

Förderung eines praktikablen kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP)
zur Energieeffizienzsteigerung in kleinen und mittleren Unternehmen

Lebensweganalyse

vom

14.02.2022

An

LfU Bayerisches Landesamt für Umwelt

Bürgermeister Ulrichstr. 160

86179 Augsburg

erstellt von

Bernd Maur Consulting

Eisenbahnstraße 33a

82110 Germering

Inhalt

1	Einführung.....	4
1.1	Lebenswegphasen	5
2	Beschreibung des betrachteten Produkts.....	6
3	Grobanalyse	10
3.1	Darstellung der Daten.....	13
3.1.1	Grunddaten.....	13
3.1.2	Schritt 1 bis 3, Rohstoff und Vorprodukte Herstellung	14
3.1.3	Schritt 4, Herstellung.....	16
3.1.4	Schritt 5, Montage und Inbetriebnahme	17
3.1.5	Schritt 6, Stromverbrauch beim Betrieb der Kältemaschine.....	17
3.1.6	Schritt 7, Service und Wartung	18
3.1.7	Schritt 8, Demontage	19
3.1.8	Schritt 9, Entsorgung.....	19
3.1.9	Zusammenfassung	20
3.1.10	Handling Grobanalyse	21
4	Feinanalyse.....	22
5	Maßnahmenfelder	22
5.1	Strategiefeld 1: Materialauswahl.....	22
5.2	Strategiefeld 2: Leichtbauweise.....	22
5.3	Strategiefeld 6: Nutzungsgerechte Gestaltung.....	23
5.4	Strategiefeld 8: Produktlebensdauer	23
5.5	Strategiefeld 29: Energieeffiziente Gebäudestruktur	23
5.6	Strategiefeld 26: Vermindern des Energieverbrauchs.....	23
6	Betriebliche Schlussfolgerungen	23
7	Zusammenfassung	23

8	Anhang.....	24
8.1	Kältemittelfliessschema.....	24
8.2	Tabellenverzeichnis.....	25
8.3	Abbildungen.....	25
8.4	Literaturquellen.....	25

1 Einführung

Mit dem Thema Ressourceneffizienz geht einher, dass sich ein Unternehmen nicht nur Gedanken machen sollte, wie es seine eigenen Prozesse im Hinblick auf die Ressourceneffizienz möglichst optimal aufstellt. Hier spricht die Richtlinie VDI 4801 von einem Gate to Gate Ansatz. Bereits mit diesem Ansatz lässt sich regelmäßig die Ressourceneffizienz verbessern. Über die innerbetrieblichen Vorgänge sowie Ressourcen- und Energieeinsätzen liegen häufig belastbare Daten vor, oder sind mit überschaubarem Zeitaufwand aus den betrieblichen Steuerungssystemen zu entnehmen.

Ein Unternehmen sollte sich aber auch Gedanken machen über die vorgelagerten Produktions- und Transportschritte, die eingekaufte Produkte, Rohstoffe und Halbzeuge durchlaufen müssen, bis sie in die eigene Produktion einfließen können. Nachgelagert verursachen Produkte weiteren Ressourceneinsatz, sowie einen gegebenenfalls erheblichen Energieeinsatz, der zu deutlichen CO₂-Emissionen führen kann. Dieser Analyseansatz wird „Cradle to Grave“ Ansatz genannt. Die Problematik hierbei ist aber oft, dass über die Fertigung, den Ressourceneinsatz und den Energieeinsatz der vorgelagerten Schritte wenig bekannt ist. Auch über die nachgelagerte Nutzung liegen häufig wenige gesicherte Kenntnis vor. Entsprechende Anfragen und Literaturrecherchen erfordern einen hohen Zeitaufwand und eine gute Grundkenntnis der Vorgehensweise. Dennoch hat das Unternehmen hier regelmäßig Möglichkeiten der Einflussnahme, die über die gesamte Prozesskette helfen, den Ressourceneinsatz zu mindern.

Entsprechend der Komplexität der Fragestellung und der eigentlichen Zielgruppe der KMU liegt der Ansatz dieser Untersuchung im Rahmen des Projektes auf der Anwendbarkeit der in der VDI 4801 beschriebenen Methodik und ihrer Anwendbarkeit in einem KMU. Dazu wird zuerst eine Grobanalyse im Sinne der VDI 4801 für eine Lebenswegbetrachtung am Beispiel einer realen Kältemaschine durchgeführt.

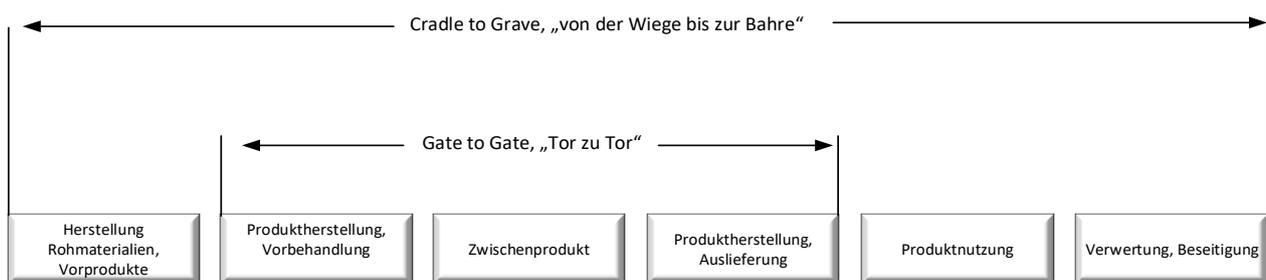


Abbildung 1: Untersuchungsansätze der VDI 4801

In diesem Projekt geht es primär um das Thema Energie, sodass einzelne Einsparmöglichkeiten im Bereich von Rohstoffen und Produkten in dieser Analyse nicht betrachtet werden.

In dieser Untersuchung wird exemplarisch anhand einer Maschine, errichtet und betreut durch die Fa. Trane Roggenkamp, einem der Projektpartner im Pilotprojekt „Einführung der VDI 4801“, ein mögliches pragmatisches Vorgehen dargestellt.

1.1 Lebenswegphasen

Mit der Lebensweganalyse in der VDI 4801 wird dem Umstand Rechnung getragen, dass Unternehmen nicht nur auf die Ressourceneffizienz im eigenen Unternehmen, in einem Gate to Gate Ansatz, Einfluss nehmen können, sondern ggfs. bei:

- der Beschaffung von Produkten,
- der Zusammenarbeit mit Lieferanten zur Verbesserung der Vorprodukte,
- den Lieferanforderungen,
- dem Transport der Güter,
- den vorgelagerten Produktionsschritten über den Einkauf,
- der Nutzungsphase,
- und der Verwertung und Beseitigung.

Die VDI 4801 beschreibt die Lebenswegphasen wie in der nachstehenden Grafik dargestellt.



Abbildung 2: Lebenswegphasen

Nicht genannt sind hier die Transporte, die je nach Produkt auch einen erheblichen Anteil auf den Energieeinsatz haben können.

Der Fokus der Betrachtung wird auf den Aspekt CO₂ gelegt, da dieser über die gesamte Prozesskette aufgrund der Datenlage am zuverlässigsten zu kalkulieren ist. Zu den bei Prozessen und Produkten freigesetzten CO₂ Mengen gibt es viele Datenbanken, auf die man zu Recherchezwecken zugreifen kann. So kann zielführend eine valide Bilanz erstellt werden. In dem Projekt wurde auf Daten aus ProBas¹ zurückgegriffen, ein Dienst des Umweltbundesamtes.

