$$m_{hotel_{CO_2}}{}^{EU-OEM} \approx 0,2714~t~CO_2$$

Die Berechnungen zu  $m_{hotel_{CO_2}}{}^{EU-OEM}$  sind im Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases VIBN im Abschnitt Szenario 3.2 zu finden.

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente durch die im Zuge des Engineerings notwendigen Hotelübernachtungen ergeben sich somit gemäß der nachfolgenden Berechnung:

$$m_{hotel_{CO_2}}{}^{3.2} = 0{,}5429\ t\ CO_2 + 0{,}2714\ t\ CO_2 = 0{,}8143\ t\ CO_2$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

Der Wert der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der Bürogebäude bleibt verglichen mit Szenario 3.1 unverändert. Somit:

$$m_{office_{CO_2}}^{3.2} \approx 4,7624 \ t \ CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente, die im Engineering der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung bei Beauftragung des Lieferanten innerhalb Europas und unter Einsatz der VIBN und deren Durchführung online entstehen, werden im Folgenden berechnet:

$$m_{Eng_{CO_2}}^{3.2} = 5,1527 \ t \ CO_2 e + 0,8369 \ t \ CO_2 e + 0,5027 \ t \ CO_2 e + 4,7624 \ t \ CO_2 e + 0,8143 \ t \ CO_2 = 12,0690 \ t \ CO_2 e$$

#### Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Anhand der nachfolgenden Berechnung werden die Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering ermittelt:

$$C_{CO_2}^{3.2} = 12,0690 \ t \ CO_2 e \ \cdot \left(30 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2} + 696 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2 e}\right) = 8.762,09 \ \epsilon$$

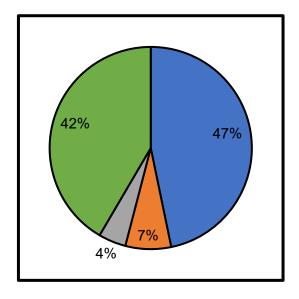
Dementsprechend ergibt sich gemäß der nachfolgenden Berechnung der Anteil der Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen an den Gesamtkosten des Engineerings:

$$P_{\frac{C_{CO_2}}{C_{TC}}}^{3.2} = \frac{8.762,09 \in \mathbb{R}}{8.762,09 \in +400.000 \in \mathbb{R}} \cdot 100 \% = 2,14 \%$$

#### Zusammenfassung

Durch die Durchführung der VIBN online inklusive automatischer Modellgenerierung können die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering in Szenario 3.1 um insgesamt 17,2 t CO<sub>2</sub>e im Vergleich zum Einsatz der VIBN in Szenario 2.1 und in Szenario 3.2 um 50,29 t CO<sub>2</sub>e im Vergleich zu Szenario 2.2 reduziert werden. Dies ist hauptsächlich auf die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports um 16,7916 t CO<sub>2</sub>e in Szenario 3.1, die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten des Personentransports um 40,8540 t CO<sub>2</sub>e zurückzuführen.

Dementsprechend reduzieren sich die Kosten um 12.485,40 € in Szenario 3.1 und um 36.507,12 € in Szenario 3.2 verglichen mit Szenario 2.1 und Szenario 2.2. Der Anteil der Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalenten an den Gesamtkosten des Engineerings beträgt in Szenario 3.1 2,04 % und in Szenario 3.2 2,14 %. Abbildung 36 und Abbildung 35 veranschaulichen die prozentualen Anteile der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente an den CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalenten im Engineering.



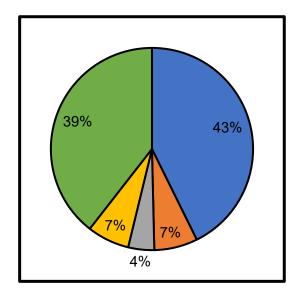


Abbildung 36 Prozentuale Verteilung der CO2-Massenäquivalente (Szenario 3.1); Quelle: eigen

Abbildung 35 Prozentuale Verteilung der CO2-Massenäquivalente (Szenario 3.2); Quelle: eigen

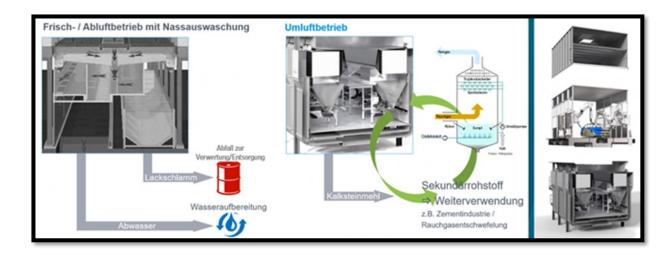


# 7.3. Digitale Energieplanung- und Simulation auf Basis von AutomationML

# 7.3.1. Beschreibung eines exemplarischen Use-Case aus der Lackiererei in der Automobilproduktion

Die Lackierprozesse in der Industrie sind von entscheidender Bedeutung für die Qualität und Langlebigkeit von Produktoberflächen. Traditionell kommen Nassabscheidesysteme zum Einsatz, die den Overspray während des Lackiervorgangs abscheiden. In den letzten Jahren hat sich jedoch ein Trend zur Trockenabscheidung entwickelt, der umweltfreundlicher ist und die Betriebskosten senken kann. Dieser Use-Case beschäftigt sich mit dem Umbau einer bestehenden Lackieranlage von der Nass- zur Trockenabscheidung. Die Nassabscheidung ist ein Prozess, bei dem der Overspray durch ein Wasser-Vorhang-System eingefangen wird. Die lackhaltige Luft wird durch ein Wasserbad geleitet, wobei die Lackpartikel im Wasser gebunden und anschließend als Schlamm abgeschieden werden. Dieses Verfahren erfordert eine kontinuierliche Wasseraufbereitung und -entsorgung, was sowohl kosten- als auch umweltintensiv ist. Im Gegensatz dazu setzt die Trockenabscheidung auf Materialien wie Karton- oder Faserfilter, welche die Lackpartikel aus der Luft aufnehmen. Diese Technologie ermöglicht eine einfachere Wiederverwendung oder Entsorgung der gesammelten Feststoffe und reduziert den Wasserverbrauch um bis zu 13 Millionen Liter Wasser im Jahr. [150]

In Abbildung 37 ist der Unterschied der beiden Methoden grafisch zusammengefasst. Auf der linken Seite befindet sich der Prozess der Nassabscheidung und auf der rechten Seite die Trockenabscheidung.



#### Abbildung 37 Use-Case Trockenabscheidung in der Lackiererei [150]

Für die folgenden Berechnungen der Use Cases wurde wiederraum der gleiche OEM mit Standort in Regensburg und ein standortnaher Lieferant ein Anlagenbauer mit Hauptsitz in Bietigheim-Bissingen in Deutschland, und somit einer Entfernung von ca. 281 km von Regensburg mit dem Bau der Anlage für als Beispiellieferant angenommen [150].

# 7.3.2. Szenario1: Anlagenaufbau ohne Energieplanung bzw. Energiesimulation

In diesem Szenario entwickelt der Lieferant die Anlage für die Trockenabscheidung gemäß den allgemeinen Spezifikationen im Automobilbereich. Das Engineering der Anlage erfolgt gemäß dem Kapitel 3.2, jedoch ohne Einsatz einer Energiesimulation.

Da die Energiesimulation entfällt wird die Anlage auf dem Gelände des OEMs aufgebaut und getestet. Sind die Tests zum Thema Energieverbrauch und Verfügbarkeit erfolgreich, erfolgt die Abnahme der Anlage durch den OEM. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in diesem Szenario durch die Beauftragung eines standortnahen Lieferanten in Deutschlands entstehen, werden im Folgenden anhand der ECEE-Methode berechnet.

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des zusätzlichen Materialbedarfs

Aufgrund der fehlenden Möglichkeit einer Energieplanung bzw. Simulation für die Zukunft, wird laut Expertenaussagen im Regelfall die Anlage zwischen 10-20% zu groß ihrer zukünftigen Betriebsweise ausgelegt. Dieser zusätzliche Materialbedarf besteht zu 80% aus dem Material Stahl, welches dann als Referenz für die folgenden Berechnungen genommen wird.

Die dadurch entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund des erhöhten Materialbedarfs von ca. 10t Stahl belaufen sich in Summe auf 21,8 t CO<sub>2</sub> e:

$$m_{Mat_{CO_2}}^{~~4.1} \approx 21.8~t~CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{Mat_{CO_2}}^{4.1}$  sind im Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation zu finden.

#### CO<sub>2</sub>-Massenäguivalente des Personentransports

Während des Engineerings der Anlage für den Umbau der Trockenabscheidung, reisen insgesamt vier Lieferanten Mitarbeiter 20-Mal zu einem Vorort-Meeting nach Regensburg mit einem Pkw als Transportmittel. Die dadurch entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen belaufen sich auf 7,3285 t CO<sub>2</sub> e:

$$m_{t_{CO_2}}^{4.1} \approx 7,3285 \ t \ CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{t_{CO_2}}^{4.1}$  sind im Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation zu finden.

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

Synchron zu Kapitel 7.2 wird eine durchschnittliche tägliche Nutzungsdauer der elektronischen Geräte von sieben Stunden angenommen. Zudem wird angenommen, dass jeder Mitarbeiter zwei Monitore verwendet und jeweils ein Router bei dem OEM und ein Router bei dem Lieferanten eingesetzt wird. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der einzelnen elektronischen Geräte, die im Engineering in diesem Szenario zum Einsatz kommen, sind nachfolgende aufgelistet:

$$m_{laptop_s}^{4.1} \approx 0,1539 \ t \ CO_2 e$$
 $m_{monitor}^{4.1} \approx 0,4287 \ t \ CO_2 e$ 
 $m_{smartphone}^{4.1} \approx 0,024 \ t \ CO_2 e$ 
 $m_{router}^{4.1} \approx 0,106 \ t \ CO_2 e$ 

Die Berechnungen " $m_{laptop_s}$ <sup>4.1</sup>", " $m_{monitor}$ <sup>4.1</sup>", " $m_{smartphone}$ <sup>4.1</sup>", und " $m_{router}$ <sup>4.1</sup>" sind im Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation zu finden.

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der elektronischen Geräte ergeben sich gemäß nachfolgender Berechnung:

$$m_{D_{el_{CO_2}}}^{\quad \ \, 4.1} = 0,1539\ t\ CO_2e + 0,4287\ t\ CO_2e + 0,024\ t\ CO_2e \ + 0,106\ t\ CO_2e \ = 0,7126\ t\ CO_2e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

Für das Engineering der Anlage zur Trockenabscheidung sind insgesamt 56 Videokonferenzen á 1,5 Stunden mit vier Teilnehmern seitens OEM und vier Teilnehmern seitens Lieferanten notwendig. Zudem werden pro Arbeitstag fünf E-Mails bei dem OEM intern, zehn E-Mails bei einem Lieferanten intern und fünf E-Mails zwischen OEM und Lieferant verschickt. Insgesamt entstehen während des Engineerings 60 GB an Daten, die auf Servern in Rechenzentren gespeichert werden. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der ICT sind wie folgt:

$$m_{videoconference}^{4.1} \approx 0,0013 \ t \ CO_2 e$$
 $m_{datatransfer}^{4.1} = 0,016 \ t \ CO_2 e$ 
 $m_{mail}^{4.1} == 0,4675 \ t \ CO_2 e$ 
 $m_{storage}^{4.1} =\approx 0,013 \ t \ CO_2 e$ 

Die Berechnungen " $m_{videoconference}$  <sup>4.1</sup>", " $m_{datatransfer}$  <sup>4.1</sup>", " $m_{mail}$  <sup>4.1</sup>", und " $m_{storage}$  <sup>4.1</sup>" sind im Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation zu finden.

Dementsprechend ergeben sich die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT gemäß folgender Berechnung:

$$m_{ict_{CO_2}}{}^{4.1} = 0,0032\ t\ CO_2e + 0,016\ t\ CO_2e + 0,4675\ t\ CO_2e + 0,013\ t\ CO_2e = 0,4974\ t\ CO_2e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

Pro Mitarbeiter wird eine Bürofläche von 5 m² benötigt. Dadurch werden in Summe CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 2,5213 t CO<sub>2</sub>e verursacht:

$$m_{office_{CO_2}}^{4.1} \approx 2,5213 \ t CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{office}^{4.1}$  sind im Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation zu finden.

#### CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Durch die vorhergehenden Berechnungen der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der einzelnen Emissionsquellen, können die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering der Trockenabscheidung gemäß nachfolgender Berechnung berechnet werden:

$$m_{Eng_{CO_2}}^{4.1} = 43,26672 \ t \ CO_2 e + 0,7126 \ t \ CO_2 e + 0,4997 \ t \ CO_2 e + 4,4822 \ t \ CO_2 e$$
  
= 32,8598  $t \ CO_2 e$ 

#### Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäguivalente im Engineering

Die Kosten, der durch das Engineering verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen werden anhand nachfolgender Berechnung ermittelt:

$$C_{CO_2}^{4.1} = 32,8598 \ t \ CO_2 e \cdot \left(30 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2} + 696 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2 e}\right) \approx 23856,23\epsilon$$

Die Gesamtkosten für das Engineering dieses Use Cases wurden nach Rücksprache mit Experten auf ca. 200.000€ abgeschätzt. Dementsprechend ergibt sich der Anteil der Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering an den Gesamtkosten des Engineerings wie folgt:

$$P_{\frac{C_{CO_2}}{C_{TC}}}^{4.1} = \frac{23856,23 \in 0}{23856,23 \in 0.0000 \in 0} \cdot 100 \% = 10,65 \%$$

#### Zusammenfassung

Insgesamt belaufen sich die CO₂-Emissionen in diesem Szenario 1 ohne Energiesimulation auf ca. 32,85 t CO₂e. Die zusätzlichen Kosten der CO₂-Emissionen im Engineering betragen dementsprechend aktuell 23.856,23 € ohne eine Energieplanung bzw. Simulation im Engineering. Der zusätzliche Materialbedarf ist hier mit Abstand der größte Emissionstreiber.

Die Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen entsprechen somit ca. 10,65 % der Gesamtkosten des Engineerings. Abbildung 38 verschafft einen Überblick über die prozentualen Anteile der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der einzelnen Kategorien an den CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalenten im Engineering, wobei der zusätzliche Materialbedarf mit Abstand sich als die größte Emissionsquelle darstellt.

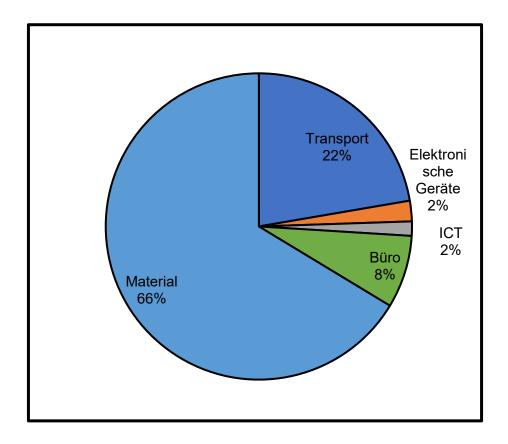


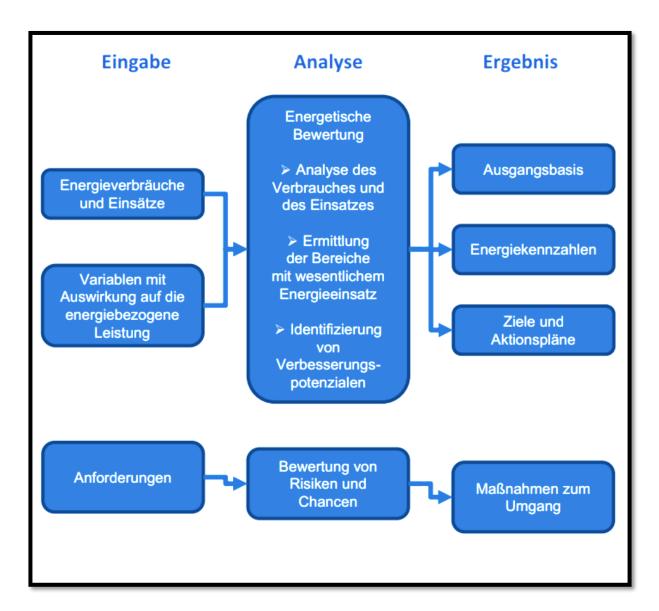
Abbildung 38 Prozentuale Verteilung der CO2-Massenäquivalente in Szenario 4.1

### 7.3.3. Szenario2: Energieplanung im klassischen Engineering

Die Energieplanung in einer Lackiererei ist ein kritischer Aspekt, der direkten Einfluss auf die Betriebskosten und die Umweltverträglichkeit des Produktionsprozesses hat. Ziel ist es, den Energieverbrauch zu optimieren und gleichzeitig die Qualität und Effizienz der Lackierprozesse zu gewährleisten. Durch die Implementierung von energieeffizienten Technologien, wie z.B. Trockenabscheidungssystemen anstelle von herkömmlichen Nassabscheidern, kann der Energiebedarf für die Luftaufbereitung und -entsorgung deutlich reduziert werden. Eine sorgfältige Planung und Überwachung des Energieverbrauchs, unterstützt durch moderne Steuerungs- und Simulationstools, ermöglicht es Lackierereien, ihre Energieeffizienz zu maximieren und einen nachhaltigeren Betrieb zu fördern.

