

## Schriftenreihe des Studienganges Service Engineering Whitepaper #3

Morris Bertram, Elias Janner

### Berechnung des Carbon Handprint von Wartungen

Hrsg.: Prof. Dr. Lennart Brumby



# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	III
Vorwort .....	IV
Einleitung .....	1
Überblick .....	3
<b>Analyse der technischen Referenzsysteme .....</b>	<b>7</b>
1.1 <i>Charakterisierung der energetischen Profile der Untersuchungsobjekte .....</i>	7
1.1.1 Produktionssysteme am Beispiel einer CNC – Drehmaschine .....	7
1.1.2 Fluidtechnische Systeme am Beispiel einer Membranpumpe .....	8
1.1.3 Infrastruktursysteme am Beispiel einer HLK - Anlage .....	8
1.2 <i>Instandhaltungsstrategien im Kontext der Dekarbonisierung .....</i>	9
1.2.1 Die energetischen Defizite der reaktiven Instandhaltung .....	9
1.2.2 Präventive Wartung als Hebel zur Emissionsvermeidung .....	9
1.2.3 Predictive Maintenance und Energiemanagement .....	10
1.3 <i>Methodik der energetischen Datenerfassung .....</i>	10
<b>Methodik zur Berechnung des Carbon Handprint von Wartungen .....</b>	<b>12</b>
2.1 <i>Systemgrenzen und Bilanzierungsrahmen .....</i>	12
2.2 <i>Mathematische Herleitung des Differenzansatzes .....</i>	13
2.3 <i>Quantifizierung energetischer Verlustfaktoren .....</i>	14
2.3.1 CNC-Drehmaschinen (Elektromotor) .....	14
2.3.2 Industripumpe (Membranpumpe, elektrisch) .....	15
2.3.3 HLK-Systeme (Heizung, Lüftung und Klimatisierung) .....	17
2.4 <i>Zusammenführung der Parameter in ein Berechnungsmodell .....</i>	18
2.5 <i>Berücksichtigung von Lastprofilen und Betriebsarten .....</i>	19
2.6 <i>Validierung der Datenbasis und Unsicherheitsbetrachtung .....</i>	20
<b>Entwicklung der Kennzahl: „Maintenance Carbon Handprint – Wartung (MCHW)“</b>	<b>21</b>
3.1 <i>Herleitung und Definition der Kennzahl .....</i>	21
3.2 <i>Einflussfaktoren auf den MCHW .....</i>	22
3.3 <i>Berechnungsansatz und Beispielwerte .....</i>	23

3.4	<i>Visualisierung und Priorisierungs-Matrix</i> .....	27
	<b>Diskussion</b> .....	<b>28</b>
4.1	<i>Aussagekraft und Grenzen der Methode</i> .....	28
4.1.1	Validität der Baseline.....	28
4.1.2	Systemgrenzenproblem: Wartung und Instandsetzung.....	28
4.1.3	Nicht bilanzierte Effekte.....	29
4.1.4	Grenzfall negativer Handprint .....	29
4.2	<i>Unsicherheit der Datengrundlage</i> .....	29
4.2.1	Emissionsfaktor Varianz .....	29
4.2.2	Fehlende Standardisierung .....	30
4.3	<i>Vergleich zu alternativen Nachhaltigkeitsmetriken</i> .....	30
4.3.1	Carbon Footprint vs. Carbon Handprint.....	30
4.3.2	Life Cycle Climate Performance (LCCP) .....	30
4.3.3	ESG – Rating und CSRD – Anforderungen .....	31
	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>32</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
	<b>Abbildungsquellen</b> .....	<b>XIV</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XIV</b>
	<b>Impressum</b> .....	<b>XV</b>
	<b>Kontakt</b> .....	<b>XVI</b>

# Abkürzungsverzeichnis

VDI	Verein Deutscher Ingenieure
LCCP	Life Cycle Climate Performance
DIN EN	Deutsches Institut für Normung / Europäische Norm
ESG	Environmental, Social, Governance
CSRD	Corporate Social Responsibility Directive
CSR	Corporate Social Responsibility
CH	Carbon Handprint
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
CFP	Carbon Footprint
THG	Treibhausgas
CNC	Computerized Numerical Control
MCHW	Maintenance Carbon Handprint – Wartung
CMMS	Computerized Maintenance Management System
HLK	Heizung, Lüftung, Klimatisierung
CO <sub>2</sub> e	Kohlenstoffdioxidäquivalente
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning
ERP-System	Enterprise Resource Planning System
MES-System	Manufacturing Execution System
KPI	Key Performance Indicator
GHG Protocol	Greenhouse Gas Protocol
ESRS	European Sustainability Reporting Standards
OEE	Overall Equipment Effectiveness
SAP PM	SAP Plant Maintenance
PCF	Product Carbon Footprint
IIoT	Industrial Internet of Things

# Vorwort

Dass Instandhaltung von Maschinen sinnvoll und notwendig ist, wird grundsätzlich keiner bestreiten. Dass solche Instandhaltung natürlich auch einen ökologischen Wert haben, steht ebenfalls außer Frage, wäre doch die alternative Neubeschaffung einer Maschine in der Regel mit einem wesentlich höheren Carbon Footprint verbunden. Bei der Bemessung dieses ökologischen Wertes von Instandhaltungsleistungen stoßen wir jedoch noch an Grenzen. Während wir heute detailliert die Instandhaltungskosten ermitteln und dokumentieren, wird nicht bestimmt, wie viel CO<sub>2</sub> durch bestimmte Instandhaltungsleistungen eingespart werden.

Der vor einiger Zeit von mir postulierte *Maintenance Carbon Handprint (MCH)*, also die Bemessung des ökologischen Beitrags der Instandhaltung in Form von eingesparten CO<sub>2</sub>-Äquivalenten durch die jeweiligen Leistungen der Instandhaltung, ist bislang nur ein theoretischer Ansatz gewesen ohne praktische Erprobung.

Das hier vorliegende Whitepaper ist im Rahmen einer Studienarbeit an der DHBW Mannheim im Studiengang Service Engineering entstanden, die genau diese Erprobung des MCH am Beispiel von regelmäßigen Wartungen an Maschinen zum Ziel hatte. Anhand beispielhafter Berechnungen wird hier sehr anschaulich und gut nachvollziehbar gezeigt, dass ein solcher MCH für Wartungen berechenbar ist und so sehr schön aufzeigen kann, welchen ökologischen Beitrag Wartungen für ein Unternehmen und die Umwelt leisten können.

Die Autoren dieses Whitepapers studieren im Studiengang Service Engineering und kennen die Besonderheiten der Instandhaltung nicht nur aufgrund der speziellen Lehreinheiten des Studiengangs, sondern auch durch ihre regelmäßigen Praxisphasen in ihren Ausbildungsunternehmen sehr gut. Mit ihrer spezifischen Ausbildung sind sie prädestiniert, neue wissenschaftliche Methoden und Werkzeuge in den Bereich der Instandhaltung und des technischen Service zu adaptieren und praktisch anzuwenden.

Ich danke den beiden hoch engagierten Studenten für die hier ausgearbeitete Methodik zur Berechnung eines MCH von Wartungen. Mit der Veröffentlichung wollen wir diese beispielhaften Berechnungen auch einem breiten Fachpublikum zur Verfügung stellen. Ich wünsche Ihnen viel Freude beim Lesen und hoffe, dass Ihnen diese hier präsentierte Methodik hilft, Ihren eigenen Maintenance Carbon Handprint von Wartungen berechnen zu können.

Ihr



Prof. Dr. Lennart Brumby  
Studiengangsleiter Service Engineering  
Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Man



# Einleitung

Der globale Klimawandel zählt zu den größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Mit dem Pariser Klimaabkommen von 2015 verpflichteten sich die Vertragsstaaten, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. [1] Um dieses Ziel zu erreichen, müssen Staaten, Unternehmen und Gesellschaften ihren Ausstoß an Treibhausgasen (THG) signifikant reduzieren. In der Folge wächst der Druck auf die Industrie, Prozesse, Produkte und Dienstleistungen nachhaltiger zu gestalten und Emissionen systematisch zu bilanzieren. [2] Die Europäische Union hat diesen Transformationsprozess durch den European Green Deal und die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) politisch und regulatorisch fest verankert. Unternehmen werden zunehmend verpflichtet, ihre ökologischen Auswirkungen offenzulegen und darzulegen, mit welchen Maßnahmen sie aktiv zur Emissionsminderung beitragen. [3] Neben der Reduktion des sogenannten Carbon Footprint, also der verursachten Emissionen, rückt damit auch die Frage nach dem positiven Beitrag von Organisationen zur Emissionsvermeidung, dem sogenannten Carbon Handprint, in den Fokus. Im industriellen Kontext werden Umweltwirkungen bislang vorrangig im Produktionsprozess selbst oder in der Lieferkette verortet (Scopes 1–3 nach GHG Protocol). Unterstützende Unternehmensfunktionen wie die Instandhaltung werden hingegen meist nur aus technischer und wirtschaftlicher Perspektive betrachtet.

Die Instandhaltung wird definiert als die „Kombination aller technischen, administrativen und Management-Maßnahmen während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung des funktionsfähigen Zustands dient“. [4] Die Wartung als Teilbereich der Instandhaltung verfolgt das Ziel, den Abnutzungsprozess zu verlangsamen und so die Lebensdauer technischer Systeme zu verlängern. Damit besitzt sie nicht nur ökonomische, sondern auch ökologische Relevanz. Jede Wartung trägt potenziell dazu bei, den Energieverbrauch, die Materialverluste und den Ersatzteilbedarf einer Anlage zu reduzieren. [5]

Durch Wartungen wird ein technisches System energieeffizienter, langlebiger oder ressourcenschonender betrieben, was zu einer nachweisbaren Reduktion der Treibhausgasemissionen führt. Trotz dieser Logik fehlt bislang eine standardisierte Methode, um den positiven Klimaeffekt von Wartungen zu berechnen oder als Kennzahl abzubilden. Die bestehenden Normen bieten zwar methodische Ansätze, wurden jedoch primär zur Bewertung von Produkten, Organisationen oder kompletten Prozessen entwickelt, nicht für einzelne technische Maßnahmen. [2] [6] [7]

Die vorliegende Studienarbeit verfolgt das Ziel, den Beitrag von Wartungsmaßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen systematisch zu erfassen und zu bewerten. Im Zentrum steht die Entwicklung der Kennzahl „Maintenance Carbon Handprint – Wartung“ (MCHW) einhergehend mit einer Methodik zur Berechnung des Carbon Handprint von Wartungen, die es ermöglicht, den positiven Nachhaltigkeitseffekt von Instandhaltungsmaßnahmen quantitativ zu bestimmen. Ferner soll eine Bewertungsmethode erstellt werden, die es ermöglicht den Handprint einer Wartung in Form einer Matrix zu priorisieren und in das betriebliche Instandhaltungsmanagement zu integrieren.

# Überblick

Zur besseren Verständlichkeit dient dieser Überblick als Orientierung für den Aufbau dieser Arbeit. Grundsätzlich ist die Arbeit in Hauptkapitel und Unterkapitel gegliedert, wobei nur die Unterkapitel einer festgelegten Nummerierung folgen. Erstes Kapitel ist somit die „Analyse der technischen Referenzsysteme“.

Die Arbeit beginnt mit der Erläuterung der ausgewählten Referenzsysteme, anhand welcher die entwickelte Methodik exemplarisch eingesetzt werden soll. Die Methodik zur Berechnung des Carbon Handprint einer Wartungsmaßnahme wird im folgenden Kapitel erläutert und dargestellt. Anschließend wird die Kennzahl MCHW entwickelt und anhand von drei Beispielrechnungen aufgeführt. Des Weiteren werden die Ergebnisse dieser Rechnungen in der erstellten Priorisierungsmatrix, der „MCHW – Matrix“ veranschaulicht. Zum Schluss folgt die Diskussion der Ergebnisse. In diesem Überblick werden grundlegende Begriffe und Mechanismen erläutert, die zum Verständnis der nachfolgenden Arbeit benötigt werden. Abbildung 1 erläutert beispielhaft den Unterschied zwischen dem Carbon Footprint und dem Carbon Handprint, anhand eines Unternehmens welches Solarzellen herstellt.



