

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr.: IGF 19765 N

## Thema

Entwicklung einer Bewertungsmethode zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Klebanwendungen - Klebfuß

## Berichtszeitraum

01.01.2018 – 31.12.2020

## Forschungsvereinigung

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

## Forschungseinrichtungen

1: Universität Kassel, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff)

2: Universität Kassel, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse (upp)

Kassel, 31.12.2020

Ort, Datum

Nils Ratsch, tff

Kassel, 31.12.2020

Ort, Datum

Felix Ebersold, upp

## Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben „Entwicklung einer Bewertungsmethode zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Klebanwendungen, IGF-Projekt Nr. 19765 N, der Forschungsvereinigung DECHEMA wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



# INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>Thema</b> .....	1
<b>Berichtszeitraum</b> .....	1
<b>Forschungsvereinigung</b> .....	1
<b>Forschungseinrichtungen</b> .....	1
<b>Förderhinweis</b> .....	2
Inhaltsverzeichnis .....	3
1. Zusammenfassung .....	6
1.1. Zielsetzung .....	6
1.2. Ergebnisse .....	7
1.2.1. Gegenüberstellung der Ergebnisse mit der Zielsetzung des Forschungsantrages 11	
1.3. Ergebnistransfer .....	13
1.4. Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzeptes .....	14
1.5. Verwendung der Zuwendung .....	16
1.6. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittelständische Unternehmen .....	19
2. Stand der Technik .....	21
2.1. Grundlagen der Klebtechnik .....	21
2.1.1. Begriffe und Mechanismen .....	21
2.1.2. Fertigungsverfahren Kleben: DIN 8593-8 .....	21
2.1.3. Klebtechnische Begriffe .....	22
2.2. Grundlagen der Bilanzierung von THG-Emissionen .....	25
2.3. Grundlagen des Messens von Stoff- und Energieströmen .....	30
3. Materialien und Methoden .....	33
3.1. Einteilung der Klebstoffsysteme .....	33

3.2.	Erarbeitung der Prozessketten .....	36
3.2.1.	Oberflächenbehandlung .....	36
3.2.2.	Kleben.....	41
3.3.	PCF von Klebstoffsystemen .....	44
3.4.	Erfassung von Sekundärdaten durch Datenblätter .....	50
3.5.	Bilanzierung manueller Prozesse .....	55
3.6.	Emissionsfaktoren .....	58
4.	Ergebnisse Carbon Footprints .....	60
4.1.	Klebstoffsysteme .....	60
4.2.	Laboranlagen .....	61
4.3.	Industrieprozesse.....	64
4.3.1.	Industriebesuch Uzin Utz AG, Ulm .....	64
4.3.1.	Industriebesuch 1 Henkel AG & Co. KGaA, Bopfingen.....	71
4.3.2.	Industriebesuch 2 Henkel AG & Co. KGaA, Bopfingen.....	74
4.3.3.	Industriebesuch Kohlstädt GmbH, Vlotho .....	78
4.3.4.	Hypothetischer Prozess aus den generierten Daten.....	80
4.4.	PCFs aus Sekundärdaten .....	80
4.4.1.	Sachbilanzierung.....	81
4.4.2.	Wirkbilanzierung.....	87
4.5.	Gesamtübersicht .....	93
5.	Erstellung der Datenbank .....	96
5.1.	Einführung.....	96
5.2.	Datenbankelemente .....	97
5.2.1.	Tabellen .....	97
5.2.2.	Formulare.....	100
5.2.3.	Berichte.....	101
5.3.	Leitfaden zur Anwendung.....	101
5.3.1.	Benutzeroberfläche .....	101
5.3.2.	Dateneingabe.....	103
5.3.3.	Bestimmung des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks .....	106
6.	Zusammenfassung .....	112
6.1.	Zusammenfassung.....	112
6.2.	Fazit .....	115

7.	Danksagung .....	116
8.	Abbildungsverzeichnis .....	117
9.	Tabellenverzeichnis .....	120
10.	Literatur .....	121

# 1. ZUSAMMENFASSUNG

---

## 1.1. Zielsetzung

Das grundlegende Ziel des vorliegenden Projektes besteht darin, Anwendern und Anbietern der Klebtechnik ein methodisches Handbuch bzw. einen Baukasten zur Verfügung zu stellen, der eine Abschätzung und damit eine Vergleichbarkeit des Klebprozesses mit herkömmlichen Fügeprozessen im Hinblick auf das Global Warming Potential (GWP) liefern kann. Die Bewertung der Klebprozesse soll modularisiert erfolgen, damit der Vielzahl an möglichen Klebanwendungen Rechnung getragen werden kann. Der modularisierte Aufbau bietet dabei die maximal mögliche Transparenz bei der Bestimmung der Kennwerte. Wann immer sich Unschärfefaktoren in der Berechnung aufgrund mangelnder Datenlage ergeben, wird explizit darauf hingewiesen und – sofern möglich – der entstehende Fehler abgeschätzt. Des Weiteren bietet das vorliegende Projekt die Möglichkeit, Klebprozesse ökologisch, d.h. im Hinblick auf das Treibhauspotenzial, auf Basis anerkannter Kennzahlen zu bewerten. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die im Bereich der Klebtechnik beratend und projektierend tätig sind, fehlt oft die finanzielle Kapazität, Product Carbon Footprints (PCF) projekt- bzw. prozessbezogen aufzustellen. Durch ein modular aufgebautes Konzept, das eine Abschätzung in Abhängigkeit relevanter Prozess- und Klebstoffkennwerte, wie zum Beispiel Auftragsart, Härtung, Klebstoffart usw., ermöglicht, sind auch KMU in der Lage das GWP, einer Klebverbindung zu erarbeiten.

Die Ergebnisse des vorliegenden Projektes, insbesondere die Datenbank zur Sicherung der Ergebnisse, können direkt nach Fertigstellung in kleinen und mittleren Unternehmen, vornehmlich Anwendern der Klebtechnik, eingesetzt werden. Darüber hinaus wird den Klebstoffherstellern die Möglichkeit gegeben, auf Basis der Ergebnisse beratend in treibhausgas-bezogenen Fragestellungen zu konkreten Fügeaufgaben tätig zu werden. Diese Betrachtung von Klebprozessen kann dazu beitragen, herkömmliche Fügeverfahren in den Bezug zur Klebtechnik zu setzen und Vorurteile hinsichtlich des GWP der Klebstoffherstellung auszuräumen.

Der langfristige wirtschaftliche Vorteil für KMU besteht vor allem darin, dass sie mit der strukturiert aufbereiteten Darstellung der Vorgehensweise zur Ermittlung energiebezogener PCF selbst GWP-Daten erheben können, mit denen sie sich von Mitbewerbern abgrenzen, aber auch im Vergleich zu anderen Fügemethoden die GWP-Vorteile der klebtechnischen Fertigung aufzeigen können. So können Prozesse bewertet werden, deren Bewertung sonst

sehr zeit- und kostenintensiv ist und für viele KMU in keinem Kosten-Nutzen-Verhältnis steht. Durch den modularen Aufbau ist es möglich, den gesamten Lebenszyklus eines Klebstoffes und der zugehörigen Klebungen mit einem oder mehreren Kennwerten zu quantifizieren und mit herkömmlichen Fügeverfahren zu vergleichen. Stehen für das konkurrierende Fügeverfahren nur eingeschränkte Informationen, zum Energieverbrauch zur Verfügung, kann für eine Vergleichbarkeit auf die in den Einzelmodulen ermittelten Kennwerte zurückgegriffen werden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass der Einfluss der einzelnen Prozessschritte des Klebprozesses von denen des konkurrierenden Fügeverfahrens deutlich abweicht, obwohl das Ergebnis bei ganzheitlicher Betrachtung ähnlich ausfallen würde. Für Vergleiche sollten daher stets die methodischen Überlegungen, die zur Wahl der bewerteten Einzelmodule geführt haben, angegeben werden.

Die Ergebnisse erlauben den Anwendern der Klebtechnik den THG-bezogenen Vergleich von Klebstoffsystemen auf verschiedenen chemischen Basen und bietet so neben den funktionellen Anforderungen an die Klebverbindung ein weiteres Entscheidungskriterium für oder gegen ein bestimmtes Klebstoffsystem. Ein Vergleich chemisch ähnlicher Klebstoffsysteme unterschiedlicher Hersteller soll nicht Gegenstand der Bewertungsmatrix sein. Insbesondere in Anbetracht des steigenden Drucks auf Unternehmen, den Ausstoß von CO<sub>2</sub> zu verringern und energetisch effiziente Prozesse einzusetzen, wird dieser ökologische Vergleich bei hohen Stückzahlen und der grundsätzlichen Auswahl eines Klebstoffsystems als wesentlicher Beitrag zu den Klimazielen der Bundesregierung und der Europäischen Union angesehen.

## 1.2. Ergebnisse

### AP1 Einteilung der Klebstoffe in Klassen (upp, tff)

**Ziel:** Ziel des Arbeitspaketes 1 ist es, eine Einteilung der Klebstoffe in Klassen vorzunehmen, die durch Gemeinsamkeiten in der Prozessführung gekennzeichnet sind. Die so gewonnene Einteilung bildet den Ausgangspunkt für Arbeitspaket 2, in dem den Klebstoffklassen Modellprozesse zugeordnet werden.

**Inhalt:** Die Summe der Treibhausgasemissionen des gesamten Lebenszyklus eines Produktes (von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Entsorgung bzw. zur Weiterverwertung) wird nach DIN EN ISO 14067 (2019) als Product Carbon Footprint (PCF) beschrieben. Um eine nachvollziehbare und transparente Bewertung und sinnvolle Zusammenfassung der Klebprozesse hinsichtlich dieser Methodik vornehmen zu können, wurden für den Markt relevante Klebstoffe (bezogen auf die chemische Grundlage oder Abbindemechanismus der Systeme) identifiziert. Anschließend wurden diese nach weiteren Gesichtspunkten unterteilt:

- Ist ein Energieeintrag bei der Anwendung der Klebstoffe notwendig und wenn ja, welche Art von Energie? (Wärme, Strahlung)
- Wo findet im Prozess ein Energieeintrag statt? (Vor oder nach dem Fügen)
- Für welche konkreten Prozessschritte ist der Energieeintrag notwendig? (Fördern, Dosieren, Applizieren, Abdampfen, Vernetzen, Schmelzen)

## AP2 Modellierung von Prozessketten und Identifikation von Prozessmodulen

**Ziel:** Aufbauend auf der Klassifizierung der Klebstoffe aus Arbeitspaket 1 sollen Prozessketten modelliert werden, die möglichen Prozessschritte bei der Verarbeitung von Klebstoffen vollumfänglich verfasst. Für jede Klebstoffklasse wird es bei dieser Betrachtung Prozessschritte geben, die optional auftreten können. Bei der Bewertung der Klebprozesse durch die Anwendung der Datenbank können diese Prozessschritte dann ausgelassen werden.

**Inhalt:** Das Thema Klebtechnische Fertigung wurde hinsichtlich der beiden Einzelaspekte Oberflächenbehandlung und Kleben in zwei voneinander unabhängige Prozessketten unterteilt. Um diese Themenbereiche so genau wie möglich beschreiben bzw. allgemein abbilden zu können, wurde eine weitere Unterteilung in Prozessschritte durchgeführt. Die Prozesskette Oberflächenbehandlung wird so beispielsweise in die Prozessschritte Konditionieren, Reinigen und Oberflächenvorbehandlung untergliedert. Den einzelnen Prozessschritten werden im Anschluss Prozessmodule zugeordnet, die die reale technische Umsetzung des abstrakten Prozessschrittes widerspiegeln. Diese Unterteilung ermöglicht es, für relevante Klebstoffklassen der in AP1 erarbeiteten Übersicht Prozessketten zu modellieren, was als Grundlage für die später im Projekt durchzuführenden messtechnischen Erhebung von Primärdaten anzusehen ist.

## AP3 Bestimmung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks für die Prozessmodule

**Ziel:** Ziel des Arbeitspaketes 3 ist es, den Product Carbon Footprint (PCF) für die in Arbeitspaket 2 definierten Prozessketten je Klebstoffklasse zu erfassen. Arbeitspaket 3 stellt den mit Abstand größten Arbeitsaufwand dar, da der PCF durch tatsächliches Messen der Stoff- und Energieströme ermittelt werden muss. Für die Bestimmung des PCF sind neben den verwendeten Materialien auch die Energiebedarfe von großer Bedeutung. Für den Klebprozess sind hierbei potentiell alle Prozessschritte aus der Prozesskette des Klebens bzw. der Oberflächenbehandlung relevant. Das Auftragen der Klebstoffe erfolgt z.B. elektrisch oder pneumatisch, während das Härten des Klebstoffs durch induktive Anlagen, Ofenstrecken, Infrarotöfen und dergleichen realisiert wird. Über spezifische Faktoren für den verwendeten Energiemix kann der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck anschließend berechnet werden. Die Faktoren werden anerkannten wissenschaftlichen Publikationen und Datenbanken entnommen.

**Inhalt:** Die Wirkkategorie für die Treibhausrelevanz stellt das Global Warming Potential (GWP) dar. Die Referenzsubstanz mit einem GWP-Wert von 1 bildet CO<sub>2</sub>, allerdings besitzen auch andere Substanzen ein Treibhauspotenzial.

Im ersten Projekttreffen wurde deutlich, dass bei den Mitgliedern des PA Unklarheit darüber besteht, welche Phasen im Lebenszyklus eines Klebverbundes welches GWP aufweisen, insbesondere wie groß das Verhältnis des GWP der Klebstoffherstellung (Rohstoffgewinnung, Klebstoffproduktion und -distribution) im Vergleich zur Nutzungsphase ist, wobei diese Nutzungsphase auch die besonders energieintensive Prozesskette Oberflächenbehandlung und das Fügen an sich beinhaltet. Daher wurde im ersten Schritt dieses AP diesbezüglich eine Auswertung durchgeführt. Die verschiedenen Phasen eines PCF für eine Klebung sind in Abbildung 1-1 dargestellt.

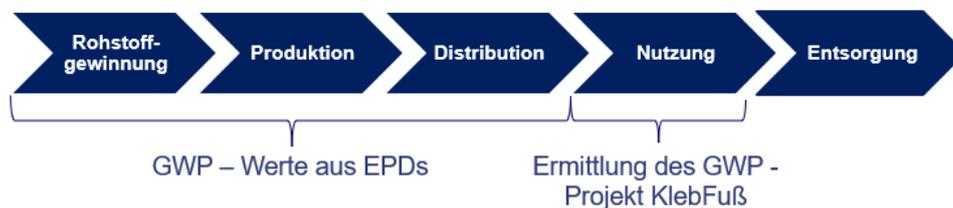


Abbildung 1-1: Phasen eines PCF einer Klebung (in Anlehnung an BMU/BDI 2012)

Die GWP-Daten der Herstellung verschiedener Klebstoffsysteme wurden Environmental Product Declarations (EPD) entnommen. Mittels charakteristischer Klebstoffdichten und Schichtdicken wurde das angegebene GWP [kg CO<sub>2</sub>e/kg Klebstoff] auf eine frei variierbare Klebfläche umgerechnet [kg CO<sub>2</sub>e/Referenzfläche].

Zur Untersuchung des GWP der Nutzungsphase dient ein beispielhafter Fügeprozess, welcher in den Laboren des FG tff durchgeführt wurde. Die generelle Vorgehensweise bei der Erstellung eines PCF ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.



### Firmenakquise

Es wurden proaktiv Kontakte zu Firmen des Klebtechniksektors hergestellt, welche im Rahmen des Vorhabens Leistungsmessungen zu unterschiedlichen Themen ermöglicht haben:

- Henkel AG & Co.KG, Bopfingen: Dispersionsauftrag, Kantenleimen, Flatlamination
- Henkel AG & Co.KG, Düsseldorf: Folienkaschierung
- Uzin-Utz AG, Ulm: Verlegen von Designbelägen und Parkett
- Kohlstädt GmbH, Vlotho: Optical Bonding

Es konnten Messungen mit Fokus auf manuelle Arbeit bei der Uzin-Utz AG in Ulm, zum Dispersionsauftrag und zum Kantenleimen und Flatlaminationprozess bei der Fa. Henkel AG & Co.KG in Bopfingen sowie im Bereich Optical Bonding bei der Firma Kohlstedt GmbH durchgeführt werden.

Weitere Messungen konnten auf Grund der anhaltenden Corona-Pandemie und der Fokussierung der Unternehmen auf Aufrechterhaltung der betrieblichen Leistungsfähigkeit nicht umgesetzt werden. Daher wurde die Ermittlung weiterer PCF durch die Akquise und Auswertung von Datenblättern unterschiedlicher Anlagen diverser Firmen und die Durchführung von Expertengesprächen umgesetzt.

### AP4 Erstellung einer Datenbank

**Ziel:** Ziel des Arbeitspaketes 4 ist es, eine Datenbank mittels Microsoft Access zu erstellen, die eine einfache und transparente Abschätzung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks einer Klebverbindung liefert. Nach der Wahl der Klebstoffklasse kann jedes einzelne Modul entweder als Mittelwert eingebunden werden oder durch den Benutzer zur Steigerung der Genauigkeit mit eigenen Daten ergänzt werden. Hinweise zu den einzelnen Modulen, welche Unschärfe bei Nutzung der Mittelwerte besteht und Hinweise, welche Daten zur Steigerung der Genauigkeit benötigt werden, sind in der Datenbank enthalten. Die Datenbank wird von beiden Forschungsstellen und in enger Kooperation mit dem projektbegleitenden Ausschuss erstellt.

**Inhalt:** Bei der Erstellung der Microsoft Access-Datenbank fanden die GWP-Daten der Klebstoffherstellung sowie unterschiedliche Kriterien hinsichtlich Oberflächenbehandlung und des Fügeprozesses Berücksichtigung. Die Datenbank wurde in Microsoft Access erstellt. Neben grundlegenden SQL-Befehlen wurde bei der Erstellung von der microsoftspezifischen Programmiersprache VBA Gebrauch gemacht werden, um z.B. automatisierte Abfragen oder die Übermittlung von Daten zwischen Formularen zu realisieren. Die Datenbank ermöglicht dem Anwender sowohl Daten eigener Messungen einzupflegen als auch das GWP eigener

Prozessketten bzw. den Product Carbon Footprint eigener Klebungen zu bestimmen. Die Ergebnisse werden in einem Report zusammengefasst.

Die Datenbank liegt als accdb-Datei mit benutzerfreundlich gestalteter Oberfläche vor. Der generelle Aufbau wird in Kapitel 5 verdeutlicht.

#### AP5 Validierung der Bewertungsmethode

**Ziel:** Ziel des Arbeitspaketes 5 ist es, zu zeigen, dass die Bewertungsmethode eine hinreichend genaue Abschätzung des GWP einer Klebverbindung ohne zeit- und kostenintensive Einzelfallbewertungen ermöglicht. Hierzu werden reale Prozesse zunächst mit der erstellten Bewertungsmethode und im Anschluss als vollständige Einzelfallbewertung bewertet und die Ergebnisse kritisch verglichen.

**Inhalt:** Auf Grund der hohen Anzahl und der Spezifität der in der Industrie vorhandenen Prozessmodule ist eine Validierung der Bewertungsmethode nicht möglich. Der PA bestätigt dies und beschließt, dass Arbeitspaket 5 genutzt werden soll, um die Datenlage des Treibhauspotentials für Klebanwendungen zu festigen (siehe Protokoll: Projekttreffen 3 05.02.2020).

Des Weiteren wurde die Datenbank weiter optimiert und soll im Nachgang des Projektes Unternehmen zugänglich gemacht werden, sodass Nutzer Daten eigener Anlagen einpflegen können. Eine zentrale Verwaltung der Datenbank bspw. über den Industrieverband Klebstoffe e.V. wäre wünschenswert und soll im Nachgang des Projektes geklärt werden.

#### AP6 Berichterstellung

**Ziel:** Arbeitspaket 6 beinhaltet im Wesentlichen die Erstellung des Abschlussberichtes sowie die Veröffentlichung der Ergebnisse.

#### **1.2.1. Gegenüberstellung der Ergebnisse mit der Zielsetzung des Forschungsantrages**

AP	Ziele	Ergebnisse	Abweichungen vom Arbeitspaket
1	Einteilung der Klebstoffe nach energetischen Gesichtspunkten	Mit Unterstützung des projektbegleitenden Ausschusses wurden für den Markt relevante Klebstoffe (bezogen auf die chemische	

		Grundlage oder Abbindemechanismus der Systeme) identifiziert. Anschließend wurden diese nach energetischen Gesichtspunkten unterteilt.	
2	Modellierung von Prozessketten und Identifikation von Prozessmodulen	In einem ersten Schritt wurde die klebtechnische Fertigung in 2 Prozessketten unterteilt. Prozesskette 1 bezieht sich auf die Oberflächenbehandlung. Hierzu zählen nicht nur mechanische und chemische Reinigungsverfahren, sondern auch die üblichen Oberflächenvorbehandlungsverfahren, wie z.B. die Plasmavorbehandlung. Die Prozesskette 2 behandelt das Kleben an sich. Hierzu zählen alle nötigen Prozessschritte wie z.B. das Bevorraten, die Klebstoffförderung, die Applikation sowie das Aushärten.	
3	Bestimmung des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Prozessmodule	AP4 wurde entsprechend des Antrages bearbeitet. Es konnten erste Messungen an Laboranlagen durchgeführt werden. Des Weiteren konnten Primärdaten durch Messungen bei bestehenden Prozessketten diverser Projektpartner generiert werden. So konnten aus den EPDs der Klebstoffe und den analysierten Prozessen das GWP dieser Prozesse bestimmt werden	
4	Erstellung einer Datenbank	AP4 wurde entsprechend des Antrages bearbeitet. Die Daten aus den vorhergehenden Arbeitspaketen wurden in die Datenbank eingefügt. Am Ende des Projektes steht eine modularisierte Datenbank zur Berechnung des PCF zur Verfügung.	

5	Validierung der Bewertungsmethode	Aufgrund der hohen Spezifität der Prozesse war dies nicht möglich.	Mit Rücksprache des projektbegleitenden Ausschusses wurde dieses Arbeitspaket genutzt, um weitere Primär- und Sekundärdaten zu generieren und in die Datenbank einfließen zu lassen.
6	Berichterstellung	Während der Projektbearbeitung wurden vier Projekttreffen abgehalten sowie zwei Zwischenberichte von den beiden Forschungsstellen verfasst.	

### 1.3. Ergebnistransfer

Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit:

Maßnahme	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse im Fachausschuss	Vorstellung des Projektes durch Herrn Dr. Onusseit, Technischer Ausschuss des IVK	19.11.2018, Göttingen
		WS 2018/19 WS 2019/20 WS 2020/21
Nutzung der Projektergebnisse in der akademischen Lehre	Vorlesung Klebtechnische Fertigungsverfahren, tff, Universität Kassel	WS 2018/19 WS 2019/20 WS 2020/21
	Vorlesung: Life Cycle Engineering, upp, Universität Kassel	fortlaufend
	Vorlesung Klebtechnische Fertigungsverfahren, tff, Universität Kassel	fortlaufend
Veröffentlichungen	Euroblech 25. Internationale Technologiemesse für Blechbearbeitung	23. – 26.10.2018
	Projektvorstellung tff-Homepage	1. Quartal 2019
Präsentationen auf Fachtagungen	Projektvorstellung auf dem 20. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, 12. - 13. März 2020, Würzburg	März 2020

Weiterbildung/Transfer der Projektergebnisse in die Industrie, auch über DEHEMA- und DVS-Fachveranstaltungen und über Kurzberichte terbeiträge	Messkampagne bei der Uzin Utz AG, Ulm	08.05.2019
	Messkampagne bei Henkel AG & Co.KG, Bopfingen	17.12.2019
		12.03.2020
	Projektvorstellung auf dem 20. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, 12. - 13. März 2020, Würzburg	März 2020
	Messkampagne bei der Kohlstädt GmbH, Vlotho	August 2020

### Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses

1. Sitzung des PA	Universität Kassel (tff, upp) Vorstellung der bisher erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	17.07.2018
2. Sitzung des PA	Universität Kassel (tff, upp) Vorstellung der bisher erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	20.11.2018
3. Sitzung des PA	Universität Kassel (tff, upp) Vorstellung der bisher erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	05.02.2020
4. Sitzung des PA	Universität Kassel (tff, upp) Vorstellung der bisher erzielten Ergebnisse und Projektzusammenfassung	16.12.2020

### Geplante Transfermaßnahmen nach Ablauf des Projektes

Maßnahme	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Veröffentlichung des Abschlussberichtes	Internetauftritt der Antragsteller	Ende der Projektlaufzeit
Wissenschaftliche Veröffentlichungen, national und international	Paper Ergebnisse in Journal of Cleaner Production	2. Quartal 2021
Nutzung der Projektergebnisse in der akademischen Lehre	Vorlesung: Life Cycle Engineering, upp, Universität Kassel Vorlesung Klebtechnische Fertigungsverfahren, tff, Universität Kassel	Nach Projektende fortlaufend

#### 1.4. Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzeptes

Die durchgeführten Transfermaßnahmen ließen ein hohes Interesse bei den Projektpartnern, bei denen Untersuchungen durchgeführt wurden sowie der Industrie, auch nach Projektende, an der Thematik erkennen.

Der Wissenstransfer an zukünftige Ingenieure im Rahmen von Lehrveranstaltungen ist ebenfalls als hoch einzustufen. Sowohl durch das Fachgebiet upp im Rahmen der Lehrveranstaltung „Life Cycle Engineering“ als auch durch das Fachgebiet tff in Form der

Lehrveranstaltung „Klebtechnische Fertigungsverfahren“ werden die Projektergebnisse zukünftigen Ingenieuren nähergebracht.

Durch die Teilnahme an nationalen Konferenzen wurde sichergestellt, dass die Ergebnisse des Forschungsvorhabens auch im wissenschaftlichen Umfeld der Klebtechnik Beachtung finden. Der Transfer der erzielten Ergebnisse in die Anwendung erfolgte neben den regelmäßigen Treffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss vorwiegend über die Präsentation der Ergebnisse auf Konferenzen sowie den im Rahmen des Projektes durchgeführten Industriebesuchen.

Die Ergebnisse in Form des Schlussberichts und für spezifisch für Zielgruppen aufgearbeitete Präsentationen oder Onepager werden auf den Internetauftritten der Forschungseinrichtungen einem größeren potentiellen Interessenten- bzw. Nutzerkreis zur Verfügung gestellt.

## 1.5. Verwendung der Zuwendung

### Ausgaben für Personal

#### **FE 1 Universität Kassel Fachgebiet für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff)**

##### A1 Wissenschaftlich-technisches Personal Wissenschaftlicher Mitarbeiter (HPA A, 20,00 MM)

Der wissenschaftliche Mitarbeiter ist für die Durchführung des Projekts und der damit verbundenen Definition und Erarbeitung von Einzelmodulen der klebtechnischen Verarbeitungskette sowie der Durchführung von Versuchen sowohl in der FST 1 als auch bei Firmen des PBA verantwortlich. Dafür ist ein Diplom-Ingenieur erforderlich, der über wissenschaftliche Erfahrungen im Bereich der Klebtechnik und den Prozessketten unterschiedlicher Klebstoffsysteme verfügt. Weiterhin hat er bereits Erfahrungen im Bereich der Bewertung der Ressourceneffizienz im Zusammenhang mit fügetechnischen Prozessen. Ihm obliegen die Planung der Versuche sowie die Durchführung und Überwachung der Experimente zur Ermittlung relevanter Prozessgrößen. Zusätzlich sind die Koordination der Arbeiten mit der FST 2 und vor allen den Firmen des PBA, Dokumentationen ebenso wie die Abfassung des Abschlussberichtes Bestandteile seiner Arbeiten. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Klebstoffsysteme und deren diversen Verarbeitungsmöglichkeiten wird der wissenschaftliche Mitarbeiter die gesamte Projektzeit voll benötigt.

##### A2 Übriges Fachpersonal Techniker (CTA) (HPA C, 8,00 MM)

Der Techniker unterstützt den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Durchführung der Versuche. Er muss über Kenntnisse im Bereich der Klebstoffverarbeitung und der klebtechnischen Verarbeitungskette verfügen. Für die Durchführung dieser Arbeiten ist ein Techniker mit einer Ausbildung zum chemisch-technischen Assistenten erforderlich.

##### A3 Hilfskräfte Studentische Hilfskraft (HPA F, 80h/M, 24 MM)

Die studentische Hilfskraft unterstützt den wissenschaftlichen Mitarbeiter und den Techniker bei der Durchführung der Versuche. Er begleitet den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei Versuchen bei Firmen des PBA und sorgt für einen reibungslosen Verlauf bei der Aufnahme der relevanten Prozessgrößen. Hierfür ist ein Student eines technischen Studiengangs im fortgeschrittenen Semester erforderlich.

## **Forschungsstelle 2: Universität Kassel Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse (upp)**

### A1 Wissenschaftlich-technisches Personal Wissenschaftlicher Mitarbeiter (HPA A, 18,00 MM)

Der wissenschaftliche Mitarbeiter ist für Durchführung des Projekts und der damit verbundenen Definition und Erarbeitung von Einzelmodulen der klebtechnischen Verarbeitungskette sowie der Durchführung von Versuchen sowohl in der FST 1 als auch bei Firmen des PBA verantwortlich.

Dafür ist ein Diplom-Ingenieur erforderlich, der über wissenschaftliche Erfahrungen im Bereich der Klebtechnik und den Prozessketten unterschiedlicher Klebstoffsysteme verfügt. Weiterhin hat er bereits Erfahrungen im Bereich der Bewertung der Ressourceneffizienz im Zusammenhang mit fügetechnischen Prozessen.

Ihm obliegen die Planung der Versuche sowie die Durchführung und Überwachung der Experimente zur Ermittlung relevanter Prozessgrößen. Zusätzlich sind die Koordination der Arbeiten mit der FST 1 und vor allen den Firmen des PBA, Dokumentationen ebenso wie die Abfassung des Abschlussberichtes Bestandteile seiner Arbeiten.

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Klebstoffsysteme und deren diversen Verarbeitungsmöglichkeiten wird der wissenschaftliche Mitarbeiter die gesamte Projektzeit voll benötigt.

### A3 Hilfskräfte: Studentische Hilfskraft (HPA F, 80h/M, 36 MM)

Die studentische Hilfskraft unterstützt den wissenschaftlichen Mitarbeiter und den Techniker bei der Durchführung der Versuche. Er begleitet den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei Versuchen bei Firmen des PBA und sorgt für einen reibungslosen Verlauf bei der Aufnahme der relevanten Prozessgrößen. Hierfür ist ein Student eines technischen Studiengangs im fortgeschrittenen Semester erforderlich.

Die geleisteten Arbeiten entsprechen in vollem Umfang dem beantragten und bewilligten Antrag. Die geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen. Dabei dient die Einteilung der Klebstoffe in Klassen vor allem dazu, die verschiedenen Systeme hinsichtlich des benötigten Energiebedarfs bei der Applikation und Aushärtung grob einschätzen zu können. Die im Anschluss durchgeführte Auflistung von Prozessketten und -modulen dient dazu, den Bereich „Klebtechnische Fertigung“ mit allen Einzelaspekten zu erfassen und im Folgenden eine Modellierung verschiedenster Fertigungsprozesse ermöglichen zu können, welche in

ihrer Gesamtheit die aufgeführten Aspekte möglichst vollständig abdecken. Durch die Auswertung des Energiebedarfs der Klebstoffherstellung, erster Leistungsmessungen und die Bilanzierung des Beispielprozesses wurde zudem der Grundstein für weitere Untersuchungen gelegt.

Besondere Bedeutung kam dem Aufbau von Industriekontakten und dem Vorstellen der Projektinhalte und –ziele durch FE 1 zu. Nur dadurch wurden Leistungsmessungen im Rahmen der klebtechnischen Fertigung unter Berücksichtigung der in AP1 und AP2 vorgenommenen Klebstoff- und Prozesseinteilung überhaupt möglich, um die dort aufgeführten Kriterien möglichst umfassend im Forschungsvorhaben abdecken zu können. Ferner übernahm FE 1 die Betreuung der Leistungsmessung hinsichtlich der klebtechnischen Fachkompetenz, was die Vollständigkeit der aufgenommenen Messdaten sicherstellte, und die fachliche Unterstützung bei der Erstellung der Datenbank.

Die primäre Aufgabe von FE 2 lag in der Aufnahme der Leistungsdaten bei den Industriepartnern vor Ort und in der Kommunikation mit den unterstützenden Firmen im Rahmen der Organisation der Messkampagnen, um den Anschluss der Messgeräte an die Elektrik der zu untersuchenden Anlagen gewährleisten zu können. Darüber hinaus zeichnete FE 2 für die Aufbereitung und Auswertung der aufgenommenen Daten verantwortlich. Das FG upp wertete zudem zahlreiche Anlagendatenblätter aus und errechnete das GWP für die angegebene Nennleistung für thermische, elektrische und druckluftbezogene Arbeit. Ferner erstellte FE 2 die Microsoft Access-Datenbank und pflegte die gewonnenen Daten ein.

### **Ausgaben für Gerätebeschaffung**

- entfällt für beide Forschungseinrichtungen

Universität Kassel, FG für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff)

Position	Zuwendung laut Einzel- finanzierungsplan vom 11.04.2018	Kumulierte Ausgaben laut zahlenmäßigem Nachweis für die Projektlaufzeit
A.1 Wiss.-techn. Personal	20 Personenmonate	19,99 Personenmonate
B. Ausgaben für Gerätebeschaffung	0,00 €	0,00 €
C. Ausgaben für Leistungen Dritter	0,00 €	0,00 €

Position	Zuwendung laut Einzel- finanzierungsplan vom 11.04.2018	Kumulierte Ausgaben laut zahlenmäßigem Nachweis für die Projektlaufzeit
A.1 Wiss.-techn. Personal	18 Personenmonate	18 Personenmonate
B. Ausgaben für Gerätebeschaffung	0,00 €	0,00 €
C. Ausgaben für Leistungen Dritter	0,00 €	0,00 €

## **1.6. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittelständische Unternehmen**

### Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der kmU

Die in diesem Projekt generierten Erkenntnisse werden mittelständischen sowie Kleinunternehmen über den Industrieverband Klebstoffe kostenlos zur Verfügung gestellt. Somit werden diese Unternehmen (KMU) in die Lage versetzt die von ihnen angewandten Klebverbindungen bzgl. des GWP zu bewerten und so den Anforderungen ihrer Auftraggeber der Politik und ggü. der Gesellschaft gerecht zu werden. Eine Anleitung zur korrekten Benutzung und Pflege sowie die Datenbasis werden den Unternehmen zur Verfügung gestellt.

### Wirtschaftlich-technische Erfolgsaussichten

Im Projekt konnte die Machbarkeit der Bestimmung des GWP auf Grundlage einer funktionellen Einheit erbracht werden. Damit kann das Konzept nach Projektende von interessierten Firmen und Anwendern aufgegriffen und in die eigene Fertigung überführt werden. Es besteht die Möglichkeit, die entstandene Datenbank zu pflegen und zu erweitern und somit eigenen Prozessketten individuell zu generieren, auszuwerten gegebenenfalls Optimierungspotentiale zu identifizieren.

### Einschätzung der Finanzierbarkeit einer industriellen Umsetzung

Die Finanzierbarkeit der Umsetzung des erarbeiteten Bewertungskonzeptes ist als hoch einzuschätzen. Die Konzepte zur Bewertung sowie die Datenbasis bzw. das Erweitern der Datenbasis gestaltet sich unkompliziert und kostengünstig. Die Erhebung der Daten für eine Sachbilanz können mit dem richtigen Equipment selbst umgesetzt, mit jeweiligen Emissionsfaktoren verrechnet und in die Datenbank eingepflegt werden. Die Anleitung zur Pflege der Datenbank unterstützt dieses Prozedere. So können auch kleine und mittlere Betriebe ohne große FuE-Abteilung entsprechende Systeme kostengünstig erwerben und nutzen.