Energieplanung soll im Einklang mit der Energiepolitik und den angestrebten Zielen des Unternehmens und des Landes erstellt werden. Notwendige Inputs für Planung sollen bestimmt und analysiert werden und weiterfolgend sollen notwendige Schritte zum Ergreifen von Maßnahmen festgelegt werden. Als Beispiele für den Input sind; Gesamtenergieverbrauch, Art der eingesetzten Energieträger, wie viel Energie das Unternehmen selbst produziert, wie viel es extern zugekauft wird.

Als Beispiele für mögliche Outputs sind; Bestimmung der relevanten Kennzahlen, Ziele, Maßnahmen und Roadmap zur Erreichung der angestrebten Ziele. Eine detaillierter Analyseprozess ist erforderlich, um Outputs von Inputs zu erreichen. In diesem Prozess soll wesentlicher Energieverbrauchern, Energieeinsparungsmöglichkeiten und ob mögliche Maßnahmen anwendbar ist, analysiert werden.



#### Abbildung 39 Energieplanung nach ISO 50001:2018 [151, p. 31]

Die Energieplanung und Simulation im klassischen Anlagenenstehungsprozess ohne digitales Abbild basiert zu großen Teilen jedoch auf vielen manuellen Prozessen und Office bzw. Excel Funktionalitäten.

Die Nutzung von Excel für Energie-Planungen und -Simulationen ist wegen seiner Benutzerfreundlichkeit und Flexibilität beliebt, stößt jedoch bei komplexen Aufgaben an Grenzen. Excel mangelt es an spezialisierten Simulationsfunktionen, und die Fehleranfälligkeit kann die Zuverlässigkeit der Ergebnisse beeinträchtigen.

Zudem sind die Möglichkeiten für die Verarbeitung großer Datenmengen und fortgeschrittene Visualisierungen begrenzt. In Teams kann die Zusammenarbeit durch Schwierigkeiten bei der Versionierung erschwert werden. Für detaillierte und anspruchsvolle Planungen soll es daher nicht verwendet werden. Anhand des Use-Case aus Kapitel 7.3.1 wird in dem folgenden Abschnitt die Anwendung der ECEE-Methode für die klassische Energieplanung untersucht:

#### CO2-Massenäquivalente des zusätzlichen Materialbedarfs

Auf Basis einer klassischen Energieplanung für Produktionsanlagen, wird laut Expertenaussagen im Regelfall die Anlage maximal 5% zu groß ihrer zukünftigen Betriebsweise ausgelegt. Dieser reduzierte zusätzliche Materialbedarf im Vgl. zu Szenerio 1 besteht wiederum zu 80% aus dem Material Stahl, welches dann als Referenz für die folgenden Berechnungen genommen wird. Die dadurch entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund des erhöhten Materialbedarfs von ca. 4t Stahl belaufen sich in Summe auf 8,72 t CO<sub>2</sub> e:

$$m_{Mat_{CO_2}}^{4.2} \approx 8,72 t CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{Mat_{CO_2}}^{4.2}$  sind im Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation zu finden.

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

Während des Engineerings der Anlage für den Umbau der Trockenabscheidung, reisen insgesamt sechs Lieferanten Mitarbeiter 15-Mal zu einem Vorort-Meeting nach Regensburg mit einem Pkw als Transportmittel. Die dadurch entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen belaufen sich auf 8,2445 t CO<sub>2</sub> e:

$$m_{t_{CO_2}}^{4.2} \approx 8,2445t \ CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{t_{CO_2}}^{4.2}$  sind im Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation zu finden.

#### CO<sub>2</sub>-Massenäguivalente elektronischer Geräte

Synchron zu Kapitel 7.3.2 wird eine durchschnittliche tägliche Nutzungsdauer der elektronischen Geräte von sieben Stunden angenommen. Zudem wird angenommen, dass jeder Mitarbeiter zwei Monitore verwendet und jeweils ein Router bei dem OEM und ein Router bei dem Lieferanten eingesetzt wird.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der einzelnen elektronischen Geräte, die im Engineering in diesem Szenario zum Einsatz kommen, sind nachfolgende aufgelistet:

$$m_{laptop_s}^{4.2} \approx 0.1924 t CO_2 e$$
 $m_{monitor}^{4.2} \approx 0.5091 t CO_2 e$ 
 $m_{smartphone}^{4.2} \approx 0.027 t CO_2 e$ 
 $m_{router}^{4.2} \approx 0.106 t CO_2 e$ 

Die Berechnungen " $m_{laptop_s}$ <sup>4.2</sup>", " $m_{monitor}$ <sup>4.2</sup>", " $m_{smartphone}$ <sup>4.2</sup>", und " $m_{router}$ <sup>4.2</sup>" sind im Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation zu finden.

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der elektronischen Geräte ergeben sich gemäß nachfolgender Berechnung:

$$m_{D_{el_{CO_2}}}^{4.2} = 0,1924 \ t \ CO_2 e + 0,5091 \ t \ CO_2 e + 0,027 \ t \ CO_2 e \ + 0,106 \ t \ CO_2 e \ = 0,8345 \ t \ CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

Für die ICT werden die gleichen Rahmenbedingungen wie in Szenario 1 angenommen, da die elektronischen Anforderungen sich bei einer klassischen Energiesimulation kaum ändern im Vergleich zu einem Engineering ohne Energiesimulation.

$$\begin{split} m_{videoconference}^{~4.2} = ~m_{videoconference}^{~4.1} \approx 0,0013~t~CO_2e \\ \\ m_{datatransfer}^{~4.2} = m_{datatransfer}^{~4.1} \approx 0,016~t~CO_2e \\ \\ m_{mail}^{~4.2} = m_{mail}^{~4.1} = 0,4675~t~CO_2e \\ \\ m_{storage}^{~4.2} = ~m_{storage}^{~4.1} \approx 0,013~t~CO_2e \end{split}$$

Dementsprechend ergeben sich die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT gemäß folgender Berechnung:

$$m_{ict_{CO_2}} \, ^{4.2} = 0,0032 \, t \, CO_2 e + 0,016 \, t \, CO_2 e + 0,4675 \, t \, CO_2 e + 0,013 \, t \, CO_2 e = 0,4974 \, t \, CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

Pro Mitarbeiter wird wieder eine Bürofläche von 5 m² benötigt. Dadurch werden in Summe CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 5,3227 t CO<sub>2</sub>e verursacht:

$$m_{office_{CO_2}}^{4.2} \approx 5{,}3227 \ t CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{office}^{4.2}$  sind im Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation zu finden.

#### CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäguivalente im Engineering

Durch die vorhergehenden Berechnungen der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der einzelnen Emissionsquellen, können die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering der Trockenabscheidung gemäß

nachfolgender Berechnung berechnet werden:

$$m_{Eng_{CO_2}}^{4.2} = 8,2445 t CO_2 e + 0,8345 t CO_2 e + 0,5041 t CO_2 e + 5,3227 t CO_2 e$$
  
= 14,9058 t CO\_2 e

#### Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Die Kosten, der durch das Engineering verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen werden anhand nachfolgender Berechnung ermittelt:

$$C_{CO_2}^{4.2} = 14,9058 \ t \ CO_2 e \cdot \left(30 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2} + 696 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2 e}\right) \approx 10821,60 \epsilon$$

Die Gesamtkosten für das Engineering dieses Use Cases wurden nach Rücksprache mit Experten auf ca. 230.000€ abgeschätzt. Dementsprechend ergibt sich der Anteil der Kosten der CO₂-Emissionen im Engineering an den Gesamtkosten des Engineerings wie folgt:

$$P_{\frac{C_{CO_2}}{Crc}}^{4.2} = \frac{10821,60 \in 10000}{10821,60 \in +230.000 \in 10000} \cdot 100\% = 4,49\%$$

#### Zusammenfassung

Insgesamt belaufen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Szenario 2 mit klassischer Energieplanung auf ca. 14,91 t CO<sub>2</sub>e. Die zusätzlichen Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering betragen dementsprechend nur noch 10.821,60. Gegenüber Szenario 1 gelang es, die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 55% zu senken. Dies ist vorallem auf den reduzierten Materialbedarf zurückzuführen.

Die Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen entsprechen somit ca. 4,49 % der Gesamtkosten des Engineerings.

Abbildung 40 verschafft einen Überblick über die prozentualen Anteile der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der einzelnen Kategorien an den CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalenten im Engineering, wobei sich der zusätzliche Materialbedarf und die Transportkosten als die größten Emissionsquellen darstellen.

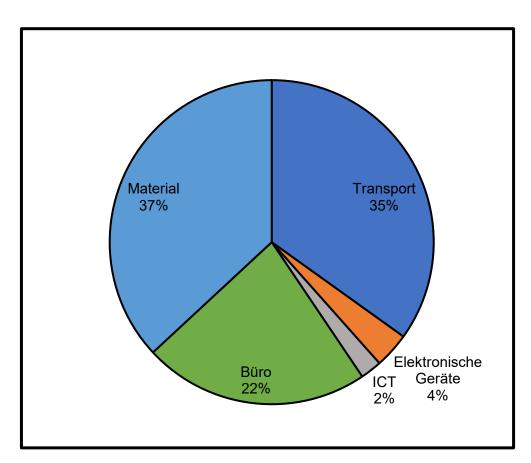


Abbildung 40 Prozentuale Verteilung der CO2-Massenäquivalente in Szenario 4.2

## 7.3.4. Szenario3: Digitale Energieplanung- und simulation basierend auf AutomationML Strukturen

Die digitale Transformation der Industrie erfordert innovative Ansätze zur Planung und Simulation von Energiesystemen, wobei AutomationML (Automation Markup Language) sich als ein wichtiger Standard für den Datenaustausch in der Automatisierungstechnik etabliert hat, wie bereits im Kapitel 3.3 erklärt.

Die Anwendung von AutomationML für die digitale Energieplanung und -simulation zielt darauf ab, Effizienz und Nachhaltigkeit in Produktionsprozessen zu steigern. Die Verwendung von AutomationML in der Energieplanung ermöglicht eine standardisierte Beschreibung von Energieflüssen und -systemen, was die Integration verschiedener Komponenten und Systeme in die digitale Planungsumgebung erleichtert.

Bei der Modellierung eines digitalen Abbildes von Energieflüssen werden alle relevanten Energieflüsse und -verbraucher innerhalb einer Anlage erfasst. AutomationML fungiert hier als Schnittstelle, die es ermöglicht, die Daten aus verschiedenen Quellen zu sammeln und zu strukturieren. Für die Simulation von Energiesystemen können spezialisierte Werkzeuge eingesetzt werden, wobei die Herausforderung darin besteht, diese Tools mit den in AutomationML beschriebenen Daten zu verknüpfen.

Hierfür sind entsprechende Schnittstellen und Konverter notwendig. Mit den vorbereiteten Daten können Simulationen durchgeführt werden, um das Verhalten des Energiesystems unter verschiedenen Bedingungen zu analysieren, einschließlich Lastflusssimulationen, Peak-Shaving-Analysen und die Optimierung von Energieverbrauchsmustern.

Die wichtigsten Inputs für das digitale Modell einer Produktionsanlage zur Energiesimulation sind die Layoutplanung und die elektrische Planung.

Das Layout einer Produktionsanlage wird generell in einer Software wie z.B. Microstation, Autocad oder ähnlicher Software geplant und kann mithilfe einer AutomationML Schnittstelle ausgeleitet werden. [152, p. 10] Das Schema eines ausgeleiteten Layouts in AutomationML beinhaltet folgende Inhalte [152, p. 11]:

- grobes Layout der Produktionslinien
- Mengenstruktur
- Prognose und Kosten der kompletten Produktionslinie und des Engineerings
- Aufbau der gesamten Ausrüstung mit allen darin enthaltenen Elementen
- Positionen
- Koordinaten
- Nullpunkte

Die Ausleitung aus der elektrischen Anlagenplanung in Form von AutomationMI beinhaltet alle technischen Geräte, die mit elektrischer Energie betrieben werden. Dies betrifft insbesondere Antriebs-, Steuerungs-, Mess- und Regeltechnik. Automatisierung und Energieverteilung. Folgende für die Simulation relevante Inhalte sind darin enthalten:

- Konstruktion des Schaltschranklayouts
- Verkabelung
- schematische Darstellung des elektrischen Plans der Anlage
- Schrankanordnung
- Stücklisten

Die folgende Abbildung 41 zeigt das Schema zum Aufbau einer digitalen Energiesimulation in Modelica.

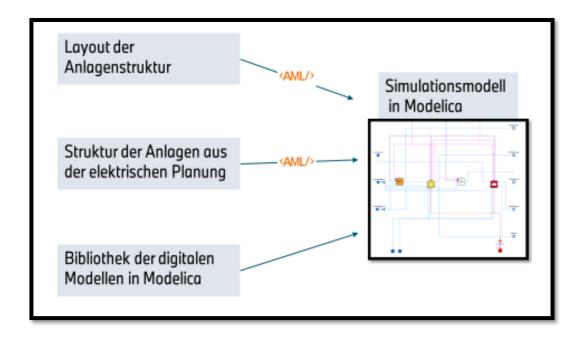


Abbildung 41 Schematische Darstellung der Datenflüsse der digitalen Energiesimulation

Als Resultat nach dem Zusammenführen der beiden Inputs aus dem Layout und der Elektroplanung erhält man eine komplette Struktur der zu simulierenden Produktionsanlage. Diese Struktur ist in folgender Abbildung 42 zusammengefasst dargestellt:

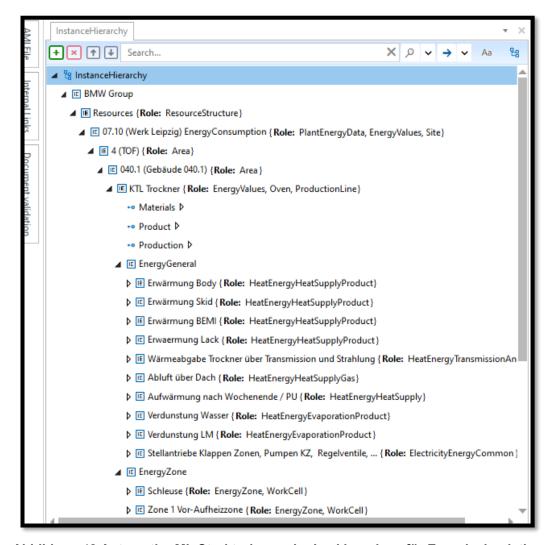


Abbildung 42 AutomationML Strukturbaum der Lackieranlage für Energiesimulation

Zu dieser Struktur werden dann die jeweiligen Simulationsmodelle in Modelica hinzufügt. Die Simulationsmodelle können grundlegend auch als neutrale Verhaltensmodelle z.B. als FMI (Functional Mock-up Interface) beschrieben und in AutomationML abgebildet werden. [21]

Die digitale Energieplanung und Simulation auf Basis von AutomationML bietet ein großes Potenzial für die Optimierung von Energiesystemen in der Industrie. Durch die Standardisierung des Datenaustauschs können verschiedene Systeme effektiv integriert und simuliert werden, was zu einer verbesserten Datenqualität und Zeitersparnis führt.

Anhand des Use-Case aus Kapitel 7.3.1 wird in dem folgenden Abschnitt die Anwendung der ECEE-Methode für die digitale Energieplanung untersucht:

Aufgrund der digitalen Energieplanung incl. Simulation für Produktionsanlagen, wird laut Expertenaussagen aus dem Bereich der Lackiererei im Regelfall die Anlage nicht zu groß ihrer zukünftigen Betriebsweise ausgelegt. Somit fallen hiermit keine CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente bzgl. Material an.

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

Während des Engineerings der Anlage für den Umbau der Trockenabscheidung, reisen insgesamt sechs Lieferanten Mitarbeiter nur fünf Mal zu einem Vorort-Meeting nach Regensburg mit einem Pkw als Transportmittel. Die dadurch entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen belaufen sich auf 2,7482 t CO<sub>2</sub> e:

$$m_{t_{CO_2}}^{4.3} \approx 2,7482 \ t \ CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{t_{CO_2}}^{4.3}$  sind im Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation zu finden.