Abbildung 1: Erläuterung des Carbon Handprint [A]

Während der Carbon Footprint die durch Produkte, Prozesse oder Organisationen entstehenden Emissionen bilanziert und damit die klimarelevante Belastung dokumentiert, richtet sich der Carbon Handprint auf jene Emissionsminderungen, die durch gezielte Maßnahmen erzielt werden. Er macht somit sichtbar, welchen aktiven Beitrag eine Handlung, eine technische Innovation oder eine Wartungsmaßnahme zur Reduktion von Treibhausgasemissionen leisten kann. [8] Die Emissionen, die ein Unternehmen emittiert oder der Umwelt entzieht, lassen sich in drei Kategorien einteilen, den sogenannten „Scopes“.

### Übersicht der Scopes und Emissions-Kategorien des Greenhouse Gas Protocol Corporate und Scope 3 Standard

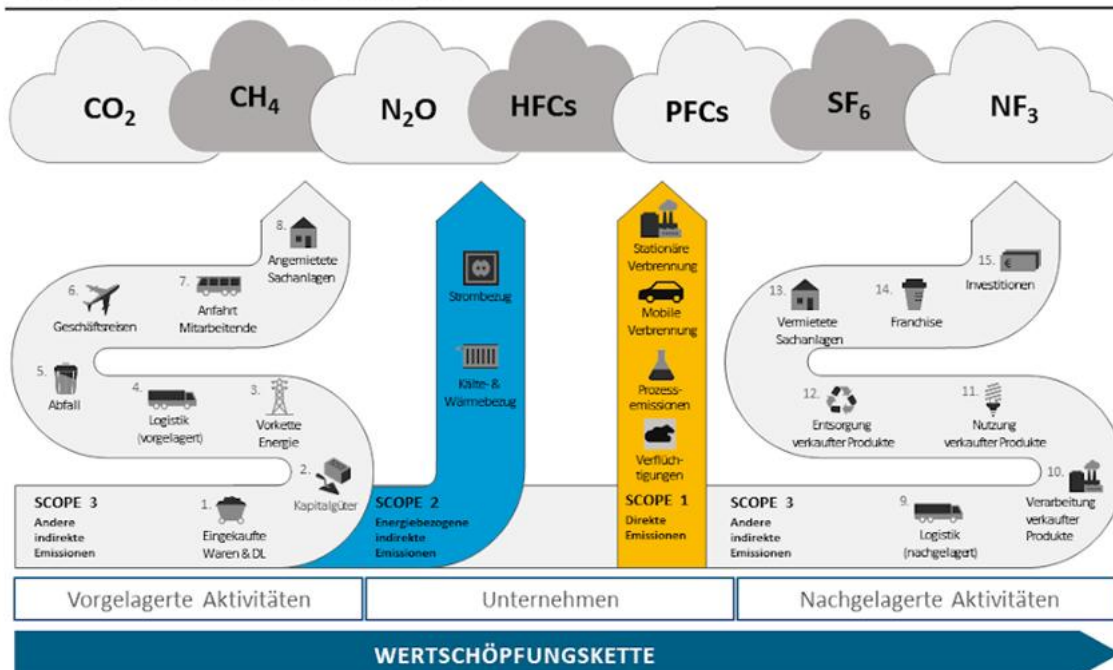


Abbildung 2: Emissions-Kategorien (Scopes) [B]

Abbildung 2 zeigt die drei verschiedenen Scopes, in die Emissionen im betriebswirtschaftlichen Sinne eingeteilt werden können. Scope 1 Emissionen sind direkte vom Unternehmen erzeugte Emissionen, wie die Verbrennung fossiler Stoffe oder die Nutzung und Verflüchtigung von Gasen während der Produktion. Auf diese Emissionen kann das Unternehmen unmittelbaren Einfluss nehmen. Scope 2 Emissionen erschließen sich aus dem Energieverbrauch eines Unternehmens. Wenn für Prozesse innerhalb des Unternehmens Strom benötigt wird, so sind die Emissionen, die bei der Stromerzeugung entstanden sind, dem Unternehmen als Scope 2 Emissionen anzurechnen. Für erzeugte Wärme oder Kälte, die vom Unternehmen genutzt wird, gilt das gleiche. Zuletzt werden die Scope 3 Emissionen betrachtet. Diese werden als „Andere indirekte Emissionen“ bezeichnet und in vor- und nachgelagerte Aktivitäten unterschieden. Zu den vorgelagerten Scope 3 Emissionen zählt man alle Prozesse, die zur

Entstehung des Produktes beitragen, wie etwa den Bezug von Waren und Dienstleistungen, deren Logistik, Dienstreisen sowie die Anfahrt der Mitarbeiter zum Unternehmen aber auch die Entsorgung von Stoffen, die während der Erzeugung des Produktes entstehen. Zu den nachgelagerten Scope 3 Emissionen zählen demnach alle Prozesse, die im Zusammenhang mit dem fertigen Produkt stehen, wie etwa die Logistik, die Verarbeitung und Nutzung des Produkts, vermietete Sachanlagen und die Entsorgung der verkauften Produkte. [9]

Da der Carbon Footprint nicht nur Kohlenstoffdioxid berücksichtigt, müssen andere Treibhausgase zuerst über einen Emissionsfaktor (*EF*) in sogenannte CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>e) umgerechnet werden. Ein Kohlenstoffdioxidäquivalent ist ein Maß, welches für einen normierten Zeitraum die Klimawirkung von Treibhausgasen mit der von CO<sub>2</sub> vergleicht und dabei die unterschiedlichen Eigenschaften von Treibhausgasen in Relation setzt, um diese greifbarer zu machen. [10] Die Angaben zur Umrechnung der Klimawirkung auf CO<sub>2</sub>-Äquivalente, müssen dem neuesten Bericht des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change/IPCC) entnommen werden. [2] Alle auch für diese Arbeit notwendigen Emissionsfaktoren und Umrechnungswerte sind der „Liste mit Emissionsfaktoren für die Treibhausgasbilanzierung von Organisationen“ zu entnehmen. [11]

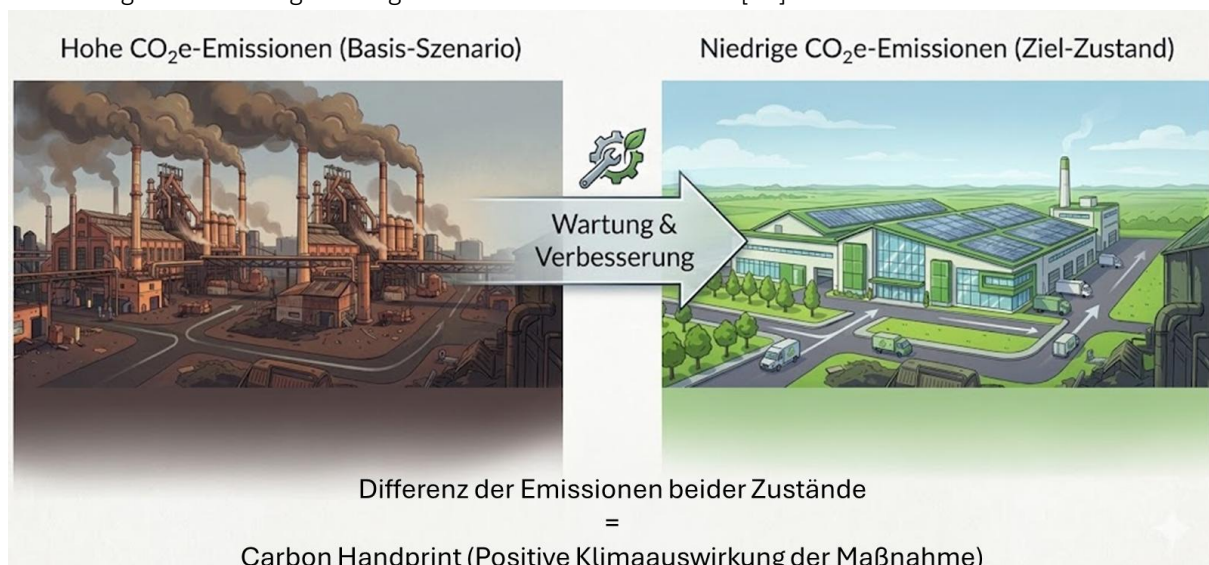


Abbildung 3: Konzept des Carbon Handprint [C]

Wie in Abbildung 3 zu sehen, erfolgt die Ermittlung des Carbon Handprint über einen Differenzansatz. Ausgangspunkt ist ein definiertes Ausgangsszenario, das den Zustand ohne die betrachtete Maßnahme abbildet. Diesem wird ein alternatives, verbessertes Szenario gegenübergestellt, in dem die entsprechende Maßnahme, beispielsweise eine optimierte Wartungsstrategie oder eine Effizienzsteigerung, umgesetzt ist. Der Carbon Handprint ergibt sich aus der Differenz der

Treibhausgasemissionen beider Szenarien. [6] Entscheidend ist hierbei die emissionsrelevante Veränderung, die in CO<sub>2</sub>e angegeben wird. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine eindeutige Quantifizierung der erzielten Emissionsminderungen und schafft die Grundlage für eine objektive Bewertung der Klimawirkung.

# Analyse der technischen Referenzsysteme

## 1.1 Charakterisierung der energetischen Profile der Untersuchungsobjekte

Die Berechnung eines universell anwendbaren *Maintenance Carbon Handprint – Wartung* (MCHW) erfordert eine detaillierte Analyse der technischen Systeme, an denen die Wartungsmaßnahmen durchgeführt werden. In dieser Arbeit werden drei repräsentative Säulen der industriellen Infrastruktur untersucht: ein Produktionssystem (CNC-Drehmaschine), ein fluidtechnisches System (elektrische Membranpumpe) und ein infrastrukturelles System (HLK-Anlage). Diese Auswahl stellt sicher, dass die entwickelte Methodik unterschiedliche Lastprofile und Verschleißmechanismen abdeckt.

### 1.1.1 Produktionssysteme am Beispiel einer CNC – Drehmaschine

CNC-Drehmaschinen sind hochkomplexe Systeme, deren Energieverbrauch stark von der mechanischen Präzision und dem Zustand der Antriebskomponenten abhängt. Der Gesamtenergiebedarf setzt sich aus einer variablen Prozesslast und einer signifikanten Grundlast zusammen. Letztere umfasst Aggregate wie die Steuerung, die Hydraulik für die Werkzeugspannung und das Kühlschmiermittelsystem (KSS). Studien zeigen, dass der energetische Wirkungsgrad einer Werkzeugmaschine mit fortschreitendem Verschleiß der Hauptspindellager und der Führungsbahnen degressiv abnimmt. [12] Besonders kritisch ist hierbei der Zusammenhang zwischen der Werkzeugverschleißprogression und der notwendigen Schnittkraft. Ein stumpfes Werkzeug oder eine schlecht geschmierte Führung führen zu einer erhöhten Stromaufnahme der Achsmotoren, um den mechanischen Widerstand zu überwinden. [13] Das Lastprofil einer CNC-Drehmaschine ist somit hochdynamisch. Eine Wartung zielt hier primär darauf ab, die mechanische Reibung in den Linearführungen und Lagern auf einem konstanten Minimum zu halten, um die Abweichung zwischen dem idealen Leistungsbedarf ( $P_{Base}$ ) und dem verschleißbedingten Realbedarf ( $P_{Ref}$ ) zu minimieren.

### 1.1.2 Fluidtechnische Systeme am Beispiel einer Membranpumpe

Im Gegensatz zur hochdynamischen CNC-Drehaschine zeichnen sich elektrische Membranpumpen oft durch ein eher konstantes Lastprofil aus, da sie häufig in kontinuierlichen Prozessketten eingesetzt werden. Hier liegt der energetische Fokus auf dem Wirkungsgrad der Energieumwandlung von elektrischer Arbeit in kinetische Energie des Fluids. Die Energiekosten stellen den dominanten Teil der Lebenszykluskosten dar, wobei bereits geringfügige Verschleißerscheinungen den Gesamtwirkungsgrad der Anlage untergraben. [14] Der Verschleiß zeigt sich bei Membranpumpen primär in der Materialermüdung der Elastomer-Membran sowie in der Erosion der Ventilsitze. Um den geforderten Volumenstrom dennoch aufrechtzuerhalten, muss die Antriebsleistung gesteigert werden, was unmittelbar zu einer Erhöhung von  $P_{\text{Ref}}$  gegenüber der idealen Basislinie  $P_{\text{Base}}$  führt. Zudem spielt der Strömungswiderstand eine entscheidende Rolle. Ablagerungen im Pumpengehäuse oder an den Hubventilen erhöhen den Gegendruck. Da die Leistungsaufnahme eines Elektromotors bei Pumpen nahezu linear zum Förderdruck steigt, resultiert aus jeder durch Verschmutzung induzierten Druckdifferenz eine messbare Steigerung der CO<sub>2</sub>e-Emissionen. [15] Die Wartung umfasst hier die Reinigung der produktberührten Teile und den proaktiven Austausch von Elastomer-Komponenten, um den Wirkungsgrad nahe am theoretischen Maximum zu stabilisieren.