Der Umsetzungsaufwand für das erarbeitete Konzept im Hinblick auf die Bestimmung des GWP's lässt sich auf folgende Punkte zusammenfassen:

- Umsetzung des Konzepts der Bestimmung des GWP's inkl.
  - Anschaffung einer Anlage zur Leistungsmessung.
  - Installation und Pflege der im Projekt generierten modularisierten Datenbank.

### Beitrag zu wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen

Es konnten folgende Erkenntnisse während des Projekts gewonnen werden:

- In vielen Fällen überwiegt das GWP der Herstellung der Klebstoffe das GWP der Nutzung (Oberflächenbehandlung, Klebprozesse).
- Mithilfe der generierten Datenbank besteht die Möglichkeit, individuelle Prozessketten zu erstellen und sich das jeweilige GWP dieser Prozesskette sowie auch für jeden einzelnen Prozessschritt separat ausgeben lassen
- Mit Hilfe der Datenbank können bestehende Prozessketten analysiert und optimiert werden.
- Die dargestellte Vorgehensweise bei der Auswertung von Datenblättern ermöglicht die Erstellung von PCFs ohne das direkte Messen von Energieströmen. Anhand dessen werden einfache Bewertungen zur ersten Abschätzung hinsichtlich des GWP ermöglicht.
- Die erarbeitete Methodik ermöglicht das Bewerten manueller Tätigkeiten hinsichtlich des GWP im Bereich der Klebtechnik.

Die Projektziele wurden vollumfänglich erreicht.

## 2. STAND DER TECHNIK

### 2.1. Grundlagen der Klebtechnik

#### 2.1.1. Begriffe und Mechanismen

In diesem Abschnitt sollen nach einer kurzen Einordnung des Klebens in den Kontext der Fertigungsverfahren die grundlegenden Begriffe der Klebtechnik erläutert und die Mechanismen, auf denen Klebverbindungen basieren, verdeutlicht werden.

#### 2.1.2. Fertigungsverfahren Kleben: DIN 8593-8

Gemäß DIN 8593-8 werden die Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen eingeteilt (siehe Abbildung 2-1), wobei das Kleben der Hauptgruppe des Fügens angehört. Ein Fügeprozess soll ein dauerhaftes Verbinden von zwei oder mehr Werkstücken gewährleisten (DIN 8593-8).

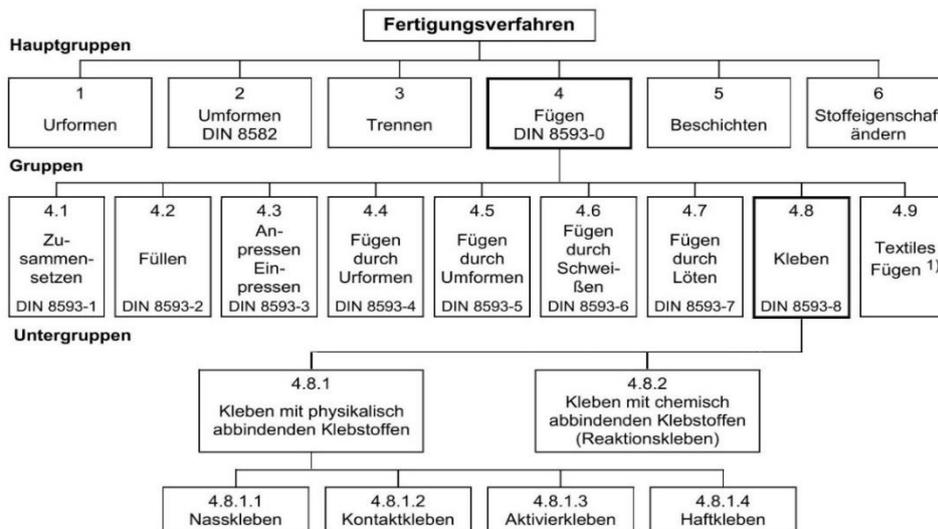


Abbildung 2-1: Übersicht der Fertigungsverfahren nach DIN 8593-8

Um ein Verbinden zwischen Fügeteilen zu realisieren, kann zwischen kraft-, form- und stoffschlüssigen Fügeverfahren differenziert werden (Rasche 2012). Das Kleben bedarf für die Verbindungsbildung eines zusätzlichen Werkstoffes und gehört neben dem Schweißen und Löten zu den stoffschlüssigen Fügeverfahren (Habenicht 2016b). Der Stoffschluss selbst wird durch Kohäsion und Adhäsion sichergestellt (DIN 8580).

### 2.1.3. Klebtechnische Begriffe

#### 2.1.3.1. Klebung

In Abbildung 2-2 sind alle wichtigen Begriffe einer Klebverbindung visualisiert. Eine Klebung bezeichnet dabei die mit einem Klebstoff hergestellte Verbindung der Fügeteile (Habenicht 2009). Ein Fügeteil bzw. Substrat selbst ist ein „Körper, der an einen anderen Körper geklebt werden soll oder geklebt ist“ (Habenicht 2016b). Die Klebfläche bezeichnet jene Fläche zwischen den Fügeteilen, auf die der Klebstoff aufgebracht wird und über die die Fügeteile miteinander verklebt werden. Zwischen den Fügeteilen entsteht bei einer Klebung eine Klebfuge, die mit einer Klebschicht gefüllt ist und den Zwischenraum der Klebflächen charakterisiert (Habenicht 2016b).

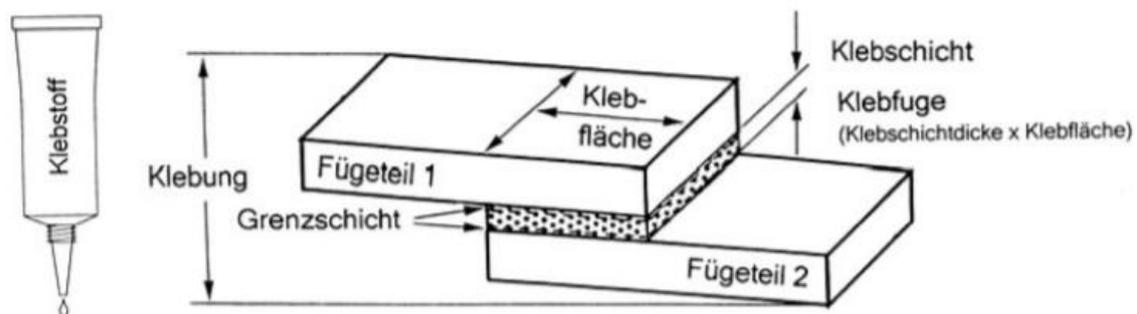


Abbildung 2-2: Klebtechnische Begriffe (Habenicht 2016b)

Die stoffschlüssigen Klebeverbindungen halten zusammen, da im Bereich der Grenzschicht „Anziehungskräfte zwischen den Atomen bzw. den Molekülen der Fügeteile und des Hilfstoffes“ (Rasche 2012) vorliegen, die im Abschnitt 2.1.3.2 thematisiert werden.

#### 2.1.3.2. Klebstoffe: Aufbau und innere Festigkeit (Kohäsion)

Als Klebstoff bezeichnet DIN EN 923 einen „nichtmetallischen Stoff, der Fügeteile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann“ (Habenicht 2009).

Habenicht (Habenicht 2009) legt in seinem Werk dar, dass die meisten Klebstoffe organischer Art sind und dem chemischen Aufbau von Kunststoffen entsprechen. Das Ausgangsprodukt

des Klebstoffes auf molekularer Ebene sind dabei Monomere, die einzeln vorliegen und sich durch chemische Reaktionen zu Polymeren zusammenlagern.

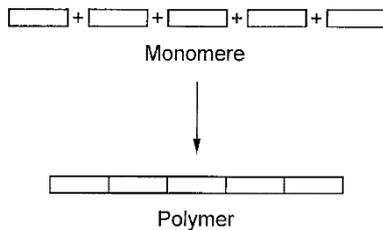


Abbildung 2-3: Polymerbildung (Habenicht 2016)

In der einleitenden Definition wird mit der Kohäsion eine wichtige Eigenschaft der Klebstoffe genannt. Diese ist für die innere Festigkeit eines Klebstoffes verantwortlich und beschreibt die wirkenden Anziehungskräfte der Moleküle eines Stoffes untereinander. Diese innere Festigkeit wird charakterisiert durch die chemische bzw. physikalische Abbindung und ist werkstoff- und temperaturabhängig (Onusseit 2019). Aufbauend auf der Unterscheidung von Monomeren und Polymeren lässt sich eine Einteilung der Klebstoffe nach Abbindungsmechanismen, wie in Abbildung 2-3 bereits dargestellt, vornehmen. Bei einer chemischen Abbindung liegt der sogenannte Reaktionsklebstoff in flüssiger Phase vor, die aus reaktionsbereiten Monomeren besteht, welche nach dem Applizieren in der Klebfuge aushärten und durch eine chemische Reaktion eine polymere Klebschicht erzeugen (Habenicht 2009). Dem gegenüber stehen physikalisch abbindende Klebstoffe, bei denen die Polymerbildung vor der Verarbeitung erfolgt ist (Onusseit 2019). Damit die festen Polymere zu einem späteren Zeitpunkt verarbeitet werden können, werden sie bspw. in Wasser gelöst, welches anschließend bei diesen sogenannten Dispersionsklebstoffen in der Klebfuge abdampft, sodass nach diesem Abbindeprozess die aus Polymeren bestehende Klebschicht entsteht (Habenicht 2016b). Die Abbindungsmechanismen sind wichtig zu unterscheiden, weil der Klebstoff, wie zuvor erwähnt, vor Verarbeitung in den flüssigen Zustand gebracht werden muss, wofür bspw. bei Schmelzklebstoffen Energie in Form von Wärme für den Schmelzvorgang benötigt wird (Onusseit 2019).

#### 2.1.3.3. Prinzip der Adhäsion

Neben dem Kleben gibt es in der Natur viele Prozesse, die auf dem Prinzip der Haftung basieren. Warum jedoch haftet ein Klebstoff auf der Oberfläche der Füge­teile und ermöglicht somit ein Verbinden dieser? Die Erklärung liefert das Phänomen der Adhäsion. Zunächst ist die mechanische Adhäsion zu erwähnen, bei der ein Formschluss zwischen Füge­teil und Klebstoff entstehen kann, in dem der Klebstoff in Poren vordringt und für eine mechanische Verklammerung sorgt (Rasche 2012). Gerade bei rauen Oberflächenstrukturen wie Holz ist dies ein wichtiger Adhäsionsmechanismus (Onusseit 2019).

In der in Kapitel 2.1.3.1 bereits erwähnten Grenzschicht kann es auch zu physikalischen Wechselwirkungen zwischen den Molekülen des Fügeteils und des Klebstoffs kommen, weil im Vergleich zum Inneren einer homogenen Phase kein Gleichgewichtszustand zwischen den Bindungskräften der Moleküle vorhanden ist (Habenicht 2016b). Die erwähnten physikalischen Kräfte können z. B. aus Dipol-Wechselwirkungen oder Wasserstoffbrücken resultieren (Doobe 2018). Den Unterschied zwischen den beiden Molekülzuständen zeigt Abbildung 2-4, in der verdeutlicht wird, dass Kohäsionskräfte zwischen Molekülen im Inneren gleichmäßig verteilt sind, jedoch im Bereich der Substratoberfläche aufgrund des fehlenden Molekülpartners in die Umgebung hineinwirken (Habenicht 2016b). Dadurch werden die nach innen gerichteten Kohäsionskräfte an den Substratoberflächen nicht kompensiert und Oberflächenspannungen entstehen (Onusseit 2008). Die durch diese Oberflächenspannung entstehenden Bindungskräfte zwischen den Polymermolekülen des Klebstoffes und denjenigen der Substratoberfläche werden als Adhäsionskräfte bezeichnet (Doobe 2018). Diese bilden die Grundlage für den Zusammenhalt einer Klebung bzw. die Festigkeit der Grenzschicht (Habenicht 2016b). Zusammenfassend lässt sich die Adhäsion als Wechselwirkung zwischen Atomen bzw. Molekülen inhomogener Phasen bezeichnen (Habenicht 2009).

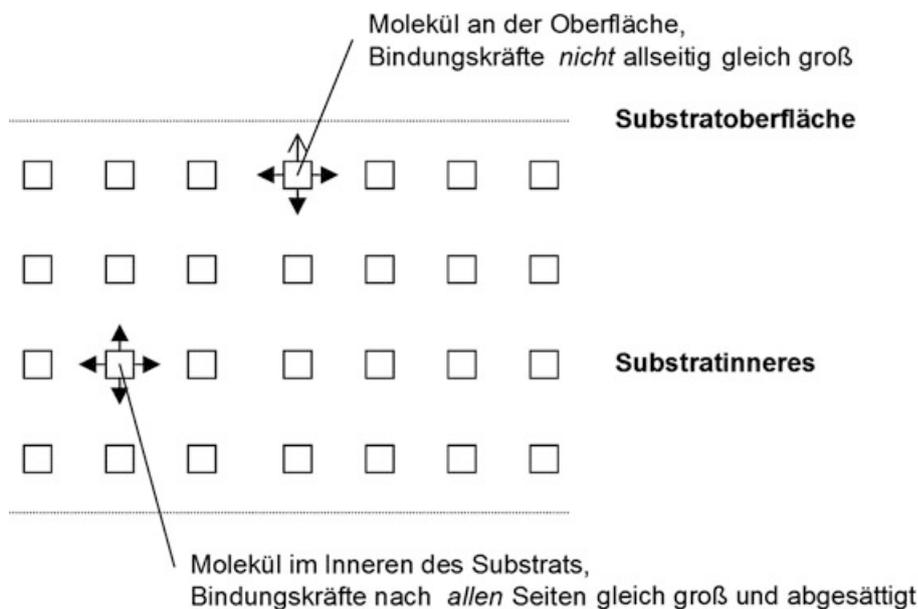


Abbildung 2-4: Bindungskräfte im Grenzschichtbereich (Doobe 2018)

Damit Adhäsionskräfte zwischen Fügepart und Klebstoff ausreichend wirken können, sollte in den meisten Fällen – je nach Art der Klebung und der beabsichtigten Kraftübertragung - eine Oberflächenbehandlung (OB) des Fügeparts erfolgen. Die Oberflächenbehandlung mit Beispielen wird später in Kapitel 3 vorgestellt.

## 2.2. Grundlagen der Bilanzierung von THG-Emissionen

Nach der Vermittlung eines Grundverständnisses über die Klebtechnik wird nun der Fokus auf die Grundlagen bzgl. der Bestimmung des Carbon Footprints gelenkt.

### Treibhausgase (THG)

THGs sind all jene gasförmigen Atmosphärenbestandteile, welche die von der Erde reflektierte Wärmestrahlung absorbieren und anschließend emittieren (DIN EN ISO 14067). Dazu zählen u.a. Kohlendioxid, Lachgas oder Methan, deren GWP auf CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>e) normiert wird. Dabei werden die unterschiedlichen Strahlungseigenschaften und Verweildauern der THG in der Atmosphäre untersucht, um das GWP eines THG in einem Zeitraum von 100 Jahren im Vergleich zu CO<sub>2</sub> zu bestimmen (Bernstein 2008). So beträgt z.B. das vom IPCC ausgewiesene Treibhauspotential von Methan 25 kgCO<sub>2</sub>e (Heidi Hottenroth, Bettina Joa, Prof. Dr. Mario Schmidt 2013).

Die Abbildung 2-5 verdeutlicht die Funktionsweise des Treibhauseffektes grafisch. Der Ausgangspunkt des Effekts ist die eingehende kurzwellige Sonnenstrahlung, die einerseits direkt von der Atmosphäre (z.B. Wolken) wieder in den Weltraum reflektiert und andererseits von der Erdoberfläche, Ozeanen o. Ä. absorbiert wird. Diese absorbierten kurzwelligen Sonnenstrahlen erwärmen die Erdoberfläche und werden als langwellige Wärmestrahlung wiederum von dieser ausgesendet. Da die langwellige Wärmestrahlung die in der Atmosphäre befindlichen THGs oder großen Aerosole nicht einfach passiert, sondern von diesen absorbiert und in alle Richtungen emittiert wird, wird die Wärmestrahlung nicht nur in den Weltraum abgegeben, sondern auch erneut in die Erdatmosphäre emittiert. (Brasseur et al. 2017)

Prinzipiell ist dieser natürliche Vorgang nicht problematisch, weil die Absorption der Strahlungsenergie in Form von Wärme durch die THGs verhindert, dass es auf der Erde mittlere Temperaturen von -18 °C gibt (Umweltbundesamt 2013). Wenn aber eine erhöhte Treibhausgaskonzentration dazu führt, dass mit der Strahlung immer weniger Wärme in den Weltraum abgegeben wird, sondern diese in der Atmosphäre verweilt, führt dies wiederum zur besagten Temperaturerhöhung auf der Erde, dem anthropogenen Klimawandel. Ein solcher menschlicher Eingriff in das Klimasystem erfolgt z.B. durch die Nutzung fossiler Brennstoffe oder Vegetationsänderung wie Waldrodungen, wodurch THGs freigesetzt werden (Brasseur et al. 2017).

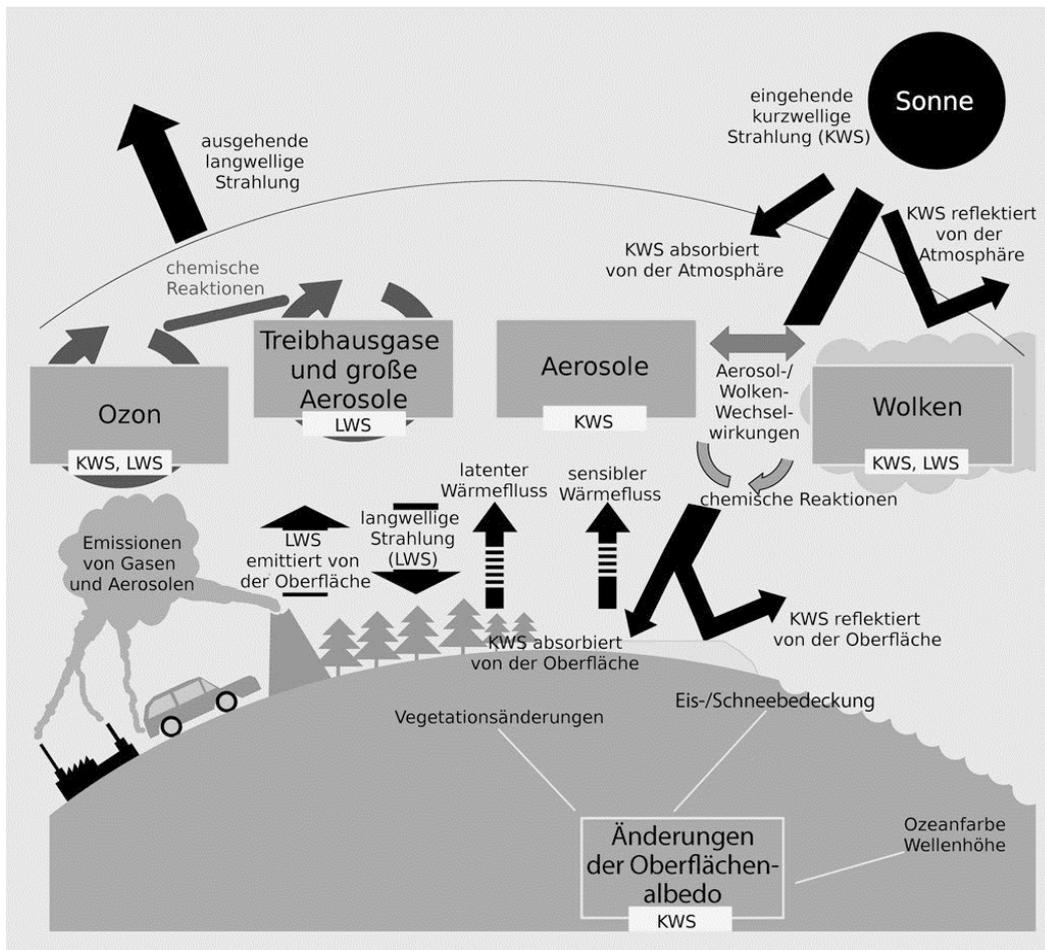


Abbildung 2-5: Treibhauseffekt (Brasseur et al. 2017)

### Product Carbon Footprint (PCF)

Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Anforderungen, die an eine PCF-Studie gestellt werden, entstammen, insoweit nicht explizit gekennzeichnet, der DIN EN ISO 14067 (vgl. DIN 2019).

In dieser wird der PCF als „Summe der emittierten THG-Mengen und der entzogenen THG-Mengen in einem Produktsystem, angegeben als CO<sub>2</sub> Äquivalente und beruhend auf einer Ökobilanz unter Nutzung der einzigen Wirkungskategorie „Klimawandel“ definiert. Er soll dabei helfen, ein Bewusstsein in Unternehmen zu schaffen, wie viel Treibhausgasen ihre Produkte oder Dienstleistungen in einem Lebenszyklus (siehe Abbildung 2-6) emittieren, und somit die Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung von THG-Emissionen (THGE) bzw. zur Steigerung von entzogenen THGs fördern.

Ein vollständiger Produktlebenszyklus umfasst die Phasen der Rohstoffgewinnung bzw. aufbereitung, die Produktion, die Distribution, den Einkauf bzw. die Nutzung des Produktes

und abschließend die End-of-Life-Phase, die in einer Entstorgung bzw. einem Recycling umgesetzt wird.

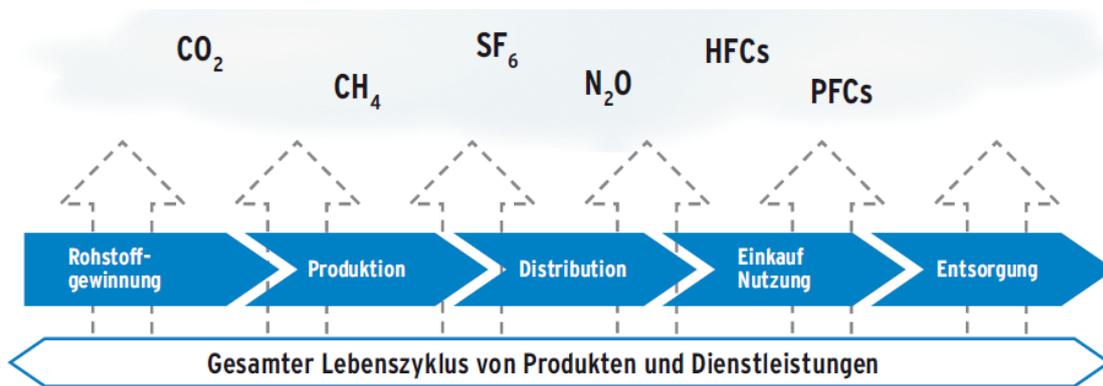


Abbildung 2-6: Lebenszyklus eines PCF (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)

Wie der Definition zu entnehmen ist, wird der Klimawandel als einzige Wirkungskategorie fokussiert und andere Umweltkategorien vernachlässigt. Die in der Norm formulierten Anforderungen für die Quantifizierung des PCF je funktioneller Einheit werden in dieser Arbeit umgesetzt und im Kontext des Ablaufes eines PCF im nächsten Schritt erläutert.

#### Vorgehensweise bei der Erstellung eines PCF

Wie bereits erwähnt, wird in der DIN EN ISO 14067 ein einheitliches Vorgehen zur Ermittlung des PCF festgelegt. In Übereinstimmung mit der Norm zu Ökobilanz (ISO 14040) ergibt sich für die Bestimmung eines PCF der in Abbildung 2-7 gezeigte Ablauf, der auf den vier Phasen der Ökobilanz basiert.

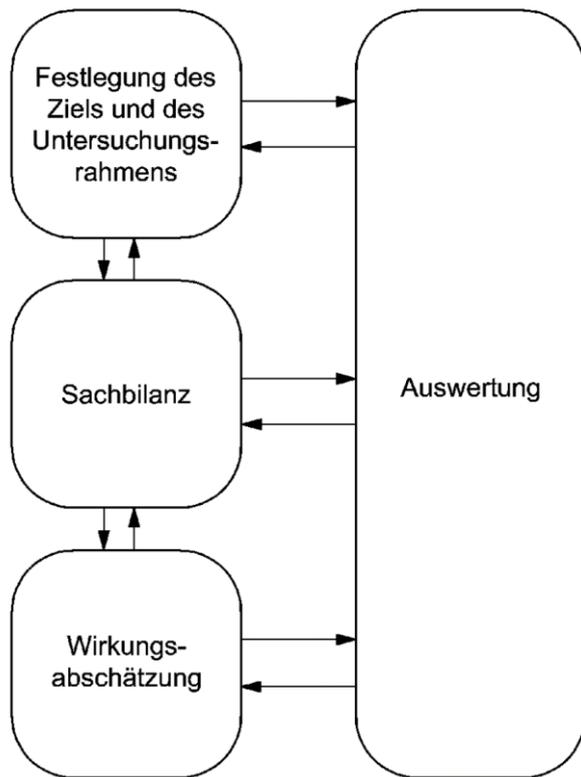


Abbildung 2-7: Phasen eines Product Carbon Footprints Bild 1 - Phasen einer Ökobilanz (DIN 2009, S. 20)

Das übergeordnete Ziele einer PCF-Studie zielt darauf ab, alle wesentlichen emittierten und entzogenen THG-Mengen zu quantifizieren und den potenziellen Beitrag eines Produkts bei der Klimaerwärmung zu berechnen. Bei der Erstellung des Untersuchungsrahmens müssen u.a. die folgende Aspekte miteinbezogen werden:

- Das zu untersuchende Produktsystem und dessen Funktionen
- Die funktionelle Einheit<sup>1</sup>
- Die Systemgrenze inklusive des geographischen Bezugs
- Anforderungen an Daten, deren Qualität und zeitliche Gültigkeit
- Betroffene Annahmen über Lebenswegabschnitte
- Gewählte Allokationsmethoden
- Der Bericht der Studie
- Ggf. die Art der kritischen Prüfung der Ergebnisse
- Grenzen der Aussagefähigkeit

---

<sup>1</sup> Eine funktionelle Einheit wird als Bezugsgröße gewählt, auf die die Input- und Outputs der betrachteten Prozessmodule bezogen werden können. Weiterhin kann sie als Vergleichskriterium für die Ergebnisse weiterer Studien genutzt werden.

Mit der Festlegung der Systemgrenze wird bestimmt, welche Lebensphasen und Prozessmodule des betreffenden Produktsystems miteinbezogen werden. Prozessmodule sind anhand ihrer Stoff- und Energieströme Bestandteile des Produktsystems, die bei der Datenerfassung in der Sachbilanzphase betrachtet werden. Insofern möglich müssen alle Prozesse und Flüsse, die das Produktsystem betreffen, miteinbezogen werden. Einzelne Stoff- und Energieströme können ausgeschlossen werden, insofern sie als unbedeutend befunden werden. Solche Abschneidekriterien sollten zuvor definiert und deshalb gewählte Ausschlüsse dokumentiert werden.

Inhalt der Sachbilanz ist das Zusammentragen und die Quantifizierung der Inputs und Oupputs (stoff- und energiebezogen) der betrachteten Lebensabschnitte des Produkts. Die Phase umfasst folgende Schritte:

- Erfassung der Daten
- Validierung der Daten
- Bezug der Daten auf ein Prozessmodul und eine funktionelle Einheit
- Ggf. Anpassung der Systemgrenze
- Allokation

Die in die Untersuchung einbezogenen Daten können entweder durch Messen, Berechnen oder Schätzen erhoben werden. Für Daten, die für Schlussfolgerungen genutzt werden, müssen verwendete Datenerhebungsverfahren, der Zeitrahmen sowie die Datenqualität aufgezeigt werden. Zur Sicherstellung der Datenqualität, muss eine Validierung der Daten erfolgen. Beziehen sich die erhobenen Daten der Prozessmodule auf unterschiedliche Produktsysteme, muss eine Allokation bzgl. des untersuchten Produktsystems durchgeführt werden. Das heißt, dass nur derjenige Anteil der Inputs und Outputs, die das Produktsystem betreffen, diesem auch zugeordnet wird.

In der Phase der Wirkbilanz müssen die potenziellen Auswirkungen auf die Änderung des Klimas der durch das Produktsystem emittierten bzw. entzogenen Treibhausgase durch die Multiplikation mit den spezifischen Emissionsfaktoren festgestellt werden. Bezüglich der Emissionsfaktoren sollten die aktuellen durch das IPCC veröffentlichten Daten herangezogen werden. Die Berechnung des Treibhauspotenzials sollte sich auf einen Zeithorizont von 100 Jahren beziehen.

Die Auswertung des PCF und die Erstellung eines Berichts bilden die letzte Phase einer PCF-Studie ab. Die Auswertung muss folgende Schritte beinhalten:

- Identifizierung der relevanten Parameter
- Bewertung bzgl. Vollständigkeit und Konsistenz

- Formulierung von Schlussfolgerungen

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte anwendungsspezifisch näher erläutert und die jeweiligen Kriterien festgelegt, ehe in Kapitel 3 die eigentliche Berechnung erfolgt.

### 2.3. Grundlagen des Messens von Stoff- und Energieströmen

Die Ausführungen zu den Grundlagen des Messens von Stoff- und Energieströmen in diesem Unterkapitel entstammen, insofern nicht explizit gekennzeichnet aus der Vorlesung Energie- und klimaeffiziente Produktion Hesselbach (2012). Dabei werden ausschließlich Methoden betrachtet, die im Zuge der Messungen Anwendung fanden.

#### Elektrische Leistungsmessung

Die Bestimmung der elektrischen Leistung (P) erfolgt nicht explizit, sondern indirekt über die Messung von Spannung (U) und Stromstärke (I).

$$P = U \times I \quad (2.1)$$

Die Spannungsmessung erfolgt parallel, d.h. ohne, dass der Stromkreis dafür aufgetrennt werden muss. Bei der Strommessung muss der Stromkreis i.d.R aufgetrennt werden. Zur Versorgung der industriellen Anlagen mit elektrischer Energie wird hauptsächlich dreiphasiger Wechselstrom genutzt. Dabei können die Verbraucher in Stern- oder Dreiecksschaltung angeschlossen sein. Um die Gesamtleistung ermitteln zu können, müssen die Leistungen sowohl für Stern- oder Dreieckschaltung für jede Phase ermittelt und nach Formel summiert werden:

$$P_{ges} = 3U_{Strang}I_{Strang} = \sqrt{3}U_{Leiter}I_{Leiter} \quad (2.2)$$

Mithilfe von Anschlussklemmen kann die Spannung abgegriffen werden. Sind die Phasen symmetrisch belastet ist die Messung von Spannung und Strom an einer Zuleitung ausreichend. Um ein Öffnen der Stromkreise zu umgehen, können Induktionsklemmen, die an den Leitungen angebracht werden, genutzt werden. Induktionsklemmen entsprechen vereinfachend einem Eisenkern. Durch das Magnetfeld, das durch den Strom induziert wird, entsteht in der Sekundärspule ein proportional zum Leitungsstrom stehender Strom, der mithilfe des Leistungsmessegrätes erfasst wird.

## Durchflussmessung

Im Bereich der Durchflussmessung gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden<sup>2</sup>, die hinsichtlich der jeweiligen Aufgabenstellung gewählt werden sollten. Generell kann zwischen einer Volumenstrom- und einer Massenstrommessung unterschieden werden. Bei Gasen hängt die Dichte von Temperatur und Druck ab. Demnach kann nicht immer eine Multiplikation des Volumenstromes mit einer konstanten Dichte zur Errechnung des Massenstroms genutzt werden. Massenströme sind die Grundlage zur Berechnung von Energieströmen.

Mobile Durchflussmessungen von Druckluft, Gasen, Flüssigkeiten und Wärmemengen können mithilfe des Ultraschallverfahrens umgesetzt werden. Befindet sich ein Fluid in ruhendem Zustand, breitet sich ein eingebrachtes akustisches Signal mit Schallgeschwindigkeit aus. Befindet sich das Medium im strömenden Zustand, erhöht sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Strömungsrichtung, entgegengesetzt verringert sie sich. Dabei verändert sich die Zeitspanne, die das Schallsignal zur Überwindung der definierten Strecke benötigt. Der prinzipielle Aufbau einer Durchflussmessung ist in Abbildung dargestellt.

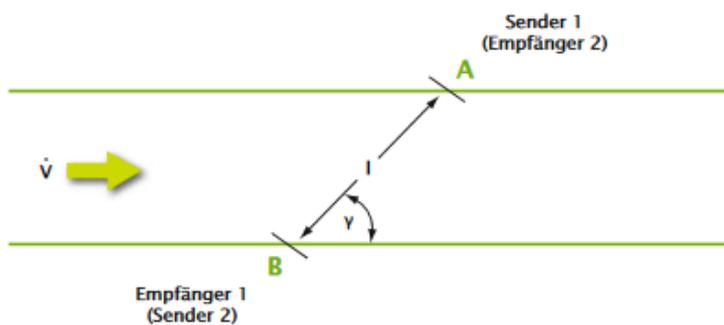


Abbildung 2-8 Grundlegender Aufbau einer Durchflussmessung mit Ultraschall (Hesselbach 2012)

Die auf der Rohrleitung installierten Sensoren senden Ultraschallsignale aus, die auf der schräg gegenüberliegenden Seite (Winkel  $\gamma$ ) nach der Zeit  $t_1$  bzw.  $t_2$  empfangen werden. Die Zeit die das Signal gegen die Strömungsrichtung benötigt ergibt sich anhand folgender Formel:

$$t_1 = \frac{l}{c_{\text{Schall}} - c_F} \quad (2.3)$$

---

<sup>2</sup> Für eine Übersicht und Erläuterung der einzelnen Verfahren kann Hesselbach et al. herangezogen werden.

In Strömungsrichtung lautet die Gleichung:

$$t_2 = \frac{l}{c_{Schall} + c_F} \quad (2.4)$$

Die Eliminierung der Schallgeschwindigkeit erfolgt durch Subtraktion der beiden Gleichungen. Somit lässt sich aus der Laufzeitdifferenz der Ultraschallsignale die mittlere Fluidgeschwindigkeit mithilfe der folgenden Gleichung bestimmen.

$$c_{F,m} = \frac{l}{\cos\gamma} \left( \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad (2.5)$$

Diese Vorgehensweise erfordert ein Zweikanalsystem, das auf beiden Seiten jeweils einen Empfänger und Sender besitzt. Die Begrenzung der Messgenauigkeit ergibt sich mit einer Abweichung von zirka 2 Prozent.