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

Synchron zu Kapitel 7.3.2 wird eine durchschnittliche tägliche Nutzungsdauer der elektronischen Geräte von sieben Stunden angenommen. Zudem wird wiederum angenommen, dass jeder Mitarbeiter zwei Monitore verwendet und jeweils ein Router bei dem OEM und ein Router bei dem Lieferanten eingesetzt wird. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der einzelnen elektronischen Geräte, die im Engineering in diesem Szenario zum Einsatz kommen, unterscheiden sich somit nicht vom Szenario 2:

$$m_{laptop_s}^{4.3} = m_{laptop_s}^{4.2} \approx 0,1924 t CO_2 e$$
 $m_{monitor}^{4.3} = m_{monitor}^{4.2} \approx 0,5091 t CO_2 e$ 
 $m_{smartphone}^{4.3} = m_{smartphone}^{4.2} \approx 0,027 t CO_2 e$ 
 $m_{router}^{4.3} = m_{router}^{4.2} \approx 0,106 t CO_2 e$ 

Die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der elektronischen Geräte ergeben sich gemäß nachfolgender Berechnung:

$$m_{D_{el_{CO_2}}}{}^{4.3} = m_{D_{el_{CO_2}}}{}^{4.2} = 0{,}8345 \ t \ CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

Durch den Einsatz der digitalen Energieplanung sind zu den regulären 138 Videokonferenzen zusätzlich 10 Videokonferenzen á einer Stunde notwendig. Zusätzlich ist online am Ende der Entwicklungsphase ein dreitägiges virtuelles Meeting á sieben Stunden pro Tag notwendig. Die Anzahl der Teilnehmer der Videokonferenzen bleibt dabei identisch zu der in Szenario 2.

Zudem bleibt der benötigte Speicherplatz von 65 GB sowie die Anzahl der zusätzlich gesendeten E-Mails im Vergleich zu Szenario 2 unverändert. Die Höhe der CO2-Emissionen der ICT sind nachfolgend aufgelistet:

$$m_{videoconference}^{4.3} = 0.0038 t CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{videoconference}^{4.3}$  sind im Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation zu finden.

$$m_{datatransfer}^{4.3} = m_{datatransfer}^{4.2} \approx 0,016 t CO_2 e$$
 
$$m_{mail}^{4.3} = m_{mail}^{4.2} = 0,4675 t CO_2 e$$
 
$$m_{storage}^{4.3} = m_{storage}^{4.2} \approx 0,013 t CO_2 e$$

Dementsprechend ergeben sich die CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT gemäß folgender Berechnung:

$$m_{ict_{CO_2}} \, ^{4.3} = 0,0038 \, t \, CO_2 e + 0,016 \, t \, CO_2 e + 0,4675 \, t \, CO_2 e + 0,013 \, t \, CO_2 e = 0,5027 t \, CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

Pro Mitarbeiter wird wieder eine Bürofläche von 5 m² benötigt. Dadurch werden in Summe CO₂-Emissionen in Höhe von 5,6028 t CO₂e verursacht:

$$m_{office_{CO_2}}^{4.3} \approx 5,6028 \ t \ CO_2 e$$

Die Berechnungen  $m_{office}^{4.3}$  sind im Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation zu finden.

#### CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Durch die vorhergehenden Berechnungen der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der einzelnen Emissionsquellen, können die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering der Trockenabscheidung gemäß

nachfolgender Berechnung berechnet werden:

$$m_{Eng_{CO_2}}^{4.3} = 8,2445 t CO_2 e + 0,8345 t CO_2 e + 0,5041 t CO_2 e + 5,3227 t CO_2 e$$
  
= 9,6881 t CO\_2 e

#### Kosten der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente im Engineering

Die Kosten, der durch das Engineering verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen werden anhand nachfolgender Berechnung ermittelt:

$$C_{CO_2}^{4.2} = 14,9058 \ t \ CO_2 e \cdot \left(30 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2} + 696 \ \frac{\epsilon}{t \ CO_2 e}\right) \approx 7033,58\epsilon$$

Die Gesamtkosten für das Engineering dieses Use Cases wurden nach Rücksprache mit Experten auf ca. 230.000€ abgeschätzt. Dementsprechend ergibt sich der Anteil der Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering an den Gesamtkosten des Engineerings wie folgt:

$$P_{\frac{C_{CO_2}}{C_{TC}}}^{4.2} = \frac{7033,58 \in}{7033,58 \in +230.000 \in} \cdot 100 \% = 2,97 \%$$

#### Zusammenfassung

Insgesamt belaufen sich die CO₂-Emissionen in diesem Szenario 3 mit digitaler Energieplanung auf ca. 9,69 t CO₂e. Die zusätzlichen Kosten der CO₂-Emissionen im Engineering betragen dementsprechend nur noch 7033,58€. Im Vergleich zu Szenario 1 fielen die CO₂-Emissionen um 71% geringer aus. Auch im Vergleich zu Szenario 2 können die CO₂-Emissionen, um 5,2 t CO₂e verringert werden, was einer Reduktion von ca. 35% entspricht. Dies ist vorallem auf den stark reduzierten Materialbedarf zurückzuführen.

Die Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen entsprechen somit ca. 2,97 % der Gesamtkosten des Engineerings. Abbildung 43 verschafft einen Überblick über die prozentualen Anteile der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der einzelnen Kategorien an den CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalenten im Engineering, wobei sich nun das Bürogebäude anteilsmäßig als die größte Emissionsquelle darstellt.

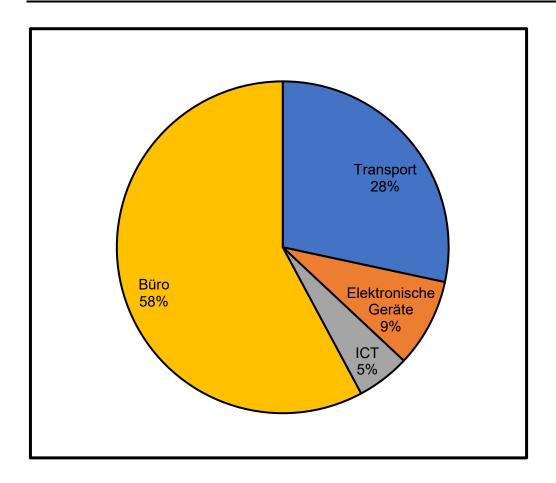


Abbildung 43 Prozentuale Verteilung der CO2-Massenäquivalente in Szenario 4.3

# 7.4. Beantwortung der Forschungsfragen und Zusammenfassung der Validierung

Ziel dieser Arbeit war es eine Methode zu entwickeln und zu validieren, die eine quantitativ messbare Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering industrieller Produktionsanlagen bzw. Produktionssysteme ermöglicht und dadurch als Identifizierungshilfe wesentlicher Emissionsquellen im Engineering dient, die es Unternehmen ermöglicht Einsparungs- und Effizienzmaßnahmen einzuleiten.

Für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten ECEE-Methode, wurde der Engineering-Prozess von der initialen Idee bis hin zur Produktionsunterbrechung betrachtet, wobei der Fokus auf den administrativen und entwicklungstechnischen Tätigkeiten im Engineering lag.

Zusammengefasst können die Forschungsfragen (siehe Kapitel 4) folgendermaßen beantwortet werden:

### **RQ1:** Lässt sich der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck im Engineeringprozess von industriellen Produktionsanlagen quantifizieren und evaluieren?

Zunächst wurden für die Entwicklung der ECEE-Methode die relevanten Emissionsquellen des Engineerings mithilfe von Expertenbefragungen ausgewählt. Die CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten der ausgewählten Emissionsquellen wurden anschließend quantifiziert und die Formeln zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente aufgestellt.

Durch die Addition der CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente können die CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente des Engineerings berechnet werden. Die Multiplikation der CO<sub>2</sub>-Gesamtmassenäquivalente mit den Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen, gemessen an den Kosten für CO<sub>2</sub>-Zertifikate und CO<sub>2</sub>-Filterung, ermöglicht die monetäre Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering, die in der Analysephase des Fabrikplanungsprozesses berücksichtigt werden müssen.

Mithilfe dieser Quantifizierung, Auswahl und Kategorisierung der CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen im Engineering, wie in den Kapiteln 5.1 und 5.2 beschrieben, kann die RQ1 mit JA beantwortet werden. Die ECEE-Methode wurde zukunftsorientiert gestaltet, jedoch können sich die CO<sub>2</sub>-Massenkoeffizienten in der Zukunft aufgrund politischer oder gesellschaftlicher Ereignisse signifikant verändern.

**RQ2:** Inwiefern kann ein durchgängig digitaler Engineeringprozess basierend auf neutralen Datenstandards, von der initialen Idee bis zur Produktionsunterbrechung, zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen?

Um die Eignung der ECEE-Methode für den Praxisgebrauch zu erproben, wurde diese anhand zweier Prozesse des Engineerings in verschiedenen Szenarien angewandt. Dabei wurde exemplarisch eine Produktionsanlage jeweils aus der Fahrzeugmontage und aus der Lackiererei als Use Cases ausgewählt. In jedem Szenario des Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme erfolgte die Beauftragung eines standortnahen bzw. eines Lieferanten in Europa, um einen Vergleich der dadurch entstehenden Emissionen und dadurch die Validierung der ECEE-Methode zu ermöglichen.

Um zu überprüfen, ob die ECEE-Methode zur emissionsbasierten Bewertung einzelner Engineering-Tätigkeiten geeignet ist, wurden spezifisch die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch den Einsatz der VIBN bzw. deren Durchführung online inklusive automatischer Modellgenerierung entstehen, untersucht.

Bei der zweiten Validierung am Prozess der digitalen Energieplanung und Simulation wurde der Fokus auf die Prozessverbesserung durch die Nutzung eines digitalen Energie Abbilds gelegt.

Die Validierung der ECEE-Methode anhand der beiden Prozessbeispiele zeigte, dass die ECEE-Methode eine realitätsnahe und aussagekräftige Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering ermöglicht.

Die emissionsbasierte Bewertung einzelner Engineering-Tätigkeiten ist durch die Anwendung der ECEE-Methode ebenfalls möglich. Daher wurde die Eignung der ECEE-Methode für Praxis durch die Validierung dieser bestätigt. Somit stellt die ECEE-Methode einen ersten Ansatz zur Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering dar.

In folgender Tabelle sind die relevanten Ergebnisse aus den Validierungen zusammengefasst:

Prozess	Szenario 1	Szenario 2	CO <sub>2</sub> - Differenz	Kostendifferenz
				[€]
			[t CO <sub>2</sub> ]	
VIBN	VIBN	VIBN mit neutralen	-17,20	-12.485,40
	Klassisch	Austauschformaten		
	(2.1)	(3.1)		
VIBN	Ohne	VIBN VIBN mit	-37,50	-27.226,53
	VIBN	neutralen Austauschformaten		
	(1.1)	Austausomormaten		
	(1.1)	(3.1)		
		(- /		
Energiesimulation	Klassisch	Digital mit neutralen	-17,95	-13.034,63
	(4.2)	Austauschformaten		
		(4.3)		
Energiacimulation	Ohno (4.1)	Digital mit noutrales	22.47	16 922 65
Energiesimulation	Ohne (4.1)	Digital mit neutralen Austauschformaten	-23,17	-16.822,65
		(4.3)		
		,		

Tabelle 6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Validierung

Ein durchgängig digitaler Engineeringprozess, der auf neutralen Datenstandards basiert, kann mithilfe der Ergebnisse als Antwort auf RQ2 einen signifikanten Beitrag zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten.

Dieser Prozess ermöglicht es, Produktionsanlagen effizienter zu planen, zu konstruieren und zu betreiben, wodurch der Energieverbrauch und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen verringert werden können. Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung neutraler Datenstandards, wie beispielsweise AutomationML, einen nahtlosen Datenaustausch zwischen allen Beteiligten im Engineeringprozess. Dadurch können Informationen und Änderungen effizient kommuniziert werden, was Medienbrüche und redundante Datenhaltung vermeidet.

Dies reduziert nicht nur Fehlerquellen, sondern auch den zeitlichen und materiellen Aufwand für Koordination und Abstimmung.

## **RQ3**: Können die CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch die CO<sub>2</sub> bezogenen Kosten im Engineering von Produktionsanlagen durch einen digitalen Fabrikplanungsprozess reduziert werden?

Auch die Antwort auf die RQ3 kann auch klar mit Ja beantwortet werden, da die CO2 -Emissionen Engineering von Produktionsanlagen durch einen digitalen Fabrikplanungsprozess signifikant reduziert werden können. Dieser digitale Prozess ermöglicht es, den Energieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen über den gesamten Lebenszyklus der Anlage zu optimieren. Der Schlüssel dazu ist die durchgängige Digitalisierung des Engineeringprozesses, von der initialen Idee bis Produktionsunterbrechung. Die Auswahl der Emissionsquellen aus Kapitel 5.1 verdeutlicht diese Faktoren und zeigt die potenziellen Risikofaktoren auf. Durch den Einsatz von digitalen Methoden Werkzeugen und können bereits in der Konzeptphase diese Optimierungspotenziale identifiziert und berücksichtigt werden.

Zum einen ermöglicht die virtuelle und digitale Planung, Simulation und Inbetriebnahme der Produktionsanlagen eine frühzeitige Analyse und Verbesserung von Materialflüssen, Energieverbräuchen und Emissionen. Dadurch können Ineffizienzen, wie z.B. eine zu groß dimensionierte Produktionsanlage ohne Energieplanung, bereits im Vorfeld erkannt und behoben werden, bevor physische Komponenten gefertigt werden.

Zudem ermöglicht der digitale Fabrikplanungsprozess eine optimierte Inbetriebnahme und einen effizienteren Betrieb der Produktionsanlagen. Durch die digitale Anbindung von Sensoren und Steuerungen können Betriebszustände, Energieverbräuche und Emissionen in Echtzeit überwacht und optimiert werden.

Insgesamt zeigt sich, dass ein digitaler Fabrikplanungsprozess, der auf neutralen Datenstandards basiert, ein wirksames Mittel ist, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Engineering von Produktionsanlagen, von der initialen Idee bis zur Produktionsunterbrechung, signifikant zu senken.

### 8. Ausblick und weiterführender Forschungsbedarf

Heiß diskutiert und stark kritisiert wurde die vom 31. Juli 2023 bis zum 05. August 2023 stattgefundene Aktion "wahre Kosten" des Discounters Penny. Grund dafür waren die Preise von neun angebotenen Lebensmitteln von insgesamt über 3.000 Artikeln im Sortiment, die für eine Woche deutlich erhöht wurden. Diese erhöhten Preise entsprechen den "wahren Preisen". Neben dem ursprünglichen Lebensmittelpreis wurden hierbei auch die anfallenden "unsichtbaren Kosten" berücksichtigt.

Unter diese fallen die mit der Lebensmittelerzeugung verursachten Gesundheitskosten durch Stickoxide, Feinstaub und Treibhausgase, sowie die damit einhergehenden Schadenskosten durch die verursachte Bodenerosion, Überdüngung von natürlichen Lebensräumen, Lebensmittelabfälle, Antibiotikaresistenzen oder Lebensmittelimporte aus wasserarmen Gebieten. Das Ziel dieser Aktion, nämlich einen gesellschaftlichen Diskurs über die mit der Lebensmittelproduktion verbundene Umweltauswirkung anzustoßen, ist aufgrund des Aufzeigens der sogenannten Umweltschadenskosten gelungen, auch wenn Penny durch diese Aktion einen einstelligen Millionenverlust wegen eines Kaufrückgangs bei diesen Produkten verzeichnen musste.

Auch diese Thesis zielt auf eine Sensibilisierung im Sinne der Nachhaltigkeit ab. Hierbei wurde eine Methode vorgestellt und entwickelt, um den Nachhaltigkeitsaspekt von technischen Weiterentwicklungen und Innovationen hinsichtlich des Engineering Prozesses von Produktionsanlagen monetär bewerten zu können. Wenn nun diese Kosten ähnlich wie im vorhergehenden Beispiel bei Penny geltend gemacht stellt sich die Frage, wie der stark kostenoptimierte Produktionssektor darauf reagiert.

Die inzwischen zahlreichen Publikationen betreffend dieser Thematik zeigen, dass das Problem nicht im fehlenden Wissen liegt. Politik und Wissenschaft sind sich, wie die Informationsquellen zeigen, bereits vieler der vom Menschen hervorgerufenen schädlichen Auswirkungen bewusst. Wir scheitern demnach aktuell nicht an einem Wissensproblem, sondern an den vielen Implementierungsproblemen.

Ausgehend von diesen Fragestellungen und den identifizierten Implementierungslücken, liefert diese Arbeit eine wertvolle Grundlage, die in den folgenden Themenbereichen weiter vertieft werden sollte.