### 1.1.3 Infrastruktursysteme am Beispiel einer HLK - Anlage

Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungsanlagen (HLK) stellen in vielen Industriebetrieben einen der größten Posten im Scope-2-Emissionsprofil dar. Die energetische Relevanz der Wartung ist hier besonders ausgeprägt, da diese Systeme oft im Dauerbetrieb (24/7) laufen. Das zentrale Bauteil für die energetische Betrachtung ist der Ventilatorantrieb in Kombination mit dem Filtersystem. Die Filterverschmutzung („Fouling“) korreliert direkt mit einem exponentiell steigenden Druckverlust über das Filtermedium. [16] Um den geforderten Volumenstrom für die Hallenbelüftung konstant zu halten, muss die Drehzahlregelung des Ventilators den steigenden Widerstand durch eine höhere elektrische Leistungsaufnahme kompensieren. Eine Analyse zur ökonomischen und ökologischen Optimierung von HLK-Systemen betont, dass die Vernachlässigung der Filterreinigung oder des Filterwechsels die Betriebskosten und die damit verbundenen Emissionen innerhalb kurzer Zeiträume um zweistellige Prozentsätze steigern kann. [17] Der MCHW wird bei HLK-Systemen somit maßgeblich durch die Konstanzhaltung des Systemdrucks generiert.

## 1.2 Instandhaltungsstrategien im Kontext der Dekarbonisierung

Die Wahl der Instandhaltungsstrategie ist maßgebend für die Höhe des realisierbaren Carbon Handprint. Während die technische Verfügbarkeit traditionell das primäre Zielkriterium darstellt, rückt durch die Notwendigkeit der Emissionsreduktion die energetische Effizienz in den Fokus der strategischen Planung. Im industriellen Umfeld lassen sich drei wesentliche Strategieformen unterscheiden, deren Auswirkungen auf den ökologischen Fußabdruck erheblich divergieren.

### 1.2.1 Die energetischen Defizite der reaktiven Instandhaltung

Die schadensorientierte oder reaktive Instandhaltung (Run-to-Failure) ist dadurch gekennzeichnet, dass Maßnahmen erst nach dem Eintritt eines Funktionsverlusts eingeleitet werden. Aus Sicht der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung stellt dies das ungünstigste Szenario dar. Wie am Beispiel von Zerspanungsprozessen belegt wird, führt die fortgeschrittene Verschleißprogression, etwa durch Abstumpfen der Schneidkanten oder mangelnde Schmierung der Spindellager, zu einem progressiven Anstieg der Prozessleistung. [12] Da bei einer reaktiven Strategie dieser schleichende Mehrverbrauch bis zum Totalausfall toleriert wird, akkumuliert das System über die Zeit eine erhebliche Menge an „vermeidbaren“ Emissionen. Diese Differenz zwischen dem tatsächlichen Verbrauch unter Verschleißbedingungen und der idealen energetischen Basislinie bildet das theoretische Potenzial des Carbon Handprint, welches bei reaktiver Fahrweise jedoch ungenutzt bleibt. Zudem belegen Studien zur Lebenszyklusanalyse (LCA), dass ungeplante Instandsetzungen häufig mit einem erhöhten Material- und Logistikaufwand verbunden sind, was die Scope-3-Emissionen weiter belastet. [6]

### 1.2.2 Präventive Wartung als Hebel zur Emissionsvermeidung

Die in dieser Arbeit fokussierte präventive (vorbeugende) Wartung setzt auf feste Zeit- oder Nutzungsintervalle, wie das in den späteren Berechnungen verwendete Intervall von  $t = 1.500$  h. Ziel ist es, den Abnutzungsvorrat künstlich hochzuhalten und somit den energetischen Wirkungsgrad im Bereich des Optimums zu stabilisieren. Der ökologische Vorteil dieser Strategie liegt in der Glättung der Verbrauchskurve. Anstatt eine exponentielle Zunahme der Leistungsaufnahme ( $P_{Ref}$ ) zuzulassen, wird durch zyklische Eingriffe der Systemzustand regelmäßig auf die Basislinie ( $P_{Base}$ ) zurückgeführt. Besonders bei Infrastruktursystemen wie HLK-Anlagen ist dieser Effekt deutlich messbar. Durch geplante Filterwechsel wird der exponentielle Anstieg des Energiebedarfs, der durch Filterverschmutzung entsteht, effektiv unterbrochen. [16] Die Wartung fungiert hierbei als „Emissions-Cap“, indem sie die

energetische Degradation deckelt. Die ökonomisch optimalen Wartungsintervalle korrelieren daraus schließend oft mit den ökologisch vorteilhaftesten Zeitpunkten, da die eingesparten Energiekosten direkt mit reduzierten Scope-2-Emissionen einhergehen. [17]

### 1.2.3 Predictive Maintenance und Energiemanagement

Einen Schritt weiter geht die vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance), die auf der kontinuierlichen Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) basiert. Hierbei werden Datenströme von Sensoren genutzt, um den exakt richtigen Zeitpunkt für eine Wartung zu bestimmen, idealerweise genau dann, wenn der energetische Mehrverbrauch die  $\text{CO}_2$ -Kosten der Wartungsmaßnahme selbst ( $P_{\text{Wartung}}$  und  $\text{CO}_2, \text{Logistik}$ ) zu übersteigen droht. Diese datengetriebene Strategie ist eng mit dem Energiemanagement verknüpft und fordert eine kontinuierliche Verbesserung der energiebezogenen Leistung. [18] Ein vorausschauendes Instandhaltungssystem, das den Anstieg der Leistungsaufnahme in Echtzeit verfolgt, liefert die notwendige Transparenz, um den Carbon Handprint zu maximieren. Die Integration von Machine-Learning-Modellen zur Vorhersage des Werkzeugverschleißes ermöglicht es, Wartungseingriffe so zu Takten, dass die Summe aus operativen Emissionen und Instandhaltungsemissionen minimiert wird. [13]

## 1.3 Methodik der energetischen Datenerfassung

Die Validität der Berechnung des Maintenance Carbon Handprint – Wartung (MCHW) steht und fällt mit der Qualität der zugrunde liegenden Energiedaten. Um die Differenz zwischen der idealen Basislinie ( $P_{\text{Base}}$ ) und der verschleißbedingten Leistungsaufnahme ( $P_{\text{Ref}}$ ) präzise zu quantifizieren ist eine systematische Datenerfassung erforderlich. Die Basislinie repräsentiert den energetischen Soll-Zustand einer Anlage unmittelbar nach einer fachgerechten Wartung oder im Neuzustand. Für die untersuchten Referenzsysteme (CNC, Pumpe, HLK) wird  $P_{\text{Base}}$  durch Herstellerangaben zum Stromverbrauch unter definierten Lastbedingungen ermittelt. Bei der CNC-Drehmaschine erfolgt dies durch Datenblätter von renommierten Herstellern, hierfür werden die Angaben zum Verbrauch unter Volllast sowie dem Nennverbrauch im Leerlauf gewichtet multipliziert. Im Falle dieser Arbeit wurde ein realitätsnahes Szenario aus 60% Betrieb unter Volllast gewählt, hinzu kommt der Stromverbrauch für die KSS - Förderpumpe, der ebenfalls gewichtet mit 60% zum komprimierten Verbrauch addiert wird. [19] Für die Membranpumpe wird  $P_{\text{Base}}$  bei einem konstanten Gegendruck und definierten Volumenstrom im optimalem Betriebszustand gewählt. [20] Bei HLK-Systemen dient ebenfalls der Zustand mit neuen

Filtern und gereinigten Wärmetauschern als Referenzwert, wobei hier externe Faktoren wie Außenlufttemperatur und Feuchtigkeit rechnerisch normiert werden müssen, wie in Effizienzstudien dargelegt wird. [17]

# Methodik zur Berechnung des Carbon Handprint von Wartungen

Die Quantifizierung des ökologischen Nutzens industrieller Instandhaltung erfordert eine methodische Brücke zwischen der physikalischen Zustandsänderung an einer Anlage und der resultierenden Emissionsbilanz. Während die klassische Bilanzierung des Carbon Footprint (CF) die Last eines Ist-Zustandes dokumentiert, bemisst der Carbon Handprint (CH) die aktive Reduktion von Emissionen durch eine spezifische Handlung. Im Folgenden wird das Berechnungsmodell hergeleitet, das den Handprint als Differenz zwischen einem defizitären Referenzszenario und einem durch Wartung optimierten Baseline-Szenario definiert.

## 2.1 Systemgrenzen und Bilanzierungsrahmen

Eine wesentliche Voraussetzung für die Validität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist die präzise Definition der Systemgrenzen. Um eine methodische Belastbarkeit zu gewährleisten und die Gefahr von Fehlinterpretationen durch „Cherry-Picking“ zu minimieren, orientiert sich die vorliegende Bilanzierung an den international anerkannten Standard. [5] [21] Zunächst werden die räumlichen Systemgrenzen auf die physische Einheit der CNC-Drehmaschine inklusive aller prozesskritischen Peripherieaggregate festgelegt. In die Berechnung fließen nicht nur die Hauptantriebe ein, sondern explizit auch die Nebenaggregate. Hierzu zählt insbesondere das Kühlschmierstoffsystem (KSS). Wie das Umweltbundesamt darlegt, ist eine klare Abgrenzung der Energieverbräuche essenziell für eine korrekte Zuordnung der Emissions-Kategorien. [11] Die zeitliche Systemgrenze wird durch die Festlegung einer funktionalen Einheit definiert. Für die vorliegende Untersuchung wird ein Betriebsintervall von 1.500 Stunden angesetzt. Dieser Zeitraum korrespondiert mit einem typischen industriellen Wartungszyklus in einem Mehrschichtbetrieb und ist ausreichend bemessen, um sowohl schleichende Degradationsprozesse, etwa die Alterung von Luftfiltern, als auch kumulative Verschleißerscheinungen an mechanischen Komponenten statistisch signifikant abzubilden. Hinsichtlich der Kategorisierung der Emissionsquellen erfolgt eine Zuordnung nach den Scopes des GHG-Protocols. Der Schwerpunkt liegt auf Scope 2, welcher die indirekten Emissionen aus dem Bezug elektrischer Energie umfasst. [11] Durch die Instandhaltung wird der Wirkungsgrad der Anlage optimiert, was den spezifischen Stromverbrauch direkt reduziert. Ergänzend werden Scope 3 Emissionen betrachtet, die aus der Supply Chain von Ersatzteilen resultieren. Da Wartungsmaßnahmen die Lebensdauer von Hauptkomponenten

verlängern, wird der anteilige ökologische Fußabdruck für die Neuproduktion dieser Bauteile pro Betriebsstunde reduziert, was den Handprint weiter vergrößert. [4]

## 2.2 Mathematische Herleitung des Differenzansatzes

Die Ermittlung des Carbon Handprint basiert methodisch auf einem komparativen Ansatz, der die Emissionseinsparungen durch einen direkten Vergleich zweier Betriebszustände isoliert. Dieser sogenannte Differenzansatz ist notwendig, da eine isolierte Betrachtung des Ist-Verbrauchs keine Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der Instandhaltung zulässt. Wie im Kontext internationaler Normen zur Berechnung des Carbon Footprint erläutert, erfordert die Bestimmung vermiedener Emissionen stets die Definition eines belastbaren Referenzrahmens. [22] Das erste Szenario wird als Baseline-Szenario (E Base) definiert. Dieses repräsentiert den energetischen Optimalzustand der Anlage unmittelbar nach einer fachgerechten Durchführung aller vorgesehenen Instandhaltungsmaßnahmen. [4] In diesem Zustand wird davon ausgegangen, dass alle mechanischen Reibungswiderstände durch Schmierung minimiert, Filtermedien gereinigt und die Ausrichtung der Antriebe perfektioniert wurden. Die Baseline bildet somit den wissenschaftlichen Nullpunkt für die maximale technische Effizienz unter realen Einsatzbedingungen. Dem gegenüber steht das Referenz-Szenario (E Ref), welches die energetische Entwicklung der Anlage bei Vernachlässigung der Wartungszyklen beschreibt. In diesem Zustand kumulieren über die Zeit Degradationseffekte. Mechanische Komponenten weisen einen erhöhten Roll- oder Gleitwiderstand auf, und Nebenaggregate müssen eine höhere elektrische Wirkleistung erbringen, um systemimmanente Verschleißerscheinungen zu kompensieren. Die Differenz zwischen diesen beiden Szenarien stellt das Brutto-Einsparpotenzial dar, welches durch die Instandhaltung realisiert wird. Mathematisch wird der Carbon Handprint (CH) somit als Differenz der kumulierten Emissionen beider Zustände über das betrachtete Intervall berechnet:

$$CH = (E \text{ Ref} - E \text{ Base})$$

Um die methodische Integrität zu wahren, muss zusätzlich der Wartungsaufwand (E Wartung) berücksichtigt werden. [5] Hierbei handelt es sich um die Emissionen, die durch die Instandhaltungstätigkeit selbst entstehen, wie beispielsweise die Anfahrt des Service Technikers oder der ökologische Fußabdruck der eingesetzten Betriebsstoffe. Der Netto Carbon Handprint ergibt sich somit erst nach Abzug dieser investierten Emissionen:

$$CH = (E \text{ Ref} - E \text{ Base}) - E \text{ Wartung}$$

In der industriellen Anwendung übersteigt der energetische Nutzen einer optimierten Anlage den Wartungsaufwand meist so deutlich, dass die Instandhaltung als Schlüsselfaktor für das Erreichen der Klimaziele im Industriesektor gelten muss.