¹ (Umwelt Bundesamt, 2022)

2 Beschreibung des betrachteten Produkts

Zu Beginn einer Analyse ist es wichtig, das Betrachtungsobjekt und die Rahmenbedingungen hinreichend genau zu definieren.

Die Analyse wird für eine Kältemaschine RTHF 460 durchgeführt. Das nachstehende Bild zeigt eine solche Maschine. Die Maschine ist im Raum München installiert.



Abbildung 3: Kältemaschine RTHF 460

Im Anhang findet sich die Grafik mit einer Benennung der einzelnen sichtbaren Teile.

Bei der Maschine handelt es sich um eine Kompressionskältemaschine mit zwei Verdichtern, die durch diesen modularen Aufbau eine bessere Regelbarkeit und niedrigere Betriebskosten möglich macht.

Die nachstehende Tabelle zeigt die wesentlichen Daten der Maschine, die Maschine ist mit IE 3 Motoren ausgerüstet.

Tabelle 1. Technische Daten der Maschine

Allgemeine Daten		
Typ	RTHF 460	
Kältemittel	R134a	
Kältemittelfüllmenge Kreis 1	178	kg
Kältemittelfüllmenge Kreis 2	180	kg
Mehrfachverdichter	Ja	
Gesamtkälteleistung	1573	kW
Bruttogesamtleistungsaufnahme im Kühlbetrieb	280	kW
Maximale Leistungsaufnahme	356	kW
Kabelquerschnitt max. 2x	300	mm ²
Verdichtertyp	Schraube	
Leistungsaufnahme Verdichter Stufe 1	209	kW
Leistungsaufnahme Verdichter Stufe 2	145	kW
Leistungsaufnahme Steuerung	1,4	kW
Ölwannenheizung 1	0,3	kW
Ölwannenheizung 2	0,3	kW
Verdampfer	1	
Typ	Mantelrohrwärmetauscher	
Mantelwerkstoff	Stahl	
Rohrbündel	Stahl	
Rohrwerkstoff	Kupfer	
Verdampferwassermenge	187	l
Verflüssiger	1	
Typ	Mantelrohrwärmetauscher	
Mantelwerkstoff	Stahl	
Rohrbündel	Stahl	
Rohrwerkstoff	Kupfer	
Verflüssigerwassermenge	350	l
Ölfüllmenge Kreis 1	24	l
Ölfüllmenge Kreis 2	16	l
Länge der Maschine	4586	mm
Höhe der Maschine	2395	mm
Breite der Maschine	1940	mm
Transportgewicht	8080	kg
Betriebsgewicht	8590	kg

Die nächste Grafik zeigt das typische Schaltschema der Maschine.

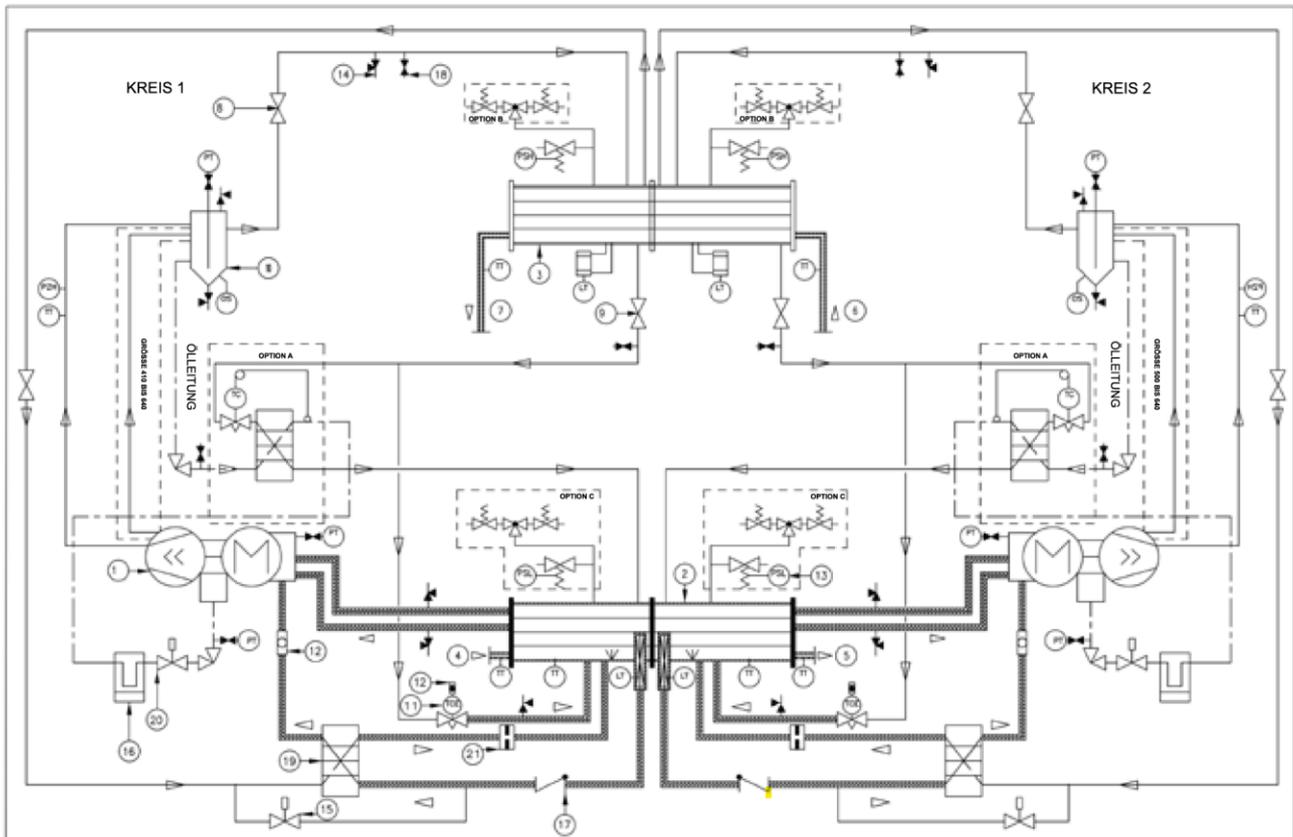


Abbildung 4: Schaltbild laut Herstellerbeschreibung

Der Bilanzkreis der Betrachtung wird hierbei in einem engen Rahmen auf die Kompressionskältemaschine eingeschränkt, externe Baugruppen wie Rückkühler spielen bei der Betrachtung nur im Bereich der möglichen Einsatzoptimierung eine Rolle.

Die Hauptelemente der Maschine sind

- 1) Schaltschrank mit Starter und Drehzahlregelung, sowie SPS und Leistungsanschlüssen
- 2) Schraubenverdichter
- 3) Antriebsmotor
- 4) Verdampfer
- 5) Wassergekühlter Verflüssiger mit integriertem Tiefkühler
- 6) Ölsystem
- 7) Rohrleitungen
- 8) Stahlrahmen

Es existiert keine detaillierte verfügbare Auflistung der Werkstoffe der einzelnen Komponenten, aus denen die genauen Zusammensetzungen zu entnehmen sind. Dementsprechend wird für die Analyse einem Pareto Ansatz gefolgt, so dass mit hoher Wahrscheinlichkeit 80 % der Gewichtsanteile abgebildet sind. Diese erlaubt primär eine qualitative Analyse, die Genauigkeit einer quantitativen Analyse muss später validiert werden.

Im konkreten Fall wurden die Gewichtsbestandteile der Maschine aus den technischen Dokumenten und den Abmessungen der Anlage und der Einzelkomponenten bestimmt.