#### Vorbereitung auf weitere gesetzliche Vorgaben

Die Messung und Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Fabrikplanungsprozess bringt trotzdem viele Vorteile mit sich. Zunächst zeigt es die Übernahme von Umweltverantwortung und das Streben nach Nachhaltigkeit, was dazu beiträgt, die negativen Auswirkungen des Klimawandels zu verringern und einen Beitrag zum Umweltschutz zu leisten.

Darüber hinaus hilft es Unternehmen, die zunehmend strengeren Gesetze und Vorschriften zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen einzuhalten und rechtliche Konsequenzen zu vermeiden. Zusätzlich können Unternehmen ihre CO<sub>2</sub>-Bilanz verbessern, sich gegenüber der Konkurrenz profilieren und als umweltfreundlicher Anbieter wahrgenommen werden, was zu einer erhöhten Kundenzufriedenheit und -bindung sowie zu neuen Marktchancen führen kann. [117]

Durch die präzise Berechnung der Engineering-spezifischen Emissionen mittels der ECEE-Methode werden die notwendigen Daten zur Bestimmung der LECO-Kennzahl geliefert. Diese Kennzahl gibt Aufschluss darüber, wie relevant die Optimierung des Engineering-Prozesses für die Gesamtumweltbilanz ist. Somit bilden ECEE-Methode und LECO-Kennzahl ein aufeinander abgestimmtes System, um die Umweltauswirkungen von Engineeringprojekten umfassend zu analysieren und Optimierungspotenziale zu identifizieren. Die präzise Erfassung der Engineering-spezifischen Emissionen durch ECEE ist dabei die Grundlage für eine aussagekräftige LECO-Kennzahl. [60]

#### Stetige Aktualisierung und Synchronisierung der CO<sub>2</sub> – Input Parameter

Grundsätzlich ist es für die Verwendung dieser Methode wichtig, die CO<sub>2</sub> Massenkoeffizienten regelmäßig anzupassen, sei es, wenn ein aktueller Wert vorliegt oder das UBA angepasste oder neue Kostensätze bekannt gibt. Damit können jüngste Erkenntnisse berücksichtigt und zudem Unsicherheiten betreffend der kalkulierten CO<sub>2</sub> - Kosten, die die Zukunft betreffen, reduziert werden.

#### **Erweiterung Methode für Betriebsphase**

Forschungsbedarf besteht zum einen noch bezüglich der monetären Bewertung der sozialen Dimension der hier betrachteten Investitionen. Zum anderen könnte die ECEE- Methode auch für die Bewertung der Emissionen im Betrieb genutzt werden. Aufgrund der langen Betriebsdauer von solchen Produktionsanlagen, welche in der Regel >15 Jahre ist, können diese Emissionsquellen von entscheidender Bedeutung sein.

Ist der Business Case aufgrund der längerfristigen Betrachtung der CO<sub>2</sub> Kosten besser als das Ergebnis rein auf das Engineering betrachtet, kann dies mit hoher Wahrscheinlichkeit das Management von der Investition in diese Innovation im Engineering Prozess überzeugen, da sich die hier betrachteten Investitionen positiv auf die Unternehmensstrategie auswirken.

#### Erweiterung Web-Applikation für Berechnung des gesamten PCF

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Streamlit Web-Applikation zur CO<sub>2</sub>-Berechnung eines Engineeringprozesses bietet die Möglichkeit, die Funktionalität für weitere Anwendungsfälle zu nutzen. Ein interessanter Anwendungsfall wäre die Erweiterung der Applikation, um den gesamten Product Carbon Footprint (PCF) eines Produkts incl. aller Prozesse zu berechnen [56, p. 27].

Dazu könnte die Web-Applikation in der Lage sein, Daten aus AutomationML-Dateien einzulesen. [71]. Durch die Verknüpfung der CO<sub>2</sub>-Berechnungsfunktionalität mit den Daten aus AutomationML wäre es möglich, den gesamten Lebenszyklus eines Produkts in Bezug auf seine Treibhausgasemissionen zu analysieren. [147]

Die Integration von AutomationML-Daten würde es ermöglichen, Informationen über Materialien, Komponenten, Produktionsprozesse und Engineeringprozesse in die Berechnung des PCF einzubeziehen. Dadurch könnten Hotspots in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Belastung entlang der gesamten Wertschöpfungskette identifiziert werden [153]. Dies wiederum hilft als wichtige Grundlage für gezielte Optimierungsmaßnahmen, damit die Umweltauswirkungen des Produkts zu reduziert werden können.

Die Erweiterung der Web-Applikation mit dieser Funktionalität würde somit den Anwendungsbereich deutlich erweitern und Unternehmen dabei unterstützen, ihre Produkte hinsichtlich Nachhaltigkeit und Klimafreundlichkeit zu verbessern.

#### Integration der Methodik in zukünftige Einkaufsprozesse

Die Integration einer monetären CO<sub>2</sub>-Bewertung in den Engineering-Prozess von Produktionsanlagen kann vielfältige Auswirkungen auf die zugehörigen Einkaufsprozesse haben. Zunächst kann die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Lieferanten und ihrer Produkte als wichtiges Kriterium in die Lieferantenbewertung und -auswahl einfließen. Lieferanten mit geringeren Treibhausgasemissionen werden dabei bevorzugt, um die Gesamtemissionen der Produktionsanlage zu reduzieren. [154]

Darüber hinaus kann das Konzept der nachhaltigen Beschaffung in den Einkaufsprozess integriert werden. Hierbei werden neben Kriterien wie Recyclingfähigkeit und Lebensdauer auch die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Produkte über ihren gesamten Lebenszyklus berücksichtigt [155]. Insgesamt zeigt sich, dass eine CO<sub>2</sub>-Bewertung im Engineering-Prozess vielfältige Hebel zur Ausrichtung der Einkaufsprozesse auf eine Verringerung der Umweltbelastung bietet.

### 9. References

- [1] H. Dyckhoff, M. Müser, and T. Renner, "Ansätze einer Produktionstheorie des Serienanlaufs," *Z Betriebswirtsch*, vol. 82, no. 12, pp. 1427–1456, 2012, doi: 10.1007/s11573-012-0631-7.
- [2] Bundesfinanzministerium, *Fragen und Antworten zum Klimaschutz*. [Online]. Available: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/FAQ/klimaschutz.html #:~:text=Der%20CO2%20%2DEinstiegspreis%20im%20Jahr,5%20Cent%20pro%20Lite r%20ausmacht.
- [3] Heß, D., Klumpp, M. und Dittmeyer, R, *Nutzung von CO2 aus Luft als Rohstoff für synthetische Kraftstoffe und Chemikalien.* [Online]. Available: https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/29-01-2021-DAC-Studie.pdf (accessed: Nov. 2 2023).
- [4] Prognos AG, Technische CO2-Senken Techno-ökonomische Analyse ausgewählter CO2-Negativemissionstechnologien: Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität" Deutsche Energie-Agentur GmbH. [Online]. Available: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005\_DLS\_Gutachten\_Prognos final.pdf (accessed: Nov. 2 2023).
- [5] Destatis, *Energieerzeugung*. [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Erzeugung/ inhalt.html (accessed: Nov. 3 2023).
- [6] K. H. Weber, *Engineering verfahrenstechnischer Anlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [7] K. M. Oltersdorf, Über HMI Versuch einer Definition. [Online]. Available: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/
- [8] K. Bender, *Embedded Systems qualitätsorientierte Entwicklung*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [9] M. Association, "Modelica® Language Specification version 3.5". [Online]. Available: https://modelica.org/documents/MLS.pdf
- [10] S. Dominka, *Hybride Inbetriebnahme von Produktionsanlagen von der virtuellen zur realen Inbetriebnahme*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2007, 1st ed. Göttingen: Sierke, 2007.
- [11] M. Wühle, *Nachhaltigkeit einfach praktisch!* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [12] H. Dyckhoff and T. Spengler, *Produktionswirtschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [13] M. P. Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, SI Version, 5th ed. New York, NY: Wiley, J, 2013.
- [14] U. Dombrowski and T. Mielke, "Einleitung und historische Entwicklung," in *Ganzheitliche Produktionssysteme*, U. Dombrowski and T. Mielke, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 1–24.
- [15] W. Eversheim and G. Schuh, *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [16] U. Lindemann, Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

- [17] AutomationML Consortium, Whitepaper AutomationML (Part 6: AutomationML Component). [Online]. Available: www.automationml.org (accessed: Nov. 3 2023).
- [18] R. Kreutzer, *Time-to-Market*. [Online]. Available: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/ (accessed: Nov. 3 2023).
- [19] Umweltbundesamt, *Wie funktioniert der Treibhauseffekt?* [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/
- [20] A. Kufner, Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2011 (Nicht für den Austausch). Heimsheim: Jost-Jetter-Verl., 2012.
- [21] A. Lüder, N. Schmidt, and R. Drath, "Chapter 4 Modelling of Behaviour," in *AutomationML*, R. Drath, Ed.: De Gruyter, 2021, pp. 213–234.
- [22] Faltinski, S., Niggemann, O., Moriz, N., und Schetinin, N., *AutomationML als Grundlage für einen durchgängigen Modellierung-, Simulations- und Integrationsprozess in der Anlagenplanung.* [Online]. Available: https://publica.fraunhofer.de/ (accessed: Nov. 3 2023).
- [23] Eric Schweitzer, "Bei allem, was man tut, das Ende zu bedenken, das ist Nachhaltigkeit.," *Süddeutsche Zeitpunkt*. [Online]. Available: https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/eric-schweitzer-ueber-recycling-im-muell-steckt-einriesiges-potential-1.3011589?reduced=true
- [24] R. K. Pachauri and L. Mayer, Eds., *Climate change 2014: Synthesis report*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015.
- [25] IPCC, Global Warming of 1.5°C: Cambridge University Press, 2022.
- [26] Umweltbundesamt, *Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren.* [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren (accessed: Jun. 23 2024).
- [27] BMWK, *Energieeffizienz in Zahlen*. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2021. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-entwicklungen-und-trends-in-deutschland-2021.html
- [28] ClimateWatch, Historical GHG Emissions. [Online]. Available: https:// www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end\_year=2020&start\_year=1990
- [29] BMWK, *Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren*. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Industrie/treibhausgasemissionendeutschland-nach-sektoren.html (accessed: Dec. 22 2023).
- [30] Verordnung (EU) 2019/2089 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2019 zur Änderung der Verordnung (EU) 2016/1011 hinsichtlich EU-Referenzwerten für den klimabedingten Wandel, hinsichtlich auf das Übereinkommen von Paris abgestimmter EU-Referenzwerte sowie hinsichtlich nachhaltigkeitsbezogener Offenlegungen für Referenzwerte (Text von Bedeutung für den EWR): 32019R2089, 2019. Accessed: 22.Feb. 12 2023. [Online]. Available: http://data.europa.eu/eli/reg/2019/2089/oj
- [31] Umweltbundesamt, *Digitalisierung nachhaltig gestalten: Ein Impulspapier des Umweltbundesamtes*: Umweltbundesamt, 2019.
- [32] "Nachhaltigkeit," *Duden.de*, 27 Apr., 2018. https://www.duden.de/rechtschreibung/ Nachhaltigkeit (accessed: Sep. 15 2024).

- [33] bessergrün GmbH, "Was ist Nachhaltigkeit?," bessergrün GmbH, 27 Oct., 2023. https://www.bessergruen.de/was-ist-nachhaltigkeit/ (accessed: Sep. 15 2024).
- [34] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, *Nachhaltigkeit (nachhaltige Entwicklung)*. [Online]. Available: https://www.bmz.de/de/service/lexikon/nachhaltigkeit-nachhaltige-entwicklung-14700 (accessed: Sep. 15 2024).
- [35] K. Mayer, *Nachhaltigkeit: 125 Fragen und Antworten*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [36] A. Kleine, Ed., *Operationalisierung einer Nachhaltigkeitsstrategie*. Wiesbaden: Gabler, 2009.
- [37] U. Sailer, *Nachhaltigkeitscontrolling: So werden Unternehmen nachhaltig gesteuert,* 4th ed. München, Tübingen: UVK Verlag; Narr Francke Attempto Verlag, 2022.
- [38] J. Ludwikowski, *Das Nachhaltigkeits-Konzept in deutschen Unternehmen: Modetrend oder Notwendigkeit?* Hamburg: Diplomica Verl., 2010.
- [39] H. Heinrichs and G. Michelsen, *Nachhaltigkeitswissenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [40] Was ist die Triple Bottom Line? | IBM. [Online]. Available: https://www.ibm.com/de-de/topics/triple-bottom-line (accessed: Sep. 15 2024).
- [41] Vereinte Nationen, *Ziele für nachhaltige Entwicklung: SDG.* [Online]. Available: https://unric.org/de/17ziele/ (accessed: Sep. 14 2024).
- [42] Ursula von der Leyen, A Union that strives for more: My agenda for Europe. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/system/files/2020-04/political-guidelines-next-commission\_en\_0.pdf (accessed: Sep. 14 2024).
- [43] Europäische Kommission, *Ganzheitlicher EU-Ansatz für nachhaltige Entwicklung*. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/sustainable-development-goals/eu-whole-government-approach\_de (accessed: Sep. 14 2024).
- [44] M. Schmidt, "Carbon Accounting zwischen Modeerscheinung und ökologischem Verbesserungsprozess," Z. Control. Manag., vol. 54, no. 1, pp. 32–37, 2010, doi: 10.1007/s12176-010-0011-5.
- [45] T. Wiedmann and J. C. Minx, "A definition of "carbon footprint"," in *Ecological economics research trends*, New York, NY: Nova Science Publ., 2007, 2007.
- [46] R. Chen, R. Zhang, and H. Han, "Where has carbon footprint research gone?," *Ecological Indicators*, vol. 120, 2021, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106882.
- [47] UNFCCC, Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop3/107a01.pdf (accessed: Nov. 2 2023).
- [48] UN Global Compact Netzwerk Deutschland, Ed., Einführung Klimamanagement: Schritt für Schritt zu einem effektiven Klimamanagement im Unternehmen. Berlin: Deutsches Global Compact Netzwerk, 2017. [Online]. Available: https://www.globalcompact.de/wAssets/docs/Umweltschutz/Publikationen/001-Einfuehrung-Klimamanagement-DGCN\_web.pdf
- [49] J. Blazejczak et al., Wirtschaftliche Chancen durch Klimaschutz (II): Die wachsenden Weltmärkte für Klimaschutzgüter und -dienstleistungen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2019. [Online]. Available: http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:3: 2-921552

- [50] O. Eitelwein and L. Goretzki, "Carbon Controlling und Accounting erfolgreich implementieren — Status Quo und Ausblick," *Z. Control. Manag.*, vol. 54, no. 1, 2010, doi: 10.1007/s12176-010-0010-6.
- [51] Tholen, L. und Kiyar, D., *AG Industrie Input- / Hintergrund-Papier CO2-Fußabdruck.* [Online]. Available: https://www.bmwk.de/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [52] W. R. WBCSD, *Greenhouse Gas Protocol (o. D.): Companies and Organizations*. [Online]. Available: https://ghgprotocol.org/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [53] Deutsches Institut für Normung, DIN EN ISO 14064-1, Treibhausgase. Teil 1, Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene (ISO 14064-1:2018): = Greenhouse gases. Part 1, Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals (ISO 14064-1:2018), 14064th ed. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019.
- [54] British Standards Institute, *PAS 2050-2:2012: Assessment of Life Cycle Greenhouse Gas Emissions*. [Online]. Available: http://shop.bsigroup.com/en/Browse-By-Subject/Environmental-Management-and-Sustainability/PAS-2050/PAS-2050-2/
- [55] S. Lewandowski, A. Ullrich, and N. gronau, "Normen zur Berechnung des  $CO_2$ -Fußabdrucks," *I40M*, vol. 2021, no. 4, pp. 17–20, 2021, doi: 10.30844/I40M\_21-4\_S17-20.
- [56] Greenhouse Gas Protocol, Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard: Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard. [Online]. Available: https://ghgprotocol.org/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [57] Greenhouse Gas Protocol, *GHG Protocol Scope 2 Guidance: An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard.* [Online]. Available: https://ghgprotocol.org/(accessed: Nov. 2 2023).
- [58] Greenhouse Gas Protocol, A Corporate Accounting and Reporting Standard" Revised Edition. [Online]. Available: https://ghgprotocol.org/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [59] BSI Group, Product Carbon Footprinting for Beginners: Guidance for smaller businesses on tackling the carbon footprinting challenge. [Online]. Available: https:// www.bsigroup.com/LocalFiles/en-GB/standards/BSI-sustainability-guide-productcarbon-footprinting-for-beginners-UK-EN.pdf (accessed: Nov. 2 2023).
- [60] K. Erlach and E. Sheehan, "Die CO 2 -Wertstrom-Methode zur Steigerung von Energieund Materialeffizienz in der Produktion," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, vol. 109, no. 9, pp. 655–658, 2014, doi: 10.3139/104.111207.
- [61] Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union, "Richtlinie (EU) 2022/2464," 2022. [Online]. Available: http://data.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj
- [62] Umweltbundesamt, CSR-Richtlinie. [Online]. Available: https:// www.umweltbundesamt.de/umweltberichterstattung-csr-richtlinie (accessed: Sep. 14 2024).
- [63] CSR in Deutschland, CSR Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD).
  [Online]. Available: https://www.csr-in-deutschland.de/DE/CSR-Allgemein/CSR-Politik/CSR-in-der-EU/Corporate-Sustainability-Reporting-Directive/corporate-sustainability-reporting-directive-art.html (accessed: Sep. 14 2024).
- [64] Greenpeace, "Biomasse: CO2-neutrale Erneuerbare Energie," *Greenpeace*. https://www.greenpeace.de/klimaschutz/energiewende/erneuerbare-energien/biomasse (accessed: Sep. 15 2024).