## 2.3 Quantifizierung energetischer Verlustfaktoren

Um den Carbon Handprint einer Wartung nicht nur theoretisch herzuleiten, sondern mathematisch präzise zu belegen, müssen die physischen Verschleißerscheinungen an der Maschine in messbare energetische Verlustfaktoren ( $f$ ) übersetzt werden. Diese Faktoren bilden die Brücke zwischen der mechanischen Abnutzung und den daraus resultierenden THG-Emissionen. Zur Validierung der entwickelten Methodik werden drei repräsentative Anlagentypen aus der Industriepraxis untersucht. Die Auswahl umfasst eine CNC-Drehmaschine (Elektromotor, spanende Fertigung), eine industrielle Membranpumpe (Prozessflüssigkeit) sowie eine HVAC-Anlage (Gebäudetechnik). Alle drei Anlagentypen weisen charakteristische Verschleißmuster auf, deren Auswirkungen auf die Stromzunahme und somit den Energieverbrauch gut durch Literaturwerte belegt sind.

### 2.3.1 CNC-Drehmaschinen (Elektromotor)

CNC-Drehmaschinen sind energieintensive Fertigungsanlagen, deren Hauptantrieb durch einen Elektromotor angetrieben wird. Der Energieverbrauch setzt sich aus dem Volllaststrom im spanenden Betrieb, sowie dem Leerlaufverbrauch zusammen. Hinzu kommt die Kühlschmierstoff-Förderpumpe (KSS-Pumpe), die für die Kühlung des Werkstücks und des Werkzeugs sorgt. Charakteristische Verschleißmechanismen an einer CNC-Drehmaschine sind:

**Werkzeugverschleiß:** Durch verschlissenes oder zerstörtes Werkzeug erhöhen sich die Schnittkräfte stark. Die Temperatur an Werkstück und Werkzeug steigt, es kommt zu einer erhöhten Spindelleistung und Schnittenergie die typischerweise zwischen 5% - 20% liegt (Faktor  $f_w$  1,05 – 1,20). [13] [23]

**Lagerabnutzung:** Lagerverschleiß erhöht die Reibung in den Hauptlagern der Spindel und des Antriebs. Der Energiemehrverbrauch durch defekte Kugellager beträgt typischerweise 8% - 12% (Faktor  $f_L$  1,08 – 1,12). [24] [12]

**Wellenfehlausrichtung:** Durch thermische Ausdehnung oder Montageungenauigkeiten entstehende, axiale- oder radiale Fehlausrichtungen der Welle erhöhen die Schwingungen und Verlustleistung um 5% - 10% (Faktor  $f_A$  1,05 – 1,10). [25] [26]

**Mangelschmierung:** Fehlende oder mangelnde Schmierung der Lager erhöht deren Reibungskoeffizient sowie deren Verschleiß. Dies führt zu messbaren Temperaturerhöhungen und einer Verlustleistung von 2% - 10% (Faktor  $f_M$  1,02 – 1,10). [27]

**KSS-System defekt:** Verunreinigter Kühlschmierstoff erhöht die Pumpenleistung durch erhöhte Viskosität und Abrasion. Zusätzlich verstopfen die Filter der Pumpe, was zu einem Druckverlust im System führt, den die Pumpe durch erhöhte Leistung ausgleichen muss. Leckagen im KSS-System führen ebenfalls zu einem Druckabfall, zudem begünstigen die oben genannten Verschleißmechanismen die Mangelschmierung der Lager. Typische Werte für die Verlustleistung liegen bei 1% - 4% (Faktor  $f_K$  1,01 – 1,04). [26]

### 2.3.2 Industripumpe (Membranpumpe, elektrisch)

Industriepumpen sind in der verarbeiteten Industrie weit verbreitet und gehören weltweit zu den größten Stromverbrauchern. Eine Europump-Studie von 2024 schätzt den Anteil von Pumpensystemen am industriellen Stromverbrauch auf 20% - 25%. [28] Der Wirkungsgrad einer Pumpe lässt sich nach folgender Formel bestimmen, die den Zusammenhang zwischen Antriebsleistung und hydraulischer Leistung beschreibt. [29]

$$\eta = \frac{\rho * g * H * Q}{P} \quad / \quad P = \frac{\rho * g * H * Q}{\eta}$$

$\eta$ : Wirkungsgrad

H: Förderhöhe

$\rho$ : Dichte Medium

G: Volumenstrom

g: Ortsfaktor

P: Antriebsleistung

Anhand der Formel ist zu erkennen, dass sich eine Änderung des Wirkungsgrades direkt auf die aufgenommene Leistung der Pumpe auswirkt. Eine Verschlechterung des Wirkungsgrades hat somit eine Zunahme der Pumpenleistung zur Folge. Typische Verschleißmechanismen einer Industripumpe, die zur Minderung des Wirkungsgrades beitragen, sind:

**Lagerabnutzung:** Analog zur CNC-Drehmaschine, wirken sich defekte Kugellager direkt auf die aufgenommene Leistung aus. Typischer Energiemehrverbrauch liegt auch hier bei 8% - 12% (Faktor  $f_L$  1,08 – 1,12).

**Mangelschmierung:** Fehlende oder mangelnde Schmierung der Lager erhöht deren Reibungskoeffizient sowie deren Verschleiß. Dies führt zu messbaren Temperaturerhöhungen und einer Verlustleistung von 2% - 10% (Faktor  $f_M$  1,02 – 1,10).

**Verunreinigte Filter:** Verunreinigte und verstopfte Filter führen zu einem erheblichen Druckverlust im Pumpensystem. [30] Diese Druckverluste versucht die Pumpe auszugleichen, was zu längeren Betriebszeiten oder meist zu erhöhter Stromaufnahme führt. Studien geben unterschiedliche Werte zum Energiemehrverbrauch bei unterschiedlich stark verschmutzten Systemen an, mit experimentellen Untersuchungen, die eine erhöhte Stromaufnahme von bis zu 30% bei sehr stark verschmutzten Filtern messen konnten. In der Regel liegt der Energiemehrverbrauch durch verunreinigte Filter jedoch bei 5% - 10% (Faktor  $f_F = 1,05 - 1,10$ ). [17]

**Verunreinigte Rohre:** Auch durch Sediment- und Kalkablagerungen in Rohrsystemen, entstehen ähnliche Effekte wie bei verstopften Filtern. Durch die Verengung im Rohrsystem kommt es zum Druckabfall und somit zur erhöhten Leistungsaufnahme. Untersuchungen an einem solchen Pumpensystem zeigen, dass bereits geringe Ablagerungen zu einem Effizienzverlust von 10% - 15% führen, [31] starke Verschmutzungen sogar einen Energiemehrverbrauch von 13,5% - 55,7% mit sich bringen. [32] Somit wird es einen Faktor für geringe Verschmutzung (Faktor  $f_{RI} = 1,10 - 1,15$ ) und einen Faktor für starke Verschmutzung (Faktor  $f_{RS} = 1,15 - 1,30$ ) geben.

### 2.3.3 HLK-Systeme (Heizung, Lüftung und Klimatisierung)

Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssysteme (engl. HVAC) sind unmittelbarer Bestandteil der Gebäudetechnik und in der fertigen Industrie nicht wegzudenken.

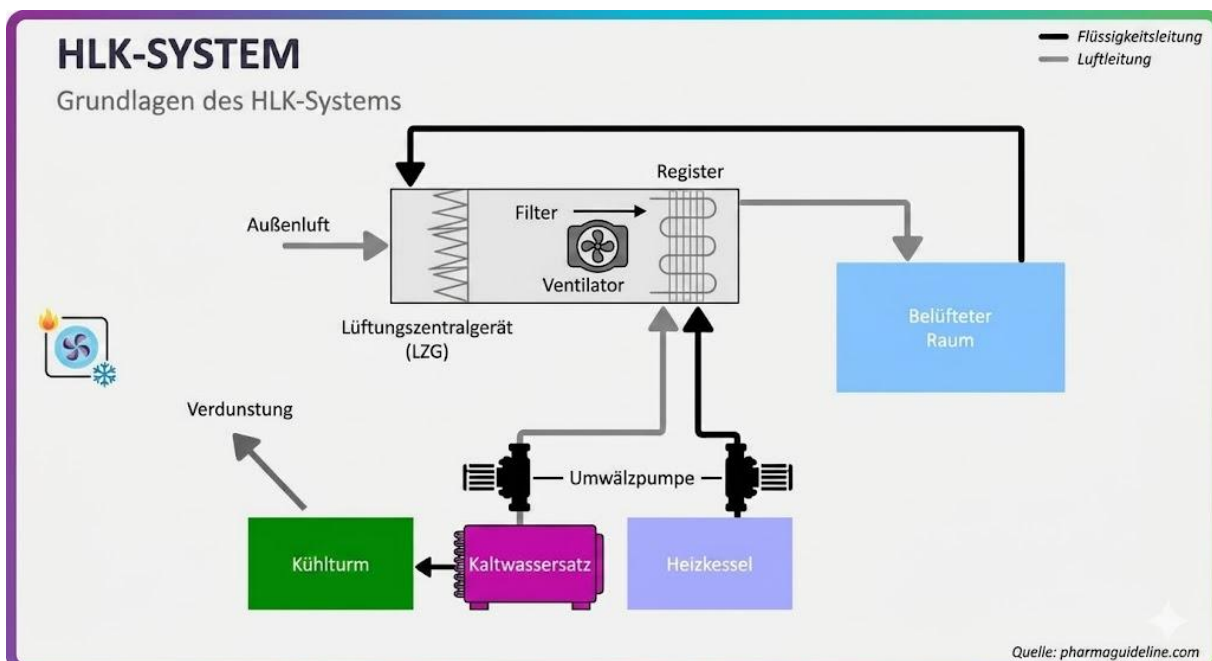


Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines HLK-Systems [D]

Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau einer HLK-Anlage bestehend aus zwei Pumpen die elektrisch angetrieben werden, einem Filter System für die außen Luft mit Luftfilter, Ventilator und einer (Heiz-)Spule (Register) sowie dem dazugehörigen Wärmetauscher und Kühlturm. Für diese Arbeit von Bedeutung sind vor allem die Komponenten, die eine durch Nutzung bedingte charakteristische Abnutzungskurve aufweisen und leicht ausgetauscht werden können. Diese befinden sich vor allem in Elektromotoren, Pumpen, Ventilatoren und Filtern. Die Verschleißmechanismen für die Pumpen aus Kapitel 2.3.2 können direkt für die HLK-Anlage übernommen werden, da hier ebenfalls zwei Pumpen verbaut sind, die jeweils über einen Elektromotor gesteuert werden. Speziell für die HLK-Systeme betrachtet man:

**Luftfilterverschmutzung:** Eine Studie in den USA untersuchte den Effekt von verstopften Luftfiltern auf den Energieverbrauch von HLK-Systemen in unterschiedlichen Klimazonen der USA. Für ein mit Deutschland vergleichbares Klima (Chicago/Denver) wurde ein Energiemehrverbrauch durch verstopfte Luftfilter von 5% - 10% festgestellt (Faktor  $f_V$  1,05 – 1,10). [16]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass erst durch die gezielte Wartung dieser Komponenten, die Verlustfaktoren wieder auf ihren Idealwert von 1,0 zurückgeführt werden. Die Summe dieser vermiedenen Mehrverbräuche bildet den Kern des Carbon Handprints.