Wichtig dabei ist es aber, die Möglichkeiten eines KMU zur Durchführung einer LCA Analyse mit in Betracht zu ziehen. Ausführliche LCA Analysen erfordern genaue Kenntnisse über die einzelnen genutzten Rohstoffe, ihre Herkunft, ihre Bearbeitung, den Transport und auch über den Einfluss der Entsorgung.

Dafür bedarf es einerseits einer professionellen Software, andererseits auch genaue Detailkenntnisse über die Konstruktion der einzelnen Bestandteile der Anlage.

Deswegen ist es wichtig, eine einfache Methode zu etablieren, die leicht auch durch KMU umzusetzen ist. Dabei spielt der Pareto Ansatz, aber auch die ABC Analyse eine Rolle.

Im vorliegenden Fall werden die einzelnen Baugruppen betrachtet und die verschiedenen Gewichte der Maschinenelemente abgeschätzt.

Wenn die Gesamtbetrachtung einen Nutzen durch Variation oder Vertiefung der Daten zeigt, wird später eine Betrachtung möglicher Änderungen durchgeführt. Als Grenzwert legen wir hier eine erwartete Änderung der Analyseergebnisse um mehr als 10 % fest.

Die Ermittlung der Notwendigkeit einer Variation erfolgt über die Massenanteile, die die ersten Ergebnisse in Hinblick auf das Ermittlungsziel darstellt. Diese Ergebnisse dienen als Eingangsgröße der Produktweganalyse. Der Energieaufwand für den Betrieb wird echten Anlagendaten entnommen.

3 Grobanalyse

Ziel ist es, den Energieeinsatz der einzelnen Stufen zu bestimmen, die in der nachstehenden Grafik dargestellt sind.

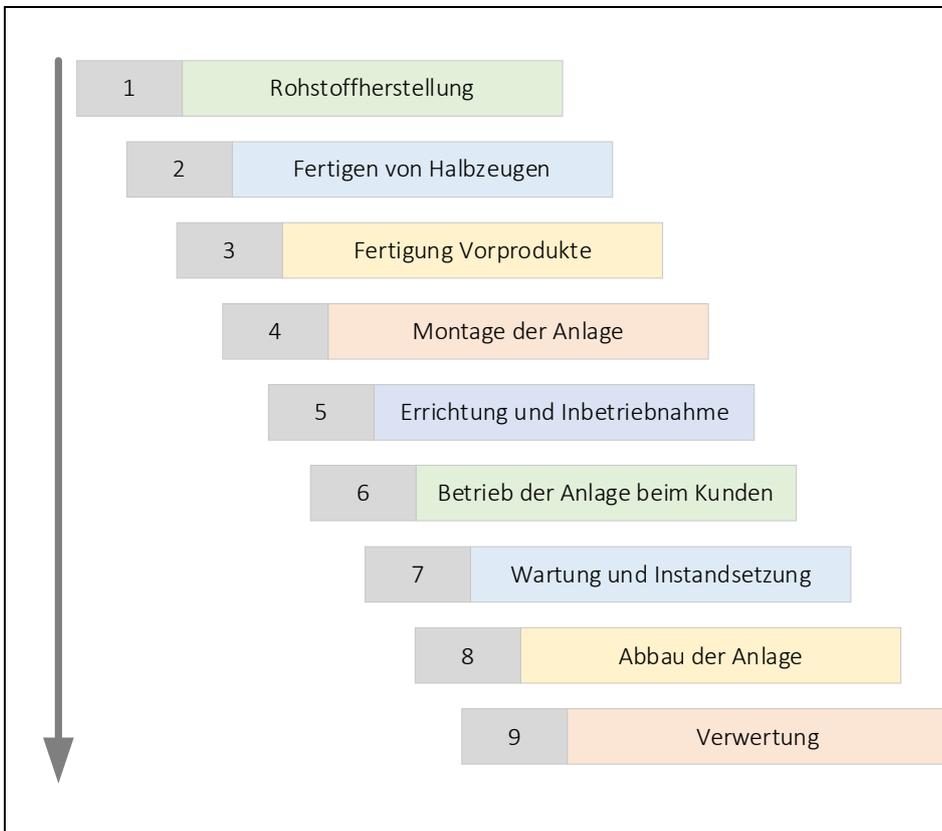


Abbildung 5: Analyseschritte

Einige Elemente werden aus der Analyse von vornherein ausgeschlossen, da hierzu keine plausiblen Werte zu erheben sind und keine validierbaren Annahmen getroffen werden können. Dies sind:

- CO₂ Emission von Lagerungsaktivitäten über den Produktlebensweg
- CO₂ Emission für Verpackungen

Die Daten zu den spezifischen Emissionsfaktoren werden überwiegend der Gemis/ProBas Datenbank entnommen.

Zu den einzelnen Positionen werden die folgenden Beschreibungen gegeben.

1) Rohstoffherstellung

Bei der Rohstoffherstellung werden die einzelnen wesentlichen Bestandteile der Maschine betrachtet. Dabei handelt es sich um Stahl, Aluminium, Kupfer und ähnlichen Materialien. Hier wird originär auf die Förderung der Rohstoffe abgestellt. Zu den Rohstoffen gehören Transporte, für den verschiedene Annahmen gemacht werden müssen. Diese werden als Ergebnis in der Material-Energiematrix ausgewiesen.

2) Fertigen von Halbzeugen

Halbzeuge sind Waren wie Stahlblech, Aluminiumblöcke, Kunststoffe, Kupferbarren und dergleichen. Hier findet eine Umwandlung des Rohstoffs in eine solche Form statt, dass eine spätere Formgebung ermöglicht wird. Auch hier fallen Transporte an.

3) Fertigung Vorprodukte

In diesem Betrachtungsschritt werden die Elemente produziert, die von dem Hersteller zu einer Maschine zusammengebaut werden. Da die Fertigungstiefe des Herstellers bei verschiedenen Produkte schwankt und im vorliegenden Fall auch nicht bekannt ist, wird ein eher allgemeiner Ansatz gewählt. Auch hier fallen Transporte an.

Die Punkte 1) bis 3) werden zusammengefasst, da Detaildaten nicht mit einem vertretbaren Aufwand zu kalkulierten sind.

4) Montage der Maschine

In der Montage werden die einzelnen Teile montiert und einzelne Funktionstests durchgeführt. Von hier aus werden die Maschinen dann in der Regel direkt an den Einbauort geliefert. Eine Lieferung an den Standort der Trane-Roggenkamp erfolgt nur, wenn an der Maschine noch kundenspezifische Anpassungen vorgenommen werden müssen. Fertigungsort ist das französische Épinal, die nachstehende Abbildung zeigt ein Bild des Standorts.



Abbildung 6: Herstellwerk der Maschine

5) Errichtung und Inbetriebnahme

Zu der Errichtung der Maschine gehört der Transport aus dem Herstellerwerk zum Einbauort, die Einbringung in den Aufstellungsort (Kran) und der Anschluss an die zu versorgende Maschine. Hier werden neben den Energieaufwendungen für den Transport der Maschine auch der Energieaufwand der Monteure einbezogen, die im vorliegenden Fall zwischen dem Aufstellungsort und der Niederlassung von Trane-Roggenkamp pendeln. Unberücksichtigt bleibt hierbei, dass im Unternehmen die Monteure und Servicetechniker

die Fahrzeuge mit nach Hause nehmen dürfen. Die Monteure müssen zu Arbeitsbeginn nicht zum Hauptstandort anreisen, wodurch sich der energetische Aufwand senkt.