## 3. MATERIALIEN UND METHODEN

### 3.1. Einteilung der Klebstoffsysteme

Da eine klassische Einteilung der Klebstoffe für die Ziele des Forschungsprojektes „KlebFuß“ nicht von Nutzen ist, wurde von den Forschungsstellen eine Einteilung der Klebstoffe nach energetischen Maßstäben vorgenommen, sodass eine erste ökologische Betrachtung möglich wird. Die häufigsten angewandten Klebstoffe wurden analysiert (siehe Abbildung 3-1) und nach den nachfolgenden Kriterien eingeteilt:

- Ist eine Energiezufuhr aus chemischer, aber auch aus prozessspezifischer Sicht notwendig?
- Art der Energie (Wärme-, Strahlungsenergie)
- Zeitpunkt der Energiezufuhr (vor oder nach dem Fügen)
- Prozessschritt

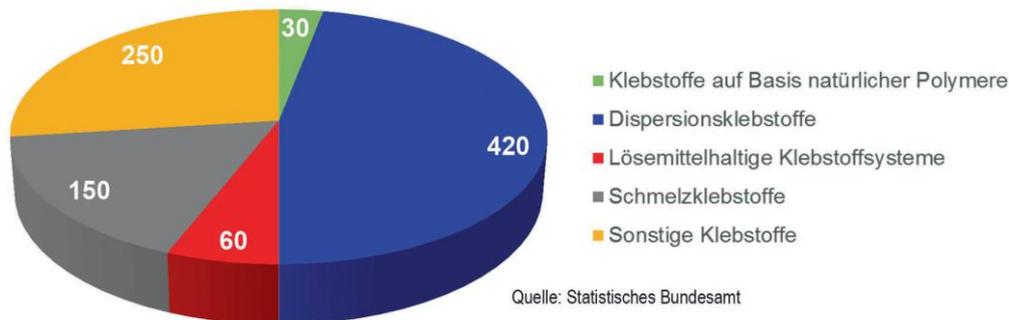


Abbildung 3-1: Klebstoffproduktion in 100.000 t (adhäsion 2017, 61(11))

Anschließend wurden diese nach weiteren Gesichtspunkten unterteilt und zusammenfassend in Abbildung 3-2 dargestellt.

RT-vernetzenden Systeme sind aufgeführt, auch wenn diese grundsätzlich keinen zusätzlichen Energieeintrag benötigen. Sie können aber mit Hilfe von Wärme schnellgehärtet werden und in ihren mechanischen Eigenschaften verändert/optimiert werden.

Ziel dieser Unterteilung ist es eine sinnvolle Aufstellung unterschiedlicher Klebstoffsysteme nach energetischen Gesichtspunkten für die später im Verlauf des Projektes vorgenommenen Messungen sowie die Sicherstellung der Erfassung markt- und energierelevanter Klebstoffsysteme zu erlangen.

Wärme						
Wärme nur vor dem Fügen		Wärme nur nach dem Fügen			Wärme vor und nach dem Fügen	
Fördern, Dosieren, Applizieren	Abdampfen	Vernetzung	Abdampfen	Schmelzen	Fördern, Dosieren, Applizieren, Vernetzung	Abdampfen, Vernetzung
Schmelzklebstoffe (ggf. auch nachvernetzend durch Feuchte)	Kontaktklebstoffe	1K-Epoxy	Lösemittelklebstoffe	Schmelzklebstoffe (Pulver, Folien)	hochviskose 1K-Epoxy	Therm. nachvern. Lösemittel-, Kontakt-, Dispersionsklebstoffe
ggf. hochviskose 1K-Systeme (PU, Silikon, MS)	ggf. Härterlack bei NoMix	PF-Harze	Dispersionsklebstoffe		hochviskose Butylkautschuke	Backlacke
vorgewärmte Substrate		Plastisole			therm. nachvern. Schmelzklebstoffe	
		Butylkautschuke				
		Polyimide				
		nachvernetzende doppelseitige Klebebänder und Transferklebebänder				

Wärme	Strahlung		RT-vernetzende/-abbindende KS
Wärme nach dem Fügen	Bestrahlung vor dem Fügen	Bestrahlung nach dem Fügen	---
Beschleunigung Vernetzung/Taktzeiten	Vernetzung	Vernetzung	---
2K-Epoxy (frozen 1K-Epoxy)	Kationisch polym. Epoxy	Acrylate	2K-Epoxy (frozen 1K-Epoxy)
1K/2K PU		Kationisch polym. Epoxy	1K/2K PU
1K/2K Silikone			1K/2K Silikone
MS-Polymere			MS-Polymere
2K-Acrylat			2K-Acrylat
Cyanacrylate			Cyanacrylate
Anaerobe Klebstoffe			Anaerobe Klebstoffe
Unges. Polyesterharze			Unges. Polyesterharze
Polysulfide			Polysulfide
			doppelseitige Klebebänder und Transferklebebänder

Abbildung 3-2: Einteilung der Klebstoffsysteme nach energetischen Gesichtspunkten

Die Auswahl der im Rahmen dieser Arbeit thematisierten Klebstoffe resultiert aus der Möglichkeit, Environmental Product Declarations (EPDs) für Klebstoffe zu analysieren, da aus diesen die klebstoffspezifischen Treibhauspotentiale gewonnen werden können (siehe dazu 3.3). An dieser Stelle wird auf die zugrunde gelegte Klebstoffübersicht in der folgenden Abbildung 3-3 verwiesen.

Beschreibung	Dichte [g/cm³]		GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.] pro kg KS		A4 transport distance [km]
	min.	max.	A1-A3	A4	
fischer Patronen auf Methacrylatharz-Basis (RM, FHB IIP, FHB II-PF, UMV-P, RSB)	1,6	4	1,92E+00	2,74E-02	500
fischer Injektionsmörtel auf Methacrylatharz-Basis	1,6	1,9	1,92E+00	2,74E-02	500
Montagemörtel FIS Green 300 T	1,4	1,7	1,92E+00	2,74E-02	500
Hilti HIT-CT 1	1,9	1,9	2,57E+00		500
Silicone-based construction sealants	1	1,5	7,08E+00	5,61E-03	1000
1-K STP-Parkettklebstoff - UZIN MK 250	1,6	1,6	2,21E+00	2,45E-02	500
1-K STP-Parkettklebstoffe - UZIN MK 200, UZIN MK 200 PLUS und UZIN MK 150	1,64	1,76	1,20E+00	2,45E-02	500
KEMPEROL 2K-PUR Abdichtung	1,23	1,25	4,66E+00	2,58E-02	500
Fußbodenklebstoffe: SikaBond Parquet, AT, T	1,25	1,65	4,66E+00	2,58E-02	500
PU/SMP-basierende, lösemittelfreie Fassadendichtstoffe: SikaHyflex, Sikaflex	1,25	1,5	4,66E+00	2,58E-02	500
Reaktionsharze auf Polyurethan- oder SMP-Basis, gefüllt oder auf wässriger Basis, lösemittelfrei	1,25	1,5	4,66E+00	2,58E-02	500
Reactive resins based on PU or silane-modified polymer, filled or aqueous, solvent-free	1,25	1,8	4,10E+00	5,04E-02	1000
Reaktionsharze auf Polyurethanbasis; lösemittelhaltig, Lösemittelgehalt zwischen 10% und 50%	1	1,25	5,75E+00	2,58E-02	500
Reactive resins based on PU or silane-modified polymer, containing solvent, solvent content between 10% and 50%	1	1,25	5,37E+00	5,04E-02	1000
Reaktionsharze auf Polyurethanbasis; lösemittelhaltig, Lösemittelgehalt kleiner 10%	1	1,25	4,34E+00	2,58E-02	500
Reactive resins based on polyurethane, containing solvent, solvent content <10%	1	1,25	3,82E+00	5,04E-02	1000
Reaktionsharze auf Polyurethanbasis, ungefüllt/lösemittelfrei, polyolfrei	0,85	1,25	8,82E+00	2,58E-02	500
Reactive resins based on PU or silane-modified polymer, unfilled/solvent-free, polyol-free	0,85	1,25	8,10E+00	5,04E-02	1000
Reaktionsharze auf Polyurethanbasis, ungefüllt/lösemittelfrei, polyolhaltig	0,85	1,25	5,87E+00	2,58E-02	500
Reactive resins based on polyurethane, unfilled/solvent-free, containing polyols	0,85	1,25	5,03E+00	5,04E-02	1000
Dispersionsbasierte lösemittelfreie Kleb-, Beschichtungs- und Dichtstoffe	1	1,5	9,55E-01	2,46E-02	500
UZIN KE 66 dispersion adhesive			9,97E-01	2,40E-02	500
Dispersionsbasierte Produkte der Klasse a	1	1,5	2,29E+00	2,46E-02	500
Dispersion-based products, Class A	1	1,5	2,06E+00	4,87E-02	1000
Dispersionsbasierte Produkte der Klasse b	1	1,5	3,95E+00	2,46E-02	500
Dispersion-based products, Class B	1	1,5	3,65E+00	4,87E-02	1000
Dispersionsbasierte Produkte, lösemittelfrei	1	1,5	9,55E-01	2,46E-02	500
Dispersion-based products, solvent free	1	1,5	9,92E-01	4,87E-02	1000
Epoxidharzmörtel FIS ER 390 S	1,6	1,6	2,66E+00	2,51E-02	500
Reaktionsharze auf Epoxidharzbasis, wässrig, ungefüllt	1	1,25	3,30E+00	2,51E-02	500
Reactive resins based on epoxy resin, aqueous/unfilled	1	1,25	3,28E+00	4,91E-02	1000
Reaktionsharze auf Epoxidharzbasis, gefüllt oder wässrig, gefüllt mit hohem Gehalt an Füllstoffen	1,1	2,5	2,66E+00	2,51E-02	500
Reactive resins based on epoxy resin, filled and/or aqueous with high content of filler	1,1	2,5	2,63E+00	4,91E-02	1000
Reaktionsharze auf Epoxidharzbasis, gefüllt oder wässrig, gefüllt mit niedrigem Gehalt an Füllstoffen	1,1	2,5	6,09E+00	2,51E-02	500
Reactive resins based on epoxy resin, filled and/or aqueous with low content of filler	1,1	2,5	5,90E+00	4,91E-02	1000
Reaktionsharze auf Epoxidharzbasis, ungefüllt, lösemittelfrei mit hohem Gehalt an Reaktivverdünnern	1	1,25	1,23E+01	2,51E-02	500
Reactive resins based on epoxy resin, unfilled/solvent-free with high content of reactive diluent	1	1,25	1,17E+01	4,91E-02	1000
Reaktionsharze auf Epoxidharzbasis, ungefüllt, lösemittelfrei mit niedrigem Gehalt an Reaktivverdünnern	1	1,25	5,99E+00	2,51E-02	500
Reactive resins based on epoxy resin, unfilled/solvent-free with low content of reactive diluent	1	1,25	5,81E+00	4,91E-02	1000

Abbildung 3-3: Klebstoffübersicht aus EPDs

## 3.2. Erarbeitung der Prozessketten

Grundsätzlich lässt sich ein Klebprozess in die Prozessketten der Oberflächenbehandlung (OB) und des Klebens unterteilen. Für die jeweiligen Prozessketten gibt es verschiedene Prozessschritte, welche durch unterschiedliche Prozessmodule technisch realisiert und in diesem Abschnitt unter energetischen Aspekten näher vorgestellt werden. Es besteht die Möglichkeit, für die dargestellten relevanten Klebstoffklassen entsprechende Prozessketten zu modellieren.

### 3.2.1. Oberflächenbehandlung

Als Resultat der Modellierung der Prozessketten (AP 2) sind in Abbildung 3-4 die Prozessschritte der OB und die dazugehörigen identifizierten Prozessmodule dargestellt. Je nach spezifischen Anforderungen an den Klebprozess hinsichtlich der Kleb- und Werkstoffe, können unterschiedliche Kombinationen der Prozessmodule für eine OB gewählt werden. Ziel dieses Prozessschrittes ist es, die Oberfläche für den Klebprozess zu reinigen, Fremdstoffe zu entfernen und je nach Bedarf für eine chemische und/oder physikalische Modifizierung zu sorgen (Ebnesajjad und Ebnesajjad 2014).

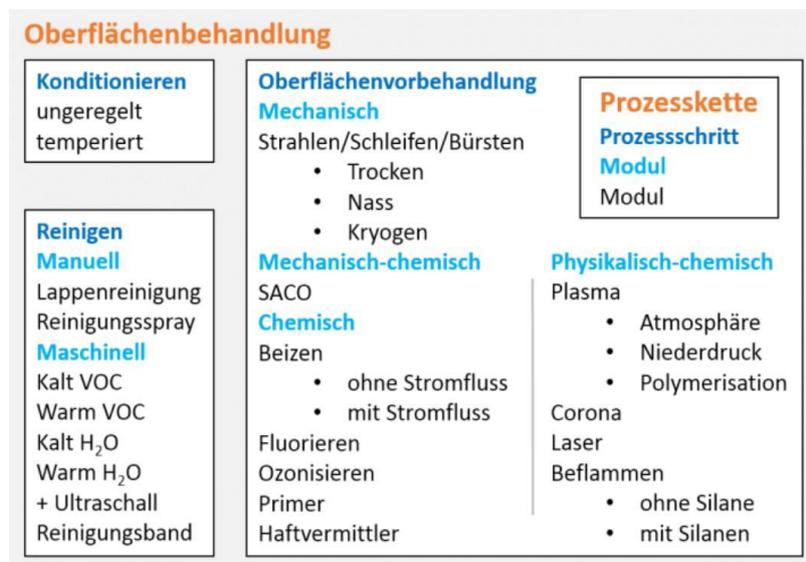


Abbildung 3-4: Prozessschritte und Prozessmodule der Oberflächenvorbereitung nach DIN SPEC 2305-1

Um zu erklären, welche Rolle eine Oberfläche in der Klebtechnik spielt und warum sie vorbehandelt werden sollte, wird erneut auf das Prinzip der Adhäsion verwiesen. Wie in Kapitel 2.1.3.3 erwähnt, sind die zwischen Klebstoff und Werkstoffoberfläche wirkenden Adhäsionskräfte die Grundlage des Zusammenhalts einer Klebung. Damit die entsprechende Wechselwirkung stattfinden kann, wird eine optimale Benetzung des Klebstoffes auf der Substratoberfläche vorausgesetzt. Das bedeutet, dass die Klebstoffmoleküle so nah an die

Oberfläche vordringen müssen (im Bereich weniger Nanometer), dass Adhäsionskräfte überhaupt wirken können. (Habenicht 2016b).

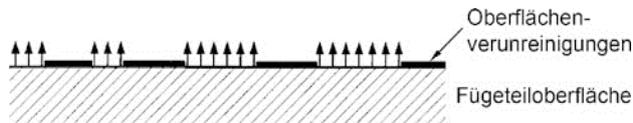


Abbildung 3-5: Darstellung der Adhäsionskräfte bei Verunreinigungen der Oberfläche (Habenicht 2016)

Habenicht (Habenicht 2016b) legt dar, dass diese Kräftewirkung nur vorliegt, wenn keine anderweitigen Stoffe bereits mit der Oberfläche in Verbindung stehen (siehe Abbildung 3-5). Für eine optimale Haftung der Klebung bedarf es daher einer OB, die u.a. eine Oberfläche von Verunreinigungen befreit und auf gleichmäßige physikalisch-chemische Zustände der Oberfläche abzielt (Doobe 2018). Über die Haftungsverbesserung hinaus soll eine Erhöhung der Langzeitbeständigkeit in Form einer Verbesserung des Korrosions- und Ermüdungsverhaltens erfolgen (Rasche 2012). Grundsätzlich kann, laut Rasche, bei der OB zwischen Wirkungsmechanismen unterschieden werden, welche werkstoffseitig die

- chemische Struktur,
- physikalische Struktur und
- Oberflächentopographie verändern.

Eine genaue Vorstellung der einzelnen Prozessschritte und deren Prozessmodule erfolgt nachfolgend.

### Konditionieren

Eine Konditionierung kann sowohl vor als auch nach der eigentlichen Oberflächenbehandlung durchgeführt werden. Für den Anwendungsfall einer temperierten Konditionierung werden die zu fügenden Teile unter bestimmten klimatischen Bedingungen gelagert, sodass Parameter wie Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit geregelt werden können. So kann z.B. nach dem Prozessschritt der Oberflächenvorbehandlung (OVB) und vor Beginn des Fügens das Ziel sein, eine ungewünschte Reaktion zwischen Fügeteiloberfläche und Umgebungsluft zu verhindern, welche die hergestellten Adhäsionseigenschaften ins Negative beeinflussen (Habenicht 2016b). Eine unregelmäßige Konditionierung erfolgt unter der Annahme, dass auf diese Form der Klimatisierung verzichtet wird.

## Reinigen

Unter diesem Prozessschritt wird eine Reinigung bzw. Entfettung der Oberfläche verstanden, sodass Feststoffe wie Staub oder Flüssigkeiten wie Öl entfernt werden (Rasche 2012). Dies hat positiven Einfluss auf die Ausbildung von Adhäsionskräften, weil die Benetzungsfähigkeit des Fügeteils optimiert wird. Wie intensiv eine Reinigung stattfinden muss, ist dabei immer auch abhängig von den an die Haftung gestellten Anforderungen und den verwendeten Klebstoffen, sodass, bei leichten Verschmutzungen oder der Verwendung kontaminationstoleranter Klebstoffe eine Reinigung entfallen kann. Rasche erklärt weiter, dass bei der manuellen Reinigung durch Wischen mit in Reinigungsmittel getränkten Lappen oder Mikrofasertüchern die Oberfläche gesäubert wird. Bei der Anwendung eines Reinigungssprays wird ein Lösungsmittel auf die Oberfläche gesprüht, welches Verunreinigungen löst, die anschließend durch Abspülen entfernt werden (Rasche 2012).

Bei der maschinellen Reinigung in einem Reinigungsbad wird das Füge teil in einem mehrstufigen Prozess in ein Wasserbad mit Reinigungsmittel getaucht, um Verschmutzungen zu lösen (Rasche 2012). Beim Einsatz eines Ultraschallbades trifft die zusätzlich durch Ultraschall in Schwingung gesetzte Reinigungsflüssigkeit auf die zu reinigende Oberfläche und wird wieder abgezogen (vgl. Rasche 2012). Entstehende Kavitationsblasen erzeugen beim Kollabieren einen hohen Druck und Strömungsgeschwindigkeiten, die eine stärkere Reinigungswirkung ermöglichen und Verunreinigungen ablösen (Rasche 2012)

Differenziert werden kann sowohl beim Einsatz von Wasser wie auch flüchtigen organischen Verbindungen (VOC - Volatile Organic Compounds) zwischen warmen und kalten Verfahren. Eine Reinigung durch Abwischen oder Spülen erfolgt z. B. bei Raumtemperatur, wohingegen ein Ultraschallbad häufig bei höheren Temperaturen stattfindet (Habenicht 2009).

## Oberflächenvorbehandlung

Im Vergleich zur Reinigung, die Verunreinigungen einer Oberfläche beseitigt, werden bei mechanischen Verfahren Oberflächen durch Abtragen einer Randschicht verändert (Doobe 2018). Dadurch wird nicht nur ein Reinigungseffekt erzielt, sondern auch die wirksame Oberfläche des Füge teils vergrößert (Habenicht 2009). Das Schmirgeln wird auf einfache Art und Weise dazu genutzt, um die Oberfläche aufzurauen. Dazu werden bei größeren Füge teilen Winkel- oder Bandschleifer verwendet. Mittels rotierender Bürsten, welche händisch oder mechanisch angetrieben werden können, werden lose Verunreinigungsschichten abgetragen (Rasche 2012).

Die effektivste mechanische Vorbehandlung jedoch wird durch das Strahlen erreicht. Beim sogenannten Trockenstrahlen wird ein durch Druckluft beschleunigtes Strahlmittel (z.B. Sand)

innerhalb einer Strahlkabine auf die Oberfläche geschossen und somit, durch den resultierenden Materialabtrag, eine Vergrößerung der wirksamen Oberfläche erreicht (Habenicht 2009). Als wirksame Oberfläche (siehe Abbildung 3-6) wird der für die Benetzung des Klebstoffes zur Verfügung stehende Teil der Oberfläche bezeichnet, welcher von der geometrischen Oberfläche und der wahren Größe abgegrenzt wird (Heckert 2019). Wenn die Erhöhung der kinetischen Energie des Strahlmittels mit Wasserdruck erfolgt, wird vom Nassstrahlen gesprochen. Die nachteilige Luft- bzw. Wasserverschmutzung dieser beiden Strahlverfahren wird beim kryogenen Strahlen vermieden, indem Kohlendioxid in festem Zustand (Trockeneis) als Strahlmittel fungiert. Habenicht erklärt hierzu, dass das unter Umgebungsdruck bei  $-78,5\text{ °C}$  vorliegende Trockeneis-Granulat durch ein Schleuderrad beschleunigt und auf die Oberfläche geschossen werden. Dazu verdeutlicht Rasche, dass es einerseits nach Beschuss zu einer Volumenkontraktion der Randschicht sowie Versprödung von Kontaminationen und andererseits zu einer schlagartigen Erwärmung des Trockeneises komme, welches beim Übergang in den gasförmigen Zustand durch die Volumenzunahme die Verunreinigungen absprengt (Rasche 2012; Habenicht 2009).

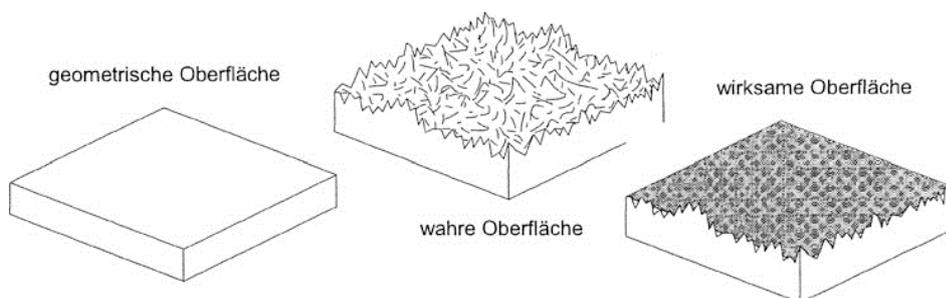


Abbildung 3-6: Oberflächenarten (Habenicht 2016)

Eine verbesserte Haftung kann auch durch eine chemische Veränderung der Oberfläche (häufig bei Metallen, seltener bei Kunststoffen) realisiert werden, was als Beizen bezeichnet wird (Habenicht 2009). Dies wird wegen des hohen (zeitlichen) Aufwands nur eingesetzt, wenn zum Erreichen sicherheitsrelevanter, höchstfester und langzeitbeständiger Klebungen keine alternativen Verfahren zur Verfügung stehen (Rasche 2012).

Aufgrund der Anwendungsspezifität wird dieses Verfahren nicht weiter berücksichtigt.

Wenn keine Flüssigkeiten, sondern Gase die chemische Reaktion auf der Oberfläche auslösen und die Adhäsionsfähigkeit erhöhen, wird von Ozonisieren oder Fluorisieren gesprochen. Dabei wird das zu behandelnde Fügeglied in einer mit Ozon durchmischten Luftkammer behandelt. Das Ozon wird dabei mit einem Generator erzeugt und nach diesem Prozess durch einen ozonerlegenden Katalysator wieder abgeführt. Der Einsatz von Fluor in der Reaktionskammer bei Kunststoffen verändert die Oberfläche auf atomarer Ebene, indem Wasserstoffatome durch Fluoratome substituiert werden, was die Oberflächenpolarität erhöht.

Die erhöhte Polarität der Substratoberfläche wiederum verbessert die Haftung des Klebstoffes auf dieser (Rasche 2012; Doobe 2018).

Um nach einer erfolgreichen OVB dafür zu sorgen, dass die geschaffenen Haftungsbedingungen konserviert werden und keine erneute Deaktivierung der Oberfläche erfolgt, werden Primer eingesetzt, welche die Oberfläche mit einer dünnen Schicht überziehen und z.B. per Walz- oder Tauchvorgang aufgebracht werden (Habenicht 2009). Ein Primer wird auch aufgetragen, um die Adhäsionsfähigkeit selbst zu erhöhen (Silva et al. 2011). Haftvermittler hingegen werden häufig als Bestandteil des Klebstoffes oder Primers auf die Oberfläche aufgetragen und bestehen aus Molekülen, deren unterschiedlich ausgebildete Enden die Ausbildung kovalenter Bindungen zur Fügeiteiloberfläche und zum Klebstoff ermöglichen (Rasche 2012).

Bei einer kombinierten mechanischen und chemischen OVB, wie dem Sandstrahl-Coating-Verfahren (SACO), wird durch mit Silikaten beschichtetes Korund neben dem mechanischen Abtrag auch eine chemische Modifizierung erreicht, da das Korund beim Strahlvorgang einen Teil seiner Beschichtung auf die Oberfläche überträgt und damit die Haftwirkung verbessert (Rasche 2012).

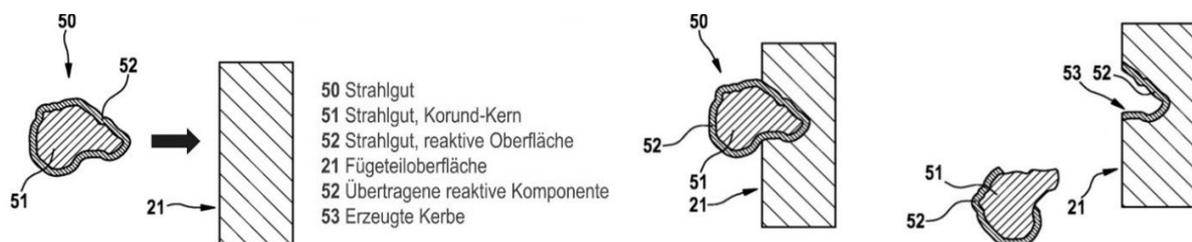


Abbildung 3-7: SACO-Verfahren (Rasche 2012)

In einem letzten Schritt werden die physikalisch-chemischen Verfahren vorgestellt. Darunter zählt das Beflammen zur Vorbehandlung von Kunststoffen, wobei die Fügeiteile an einer oxidierenden Flamme vorbeigeführt werden und dabei Sauerstoff aufgrund des Überschusses in die Oberfläche eingebaut wird (Doobe 2018). Die verbesserte Benetzbarkeit resultiert aus einer erhöhten Polarität und Oberflächenenergie. Wenn der Flamme neben Sauerstoff auch Silan hinzugefügt wird, entstehen durch chemische Reaktionen in der Flamme Silikate, welche sich als Schicht auf der Oberfläche anlagern und zu Haftungsverbesserungen auch bei Metallen oder Keramiken führen können (Rasche 2012).

Laut Doobe sorgt die Absorption der Strahlung eines Lasers dafür, dass das Material energetisch angeregt wird und durch die verdampfende Deckschicht eine neustrukturierte

Oberfläche entsteht. Damit geht die Verdampfung der Verunreinigungen, welche im gasförmigen Zustand abtransportiert werden, einher.

Ein Plasma entsteht, wenn gasförmigen Stoffen hohe Energiebeträge zugeführt werden. Dies führt zu einer Ionisierung des Gases und ein „4. Aggregatzustand“ ist die Folge. Das Plasma bricht Bindungen der Substratoberfläche auf, sodass es durch Reaktion mit dieser aktivierten Oberfläche Verunreinigungen verdampft und die Oberflächenenergie erhöht (Dr.Andreas Winkel 2018a/2019). Beim Atmosphären-Plasma-Verfahren wird das Plasma aus ionisierter Luft oder anderen ionisierten Gasen mittels Hochspannung innerhalb einer Plasmadüse erzeugt und per Druckluft auf die Oberfläche gebracht (Doobe 2018). Das Niederdruckplasmaverfahren findet dagegen in einer Prozesskammer statt, in welche nach Evakuierung das Prozessgas unter niedrigem Druck eingeleitet und das Plasma durch einen Spannungsgenerator gezündet wird. Dabei sind aufgrund des geringen Drucks bei niedriger Substrattemperatur Reaktionen möglich, die ansonsten nur unter Hochtemperaturbedingungen ablaufen würden (Doobe 2018).

Die vorwiegende Vorbehandlung von Kunststofffolien erfolgt durch das Corona-Verfahren, bei dem Luftmoleküle zwischen einem hochfrequenten Spannungsfeld zweier Elektroden ionisiert werden und ein Plasma, sog. „Corona“, erzeugen (Habenicht 2016b). Bei elektrischer Entladung zwischen Elektroden kommt es zum Ladungstransport von Elektronen, welche auf die Substratoberfläche treffen und mittels Oxidation polare Bereiche entstehen lassen, die die Oberflächenenergie erhöhen (Rasche 2012).

### 3.2.2. Kleben

Im nächsten Schritt werden die Prozessschritte des Klebens und deren Prozessmodule vorgestellt. Die Abbildung 3-8 gibt einen Überblick über die im Folgenden thematisierten Prozesse im Zuge der Klebverbindung von Füge­teilen.



Abbildung 3-8: Prozessschritte und Prozessmodule des Klebens

### Bevorratung

Ähnlich zur Konditionierung der Fügeteile bedürfen bestimmte Klebstoffe einer Temperierung, um z.B. Abbindegeschwindigkeiten zu reduzieren und andere Vorgänge bei zu hohen oder zu niedrigen Lagertemperaturen zu vermeiden und somit die Haltbarkeit der Klebstoffe zu erhöhen (Rasche 2012).

Die eigentliche Bevorratung ist abhängig von der Viskosität des zu verarbeitenden Klebstoffes. Flüssige bzw. niedrigviskose Klebstoffe können in offenen Behältern oder Druckbehältern bevorratet und gefördert werden. Bei hoch gefüllten flüssigen Klebstoffen kann es zu einer Entmischung während der Lagerung kommen. Für diesen Fall werden Rührwerke eingesetzt, welche zur erneuten Homogenisierung des Klebstoffes beitragen, bevor er gefördert wird. Dies kann händisch erfolgen oder per elektrischem oder pneumatischem Antrieb. (Rasche 2012)

### Fördern

Um eine Förderung pastöser Klebstoffe zu sichern, werden diese zunächst unter Wärmezufuhr bevorratet, indem mittels Heizmanschetten die Fässer beheizt und durch Heizschläuche transportiert werden. Die eigentliche Förderung geschieht häufig durch Druckbehälter mit Folgekolben.

Im Fall der in fester Form vorliegenden Schmelzklebstoffe werden diese serienmäßig durch Fassschmelzanlagen gleichzeitig aufgeschmolzen und gefördert. Das Aufschmelzen erfolgt dabei durch eine beheizte Folgeplatte (Onusseit 2008). Diese wird auf den in einem Fass befindlichen Klebstoff aufgesetzt und durch einen elektrisch oder pneumatischen angetriebenen Hubzylinder nach dem Aufschmelzen direkt oder durch eine zwischengeschaltete Pumpe zur Auftragseinheit gefördert. Auch möglich ist der Einsatz von Tankschmelzanlagen, die den Klebstoff lediglich aufschmelzen und fördern, in denen aber keine Auftragseinheit integriert ist (Rasche 2012).

### Mischen, Dosieren und Applizieren

Die Prozessschritte des Mischens, Dosierens und Applizierens sind in der industriellen Verarbeitung oft eng miteinander verknüpft und werden daher häufig kombiniert durch halb- bzw. vollautomatische Prozessanlagen durchgeführt (Habenicht 2016b).

Durch das Mischen werden Klebstoffkomponenten, wie z.B. im Fall von 2-komponentigen Epoxidharzen, im vorgesehenen Verhältnis homogenisiert (Silva et al. 2011). Wenn dies chargenweise mittels elektrischer Rührwerke geschieht, wird von Batch-Mischen gesprochen. Bei einer statischen Mischung werden Klebstoffe durch Druckluft- und Pumpeneinsatz in ein Mischrohr geströmt, in welchem durch fest installierte Mischwendeln die Mischung erfolgt. Bei

viskoserer Klebstoffsystemen kann ein höherer Energieeintrag durch mechanisch angetriebene Mischwendeln erfolgen (statischdynamische Mischung). Eine rein dynamische Mischung erfolgt durch rotierende Rührwerke, die mit einem elektrischen oder pneumatischen Motor angetrieben werden (Silva et al. 2011).

Die Dosierung definiert Habenicht als die „Steuerung aller physikalischen und/oder mechanischen Parameter im Dosiersystem bis zum Augenblick des Austritts der Masse“. Entsprechende Dosiersysteme kombinieren die Klebstoffförderung und -dosierung. Diese umfassen daher die Funktionseinheiten Pumpen und Dosierventile. An dieser Stelle wird auf eine differenzierte Vorstellung aller technischen Spezifikationen verzichtet, da die unterschiedliche Pumpentechnik- und Dosierventilartwahl keinen erheblichen Einfluss auf den PCF hat. Es sei lediglich erwähnt, dass der Pumpen- und Dosierventilantrieb elektrisch oder pneumatisch erfolgen kann. Neben einer automatisierten Dosierung ist auch eine manuelle Dosierung möglich, die unmittelbar mit der Applikation verknüpft ist. Dabei wird mit Handauftragspistolen und Klebstoffkartuschen gearbeitet (Silva et al. 2011). Alternativ kann im Industriefall ein automatisiertes Applikationsverfahren durch Roboter erfolgen, was sich durch eine hohe Reproduktionsgenauigkeit auszeichnet.

### Fügen und Fixieren

Nach dem Klebstoffauftrag erfolgt der eigentliche Fügevorgang, indem die beiden Fügeteile in Verbindung gebracht und fixiert werden, um eine optimale bzw. passgenaue Aushärtung zu ermöglichen. Dabei ist sowohl ein manuelles als auch automatisiertes Fügen denkbar. Die Fixierung der Fügeteile erfolgt durch mechanische Druckaufbringung. Im einfachsten Fall erfolgt eine Fixierung durch Klettbander, Klemmen oder Gewichte. (Habenicht 2016b).

### Aushärten, Bestrahlen und Abdampfen

Damit die Aushärtung oder das Abbinden des Klebstoffes, bei der er seine Kohäsionsfestigkeit und die notwendigen mechanischen sowie chemischen Eigenschaften ausbildet, in Abhängigkeit des Klebstoffes entweder möglich oder aus Zeitgründen beschleunigt wird (Silva et al. 2011), gibt es im Allgemeinen eine Reihe von klebstoffspezifischen Verfahren (Habenicht 2009). Gemäß den betrachteten Klebstoffen ergeben sich unterschiedliche Aushärtungsverfahren:

Bei strahlungshärtenden Klebstoffen wie Acrylaten erfolgt eine Bestrahlung, die für eine Aushärtung unabdingbar ist, oft durch UV-Quellen, z.B. mit LED-Strahlern. Die technische Umsetzung kann in Strahlungskammern oder durch mobile Flächen- oder Punktstrahler unter Einsatz elektrischer Energie erfolgen. Die Strahlung hat einen Zerfall der sogenannten

Fotoinitiatoren des Klebstoffes und eine anschließende Polymerisation zur Folge. (Rasche 2012)

Bei Dispersionsklebstoffen wird der Prozess als Abdampfen bezeichnet. Bei diesem physikalischen Vorgang verdunsten die flüchtigen Bestandteile wie Lösungsmittel- bzw. Wasserbestandteile des Klebstoffes bei Raumtemperatur oder Wärmezufuhr, sodass die Polymere in der Klebefuge zurückbleiben (Onusseit 2008).

Von Aushärten wird gesprochen, wenn Reaktionsklebstoffe wie Epoxidharze durch chemische Reaktion eine feste Klebschicht bilden, was unter Wärmezufuhr geschieht (Habenicht 2016). Es wird sich in dieser Untersuchung aufgrund der Generierbarkeit von Energiedaten auf das Aushärten bzw. Abdampfen durch Wärmekonvektion und Induktionserwärmung fokussiert. Beim Warmabbinden werden die Fügeteile in einem Heißluftofen durch das Prinzip der Konvektion erwärmt. Die Induktionserwärmung ermöglicht die Wärmeenergiezufuhr, indem stromdurchflossene Spulen elektromagnetische Wechselfelder erzeugen. Die entstehenden Wirbelströme innerhalb leitfähiger Werkstücke sind für die indirekte Erwärmung der Klebefuge verantwortlich. Bei den Reaktionsklebstoffen ist auch eine Abbindung bei Raumtemperatur ohne zusätzliche Energiezufuhr möglich (Habenicht 2016, p 97). So können bspw. Silikone bei Raumtemperatur aushärten (Onusseit 2008, 99ff).