- [65] Helmholtz Klima, "Was sind CO2-Äquivalente?," *Helmholtz Klima*, 23 Feb., 2023. https://www.helmholtz-klima.de/fag/was-sind-co2-aequivalente (accessed: Sep. 15 2024).
- [66] US EPA, Basic Information of Air Emissions Factors and Quantification. [Online]. Available: https://www.epa.gov/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [67] Stiftung Allianz für Entwicklung und Klima, Was bedeuten CO2-Äquivalent (CO2e) und Global Warming Potential (GWP)? [Online]. Available: https://allianz-entwicklung-klima.de/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [68] Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T. and Zhang, H, Ed., *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- [69] Umweltbundesamt, *Die Treibhausgase*. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [70] R. Drath, Ed., Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML: Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [71] D. Rainer, *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML*. Berlin, 2010.
- [72] A. Luder, M. Foehr, L. Hundt, M. Hoffmann, Y. Langer, and S. Frank, "Aggregation of engineering processes regarding the mechatronic approach," in *ETFA2011*, Toulouse, France, 2011, pp. 1–8.
- [73] A. Lüder and N. Schmidt, "AutomationML in a Nutshell," in *Handbuch Industrie 4.0 Bd.2*, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, pp. 213–258.
- [74] H. Ullrich, Wirtschaftliche Planung und Abwicklung verfahrenstechnischer Anlagen, 2nd ed. Essen: Vulkan-Verl., 1996.
- [75] K. Sattler and W. Kasper, Verfahrenstechnische Anlagen: Wiley, 2000.
- [76] A. Malkwitz, N. Mittelstädt, J. Bierwisch, J. Ehlers, T. Helbig, and R. Steding, *Projektmanagement im Anlagenbau*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [77] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [78] J. Gantz, "The Diverse and Exploding An Updated Forecast of Worldwide Information Growth Through 2011," 2008.
- [79] P. D. Grösser, *Digitaler Zwilling: Wirtschaftslexikon Gabler*: Springer Gabler Verlag, 2018.
- [80] R.-P. Nikula, M. Paavola, M. Ruusunen, and J. Keski-Rahkonen, "Towards online adaptation of digital twins," *Open Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 776–783, 2020, doi: 10.1515/eng-2020-0088.
- [81] M. Maurer and S.-O. Schulze, Eds., *Zusammenhänge erkennen und gestalten: Tag des Systems Engineering ; Paderborn, 7. 9. November 2012.* München: Hanser, 2012.
- [82] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, VDI 4499 Blatt 1 Digitale Fabrik Grundlagen.
  [Online]. Available: https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4499-blatt-1-digitale-fabrik-grundlagen (accessed: Sep. 15 2024).
- [83] B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., *Handbuch Industrie 4.0*: Springer Vieweg, 2017.

- [84] Faltinski S, Moriz N, Schetinin N, Niggemann O., "AutomationML als Grundlage für einen durchgängigen Modellierung-, Simulations- und Integrationsprozess in der Anlageplanung," 2012. [Online]. Available: https://www.th-owl.de/elsa/record/4807
- [85] C. Härle, M. Barth, and A. Fay, "Ein Assistenzsystem zur automatischen Komposition und Konfiguration von Co-Simulationen," *atp edition*, vol. 62, no. 9, pp. 72–79, 2020, doi: 10.17560/atp.v62i9.2504.
- [86] M. Bergert, J. Kiefer, and S. Höme, "Einsatz der Virtuellen Inbetriebnahme im automobilen Karosserierohbau: Ein Erfahrungsbericht," in *Forschung in Bewegung*, Magdeburg: Univ., 2009, 2009.
- [87] S. Frerich *et al.*, *Engineering Education 4.0*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [88] SÜSS, S., STRAHILOV, A. & DIEDRICH, C., 20th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): September 8 11, 2015, Luxembourg. Piscataway, NJ: IEEE, 2015.
- [89] H. HÄmmerle, A. Strahilov, and R. Drath, "AutomationML im Praxiseinsatz," *atp edition*, vol. 58, p. 52, 2016, doi: 10.17560/atp.v58i05.567.
- [90] 4499 Blatt 1: Digitale Fabrik Grundlagen., VDI 4499 Blatt 1 2011, Berlin.
- [91] R. Drath, A. Luder, J. Peschke, and L. Hundt, "AutomationML the glue for seamless automation engineering," in *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 2008. ETFA 2008, Hamburg, Germany, 2008, pp. 616–623.
- [92] G. Mayer, C. Pöge, S. Spieckermann, and S. Wenzel, Eds., *Ablaufsimulation in der Automobilindustrie*. Berlin: Springer Vieweg, 2020.
- [93] R. Drath, Ed., *AutomationML: The Industrial Cookbook*, 1st ed. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2021.
- [94] Baum Heiko, *Virtuelle Inbetriebnahme ermöglicht Designtests im frühen Projektstadium.* [Online]. Available: https://www.digital-engineering-magazin.de/ virtuelle-inbetriebnahme-ermoeglicht-designtests-im-fruehen-projektstadium/ (accessed: Nov. 3 2023).
- [95] J. Gausemeier and F. Rammig, Eds., Entwurf mechatronischer Systeme: Grundlagen, Methoden und Werkzeuge; Adaption, Selbstoptimierung und Verlässlichkeit; Integration Mechanik und Elektronik, Miniaturisierung; 7. Paderborner Workshop Entwurf Mechatronischer Systeme, 18. und 19. März 2010, Heinz-Nixdorf-MuseumsForum. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst, 2010.
- [96] VDMA, Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme: Handlungsempfehlungen zum wirtschaftlichen Einstieg. [Online]. Available: https://www.vdma.org/ (accessed: Nov. 12 2023).
- [97] H. Zhang, H. Mao, and G. Peng, "Modular Collaborative Simulation in Multibody System Dynamics of Complex Mechatronic Products," in *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Manchester, 2013, pp. 705–711.
- [98] P. P. Schmidt and A. Fay, "Applying the Domain-Mapping-Matrix to Identify the Appropriate Level of Detail of Simulation Models for Virtual Commissioning," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 10, pp. 69–74, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.08.110.
- [99] M. Langosch and R. Mader, "20 AutomationML Industrialization and Toolchain," in *AutomationML*, R. Drath, Ed.: De Gruyter, 2021, pp. 379–384.

- [100] Y. Pan *et al.*, "Building energy simulation and its application for building performance optimization: A review of methods, tools, and case studies," *Advances in Applied Energy*, vol. 10, 2023, doi: 10.1016/j.adapen.2023.100135.
- [101] E. Müller, J. Engelmann, T. Löffler, and J. Strauch, *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*, 2nd ed. Berlin: Springer Berlin; Springer Vieweg, 2020.
- [102] C. Herrmann and S. Thiede, "Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing," CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 1, no. 4, pp. 221–229, 2009, doi: 10.1016/j.cirpj.2009.06.005.
- [103] D. Wolff, D. Kulus, and S. Dreher, "Simulating Energy Consumption in Automotive Industries," in *Use Cases of Discrete Event Simulation*, S. Bangsow, Ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 59–86.
- [104] F. Bleicher, F. Duer, I. Leobner, I. Kovacic, B. Heinzl, and W. Kastner, "Co-simulation environment for optimizing energy efficiency in production systems," *CIRP Annals*, vol. 63, no. 1, pp. 441–444, 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.122.
- [105] L. März, W. Krug, O. Rose, and G. Weigert, *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [106] J. Sinnemann, "Methodik zur effizienten Energiesimulation von automatisierten Produktionsanlagen in der virtuellen Inbetriebnahme," Ruhr-Universität Bochum, 2021.
- [107] Transsolar, Startseite. [Online]. Available: http://trnsys.de/ (accessed: Feb. 23 2024).
- [108] EQUA, *IDA ICE Simulation Software.* [Online]. Available: https://www.equa.se/de/ida-ice
- [109] T. L. Schmitt and M. Andres, Methoden zur Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [110] M. Wetter and C. Haugstetter, ""Modelica Versus TRNSYS A Comparison Between an Equation-Based and a Procedural Modeling Language for Building Energy Simulation." Proceedings of SimBuild 2006," *Modelica versus Trnsys A Comparison between An Equation-based and a Procedural Modeling Language for Building Energy Simulation, Proceedings*, 2006.
- [111] A. Vadiee, A. Dodoo, and L. Gustavsson, "A Comparison Between Four Dynamic Energy Modeling Tools for Simulation of Space Heating Demand of Buildings," in Springer Proceedings in Energy, Cold Climate HVAC 2018, D. Johansson, H. Bagge, and Å. Wahlström, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 701–711.
- [112] A. A. Garcia, "AutomationML-Ein Überblick," 2010.
- [113] S. Bader, E. Barnstedt, H. Bedenbender, B. Berres, M. Billmann, and M. Ristin, "Details of the Asset Administration Shell part 1: the exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC02)," 2022.
- [114] J. Deuse, Ed., How can industrial management contribute to a brighter future?: GITO mbH Verlag, 2023.
- [115] ZVEI, Product Carbon Footprint Calculation of a Control Cabinet using the Asset Administration Shell. [Online]. Available: https://www.zvei.org/fileadmin/user\_upload/Presse\_und\_Medien/Publikationen/2022/Mai/Show-Case\_PCF%40ControlCabin/22-05-25\_Whitepaper\_ZVEI-Show-Case-PCF-Control-Cabinet-HMI2022.pdf
- [116] IDTA, Carbon Footprint (Version 1.0). [Online]. Available: https://github.com/admin-shell-io/submodel-templates/tree/main/development/Carbon%20Footprint/1/0 (accessed: Dec. 22 2023).
- [117] BMW AG, Nachhaltigkeit im Kern der Unternehmensstrategie. München, 2022.

- [118] M. Schleipen, T. Mersch, and S. Karch, "Engineering und Inbetriebnahme von Produktionsanlagen," *atp edition*, vol. 65, no. 8, pp. 88–93, 2023, doi: 10.17560/atp.v65i8.2683.
- [119] C. Listl, "Ableitung einer ganzheitlichen Transformationsstrategie zur Realisierung von Datendurchgängigkeit im Anlagenentstehungsprozess," Universitäts- und Landesbibliothek Sachsen-Anhalt, 2024. [Online]. Available: https://opendata.uni-halle.de//handle/1981185920/118625
- [120] S. Karch *et al.*, "Lean Engineering Identifying waste in engineering chains," *Procedia CIRP*, vol. 120, pp. 463–468, 2023, doi: 10.1016/j.procir.2023.09.020.
- [121] Forschungsprojekt DIAMOND, *Digitale Anlagenmodellierung mit neutralen Datenformaten*. [Online]. Available: https://diamond-project.de/
- [122] S. Karch, J. Prior, A. Strahilov, A. Lüder, and B. Kuhlenkötter, "Lean Engineering and Lean Information Management Make Data Flow in Plant Engineering Processes," in Lecture Notes in Production Engineering, Production at the Leading Edge of Technology, M. Liewald, A. Verl, T. Bauernhansl, and H.-C. Möhring, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 664–676.
- [123] Umweltbundesamt, *Emissionsdaten*. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [124] Gröger, J., Liu, R., Stobbe, L., Druschke J. und Richter N., Green Cloud Computing: Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-17 texte 94-2021 green-cloud-computing.pdf
- [125] Rammstein, *Benzin*, 2005. Accessed: Jan. 27 2025. [Online]. Available: https://genius.com/Rammstein-benzin-lyrics
- [126] M. Berners-Lee, *The carbon footprint of everything*. Vancouver, Berkeley, London: Greystone Books, 2022.
- [127] VDR, CO2–Berechnung Geschäftsreise: Teil II: Anwendung und Beispielrechnungen". [Online]. Available: https://www.atmosfair.de/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [128] BMWK, Kohlendioxid-kostenaufteilungsgesetz. [Online]. Available: https://www.dehst.de/DE/Nationaler-Emissionshandel/Zertifikate-Verkauf-Handel/CO2-Kostenaufteilungsgesetz/co2-kostenaufteilungsgesetz\_node.html #:~:text=im%20Zeitraum%20vom%2001.01.2023,zum%2031.12.2025%3A%2045%20Euro (accessed: Nov. 2 2023).
- [129] Umweltbundesamt, CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilowattstunde Strom steigen 2021 wieder an. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [130] Railway-News, *How green is satellite monitoring? Let's do the math.* [Online]. Available: https://railway-news.com/how-green-is-satellite-monitoring-lets-do-the-math/#:~:text=Jet%20Fuel%20causes%20CO2%20at,helicopter%20emits%20500%20kg%20CO2 (accessed: Nov. 2 2023).
- [131] Öko-Institut e. V, *Factsheet 1: Klimaschädliche Wirkungen des Luftverkehrs.* [Online]. Available: https://fliegen-und-klima.de/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [132] Gröger Jens, *Digitaler CO2-Fußabdruck: Datensammlung zur Abschätzung von Herstellungsaufwand, Energieverbrauch und Nutzung digitaler Endgeräte und Dienste.*[Online]. Available: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Digitaler-CO2-Fussabdruck.pdf (accessed: Nov. 2 2023).

- [133] BAFA, *Informationsblatt CO2-Faktoren*. [Online]. Available: https://www.bafa.de/ SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew\_infoblatt\_co2\_faktoren\_2022.pdf?\_\_blob= publicationFile&v=6 (accessed: Jun. 23 2024).
- [134] Umweltbundesamt und Deutsche Emissionshandelsstelle, *Nationaler Emissionshandel*. [Online]. Available: https://www.dehst.de/DE/Themen/nEHS/nehs\_node.html (accessed: Nov. 2 2023).
- [135] BayÖPNVG, Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr in Bayern: (BayÖPNVG); Kommentar. München: Gemeinde- und Schulverl. Bavaria, 1997.
- [136] HP, *Product carbon footprint: HP EliteBook 840 G6 Notebook.* [Online]. Available: https://h20195.www2.hp.com/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [137] HP, *Product carbon footprint: HP ZBook Fury 17 G7.* [Online]. Available: https://h20195.www2.hp.com/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [138] HP, *Product carbon footprint: HP E22 G4 FHD monitor.* [Online]. Available: https://h20195.www2.hp.com/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [139] HP, *Product carbon footprint: HP Pavilion Desktop PC TP01.* [Online]. Available: https://h20195.www2.hp.com/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [140] Apple, *Product Environmental Report: iPhone SE (3rd generation).* [Online]. Available: https://www.apple.com/ (accessed: Nov. 2 2023).
- [141] Henger, R., Deschermeier, P., Hude, M., Seipelt, B. und Voigtländer, M., Energieeffizienz bei Büroimmobilien: dena-Analyse über den Gebäudebestand und seine energetische Situation. [Online]. Available: https://effizienzgebaeude.dena.de/ fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9143\_dena-Analyse\_Energieeffizienz\_bei\_ Bueroimmobilien.pdf (accessed: Nov. 2 2023).
- [142] Entwicklung mechatronischer cyber-physischer Systeme, 2206, VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik, Berlin, 2021.
- [143] U. Lindemann, *Handbuch Produktentwicklung*. München: Hanser, 2016. [Online]. Available: http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446445819
- [144] Quality management systems Fundamentals and vocabulary, 9000, ISO, 2015. [Online]. Available: https://www.iso.org/
- [145] Streamlit A faster way to build and share data apps. [Online]. Available: https://streamlit.io/ (accessed: Dec. 21 2024).
- [146] Python.org, *Welcome to Python.org*. [Online]. Available: https://www.python.org/ (accessed: Dec. 21 2024).
- [147] A. Luder, D. Hoffmann, R. Gudder, S. Biffl, and K. Meixner, "Representing Property Dependencies within AutomationML Based Digital Twins," in 2024 IEEE 29th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation: ETFA 2024: 10-13 September 2024, Padova, Italy, Padova, Italy, 2024, pp. 1–4.
- [148] FFT, Fulda. [Online]. Available: https://www.fft.de/ (accessed: Nov. 25 2023).
- [149] EDAG, *EDAG Polska.* [Online]. Available: https://pl.edag.com/ (accessed: Nov. 25 2023).
- [150] DUERR Group, 10 JAHRE TROCKENABSCHEIDUNG. [Online]. Available: https://www.durr-group.com/de/duerrmore/2020/10-jahre-trockenabscheidung
- [151] J. Bränzel, D. Engelmann, M. Geilhausen, and O. Schulze, *Energiemanagement: Praxisbuch für Fachkräfte, Berater und Manager,* 2nd ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.