6) Betrieb der Maschine

Im Betrieb der Maschine versorgt die Maschine die periphere Anlage mit Kälte und setzt dafür Strom ein. Ein Transport fällt hier nicht an. Die Einstellungen der Maschine werden durch das Fachpersonal vorgenommen und im Laufe der späteren Wartungstätigkeit überprüft. Optimal wäre hier eine Fernwartung und eine registrierende Datenerfassung, aus der sich dann Optimierungspotenziale ableiten lassen.

7) Wartung und Instandsetzung

Die Maschinen müssen regelmäßig gewartet werden, ebenfalls müssen auftretende Störungen beseitigt werden. Hier bemüht sich Trane-Roggenkamp darum, die Anlagen mit Fernwartungsmodulen auszustatten. Über solche Systeme kann der Fehler bestenfalls aus der Ferne behoben werden. Grundsätzlich liefert die Fernwartung aber wichtige Informationen über den Fehler, so dass der zuständige Monteur in vielen Fällen bereits die richtigen Ersatzteile mitbringen kann. Hier wird wieder Fahrtstrecke gespart.

8) Abbau der Maschine

Wenn die Maschine abgebaut wird, muss sie in aller Regel wieder gekrant werden, es fällt wieder ein Transport an. Als Ziel des Abbaus wird die Niederlassung der Fa. Trane-Roggenkamp angesetzt. Mögliche Entsorger sind in einer vergleichbaren Entfernung angesiedelt, so dass das Ergebnis der Lebenswegbetrachtung nicht wesentlich beeinflusst werden wird.

9) Verwertung

Hier gibt es zwei Möglichkeiten, die in die Betrachtung einfließen. Das eine ist die Demontage und Entsorgung der Maschine und ihrer Bestandteile. Eine zweite Betrachtung wäre der – auch heute schon praktizierte – Einsatz der gebrauchten Maschine als Mietkältemaschine. Die Maschinen werden hierfür wieder überholt und dann an Kunden vermietet. So können Anlagendefekte kompensiert werden oder Umbauzeiten überbrückt werden. Hierdurch wird die Ressourceneffizienz gesteigert.

Bei einer Entsorgung fließen die wesentlichen Emissionsverursacher, die Metalle, zurück in den Wertstoffkreislauf.

3.1 Darstellung der Daten

3.1.1 Grunddaten

Die folgenden Daten werden der Analyse zu Grunde gelegt. Weitere Daten sind in den Tabellen zu den einzelnen Schritten enthalten (s. Kap. 4.1.2 ff). Die nachstehende Tabelle enthält die ermittelten Entfernungswerte, sowie Servicehäufigkeit und die angesetzte Lebensdauer der Maschine.

Tabelle 2. Grunddaten

Grunddaten		
Position	Wert	Einheit
Anlagenlebensdauer	15	Jahre
Entfernung zu Hersteller	511	km
Fahrtstrecke Service (Hin-+Rückweg)	42	km
Serviceeinsätze pro Jahr	4	Stück

Die nächste Tabelle zeigt die zugrunde gelegten Emissionsfaktoren.

Tabelle 3: Verwendete Emissionsfaktoren

Verwendete Emissionsfaktoren			
Name	CO ₂ Faktor	Einheit	Datenquelle
Schmieröl	0,818	t _{CO2} /t	Probas
Wasser	0,000402	t _{CO2} /t	Probas
R134a	2,13	t _{CO2} /t	Probas
Stahl	1,91	t _{CO2} /t	Probas
Rohrkupfer	2,38	t _{CO2} /t	Probas
Elektrokupfer	4,2	t _{CO2} /t	Probas
Glasfaserverstärkter Kunststoff	8,82	t _{CO2} /t	Probas
Metallmix	4,56	t _{CO2} /t	Probas
Polypropylen	0,43	t _{CO2} /t	Fraunhofer ISI
Polyamide	0,16	t _{CO2} /t	bregau olt GmbH
Aluminium	5,4	t _{CO2} /t	Probas
Lackierung	1,51	t _{CO2} /t	BVT Lacke
Transport LKW	0,568	kg _{CO2} /km	Probas
Transport Servicefahrzeug	0,215	kg _{CO2} /km	VW
Deutscher Strommix 2020	0,366	kg _{CO2} /kWh	UBA

Mit diesen Tabellen werden die wesentlichen Grundlagen für die nachfolgenden Abschätzungen beschrieben.

3.1.2 Schritt 1 bis 3, Rohstoff und Vorprodukte Herstellung

Die Schritte 1 bis 3 werden zusammengefasst, da der Vorfertigungsprozess sehr komplex und im Detail nicht über die gesamte Lieferkette bekannt ist. Die verwendeten Daten wurden möglichst so ausgewählt, dass sie mit Vorprozessen dem Ergebnis von Schritt 3 entsprechen.

Die Gewichtsdaten zu den einzelnen Inhaltsstoffen der Maschine wurden auf Basis der vorliegenden Dokumentation abgeschätzt. Die nachstehende Tabelle stellt die auf dieser Basis ermittelten Daten dar.

Tabelle 4: Kenngrößen der Maschine

Berechnung Grunddaten			
Position	Gewicht*	Einheit	Werkstoff
Betriebsgewicht	8590	kg	
Ölgewicht	37,6	kg	Schmieröl
Verdampferwassermenge	187	kg	Wasser
Verflüssigerwassermenge	350	kg	Wasser
Kältemittel	456	kg	R134a
Maschinengewicht trocken	7559	kg	
Gewicht Verflüssiger Zylinder	653	kg	Stahl
Gewicht Verdampfer Zylinder	653	kg	Stahl
Gewicht Verflüssiger Rohrbündel	821	kg	Kupfer
Gewicht Verdampfer Rohrbündel	821	kg	Kupfer
Rahmen/Schrauben/Halter	1600	kg	Stahl
Gewicht Verdichter	1650	kg	Stahl
Gewicht Verrohrung	400	kg	Kupfer
Gewicht Ölfilter	100	kg	Stahl
Gewicht Schaltschrank	41	kg	GFK
Frequenzumrichter Umrichter 1	150	kg	Metallmix
Frequenzumrichter Umrichter 2	150	kg	Metallmix
Verkabelung	100	kg	Kupfer
Kunststoffe Isolation	20	kg	PP
Kunststoffe Elektronik und allgemein	100	kg	Polyamide
Verschiedene Bauteile Aluminium	300	kg	Aluminium
Summe	7559	kg	
*geschätzt			

Gut zu erkennen ist bereits hier, dass die Metalle den größten Anteil an den verbauten Werkstoffen spielen. Die nächste Tabelle zeigt die Berechnung für die Ermittlung der CO₂ Mengen auf Basis der ermittelten CO₂-Faktoren für die Schritte 1 bis 3:

Tabelle 5: Berechnung der Emissionen Maschine, Schritte 1-3

Berechnung CO ₂ Emission				
	Gewicht*	CO ₂ Faktor	Emission	Anteil
Einheit	kg	t/t	kg CO ₂	
Ölgewicht	37,6	0,818	30,76	0,17
Verdampferwassermenge	187	0,000402	0,08	0,00
Verflüssigerwassermenge	350	0,000402	0,14	0,00
Kältemittel	456	2,13	971,48	5,24
Flüssigkeiten Summe			1.002,45	
Maschinengewicht trocken		kg		
Gewicht Verflüssiger Zylinder	653	1,91	1.247,17	6,72
Gewicht Verdampfer Zylinder	653	1,91	1.247,17	6,72
Gewicht Verflüssiger Rohrbündel	821	2,38	1.954,47	10,54
Gewicht Verdampfer Rohrbündel	821	2,38	1.954,47	10,54
Rahmen/Schrauben/Halter	1600	1,91	3.056,00	16,47
Gewicht Verdichter	1650	1,91	3.151,50	16,99
Gewicht Verrohrung	400	2,38	952,00	5,13
Gewicht Ölfilter	100	1,91	191,00	1,03
Gewicht Schaltschrank	41	8,82	361,62	1,95
Frequenzumrichter Umrichter 1	150	4,56	684,00	3,69
Frequenzumrichter Umrichter 2	150	4,56	684,00	3,69
Verkabelung	100	4,2	420,00	2,26
Kunststoffe Isolation	20	0,43	8,60	0,05
Kunststoffe Elektronik und allgemein	100	0,16	16,00	0,09
Verschiedene Bauteile Aluminium	300	5,4	1.620,00	8,73
Feste Bestandteile Summe			17.548,00	100,00
Summe gesamt			18.550,45	

Wertet man diese Tabelle nach der Paretomethode aus, ergeben sich die in der folgenden Tabelle dargestellten Daten.

Tabelle 6: Gewichtung der Werkstoffe

Gewichtung der Werkstoffe		
	%	Summe in %
Stahl	47,94	47,94
Kupfer	28,47	76,41
Aluminium	8,73	85,14
Metallmix	7,37	92,51
Kältemittel	5,24	97,75
GFK	1,95	99,70
Öl	0,17	99,87
Kunststoffe Elektronik und allgemein	0,09	99,95
Kunststoffe Isolation	0,05	100,00
Wasser	0,00	100,00

Damit wird eindrücklich deutlich, dass die Emissionen in den vorgelagerten Lebensphasen maßgeblich durch die verwendeten Metalle bestimmt werden. Später könnte ggfs. geprüft werden, ob sich hier Möglichkeiten im Sinne der Strategien 1 (Werkstoffauswahl) oder 2 (Leichtbauweise) ergeben könnten.

3.1.3 Schritt 4, Herstellung

Für das Herstellungswerk im französischen Épinal liegen keine Daten vor, aus denen man spezifische Werte pro Maschine bilden könnte. Zudem ist in Frankreich der Anteil an Atomstrom mit 71 % sehr hoch, was zu einem anderen Emissionsfaktor als in Deutschland führt. Aus diesem Grund wurde ein Top Down Ansatz auf Basis von Daten aus Deutschland des Umweltbundesamts (UBA) gewählt. Hierbei wurde das Verhältnis des Energieeinsatzes bei der Metallherstellung zum Maschinenbau der nachstehenden Grafik entnommen.

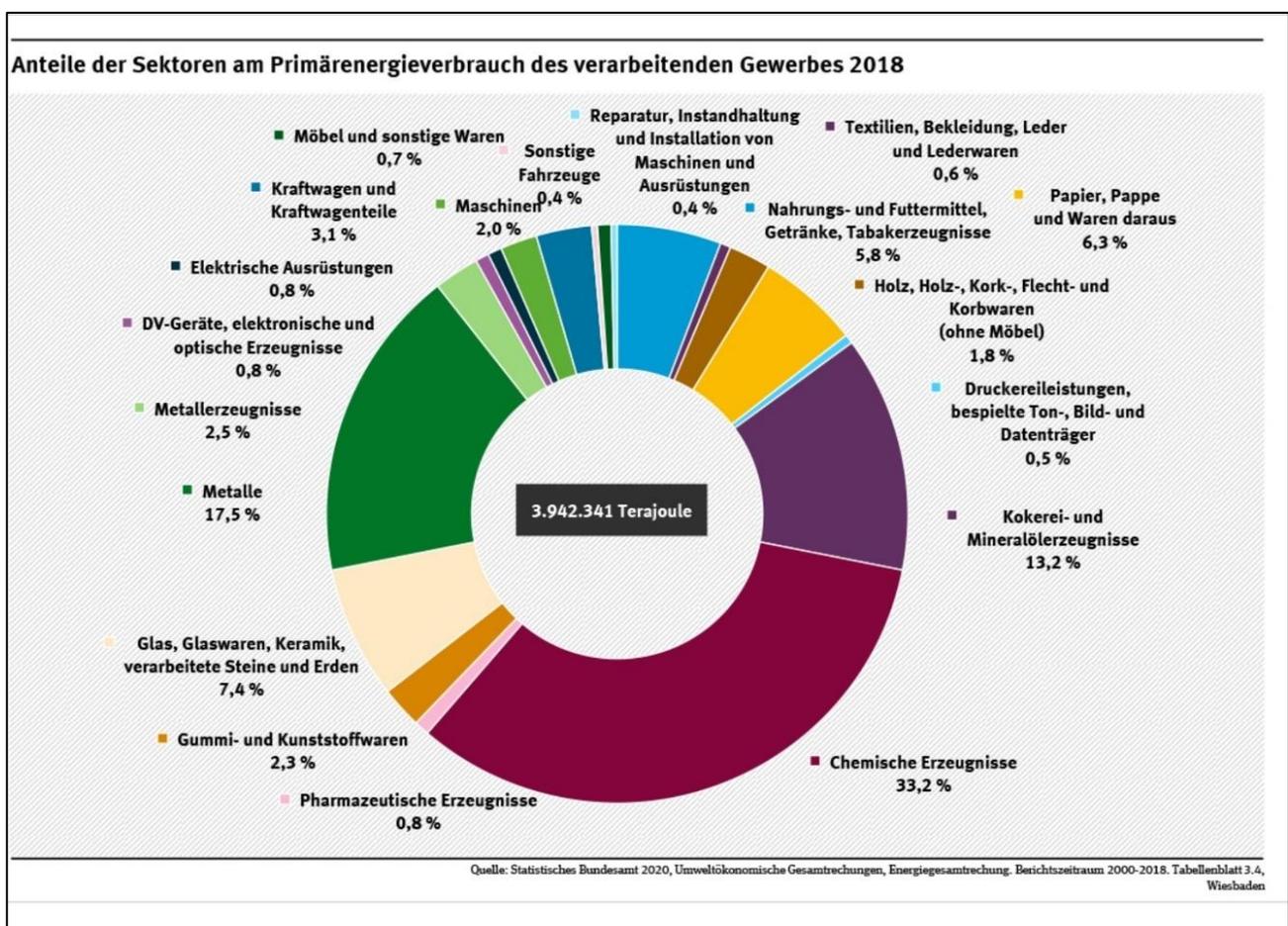


Abbildung 7: Energieverbrauch nach Sektoren

Mit dieser Hilfsgröße wurden dann die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Berechnungen durchgeführt.

Tabelle 7: Emissionen Fertigung

Abschätzung Anteil Emissionen im Herstellerwerk		
Position	Wert	Einheit
CO ₂ Emission Metalle Kältemaschine	16.970,78	kg
Energieverbrauch Maschinen	2	%
Energieverbrauch Metallherstellung	17,5	%
Verhältnis	0,11	
Ergebnis	1.939,52	kg_{CO2}

Deutlich zu erkennen ist, dass die Emissionen deutlich geringer als im vorgelagerten Schritt sind.