#### Auftragskontrolle und zerstörungsfreie Prüfung (zfP)

Um gerade bei automatisierten Prozessen die korrekte Klebstoffaufbringung zu kontrollieren, erfolgt dies entweder rein visuell durch den Menschen oder z.B. durch ein Laserscanning. Entscheidend für die Bewertung sind Menge, Ort und Gleichmäßigkeit des Auftrages (Rasche 2012).

Die zerstörungsfreie Prüfung soll, z.B. mit Thermografie durch Verfolgen lokaler Temperaturunterschiede Rückschlüsse auf fehlenden Klebstoff oder eine fehlerhafte Verteilung ermöglichen.

Aufgrund von nicht generierbaren Energiedaten und der Tatsache, dass diese Prozessschritte eine eher untergeordnete Rolle spielen, werden diese im Rahmen dieses Projektes nicht weiter fokussiert.

### 3.3. PCF von Klebstoffsystemen

Mithilfe der in 2.2 aufgezeigten theoretischen Anforderungen, die an eine PCF-Studie gestellt werden, erfolgt in den folgenden Abschnitten die Erarbeitung einer Vorgehensweise zur Erstellung von PCFs für Klebstoffsysteme.

## Produktauswahl und Festlegung von Ziel und funktioneller Einheit

Der Grund für die Durchführung der PCF-Studie resultiert aus der nur rudimentär vorhandenen Datenbasis der Klebstoffanwendung, die eine tiefgehende Beurteilung hinsichtlich des GWP notwendig macht. Neben dem übergeordneten Ziel der Erarbeitung einer Vorgehensweise bei der Erstellung von PCFs für Klebstoffsysteme entlang des Lebenszyklus, werden weitere untergeordnete Ziele verfolgt. Ein Ziel ist es innerhalb der Nutzungsphase das GWP der verschiedenen Prozessmodule zu quantifizieren. Das ermöglicht, energie- und emissionsintensive Prozessmodule innerhalb eines Prozessschrittes hervorzuheben und diese falls technisch und wirtschaftlich möglich, gegen Prozessmodule mit einem geringeren GWP zu substituieren. Zudem ergibt sich die Möglichkeit eines Vergleichs hinsichtlich der Klebstoffherstellung<sup>3</sup> und der Klebstoffnutzung<sup>4</sup>. Die mit der Studie angesprochene Zielgruppe sind Anwender von Klebverfahren in der Industrie, die eine energetische Transparenz für ihre Prozesse erhalten und durch das Bewusstsein der Umweltwirkungen ggf. Prozessoptimierungen in Erwägung ziehen wollen. Die beabsichtigte Kommunikation der Ergebnisse erfolgt über eine Datenbank, in der die Ergebnisse der Studie veröffentlicht werden. Weiterhin soll die Datenbank dazu dienen, dass Anwender die GWP-Daten eigener Prozesse hinterlegen können.

Die zu untersuchenden Produkte stellen die unterschiedlichen Klebstoffsysteme dar. Die Erhebung von Sekundär- als auch Primärdaten, ist abhängig von der Bereitstellung der Daten durch Industriepartner und der generellen Möglichkeit Untersuchungen der Prozesse bei den Projektpartnern vor Ort durchführen zu können.

Im Rahmen der Untersuchungen wird als funktionelle Einheit die zu fügende Fläche  $A_{FE} = 10\text{cm}^2$  bzw.  $1\text{m}^2$  verwendet. Als Basis der Berechnung des PCF ermöglicht die Definition einer funktionellen Einheit in der Folge den Vergleich zwischen verschiedenen Prozessmodulen, Prozessschritten, Prozessketten oder auch Phasen im Lebenszyklus. Übergeordnet wird ein bewertender Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren unter bestimmten Voraussetzungen realisierbar. Dabei muss jedoch die bei einem anderen Fügeverfahren jeweilige konstruktionsbedingte Anpassung berücksichtigt werden.

## Festlegen des Untersuchungsrahmens und der Systemgrenze

---

<sup>3</sup> Herstellung umfasst in diesem Zusammenhang die Phasen der Rohstoffgewinnung, der Klebstoffproduktion und der Distribution bis zum Standort der Klebstoffnutzung.

<sup>4</sup> Klebstoffnutzung umfasst die Phasen der Oberflächenvorbehandlung sowie der Klebstoffanwendung.

Mit der Definition der Systemgrenze erfolgt die Festlegung des zu untersuchenden Systems und die Abgrenzung zur Systemumgebung. Durch die Festlegung werden ferner diejenigen Prozessmodule bestimmt, die als Teil des PCF berücksichtigt werden.

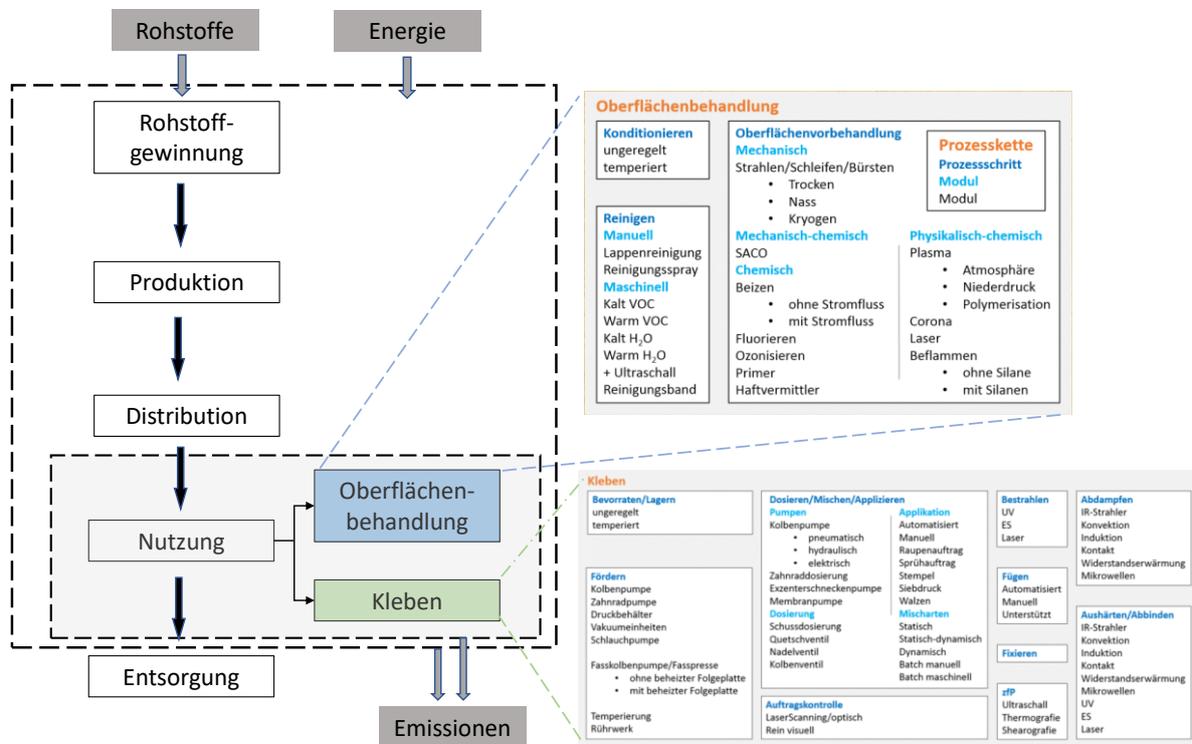


Abbildung 3-9: Systemgrenzen im Kontext des Lebenszyklus einer Klebstoffanwendung

Wie Abbildung 3-9 zu entnehmen ist, umfasst das bilanzierte System die Phasen von der Rohstoffgewinnung des Klebstoffes inklusive der Nutzungsphase. Die Phase der Entsorgung befindet sich außerhalb der Systemgrenzen und ist somit nicht Bestandteil der Betrachtung. Im Fokus der Untersuchung steht die Nutzungsphase mit den Prozessketten der Oberflächenbehandlung und des Klebens. Die Daten der vorgelagerten Phasen, der Rohstoffgewinnung, des Transports und der Herstellung der Klebstoffe werden über EPDs ermittelt.

Im Zuge der Festlegung des Untersuchungsrahmens wird zunächst bestimmt, welche Energieströme gemessen und ausgewertet werden. Folgende Auflistung zeigt die berücksichtigten Energieträger:

- Elektrische Arbeit
- Druckluft (als spezielle Form der elektrischen Arbeit)
- Thermische Energie
- Manuelle Arbeit des Menschen

Von der Bilanzierung weiterer Inputs, wie z.B. Betriebsstoffen, wird abgesehen. Die bilanzierten THGE umfassen alle THG, die auf CO<sub>2</sub>-Äquivalente normiert werden. Zudem muss die technische Machbarkeit der Erfassung bei den Projektpartnern vor Ort gegeben sein bzw. ermöglicht werden. Es werden außerdem nur solche Treibhausgase in die Systemgrenzen mit einbezogen, die durch direkte Nutzung emittiert werden. So wird zum Beispiel bei einem Primerauftrag während der OVB ein nachträgliches Abdampfen des Lösemittels nicht bilanziert.

Im Zuge der Festlegung des Untersuchungsrahmens ergeben sich Anforderungen an die Daten und deren Qualität. Die Primärdaten und deren Berechnung basieren auf der Grundlage direkter elektrischer Leistungsmessungen, deren Qualität aufgrund entsprechender Analysator-Messgeräte als hoch eingestuft werden kann, da die Messgenauigkeit des Messgerätes vom Hersteller mit besser als 1 % deklariert ist (vgl. Chauvin Arnoux Group 2019).

Die Berechnung beruht sowohl auf selbst erfassten Primärdaten als auch auf Sekundärdaten. Dabei wird bei der Sammlung von technischen Datenblättern oder Verbrauchsangaben von Herstellern stets auf die Validität der Daten geachtet. Zunächst werden bei der Herkunft der Daten etablierte Anlagenhersteller und Unternehmen im Bereich der Klebtechnik präferiert. Darüber hinaus wird die Validität der angefragten Daten verschiedener Quellen miteinander verglichen.

Die Entscheidungen, welche Prozessmodule im Rahmen dieses Projektes analysiert werden, ist abhängig von der Generierbarkeit bzw. Verfügbarkeit der jeweiligen Daten. Aufgrund der anhaltenden Pandemie und der damit einhergehenden beschränkten Möglichkeit Untersuchungen bei Unternehmen vor Ort durchzuführen, stellt die Berechnung von GWPs anhand der Sekundärdaten aus Datenblättern eine weitere Möglichkeit dar. Aber auch hier ist die Datenlage von verschiedenen Faktoren abhängig. In erster Linie umfassen diese die Bereitschaft der Anwender und/oder Hersteller verschiedener Prozessmodulanlagen, solche Daten zur weiteren Analyse zur Verfügung zu stellen. In der Folge ist eine Abdeckung aller Prozessmodule nicht möglich.

Letztendlich werden verschiedene Verfahren bzw. Methoden zur Sammlung von Primär- und Sekundärdaten angewandt, die sich aus anwendungsspezifischen Problemen (z.B. der Vielzahl von manuellen Arbeiten) ergeben und im nächsten Abschnitt thematisiert werden.

#### Erfassung der Primär- und Sekundärdaten

Die Grundlage zur Bestimmung des PCF sind die Sekundärdaten, die für die Rohstoffgewinnung, Produktion und Distribution der Klebstoffe aus vorhandenen

Environmental Product Declarations und Energieverbrauchsdaten bezogen werden und die Daten der Prozessmodule, die bei der Klebstoffanwendung zum Einsatz kommen. In diesem Abschnitt werden die Methoden vorgestellt, die zur Sammlung von Primär- und Sekundärdaten angewandt werden.

### Rohstoffgewinnung, Produktion und Distribution der Klebstoffsysteme

Für die Phasen der Rohstoffgewinnung, Klebstoffproduktion und -distribution werden die GWP anhand von Sekundärdaten aus Environmental Product Declarations (EPD) unterschiedlicher Klebstoffsystemen bezogen. In den EPDs werden umweltbezogene Wirkungen verschiedener Produkte über ihren Lebenszyklus hinweg nach den Grundsätzen der Ökobilanzierung quantifiziert (vgl. Institut Bauen und Umwelt e.V.). Über die Wirkkategorie des Treibhauseffektes hinweg werden weitere Umweltauswirkungen dargestellt, die kein Untersuchungsgegenstand von PCFs sind. Ziel der Erarbeitung der EPDs ist es, einen Vergleich der Umwelteinflüsse verschiedener Bauprodukte zu ermöglichen, um damit einhergehend das Nachhaltigkeitsbewusstsein zu schärfen (vgl. Institut Bauen und Umwelt e.V.).

Es konnten mit den vom Industrieverband Klebstoffe e.V., Institut Bauen und Umwelt e.V. und Association of the EUROPEAN ADHESIVE and SEALANT INDUSTRY veröffentlichten EPDs und den von verschiedenen Klebstoffherstellern im Zuge des Projekts zur Verfügung gestellten EPDs Sekundärdaten für folgende Klebstoffe zusammengestellt werden:

- Acrylate
- Epoxidharzklebstoffe
- Dispersionsklebstoffe
- Silikone
- Polyurethane

Die in den EPDs beinhalteten Einträge A1=Rohstoffversorgung, A2=Transport und A3=Herstellung, für welche in Summe ein GWP-Wert in g CO<sub>2</sub>e/g Klebstoff ausgewiesen wird, dienen der Datengrundlage der Phasen Rohstoffgewinnung und Produktion. Weiterhin gibt es für den Eintrag A4=Transport einen GWP-Wert, der als Referenzwert für die Distribution im Lebenszyklus angenommen wird.

Das Ziel ist es, das GWP für die Klebstoffmenge zu ermitteln, die für das Kleben einer bestimmten Substratoberfläche benötigt wird. Dafür werden zunächst mit der charakteristischen minimalen und maximalen Klebstoffdichte und variierbaren Klebstoffschichtdicke die Masse des jeweiligen Klebstoffes berechnet, der es zum Fügen der Referenzfläche von 10 cm<sup>2</sup> (funktionelle Einheit) bedarf (siehe Formel 3.1).

$$m = \rho \times D \times A_{FE} \quad (3.1)$$

Der in Abbildung 3-10 gezeigte Ausschnitt der Berechnungsmatrix für ausgewählte Epoxid-Klebstoffe zeigt, dass die GWP für die Rohstoffgewinnung sowie Klebstoffproduktion (A1-A3) und für die Distribution (A4) abhängig von minimaler und maximaler Dichte, Klebschichtdicke sowie Referenzfläche sind. Es ist möglich, je nach Anwendungsfall, die rot markierten Werte der Schichtdicke und Referenzfläche anzupassen, um abschließend das spezifische minimale bzw. maximale GWP pro Referenzfläche (vgl. Formel 3.2) zu erhalten:

$$GWP_{KS,FE} = m \times GWP_{A1-A3,A4} \quad (3.2)$$

		Referenzfläche: 10 cm <sup>2</sup>			Masse KS für Referenzfläche [g] bei			A1-A3 GWP [g CO <sub>2</sub> -Äq. pro Referenzfläche] bei			A4 GWP [g CO <sub>2</sub> -Äq. pro Referenzfläche] bei					
Epoxy	Dichte			GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.] pro kg KS		A4 transport distance [km]	Schichtdicke [mm]	min. Dichte	max. Dichte	mittlerer Dichte	min. Dichte	max. Dichte	mittlerer Dichte	min. Dichte	max. Dichte	mittlerer Dichte
Beschreibung	min.	max.	mittel	A1-A3	A4											
Epoxidharzmörtel FIS ER 390 S	1,6	1,6	1,600	2,66E+00	2,51E-02	500	1	1,6	1,6	1,6	4,256	4,256	4,256	0,04016	0,04016	0,04016
Reaktionsharze auf Epoxidharzbasis, wässrig, ungefüllt	1	1,25	1,125	3,30E+00	2,51E-02	500	1	1	1,25	1,125	3,3	4,125	3,7125	0,0251	0,031375	0,0282375
Reactive resins based on epoxy resin, aqueous/unfilled	1	1,25	1,125	3,28E+00	4,91E-02	1000	1	1	1,25	1,125	3,28	4,1	3,69	0,0491	0,061375	0,0552375
Reaktionsharze auf Epoxidharzbasis, gefüllt oder wässrig, gefüllt mit hohem Gehalt an Füllstoffen	1,1	2,5	1,800	2,66E+00	2,51E-02	500	1	1,1	2,5	1,8	2,926	6,65	4,788	0,02761	0,06275	0,04518

Abbildung 3-10: GWP-Berechnungsmatrix für beispielhafte Epoxidharze

### 3.4. Erfassung von Sekundärdaten durch Datenblätter

Aufgrund der Corona-Pandemie waren Untersuchungen bei Industrieunternehmen nur eingeschränkt möglich. Deshalb wurde ergänzend zur messtechnischen Erfassung von Primärdaten die theoretische Ermittlung anhand von Datenblättern zur Festigung der Datenlage umgesetzt. Mithilfe einer Kampagne bei der Unternehmen im Bereich der Klebstoffanwendung per E-Mail und Telefon kontaktiert wurden, konnten 77 Datenblätter erfasst werden. Aufgrund der Analyse der Datenblätter und Gesprächen mit technischem Fachpersonal der Unternehmen konnte eine Sachbilanzierung für 28 Anlagen durchgeführt werden. Das jeweilige Vorgehen wird für unterschiedliche Anlagen auszugsweise anhand der verschiedenen Energieformen in den folgenden Abschnitten dargestellt.

#### Elektrische Energie:

In einem ersten Schritt wird theoretisch die mittlere elektrische Leistung bestimmt, die während eines Prozesses abgerufen wird, indem die elektrische Anschlussleistung  $P_A$  mit einem Korrekturfaktor  $k_f$  mit dem Wertebereich  $\{0 < k_f \leq 1\}$  multipliziert wird. Dieses Vorgehen wurde in einem Expertengespräch erarbeitet (Limón GmbH). Dafür ist es notwendig, den Prozessablauf dahingehend zu bewerten, zu welchen Zeitpunkten und wie lange ein hoher bzw. geringer Leistungsbedarf vorliegt, um einen geeigneten Korrekturfaktor festzulegen.

$$P_{el,mittel} = P_A \times k_f \quad (3.3)$$

Um in einem weiteren Schritt die elektrische Arbeit für das jeweilige Prozessmodul berechnen zu können, muss für jeden Prozess die Betriebsdauer  $t_{FE}$  für die Bearbeitung der funktionellen Einheit eruiert werden. Somit ergibt sich folgende theoretische Berechnungsformel für die elektrische Arbeit pro Fläche der funktionellen Einheit:

$$w_{el,FE} = P_{el,mittel} \times t_{FE} \quad (3.4)$$

#### Thermische Energie:

Unter thermischer Energie oder Wärmeenergie wird ein Teil der inneren Energie eines Systems verstanden, der in der Bewegung der Atome und ihrer Anordnung und somit in einem Stoff gespeichert ist (vgl. Luke 2018, S. 66). Um die Wärmeenergie pro Zeit während einer Zustandsänderung zu berechnen, steht die Berechnungsformel 3.7 zur Verfügung (vgl. Stephan et. 2009, S. 85).

$$\dot{Q} = \frac{\partial Q}{\partial t} = m \times c_{p,W} \times \Delta T \quad (3.5)$$

Die Berechnung der spezifischen Wärmenergie pro Fläche der funktionellen Einheit erfolgt schließlich mit Hilfe folgender Formel:

$$q_{FE} = \frac{m \times c_p \times W \times \Delta T}{A_{ges}} \times A_{FE} \quad (3.6)$$

Beispiel: Ultraschallbadreinigung:

Die theoretische Ermittlung der elektrischen sowie thermischen Energie wird nachfolgend exemplarisch anhand eines Ultraschallbads erläutert. Als Reinigungsmethode der Prozesskette Oberflächenbehandlung dient dieses der Entfettung der Substrate, welche bei einer empfohlenen Wassertemperatur von 55 °C erfolgt; die maximale Eingangstemperatur des Wassers sollte dabei 40 °C nicht überschreiten, um das Heizsystem nicht zu beschädigen (vgl. Reichmann Industrieservice).

Tabelle 3-1: Technische Spezifikationen des Ultraschallbads (Allplax GmbH & Co. KG 2018, S. 13)

Bezeichnung	Wert	Einheit
Wärmeleistung $\dot{Q}$	600	W
Ultraschalleistung $P_U$	600	W
max. Bearbeitungsfläche	1.000	cm <sup>2</sup>
Max. Wassermenge	19,980	l
Wassertemperatur ein	40	°C
Wassertemperatur zur Entfettung	55	°C
Dauer zum Entgasen der Flüssigkeit	10	min
Reinigungsdauer	20	min

Die in Tabelle 3-1 zu findenden technischen Spezifikationen können dem technischen Datenblatt der Standardanlage Allpax Palssonc UD30 zur Ultraschallreinigung entnommen werden.

Nach dem Befüllen des Behälters mit vorgewärmtem Wasser und Hinzugabe des Reinigungszusatzes bedarf es zunächst einer Entgasung der Flüssigkeit. Gemäß Formel 3.5 ergibt sich unter Annahme von  $k_f = 0,75$  eine durchschnittlich abgerufene Ultraschalleistung in Höhe von  $P_{el,mittel} = 450 \text{ W}$ , was bei einer Betriebszeit von  $t = 10 \text{ min}$  und einer Bearbeitungsfläche  $A_{ges} = 1000 \text{ cm}^2$  einer spezifischen elektrischen Arbeit von

$$w_{el,Entgasen} = 450 \text{ W} \times 0,167 \text{ h} \times \frac{10 \text{ cm}^2}{1000 \text{ cm}^2} = 0,750 \frac{\text{Wh}}{10 \text{ cm}^2} \text{ entspricht.}$$

Nach Umstellung der Formel 3.5 kann im nächsten Schritt die Zeit berechnet werden, um die Flüssigkeit auf die zur Entfettung angenommene Temperatur von 55 °C mit der gegebenen Heizleistung aufzuwärmen:

$$t_{\text{Aufheizen}} = \frac{m \times c_{p,w} \times \Delta T}{\dot{Q}} = 2088,4 \text{ s} = 0,580 \text{ h}.$$

Dabei wird mit der spezifischen Wärmekapazität von Wasser gerechnet. Die veränderte Zusammensetzung der Flüssigkeit durch Reinigungsmittel bleibt unberücksichtigt.

Somit beläuft sich die spezifische thermische Energie für den Aufheizvorgang in Bezug zur funktionellen Einheit auf

$$q_{\text{Aufheizen}} = w_{\text{el,Aufheizen}} = 600 \text{ W} \times 0,580 \text{ h} \times \frac{10 \text{ cm}^2}{1000 \text{ cm}^2} = 3,481 \frac{\text{Wh}}{10 \text{ cm}^2}.$$

Es wird davon ausgegangen, dass die Reinigungsflüssigkeit des Ultraschallbades für zwei Reinigungsprozesse verwendet werden kann. Als Folge halbiert sich der Energiebedarf für den Entgasungs- und Heizvorgang.

Die spezifische elektrische Energie, die während der eigentlichen Reinigungszeit  $t = 20 \text{ min}$  für die Ultraschallbehandlung benötigt wird, berechnet sich analog zur Entgasung und beträgt

$$w_{\text{el,Reinigen}} = 1,500 \frac{\text{Wh}}{10 \text{ cm}^2}.$$

Abschließend wird noch die Energie berücksichtigt, die zum Halten der Betriebstemperatur während des Reinigungsprozesses benötigt wird. Dazu wird aus Gründen der Vereinfachung angenommen, dass im Mittel eine Heizleistung von  $\dot{Q}_{\text{mittel}} = 120 \text{ W}$  aufgewendet wird, sodass eine Heizenergie von  $w_{\text{el,Reinigen,FE}} = q_{\text{Reinigen,FE}} = 0,400 \frac{\text{Wh}}{10 \text{ cm}^2}$  folgt.

### Druckluft:

Für verschiedene Prozessmodule bedarf es eines Prozessgases in Form von Druckluft. Die Bereitstellung dieser erfolgt über Kompressoren, die Luft durch das Verrichten von Arbeit verdichten. Die Kompressoren werden mit elektrischer Energie versorgt. Somit stellt Druckluft eine spezielle Form der elektrischen Arbeit dar. Das Ziel ist die Bestimmung des spezifischen Druckluftenergieverbrauches für die Fläche der funktionellen Einheit mit Hilfe des benötigten Volumenstroms  $\dot{V}$  in einem bekannten Betriebsdruck  $p$  für das jeweilige Prozessmodul.

Um den Effizienzgrad von Kompressoren zu vergleichen, wird der spezifische Leistungsbedarf verwendet, der die elektrische Gesamtaufnahmeleistung bei Maximaldruck ins Verhältnis zur Liefermenge an entspannter Luft setzt. In Abbildung 3-11 wird der spezifische Leistungsbedarf

bei unterschiedlichen Maximaldrücken im Verlauf dargestellt (Praxisleitfaden: Druckluft effizient nutzen (IHK Nürnberg für Mittelfranken 2012)).

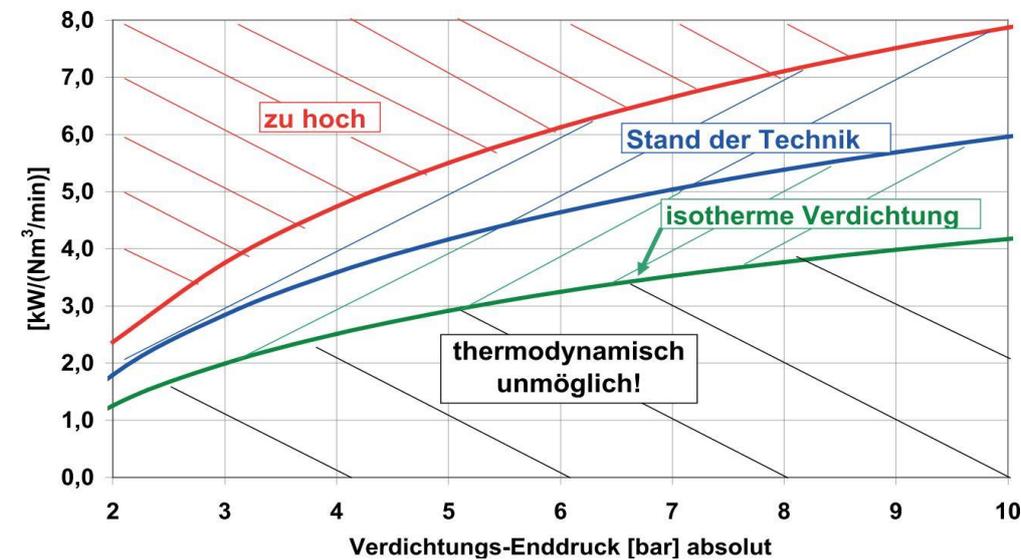


Abbildung 3-11: Spezifischer Leistungsbedarf von Kompressoren (IHK Nürnberg für Mittelfranken 2012)

Die spezifischen Energien bei einem bestimmten Druckniveau sowie die für die Berechnungen angenommenen spezifischen Leistungswerte sind in nachfolgender Tabelle (siehe Tabelle 3-2) aufgezeigt. Dabei wird von einer durchschnittlichen Effizienz der Kompressoren ausgegangen.

Tabelle 3-2: Spezifische Energiebedarfe von Kompressoren

Nenndruck in bar absolut	spez. Leistung in kW/(m³/min)	spez. Leistung in W/(m³/min)	spez. Arbeit in Wh/m³
2	2,25	2.250	37,50
3	3,50	3.500	58,33
4	4,50	4.500	75,00
5	5,25	5.250	87,50
6	6,00	6.000	100,00
7	6,75	6.750	112,50
8	7,00	7.000	116,67
9	7,25	7.250	120,83
10	8,00	8.000	133,33

Schließlich ist es nach der Bestimmung der spezifischen Arbeiten  $w_{DRL}$  mit Hilfe der Druckluftverbrauchswerte  $\dot{V}$  und der Bearbeitungsdauer pro funktioneller Einheit  $t_{DRL,FE}$

möglich, die spezifische Arbeit für die Bearbeitung der funktionellen Einheit  $w_{DRL,FE}$  zu ermitteln.

$$w_{DRL,FE} = w_{DRL} \times \dot{V} \times t_{DRL,FE} \quad (3.7)$$

### Beispiel Beflammen:

Nach Beschreibung des Vorgehens bei der theoretischen Ermittlung von elektrischer und thermischer Energie anhand des Ultraschallbades, liegt nun der Fokus auf einer zur Oberflächenvorbehandlung eingesetzten Beflammungsanlage vom Typ FTS (Fa. Arcotec), bei der in Kombination sowohl elektrische und thermische als auch pneumatische Energie benötigt wird. Die Prozessanlage erzeugt ein Erdgas/-Luftgemisch, welches verbrannt wird. Die Substratoberfläche wird durch die entsprechende mobile Beflammungseinheit aktiviert.

Tabelle 3-3: Technische Spezifikationen Beflammungsanlage (Arcotec GmbH 2009, S. 1)

Bezeichnung	Wert	Einheit
Elektrische Anschlussleistung $P_A$	1.950	W
Luftvolumenstrom $\dot{V}_L$	90	m <sup>3</sup> /h
Druckluftniveau $p$	7	bar
Gasvolumenstrom $\dot{V}_G$	11	m <sup>3</sup> /h
Brennerarbeitsbreite $b$	10	cm
Geschwindigkeit des Brenners $v$	30	cm/s
Heizwert Erdgas $H_{i,Erdgas}$	9.770	Wh/m <sup>3</sup>

Aus Tabelle 3.2 lässt sich für einen Nenndruck von  $p = 7 \text{ bar}$  der spezifische Energiebedarf eines Kompressors in Höhe von  $w_{DRL} = 112,5 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3}$  entnehmen.

Weiterhin folgt aus der Brennergeschwindigkeit  $v = 30 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  und -arbeitsbreite  $b = 10 \text{ cm}$  die bearbeitete Fläche  $\dot{A}_{ges} = 300 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} = 1.080.000 \frac{\text{cm}^2}{\text{h}}$ .

Mit der Dauer  $t_{DRL,FE} = t_{FE} = \frac{1 \text{ h}}{1.080.000 \text{ cm}^2} \times 10 \text{ cm}^2 = 9,259E - 06 \frac{\text{h}}{10 \text{ cm}^2}$  ergibt sich folgende Berechnung:

$$w_{DRL,FE} = 112,5 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3} \times 90 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 9,26E - 06 \frac{\text{h}}{10 \text{ cm}^2} = 0,094 \frac{\text{Wh}}{10 \text{ cm}^2}$$

Die spezifische elektrische Arbeit berechnet sich analog zu dem Vorgehen des vorherigen Beispiels:

$$w_{el,FE} = 4000 \text{ W} \times 9,26 \text{ E} - 06 \frac{\text{h}}{10 \text{ cm}^2} = 0,018 \frac{\text{Wh}}{10 \text{ cm}^2}.$$

Abschließend berechnet sich die durch den Energieträger Erdgas bereitgestellte thermische Arbeit wie folgt:

$$w_{th,FE} = \dot{V}_G \times H_{i,Erdgas} \times t_{FE} = 0,995 \frac{\text{Wh}}{10 \text{ cm}^2}.$$

### 3.5. Bilanzierung manueller Prozesse

Da eine Vielzahl von Tätigkeiten im Laufe einer Klebstoffanwendung, besonders im Bereich der Applikation, durch manuelle Betätigung des Menschen umgesetzt werden, ist es zunächst nötig, eine geeignete Methode für die Bestimmung des Energiebedarfs des Menschen bei diesen Arbeiten festzulegen. Als methodische Grundlage dient das metabolische Äquivalent (MET), das den Energiebedarf verschiedener Tätigkeiten wiedergibt (vgl. Stemper, S. 82–83). Dabei entspricht 1 MET einem stündlichen Ruheumsatz des Menschen.

$$1 \text{ MET} = 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{h}} = 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{h}} = 1,166 \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{h}} \quad (3.8)$$

Je nach Intensität einer Belastung steigt der Stoffwechselumsatz und der Energiebedarf des Menschen, was sich in einem höheren MET widerspiegelt. Zur Bestimmung des individuellen menschlichen Energieverbrauchs  $W_{\text{manuell}}$  wird schließlich das MET in Bezug zum Körpergewicht gesetzt. Von einer zusätzlichen Berücksichtigung unterschiedlicher körperlicher Konstitutionen, dem Geschlecht oder Alter wird zur Vereinfachung abgesehen.

$$W_{\text{manuell,FE}} = \text{MET} \times m_{\text{Körper}} \times t_{\text{manuell,FE}} \quad (3.9)$$

Für die klebspezifischen manuellen Tätigkeiten werden jeweils METs bestimmt, die es erlauben, den Energiebedarf in Wattstunden zu bestimmen. Die Ausgangsbasis für die Berechnung sind MET-Werte verschiedener Aktivitäten. Diese Ausgangswerte werden auf die jeweiligen manuellen Tätigkeiten, die im Zuge der untersuchten Prozessmodule notwendig sind, übertragen. In Abbildung 3-12 sind die Ergebnisse der Bestimmung dargestellt.

Prozesskette	Prozessschritt	Prozessmodul	Metabolisches Äquivalent	
			Händisch	mit technischer Unterstützung
Oberflächen- behandlung	<i>Reinigen</i>	Lappen/Reinigungsspray	3,5	-
	<i>Oberflächen- vorbehandlung</i>	Schleifen	4,6	3,0
		Strahlen	-	3,0
		kryogenes Strahlen	-	4,0
		manuelles Beflammen	-	4,0
		Primer-/ Haftvermittlerauftrag	2,7	-
Kleben	<i>Fördern</i>	Rührwerk	-	2,4
	<i>Mischen</i>	Batch manuell	2,8	-
	<i>Applikation</i>	Handauftragssystem	2,7	-
	<i>Fügen</i>	leichte Füge-teile verbinden	2,5	-
		schwere Füge-teile verbinden	6,0	-
	<i>Fixieren</i>	leichte Füge-teile fixieren	2,3	-
		schwere Füge-teile fixieren	3,5	-

Abbildung 3-12: MET-Werte für klebstoffspezifische Prozesse

#### Beispiel Beflammen:

Bei der im vorherigen Beispiel vorgestellten Anlage handelt es sich um eine mobile Beflammungsanlage, die durch den Menschen bedient wird. Dementsprechend wird ergänzend zu den thermischen und elektrischen Energieverbräuchen der Energieeinsatz des Menschen berücksichtigt. Es wird bei dieser Art von Berechnungen stets ein Körpergewicht des Menschen von  $m_{\text{Körper}} = 80 \text{ kg}$  angenommen. Das zur Berechnung zu Grunde gelegte metabolische Äquivalent kann Abbildung 3-12 entnommen werden und beträgt  $MET = 3,5$ . Da bei der manuellen Bedienung nicht nur die eigentliche Beflammung der Oberfläche, sondern bspw. auch der Transport des Gerätes oder das Auf- und Ablegen der Beflammungseinheit berücksichtigt werden müssen, wird die Zeit  $t_{\text{manuell,FE}} = 1,5 \times t_{\text{FE}} = 1,389E - 05 \frac{h}{10 \text{ cm}^2}$  angenommen.