## 2.4 Zusammenführung der Parameter in ein Berechnungsmodell

Nachdem die einzelnen Verlustparameter in Kapitel 2.3 identifiziert und quantifiziert wurden, erfolgt nun die Konsolidierung dieser Daten in ein geschlossenes Berechnungsmodell. Ziel ist es, eine reproduzierbare Rechenvorschrift zu erstellen, die den Brutto-Handprint über das gesamte Wartungsintervall von 1.500 Stunden abbildet. Dabei wird die energetische Differenz zwischen dem verschleißbehafteten Referenzzustand und dem optimierten Baseline-Zustand unter Berücksichtigung der spezifischen Emissionsfaktoren des deutschen Strommixes ermittelt. Das Berechnungsmodell basiert auf der Aggregation der Einzelverluste. Da die mechanischen und peripheren Ineffizienzen in der Realität oft gleichzeitig auftreten, werden diese Faktoren im Referenzszenario ( $E_{Ref}$ ) gewichtet verknüpft. Wie das Umweltbundesamt in seinen Richtlinien zur Treibhausgasbilanzierung hervorhebt, muss bei der Umrechnung von Kilowattstunden in  $CO_2e$  stets der aktuelle standortspezifische Emissionsfaktor verwendet werden. [11] Für die vorliegende Arbeit wird ein Faktor von  $0,372 \text{ kg } CO_2e/kWh$  zugrunde gelegt, um die tatsächliche Klimabelastung präzise abzubilden. Die Kernformel für den Carbon Handprint über das Intervall ( $t$ ) lautet:

$$CH \text{ Brutto} = \int_0^t (\Delta P \text{ Max} * \tau/t) * EF \, dt$$

$$CH \text{ Brutto} = \frac{1}{2} * \Delta P \text{ Max} * t * EF$$

$$CH \text{ Netto} = CH \text{ Brutto} - CF \text{ Wartung} - CO_2e \text{ Logistik}$$

Um die theoretisch hergeleiteten Modelle zu validieren, wird in folgenden Kapiteln eine Beispielrechnung für verschiedene Assets durchgeführt.

Ein zentraler Aspekt dieser Modellierung ist die Annahme eines linearen Anstiegs des Verschleißes. In der realen Betriebspraxis tritt der energetische Mehrverbrauch nicht unmittelbar nach der letzten Wartung in voller Höhe auf, sondern akkumuliert sich schleichend über die Zeit. Daher wurde für die Berechnung ein linearer Degradationsverlauf gewählt, bei dem die Leistungsdifferenz zwischen dem Idealzustand ( $P_{Base}$ ) und dem verschleißbehafteten Referenzzustand ( $P_{Ref}$ ) über die Betriebsstunden stetig zunimmt. Mathematisch führt dies dazu, dass die effektiv eingesparte Energie genau der Hälfte des maximalen potenziellen Verlusts am Ende des Intervalls entspricht.

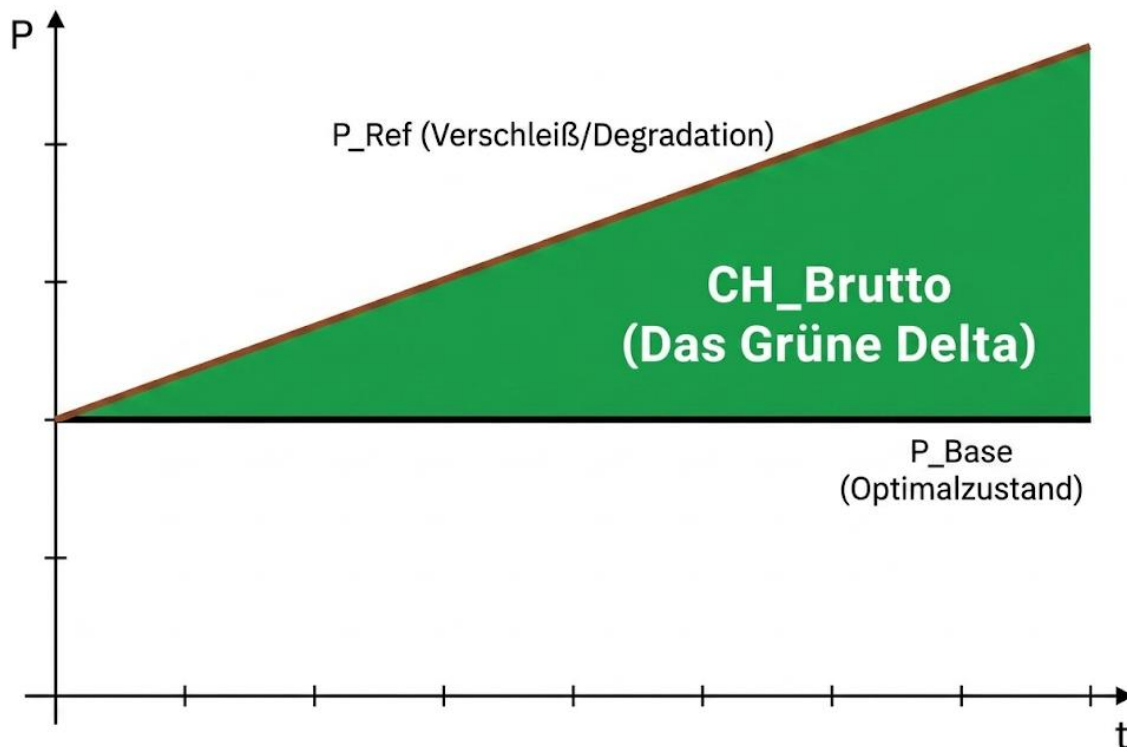


Abbildung 5: Herleitung  $P_{\text{max}}$  [E]

## 2.5 Berücksichtigung von Lastprofilen und Betriebsarten

Ein wesentlicher Bestandteil einer validen Berechnung ist die Differenzierung der Betriebszustände der CNC-Maschine. Eine rein statische Betrachtung der Nennleistung würde den tatsächlichen Carbon Handprint verzerren, da eine Werkzeugmaschine im industriellen Einsatz schwankende Lastprofile aufweist. Die Emissionen müssen über den gesamten Lebenszyklus-Abschnitt hinweg realitätsnah zugeordnet werden können. [5] In der Praxis wird zwischen Hauptlaufzeit (Zerspanung), Nebenlaufzeit (Rüstvorgänge, Werkzeugwechsel) und Stand-by-Zeiten unterschieden. Während mechanische Verluste wie Lagerreibung ( $f_L$ ) vor allem während der Spindelrotation unter Last ins Gewicht fallen, wirken sich Filterverschmutzungen ( $f_F$ ) in der Peripherie oft permanent aus, da Kühlaggregate und Lüfter häufig auch in Nebenzeiten aktiv bleiben. Das entwickelte Modell trägt dem Rechnung, indem es die Verlustfaktoren spezifisch auf die jeweiligen Betriebsstunden der Aggregate anwendet. Nur durch diese zeitliche Gewichtung kann sichergestellt werden, dass der berechnete Handprint den strengen Anforderungen an die Genauigkeit von Klimabilanzen entspricht, wie sie das Umweltbundesamt für internationale Normen zur Berechnung des Carbon Footprint fordert. [11]

## 2.6 Validierung der Datenbasis und Unsicherheitsbetrachtung

Jedes wissenschaftliche Modell zur Emissionsberechnung ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Im Kontext des Carbon Handprint von Wartungen ergeben sich diese primär aus der Varianz der Verschleißzustände. Die in dieser Arbeit verwendeten Faktoren, etwa für Lagerverschleiß und Fehlansrichtung stützen sich auf empirische Daten. [13] Dennoch muss berücksichtigt werden, dass reale Einsatzbedingungen, wie die Härte des zu bearbeitenden Materials oder die Umgebungstemperatur in der Fertigungshalle, die Degradationsgeschwindigkeit beeinflussen können. Die Unsicherheitsbetrachtung zeigt, dass die gewählten Faktoren eher konservativ angesetzt sind. Dies dient der Vermeidung von "Greenwashing", indem der erzielte Handprint eher unter- als überschätzt wird. Diese vorsichtige Herangehensweise korrespondiert mit der Empfehlung des Umweltbundesamtes, bei der Bilanzierung stets das Prinzip der konservativen Schätzung anzuwenden, wenn keine lückenlosen Primärdaten vorliegen. [11] Damit wird sichergestellt, dass die im folgenden Kapitel präsentierte Kennzahl MCHW eine verlässliche Basis für unternehmerische Nachhaltigkeitsentscheidungen darstellt.

# Entwicklung der Kennzahl: „Maintenance Carbon Handprint – Wartung (MCHW)“

Die bloße Angabe eines absoluten Carbon Handprint in Kilogramm CO<sub>2</sub>e ist für die industrielle Praxis zwar ein wichtiger Indikator, stößt jedoch bei der Vergleichbarkeit an Grenzen. Um Instandhaltungsstrategien über verschiedene Maschinentypen, Standorte oder Zeiträume hinweg bewerten zu können, bedarf es einer standardisierten Kennzahl. Hierfür wird im Rahmen dieser Arbeit der Maintenance Carbon Handprint – Wartung (MCHW) eingeführt.

## 3.1 Herleitung und Definition der Kennzahl

Die Entwicklung der MCHW-Kennzahl folgt der Logik moderner Key Performance Indicators (KPIs) im Service Engineering. Während klassische Kennzahlen wie die Gesamtanlageneffektivität (OEE) primär die Produktivität messen, zielt der MCHW auf die ökologische Effizienz der Instandhaltung ab. Die Normierung von Umweltdaten ist entscheidend, um Fortschritte im Klimamanagement messbar zu machen. [11] Der MCHW wird als spezifische Emissionsminderungsrate definiert. Er setzt den durch die Wartung erzielten Netto-Handprint (*CH Netto*) ins Verhältnis zur betrachteten Betriebsdauer (*h*) der Anlage. Die mathematische Definition lautet:

$$MCHW = CH \text{ Netto} / t$$

Die Einheit der Kennzahl wird standardmäßig in kg CO<sub>2</sub>e pro Betriebsstunde (kg CO<sub>2</sub>e/h) oder bei kleineren Anlagen in g CO<sub>2</sub>e/h angegeben.

Die Notwendigkeit dieser zeitbasierten Normierung ergibt sich aus der Dynamik industrieller Fertigung. Eine absolute Einsparung von beispielsweise 500 kg CO<sub>2</sub>e kann das Ergebnis einer hocheffizienten Kurzzeitwartung an einer Großanlage sein oder das Resultat einer weniger effektiven Maßnahme über ein ganzes Jahr. Erst durch den Bezug auf die Betriebsstunde wird die Intensität des ökologischen Nutzens greifbar. Diese Kennzahl ermöglicht es dem Instandhaltungsmanagement, eine „Carbon-Return-on-Maintenance“-Betrachtung anzustellen. Die Wartung wird damit von einer reinen Kostenstelle zu einem aktiven Werttreiber für die unternehmerische Nachhaltigkeitsstrategie. [4] Durch den MCHW lässt sich nun präzise ausdrücken, wie viele Kilogramm an Emissionen pro Stunde Betrieb durch die Durchführung einer spezifischen Wartungsmaßnahme vermieden werden. Dies schafft die Grundlage für die in den folgenden Unterkapiteln beschriebene Priorisierung und strategische Steuerung von Instandhaltungsressourcen.