- [152] AutomationML Consortium, *AR Toolchain*. [Online]. Available: https://www.automationml.org/wp-content/uploads/2023/06/AR Toolchain.pdf
- [153] Y. A. Huang, C. L. Weber, and H. S. Matthews, "Categorization of Scope 3 emissions for streamlined enterprise carbon footprinting," *Environmental science & technology*, vol. 43, no. 22, pp. 8509–8515, 2009, doi: 10.1021/es901643a.
- [154] K. Zimmer, M. Fröhling, P. Breun, and F. Schultmann, "Assessing social risks of global supply chains: A quantitative analytical approach and its application to supplier selection in the German automotive industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 149, pp. 96–109, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.041.
- [155] K. Govindan and M. Hasanagic, "A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective," *International Journal of Production Research*, vol. 56, 1-2, pp. 278–311, 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1402141.

## 10. Anhang

## 10.1. Anhang 1: Preisentwicklung der CO₂-Zertifikate

Abbildung 44 verschafft einen Überblick über die Preisentwicklung der CO<sub>2</sub>-Zertifikate, die im Rahmen des BEHGs erworben werden können. [134]

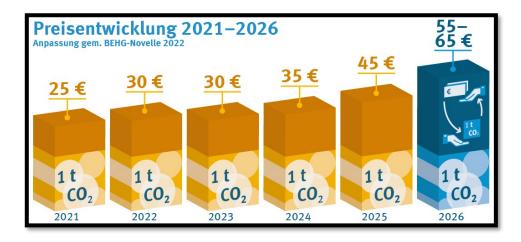


Abbildung 44 : Preisentwicklung der CO<sub>2</sub>-Zertifikate gemäß dem Umweltbundesamt und der Deutschen Emissionshandelsstelle [134]

## 10.2. Anhang 2: CO<sub>2</sub>-Emissionen des Flugverkehrs

Abbildung 45 verschafft einen Überblick über die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Flugzeuges auf Strecken unterschiedlicher Länge. Dabei steht RFI für "Radiative Forcing Index" und misst den Strahlungsantrieb des Flugverkehrs im Verhältnis zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen. [131, p. 14] CO<sub>2</sub>ä ist synonym zu der in dieser Arbeit verwendeten Einheit CO<sub>2</sub>e zu verstehen.

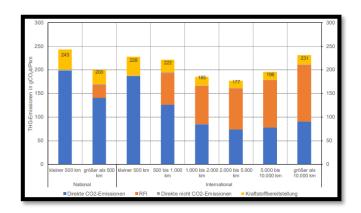


Abbildung 45 CO<sub>2</sub>-Emissionen des Flugverkehrs nach dem Öko-Institut e. V. [131]

## 10.3. Anhang 3: Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung

## Anlagenbeschreibung

Ein Lkw liefert die gestapelten Hochvoltspeicher auf spezielle Werkstückträger an. Die vorinstallierte Fördertechnik im Lkw wird mit der Fördertechnik der Anlage verbunden und die Hochvoltspeicher "HVS" werden entladen. Anschließend werden die HVS entstapelt und über einen Drehtisch richtig positioniert. Die HVS werden über einen Hubtisch auf eine höhere Ebene befördert und über Rollenförderer zum Verbauort transportiert. Mithilfe eines Hubtischs werden die HVS wieder auf die Hauptebene abgesenkt. Hier wird der HVS von einem Roboter aus seinem Werkstückträger entnommen und anschließend verbaut. Der leere Werkstückträger wird erneut über einen Hubtisch auf eine höhere Ebene befördert und anschließend über eine Förderstrecke zurück zur Lkw-Abholung transportiert. Die Werkstückträger werden gestapelt und sind nun bereit, vom Lkw abgeholt zu werden.

Verfasst von Planungsspezialisten bei einem OEM am 03. November 2023

## Bild der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung incl. virtuelles Modell



Abbildung 46 Beförderung der HVS in Werkstückträgern auf Rollenförderern zum Verbauort, Quelle: OEM intern

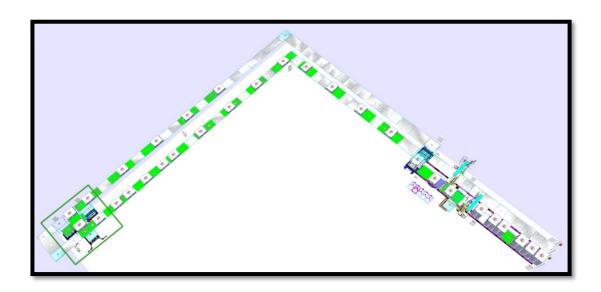


Abbildung 47 Vogelperspektive des virtuellen Modells der Anlage für Hochvoltspeicheranlieferung mit der Anlieferungs- und Abholungszone rechts und der Verbauzone links; Quelle: OEM intern

## 10.4. Anhang 4: Automatische Modellgenerierung der VIBN

Die virtuelle Inbetriebnahme wird immer bedeutsamer im Engineering des Fabrikplanungprozesses. Aus diesem Grund wird kontinuierlich daran gearbeitet, die Erstellung des virtuellen Modells so effizient wie möglich zu gestalten, da diese sehr zeitaufwendig sein kann. Für die Erstellung des virtuellen Modells werden verschiedene Engineering-Daten, wie z.B. Elektroplan und Anlagenlayout, benötigt. Mithilfe einer neutralen objektorientierten Beschreibung des Elektroplans und SPS-Programms als AutomationML File kann man zum Beispiel über Regelwerke die Anzahl, die Bezeichnung und die jeweilige SPS-Adresse der verbauten Komponenten der Anlage identifizieren. Diese Informationen werden dem VIBN-Tool zur Verfügung gestellt. Das VIBN-Tool zieht nun automatisch die richtigen Verhaltensmodelle an, bezeichnet diese korrekt und legt ebenfalls die dazugehörigen SPS Ein- und Ausgangssignale an. Diesen Vorgang musste man früher mühevoll per Hand durchführen. Durch die automatische Modellgenerierung reduziert sich der Aufwand für die Erstellung des virtuellen Modells um ca. 50-80%. Dieser Anwendungsfall wird im Rahmen des Projekts DIAMOND als einer der Kern UseCases betrachtet und mittels Demonstratoren in einen industrietauglichen Standard umgesetzt.

Link: https://diamond-project.de/ [121]

Verfasst von einem Mitarbeiter im DIAMOND Projekt am 20. November 2023

## 10.5. Anhang 5: Parameter des Engineerings

Die Parameter des Engineerings innerhalb des Fabrikplanungprozesses in Abbildung 48 und Abbildung 49 wurden am 26. April 2023 in Zusammenarbeit mit Fachspezialisten bei einem OEM definiert.

Anlagenentstehungsprozess		Standortnaher Lieferant	
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Gesamtprojektlaufzeit	12 Monate (220 Arbeitstage)	12 Monate (220 Arbeitstage)	12 Monate (220 Arbeitstage)
Projektlaufzeit der VIBN		6 Monate (in den letzten 6 Monaten des Projekts)	3 Monate (in den letzten 3 Monaten des Projekts)
Kosten des Engineerings	400.000€	400.000€	400.000€
Kosten der VIBN	-	25.000€	18.000€
Anzahl Projektbeteiligter Engineering BMW	8 Mitarbeiter	10 Mitarbeiter (8 reguläre Mitarbeiter + 2 VIBN-Experten)	10 Mitarbeiter (8 regulâre Mitarbeiter + 2 VIBN-Experten)   10 Mitarbeiter (8 regulâre Mitarbeiter + 2 VIBN-Experten)
Anzahl Projektbeteiligter Engineering Auftragnehmer	8 Mitarbeiter	10 Mitarbeiter (8 reguläre Mitarbeiter + 2 VIBN-Experten)	10 Mitarbeiter (8 regulâre Mitarbeiter + 2 VIBN-Experten) 10 Mitarbeiter (8 regulâre Mitarbeiter + 2 VIBN-Experten)
Tägliche Arbeitszeit	8 Stunden	8 Stunden	8 Stunden
Anzahl Vorort-Meetings bei BMW	10 Stück	10 Stück	10 Stück
Anzahl Vorort-Meetings beim Lieferanten	2 Stück	2 Stück	2 Stück
Anzahl Vorort-Meetings beim Lieferanten (VIBN Abnahme)	(	1 Stück (3-Tage Meeting mit 5 Personen BMW)	
Anzahl Hotelübernachtungen (Europa)	-	1	1
Anzahl Hotelübernachtungen (Europa) (VIBN Abnahme)	-		
Dauer Videokonferenzen	1,5 Stunden	1 Stunde	1 Stunde
Anzahl Videokonferenzen während Projektlaufzeit	138 (46 Arbeitswochen * 3 Meetings/Woche)	138 (46 Arbeitswochen * 3 Meetings/Woche) 158 (138 + 20 Videokonferenzen durch VIBN)	148 (138 + 10 Videokonferenzen durch VIBN)
Teilnehmeranzahl Videokonferenz	8 Mitarbeiter (4 BMW, 4 Lieferant)	10 Mitarbeiter (4 BMW + 1 VIBN BMW, 4 Lieferant + 1 VIBN Lieferant)	10 Mitarbeiter (4 BMW + 1 VIBN BMW, 4 Lieferant + 1 VIBN Lieferant)
Dauer Videokonferenzen (VIBN Abnahme)	-		7 Stunden
Anzahl Videokonferenz (VIBN Abnahme)	-	1	3 Stück
Teilnehmeranzahl Videokonferenz (VIBN Abnahme)	1	ı	10 Mitarbeiter (4 BMW + 1 VIBN BMW, 4 Lieferant + 1 VIBN Lieferant)
Anzahl gesendeter E-Mails BMW intern (pro Person)	5 E-Mails/Tag	5,1 E-Mails/Tag (+0,1 E-Mails durch VIBN in letzten 6 Monaten)	5,1 E-Mails/Tag (+ 0,1 E-Mails durch VIBN in letzten 3 Monaten)
Anzahl gesendeter E-Mails Lieferant intern (pro Person)	10 E-Mails/Tag	10,2 E-Mails/Tag (+ 0,2 E-Mails durch VIBN in letzten 6 Monaten)	10,2 E-Mails/Tag (+ 0,2 E-Mails durch VIBN in letzten 3 Monaten)
Anzahl gesendeter E-Mails Lieferant - BMW gesamt	5 E-Mails/Tag	5,1 E-Mails/Tag (+ 0,1 E-Mails durch VIBN in letzten 6 Monaten)	5,1 E-Mails/Tag (+ 0,1 E-Mails durch VIBN in letzten 3 Monaten)
Benötigter Speicherplatz (Server in Rechenzentrum)	60 GB	65 GB (+ 5 GB durch VIBN)	65 GB (+ 5 GB durch VIBN)
Benötigte Monitore (pro Mitarbeiter)	2 Stück	3 Stück	3 Stück
Benötigte Desktop PCs (pro Mitarbeiter)	-	1 Stück	1 Stück
Tägliche Nutzung elektronischer Geräte	7 Stunden	7 Stunden	7 Stunden
Benötigte Bürofläche (pro Mitarbeiter)	5 Quadratmeter	5 Quadratmeter	5 Quadratmeter

Abbildung 48 Parameter des Engineerings bei einem standortnahen Lieferanten, Quelle: eigen/Interviews innerhalb eines OEMS

Anlagenentstehungsprozess		Lieferant in Europa	
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Gesamtprojektlaufzeit	12 Monate (220 Arbeitstage)	12 Monate (220 Arbeitstage)	12 Monate (220 Arbeitstage)
Projektlaufzeit der VIBN	-	6 Monate (in den letzten 6 Monaten des Projekts)	3 Monate (in den letzten 3 Monaten des Projekts)
Kosten des Engineerings	400.000€	400.000 €	400.000€
Kosten der VIBN	-	25.000 €	18.000 €
Anzahl Projektbeteiligter Engineering BMW	8 Mitarbeiter	10 Mitarbeiter (8 reguläre Mitarbeiter + 2 VIBN-Experten)	10 Personen (8 reguläre Mitarbeiter + 2 VIBN-Experten)
Anzahl Projektbeteiligter Engineering Auftragnehmer	8 Mitarbeiter	10 Mitarbeiter (8 reguläre Mitarbeiter + 2 VIBN-Experten)	10 Personen (8 reguläre Mitarbeiter + 2 VIBN-Experten)
	8 Stunden	8 Stunden	8 Stunden
Anzahl Vorort-Meetings bei BMW	2 Stück	2 Stück (3-Tage Meeting mit 4 Personen Lieferant)	10 Stück
Anzahl Vorort-Meetings beim Lieferanten	1 Stück	1 Stück (4-Tage Meeting mit 6 Personen BMW)	2 Stück
Anzahl Vorort-Meetings beim Lieferanten (VIBN Abnahme)		1 Stück (3-Tage Meeting mit 5 Personen BMW)	1
Anzahl Hotelübernachtungen (Europa)	3 Stück	7 Stück (3 Übernachtungen á 4 Personen, 4 Übernachtungen á 6 Personen)	-
Anzahl Hotelübernachtungen (Europa) (VIBN Abnahme)	-	3 Stück (5 Personen BMW)	-
Dauer Videokonferenzen	1,5 Stunden	1 Stunde	1 Stunde
Anzahl Videokonferenzen während Projektlaufzeit	138 (46 Arbeitswochen * 3 Meetings/Woche)	138 (46 Arbeitswochen * 3 Meetings/Woche)   158 (138 + 20 Videokonferenzen durch VIBN)	148 (138 + Videokonferenzen extra durch VIBN)
Teilnehmeranzahl Videokonferenz	8 Mitarbeiter (4 BMW, 4 Lieferant)	10 Mitarbeiter (4 BMW + 1 VIBN BMW, 4 Lieferant + 1 VIBN	10 Mitarbeiter (4 BMW + 1 VIBN BMW, 4 Lieferant + 1
		Lieferant)	VIBN Lieferant)
Dauer Videokonferenzen (VIBN Abnahme)	-		7 Stunden
Anzahl Videokonferenz (VIBN Abnahme)	-		3 Stück
Teilnehmeranzahl Videokonferenz (VIBN Abnahme)			10 Mitarbeiter (4 BMW + 1 VIBN BMW, 4 Lieferant + 1
			VIDIA LIEUGIAIII)
Anzahl gesendeter E-Mails BMW intern (pro Person)	5 E-Mails/Tag	5,1 E-Mails/Tag (+ 0,1 E-Mails durch VIBN in letzten 6 Monaten)	5,1 E-Mails/Tag (+ 0,1 E-Mails durch VIBN in letzten 3 Monaten)
Anzahl gesendeter E-Mails Lieferant intern (pro Person)	10 E-Mails/Tag	10,2 E-Mails/Tag (+ 0,2 E-Mails durch VIBN in letzten 6 Monaten)	10,2 E-Mails/Tag (+ 0,2 E-Mails durch VIBN in letzten 3 Monaten)
Anzahl gesendeter E-Mails Lieferant - BMW gesamt	5 E-Mails/Tag	5,1 E-Mails/Tag (+ 0,1 E-Mails durch VIBN in letzten 6 Monaten)	5,1 E-Mails/Tag (+ 0,1 E-Mails durch VIBN in letzten 3 Monaten)
Benötigter Speicherplatz (Server in Rechenzentrum)	60 GB	65 GB (+ 5 GB durch VIBN)	65 GB (+ 5 GB durch VIBN)
Benötigte Monitore (pro Mitarbeiter)	2 Stück	3 Stück	3 Stück
Benötigte Desktop PCs (pro Mitarbeiter)	-	1 Stück	1 Stück
Tägliche Nutzung elektronischer Geräte		7 Stunden	7 Stunden
Benötigte Bürofläche (pro Mitarbeiter)	5 Quadratmeter	5 Quadratmeter	5 Quadratmeter

Abbildung 49 Parameter des Engineerings bei einem Lieferanten in Europa; Quelle: eigen/Interviews innerhalb eines OEMS

## 10.6. Anhang 6: Berechnungen zu den Use Cases VIBN

#### Szenario 1.1: Standortnaher Lieferant innerhalb Deutschland

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

$$m_{t_{CO_2}}^{OEM-DE} = (316 \, km \cdot 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6} \, \frac{t \, CO_2 e}{Pkm}\right)$$