Der Energiebedarf des Menschen in diesem Anwendungsfall berechnet sich somit gemäß der Formeln 3.10 und 3.11 wie folgt:

$$w_{\text{manuell,FE}} = 3,5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \times \text{h}} \times 1,116 \times 80 \text{ kg} \times 1,389E - 05 \frac{h}{10 \text{ cm}^2} = 0,005 \frac{\text{Wh}}{10 \text{ cm}^2}$$

#### Ernährungsbedingter Emissionsfaktor:

Die Erarbeitung eines Emissionsfaktors ist die Voraussetzung für eine Bestimmung des Treibhauspotentials. Dieser ist abhängig davon, auf welche Art und Weise sich der Mensch ernährt und somit seinem Stoffwechsel Energie zuführt. Die WMF Deutschland zeigt in ihrer

Studie „Klimawandel auf dem Teller“ aus dem Jahr 2012 den Zusammenhang zwischen Ernährung und THG-Emissionen auf. Im Bereich der landwirtschaftlichen Produktion werden direkte THG-Emissionen vor allem durch Methan, welches bei der Verdauung durch Wiederkäuer freigesetzt wird, und Lachgas, welches durch Stickstoffdüngung der Agrarfläche in die Atmosphäre gelangt, verursacht. Der THG-Anteil von CO<sub>2</sub> ist in der Landwirtschaft dagegen gering (Noleppa 2012).

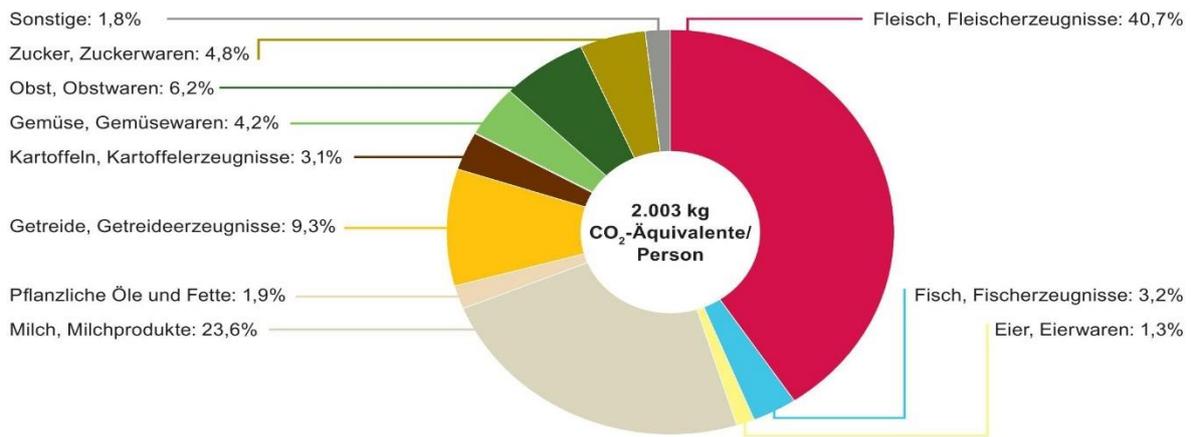


Abbildung 3-13: Direkte Treibhausgasemissionen pro Kopf durch Ernährung in Deutschland (noleppa)

Laut Studie umfassen die direkten Emissionen durch die Ernährung ca. 17 % der Gesamtemissionen Deutschlands. Davon wiederum gehen 41 % auf die Herstellung von Fleischerzeugnissen zurück, wie Abbildung 3-13 veranschaulicht. Da eine fleischbezogene Ernährung ein deutlich höheres Treibhauspotential aufweist als eine vegetarische oder vegane, werden zur Quantifizierung spezifische Emissionsfaktoren in gCO<sub>2</sub>e/Wh bestimmt.

Tabelle 3-4: Spezifische Emissionsfaktoren für die manuelle Arbeit

Ernährungstyp	spezifische Emissionsfaktoren [in gCO <sub>2</sub> e/Wh]
<b>durchschnittlich</b>	1,298
<b>vegetarisch</b>	0,952
<b>vegan</b>	0,822

Als Grundlage für die Bestimmung dienen Daten des Pro-Kopf-Verbrauchs und THG-Emissionen bestimmter Lebensmittel, welche der besagten Studie entnommen werden konnten (Noleppa 2012).

Es lässt sich unter Berücksichtigung der Daten des USDA (Landwirtschaftsministerium der Vereinigten Staaten) der Energiegehalt der Lebensmittel ermitteln und durch anschließende

Umrechnung von Kalorien in kWh (siehe Formel 3.10) bestimmen, wie viel Energie in kWh der Mensch pro Jahr durchschnittlich durch die jeweiligen Lebensmittel aufnimmt.

$$1 \text{ kcal} = 0,00116222 \text{ kWh} \quad (3.10)$$

Zum Beispiel beträgt die durch Weizenmehl bereitgestellte durchschnittliche jährliche Energie 281 kWh. Weiterhin wird bei einer durchschnittlichen Ernährung anteilig die Energie für eine kWh zu 18 % durch Weizenmehl gedeckt, was eine anteilige Emission i. H. v. 73 gCO<sub>2e</sub> bedeutet. Summiert über alle Lebensmittel ergibt sich das in Tabelle 3-4 dargestellte Ergebnis für eine durchschnittliche Ernährung.

Da bei einer vegetarischen bzw. veganen Ernährung nicht das gesamte Spektrum der berücksichtigten Lebensmittelarten konsumiert wird und daraus ein Energiedefizit entsteht, erfolgt in der Berechnung eine Korrektur mittels eines Energiedefizitfaktors. Es wird angenommen, dass die fehlende Energie durch gleichmäßige prozentuale Konsumerhöhung der je nach Ernährungstyp geeigneten und in der Berechnung berücksichtigten Lebensmittel aufgenommen wird. Im Beispiel eines sich vegan ernährenden Menschen bedeutet das, dass die fehlende bereitgestellte Energie durch einen nicht vorhandenen Konsum tierischer Produkte bspw. mit einem erhöhten Konsum von Getreideerzeugnissen, Reis, Gemüse, Obst usw. abgedeckt wird.

Mit den bestimmten Emissionsfaktoren lässt sich das Treibhauspotential für manuell ausgeführte Arbeiten schließlich wie folgt bestimmen:

$$GWP_{\text{manuell,FE}} = w_{\text{manuell,FE}} \times \text{spez. Emissionsfaktor} \quad (3.11)$$

### 3.6. Emissionsfaktoren

Um die Emissionen der Prozessmodule in der Nutzungsphase in CO<sub>2e</sub> zu quantifizieren, werden für die Berechnung die in Tabelle 3-5 ausgewiesenen Emissionsfaktoren für die jeweiligen Energieträger genutzt. Dazu wird zur Vereinfachung angenommen, dass manuelle Arbeitsschritte nur von sich durchschnittlich ernährenden Menschen durchgeführt werden.

Tabelle 3-5: Verwendete Emissionsfaktoren

Energieträger	Emissionsfaktor [g CO <sub>2e</sub> /Wh]
Elektrische Energie	0,489 <sup>5</sup>
Erdgas	0,201
Durchschnittliche Ernährung	1,298

<sup>5</sup> Wert des Jahres 2017, der einheitlich im Zuge der gesamten Untersuchungen Anwendung fand

Die allgemeine Berechnung des GWP erfolgt mit folgender Formel:

$$GWP_{FE} = w_{FE} \times \text{spez. Emissionsfaktor} \quad (3.12)$$

## 4. ERGEBNISSE CARBON FOOTPRINTS

### 4.1. Klebstoffsysteme

Das Ergebnis der Treibhauspotentialauswertung der durch EPDs gewonnenen Klebstoffdaten wird nachfolgend dargelegt. Dazu werden zunächst für die einzelnen Klebstofftypen die minimalen und maximalen GWPs bestimmt. Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristika wie Dichte und Viskosität bedürfen die Klebstoffe unterschiedlicher Schichtdicken bei der Applikation. Die benötigten Schichtdicken werden u.a. unter Berücksichtigung der Elastizität der Klebstoffe und der benötigten Kraftübertragung festgelegt. Es werden in dieser Betrachtung das Treibhauspotential für die Rohstoffversorgung, den Transport und die Herstellung der Klebstoffe berücksichtigt.

Tabelle 4-1: GWP der Klebstoffsysteme

Klebstofftyp	Angenommene Schichtdicke in mm	Klebstoffmasse pro FE in g/10cm <sup>2</sup>	GWP A1-A3 in g CO <sub>2</sub> e/10 cm <sup>2</sup>
Dispersion	0,067	0,067 - 0,1005	<b>0,064 –0,4</b>
Epoxidharze	0,25	0,25 – 0,625	<b>0,72 –3,84</b>
Acrylate	0,25	0,35 - 1	<b>0,67 –1,92</b>
Polyurethan	0,25	0,308–0,313	<b>1,43 – 1,46</b>
Abdichtung			
MS-Polymer, SMP	5	8,2 – 8,8	<b>9,82 –17,65</b>
Polyurethan/SMP	5	5 – 6,25	<b>19,1 –55,13</b>
Silikon	5	5 – 7,5	<b>35,4 –53,1</b>

Eine grafische Aufbereitung der Daten ist in Abbildung 4-1 zu finden. Es wird deutlich, dass Reaktionsklebstoffe, die aus Polyurethan oder mit Silan modifizierten Polymeren bestehenden, das größte Treibhauspotential aufweisen. Der Ursache dafür liegt in der Gewinnung der für die Herstellung des Klebstoffes benötigten Polyole, die teilweise aus Mineralölen generiert werden (vgl. FEICA - Association of the European Adhesive and Sealant Industry 2018, S. 2). Ebenfalls erhöhte Treibhauspotentiale liegen bei dem untersuchten Silikonklebstoff vor. Diesen Klebstofftypen stehen die untersuchten Epoxidharze, Acrylate, Dispersionsklebstoffe sowie

Polyurethane zur Abdichtung entgegen, welche sich durch relativ geringe Emissionswerte charakterisieren lassen.

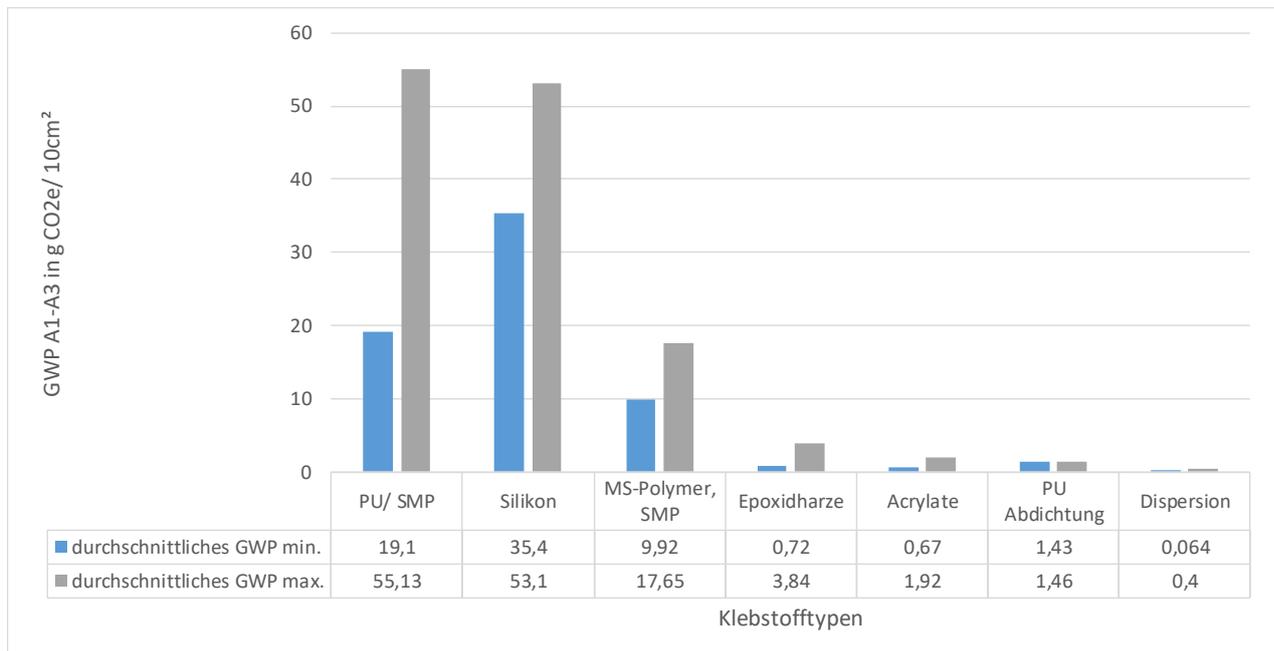


Abbildung 4-1: Grafische Darstellung des GWP einzelner Klebstoffsysteme

## 4.2. Laboranlagen

Die ersten Untersuchungen wurden an einer beispielhaften klebtechnischen Prozesskette an den Anlagen des Fachgebietes „tff“ durchgeführt. Der Prozesskette besteht in dem Fügen zweier Stahlsubstrate mittels eines Epoxidharzklebstoffes. Zur Vorbehandlung der Substrate wurden drei Verfahren ausgewählt: eine Laservorbereitung, Sandstrahlen sowie eine Atmosphärendruckplasmavorbereitung. Der Klebstoffauftrag erfolgte händisch, und die Aushärtung fand in einem Konvektionsofen statt. In der folgenden Abbildung sind die durchgeführten Prozessschritte der Prozesskette mit den jeweiligen GWPs aufgeführt. Da die Vorbehandlung in diesem Fall an beiden Substraten umgesetzt wurde, sind die GWP-Werte verdoppelt.

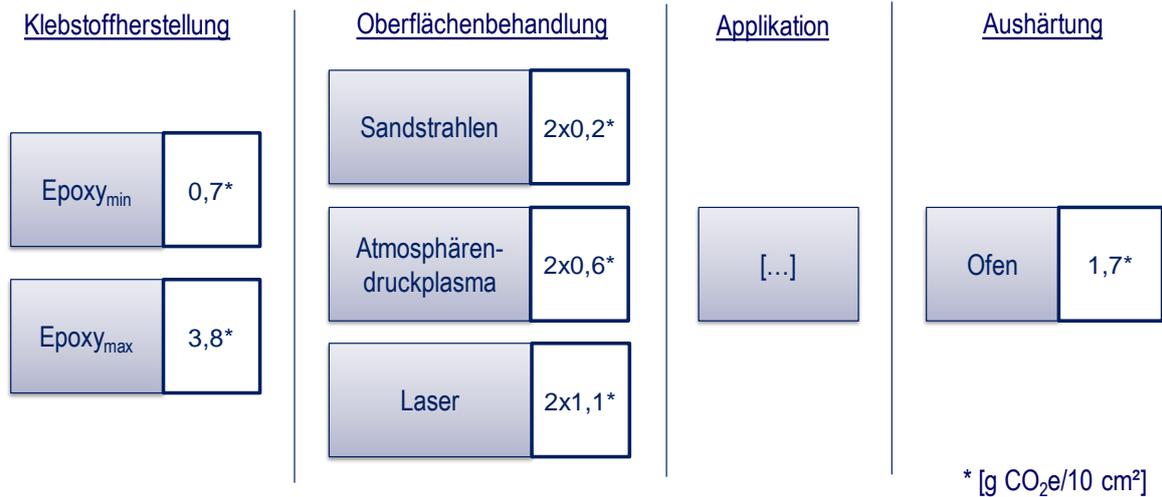


Abbildung 4-2 Beispielhafte Prozesskette an den Laboranlagen

Aufgrund der untersuchten Prozesse der Oberflächenbehandlung lassen sich drei Prozessketten ableiten. Die Ergebnisse bzgl. des GWP sind in Abbildung 4-3 anhand eines Balkendiagramms dargestellt.

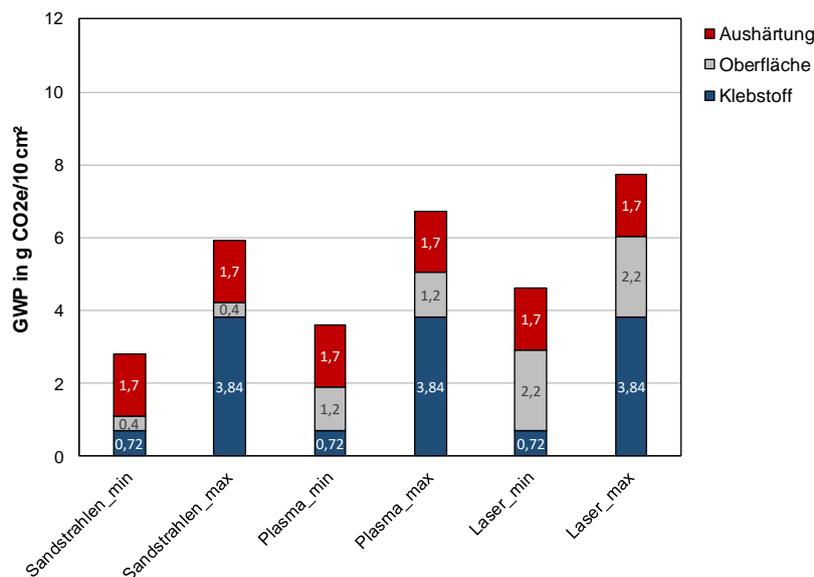


Abbildung 4-3 GWP der untersuchten Prozessketten

Das GWP für die Herstellung der Epoxidharze variiert zwischen 0,7 und 3,8 g CO<sub>2</sub>e/A<sub>FU</sub>. Es zeigt sich, dass mit gezielter Auswahl eines Epoxids einer bestimmten Rezeptur, eine Verringerung des GWP in Bezug auf die ersten drei Phasen um 80% im Vergleich zur Rezeptur mit maximalem GWP-Wert möglich ist.

Für das Sandstrahlen liegt das GWP bei 0,4 g CO<sub>2</sub>e, für die Atmosphärendruckplasmaanlage bei 1,2 g CO<sub>2</sub>e<sup>2</sup> und für die Vorbehandlung anhand des Lasers bei 2,2 g CO<sub>2</sub>e. Das Aushärten

anhand des Konvektionsofens weist ein GWP von 1,7 g CO<sub>2</sub>e auf. Demnach ist die Vorbehandlung der Oberflächen per Sandstrahlen aus ökologischer Perspektive am sinnvollsten. Das Aushärten des Klebstoffes ist für die Beispielprozesskette am energie- bzw. treibhausintensivsten.

## 4.3. Industrieprozesse

### 4.3.1. Industriebesuch Uzin Utz AG, Ulm

Die Uzin Utz Gruppe ist ein führender Anbieter bauchemischer Systemprodukte und weltweit in 50 Ländern vertreten, davon in 20 Ländern mit eigenen Produktionsgesellschaften und Vertriebsgesellschaften. Die Uzin Utz AG ist dabei einer der führenden Hersteller von Systemprodukten für die Fußbodentechnik. Mit den Marken UZIN, WOLFF, PALLMANN, Arturo, codex und RZ wird ein umfangreiches Sortiment an Produkten, Systemen und Dienstleistungen rund um die Neuverlegung, Renovierung und Werterhaltung von Bodenbelägen aller Art, Parkett, keramischen Fliesen und Naturstein geboten.

Gemeinsam mit der Uzin Utz AG wurde eine Prüfmatrix erarbeitet, welche verschiedene Verlegarten unterschiedlicher Fußbodenbeläge umfasst und dabei auch verschiedene Oberflächenbehandlungsverfahren mit in die Betrachtungen einbezieht.

#### Verlegen von Designbelägen (Durchführung und aufgenommene Kenngrößen)

Bei Designbelägen handelt es sich um einen optisch ansprechenden und widerstandsfähigen Vinylboden, der in Form einzelner Planken verlegt wird. Insgesamt wurden 4 verschiedene Verlegvarianten von Mitarbeitern der Fa. Uzin Utz AG durchgeführt, die sich in der Plattengröße, der Geschwindigkeit des Plattenverlegens und dem Klebstoffsystem zur Fixierung der Planken auf dem Untergrund unterschieden.

Verwendet wurden Platten unterschiedlicher Größe:

- Designbelag 1: 50 x 50 cm<sup>2</sup>
- Designbelag 2: „kleine Platten“

#### Oberflächenbehandlung

Die eigentliche Bodenvorbereitung war für alle im folgenden beschriebenen Varianten identisch und setzte sich aus vier Einzelschritten zusammen, deren für die spätere Auswertung notwendigen Kennwert hier mit angegeben werden:

- *Reinigungsschliff des Estrichs (siehe Abbildung 4-4)*
  - Arbeit/GWP: elektrisch, manuell
  - Behandelte Fläche: 3 m<sup>2</sup>
  - Dauer: 55 s
  - Energiebedarf: 0,008 kWh
- *Absaugen der behandelten Fläche (elektrische und manuelle Arbeit)*
  - Arbeit/GWP: elektrisch, manuell

- Behandelte Fläche: 3 m<sup>2</sup>
- Dauer: 57 s
- Energiebedarf: 0,017 kWh
- *Grundieren der Fläche mit dem Primer PE 360 PLUS*
  - Arbeit/GWP: manuell + GWP PE 360 PLUS
  - Behandelte Fläche: 3 m<sup>2</sup>
  - Dauer: 126 s
  - Verbrauch an PE 360 PLUS: 345 g
  - GWP PE 360 PLUS (A1-A3): 0,497 kgCO<sub>2</sub>e/kg
- *Auftragen des Flüssigspachtels NC 170 LevelStar NEU*
  - Elektrisches Anrühren des Spachtels für eine Fläche von 2 m<sup>2</sup>
    - Arbeit/GWP: manuell, elektrisch (GWP bei b) mitberücksichtigt)
    - Dauer: 60 s
    - Leistung: 0,011 kWh
  - Auftragen des Spachtels
    - Arbeit/GWP: manuell + GWP NC 170 LevelStar NEU
    - Behandelte Fläche: 2 m<sup>2</sup>
    - Dauer: 60 s
    - Verbrauch an NC 170 LevelStar NEU: 6,67 kg
    - GWP NC 170 LevelStar NEU (A1-A3): 0,36 kgCO<sub>2</sub>e/kg



a)



b)

Abbildung 4-4: Vorbereitende Tätigkeiten (a) Reinigungsschliff; b) Grundieren)

### Verlegen von Designbelägen – Variante 1

Für das Aufkleben der Designbelagplatten (Variante 1) wurde eine haftklebrige Dispersionsfixierung eingesetzt, welche mittels Rolle auf den vorbehandelten Boden aufgetragen wurde. Danach folgte das händische Verlegen der Planken.

- *Dispersionsauftrag*
  - Arbeit/GWP: manuell + GWP UZIN U 3000 Rollfix

- Behandelte Fläche: 2 m<sup>2</sup>
- Dauer: 105 s
- Verbrauch an UZIN U 3000 Rollfix: 160 g
- GWP UZIN U 3000 Rollfix: 1,15 kgCO<sub>2</sub>e/kg
- *Verlegen des Bodenbelags*
  - Arbeit/GWP: manuell
  - Behandelte Fläche: 2 m<sup>2</sup>
  - Dauer: 180 s

### Verlegen von Designbelägen – Varianten 2 bis 4

Bei den weiteren Varianten 2,3 und 4 wird ähnlich verfahren. Hier kommen andere Beläge zum Einsatz. Hier kommen noch zusätzlich andere Dispersionsfixierung zum Einsatz. Die entstehenden Prozessketten aus diesen Prozessen sind in Abbildung 4-5 und die dazugehörigen Ergebnisse aller Prozesse (Vorbereitung, Variante 1-4) sind in Abbildung 4-7 dargestellt.

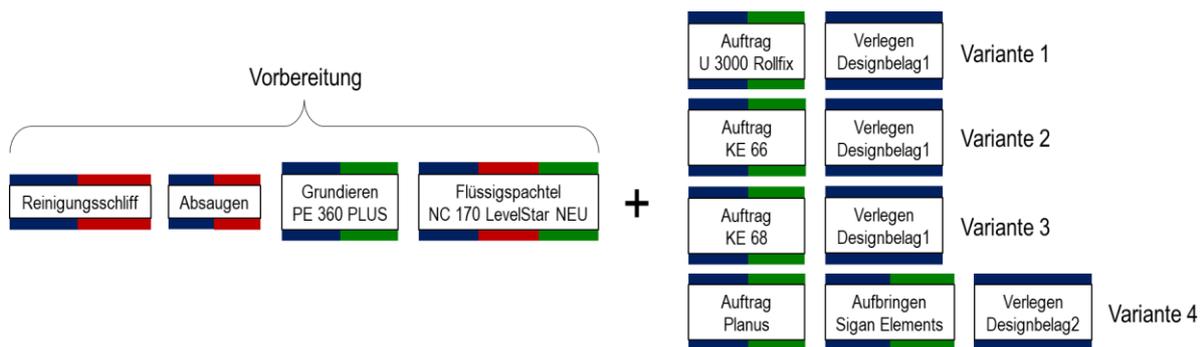


Abbildung 4-5: Prozesskette beim Verlegen von Designbelägen mit diversen Varianten

### Verlegen von Parkett

Neben dem Verlegen von Designbelägen konnte zusätzlich noch ein weiterer Prozess analysiert werden. Hierbei handelt es sich um das Verlegen von Parkett.

Dieser Prozess verläuft ähnlich dem Verlegen der Designbeläge. Bei der Vorbereitung erfolgt zunächst ein Reinigungsschliff gefolgt vom manuellen Absaugen der bearbeiteten Fläche. Im Anschluss wird der Parkettboden auf unterschiedliche Weisen verlegt (schwimmende Verlegung, verkleben, grundieren und anschließendes Verkleben). Die daraus entstehenden Prozessketten sind in Abbildung 4-6 dargestellt. Die Analyse der Prozesse wurde wie o.g. durchgeführt und die Ergebnisse dieser sind in Abbildung 4-7 dargestellt.

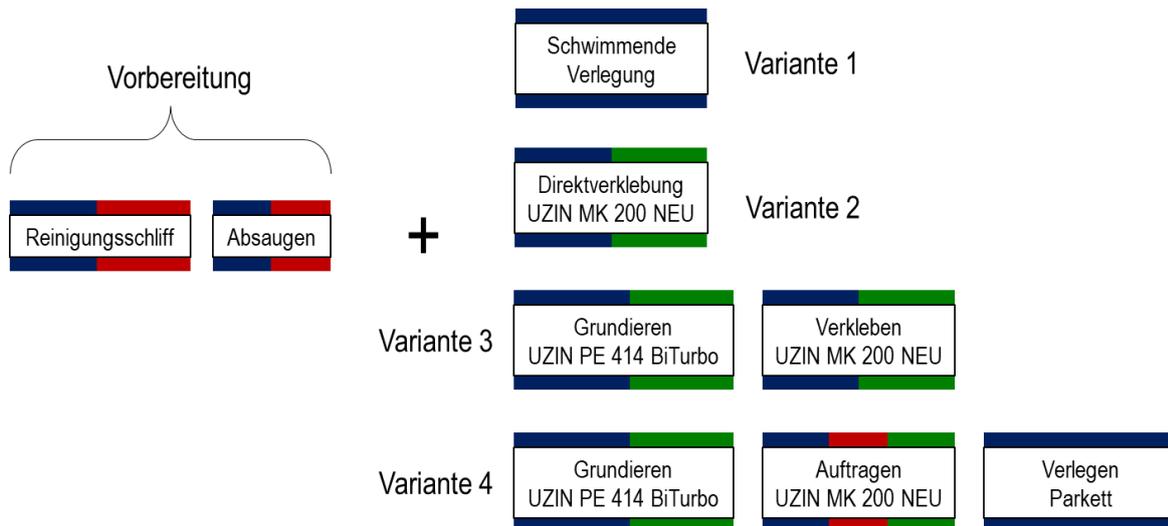


Abbildung 4-6: Prozesskette: Verlegen von Parkett in unterschiedlichen Varianten

### Verlegen von Designbelägen – Auswertung

#### Oberflächenbehandlung + Verlegen von Designbelägen – Varianten 1-4

In Abbildung 4-7 sind die GWP der Vorbehandlung sowie der unterschiedlichen Varianten bildlich dargestellt. Hier gilt es die Farben sowie die logarithmische Skalierung der Ordinatenachse zu beachten. Die Farben unterscheiden die einzelnen GWP in manuelle Arbeit, Material und den elektrischen Anteil. Im vorderen Teil der Grafik im Bereich der Vorbereitung wird deutlich, dass insbesondere der GWP des Materials deutlich ins Gewicht fällt. Im Vergleich zum Material sind die manuelle Arbeit sowie die elektrische Arbeit fasst zu vernachlässigen. Im Bereich der verschiedenen Varianten überwiegt ebenfalls der Anteil des Materials gegenüber der manuellen Arbeit des Auftrags.

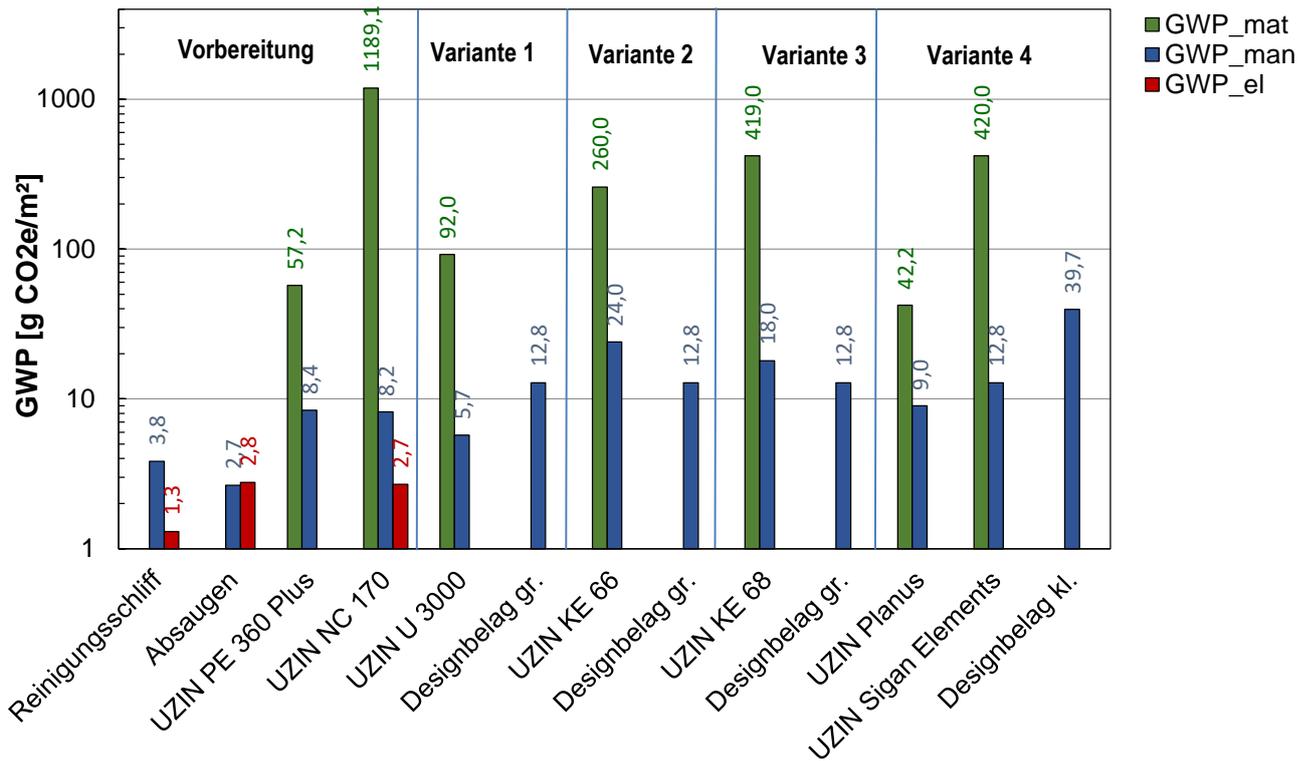


Abbildung 4-7: GWP Verlegen von Designböden unterteilt nach einzelnen Prozessen

In der folgenden Abbildung 4-8 werden die Vorbereitung und die einzelnen Varianten kumuliert betrachtet, um den gesamten Prozess zu beleuchten. Ebenfalls ist hier wieder die logarithmische Darstellung des Diagramms zu beachten. Es wird deutlich, dass die Herstellung des Materials (grün) die übrigen Prozesse der Verwendung (blau; rot) deutlich übersteigt. Insbesondere die manuelle Arbeit des Werkers ist im Hinblick auf den Einfluss auf das GWP marginal.

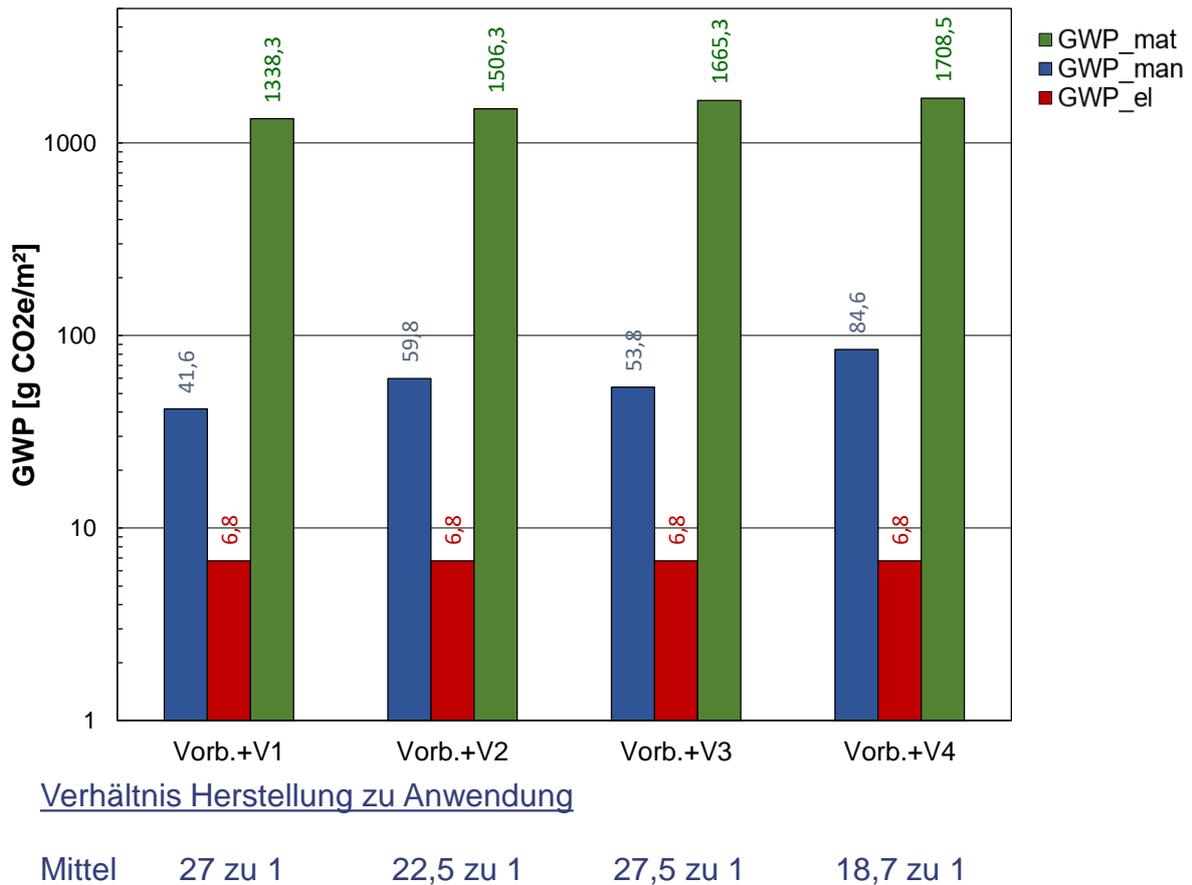


Abbildung 4-8: GWP Verlegen von Designbelägen (kumulierte Ansicht)

### Verlegen von Parkett

In Abbildung 4-9 sind die GWPs, welche beim Verlegen von Parkett auftreten dargestellt. Die logarithmische Darstellung folgt dem gleichen Schema wie zuvor bei dem Verlegen der Designböden. Die manuelle vom Werker durchgeführte Arbeit errechnet mit Hilfe der METs ist blau dargestellt. Rot bezieht sich auf die anfallende elektrische Arbeit der verwendeten Maschinen und grün stellt das GWP des verwendeten Materials dar. Hier wird ebenfalls deutlich wie stark die Herstellung des Materials im Vergleich zur elektrischen bzw. manuellen Arbeit ins Gewicht fällt.