### 3.2 Einflussfaktoren auf den MCHW

Die Aussage der MCHW-Kennzahl ist kein statischer Wert, sondern wird von einer Vielzahl technischer, betrieblicher und ökologischer Parameter beeinflusst. Um die Kennzahl als steuerbares Management-Instrument zu etablieren, müssen diese Variablen isoliert und in ihrem Wirkungsgrad bewertet werden. In Anlehnung an die Prozessanalysen des Service Engineerings lassen sich diese Einflüsse in drei Hauptkategorien unterteilen: anlagenspezifische, prozessuale und externe Faktoren. Ein dominanter Faktor ist die energetische Ausgangsbasis und das Alter der Anlage. Maschinen mit einer hohen Grundlast oder veralteter Antriebstechnik weisen oft ein signifikant höheres Potenzial für einen hohen MCHW auf. Wie Untersuchungen zur Nachhaltigkeit von Werkzeugmaschinen darlegen, führt die kumulative Degradation bei Bestandsanlagen zu überproportional steigenden Reibungsverlusten. [12] Infolgedessen erzielt eine Wartung an einer älteren CNC-Maschine pro Betriebsstunde eine höhere CO<sub>2</sub>e-Einsparung als an einer hocheffizienten Neuanlage mit moderner Frequenzumrichter-Technologie. Dies bedeutet jedoch nicht, dass Instandhaltung an Neuanlagen vernachlässigt werden sollte. Vielmehr zeigt es, dass der ökologische „Return on Invest“ bei Bestandsmaschinen oft kurzfristiger und massiver eintritt. Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor ist die Auslastung und das spezifische Lastprofil während des betrachteten Intervalls. Da der MCHW eine Rate pro Stunde darstellt, wirkt sich die Intensität der Nutzung direkt auf das Ergebnis aus. Wird die Maschine primär im Bereich der Schwerzerspannung betrieben, bei dem hohe Drehmomente und radiale Kräfte gefordert sind, wirken sich mechanische Defizite wie Lagerverschleiß oder mangelnde Schmierung energetisch wesentlich stärker aus als im Leichtbau- oder Schlichtbetrieb. Das Umweltbundesamt weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die Validität von Emissionskennzahlen maßgeblich von der Repräsentativität der zugrunde gelegten Lastzyklen abhängt. [11] Ein hoher MCHW kann somit auch ein Indikator für eine besonders beanspruchende Betriebsweise sein, bei der die Wartung den energetischen „Worst Case“ verhindert. Darüber hinaus spielen die Qualität und die Tiefe der Wartungsmaßnahme eine entscheidende Rolle für die Höhe der Kennzahl. Ein MCHW, der lediglich auf einer oberflächlichen Reinigung und Sichtprüfung basiert, wird naturgemäß geringer ausfallen als ein Wert, der durch eine präzise lasergestützte Neuausrichtung der Achsen (Alignment) und den Austausch hocheffizienter Filterelemente erzielt wird. Die Kennzahl reflektiert somit indirekt die handwerkliche und technische Qualität des Service-Einsatzes. Abschließend darf der lokale Strommix als externer, aber mathematisch kritischer Faktor nicht vernachlässigt werden. Da der MCHW die eingesparten Kilowattstunden über den Emissionsfaktor (*EF*) in CO<sub>2</sub>e umrechnet, steigt die Kennzahl linear mit der Kohlenstoffintensität des genutzten Stroms. Unternehmen, die bereits zu 100 % zertifizierten

Grünstrom beziehen, erzielen zwar physikalisch den gleichen energetischen Spareffekt, ihr MCHW im Sinne der vermiedenen Scope-2- Emissionen fällt jedoch rechnerisch geringer aus als an Standorten mit einem fossilen Energiemix. Diese Differenzierung ist für die strategische Priorisierung von Instandhaltungsressourcen über mehrere globale Standorte hinweg von essenzieller Bedeutung, um die maximale Emissionsminderung in Bezug zu den Kosten der Wartungsmaßnahme zu identifizieren.

### **3.3 Berechnungsansatz und Beispielwerte**

Die Validierung des MCHW erfolgt durch die Anwendung des mathematischen Modells auf reale Industriedaten. Als Referenzobjekt dienen die zuvor ausgewählte CNC-Drehmaschine, die Membranpumpe sowie das HLK-System, deren energetisches Profil in den vorliegenden Datensätzen detailliert dokumentiert ist. Für die Beispielrechnungen wird angenommen, dass die Wartung intern durchgeführt wird. Die Emissionen für die Anfahrt des Technikers entfallen somit. Was bleibt ist der ökologische Fußabdruck für die Herstellung gewechselter Produkte und die Nutzung von Strom während der Wartung. Da für die Dauer der Wartung sowie die Auswahl und Nutzung elektrischer Geräte keine vertraulichen Daten vorliegen, entfällt deren Strombezug für die Beispielrechnung. Somit werden nur entstandene Emissionen für die Erzeugung von gewechselten Lagern und Filtern verrechnet.

Datenbasis für die Beispielrechnung:

### CNC – Drehmaschine

Einflussgröße	Wert
Betriebsdauer [h]	1500
Basis - Leistungsaufnahme ( $P_{\text{Base}}$ ) [kW]	7,92
Verlustkoeffizient ( $f_{\text{Gesamt}}$ )	1,464
Emissionsfaktor (EF) [kgCO <sub>2</sub> e/kWh]	0,372
CF <sub>Wartung</sub> [kg CO <sub>2</sub> e]	1,59

Die 1500 Betriebsstunden entsprechen dem gewählten Wartungsintervall. Zur Basis – Leistungsaufnahme zählen der Betrieb unter Vollast (12kW), der zu 60% gewichtet wird sowie der Betrieb im Leerlauf (1,8kW) der zu 40% gewichtet wird zusätzlich der KSS-Pumpe (1,2kW), ebenfalls gewichtet mit 60%. Der Verlustkoeffizient setzt sich aus den in Kapitel 2.3.1 genannten Verschleißfaktoren zusammen. Als Emissionsfaktor ist stets der aktuelle und standortbezogene Wert für den Strom zu nehmen, in diesem Fall der Umweltbundesamt-Referenzwert für den deutschen Strommix von 2023. Im Beispiel der CNC-Drehmaschine, werden drei Rillenkugellager getauscht, die einen „Product Carbon Footprint“ (PCF) von insgesamt 1,59 kgCO<sub>2</sub>e aufweisen. [33] Mit diesen Daten folgt der erste Schritt der Ermittlung des MCHW, die Berechnung des absoluten Carbon Handprint ( $CH_{\text{Gesamt}}$ ).

#### **Schritt 1:** Berechnung des absoluten Carbon Handprint ( $CH_{\text{Gesamt}}$ )

Zunächst wird die Emissionsdifferenz über das gesamte Intervall ermittelt:

$$CH_{\text{Gesamt}} = 0,5 * (7,92 \text{ kW} * 1,464 - 7,92 \text{ kW}) * 1500\text{h} * 0,372 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh} - CF_{\text{Wartung}}$$

$$CH_{\text{Gesamt}} = 0,5 * 3,67 \text{ kW} * 1500\text{h} * 0,372 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh} - CF_{\text{Wartung}}$$

$$CH_{\text{Gesamt}} = 2.756,25 \text{ kW/h} * 0,372 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh} - CF_{\text{Wartung}}$$

$$CH_{\text{Gesamt}} = 1.025,325 \text{ kgCO}_2\text{e} - 1,59 \text{ kgCO}_2\text{e} = \mathbf{1.023,735 \text{ kgCO}_2\text{e}}$$

#### **Schritt 2:** Ermittlung des MCHW

Die spezifische Kennzahl ergibt sich durch die Normierung auf die Betriebsstunde:

$$\text{MCHW} = 1.023,735 \text{ kgCO}_2\text{e} / 1.500\text{h} \approx \mathbf{0,682 \text{ kgCO}_2\text{e/h}}$$

## Industriepumpe

<b>Einflussgröße</b>	<b>Wert</b>
Betriebsdauer [h]	1500
Basis - Leistungsaufnahme ( $P_{\text{Base}}$ ) [kW]	3
Verlustkoeffizient ( $f_{\text{Gesamt}}$ )	1,588
Emissionsfaktor (EF) [kgCO <sub>2</sub> e/kWh]	0,372
CF <sub>Wartung</sub> [kgCO <sub>2</sub> e]	0,53

Die 1500 Betriebsstunden entsprechen dem gewählten Wartungsintervall. Zur Basis – Leistungsaufnahme zählt lediglich die Leistung des Antreibenden Elektromotors mit 3 kW. Der Verlustkoeffizient setzt sich aus den in Kapitel 2.3.2 genannten Verschleißfaktoren zusammen. Emissionsfaktor ist auch hier der UBA-Referenzwert von 2023. Im Fall der Industriepumpe wird lediglich ein Rillenkugellager getauscht, welches ebenfalls einen PCF von 0,53 kgCO<sub>2</sub>e besitzt. [33]

**Schritt 1:** Berechnung des absoluten Carbon Handprint ( $CH_{\text{Gesamt}}$ )

$$CH_{\text{Gesamt}} = 0,5 * (3 \text{ kW} * 1,588 - 3 \text{ kW}) * 1.500 \text{ h} * 0,372 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh} - CF_{\text{Wartung}}$$

$$CH_{\text{Gesamt}} = 0,5 * 1,76 \text{ kW} * 1.500 \text{ h} * 0,372 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} - 0,53\text{kgCO}_2\text{e} = \mathbf{491,626 \text{ kgCO}_2\text{e}}$$

**Schritt 2:** Ermittlung des MCHW

$$MCHW = 491,626 \text{ kgCO}_2\text{e} / 1.500 \text{ h} = \mathbf{0,328 \text{ kgCO}_2\text{e/h}}$$

## HLK-System

<b>Einflussgröße</b>	<b>Wert</b>
Betriebsdauer [h]	1500
Basis - Leistungsaufnahme ( $P_{\text{Base}}$ ) [kW]	350
Verlustkoeffizient ( $f_{\text{Gesamt}}$ )	1,636
Emissionsfaktor (EF) [kgCO <sub>2</sub> e/kWh]	0,372
CF <sub>Wartung</sub> [kgCO <sub>2</sub> e]	14,56

Die 1500 Betriebsstunden entsprechen dem gewählten Wartungsintervall. Zur Basis – Leistungsaufnahme zählen hier die Elektromotoren mit einer Nennleistung von 350 kW. Der Verlustkoeffizient setzt sich aus den in Kapitel 2.3.3 genannten Verschleißfaktoren zusammen. Emissionsfaktor ist auch hier der UBA-Referenzwert von 2023. Im Fall des HLK-Systems werden zwei Rillenkugellager (PCF = 1,06 kgCO<sub>2</sub>e) [33] und ein Luftfilter (PCF = 13,5 kgCO<sub>2</sub>e) getauscht. [34]

### **Schritt 1:** Berechnung des absoluten Carbon Handprint ( $CH_{\text{Gesamt}}$ )

$$CH_{\text{Gesamt}} = 0,5 * (350 \text{ kW} * 1,636 - 350 \text{ kW}) * 1.500 \text{ h} * 0,372 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh} - CF_{\text{Wartung}}$$

$$CH_{\text{Gesamt}} = 0,5 * 222,6 \text{ kW} * 1.500 \text{ h} * 0,372 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} - 14,56 \text{ kgCO}_2\text{e} = \mathbf{62.090,84 \text{ kgCO}_2\text{e}}$$

### **Schritt 2:** Ermittlung des MCHW

$$MCHW = 62.090,84 \text{ kgCO}_2\text{e} / 1.500 \text{ h} = \mathbf{41,39 \text{ kgCO}_2\text{e/h}}$$

Im Beispiel der CNC-Drehmaschine stellt der berechnete MCHW von ca. 0,68 kg CO<sub>2</sub>e/h verdeutlicht dar, dass jede Betriebsstunde im ungewarteten Zustand eine vermeidbare Umweltbelastung von über einem halben Kilogramm CO<sub>2</sub>e verursacht. Dieser Wert dient im Folgenden als Benchmark für die Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen.