 $\cdot$  6 OEM - Mitarbeiter  $\cdot$  50 Vorort - Meetings

 $\approx 30,9048 \ t \ CO_2 e$ 

$$m_{t_{CO_2}}{}^{DE-OEM} = (316\,km\,\cdot\,2)\cdot \left(163\cdot10^{-6}\,\frac{t\,CO_2e}{Pkm}\right)\cdot\,4\,Lieferanten-Mitarbeiter\,\cdot\,$$

 $\cdot$  30 Vorort – Meetings  $\approx$  12,3619 t  $CO_2e$ 

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

$$m_{laptop_s}^{1.1} = \left(9.618 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{a}\right)$$
  
  $\cdot (8 \ OEM - Mitarbeiter + 8 \ Lieferanten - Mitarbeiter) \approx 0,1539 \ t \ CO_2 e$ 

$$\begin{split} m_{monitor}^{1.1} = \left(13.398 \, \cdot 10^{-6} \, \, \frac{t \, CO_2 e}{a}\right) \cdot \, 2 \, Monitore \\ & \cdot \left(8 \, OEM - Mitarbeiter + 8 \, Lieferanten - Mitarbeiter\right) \, \approx \, 0,4287 \, t \, CO_2 e \end{split}$$

$$m_{smartphone}^{1.1} = \left(1.5 \cdot 10^{-3} \frac{t \, CO_2 e}{a}\right) \cdot (8 \, OEM - Mitarbeiter + 8 \, Lieferanten - Mitarbeiter) \approx 0.024 \, t \, CO_2 e$$

$$m_{router}^{1.1} = \left(53 \cdot 10^{-3} \frac{t CO_2 e}{a}\right) \cdot (1 Router OEM + 1 Router Lieferant) \approx 0,106 t CO_2 e$$

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

$$m_{videoconference}^{1.1} = \left(1{,}93\cdot10^{-6}\ \frac{t\ CO_2e}{a}\right)\cdot$$

 $\cdot$  (4 OEM - Mitarbeiter + 4 Lieferant - Mitarbeiter)  $\cdot$ 

1,5 Stunden · 138 Videokonf erenzen

$$\approx 0.0032 t CO_2 e$$

$$m_{datatransfer}{}^{1.1} = \left(1 \cdot 10^{-3} \frac{t \; CO_2 e}{a}\right) \cdot$$

· (8 Arbeitsplätze OEM + 8 Arbeitsplätze Lieferant)

$$=0.016\ t\ CO_2e$$

$$m_{mail}^{1.1} = \left(17 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right)$$

$$\begin{array}{l} \cdot \left( (5\,E-\textit{Mails OEM intern}\, \cdot \, 8\,\textit{OEM}-\textit{Mitarbeiter}\, \cdot \, 220\,\textit{Arbeitstage}) \right. \\ \left. + \left( 10\,\textit{OEM}-\textit{Mails Lieferant}\, \cdot 8\,\textit{Lieferant}-\textit{Mitarbeiter}\, \cdot 220\,\textit{Arbeitstage} \right) \\ \left. + \left( 5\,\textit{OEM}-\textit{Mails OEM}-\textit{Lieferant}\, \cdot 220\,\textit{Arbeitstage} \right) \right) = 0,4675\,t\,\textit{CO}_2\textit{e} \end{array}$$

$$m_{storage}^{1.1} = \left(211 \cdot 10^{-3} \frac{t CO_2 e}{a}\right) \cdot 0.06 \, TB \approx 0.013 \, t \, CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

$$m_{office_{CO_2}}^{1.1} = \left(56.028 \ 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right) \cdot 5 \ m^2 \cdot (8 \ OEM - Mitarbeiter + 8 \ Lieferant - Mitarbeiter) \approx 4,4822 \ t \ CO_2 e$$

## Szenario 1.2: Lieferant innerhalb Europas

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalent des Personentransports

$$m_{t_{CO_2}}^{OEM-EDAG} = (1.129 \ km \cdot 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{Pkm}\right)$$

· 6 OEM - Mitarbeiter · 20 Vorort - Meetings

$$\approx 44,1665 t CO_2 e$$

$$m_{t_{CO_2}}^{EDAG-OEM} = (1.129 \ km \cdot 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{Pkm}\right)$$

 $\cdot$  4 EDAG - Mitarbeiter  $\cdot$  10 Vorort - Meetings

$$\approx 14,7222 t CO_2 e$$

#### Alternative: Gleichbleibende Anzahl an Vorort-Meetings und deren Dauer wie in Szenario 1.1

$$m_{t_{CO_2}}^{OEM-EU\,(a)} = (1.129\,km\cdot 2)\cdot \left(163\cdot 10^{-6}\,\frac{t\,CO_2e}{Pkm}\right)\,\cdot$$

 $\cdot$  6 OEM - Mitarbeiter  $\cdot$  50 Vorort - Meetings

 $\approx 110,4162 \ t \ CO_2 e$ 

$$m_{t_{CO_2}}^{EU-OEM\,(a)} = (1.129\,km \cdot 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6} \,\frac{t\,CO_2 e}{Pkm}\right) \,.$$

4 Lieferant — Mitarbeiter  $\cdot$  30 Vorort — Meetings

 $\approx 11,0416 t CO_2 e$ 

$$m_{t_{CO_2}}{}^{1.1\,(a)} = 110,\!4162\,t\,CO_2e + \,\,11,\!0416\,t\,CO_2e = 121,\!4578\,t\,CO_2e$$

## CO2- Massenäquivalente Hotelübernachtung

$$m_{hotel_{CO_2}}{}^{OEM-EU} = \left(22,62 \cdot 10^{-3} \frac{t CO_2}{night}\right) \cdot$$

· 4 Übernachtungen · 6 OEM – Mitarbeiter \* 20

 $\approx 10,8576t CO_2$ 

$$m_{hotel_{CO_2}}{}^{EU-OEM} = \left(22,62 \cdot 10^{-3} \ \frac{t \ CO_2}{night}\right) \cdot$$

· 3 Übernachtungen · 4 EU – Mitarbeiter \* 10

 $\approx$  2,7144 *t CO*<sub>2</sub>

#### Szenario 2.1: Standortnaher Lieferant innerhalb Deutschlands

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

$$m_{t_{CO_2}}^{OEM-DE} = (316 \, km \cdot 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6} \, \frac{t \, CO_2 e}{Pkm}\right) \cdot 6 \, OEM - Mitarbeiter \cdot 20 \, Vorort \\ - \, Meetings \qquad \approx 12{,}3619 \, t \, CO_2 e$$

$$\begin{split} m_{t_{CO_2}}{}^{DE-OEM} &= (316 \ km \cdot \ 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{Pkm}\right) \cdot \ 4 \ Lieferant - Mitarbeiter \cdot 20 \ Vorort \\ &- Meetings \ \approx 8,2413t \ CO_2 e \end{split}$$

$$m_{t_{CO_2}}{}^{OEM-DE\;(VIBN)} = (316\;km \cdot 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6}\;\frac{t\;CO_2e}{Pkm}\right) \cdot \cdot 5\;Lieferant - Mitarbeiter \cdot 3\;Vorort - Meetings \approx 1,5453\;t\;CO_2e$$

## CO2-Massenäquivalente elektronischer Geräte

$$m_{laptop_s}^{2.1} = \left(9.618 \cdot 10^{-6} \, \frac{t \, CO_2 e}{a}\right)$$

 $\cdot$  (8 *OEM* – *Mitarbeiter* + 8 *FFT* – *Mitarbeiter*)

$$+\left(9.618\cdot 10^{-6}\,\frac{t\,CO_2e}{a}\right)$$

 $\cdot$  (2 VIBN - Experten OEM + 2 VIBN - Experten Lieferant)

$$\cdot \frac{1}{2} Jahr \approx 0,1731 t CO_2 e$$

$$m_{monitor}^{2.1} = \left(13.398 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{a}\right) \cdot 2 \, Monitore$$

$$\cdot \left(8 \, Mitarbeiter \, 0EM \, + \, 8 \, Mitarbeiter \, Lieferant\right)$$

$$+ \left(13.398 \cdot 10^{-6} \, \frac{t \, CO_2 e}{a}\right) \cdot 3 \, Monitore$$

$$\cdot \left(2 \, VIBN - Experten \, 0EM + 2 \, VIBN - Experten \, Lieferant\right) \cdot \frac{1}{2} \, Jahr$$

$$\approx 0,5091 \, t \, CO_2 e$$

$$\begin{split} m_{desktop}^{2.1} &= \left(73.017 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right) \\ &\quad \cdot \left(2 \ VIBN - Experten \ OEM + 2 \ VIBN - Experten \ Lieferant\right) \cdot \frac{1}{2} \ Jahr \\ &\approx 0.146 \ t \ CO_2 e \end{split}$$

$$m_{smartphone}^{2.1} = \left(1.5 \cdot 10^{-3} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right) \ \cdot$$

(80EM - Mitarbeiter + 8 Lieferant - Mitarbeiter)

$$+\left(1.5\cdot10^{-3}\ \frac{t\ CO_2e}{a}\right)$$

·  $(2 VIBN - Experten OEM + 2 VIBN - Experten Lieferant) · \frac{1}{2} Jahr$  $\approx 0.027 t CO_2 e$ 

$$m_{router}^{2.1} = \left(53 \cdot 10^{-3} \frac{t CO_2 e}{a}\right) \cdot (1 Router OEM + 1 Router FFT) \approx 0,106 t CO_2 e$$

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

$$m_{videoconference}^{2.1} = \left(1.93 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right)$$

 $\cdot$  (4 OEM - Mitarbeiter + 4 Lieferant - Mitarbeiter)

· 1,5 Stunden · 138 Videokonf erenzen

$$+\left(1,93\cdot10^{-6}\ \frac{t\ CO_{2}e}{a}\right)$$

 $\cdot$  (5 OEM - Mitarbeiter + 5 Lieferant - Mitarbeiter)

· 1 Stunde · 20 Videokonferenzen  $\approx 0,0036$  t  $CO_2e$ 

$$m_{datatransfer}^{2.1} = \left(1 \cdot 10^{-3} \frac{t \, CO_2 e}{a}\right)$$

 $\cdot$  (8 Arbeitsplätze OEM + 8 Arbeitsplätze Lieferant)

+ 
$$\left(1 \cdot 10^{-3} \frac{t \ CO_2 e}{a}\right)$$
  
·  $(2 \ Arbeitsplätze \ VIBN - Experte \ OEM + 2 \ Arbeitsplätze \ VIBN$   
-  $Experte \ Lieferant)$  ·  $\frac{1}{2} \ Jahr = 0.018 \ t \ CO_2 e$ 

$$\begin{split} m_{mail}^{2.1} &= \left(17 \cdot 10^{-6} \, \frac{\text{t CO}_2 \text{e}}{a}\right) \\ &\cdot \left((5 \, E - \text{Mails OEM intern} \, \cdot \, 8 \, \text{OEM} - \text{Mitarbeiter} \, \cdot \, 220 \, \text{Arbeitstage}\right) \\ &+ (10 \, E - \text{Mails FFT intern} \, \cdot \, 8 \, \text{Lieferant} - \text{Mitarbeiter} \, \cdot \, 220 \, \text{Arbeitstage}) \\ &+ (5 \, E - \text{Mail OEM} - \text{FFT} \, \cdot \, 220 \, \text{Arbeitstage})\right) + \left(17 \cdot 10^{-6} \, \frac{\text{t CO}_2 \text{e}}{a}\right) \\ &\cdot \left((0.1 \, E - \text{Mails OEM intern} \, \cdot \, 2 \, \text{VIBN} - \text{Experten OEM} \, \cdot \, 110 \, \text{Arbeitstage}) \right. \\ &+ (0.2 \, E - \text{Mails FFT} \, \cdot \, 2 \, \text{VIBN} - \text{Experten Lieferant} \, \cdot \, 110 \, \text{Arbeitstage}) \\ &+ (0.1 \, E - \text{Mails OEM} - \text{FFT} \, \cdot \, 110 \, \text{Arbeitstage})\right) = 0.4688 \, \text{t CO}_2 \text{e} \end{split}$$

$$m_{storage}^{2.1} = 211 \cdot 10^{-3} \frac{t CO_2 e}{a} \cdot 0,065 TB \approx 0,0137 t CO_2 e$$

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente eines Bürogebäudes

$$\begin{split} m_{office_{CO_2}}^{2.1} &= \left(56.028\,10^{-6}\,\frac{t\,CO_2e}{a}\right)\cdot 5\,m^2 \\ &\quad \cdot (8\,0EM-Mitarbeiter+8\,Lieferant-Mitarbeiter) \\ &\quad + \left(56.028\,10^{-6}\,\frac{t\,CO_2e}{a}\right)\cdot 5\,m^2 \\ &\quad \cdot (2\,VIBN-Experten\,OEM+2\,VIBN-Experten\,Lieferant)\cdot \frac{1}{2}\,Jahr \\ &\approx 5,0425\,t\,CO_2e \end{split}$$

#### Szenario 2.2: Lieferant innerhalb Europas

## CO2-Massenäquivalent des Personentransports

$$m_{t_{CO_2}}^{OEM-EU} = (1.129~km \cdot 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6}~\frac{t_{CO_2}e}{p_{km}}\right) \cdot 6~OEM - Mitarbeiter \cdot 10~Vorort - Meeting~\approx 22,0832~t_{CO_2}e$$

$$m_{t_{CO_2}}^{EU-OEM} = (1.129 \ km \cdot 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{Pkm}\right) \cdot 4 \ Lieferant - Mitarbeiter \cdot 15 \ Vorort - Meetings \approx 22,0832 \ t \ CO_2 e$$

$$\begin{split} m_{t_{CO_2}}^{OEM-EU~(VIBN)} \\ &= (1.129~km~\cdot~2)~\cdot \left(163\cdot10^{-6}~\frac{t~CO_2e}{Pkm}\right) ~~\cdot 5~OEM-Mitarbeiter~\cdot~1~Vorort\\ &-Meetings~\approx 1,8403~t~CO_2e \end{split}$$

## CO2- Massenäquivalente Hotelübernachtung

$$\begin{split} m_{hotel_{CO_2}}^{&EDAG-OEM~2.2} \\ &= \left(22,62 \cdot 10^{-3}~\frac{t~CO_2}{night}\right)~ \cdot 4~ \ddot{\textbf{U}} bernachtungen~ \cdot 4~ Lieferant-Mitarbeiter\\ &\cdot~15~ Vorort~=4,0716~t~CO_2 \end{split}$$

$$\begin{split} m_{hotel_{CO_2}}^{OEM-EU~2.2} \\ &= \left(22{,}62 \cdot 10^{-3}~\frac{t~CO_2}{night}\right)~ \cdot 4~ \ddot{\cup} bernachtungen~ \cdot 6~OEM-Mitarbeiter \\ &\cdot~10~Vorort~= 5{,}4288~t~CO_2 \end{split}$$

$$m_{hotel_{CO_2}}^{OEM-EU~(VIBN)2.2}$$

$$= \left(22,62 \cdot 10^{-3} \frac{t~CO_2}{night}\right) \cdot 3 ~\ddot{\cup} bernachtungen \cdot 5~OEM - Mitarbeiter$$

$$= 0,3393~t~CO_2$$

## Szenario 3.1: Standortnaher Lieferant innerhalb Deutschlands

## CO2-Massenäquivalente des Personentransports

$$m_{t_{CO_2}}^{OEM-DE} = (316 \, km \cdot 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6} \, \frac{t \, CO_2 e}{Pkm}\right)$$
  
  $\cdot 6 \, OEM - Mitarbeiter \cdot 2 \, Vorort - Meetings$   
  $\approx 1,2362 \, t \, CO_2 e$ 

$$\begin{split} m_{t_{CO_2}}{}^{DE-OEM} &= (316 \ km \ \cdot \ 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{Pkm}\right) \cdot \ 4 \ \textit{Lieferant-Mitarbeiter} \\ &\cdot \\ &\cdot \ 10 \ \textit{Vorort-Meetings} \ \approx 4,1206 \ t \ \textit{CO}_2 e \end{split}$$