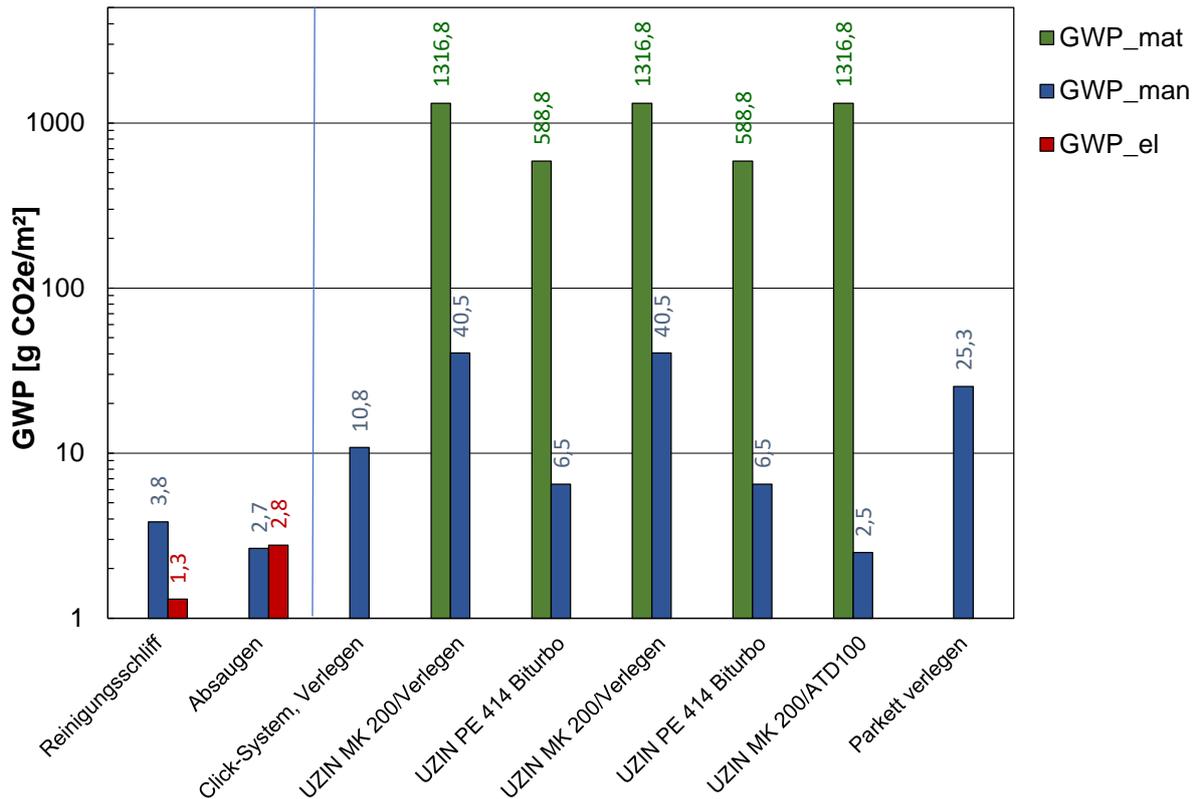


Abbildung 4-9: GWP: Verlegen von Parkett unterteilt nach einzelnen Prozessschritten

Auch in der kumulierten Version des Diagrammes Abbildung 4-10 wird dies deutlich. Das GWP der Klebstoffherstellung überwiegt das GWP der Anwendung um ein Vielfaches. Die elektrische Arbeit sowie die manuelle Arbeit sind im Vergleich zum GWP des Materials zu vernachlässigen unabhängig von der durchgeführten Varianten des Verlegens.

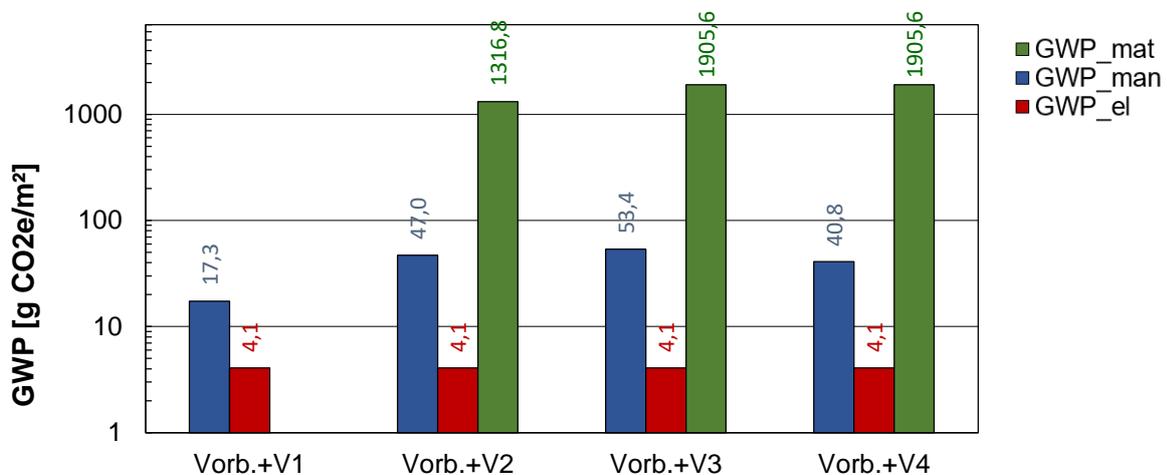


Abbildung 4-10: GWP: Verlegen von Parkett unterteilt nach Varianten

#### 4.3.1. Industriebesuch 1 Henkel AG & Co. KGaA, Bopfingen

Bei der Firma Henkel AG & Co. KGaA in Bopfingen wurden mehrere Maschinen und Prozesse betrachtet. Bei dem ersten Prozess handelte es sich um einen Dispersionsauftrag mittels Leimauftragsmaschine und anschließendem Fügen mithilfe einer elektrischen Flachpresse. Hierbei wurde das Werkstück durch ein System von Walzen geschoben wobei durch die Klebstoffbevorratung und die Dosierwalze anhand ihrer rotatorischen Bewegung eine gleichmäßige Klebstoffschicht auf dem Werkstück appliziert wird (siehe Abbildung 4-11).



Abbildung 4-11 Dispersionsauftrag

Die Leimauftragsanlage weist einen Bedarf an elektrischer Energie auf. Der Versuch wurde für zwei Substrate mit unterschiedlicher Oberflächengröße (500 und 2.500 cm<sup>2</sup>) durchgeführt. Die spezifische Bearbeitungsdauer betrug im Mittel 2,5 Sekunden (500 cm<sup>2</sup>) und 3,5 Sekunden (2.500 cm<sup>2</sup>). Zudem wurden zwei prozessübliche Auftragsmengen betrachtet (90 g/m<sup>2</sup> und 160 g/m<sup>2</sup>). Das verwendete Klebstoffsystem kann der Klasse der Dispersionsklebstoffe zugeordnet werden. Die Ergebnisse des GWP sind Abbildung 4-12 dargestellt.

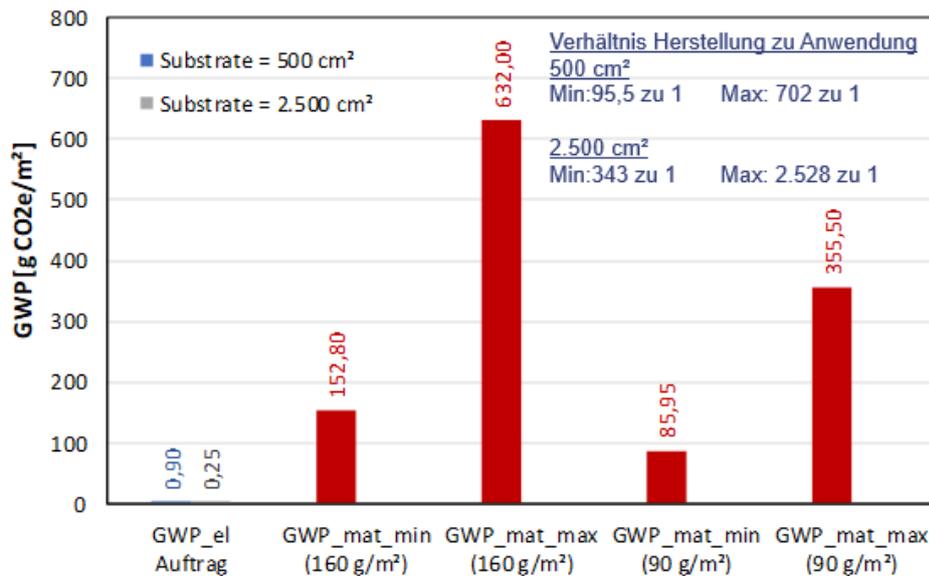


Abbildung 4-12 GWP Dispersionsauftrag

Der abschließende Prozessschritt des Fügens wurde mithilfe einer Flachpresse umgesetzt (Abbildung 4-13). Die Werkzeuge, zwischen denen die Plattenverbunde gefügt werden, sind beheizbar und weisen einen elektrischen Energiebedarf auf. Der Pressdruck beträgt zwischen 0,5 und 0,7 N/mm². Die Abmessung der Werkzeuge beträgt 40 x 50 cm² (A = 2.000 cm²). Es wurden zwei prozessübliche Vorgehensweisen untersucht. Die erste Variante umfasste das Fügen der Substrate bei Umgebungstemperatur ohne zusätzlichen Temperatureintrag mit einer Haltedauer von circa 9 Minuten. Im Zuge der 2. Variante erfolgte eine Erwärmung der Werkzeuge auf 70°C. Aufgrund des zusätzlichen Energieeintrags verringerte sich die Haltedauer auf 3 Minuten.



Abbildung 4-13 Fügen mit Flachpresse

Die GWP der gesamten Prozesskette (Dispersionsauftrag und Fügen per Flachpresse) sind in Abbildung 4-14 anhand eines Balkendiagramms visualisiert.

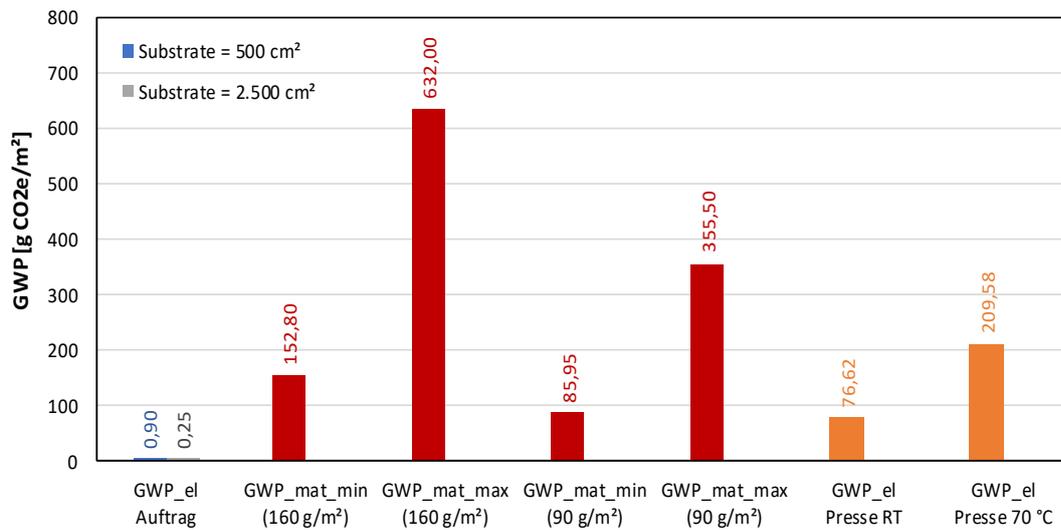


Abbildung 4-14 GWP Prozesskette Dispersionsauftrag und Flachpresse

Für die Prozesskette des Dispersionsauftrags weist die Herstellung der Klebstoffe (je nach Rezeptur und Energiebedarf der Herstellung) das höchste GWP auf. Das Pressen der Plattenverbunde stellt bzgl. des GWP den zweithöchsten Faktor dar. Jedoch lässt sich auch hier bei Inkaufnahme einer längeren Prozessdauer und einem durch den fehlenden Wärmeeintrag verringerten Bedarf an elektrischer Energie, das GWP um das 2,7-fache verringern. Der Dispersionsauftrag ist aufgrund des schnellen Prozessdurchlaufs und dem damit einhergehenden geringen Energiebedarf vernachlässigbar.

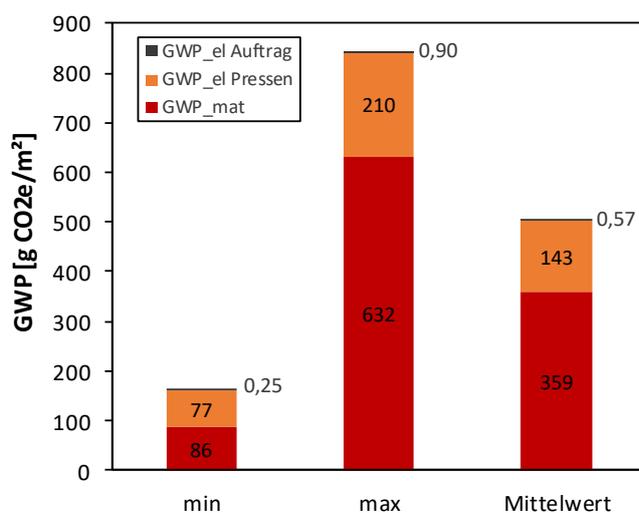


Abbildung 4-15: GWP Prozesskette Dispersionsauftrag (kumulierte Ansicht)

#### 4.3.2. Industriebesuch 2 Henkel AG & Co. KGaA, Bopfingen

Die zweite untersuchte Prozesskette bei der Firma Henkel umfasste das Anbringen von PVC-Kanten an MDF-Platten (siehe Abbildung 4-17).



Abbildung 4-16 Spanplatte-Platte vor und nach dem Kantenleimprozess

Die für diese Prozesskette genutzte Anlage ist eine Kantenleimanlage, die in Abbildung 4-17 dargestellt ist, und die mehrere, nachfolgende Prozessschritte vereinigt:

- Fräsen der Span-Platte
- Schmelzen und Auftrag des Klebstoffsystems
- Anbringen und Fügen der Kante
- Abkappen der Kantenenden
- Abfräsen des Überstands



Abbildung 4-17 Kantenfräsanlage

Bei dem verwendeten Klebstoffsystem handelte es sich um ein nicht reaktives, hochviskoses Polyolefin. Die Verarbeitungstemperatur des Klebstoffsystems beträgt 200 °C. Im Mittel ergibt

sich eine Auftragsmenge von 210 g/m<sup>2</sup>. Die Abmessungen der MDF-Platte umfassen 460 x 190 x 20 mm, die Fläche an welcher die PVC-Kante gefügt wird, beträgt 92 cm<sup>2</sup>. Die Anlage weist eine mittlere elektrische Leistung von 3,8 kW auf. Der Bedarf an technischer Druckluft konnte messtechnisch nicht erhoben werden. Der Vorschub der Anlage kann zwischen 10 und 60 m/min variiert werden. Für den Versuch wurde eine prozessübliche Vorschubgeschwindigkeit von 20 m/ min gewählt. Aufgrund dessen ergab sich eine Durchlaufzeit von 25 Sekunden.

Die Anlage umfasst unterschiedliche Prozessschritte. Die Ermittlung der elektrischen Leistung erfolgte am Schaltschrank der Anlage. Zur Ermittlung der Anteile der Prozessschritte an der Gesamtleistung wurden alle Aggregate nacheinander in Betrieb genommen und jeweils Differenzen gebildet. Das GWP der Prozesskette und er angenommenen Polyolefinrezepturen sind in Abbildung 4-18 verbildlicht.

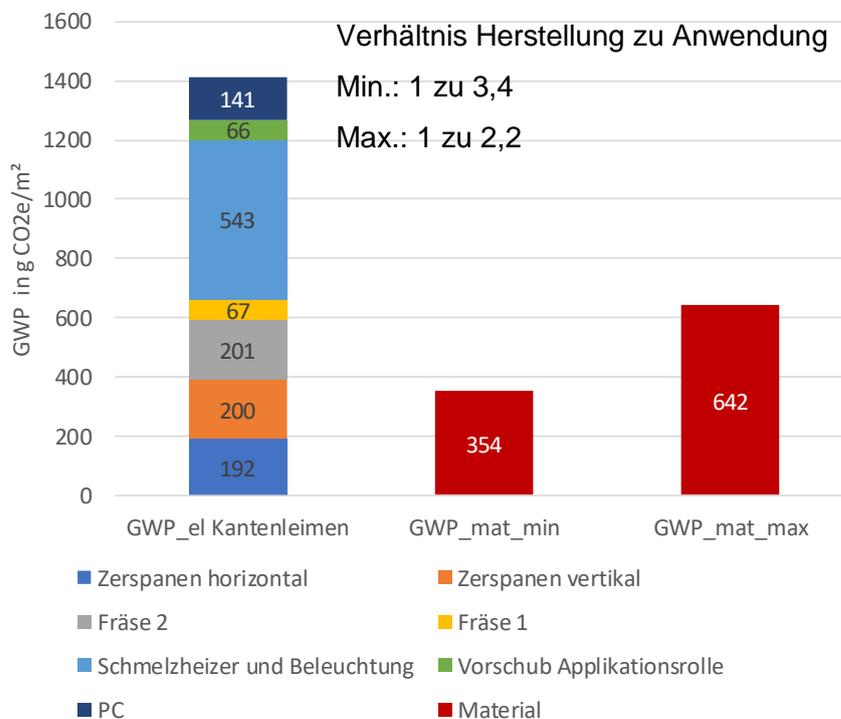


Abbildung 4-18 GWP Kantenleimen und Polyolefinrezepturen

Bei der Prozesskette des Kantenleimens überwiegt das GWP der Anwendung das GWP der Klebstoffherstellung je nach gewählter Klebstoffrezeptur in Bezug auf die funktionelle Einheit von 1 m<sup>2</sup> mit einem Faktor von 2,2 bis 3,4 zu 1. Die Fräs- bzw. Zerspanaggregate machen in Summe mit über 650 gCO<sub>2</sub>e die größte Position aus. Dem folgt das Schmelzen des Klebstoffes und die Beleuchtung der Anlage mit über 540 gCO<sub>2</sub>e, der Energiebedarf zum Betrieb des installierten PCs (141 gCO<sub>2</sub>e) und des Vorschub- bzw. Applikationssystems (66gCO<sub>2</sub>e).

Die anschließend untersuchte Prozesskette umfasste das Anbringen eines Spiegels auf einer Spanplatte. Die Substrate sowie der resultierende Spiegel- und Plattenverbund sind in Abbildung 4-19 dargestellt.



Abbildung 4-19 Substrate und Spiegel- und Plattenverbund

In der dazu genutzten Flatlaminationsanlage erfolgen die Prozessschritte Schmelzen des Klebstoffes (reaktives Polyurethan) und Klebstoffauftrag. Das Fügen der Substrate wird mithilfe einer über einer Rollbahn angeschlossenen Flachpresse umgesetzt. Die Flatlaminationsanlage sowie die Flachpresse sind in Abbildung 4-21 dargestellt.



Abbildung 4-20 Aufschmelzen der Polyurethankerze



Abbildung 4-21 Flatlaminationsanlage (links) und Flachpresse (rechts)

Bei dem verwendeten Klebstoffsystem handelt es sich um ein reaktives Polyurethan in Kerzenform, das bei einer Temperatur von 130 °C geschmolzen wird. Die initiale Aufschmelzdauer bevor mit dem Klebstoffauftrag begonnen werden kann, beträgt 20 Minuten, die Auftragsmenge 80 g/m<sup>2</sup>. Die Abmessungen der Substrate beträgt 300 x 570 mm. Bzgl. der Prozessdauer betrug der Klebstoffauftrag 12 Sekunden, das Auflegen der Spiegel und der Pressvorgang jeweils 5 Sekunden. Bezüglich der Bilanzierung der Aufheizphase fand eine Allokation statt. Dabei wurde von einem Zweischichtbetrieb ausgegangen, bei dem 960 Einheiten gefertigt werden. Die Ergebnisse des GWP der Prozessschritte und der Klebstoffherstellung sind in Abbildung 4-22 wiedergegeben.

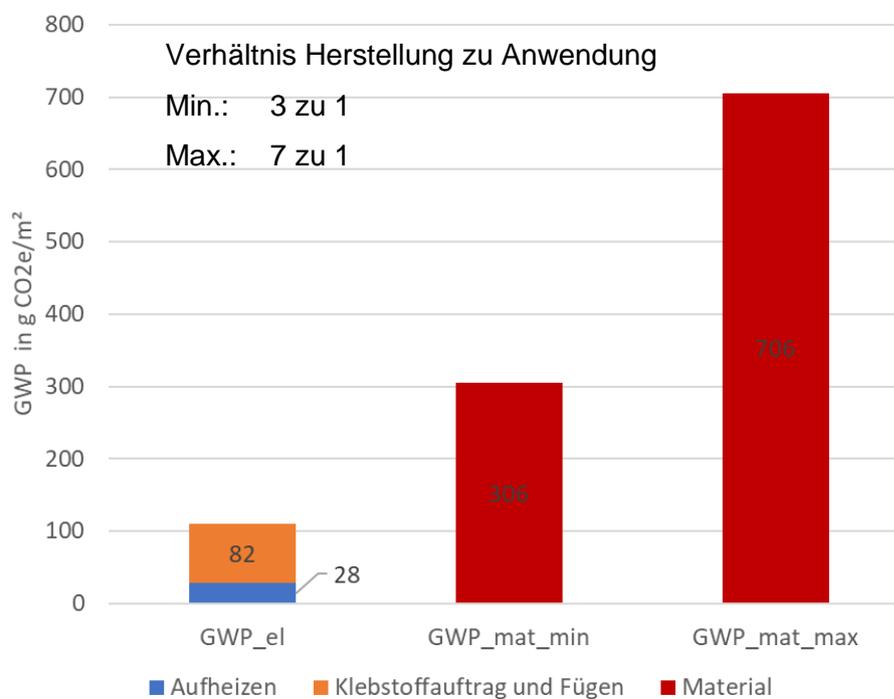


Abbildung 4-22 GWP Flatlaminationsanlage, Flachpresse und Herstellung Polyurethan

Das GWP der Klebstoffherstellung überwiegt das GWP der Anwendung je nach gewählter Rezeptur mit einem Verhältnis von 3 bzw. 7 zu 1. Im Bereich der Anwendung macht die Position des Klebstoffauftrags und Fügens mit über 80 gCO<sub>2</sub>e den höchsten Anteil aus. Dabei ist zu beachten, dass das GWP der Aufheizphase je nach gefertigter Stückzahl variiert.

#### 4.3.3. Industriebesuch Kohlstädt GmbH, Vlotho

Die Kohlstädt GmbH fertigt kundenspezifische Komponenten und Baugruppen. Diese umfassen u.a. Industriegehäuse, Folientastaturen, Frontfolien, Frontplatten, Touchintegration und Gehäuse. Neben branchenüblichen Lösungen besteht die Möglichkeit, komplette Fertigungsprozesse umfassend mitzukonzipieren und auszuführen. Die Fertigungsverfahren umfassen die Bereiche der Blech- & Fräsbearbeitung, der Oberflächenvorbehandlung und der Drucktechnik.

Der zu untersuchende Prozess kann der Optical Bonding-Technologie zugeordnet werden. Unter Optical Bonding versteht man das Fügen optischer Bauteile mithilfe eines durchsichtigen Klebstoffsystems (vgl. generaldigital 2021). Der Prozess ist in Abbildung 4-23 schematisch dargestellt.

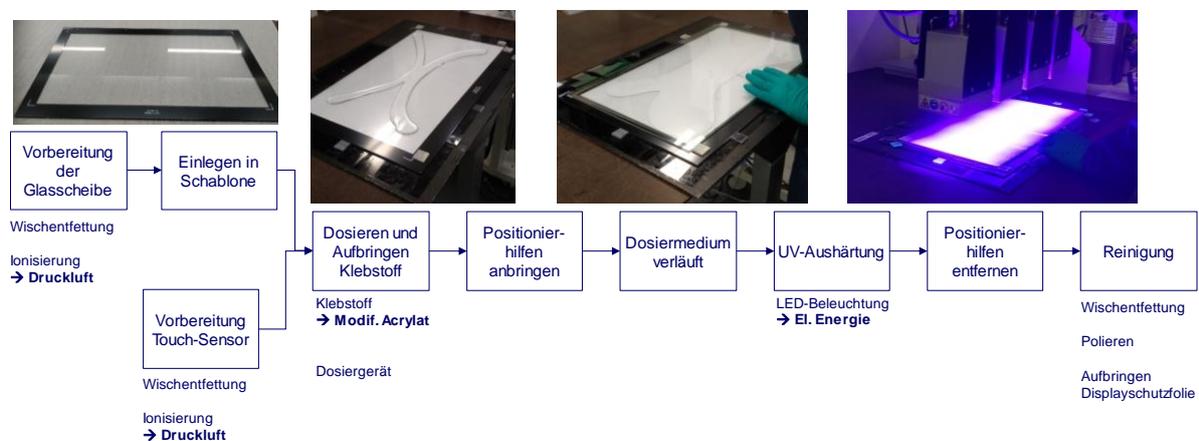


Abbildung 4-23 Optical Bonding-Prozess

Im Zuge der Oberflächenvorbehandlung werden die Substrate (Glasscheibe und Touchsensor) mithilfe einer Wischentfettung gereinigt und anhand eines Ionisiergerätes elektrostatisch entladen. Die Wischentfettung erfolgt manuell, die elektrostatische Entladung wird mithilfe technischer Druckluft umgesetzt. Für die weiteren Schritte wird die Glasscheibe an einer Schablone fixiert. Bei dem verwendeten Klebstoffsystem handelt es sich um ein modifiziertes Acrylat. Es wird mithilfe eines speziellen Dosiergerätes appliziert. Das Fügen der Bauteile wird mittels Positionierhilfen durchgeführt. Zum Aushärten des Verbundes kommen LED-UV-Leuchten zum Einsatz, die elektrisch betrieben werden. Das Entfernen der

Positionierhilfen und die anschließende Reinigung (Wischentfetten, Polieren und Aufbringen einer Displayschutzfolie) schließen die Prozesskette ab.

Die der Berechnung des GWP zugrundeliegenden Parameter lauten wie folgt:

- Klebfläche 21 Zoll Display → 1.290 cm<sup>2</sup>
- Klebstoffsystem: Modif. Acrylat
  - Auftragsmenge 390 g pro m<sup>2</sup>
- Ionisieren (Touch Sensor und Scheibe)
  - Dauer je Bauteil: 10 Sekunden
  - $\dot{V}_{\text{Druckluft}}$ : 8,5 m<sup>3</sup>/h
  - 100 Wh/m<sup>3</sup>
- Aushärten
  - Dauer 1 Minute
  - $P_{\text{el}}$  = 685 W

Die Ergebnisse bzgl. des GWP der Prozesskette und des eingesetzten Klebstoffsystems sind in Abbildung 4-23 anhand eines Balkendiagramms dargestellt. Das GWP der Anwendungen beträgt 63 gCO<sub>2</sub>e/ 1 m<sup>2</sup>. Das Aushärten weist dabei in Bezug auf die funktionelle Einheit von 1 m<sup>2</sup> mit 54 gCO<sub>2</sub>e den größten Anteil des GWP auf. Das GWP des Ionisierens beträgt 9 g gCO<sub>2</sub>e / 1 m<sup>2</sup>. Das Verhältnis zwischen Klebstoffherstellung und Anwendung variiert zwischen 11,6 bzw. 15,5 zu 1.

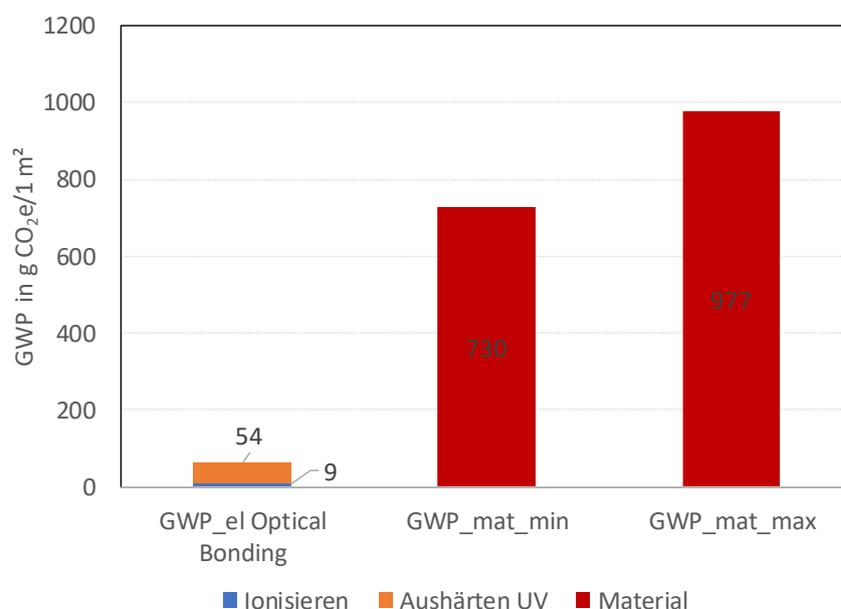


Abbildung i-4-24 GWP Prozesskette Optical Bonding

#### 4.3.4. Hypothetischer Prozess aus den generierten Daten

Aus den in den Industriebesuchen generierten Daten wurde im Anschluss ein vollständiger Klebprozess abgebildet, für welchen GWP-Daten der Themen Klebstoffherstellung, Plasmavorbehandlung (einschließlich der benötigten Druckluft), elektrischer Klebstoffauftrag und Verpressen der Substrate verwendet wurden. Da die zugrundeliegenden Werte aus unterschiedlichen Messkampagnen stammen, spiegelt der Klebprozess in keinsten Weise einen Realprozess wider. Vielmehr soll auf diese Weise das Vorgehen bei der Kombination der unterschiedlichen GWP-Daten der Prozessketten und –schritte erläutert werden.

Es wird deutlich, dass die Oberflächenbehandlung mittels Plasma am energieintensivsten ausfällt. Im Bereich der Klebstoffherstellung, hier in Rot dargestellt, werden die hohen Bandbreiten (min und max) der Klebstoffherstellung ersichtlich. Aus diesem Grund wurde zur besseren Übersicht noch ein Mittelwert eingefügt. Der Klebstoffauftrag an sich ist hierbei zu vernachlässigen.

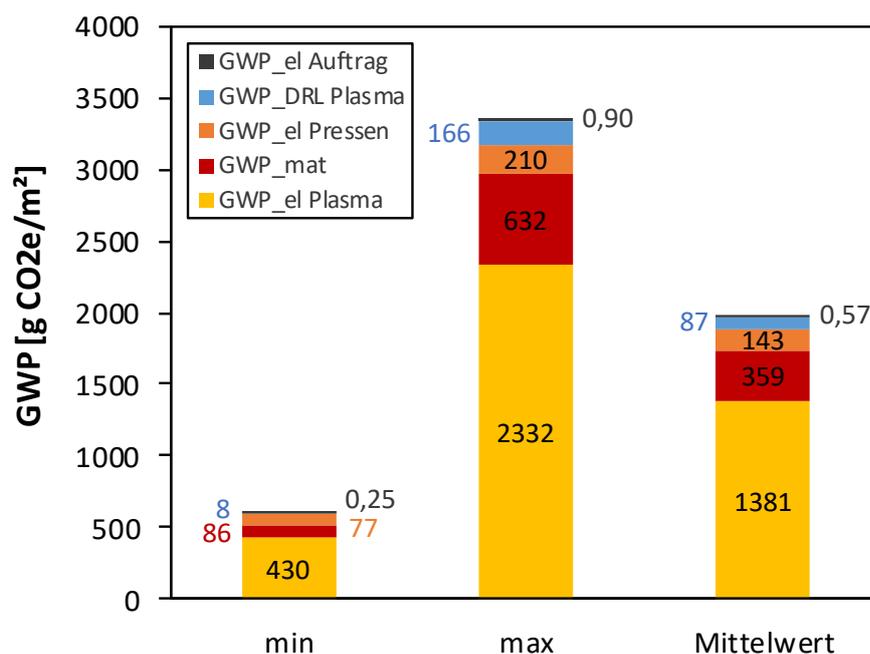


Abbildung 4-25: GWP Hypothetischer Prozess

#### 4.4. PCFs aus Sekundärdaten

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse vorgestellt, die aufgrund der Analyse der Datenblätter generiert wurden. Dabei erfolgt eine differenzierte Betrachtung der in der Nutzungsphase zu ortenden Prozessketten der Oberflächenvorbehandlung und des Klebens.

#### **4.4.1. Sachbilanzierung**

##### Prozessmodule Oberflächenbehandlung

Zunächst sind die Ergebnisse der Sachbilanz der Prozessmodule in Tabelle 4-2 ersichtlich. Für eine bessere Transparenz werden die Bedarfe an unterschiedlichen Energieformen gesondert dargestellt, um dann zusammenfassend den Gesamtenergieeinsatz für die Bearbeitung der funktionellen Einheit von 10 cm<sup>2</sup> auszuweisen.