### 3.4 Visualisierung und Priorisierungs-Matrix

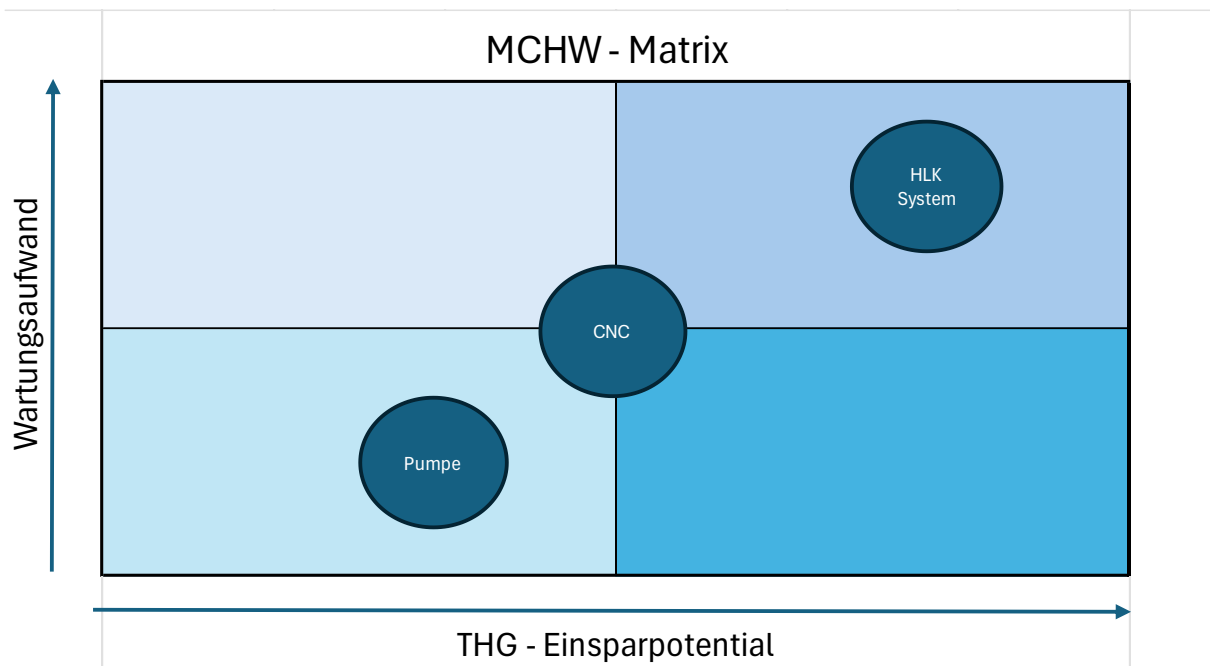


Abbildung 6: MCHW – Matrix [F]

Um die Kennzahl MCHW in die betriebliche Praxis zu integrieren, bedarf es einer Darstellungsform, die sowohl die ökologische Wirksamkeit als auch die ökonomische Effizienz abbildet. Hierzu wird die „Maintenance Carbon Handprint-Wartung – Matrix“ (MCHW-Matrix) entwickelt. Diese stellt den spezifischen Handprint (MCHW) auf der X-Achse dem relativen Wartungsaufwand bzw. den Kosten auf der Y-Achse gegenüber. Mithilfe der MCHW-Matrix lassen sich unterschiedlich aufwendige Wartungsmaßnahmen, ihrem relativem THG-Einsparpotential zuordnen. So können Unternehmen Wartungsarbeiten oder gesamte Anlagen nach ihrem ökologischen Mehrwert priorisieren. Es wurde bewusst auf eine genaue Unterteilung der Achsen in CO<sub>2</sub>e verzichtet, da sich im ökologischen Sinne jeglicher Entzug von Treibhausgasen lohnt. Vielmehr wurde die CNC-Drehmaschine als Referenzszenario gewählt, um die beiden anderen Beispiele in Bezug auf Wartungsaufwand und entzogener Emissionen relativ zur CNC-Drehmaschine einzuordnen. Unternehmen können individuell ein solches Referenzszenario wählen, welches mit mittlerem Wartungsaufwand und mittlerem THG-Einsparpotential bewertet wird. Jene Anlagen mit geringem Wartungsaufwand und hohem THG-Einsparpotential sind solchen mit hohem Aufwand und geringem Einsparpotential gegenüber zu priorisieren.

# Diskussion

## 4.1 Aussagekraft und Grenzen der Methode

Der in dieser Arbeit entwickelte Differenzansatz zur Berechnung des Carbon Handprint von Wartungen ist methodisch robust, transparent und praxisnah. Dennoch ist er mit spezifischen Einschränkungen verbunden, die für eine sachgerechte Interpretation der Ergebnisse unverzichtbar sind.

### 4.1.1 Validität der Baseline

Der Differenzansatz setzt voraus, dass das Baseline-Szenario (Anlage ohne Wartung) realitätsnah definiert werden kann. In der Praxis ist dies mit erheblicher Unsicherheit behaftet. Der tatsächliche Zustand einer ungewarteten Anlage nach einem definierten Betriebszeitraum hängt von stark variierenden Faktoren wie dem Belastungsprofil, den Umgebungsbedingungen, der Betriebsstoff-Qualität und der Betriebsführung ab. Die in dieser Arbeit verwendeten Verschleißfaktoren ( $f_L$  1,10;  $f_A$  1,07;  $f_M$  1,05;  $f_W$  1,15;  $f_K$  1,03;  $f_F$  1,10;  $f_{RI}$  1,12;  $f_{RS}$  1,25;  $f_V$  1,15) sind literaturbasierte Mittelwerte, die im Einzelfall deutlich abweichen können. Eine valide empirische Bestimmung der Baseline würde erfordern, eine Kontrollgruppe von ungewarteten Anlagen über mehrere Monate zu messen und deren Energieverbrauchsentwicklung zu dokumentieren. Dies ist in industriellen Umgebungen aus wirtschaftlichen und betriebssicherheitlichen Gründen in der Regel nicht möglich. Die Methodik muss daher akzeptieren, dass Baseline-Werte modelliert und nicht gemessen sind, was in der Berichterstattung transparent auszuweisen ist. Falls Anlagen existieren, die den Stromverbrauch mittels Sensorik in Echtzeit messen, sollten diese Werte herangezogen werden, um den Differenzansatz zu bilden. Hierfür wird jedoch eine kontinuierliche Messung über das gesamte Nutzungsintervall vorausgesetzt.

### 4.1.2 Systemgrenzenproblem: Wartung und Instandsetzung

In der Praxis ist die Grenze zwischen Wartung und Instandsetzung nicht immer scharf. Eine Wartung, die einen bereits verschlissenen Teil austauscht, der ohne Wartung kurzfristig ausgefallen wäre, enthält Elemente beider Maßnahmen. Die vorliegende Methodik weist den Carbon Handprint vollständig der Wartung zu, was in Grenzfällen zu einer Überschätzung des Handprints führen kann.

### 4.1.3 Nicht bilanzierte Effekte

Die vorliegende Methodik bilanziert ausschließlich den operativen Energieeffizienzeffekt der Wartung. Nicht berücksichtigt werden:

- **Lebensdauererlängerung:** Eine regelmäßig gewartete Anlage hat eine signifikant längere Lebensdauer als eine vernachlässigte. Dies bedeutet, dass Herstellungsemissionen auf mehr Betriebsjahre verteilt werden. Ein ökologischer Vorteil, der nicht im MCHW erscheint.
- **Leistungsverbesserungen:** Manche Wartungsmaßnahmen verbessern nicht nur den Ist – Zustand, sondern heben die Anlage auf ein höheres Betriebsniveau (Grenzfall: Verbesserung).
- **Vermiedene Notfallreparaturen:** Durch Wartung verhinderte Havarien und die damit verbundenen Materialemissionen sind qualitativ bedeutsam, aber nur schwer quantifizierbar.

### 4.1.4 Grenzfall negativer Handprint

Theoretisch kann der Carbon Handprint negativ werden, wenn der Wartungsaufwand ( $E_{\text{Wartung}}$ ) den energetischen Vorteil der Wartung übersteigt. Dies wäre der Fall bei sehr langen Anfahrtstrecken, großen Wartungsteams, intensivem Materialeinsatz und gleichzeitig geringem Energiemehrverbrauch der Anlage im ungewarteten Zustand. In der Praxis ist dieses Szenario selten, aber bei der Planung von Remote-Wartungseinsätzen zu berücksichtigen.

## 4.2 Unsicherheit der Datengrundlage

### 4.2.1 Emissionsfaktor Varianz

Die dominierende Unsicherheitsquelle neben den Verschleißfaktoren ist die Wahl des Emissionsfaktors für Strom. Der Unterschied zwischen  $EF_{\text{Alt (2019)}}$  (732 g CO<sub>2</sub>/kWh) und  $EF_{\text{Ref}}$  (372 g CO<sub>2</sub>/kWh) führt zu einer Verdopplung bzw. Halbierung der berechneten Carbon-Handprint-Werte. Dies ist keine Unsicherheit im statistischen Sinne, sondern eine methodische Entscheidung, die transparent auszuweisen ist. Für die Nachhaltigkeitsberichterstattung ist der aktuelle UBA-Emissionsfaktor ( $EF_{\text{Ref}}$ )

372 g CO<sub>2</sub>/kWh für 2023) zu verwenden. Für Benchmarkvergleiche mit älteren Perioden oder für Berechnungen in Ländern mit anderem Strommix sind die jeweiligen länder- und jahresspezifischen Faktoren zu verwenden. Darüber hinaus ist zu beachten, dass der deutsche Jahresmittelwert (372 gCO<sub>2</sub>/kWh) erheblich vom stündlichen Marginalwert des Strommixes abweichen kann. Für Anlagen, die bevorzugt zu Zeiten hoher erneuerbarer Einspeisung betrieben werden (z.B. durch Lastverschiebung), wäre ein stündlicher Emissionsfaktor methodisch genauer, erfordert jedoch Echtzeitdaten, die in der Praxis selten verfügbar sind.

## **4.2.2 Fehlende Standardisierung**

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit existiert keine ISO- oder DIN-Norm, die die Berechnung des Carbon Handprint von Wartungsmaßnahmen regelt. Dies bedeutet, dass die hier entwickelte Methodik zwar auf anerkannten Normen aufbaut, in ihrer spezifischen Anwendung auf Wartungen aber noch keiner externen Standardisierung unterliegt. Vergleiche zwischen Berechnungen verschiedener Unternehmen oder Autoren sind daher nur begrenzt möglich.

## **4.3 Vergleich zu alternativen Nachhaltigkeitsmetriken**

### **4.3.1 Carbon Footprint vs. Carbon Handprint**

Der klassische Carbon Footprint einer Anlage erfasst die kumulativen Emissionen über den Lebenszyklus oder einen Betriebszeitraum und ist somit eine Belastungsgröße. Der Carbon Handprint hingegen ist eine Nutzengröße, die beschreibt, welcher Teil dieser Emissionen durch eine Maßnahme, hier die Wartung, vermieden werden konnte.

Beide Metriken sind komplementär und sollten im Nachhaltigkeitsbericht gemeinsam ausgewiesen werden. Für Instandhaltungsmanager ist der MCHW die relevantere Kennzahl, da er den direkten Handlungsbeitrag der Instandhaltungsabteilung zur Emissionsreduktion quantifiziert, was mit dem Carbon Footprint allein nicht möglich ist.

### **4.3.2 Life Cycle Climate Performance (LCCP)**

Die Life Cycle Climate Performance (LCCP) ist ein produktbezogener Indikator, der primär für Kälteanlagen und HVAC-Systeme entwickelt wurde. Er umfasst neben den CO<sub>2e</sub> – Emissionen aus dem Energiebetrieb auch die Emissionen aus dem Kältemittel selbst (direkte Emissionen bei Leckage). Der

LCCP ist methodisch verwandt mit dem Carbon Handprint Ansatz dieser Arbeit, ist aber produktbezogen und nicht maßnahmenbezogen. Für HVAC-Anlagen bietet sich eine Integration von LCCP und MCHW an. Der MCHW der Filterwartung kann als Reduktionspotenzial innerhalb des LCCP ausgewiesen werden.

### **4.3.3 ESG – Rating und CSRD – Anforderungen**

Im Rahmen von ESG-Ratings (Environmental, Social, Governance) gewinnen positive Klimabeiträge zunehmend an Bedeutung. Während Ratings bislang primär auf Emissions-Reduktionsziele und absolute Footprint-Werte abstellen, wird erwartet, dass künftige Rating-Standards auch positive Handprint-Beiträge stärker würdigen. Die CSRD-Berichterstattung fordert über ESRS E1 die Offenlegung von Maßnahmen zur Klimaanpassung und -minderung, eine Kategorie, unter die der Nachweis eines MCHW fallen kann. Konkret könnte ein Unternehmen mit einem MCHW-Portfolio von z.B. 50 t CO<sub>2</sub>e/a (d.h. 50 Tonnen jährlich vermiedener Emissionen durch Wartungsmaßnahmen) diesen Wert im ESRS-E1-Bericht als Beitrag zur Emissionsreduktion ausweisen. Voraussetzung ist eine methodisch solide und nachprüfbare Berechnung, welche die vorliegende Arbeit entwickelt.

# Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass Wartungsmaßnahmen an Industrieanlagen nachweisbare, quantifizierbare und ökologisch bedeutsame Beiträge zur Reduktion von Treibhausgasemissionen leisten. Die zentralen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Ein Differenzansatz vergleicht die Emissionen eines ungewarteten Baseline-Szenarios mit den Emissionen im gewarteten Zustand (zzgl. Wartungsaufwand) und ermittelt so den Carbon Handprint der Wartungsmaßnahme. Die Methodik ist reproduzierbar, transparent und auf verschiedene Anlagentypen übertragbar.