3.1.4 Schritt 5, Montage und Inbetriebnahme

Für die Beurteilung der Montage wurden verschiedene Aktivitäten zusammengefasst. Eventuelle Beheizung des Aufstellraums, möglicherweise nötige Energie für Schweißarbeiten und dergleichen bleiben unberücksichtigt. Die nachstehende Tabelle zeigt die ermittelten Ergebnisse

Tabelle 8: Emissionen Transport und Montage

Abschätzung Emissionen Montage		
Position	Wert	Einheit
Transportentfernung Herstellwerk (LKW)	511	km
Montagefahrten Anzahl (Servicefahrzeug)	20	Stück
Entfernung Montage (Hin/Zurück)	42	km
Gesamt Montage	840	km
Kranstunde	3	Stück
Fahrtstreckenäquivalent	100	km
Gesamt Kran	300	km
Summe LKW	811	km
Summe Servicefahrzeug	840	km
EF Transport LKW	0,568	kg _{CO2} /km
EF Transport Servicefahrzeug	0,215	kg _{CO2} /km
Summe LKW	460,65	kg_{CO2}
Summe Servicefahrzeug	180,60	kg_{CO2}
Gesamt	641,25	kg_{CO2}

Damit wird deutlich, dass die Auswirkungen der Montage deutlich geringer als die Auswirkung von Schritt 1 bis 3 sind.

3.1.5 Schritt 6, Stromverbrauch beim Betrieb der Kältemaschine

Für Schritt 6 liegen zur Ermittlung der CO₂ Menge echte Betriebsdaten auf Basis von Stunden vor. Hier kommt jetzt als Faktor die Lebensdauer der Anlage hinzu, während die vorgenannten Schritte

immer nur singular zu betrachten waren. Die nachstehende Tabelle zeigt die Berechnungsergebnisse auf Basis eines Betriebs im deutschen Strommix.

Tabelle 9: Emissionen Betrieb

Abschätzung Emissionen Betrieb		
Position	Wert	Einheit
Energieeinsatz aus Zählerwerten pro Jahr	383.959,50	kWh
Spezifischer Emissionsfaktor	0,366	kg _{CO2} /kWh
Summe CO₂ Emission pro Jahr	140.529,18	kg _{CO2}
Anlagenlebensdauer	15,00	Jahre
Summe CO₂ Emission Lebensdauer	2.107.937,66	kg _{CO2}
Summe CO₂ Emission Lebensdauer	2.107,94	t _{CO2}

Der Wert übersteigt bereits in einer jährlichen Perspektive deutlich den Wert aller vorherigen Berechnungen. Bezieht man die Lebensdauer der Maschine ein, wird die Bedeutung eines energieeffizienten Einsatzes besonders deutlich

3.1.6 Schritt 7, Service und Wartung

Auch in diesem Schritt spielt die Lebensdauer der Maschine eine Rolle, aber erheblich weniger signifikant als bei Schritt 6. Die nachstehende Tabelle zeigt die Ergebnisse. Da der Ersatzteileinsatz abhängig von den Umgebungs- und Betriebsbedingungen ist, wäre eine pauschale Abschätzung der Emissionen hier nicht sinnvoll.

Tabelle 10: Emissionen Service

Abschätzung Emissionen Service		
Position	Wert	Einheit
Montagefahrten Anzahl (Servicefahrzeug) pro Jahr	4	Stück
Entfernung Montage (Hin/Zurück)	42	km
Jahre Betreuung	15	Jahre
Gesamt Service	2.520	km
EF Transport Servicefahrzeug	0,215	kg _{CO2} /km
Summe Servicefahrzeug	541,80	kg _{CO2}

Damit wird auch deutlich, dass eine Verringerung von Servicefahrten aufgrund von Fernwartung einen berechenbaren Effekt hat, dieser aber im Verhältnis zum elektrischen Energieverbrauch der Maschine keine Rolle spielt. Der Vorteile einer Fernwartung ist daher eher in einer konsequenten optimalen Fahrweise der Anlage zu sehen.

3.1.7 Schritt 8, Demontage

Am Ende der Lebensdauer wird die Maschine demontiert. Eine Neumontage wird hier nicht berücksichtigt, da die Emissionen der neuen Maschine zuzuordnen wären. Die Tabelle zeigt die Ergebnisse der Berechnungen.

Tabelle 11: Emissionen Demontage

Abschätzung Emissionen Demontage		
Position	Wert	Einheit
Transportentfernung Entsorgung (LKW)	25	km
Montagefahrten Anzahl (Servicefahrzeug)	10	Stück
Entfernung Montage (Hin/Zurück)	42	km
Gesamt Montage	420	km
Kranstunde	3	Stück
Fahrtstreckenäquivalent	100	km
Gesamt Kran	300	km
Summe LKW	325	km
Summe Servicefahrzeug	420	km
EF Transport LKW	0,568	kg _{CO2} /km
EF Transport Servicefahrzeug	0,215	kg _{CO2} /km
Summe LKW	184,60	kg _{CO2}
Summe Servicefahrzeug	90,30	kg _{CO2}
Gesamt	274,90	kg _{CO2}

Wie zu erwarten war, liegen die Emissionen unter denen der Montage und Inbetriebnahme.

3.1.8 Schritt 9, Entsorgung

Final muss die Kältemaschine dann entsorgt werden. Hierbei gibt es zwei Ansätze, die Verwendung als mobiles Gerät nach einer technischen Überholung oder die Entsorgung.

Um im ersten Ansatz zu einer Bewertung kommen zu können, müssten weitere, heute noch teilweise unbekannt Daten erhoben werden. Beispiele dafür sind durchschnittliche Mietdauer, Energieverbrauch vergleichbarer neuer Anlagen, Emissionsänderungen im Transport durch die Änderungen im Bereich der Mobilität.

Für den zweiten Aspekt wurde davon ausgegangen, dass zumindest die Metalle komplett recycelt werden. Diese Nutzung des Schrotts senkt dann den Energieeinsatz für eine weitere Nutzung signifikant, der Aufwand für die Entsorgung wurde aus der Einsparung zwischen Nutzung des Schrotts und Herstellung neuer Materialien angesetzt. Alle Nichtmetalle werden entsorgt, der angesetzte Wert dafür entspricht dem Einsatz bei der Herstellung.

Die Entsorgung des Kältemittels muss gesondert betrachtet werden, dieses darf aufgrund seines hohen GWP Potenzials von 1.430 nicht in die Umwelt gelangen. Dies entspräche im vorliegenden

Fall mit einer Menge von 456 kg R134a einer Emission von 652 t CO_{2eq}! Welche Mengen CO₂ bei einer fachgerechten Vernichtung anfallen, kann derzeit nicht ermittelt werden.

Die nachstehende Tabelle zeigt die Berechnungsergebnisse.

Tabelle 12: Emissionen bei der Verwertung, Schritt 9

Abschätzung Emissionen Entsorgung		
Position	Wert	Einheit
CO ₂ Emissionen Neuherstellung Metalle	16.970,78	kg _{CO2}
Einsparung	81,40	%
Rest CO₂ Metalle	3.156,57	kg_{CO2}
CO₂ Reststoffe (Ansatz mit Neuwert)	1.579,67	kg_{CO2}
Gesamt	4.736,23	kg_{CO2}

3.1.9 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Berechnungen im Überblick zeigt die nachstehenden Tabelle.

Tabelle 13: Summe der CO₂-Emissionen

Ermittlung CO₂ Emissionen Summen		
Bezeichnung	Wert	Einheit
Schritte 1-3	18.550,45	kg _{CO2}
Schritt 4	1.939,52	kg _{CO2}
Schritt 5	641,25	kg _{CO2}
Schritt 6	2.107.937,66	kg _{CO2}
Schritt 7	541,80	kg _{CO2}
Schritt 8	274,90	kg _{CO2}
Schritt 9	4.736,23	kg _{CO2}
Summe	2.134.621,81	kg_{CO2}

Der Energieeinsatz während der Betriebsdauer hat sichtbar die absolut höchste Auswirkung auf die Emissionen. Noch deutlicher ist das in der nachstehenden Tabelle zu erkennen.