Tabelle 4-2: Sachbilanz der Prozessmodule Oberflächenbehandlung

Prozessschritt	Prozessmodul	Elektrische Energie in Wh/10cm <sup>2</sup>	Energie Druckluft in Wh/10cm <sup>2</sup>	Thermische Energie in Wh/10cm <sup>2</sup>	Energie manuell in Wh/10cm <sup>2</sup>	Energie gesamt in Wh/ 10cm <sup>2</sup>
OVB	SACO-Verfahren	1,917	1,960		0,933	4,809
OVB	Strahlen nass	2,083	2,279		0,146	4,508
OVB	manuelles kryogenes Strahlen	0,200	4,000		0,124	4,324
Reinigen	Ultraschallbad	1,875		2,140		4,015
OVB	manuelles Beflammen	0,018	0,094	0,995	0,005	1,112
OVB	Primer-/ Haftvermittlerauftrag				0,804	0,804
Reinigen	Reinigungsspray				0,726	0,726
OVB	Niederdruckplasma	0,583	0,00011			0,583
Reinigen	Lappenreinigung				0,453	0,453
Konditionierung	Geregelt in Klimaprüfschrank	0,278				0,278
OVB	Corona (Blasfolie)	0,001				0,001

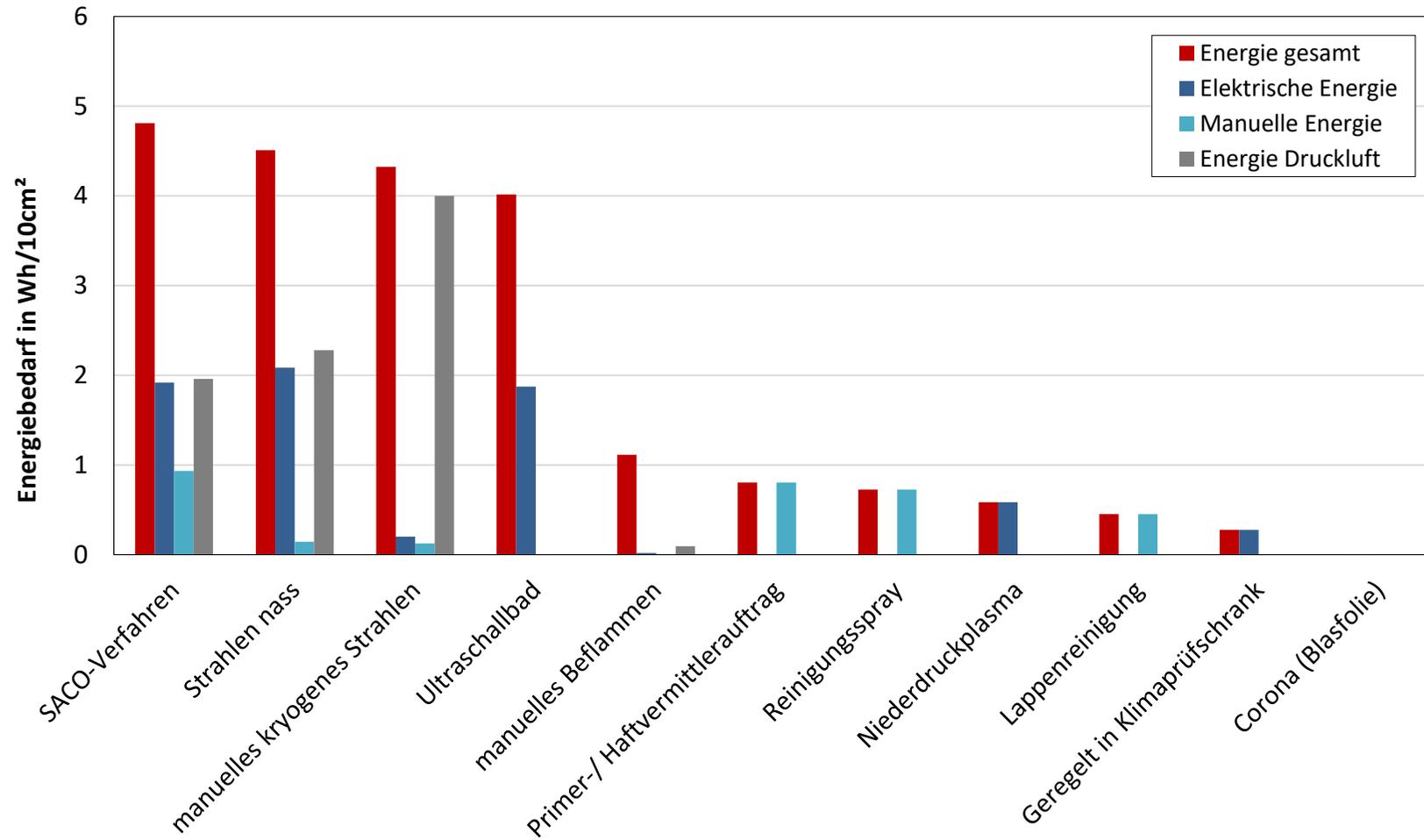


Abbildung 4-26: Sachbilanz nach Energieträgern für die Prozessmodule der Oberflächenbehandlung

In Abbildung 4-26 wird deutlich, dass gerade bei denjenigen Prozessmodulen, bei denen ein hoher Bedarf an Druckluft vorliegt, ein erhöhter Einsatz von Energie benötigt wird. Dahingegen haben manuelle Arbeiten einen eher geringen Effekt auf den Gesamtenergiebedarf.

Es sei darauf hingewiesen, dass im Allgemeinen die Auswertung der Prozessschritte des Reinigens und der OVB vom Grad der Verschmutzung abhängig sind. Dieser bestimmt die Behandlungsdauer und damit letztendlich den Energiebedarf. Bei der durchgeführten Erhebung wird stets eine durchschnittliche Bearbeitungsdauer angenommen.

Weiterhin sind die Ergebnisse abhängig von der Dimensionierung der einzelnen Anlagen. Eine Laboranlage kann im Verhältnis einen anderen Energieeinsatz als größer dimensionierte Industrieanlagen benötigen, da diese eine Bearbeitung größerer Substratflächen während eines Prozesses sicherstellen können.

Dass beim Corona-Verfahren eine große Fläche mit schneller Prozessgeschwindigkeit bearbeitet werden kann, erklärt, warum der Energieaufwand für dieses Verfahren verhältnismäßig gering ist.

Der Berechnung der Ultraschallbadreinigung (siehe Berechnung in Kapitel 3.4) basiert auf der Analyse des Datenblatts einer Laboranlage. Sowohl die geringe Bearbeitungsfläche als auch die langen Heiz- und Reinigungszeiten sind Erklärungen dafür, dass es sich um ein energieintensives Verfahren handelt.

### Prozessmodule Kleben

Der Energieeinsatz für die Prozessmodule des Klebens ist im Gegensatz zu dem der OVB in vielen Fällen abhängig von der Bezugsgröße der Klebstoffmasse, die für die Klebung einer bestimmten Fläche benötigt wird. Die Klebstoffmasse wird charakterisiert durch die Klebstoffschichtdicke und die Klebstoffdichte, für welche folgende Annahmen getroffen werden:

- Mittlere Klebstoffschichtdicke:  $D = 1 \text{ mm}$
- Mittlere Dichte:  $\rho = 1,38 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

Für diese Annahmen werden die Durchschnittswerte der Klebstoffsysteme verwendet, die im Abbildung 3-3 dokumentiert sind. Somit ergibt sich eine benötigte Klebstoffmasse von  $m = 1,38 \text{ g}$  für die Klebfläche der funktionellen Einheit. Zusammenfassend bedeutet dies, dass die in Tabelle 4-3 dargestellten Energieeinsätze, sofern diese unmittelbar von der Klebstoffmasse abhängig sind, unter obigen allgemeinen Annahmen bestimmt werden und die Berechnung auf keinem bestimmten Klebstoff basiert.

Tabelle 4-3: Sachbilanz der Prozessmodule Kleben

Prozessschritt	Prozessmodul	Elektrische Energie in Wh/10cm <sup>2</sup>	Energie Druckluft in Wh/10cm <sup>2</sup>	Energie manuell in Wh/10cm <sup>2</sup>	Energie gesamt in Wh/ 10cm <sup>2</sup>
Aushärten/ Abdampfen	Induktionserwärmung	5,333			5,333
Bevorraten	manuelles elektrisches Rühren	2,132		0,373	2,505
Bevorraten	elektrisches Rührwerk	2,132			2,132
Mischen	dynamisches Mischen	1,458			1,458
Bevorraten	Fassheizer 25 Liter	1,058			1,058
Bevorraten	Fassheizer 100 Liter	0,992			0,992
Bevorraten	Fassheizer 200 Liter	0,661			0,661
Applikation	manuelles Handauftragssystem			0,603	0,603
Fördern	Fassschmelzanlage	0,184			0,184
Mischen	Taumelmischen	0,141			0,141
Dosieren	Dosieranlage	0,044	0,047		0,090
Mischen	manuelles Batch-Mischen			0,057	0,057
Bestrahlen	UV-LED Kammer	0,036			0,036
Bestrahlen	UV-Tageslichtkammer	0,024			0,024
Fügen	manuell schwer			0,013	0,013
Fixieren	manuell schwer			0,005	0,005
Fügen	manuell leicht			0,004	0,004
Fixieren	manuell leicht			0,002	0,002

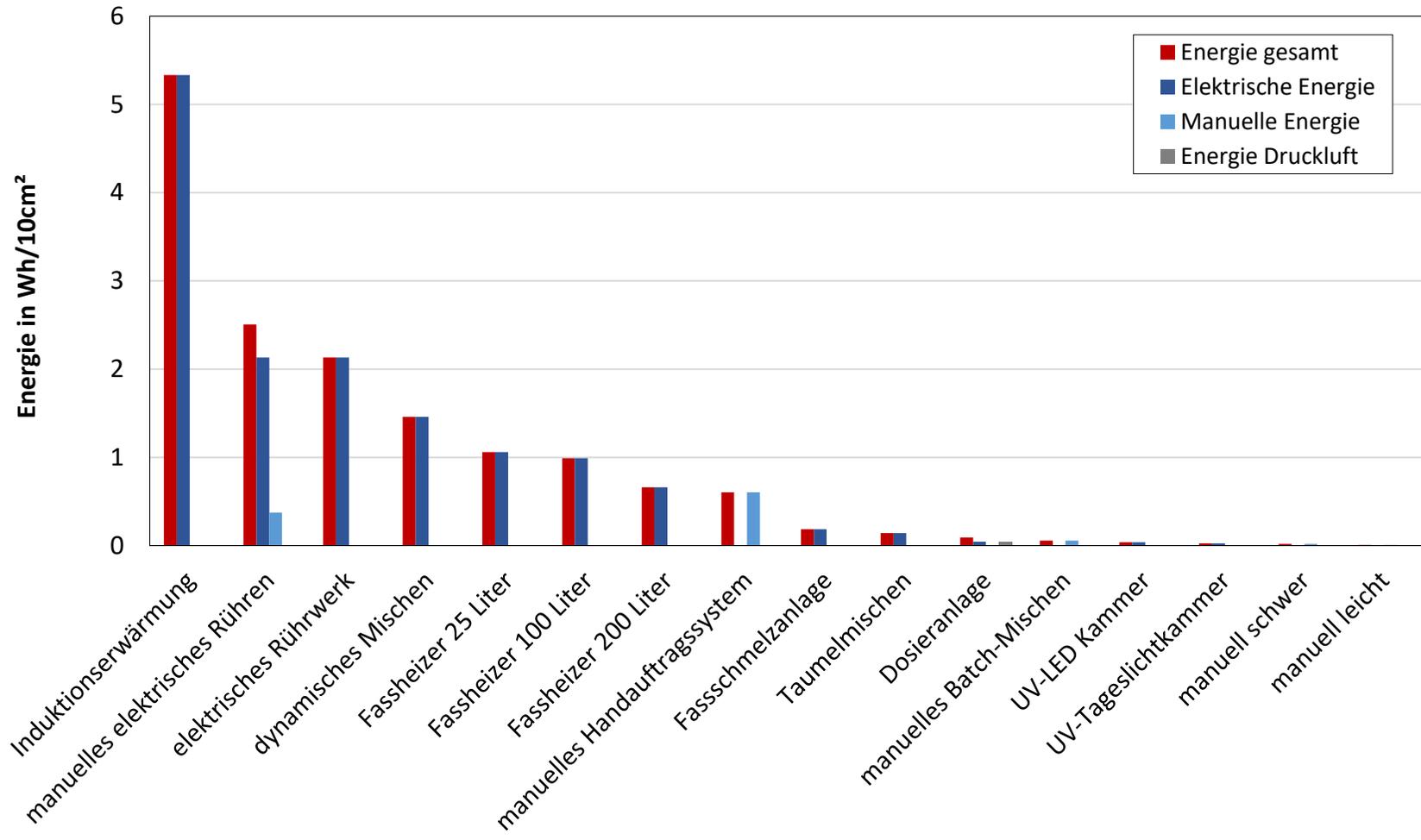


Abbildung 4-27: Sachbilanz nach Energieträgern der Prozessmodule Kleben

Die dargestellten Ergebnisse der Sachbilanz zeigen, dass der Prozessschritt des Aushärtens einen erhöhten Einsatz von Energie bedarf. Dieser resultiert aus der benötigten Heizenergie. Ebenfalls ist der Prozessschritt des Bevorratens verhältnismäßig energieintensiv. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Energiebedarf für diesen Prozessschritt stark von der Viskosität des eingesetzten Klebstoffes abhängig ist und der Notwendigkeit, diesen vor dem Fördern aufzuschmelzen oder seine Viskosität herabzusetzen.

Ebenfalls wird ersichtlich, dass manuelle Arbeitsschritte, wie auch schon bei der Prozesskette OB, einen geringen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf haben.

#### **4.4.2. Wirkbilanzierung**

##### Prozessmodule Oberflächenbehandlung:

Wie sich das GWP der Prozessmodule der OB zusammensetzt, kann Tabelle 4-4 entnommen werden. Unter dem technischen GWP werden zusammenfassend die emittierten THG durch den Einsatz von elektrischer und thermischer Energie dargestellt, darüber hinaus wird das durch manuelle Arbeitsschritte resultierende GWP ausgewiesen. Das gesamte GWP setzt sich dementsprechend aus technisch und manuell bedingten THGs zusammen.

Tabelle 4-4: Wirkbilanz der Prozessmodule Oberflächenbehandlung

Prozess- schritt	Prozessmodul	GWP technisch in gCO <sub>2</sub> e /10cm <sup>2</sup>	GWP manuell in gCO <sub>2</sub> e /10cm <sup>2</sup>	Gesamt GWP in gCO <sub>2</sub> e /10cm <sup>2</sup>
<b>OVB</b>	SACO-Verfahren	1,896	1,211	<b>3,106</b>
<b>OVB</b>	Strahlen nass	2,133	0,189	<b>2,322</b>
<b>OVB</b>	manuelles kryogenes Strahlen	2,054	0,161	<b>2,215</b>
<b>Reinigen</b>	Ultraschallbad	1,964		<b>1,964</b>
<b>OVB</b>	Primer-/ Haftvermittlerauftrag		1,043	<b>1,043</b>
<b>Reinigen</b>	Reinigungsspray		0,942	<b>0,942</b>
<b>OVB</b>	manuelles Beflammen	0,611	0,007	<b>0,618</b>
<b>Reinigen</b>	Lappenreinigung		0,589	<b>0,589</b>
<b>OVB</b>	Niederdruckplasma	0,285		<b>0,285</b>
<b>Konditionierung</b>	Geregelt in Klimaprüfschrank	0,136		<b>0,136</b>
<b>OVB</b>	Corona (Blasfolie)	0,000		<b>0,000</b>

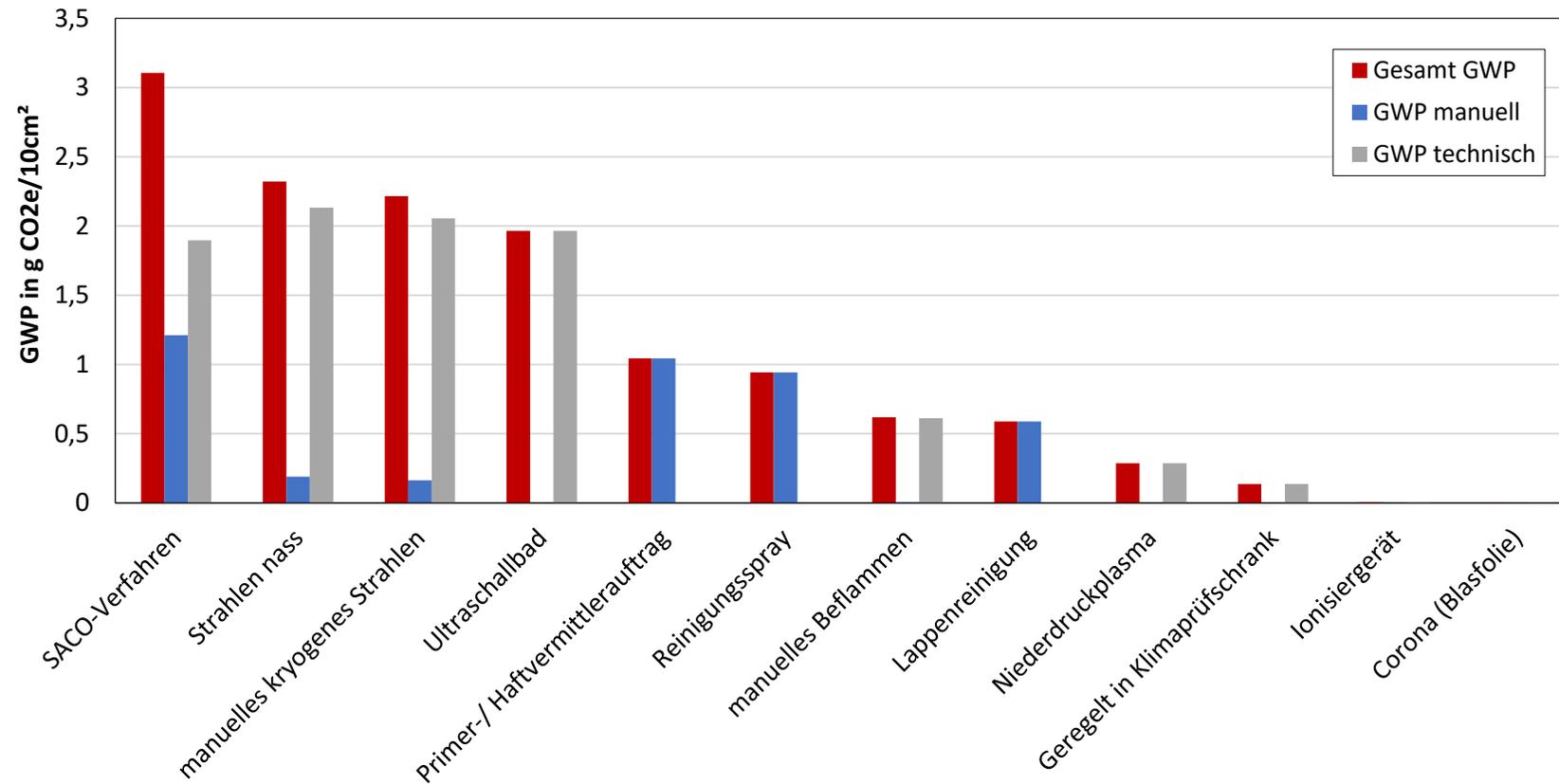


Abbildung 4-28: Grafische Darstellung des GWP der Prozessmodule Oberflächenbehandlung

Eine grafische Aufbereitung der Daten der obigen Tabelle liefert Abbildung 4-28. Zu erkennen ist, dass manuelle Tätigkeiten aufgrund des relativ hohen Emissionsfaktors vereinzelt einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zum GWP leisten.

Um die Verhältnismäßigkeit des GWP zwischen den Prozessschritten der Oberflächenbehandlung zu visualisieren, dient Abbildung 4-29. Dazu werden die durchschnittlichen GWP-Werte der Prozessmodule auf Prozessschritzebene in ein prozentuales Verhältnis gestellt. Es wird ersichtlich, dass der Reinigungsprozess im Durchschnitt ein ähnlich hohes GWP wie die OVB aufweist, der Prozessschritt der Konditionierung dafür eher einen geringen Einfluss hat. An dieser Stelle soll aber auch auf die beschränkte Aussagefähigkeit hingewiesen werden, da nur vereinzelt Prozessmodule mit einfließen. Nicht berücksichtigte weitere Prozessmodule könnten diese Verhältnismäßigkeit revidieren.

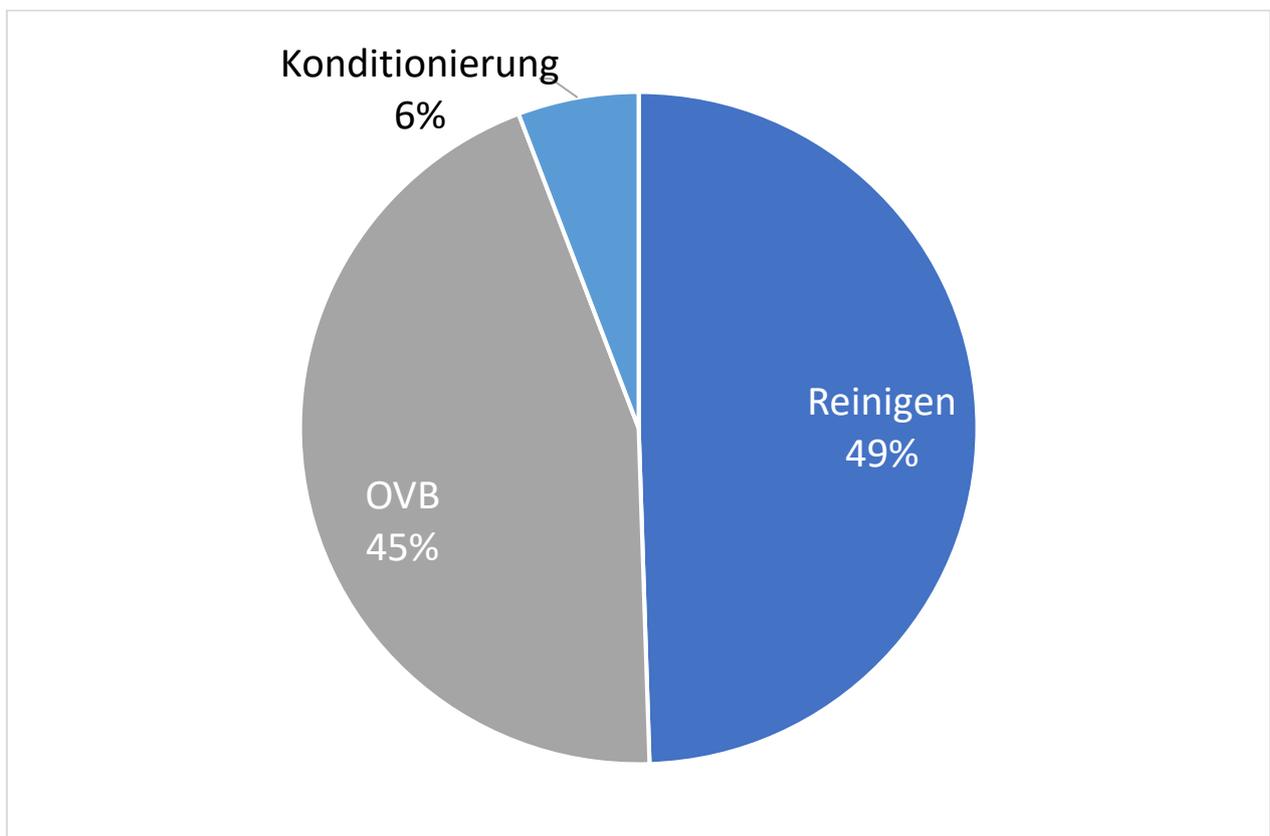


Abbildung 4-29: GWP-Verhältnis zwischen den Prozessmodulen der Oberflächenbehandlung

### Prozessmodule Kleben

Mit der gleichen Analogie wie bei der Oberflächenbehandlung wird für die Klebprozessmodule ebenfalls eine Wirkbilanz erstellt, deren Auswertung im weiteren Verlauf dieses Kapitels erfolgt (siehe Tabelle 4-5 und Abbildung 4-30).

Tabelle 4-5: Wirkbilanz der Prozesskette Kleben

Prozessschritt	Prozessmodul	GWP technisch [gCO <sub>2</sub> e /10cm <sup>2</sup> ]	GWP manuell [gCO <sub>2</sub> e/ 10cm <sup>2</sup> ]	Gesamt GWP [gCO <sub>2</sub> e/10cm <sup>2</sup> ]
Aushärten/ Abdampfen	Induktionserwärmung	2,608		2,608
Bevorraten	manuelles elektrisches Rühren	1,043	0,484	1,527
Bevorraten	elektrisches Rührwerk	1,043		1,043
Applikation	manuelles Handauftragssystem		0,782	0,782
Mischen	dynamisches Mischen	0,713		0,713
Bevorraten	Fassheizer 25 Liter	0,517		0,517
Bevorraten	Fassheizer 100 Liter	0,485		0,485
Bevorraten	Fassheizer 200 Liter	0,323		0,323
Fördern	Fassschmelzanlage	0,090		0,090
Mischen	manuelles Batch-Mischen		0,075	0,075
Mischen	Taumelmischen	0,069		0,069
Dosieren	Dosieranlage	0,044		0,044
Bestrahlen	UV-LED Kammer	0,018		0,018
Fügen	manuell schwer		0,017	0,017
Bestrahlen	UV-Tageslichtkammer	0,012		0,012
Fixieren	manuell schwer		0,007	0,007
Fügen	manuell leicht		0,005	0,005
Fixieren	manuell leicht		0,002	0,002

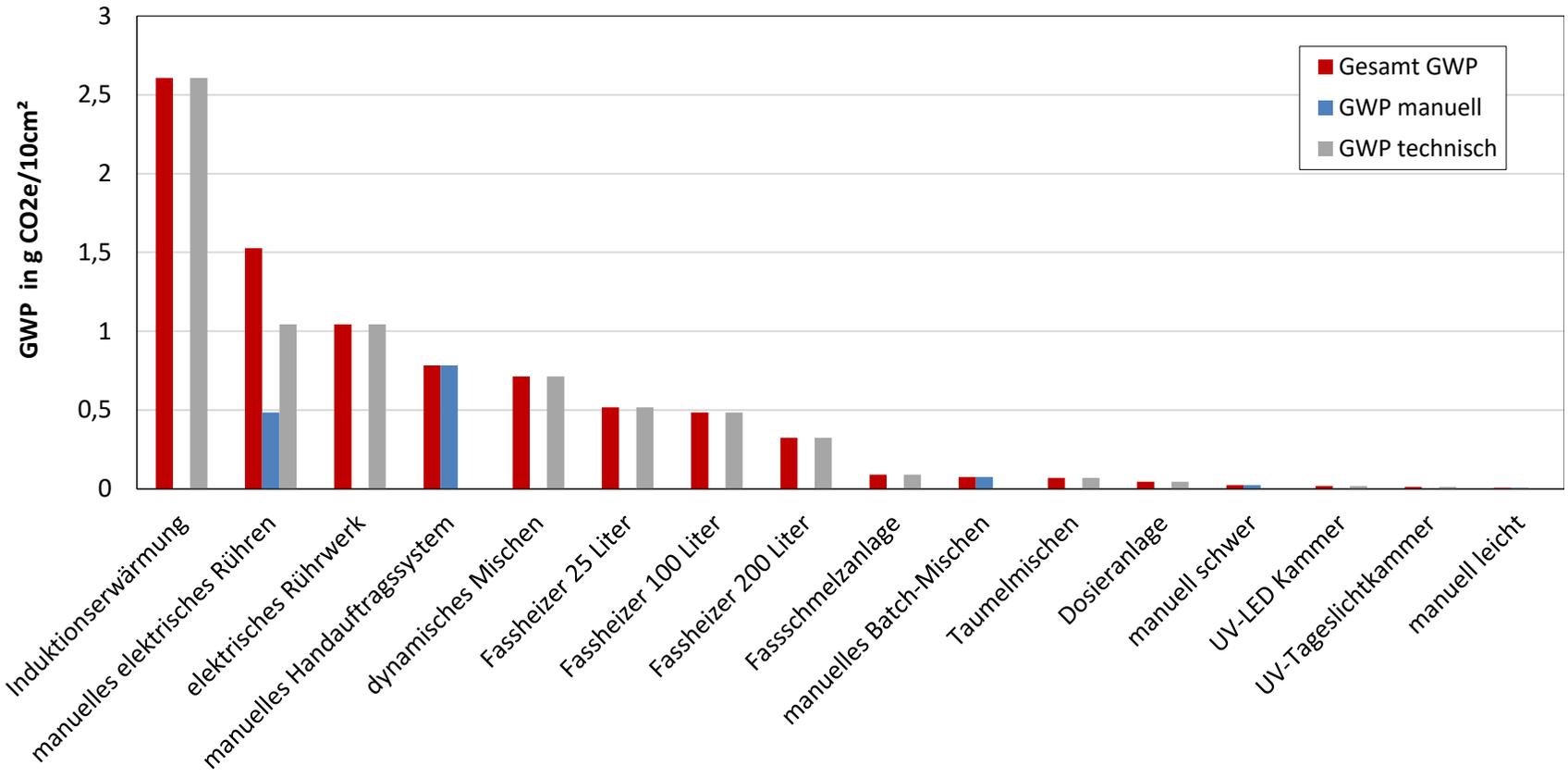


Abbildung 4-30: Grafische Darstellung des GWP der Prozessmodule (Kleben)

In Abbildung 4-31 ist eine prozentuale Verteilung bzgl. der unterschiedlichen Prozessschritte des Klebens dargestellt. Den größten Anteil zum Treibhauseffekt leistet mit über 57% demnach der Prozessschritt des Aushärtens bzw. Abdampfens. Dies ist darin begründet, dass ein erhöhter Bedarf an elektrischer Energie benötigt wird, wohingegen die anderen Prozessschritte teilweise manuell durchgeführt werden können.

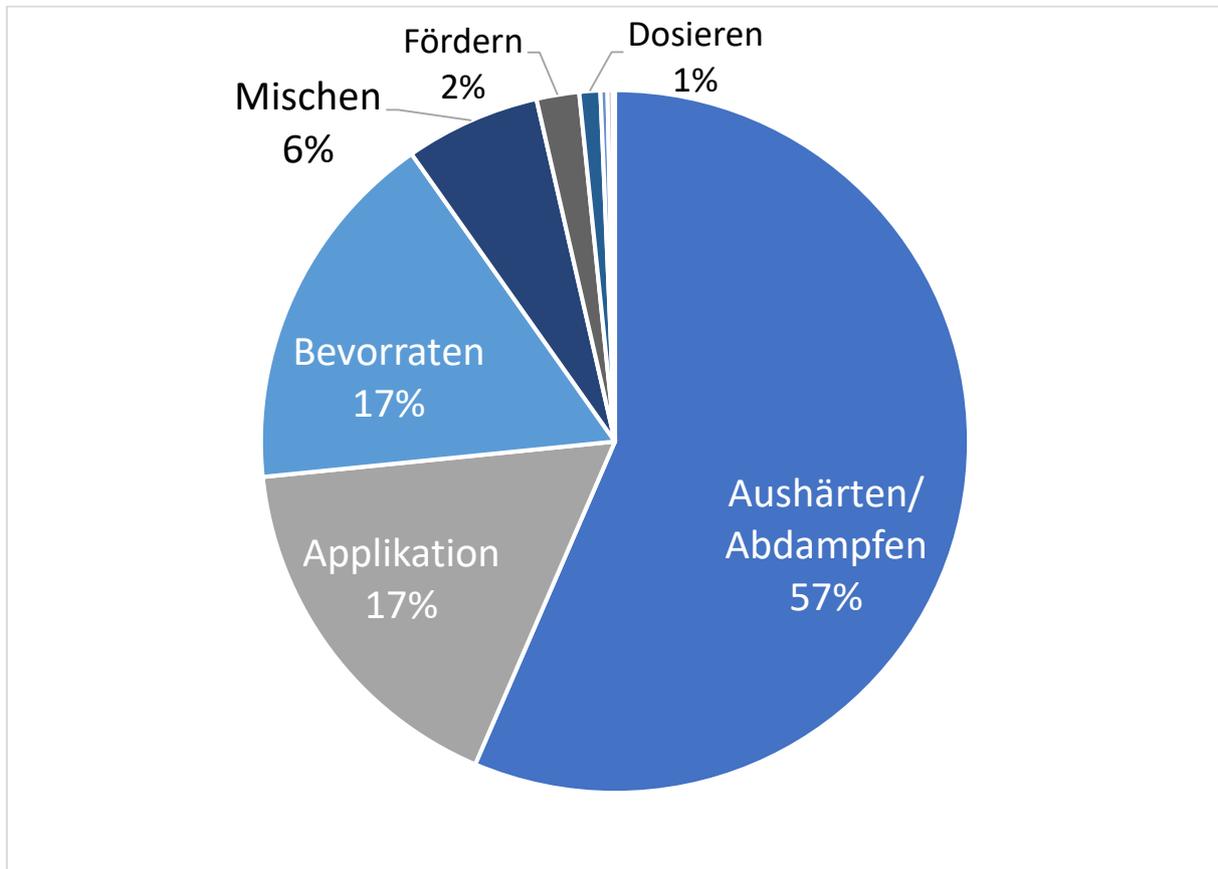


Abbildung 4-31: GWP-Verhältnis zwischen den Prozessschritten des Klebens

#### 4.5. Gesamtübersicht

Abschließend werden die Ergebnisse aller im Zuge des Projekts erhobenen PCFs zusammenfassend aufgezeigt. Dabei wird zuerst ein Vergleich zwischen den Prozessketten der Oberflächenbehandlung und des Klebens durchgeführt, indem die durchschnittlichen GWP-Werte für die einzelnen Prozessschritte in Abbildung 4-32 gegenübergestellt werden. Für die im Rahmen dieses Projekts betrachteten Prozessmodule lassen sich der Reinigungsprozess und die OVB als Prozessschritte der OB als emissionsintensiv einordnen, das gleiche gilt für das Aushärten als Prozessschritt des Klebens.

Übergeordnet lässt sich festhalten, dass die Prozessschritte des Klebens im Durchschnitt ein geringeres Treibhauspotential als diejenigen der OB besitzen. Dies resultiert daraus, dass für

eine Vielzahl der Prozessschritte lediglich manuelle und deshalb weniger energieintensive Arbeitsschritte untersucht wurden.

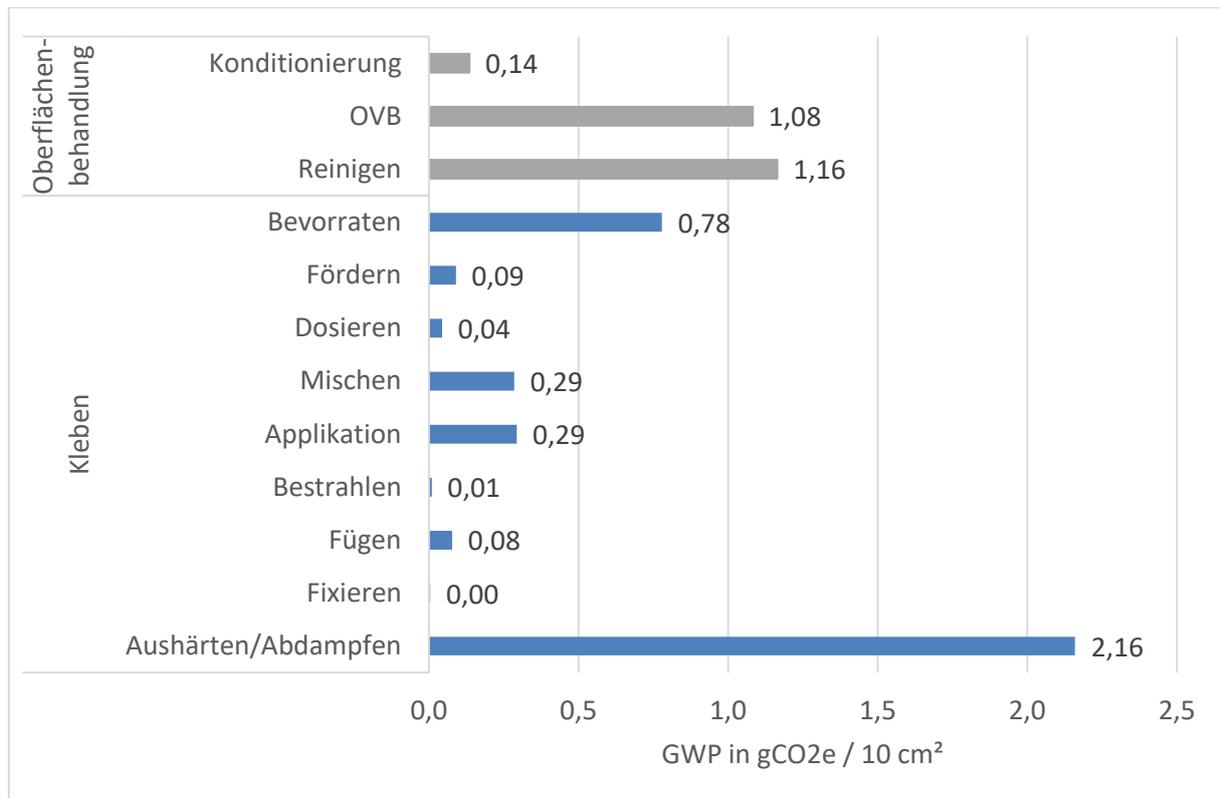


Abbildung 4-32 GWP-Vergleich zwischen den Prozessketten (Oberflächenbehandlung und Kleben) und Vergleich der Lebenszyklusphasen

Weiterhin soll das GWP für die verschiedenen Lebenszyklusphasen aufgezeigt werden. Dies wird in Abbildung 4-33 umgesetzt, in der einerseits die Prozessschritte der Nutzungsphase (Klebanwendung) und andererseits die Phasen der Rohstoffgewinnung, der Herstellung und anschließender Distribution der verschiedenen Klebstoffsysteme dokumentiert werden. Dabei sind die unterschiedlichen horizontalen Achsenskalierungen zu beachten.