In dieser Arbeit wurde die Methodik exemplarisch auf drei verschiedene Anlagentypen angewendet. Deren Carbon Handprint und spezifischer MCHW bestätigen, dass der Effekt signifikant ist.

- CNC-Drehmaschine: CH von 1.023,735 kgCO<sub>2</sub>e und MCHW von 0,682 kgCO<sub>2</sub>e/h
- Industripumpe: CH von 491,626 kgCO<sub>2</sub>e und MCHW von 0,328 kgCO<sub>2</sub>e/h
- HLK-System: CH von 62.090,84 kgCO<sub>2</sub>e und MCHW von 41,39 kgCO<sub>2</sub>e/h

Die hier neu entwickelte Kennzahl MCHW (Maintenance Carbon Handprint – Wartung) ermöglicht eine anlagenübergreifende, auf die Betriebsstunde normierte Vergleichbarkeit von Wartungsmaßnahmen nach ihrem Potential, Emissionen zu mindern. Zudem wurde die MCHW-Priorisierungsmatrix eingeführt, die es Instandhaltungsmanagern erlaubt, knappe Ressourcen auf diejenigen Anlagen zu konzentrieren, bei denen Wartungen die größten CO<sub>2</sub>e-Einspareffekte erzielen. So können Anlagen mit einem erhöhten THG-Einsparpotential priorisiert werden und mit in die Instandhaltungsplanung einfließen.

Die in dieser Arbeit entstandene Methodik ist eine erste Grundlage zur Bemessung positiver Klimabeiträge durch die Instandhaltung, hier spezifisch auf die Wartung angewendet. Wie in der Diskussion offengelegt, gibt es noch viele Felder innerhalb der Berechnung des Carbon Handprint, die weitere Optimierungen zulassen. So könnten Energieverbräuche zukünftig mittels Sensorik in Echtzeit verfolgt werden, wodurch sich der Carbon Handprint einer Instandhaltungsmaßnahme dynamisch mit zunehmenden Verschleißgrad ändern würde. Aufbauend auf diese Arbeit können so weitere Forschungen stattfinden, die einen noch detaillierten Carbon Handprint und MCHW liefern.

# Literaturverzeichnis

- [1] U. Nations, *Pariser Klimaabkommen*, Paris: Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC), 2016.
- [2] D. I. f. N. e.V., „ISO 14064-1: Treibhausgase Teil 1: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019.
- [3] E. Kommission, *Corporate Sustainability Reporting Directive*, Europäische Union, 2022.
- [4] D. I. f. N. e.V., „DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.
- [5] V. D. Ingenieure, „VDI 2893: Auswahl und Bildung von Kennzahlen für die Instandhaltung,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019.
- [6] D. D. I. f. N. e. V., „DIN EN ISO 14067: Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019.
- [7] D. I. f. N. e.V., „DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement Ökobilanz,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2021.
- [8] M. H. A. K.-T. R. R. Jouni Juntunen, *Strategies for Integrating Stakeholders into Sustainability Innovation: A Configurational Perspective*, Helsinki: University of Helsinki, 2019.
- [9] Umweltbundesamt, „Übersicht der Scopes und Emissions-Kategorien,“ 22 Januar 2025. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/bild/uebersicht-der-scopes-emissions-kategorien-des-ghg>.
- [10] H. Ponstein, *Praxishandbuch Klimaschutzmanagement in Unternehmen*, Heidelberg: Springer Gabler Berlin, 2025.
- [11] Umweltbundesamt, Dezember 2025. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/wirtschaft-umwelt/umwelt-energiemanagement/emissionsfaktoren-zur-treibhausgasbilanzierung-von>.
- [12] Y. G. M. S. Z. L. Z.Y. Liu, „Energy consumption and process sustainability of hard milling with tool wear progression,“ *Science Direct, Journal of Materials Processing Technology*, pp. 305 - 312, 2016.
- [13] T. Y. Y. D. S. Q. J. Z. Xuwei Zhang, „Energy consumption considering tool wear and optimization of cutting parameters in micro milling process,“ *Science Direct, International Journal of Mechanical Sciences*, 2020.
- [14] U.S. Department of Energy, „Pump Life Cycle Costs: A guide to LCC analysis for pumping systems,“ Office of Industrial Technologies Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy, Brüssel, 2000.
- [15] DIN e.V., „DIN EN ISO 14847 Rotierende Verdrängerpumpen,“ DIN e.V, 1999.
- [16] R. Y. Yeap, „Modeling the Impacts of Filter Fouling on Energy Consumption,“ 17 März 2026. [Online]. Available: <https://urj.library.iit.edu/index.php/urj/article/view/68/29>.
- [17] S. van der Horst, „research.tue.nl,“ 29 Januar 2019. [Online]. Available: <https://research.tue.nl/en/studentTheses/economically-optimizing-maintenance-of-air-handling-units/>.
- [18] DIN e.V., „DIN EN ISO 50001 Energiemanagementsysteme,“ DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2018.

- [19] Wagner Werkzeugmaschinen GmbH, „www.wagner-maschinen.de,“ 19 März 2026. [Online]. Available: <https://www.wagner-maschinen.de/detailseite/16?cHash=bd0caa524c83d36cc917c7a4a6abcf05#technical-details>.
- [20] STEINLE Industripumpen GmbH, „www.steinle-pumpen.de,“ 11 Januar 2026. [Online].
- [21] G. G. Protocol, „ghgprotocol.org,“ 2001. [Online]. Available: <https://ghgprotocol.org/>.
- [22] „Umweltbundesamt- CO<sub>2</sub> Fußbdruck,“ 24 November 2025. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz/co2-fussabdruck-carbon-footprint#internationale-normen-zur-berechnung-des-carbon-footprint>.
- [23] Y. Z. F. M. Q. G. G. Z. Guoyong Zhao, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,“ in *Prediction model of machine tool energy consumption in hard-to-process materials turning*, Berlin, Springer Gabler, 2020, pp. 4499 - 4508.
- [24] T. H. A. B. M. T. K. A. R. M. H. Anoire Ben Jdidia, „Energy consumed by a bearing supported spindle in the presence of a dynamic cutting force and of defects,“ *Science Direct, Comptes Rendus Mécanique*, 2019.
- [25] D. Franke, *Ausricht- und Kupplungsfehler an Maschinensätzen*, Berlin: Springer Gabler, 2020.
- [26] M. Patel, „How Smart Maintenance Practices Can Reduce Utility Costs?,“ 12 November 2025. [Online]. Available: <https://terotam.com/blog/how-smart-maintenance-practices-can-reduce-utility-costs?>
- [27] G. Carroll, „www.garanord.md,“ 17 Oktober 2025. [Online]. Available: [https://garanord.md/preventive-maintenance-checklist-for-cnc-machine-tool-motors-bearings-lubrication-and-inspections/?utm\\_source=chatgpt.com](https://garanord.md/preventive-maintenance-checklist-for-cnc-machine-tool-motors-bearings-lubrication-and-inspections/?utm_source=chatgpt.com).
- [28] Europump, „Use Phase GHG emissions from pump units - A Europump guide,“ Europump, Brüssel, 2024.
- [29] KSB, „ksb.com,“ 17 März 2026. [Online]. Available: <https://www.ksb.com/de-global/kreiselpumpenlexikon/artikel/pumpenwirkungsgrad-1074676>.
- [30] M. G. M. L. L. R. Azzedine Bouzaouit, „recentonline.ro,“ 17 März 2026. [Online]. Available: [https://www.recentonline.ro/054/Bouzaouit-Recent54.pdf?utm\\_](https://www.recentonline.ro/054/Bouzaouit-Recent54.pdf?utm_).
- [31] Derc Salotech, „dercsalotech.nl,“ 17 März 2026. [Online]. Available: [https://dercsalotech.nl/kennisbank/how-does-tube-cleaning-impact-heat-transfer-efficiency/?utm\\_](https://dercsalotech.nl/kennisbank/how-does-tube-cleaning-impact-heat-transfer-efficiency/?utm_).
- [32] M. E. V. D. Y. A. Amr Suliman, „Quantification and diagnostics of Corrosion-driven energy,“ *Elsevier*, p. 19, 2026.
- [33] SKF, „skf.com,“ 26 März 2026. [Online]. Available: <https://www.skf.com/de/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6007%2FC3>.
- [34] Camfil, „materials.oneclicklca.com,“ 26 März 2026. [Online]. Available: <https://materials.oneclicklca.com/en/material/bag-filter-for-general-air-ventilation-applications/67f018d52fcee873662bce5d>.
- [35] D. P. Radgen, „Compressed Air System Audits and Benchmarking Results from the German Compressed Air System Campaign "Druckluft effizient",“ Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Karlsruhe, 2004.
- [36] L. K. P. D.-I. D. L. T. A. Lennard Sielaff, „Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA,“ 2022. [Online]. Available: [https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Publikationen/studien/smarte-instandhaltung-als-resilienzfaktor.html?utm\\_](https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Publikationen/studien/smarte-instandhaltung-als-resilienzfaktor.html?utm_).
- [37] D. D. I. f. N. e.V., „ISO 55000: Asset Management - Übersicht, Leitlinien und Begriffe,“ Beuth Verlag

GmbH, Berlin, 2017.

- [38] Intergovernmental Panel on Climate Change, „Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle,“ 25 November 2025. [Online]. Available: <https://www.de-ipcc.de/307.php>.

# Abbildungsquellen

[A]

[https://media.licdn.com/dms/image/v2/D4E22AQHszMxuY3gMpA/feedshareshrink\\_2048\\_1536/B4EZuBOaZgloAw-](https://media.licdn.com/dms/image/v2/D4E22AQHszMxuY3gMpA/feedshareshrink_2048_1536/B4EZuBOaZgloAw-)

[/0/1767399598654?e=1775692800&v=beta&ts=sp3SOlelsxfTmKylC4\\_gwib9zYpLZG2k\\_RiJT0ew0](https://www.linkedin.com/feed/share?url=https://media.licdn.com/dms/image/v2/D4E22AQHszMxuY3gMpA/feedshareshrink_2048_1536/B4EZuBOaZgloAw-)

M4 | Letzter Zugriff am 18.03.2026

[B] Übersicht der Scopes und Emissions-Kategorien des GHG Protocol Corporate Standard | Umweltbundesamt | Letzter Zugriff am 22.01.2026

[C] KI – Erstellte Abbildung. Erstellt mit Gemini (NanoBananaAi) <https://gemini.google.com/app>  
 Erstellt am: 07.04.2026

[D] <https://excelize.com/wp-content/uploads/2025/02/HVAC-SYSTEM-1-1024x576.png> | Abbildung mit KI bearbeitet (Übersetzt). Bearbeitet mit <https://gemini.google.com/app> | Erstellt am: 13.04.2026

[E] KI – Erstellte Abbildung. Erstellt mit Gemini (NanoBananaAi) <https://gemini.google.com/app>  
 Erstellt am: 13.04.2026

[F] Selbst erstellte Abbildung. Erstellt am: 19.03.2026

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erläuterung des Carbon Handprint [A].....	3
Abbildung 2: Emissions-Kategorien (Scopes) [B] .....	4
Abbildung 3: Konzept des Carbon Handprint [C].....	5
Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines HLK-Systems [D] .....	17
Abbildung 5: Herleitung $P_{max}$ [E] .....	19
Abbildung 6: MCHW – Matrix [F] .....	27

# Impressum

## **Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim**

Handelsstraße 13

69214 Eppelheim

[www.mannheim.dhbw.de](http://www.mannheim.dhbw.de)

## **Autorenschaft**

Morris Bertram, Elias Janner

## **Herausgeberschaft**

Prof. Dr. Lennart Brumby

DHBW Mannheim, 2026

# Kontakt

## **Morris Bertram**

Dualer-Student bei J.M. Voith SE & Co. KG

[morris.bertram@voith.com](mailto:morris.bertram@voith.com)



## **Elias Janner**

Dualer-Student bei HIMA Paul Hildebrandt GmbH

[elias.janner@hima.com](mailto:elias.janner@hima.com)



## **Prof. Dr. Lennart Brumby**

Studiengangsleiter Service Engineering

Tel.: +49 (0)621 4105 - 1140

Fax: +49 (0)621 4105 - 1321

Mobil: +49 (0)173 2823204

[lennart.brumby@dhbw.de](mailto:lennart.brumby@dhbw.de)