## CO2- Massenäquivalente Hotelübernachtung

$$\begin{split} m_{hotel_{CO_2}}^{OEM-DE} \\ &= \left(22,62 \cdot 10^{-3} \; \frac{t \; CO_2}{night}\right) \cdots \; 4 \; \ddot{\textbf{U}} bernachtungen \; \cdot 6 \; OEM - Mitarbeiter \\ &\approx 0,5429 \; t \; CO_2 \end{split}$$

$$m_{hotel_{CO_2}}^{DE-OEM}$$
 
$$= \left(22,62 \cdot 10^{-3} \; \frac{t \; CO_2}{night}\right) \; \cdot \; 3 \; \ddot{\cup} bernachtungen \; \cdot 4 \; Lieferant$$
 
$$- \; Mitarbeiter \quad \approx 0,2714 \; t \; CO_2$$

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

$$\begin{split} m_{laptop_s}^{3.1} &= \left(9.618 \cdot 10^{-6} \, \frac{t \, CO_2 e}{a}\right) \cdot (8 \, OEM - Mitarbeiter + 8 \, Lieferant - Mitarbeiter) \\ &+ \left(9.618 \cdot 10^{-6} \, \frac{t \, CO_2 e}{a}\right) \\ &\cdot (2 \, VIBN - Experten \, OEM + 2 \, VIBN - Experten \, Lieferant) \cdot \frac{1}{4} \, Jahr \\ &\approx 0.1635 \, t \, CO_2 e \end{split}$$

$$\begin{split} m_{monitor}^{3.1} &= \left(13.398 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right) \cdot 2 \ Monitore \\ &\cdot (8 \ OEM - Mitarbeiter + 8 \ Lieferant - Mitarbeiter) \\ &+ \left(13.398 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right) \cdot 3 \ Monitore \\ &\cdot (2 \ VIBN - Experten \ OEM + 2 \ VIBN - Experten \ Lieferant) \cdot \frac{1}{4} \ Jahr \\ &\approx 0,4689 \ t \ CO_2 e \end{split}$$

$$\begin{split} m_{desktop}^{3.1} &= \left(73.017 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right) \\ &\quad \cdot \left(2 \ VIBN - Experten \ OEM + 2 \ VIBN - Experten \ Lieferant\right) \cdot \frac{1}{4} \ Jahr \\ &\approx 0.073 \ t \ CO_2 e \end{split}$$

$$\begin{split} m_{smartphone}^{3.1} &= \left(1.5 \cdot 10^{-3} \; \frac{t \; CO_2 e}{a}\right) \\ & \cdot \left(8 \; OEM - Mitarbeiter + 8 \; FFT - Mitarbeiter\right) \; \; + \left(1.5 \cdot 10^{-3} \; \frac{t \; CO_2 e}{a}\right) \\ & \cdot \left(2 \; VIBN - Experten \; OEM + \; 2 \; VIBN - Experten \; Lieferant\right) \cdot \frac{1}{4} \; Jahr \\ & \approx 0.0255 \; t \; CO_2 e \end{split}$$

$$m_{router}^{3.1} = \left(53 \cdot 10^{-3} \frac{t CO_2 e}{a}\right) \cdot (1 Router OEM + 1 Router Lieferant) \approx 0,106 t CO_2 e$$

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

$$m_{videoconference}^{3.1} = \left(1.93 \cdot 10^{-6} \, \frac{t \, CO_2 e}{a}\right)$$

- $\cdot$  (4 *OEM Mitarbeiter* + 4 *Lieferant Mitarbeiter*)
- $\cdot$  1,5 Stunden  $\cdot$  138 Videokonferenzen

$$+\left(1,93\cdot 10^{-6}\ \frac{t\ CO_{2}e}{a}\right)$$

- $\cdot$  (5 *OEM Mitarbeiter* + 5 *Lieferant Mitarbeiter*)
- $\cdot$  1 Stunde  $\cdot$  10 Videokonferenzen

$$+\left(1{,}93\cdot10^{-6}\;\frac{t\;CO_2e}{a}\right)$$

 $\cdot$  (5 OEM - Mitarbeiter + 5 Lieferant - Mitarbeiter)

- · 7 Stunden · 3 Videokonferenzen
- $\approx 0.0038 t CO_2 e$

$$m_{datatransfer}^{3.1} = \left(1 \cdot 10^{-3} \frac{t \ CO_2 e}{a}\right)$$

· (8 Arbeitsplätze OEM + 8 Arbeitsplätze Lieferant)

$$+\left(1\cdot 10^{-3}\frac{t\ CO_2e}{a}\right)$$

 $\cdot$  (2 Arbeitsplätze VIBN – Experte OEM + 2 Arbeitsplätze VIBN – Experte Lieferant)

$$\cdot \frac{1}{4} Jahr = 0.017 t CO_2 e$$

$$\begin{split} m_{mail}^{3.1} &= \left(17 \cdot 10^{-6} \, \frac{\text{t CO}_2 \text{e}}{\text{a}}\right) \\ &\cdot \left((5 \, E - \text{Mails OEM intern} \, \cdot \, 8 \, \text{OEM} - \text{Mitarbeiter} \, \cdot \, 220 \, \text{Arbeitstage}\right) \\ &+ (10 \, E - \text{Mails Lieferant} \, \cdot \, 8 \, \text{Lieferant} - \text{Mitarbeiter} \, \cdot \, 220 \, \text{Arbeitstage}) \\ &+ (5 \, E - \text{Mails OEM} - \text{Lieferant} \, \cdot \, 220 \, \text{Arbeitstage})\right) + \left(17 \cdot 10^{-6} \, \frac{\text{t CO}_2 \text{e}}{\text{a}}\right) \\ &\cdot \left((0.1 \, E - \text{Mails OEM intern} \, \cdot \, 2 \, \text{VIBN} - \text{Experten OEM} \, \cdot \, 55 \, \text{Arbeitstage}) \\ &+ (0.2 \, E - \text{Mails Lieferant} \, \cdot \, 2 \, \text{VIBN} - \text{Experten Lieferant} \, \cdot \, 55 \, \text{Arbeitstage}) \\ &+ (0.1 \, E - \text{Mails OEM} - \text{Lieferant} \, \cdot \, 55 \, \text{Arbeitstage})\right) = 0.4682 \, \text{t CO}_2 \text{e} \end{split}$$

$$m_{storage}^{3.1} = 211 \cdot 10^{-3} \frac{t CO_2 e}{a} \cdot 0,065 TB \approx 0,0137 t CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

$$\begin{split} m_{office_{CO_2}}^{3.1} &= \left(56.028\ 10^{-6}\ \frac{t\ CO_2e}{a}\right)\cdot 5\ m^2 \\ &\quad \cdot \left(8\ OEM - Mitarbeiter + 8\ Lieferant - Mitarbeiter\right) \\ &\quad + \left(56.028\ 10^{-6}\ \frac{t\ CO_2e}{a}\right)\cdot 5\ m^2 \\ &\quad \cdot \left(2\ VIBN - Experten\ OEM + 2\ VIBN - Experten\ OEM\right)\cdot \frac{1}{4}\ Jahr \\ &\approx 4,7624\ t\ CO_2e \end{split}$$

## 10.7. Anhang 7: Berechnungen zu den Use Cases der Energiesimulation

## Szenario 1: Ohne Energiesimulation

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des zusätzlichen Materialbedarfs

$$m_{Mat_{CO_2}}^{4.1} = \cdot 5 t Stahl \cdot 2,18 \frac{t CO_2 e}{t (Stahl)} \approx 21,8 t CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

$$m_{t_{CO_2}}^{4.1} = (281 \ km \cdot 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{Pkm}\right) \cdot 6 \ Lieferanten - Mitarbeiter \cdot 10^{-6} \cdot 10^$$

 $\cdot$  20 Vorort – Meetings  $\approx$  7,3285 t  $CO_2e$ 

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

$$m_{laptop_s}^{4.1} = \left(9.618 \cdot 10^{-6} \frac{t CO_2 e}{a}\right)$$
  
  $\cdot (8 \ OEM - Mitarbeiter + 8 \ Lieferanten - Mitarbeiter) \approx 0,1539 \ t \ CO_2 e$ 

$$m_{monitor}^{4.1} = \left(13.398 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right) \cdot 2 \ Monitore$$
  
  $\cdot (8 \ OEM - Mitarbeiter + 8 \ Lieferanten - Mitarbeiter) \approx 0,4287 \ t \ CO_2 e$ 

$$m_{smartphone}^{4.1} = \left(1.5 \cdot 10^{-3} \frac{t CO_2 e}{a}\right) \cdot (8 \ OEM - Mitarbeiter + 8 \ Lieferanten - Mitarbeiter) \approx 0.024 \ t \ CO_2 e$$

$$m_{router}^{4.1} = \left(53 \cdot 10^{-3} \; \frac{t \; CO_2 e}{a}\right) \cdot \left(1 \; Router \; OEM + 1 \; Router \; Lieferant\right) \; \approx \; 0,106 \; t \; CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

$$m_{videoconference}^{4.1} = \left(1,93 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right) \cdot \ (4 \ OEM - Mitarbeiter + 4 \ Lieferant - Mitarbeiter) \cdot \ 1,5 \ Stunden \cdot 56 \ Videokonferenzen \approx 0,00129696 \ t \ CO_2 e$$

$$m_{datatransfer}^{4.1} = \left(1 \cdot 10^{-3} \frac{t \ CO_2 e}{a}\right) \cdot$$

· (8 Arbeitsplätze OEM + 8 Arbeitsplätze Lieferant)

$$= 0.016 t CO_2 e$$

$$\begin{split} m_{mail}^{4.1} &= \left(17 \cdot 10^{-6} \; \frac{t \; CO_2 e}{a}\right) \\ & \cdot \left((5 \; E - Mails \; OEM \; intern \; \cdot \; 8 \; OEM - Mitarbeiter \; \cdot \; 220 \; Arbeitstage) \\ & + \left(10 \; OEM - Mails \; Lieferant \; \cdot \; 8 \; Lieferant - Mitarbeiter \; \cdot \; 220 \; Arbeitstage) \\ & + \left(5 \; OEM - Mails \; OEM - Lieferant \; \cdot \; 220 \; Arbeitstage)\right) = 0,4675 \; t \; CO_2 e \end{split}$$

$$m_{storage}^{4.1} = \left(211 \cdot 10^{-3} \frac{t CO_2 e}{a}\right) \cdot 0.06 \, TB \approx 0.013 \, t \, CO_2 e$$

#### CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

$$m_{office_{CO_2}}^{4.1} = \left(56.028 \ 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right) \cdot 5 \ m^2 \cdot (5 \ OEM - Mitarbeiter + 4 \ Lieferant - Mitarbeiter) \approx 2,5213 \ t \ CO_2 e$$

## Szenario 2: Klassische Energieplanung

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des zusätzlichen Materialbedarfs

$$m_{Mat_{CO_2}}^{4.2} = \cdot 4 t Stahl \cdot 2,18 \frac{t CO_2 e}{t (Stahl)} \approx 8,72 t CO_2 e$$

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

$$m_{t_{CO_2}}^{4.2} = (281 \, km \cdot 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6} \, \frac{t \, CO_2 e}{Pkm}\right) \cdot 6 \, Lieferanten - Mitarbeiter \cdot 20 \, Vorort - Meetings \approx 8,2445 \, t \, CO_2 e$$

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

$$m_{laptop_s}^{4.2} = \left(9.618 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \, CO_2 e}{a}\right)$$
  
  $\cdot \left(8 \, OEM - Mitarbeiter + 8 \, Lieferanten - Mitarbeiter\right) \approx 0,1924 \, t \, CO_2 e$ 

$$\begin{split} m_{monitor}^{4.2} = \left(13.398 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right) \cdot 2 \ Monitore \\ & \cdot \left(10 \ OEM - Mitarbeiter + 10 \ Lieferanten - Mitarbeiter\right) \approx 0,2921 \ t \ CO_2 e \end{split}$$

$$m_{smartphone}^{4.2} = \left(1.5 \cdot 10^{-3} \, \frac{t \, co_2 e}{a}\right) \, \cdot \left(10 \, OEM - Mitarbeiter + 10 \, Lieferanten - Mitarbeiter\right) \\ \approx 0.027 \, t \, CO_2 e$$

$$m_{router}^{4.2} = m_{router}^{4.1} \approx 0.106 t CO_2 e$$

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

$$m_{videoconference}^{4.2} = \left(1.93 \cdot 10^{-6} \ \frac{t \ CO_2 e}{a}\right)$$

$$\cdot$$
 (4 OEM - Mitarbeiter + 4 Lieferant - Mitarbeiter)

· 1,5 Stunden · 138 Videokonf erenzen

$$+\left(1,93\cdot10^{-6}\ \frac{t\ CO_{2}e}{a}\right)$$

 $\cdot$  (5 OEM - Mitarbeiter + 5 Lieferant - Mitarbeiter)

· 1 Stunde · 20 Videokonferenzen  $\approx 0,0036$  t  $CO_2e$ 

$$m_{datatransfer}^{4.2} = m_{datatransfer}^{4.1} = 0.016 t CO_2 e$$

$$m_{mail}^{4.2} = m_{mail}^{4.1} \approx 0.013 \ t \ CO_2 e$$

$$m_{storage}^{4.2} = m_{storage}^{4.1} \approx 0.013 t CO_2 e$$

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

$$\begin{split} m_{office_{CO_2}}^{\quad 4.2} &= \left(56.028\ 10^{-6}\ \frac{t\ CO_2e}{a}\right)\cdot 5\ m^2 \\ &\quad \cdot (8\ OEM-Mitarbeiter+8\ Lieferant-Mitarbeiter) \\ &\quad + \left(56.028\ 10^{-6}\ \frac{t\ CO_2e}{a}\right)\cdot 5\ m^2 \\ &\quad \cdot (2\ Simulation-Experten\ OEM+2\ Simulation-Experten\ OEM)\cdot 1\ Jahr \\ &\approx 5,3227\ t\ CO_2e \end{split}$$

## Szenario 3: Digitale Energieplanung

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente des Personentransports

$$m_{t_{CO_2}}^{4.3} = (281 \, km \cdot 2) \cdot \left(163 \cdot 10^{-6} \, \frac{t \, CO_2 e}{Pkm}\right) \cdot 6 \, Lieferanten - Mitarbeiter \cdot 5 \, Vorort - Meetings \approx 2,74818t \, CO_2 e$$

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente elektronischer Geräte

$$m_{laptop_s}^{4.3} = m_{laptop_s}^{4.2} \approx 0.1924t CO_2 e$$

$$m_{monitor}^{4.3} = m_{monitor}^{4.2} \approx 0.2921 \, t \, CO_2 e$$

$$m_{smartphone}^{4.3} = m_{smartphone}^{4.2} \approx 0.027 \ t \ CO_2 e$$

$$m_{router}^{4.3} = m_{router}^{4.2} \approx 0,106 t CO_2 e$$

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente der ICT

$$m_{videoconference}^{4.3} = \left(1.93 \cdot 10^{-6} \frac{t \, CO_2 e}{a}\right)$$

 $\cdot$  (4 OEM - Mitarbeiter + 4 Lieferant - Mitarbeiter)

 $\cdot$  1,5 Stunden  $\cdot$  150 Videokonferenzen

$$+\left(1,93\cdot10^{-6}\,\frac{t\;CO_{2}e}{a}\right)$$

- $\cdot$  (5 *OEM Mitarbeiter* + 5 *Lieferant Mitarbeiter*)
- · 1 Stunde · 10 Videokonferenzen

$$+\left(1,93\cdot10^{-6}\ \frac{t\ CO_{2}e}{a}\right)$$

 $\cdot$  (5 *OEM* – *Mitarbeiter* + 5 *Lieferant* – *Mitarbeiter*)

· 7 Stunden · 3 Videokonferenzen

$$\approx 0,0038 t CO_2 e$$

$$m_{datatransfer}^{4.3} = m_{datatransfer}^{4.2} = 0.016 t CO_2 e$$

$$m_{mail}^{4.3} = m_{mail}^{4.2} = 0,4675 t CO_2 e$$

$$m_{storage}^{~4.3} = m_{storage}^{~4.2}~\approx 0.013~t~CO_2e$$

## CO<sub>2</sub>-Massenäquivalente Bürogebäude

$$m_{office_{CO_2}}^{~~4.1} = m_{office_{CO_2}}^{~~4.2} \approx 5{,}3227~t~CO_2e$$

# 10.8. Anhang 8: Input Template für Web-Applikation

parameters	example value	unit
Overall project duration	220	days
engineering process project duration	30	days
Engineering costs	400000	€
engineering process costs	30000	€
Number of project participants for Engineering	8	
Number of engineering contractors involved in the project	8	employees
Daily working hours	8	hours
Number of on-site meetings at OEM	2	
Number of on-site meetings with the supplier	1	
Number of on-site meetings with the supplier	2	
Number of overnight stays in hotels	3	
Duration of video conferences	1.5	hours
Number of video conferences during the project	138	
Number of video conference participants	8	employees
Duration of video conferences	2	
Number of video conferences	2	
Number of video conference participants	2	

Number of emails sent internally by OEM (per person)	5	emails/day
Number of emails sent internally by supplier (per person)	10	emails/day
Number of emails sent Supplier - OEM overall	5	emails/day
Required storage space (server in data center)	60	GB
Monitors required (per employee)	2	pieces
Required desktop PCs (per employee)	1	
Daily use of electronic devices	7	hours
Required office space (per employee)	5	square meters