Tabelle 14: relative Verteilung der CO₂-Emissionen

Ermittlung CO ₂ Emissionen Anteile in %		
Bezeichnung	Wert	Einheit
Schritte 1-3	0,87	%
Schritt 4	0,09	%
Schritt 5	0,03	%
Schritt 6	98,75	%
Schritt 7	0,03	%
Schritt 8	0,01	%
Schritt 9	0,22	%
Summe	100,00	%

Auch gut zu erkennen ist, dass ein möglicher Fehler bei der Bestimmung der Emissionen bei den Schritten 1 bis 4 erst die festgesetzte Schwelle von 10 % überschreitet, wenn der Fehler im Bereich von 900 % liegen würde. Aus diesem Grund kann im Weiteren auf eine zeitaufwändige Variation der einzelnen Materialmengen oder einer genaueren Spezifizierung der Emissionsfaktoren verzichtet werden.

Dieses Ergebnis der LCA Betrachtung hat damit die Grundlagen für eine weitere Feinanalyse der Einflussmöglichkeiten geliefert.

Diese liegen eindeutig im Bereich der energieeffizienten Installation und der Optimierung der Regelung der Anlage im Verbund mit den peripheren Systemen beim Anlagennutzer.

3.1.10 Handling Grobanalyse

Bei der Durchführung der Analyse wurde deutlich, dass eine Vielzahl von Schwierigkeiten und Hemmnissen für die Durchführung einer solchen Analyse bestehen.

Bei der Grobanalyse wurde der „Cradle to Grave“ Ansatz verfolgt. Wenn man das Thema auf einen „Gate to Gate“ Ansatz beschränkt hätte, wären nur die Schritte 5, 7 und 8 zu berücksichtigen gewesen. Dieser Ansatz wäre auch für eine ungeübte Person leichter gewesen.

Die Beschreibung in der VDI 4801 ist aus Sicht des Autors letztendlich nicht ausreichend, um unerfahrene MitarbeiterInnen in einem KMU an das Thema heranzuführen. Diesen Anspruch erhebt die Richtlinie jedoch auch nicht.

Eine, auch überschlägige, Abschätzung eines Energieeinsatzes und der damit verbundenen Emissionen für ein Produkt setzt erhebliche Erfahrung in vergleichbaren Aktivitäten voraus.

Die wesentliche Hürde ist es, sich nicht allzu tief in Details zu verirren, damit die letzte Kommastelle noch stimmt. Man ist stetig versucht, die Aufschlüsselung und Detailtiefe auf ein sehr hohes Maß auszuweiten. Verstärkt wird dieses Gefühl noch, wenn man die Emissionsfaktoren und der Detailreichtum in der verwendeten ProBas Datenbank des Umwelt Bundesamts heranzieht. Gibt

man zum Beispiel den Suchbegriff Stahl ein, so erhält man 431 Einträge. Eine Entscheidung für einen speziellen Faktor setzt eine gewisse Erfahrung und teilweise erweiterte technische Kenntnisse voraus und muss prinzipiell durch mögliche Validierungswerkzeuge und Ansätze einer Überprüfung zugänglich sein. Der Detailgrad der Daten zu den angegebenen Materialien ist sehr groß, und weicht je nach Erfassungsjahr und Datenquelle des Werts in der Feindarstellung ab.

Die Hemmnisse in diesen Bereichen werden in den Abschlussbericht aufgenommen.

4 Feinanalyse

Eine weitergehende Feinanalyse würde voraussetzen, dass jetzt an der betrachteten Maschine weitere Untersuchungen stattfinden würden. *Mit dem derzeitigen Stand der Daten bietet sich als Methode zur weiteren Entwicklung nur eine Lastganganalyse an, die im Folgenden durchgeführt und beschrieben ist.*

Deutlich zu erkennen ist, dass unter den getroffenen Annahmen der Betrieb der Anlage über 98 % der Emissionen verursacht. Mit dieser Erkenntnis wird deutlich, dass eine weitere Detailanalyse in den anderen Bereichen nicht sinnvoll ist.

Diese Analyse entspräche dann einem Energieaudit vor Ort, da die installierte Anlage im Kontext mit der Infrastruktur untersucht werden muss. Dieses Energieaudit musste aber aus Gründen der Pandemie unterbleiben, da sich die betrachtete Anlage in einem Krankenhaus befindet und hier die Kontaktbeschränkungen keine solche Aktion aus Sicht des Kunden gerechtfertigt hätten. So bleibt es für die Feinanalyse nur, die typischen Potenziale an Kälteanlagen zu beschreiben und deren Wirkung abzuschätzen. Eine Verallgemeinerung ist aber immer unter dem Aspekt der sehr unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen zu bewerten. Änderungen im Gesamtsystem einer komplexen Kälteanlage erfordern mitunter hohe Investitionen, deren ROI nicht immer wirtschaftlich ist. Auch ist zu beachten, dass eine Maschine dieses Typs in ein altes Gesamtsystem integriert werden kann oder ein neues System parallel zur Errichtung der Maschine aufgebaut wird. Auch hier ist es nicht einfach, die Einsparmöglichkeiten zu identifizieren.

5 Maßnahmenfelder

Für die Feinanalyse sind aus der Grobanalyse die wichtigsten Ansätze abzuleiten, als da wären:

5.1 Strategiefeld 1: Materialauswahl

Die Materialauswahl kann nur in Diskussionen mit dem eigentlichen Hersteller der Maschine angepasst werden, hier ist die Einflussnahmemöglichkeit des KMU sehr begrenzt.

5.2 Strategiefeld 2: Leichtbauweise

Die Thematik entspricht der Thematik aus Punkt 6.1 .

5.3 Strategiefeld 6: Nutzungsgerechte Gestaltung

Der Hersteller verfolgt in seinen Strategien kontinuierlich das Ziel, gemeinsam mit den Unterlieferanten und den Kunden die Energieeffizienz der Anlagen zu verbessern.

Dementsprechend werden schon vom Herstellerwerk viele Maßnahmen für die Nutzungsgerechte Gestaltung der Anlagen durchgeführt. Die Rückkopplung des KMU zum Herstellerwerk über Schäden und Verbesserungspotenziale ist ein etablierter Prozess, dementsprechend gibt es hier keinen akuten Verbesserungsansatz.

5.4 Strategiefeld 8: Produktlebensdauer

Hier ist Trane Roggenkamp bereits sehr aktiv, indem es ausgetauschte Geräte übernimmt und einen Maschinenpark zur Mietkälteerzeugung aufgebaut hat. Hierdurch findet die Verlängerung der Lebensdauer bereits statt.

5.5 Strategiefeld 29: Energieeffiziente Gebäudestruktur

Hier lassen sich für einen ressourceneffizienteren Einsatz der Maschine einige Maßnahmen ableiten. Das hat Trane Roggenkamp realisiert und mit seiner Engineeringabteilung hier eine Professionalisierung in das betriebliche Geschehen integriert.

5.6 Strategiefeld 26: Vermindern des Energieverbrauchs

Hier bieten sich für den vorliegenden Fall die größten Möglichkeiten. Der Aufbau eines Fernwartungssystems, ein auf die Anlage zugeschnittene Peripherie und ein modernes, ständig überwachtetes Regelungskonzept bieten hier die größten Potenziale. Zu nennen sind zum Beispiel die Integration einer freien Kühlung, Nutzung von Speichern, Gleitpunktregelungen und selbstoptimierender Regelungen, da diese den Energieeinsatz signifikant absenken können.

6 Betriebliche Schlussfolgerungen

Aus der Analyse hat sich für das Unternehmen eindeutig ergeben, und in diese Richtung entwickelt sich das Unternehmen bereits seit längerem aktiv, die Themen Anlagenperipherie, Regelungskonzepte und verbundene infrastrukturelle Tätigkeiten zu stärken. Durch Innovationen in diesen Bereichen kann die Ressourceneffizienz der Produkte maßgeblich verbessert werden.

Die LCA Analyse hat für das Unternehmen die Schwerpunkte lohnender Aktivitäten aufgezeigt. Die LCA Analyse war dabei eine Hilfestellung, ist aber insbesondere für die Interaktion mit den Kunden ein wesentliches Element. Ergänzend zu der jetzt bereits durchgeführten Analyse kann die Methodik auf andere Produkte übertragen werden und dem Kunden damit der energetische Benefit anhand von Fakten belegt werden. Insofern ist für die Trane Roggenkamp die Beschäftigung mit der Richtlinie ein wertvoller Impulsgeber.

7 Zusammenfassung

Die durchgeführte Analyse hat die Arbeitsmethode und den Nutzen der Lebensweganalyse an dem Beispiel deutlich gezeigt. Auf Basis der generierten Ergebnisse kann die Aktivität auf die wertschöpfenden und ressourcenschonenden Aktivitäten weiterentwickelt werden.

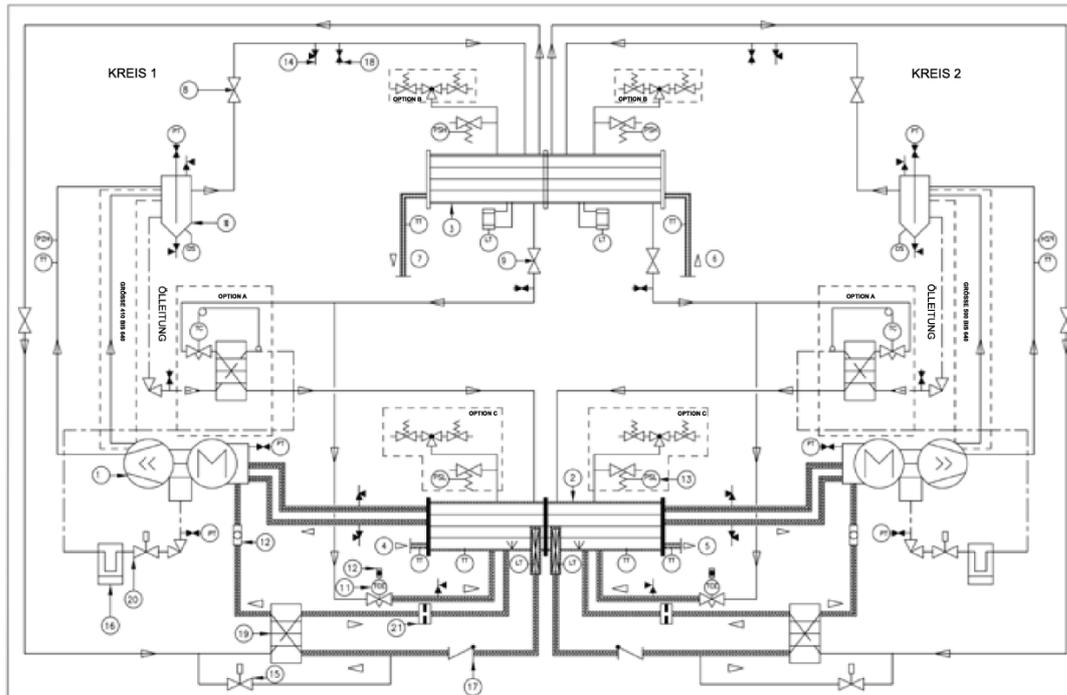
8 Anhang

8.1 Kältemittelfliessschema

Kältemittel-Fließschema

Das Kältemittelflussdiagramm für RTHF und RTWF ist in den mitgelieferten Zeichnungsunterlagen enthalten.

Abbildung 9 – Beispiel eines typischen Kältemittelflussdiagramms für RTHF.



- 1 = Schraubenverdichter
- 2 = Verdampfer
- 3 = Wassergekühlter Verflüssiger
- 4 = Anschluss Kaltwassereintritt
- 5 = Anschluss Kaltwasseraustritt
- 6 = Verflüssigeranschluss Kaltwassereintritt
- 7 = Verflüssigeranschluss Kaltwasseraustritt
- 8 = Entleerungswartungsventil
- 9 = Flüssigkeitsabsperrentil
- 10 = Ölabscheider
- 11 = Elektronisches Expansionsventil
- 12 = Schauglas
- 13 = Entlastungsventil
- 14 = Wartungsventil
- 15 = Magnetventil
- 16 = Ölfilter
- 17 = Rückschlagventil
- 18 = Schraeder-Ventil
- 19 = BPHE-Ölrückführung
- 20 = Haupt-Ölventil
- 21 = Drosselement

	KÄLTEMITTELLEITUNG
	ÖLLEITUNG
	KALT-/WARMWASSERLEITUNG
	ISOLIERUNG

- PT = Druckwandler
- PSH = Hochdruck-Sicherheitsventil
- PSL = Niederdruck-Sicherheitsventil
- PZH = Hochdruckschalter
- TT = Temperaturfühler
- TCE = Elektronisches Expansionsventil
- TC = Thermostatisches Expansionsventil
- OS = Optischer Sensor
- LT = Flüssigkeitsstandsensoren
- Option A = Ersatz-Ölkühler
- Option B = Einzelnes oder doppeltes Überdruckventil am Verflüssiger
- Option C = Einzelnes oder doppeltes Überdruckventil am Verdampfer

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Technische Daten der Maschine	7
Tabelle 2. Grunddaten.....	13
Tabelle 3: Verwendete Emissionsfaktoren	13
Tabelle 4: Kenngrößen der Maschine	14
Tabelle 5: Berechnung der Emissionen Maschine, Schritte 1-3	15
Tabelle 6: Gewichtung der Werkstoffe.....	15
Tabelle 7: Emissionen Fertigung.....	17
Tabelle 8: Emissionen Transport und Montage.....	17
Tabelle 9: Emissionen Betrieb	18
Tabelle 10: Emissionen Service.....	18
Tabelle 11: Emissionen Demontage	19
Tabelle 12: Emissionen bei der Verwertung, Schritt 9	20
Tabelle 13: Summe der CO ₂ -Emissionen	20
Tabelle 14: relative Verteilung der CO ₂ -Emissionen.....	21

8.3 Abbildungen

Abbildung 1: Untersuchungsansätze der VDI 4801	4
Abbildung 2: Lebenswegphasen	5
Abbildung 3: Kältemaschine RTHF 460.....	6
Abbildung 4: Schaltbild laut Herstellerbeschreibung	8
Abbildung 5: Analyseschritte	10
Abbildung 6: Herstellwerk der Maschine	11
Abbildung 7: Energieverbrauch nach Sektoren	16

8.4 Literaturquellen

Umwelt Bundesamt (2022). ProBas., URL:

<https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>, 15.01.2022.