Es wird deutlich, dass das durchschnittlich höchste GWP mit den der Nutzungsphase vorgelagerten Lebenszyklusphasen der Klebstoffherstellung einhergeht. Dabei sollte jedoch beachtet werden, dass sich die Prozesskette der Klebstoffanwendung, wie in den zuvor aufgezeigten Beispielen der Laboranlagen und Industrie immer aus mehreren Prozessschritten zusammensetzt.

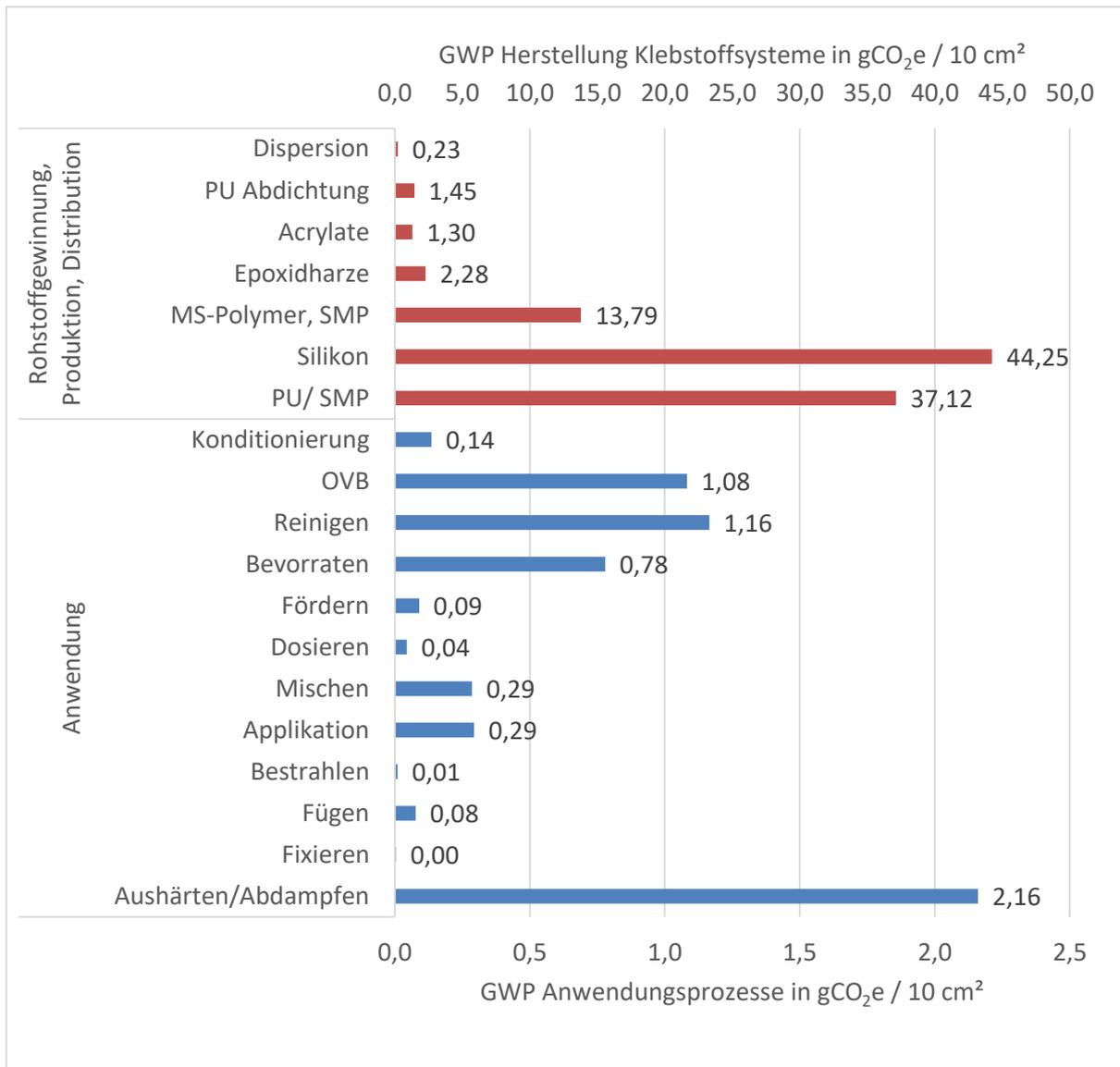


Abbildung 4-33: GWP-Vergleich zwischen den Lebenszyklusphasen

## **5. ERSTELLUNG DER DATENBANK**

---

In diesem Kapitel wird zunächst der Aufbau der erstellten Microsoft Access „Klebfuß“-Datenbank erläutert. Anschließend wird ein Leitfaden für etwaige Anwender verfasst, welcher das Vorgehen bei der Bestimmung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes und der nachhaltigen Datenpflege erläutern soll.

### **5.1. Einführung**

Das übergeordnete Ziel einer Datenbank ist es, Daten zu verwalten und zu strukturieren. So soll einerseits ein Speichern größerer Datenmengen sichergestellt werden, aus denen Informationen für den Anwender schnell abrufbar sind. Andererseits wird eine kontrollierte Eingabe von Daten beabsichtigt, die in weiteren Schritten zusammengefasst und/ oder für den Anwender ausgegeben werden können (Theis 2016). Für die Verwaltung und Strukturierung der Daten kann mit der Programmiersprache SQL gearbeitet werden. Als Programmiersprache ist diese speziell für Datenbanken entwickelt, um Daten abzufragen. Die Entscheidung für die Umsetzung des Vorhabens in Microsoft Access ist darin begründet, dass die Gestaltung einer Datenbankanwendung in einer einzelnen Anwendung erfolgen kann, wie Theis (2017) darlegt. Das ist Resultat der Tatsache, dass Microsoft Access selbst eine Datenbankanwendung mit einer eigenen Benutzeroberfläche ist, wohingegen es sich z.B. bei MySQL um einen reinen Datenbankserver ohne Benutzerschnittstelle handelt. Für den Zugriff auf diesen Datenbankserver bedarf es einer weiteren Anwendung und damit einhergehend einer weiteren Programmiersprache zur Programmierung dieser (Laube 2017). Neben grundlegenden SQL-Befehlen muss bei der Datenbankeinstellung auch von der microsoftspezifischen Programmiersprache VBA Gebrauch gemacht werden, um z.B. automatisierte Abfragen oder die Übermittlung von Daten zwischen Formularen zu realisieren.

## 5.2. Datenbankelemente

Die „KlebFuß“-Datenbank besteht aus Tabellen, Formularen und einem Bericht. Nachfolgend werden der einzelnen Elemente hinsichtlich ihres Aufbaus und Zwecks vorgestellt.

### 5.2.1. Tabellen

Wesentliche Bestandteile einer Datenbank sind deren Tabellen, in denen diejenigen Daten gespeichert werden, die in weiteren Schritten ausgewertet werden sollen. Die „KlebFuß“-Datenbankanwendung folgt dem Prinzip einer relationalen Datenbank, wonach die Daten in mehreren Tabellen (siehe Abbildung 5-1) gespeichert werden (Spieß und Swoboda 2013).



Abbildung 5-1: In der Datenbank hinterlegte Tabellen

#### 5.2.1.1. Aufbau

Im Allgemeinen bestehen Tabellen aus Spalten, die die Eigenschaften einer Tabelle beschreiben, und Zeilen, in denen die Informationen (Daten) hinterlegt sind (Theis 2016). Jede Tabelle besitzt eine Primärschlüsselspalte, in der für die jeweiligen Datensätze ein numerischer Wert festgelegt wird, welcher ein eindeutiges Identifizieren von Daten gewährleistet (Theis 2016). In Abbildung 5-2 ist diese Spalte mit einem kleinen Schlüssel symbolisch visualisiert. Ein Fremdschlüssel wiederum verweist auf den Primärschlüssel einer anderen Tabelle, auf deren Basis eine Beziehungsverknüpfung zwischen Tabellen erstellt werden kann.

#### 5.2.1.2. Beziehungen und Normalisierung

In welcher Form die Tabellen verknüpft sind, veranschaulicht das Entity-Relationship Modell in Abbildung 5-2. Als Entity werden Objekte bezeichnet, die als Tabellen in der Datenbank erfasst werden sollen. Ihnen werden in verschiedene Spalten Eigenschaften zugewiesen (Laube 2017). So zum Beispiel beinhaltet das Objekt bzw. die Tabelle „Klebstoff“ die Primärschlüsselspalte „ID“ und zusätzlich die Eigenschaft bzw. Spalte „Klebstofftyp“.

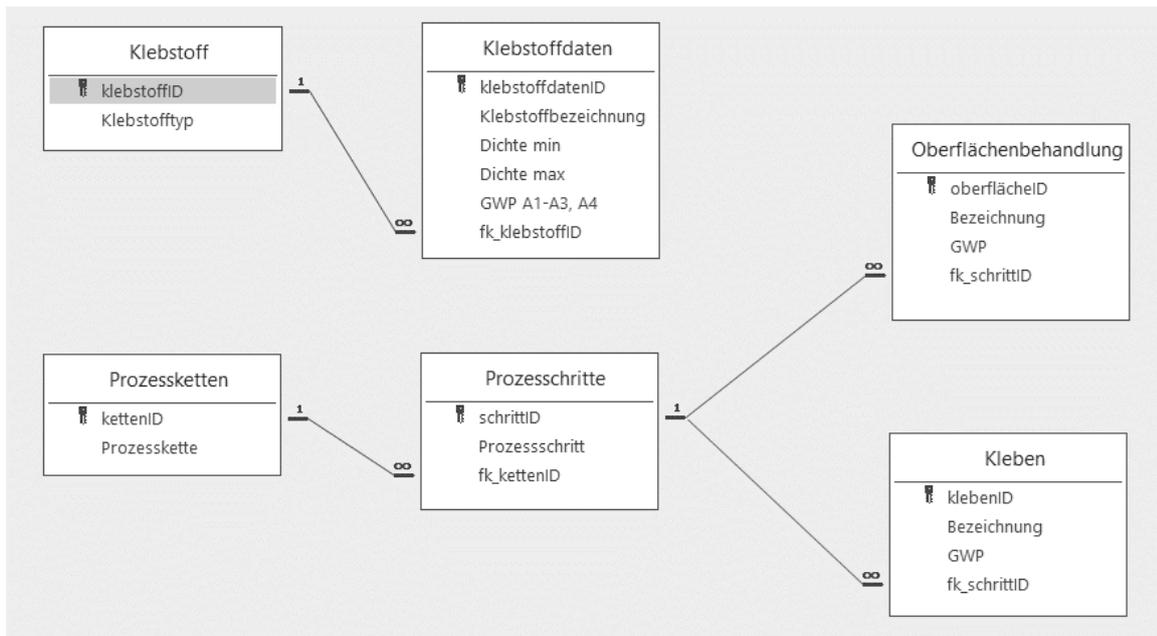


Abbildung 5-2: Modell der "Klebfuß" Datenbank

Zwischen den Tabellen liegt jeweils eine sogenannte 1:n-Beziehung zwischen dem Primärschlüssel und dem Fremdschlüssel der jeweiligen Tabellen vor. Am Beispiel der Tabellen Prozesskette und Prozessschritte bedeutet dies, dass die ID-Nummer in der Tabelle Prozesskette n Prozessschritten zugeordnet werden kann, wohingegen ein Prozessschritt nur genau einer Prozesskette angehören kann.

Unter der Normalisierung von Datenbanken wird die „Entfernung von Redundanzen in einem Datenmodell“ verstanden (Laube 2017). Das bedeutet, dass mehrfach berücksichtigte oder nicht benötigte Daten vermieden werden sollen, um die Verwaltung der Daten hinsichtlich Einfüge-, Aktualisierungs- und Löschvorgängen zu erleichtern sowie weniger Speicherplatz zu beanspruchen (Laube 2017).

Bei der Normalisierung wird zwischen drei Normalformen differenziert. Die 1. Normalform besagt, dass die in einer Spalte gespeicherten Daten hinsichtlich ihres Inhalts nicht weiter teilbar sind, also auf mehrere Spalten aufgeteilt werden können (Laube 2017).

Wenn zusätzlich zur 1. Normalform alle Nicht-Schlüsseleigenschaften einer Tabelle von einem eindeutigen Primärschlüssel abhängen, ist die 2. Normalform erfüllt (Laube 2017). Dies wird gewährleistet, indem verschiedene Tabellen angelegt werden, die in oben erwähnter 1:n-Beziehung stehen.

Tabelle 5-1: Eine die Normalform verletzende Tabelle

<b>kettenID</b>	<b>Prozesskette</b>	<b>schrittID</b>	<b>Prozessschritt</b>	<b>Prozessmodul</b>
1	Oberflächenbehandlung	2	Reinigen	Lappenreinigung
1	Oberflächenbehandlung	2	Reinigen	Ultraschallbad
2	Kleben	7	Mischen	Dynamischer Mischer

In

Tabelle 5-1 wird ersichtlich, dass sowohl eine nicht erwünschte Redundanz in der Spalte „Prozesskette“ als auch „Prozessschritt“ vorliegt. Darüber hinaus sind die Eigenschaften (Spalten) keinem Primärschlüssel zuzuordnen. Als Lösung werden die Informationen in mehrere miteinander in Beziehung stehende Untertabellen gemäß Abbildung 5-2 überführt, sodass in den Tabellen keine Redundanzen mehr auftreten und die Datensätze durch einen eindeutigen Primärschlüssel identifiziert werden können.

Abschließend wird von der Erfüllung der 3. Normalform gesprochen, wenn zusätzlich zur 1. und 2. Normalform keine Nichtschlüsseleigenschaften von einem anderen Nichtschlüsselattribut transitiv abhängig sind (Laube 2017). Erklärt werden kann dieses Prinzip anhand einer fiktiven Tabelle mit den Spalten „Postleitzahl“ und „Ort“, welche der 3. Normalform widerspricht, da aus der PLZ der Ort schlussgefolgert werden kann.

### **5.2.2. Formulare**

In Access gibt es die Möglichkeit mit Formularen zu arbeiten, die die Anwenderfreundlichkeit verbessern (Spieß und Swoboda 2013). Sie ermöglichen die übersichtliche Darstellung von Daten und ermöglichen gleichzeitig ein verbessertes Verwalten dieser (Spieß und Swoboda 2013).

Als gebundene Formulare werden die mit einer Datenquelle (Tabelle) verknüpften Formulare bezeichnet, welche z.B. zum Einfügen, Bearbeiten oder Löschen von Datensätzen genutzt werden (Spieß und Swoboda 2013). Die „KleFuß“-Datenbank beinhaltet die dementsprechenden Formulare:

- „VerwaltungKlebstoffe “
  - „Klebstofftyp Eingabe“
  - „Klebstoffdaten Eingabe“
- „VerwaltungKleben“
- „VerwaltungOberflächenbehandlung“

Weitere gebundene Formulare, die im Zuge der Bestimmung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes dem Anwender die Auswahl des spezifischen Klebprozesses ermöglichen, indem Abfragen aus entsprechenden Tabellen stattfinden, sind:

- „Klebstoffe“
- „Oberflächenbehandlung“
- „Kleben“

Es gibt auch die Möglichkeit ungebundene Formulare zu verwenden, die auf keiner Datenherkunft basieren. Dazu gehören im Anwendungsfall folgende Formulare, die zur Navigation bzw. Dateneingabe fungieren:

- „Menü“
- „Randparameter“.

### **5.2.3. Berichte**

Zur Zusammenführung der abgefragten Daten aus den Tabellen und der Eingaben des Anwenders wird ein Bericht eingesetzt. Die Berechnung des PCF erfolgt darüber hinaus ebenfalls in besagtem Bericht „Berechnung“, wobei die Daten gruppiert dargestellt und gedruckt werden können. In diesem Bericht wird der PCF des verwendeten Klebstoffs in Abhängigkeit der Klebstoffschichtdicke und der Klebfläche, für die verwendeten Prozessmodule der Oberflächenbehandlung sowie des Klebens ausgewiesen. Abschließend erfolgt die PCF-Gesamtberechnung des Klebprozesses.

## **5.3. Leitfaden zur Anwendung**

Über die Bestimmung des PCF hinaus soll die Datenbank auch eine nachhaltige und benutzerfreundliche Datenpflege ermöglichen. Deshalb soll dieser Leitfaden nicht nur aufzeigen, wie mit dieser Datenbank der PCF für eine Klebstoffanwendung bestimmt wird, sondern auch, wie zu einem späteren Zeitpunkt generierte Daten so einpflegt werden können, dass diese den Anforderungen der Tabellen entsprechen und bestehende Beziehungen nicht verletzen.

### **5.3.1. Benutzeroberfläche**

In Abbildung 5-3 ist die Benutzeroberfläche der Access-Anwendung dargestellt. Zu sehen ist das Formular „Menü“, welches beim Start der Datenbank automatisch geöffnet wird und verschiedene Möglichkeiten zur Navigation bietet. Wie bei Microsoft-Anwendungen üblich, befindet sich die Menüleiste mit Registern in der Kopfzeile der Anwendung. Sämtliche Bearbeitungsschritte lassen sich über diesen Menübereich (1) steuern. Die in Abschnitt 5.2 beschriebenen Datenbankelemente der Anwendung lassen sich über den Navigationsbereich (2), welcher sich bei Bedarf ein- und ausblenden lässt, auf der linken Seite der Benutzeroberfläche öffnen. Die geöffneten Objekte befinden sich anschließend im Arbeitsbereich (3); über ein Register kann zwischen diesen gewechselt werden. Um die Objekte in ihrer Ansicht zu wechseln und somit bspw. Formulare in der Entwurfsansicht zu bearbeiten, kann dies über den Ansichtssteuerungsbereich (4) geschehen (Spieß und Swoboda 2013).

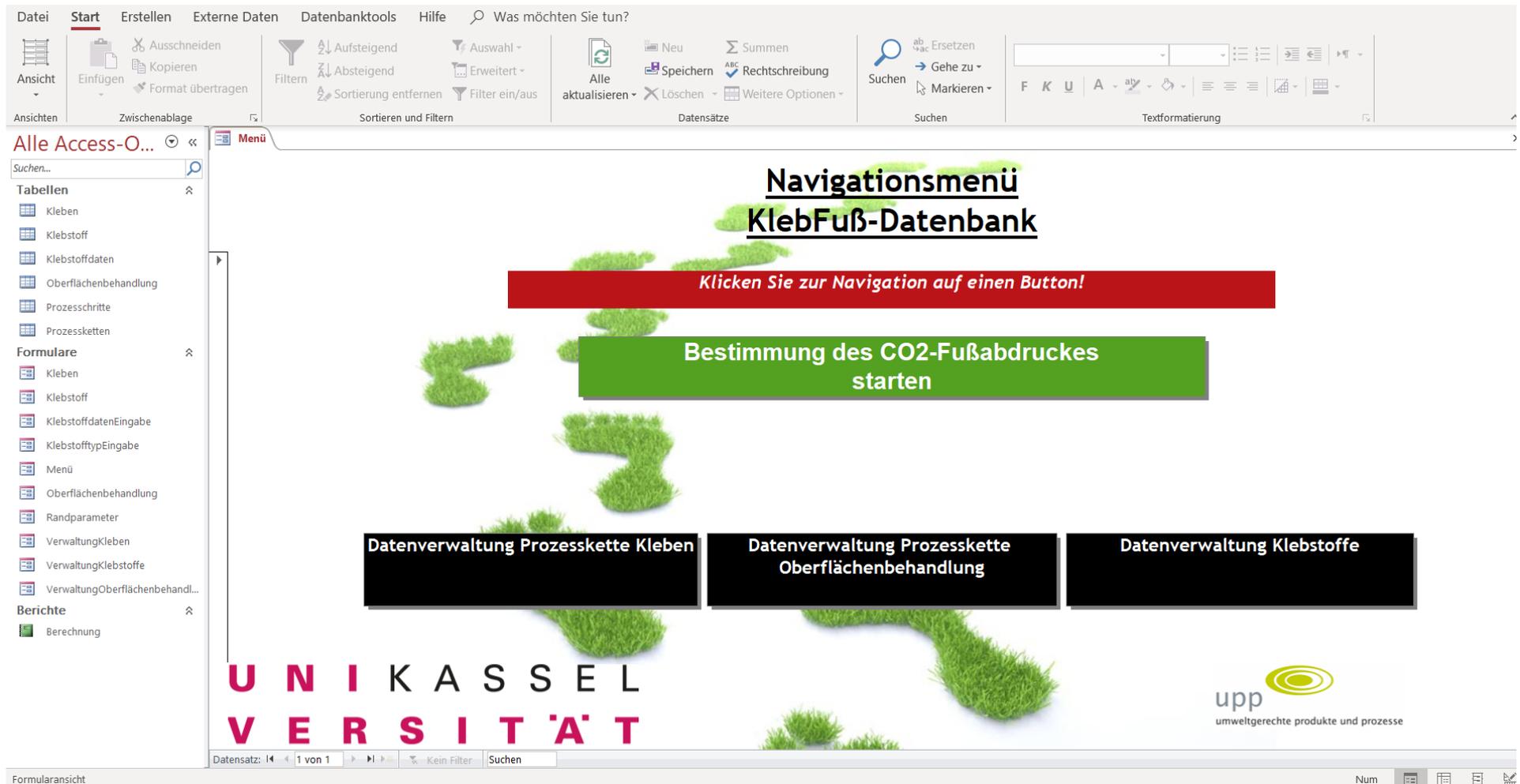


Abbildung 5-3: Access-Benutzeroberfläche (Navigationsmenü)

### 5.3.2. Dateneingabe

Zur Dateneingabe stehen drei verschiedene Formulare zur Verfügung, welche mit den schwarzen Buttons im Navigationsformular oder über den Navigationsbereich der Access-Anwendung geöffnet werden können (siehe dazu Abbildung 5-3).

#### Datenverwaltung der Prozessketten:

Die Datenverwaltung der zwei unterschiedlichen Prozessketten erfolgt mit einem analogen Vorgehen, sodass dieses nur beispielhaft anhand der Prozesskette Oberflächenbehandlung erläutert wird.

Es handelt sich bei dem Datenverwaltungsformular (siehe Abbildung 5-4) um ein geteiltes Formular. In einem solchen Formular werden die einzelnen Parameter, die es einzugeben gilt, im oberen Teil in Form eines für den Benutzer entwickelten Eingabeformulars dargestellt. Zugleich wird die entsprechende Tabellenansicht der Tabelle „Oberflächenbehandlung“, in der die eingegebenen Daten gespeichert werden, im unteren Teil des Formulars abgebildet. Das hat den Vorteil, dass schnell eine Übersicht über sämtliche vorhandene Datensätze ermöglicht wird.

oberflächeID	Bezeichnung	GWP [gCO2-Äq/10cm²]	fk_schrittID	Prozessschritt
1	geregelt (Klimaprüfschrank)	0,00E+00	2	Reinigen
2	ungeregelt	0,00E+00	1	Konditionieren
3	Lappenreinigung	0,00E+00	2	Reinigen
4	Ultraschallbad	0,00E+00	2	Reinigen
5	Reinigungsbad	0,00E+00	2	Reinigen
6	Trockenstrahlen	0,00E+00	3	Oberflächenvorbehandlung
7	Nassstrahlen	0,00E+00	3	Oberflächenvorbehandlung
8	Korrosionsstrahlen	0,00E+00	2	Oberflächenvorbehandlung

Abbildung 5-4: „KlebFuß“-Formular zur Datenverwaltung der Prozesskette Oberflächenbehandlung

Ob der Anwender die Dateneingabe mit dem vorgesehenen Eingabeformular oder alternativ direkt in der Datentabelle vornimmt, kann dieser je nach Präferenz entscheiden und erzielt das gleiche Resultat.

Die Datensatznavigation, also das Wechseln zwischen Datensätzen, kann sowohl über die dazu vorgesehenen Buttons geschehen als auch über das direkte Klicken auf die Datensätze in der Datentabelle. Zusätzlich ist eine Navigation über den Navigationsbereich im unteren linken Bereich des Formulars möglich, welcher auch eine „Suchfunktion“ bietet.

Für den Fall, dass ein neuer Datensatz hinzugefügt werden soll, ist ebenfalls ein Button vorhanden, der automatisch eine neue Zeile in der Tabelle anlegt. Die nun leer angezeigten Felder des Eingabeformulars können entsprechend ausgefüllt werden. Alternativ ist wieder eine direkte Eingabe in der Tabelle im unteren Teil des Formulars möglich.

Wenn beabsichtigt wird, einen Datensatz zu löschen, ist dies analog über den entsprechenden Button oder durch direktes Löschen einzelner Zeilen in der Tabelle realisierbar. In diesem Fall wird in einem Dialogfenster abgefragt, ob ein Löschen wirklich durchgeführt werden soll. Eine darauffolgende Bestätigung führt zum endgültigen Löschen.

Das Speichern von Änderungen bzw. Hinzufügen von neuen Datensätzen funktioniert durch Klicken auf den roten Button. Für den Fall, dass das Speichern vergessen wird, wird der Anwender beim Schließen des Formulars oder der Datenbank zur Absicherung nochmals gefragt, ob ein Speichern gewünscht wird.

Für die ordnungsgemäße Dateneingabe ist es notwendig, jedem Datensatz eine eindeutige „oberflächelD“ als numerischen Primärschlüssel zuzuweisen. Nach der entsprechenden Eingabe der „Bezeichnung“ und des „GWP-Wertes“ der funktionellen Einheit (= 10 cm<sup>2</sup>), ist die Auswahl des jeweiligen Prozessschrittes nötig, zu welchem das Prozessmodul zuzuordnen ist. Dies ist zwingend notwendig, da bei der späteren Bestimmung des PCF sämtliche Abfragen auf diesen Angaben beruhen. Das Kombinationsfeld ermöglicht die Auswahl aus den verschiedenen numerischen Werten und den entsprechenden zugewiesenen Prozessschritten der Prozesskette.

#### Datenverwaltung Klebstoffe:

Bei der Klebstoffdatenverwaltung wird zwischen zwei unterschiedlichen Formularen differenziert. Zum einen dient das Formular „KlebstofftypEingabe“ dazu, etwaige Klebstofftypen in der Datenbank zu organisieren. Aufbauend auf den vorhandenen Klebstofftypen können diesen in einem weiteren Formular „KlebstoffdatenEingabe“ entsprechende Klebstoffe mit ihren Charakteristika zugeordnet werden.

Übergeordnet können die angesprochenen Formulare über das Navigationsformular „VerwaltungKlebstoffe“ angesteuert werden, welches wiederum über den entsprechenden Button des Navigationsmenüs (siehe Abbildung 5-3) aufrufbar ist.

Dieses Navigationsformular zielt auf eine bessere Anwendbarkeit ab. Dennoch können die Unterformulare auch einzeln über den Access-Navigationsbereich bedient werden. Anhand des Navigationsformulars lassen sich zunächst die Klebstofftypen in dem entsprechenden Reiter verwalten (siehe Abbildung 5-5). Die Bedienung der Buttons erfolgt dabei analog zu obigen Ausführungen, ebenso wird die ID analog zur zuvor erläuterten Logik festgelegt. Das Formular ist verknüpft mit der Tabelle „Klebstoff“, in der die Dateneingaben gespeichert werden. Somit kann alternativ die Verwaltung der Daten auch direkt in der Tabelle erfolgen, falls dies von Anwendern präferiert wird.



Abbildung 5-5: „Klebstoff“-Formular zur Datenverwaltung der Klebstofftypen

Wie dem Datenbankmodell in Abbildung 5-2 zu entnehmen ist, steht diese Tabelle insofern in Beziehung zur Tabelle „Klebstoffdaten“, dass jedem Klebstofftyp mehrere Klebstoffe zugewiesen werden können, jedoch jeder Klebstoff nur einem Klebstofftypen. Vor diesem Hintergrund kann in einem weiteren Formular „KlebstoffdatenEingabe“, welches über den Reiter „Klebstoffdaten“ aufgerufen werden kann, die Verwaltung der den Klebstofftypen zugehörigen Klebstoffen umgesetzt werden (siehe Abbildung 5-6). Die allgemeine Bedienung des Formulars entspricht der obigen Herangehensweise. Die Dateneingabe umfasst zusätzlich zur ID und der Bezeichnung die minimale und maximale Dichte in  $\text{g/cm}^3$  sowie dass aus den

EPDs generierte GWP A1-A3 in g CO<sub>2</sub>e/g. Um die Beziehung zur Tabelle „Klebstoff“ herzustellen, wird in einem letzten Schritt der Klebstofftyp in einem Listenfeld ausgewählt.

klebstoffdatenID	Klebstoffbezeichnung	Dichte min	Dichte max	GWP A1-A3	Klebstofftyp
23	fischer Patronen auf Methacrylatharz-Basis	1,6	4	1,92	Acrylat

Abbildung 5-6: „Klebfuß“-Formular zur Verwaltung der Klebstoffdaten

### 5.3.3. Bestimmung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks

Beim Ausführen des grünen Buttons im Navigationsmenü, öffnen sich die für die Berechnung benötigten Formulare in der Navigationsleiste, beginnend mit dem Formular zur Eingabe der Randbedingungen, welches in Abbildung 5-7 dargestellt ist. Als Standardeinstellungen sind die Werte der Klebstoffdicke und Fügefläche auf null festgelegt. Wenn die Eingabe der Werte für den Anwendungsfall erfolgt ist, werden über den „Speichern und weiter“-Button einerseits die Werte über eine Ereignisprozedur in den Bericht „Berechnung“ überführt und andererseits ein Wechsel zum nächsten Formular „Klebstoff“ vorgenommen. Bevor die Speicherung erfolgt, wird in einem Dialogfenster erneut abgefragt, ob ein Speichern erwünscht ist. Gleichzeitig bleibt das verwendete Formular „Randparameter“ weiter im Hintergrund geöffnet, um die getätigten Eingaben nicht zu verwerfen.

Bitte geben Sie die Randbedingungen ein!

Speichern und weiter

Klebstoffschichtdicke eingeben [cm] (Bsp.: 0,5)	0,5
Fügefläche eingeben [cm <sup>2</sup> ]	100

Bildquelle: <http://www.maeni.ch/Umwelt/Klimawandel.html>

Datensatz: 1 von 1 | Kein Filter | Suchen

Abbildung 5-7: „KlebFuß“-Formular zur Eingabe der Randbedingungen

Allgemein kann die Navigation zwischen den geöffneten Formularen zusätzlich zu den vorhandenen „Speichern und weiter“-Buttons auch direkt durch Anklicken der Reiter erfolgen. Wichtig ist diesbezüglich zu erwähnen, dass generell eine abgeschlossene Eingabe zwangsläufig mit Betätigung des jeweiligen Buttons gespeichert werden muss, da, wie bereits erwähnt, das Ablaufen der entsprechenden Ereignisprozedur damit verknüpft ist und somit die Funktionalität der Datenbank gewährleistet.

Im zweiten Schritt der Berechnung, der Klebstoffauswahl, kann der Anwender zunächst zwischen den in Tabelle „Klebstoff“ gelisteten Klebstofftypen in einem Listenfeld einen bestimmten Klebstoff auswählen (siehe Abbildung 5-8). Ein schwarz hinterlegtes Feld signalisiert die aktuelle Auswahl. Aufbauend darauf kann zwischen den Klebstoffen, die den Klebstofftypen zugeordnet sind, in einem Kombinationsfeld gewählt werden. Die Auswahl wird erneut durch das Speichern bestätigt.

Bitte wählen Sie den verwendeten Klebstoff aus!

Zurück Speichern und weiter

**Klebstofftyp**

- Acrylat
- Dispersion
- Epoxidharz**
- Silikone
- Polyurethan

**Klebstoffbezeichnung** Reactive resins based on epoxy resin, filled and/or aqueous with low content of filler

Bildquelle: <https://www.tippscout.de/wp-content/uploads/2016/11/Heisskleber.jpg>

Datensatz: 14 1 von 1 Kein Filter Suchen

Abbildung 5-8: „KlebFuß“-Formular zur Klebstoffauswahl

Die Auswahl der Oberflächenbehandlungsprozessmodule wird in einem weiteren Schritt vorgenommen (siehe Abbildung 5-9). Der Aufbau ist so gestaltet, dass zwischen den einzelnen Prozessschritten differenziert wird. Im Hinblick darauf, dass zwei Substrate unterschiedlicher Werkstoffe verklebt werden könnten, die ggf. wiederum verschiedene Oberflächenbehandlungen bedürfen, gibt es die Möglichkeit, für die jeweiligen Substrate die Prozessmodule separat auszuwählen. Falls zwei gleichartige Substrate verklebt werden, können dementsprechend für beide Substrate die deckungsgleichen Prozessmodule ausgewählt werden. Das erneute Speichern schließt diesen Schritt zur Bestimmung des PCF ab.

**Welche Oberflächenbehandlungen haben Sie verwendet?** Zurück Speichern und weiter

Substrat 1 Substrat 2

**Konditionierung**  
Wie findet die Konditionierung statt? unregelt

**Reinigen**  
Prozessmodule Lappenreinigung  
Ultraschallbad

**Oberflächenvorbehandlung**  
Prozessmodule Trockenstrahlen  
Atmosphärenplasma

Datensatz: 1 von 1 Kein Filter Suchen

Bildquelle: <http://www.weise-fahrzeugbau.de/portfolio/rauto/>

Abbildung 5-9: „Klebfuß“-Formular zur Auswahl der Prozessmodule der Oberflächenbehandlung

Ähnlich strukturiert im Aufbau ist das im nächsten Schritt aufgerufene Formular zur Auswahl der Prozessmodule des Klebens. Analog zum vorherigen Formular können die entsprechenden Prozessmodule für die Prozessschritte gewählt werden. Da die Datenbank unter der Annahme ausgelegt ist, dass für die einzelne Klebanwendung nur ein Klebstoff eingesetzt wird, wird auf Ebene der Prozessschritte nicht wie im vorherigen Formular weiter zwischen Prozessmodulen der Substrate unterschieden, da anzunehmen ist, dass diese für beide Substrate identisch sind. Die in der Datenbank hinterlegten GWP-Werte in  $\text{g CO}_2\text{e}/10\text{cm}^2$  der Prozessmodule basieren auf der Annahme, dass nur eine Substratfläche mit Klebstoff appliziert wird.

Abschließend erfolgt die Berechnung des PCF im gleichnamigen Bericht (siehe Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11). Dieser ist in die vier Bereiche Klebstoffauswahl, Prozesskette Oberflächenbehandlung, Prozesskette Kleben und die Gesamtübersicht der Berechnung gegliedert. Zu Beginn werden die in den entsprechenden Formularen ausgewählten Randparameter sowie der Klebstoff und deren charakteristische Daten angezeigt. Durch Starten der Berechnung mit dem dafür entwickelten Button werden die minimale und maximale Dichte sowie der GWP-Wert, die aus den entsprechenden Tabellen abgerufen werden, festgelegt (schwarze Hinterlegung), um die Ergebnisse der Berechnung des minimalen und maximalen GWP pro Fügefläche in der Gesamtübersicht am Ende des Berichtes anzuzeigen.

**Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks:**

Dienstag, 3. Dezember 2019 22:54:30 UNIKABEL  
VERSITÄT

---

**Klebstoffauswahl**

Klebstoff

Fügefläche in cm<sup>2</sup>  Dichte min. in g/cm<sup>3</sup>

Klebstoffschichtdicke in cm  Dichte max. in g/cm<sup>3</sup>

GWP A1-A3 in gCO<sub>2</sub>e/g

**Prozesskette Oberflächenbehandlung**

Prozessschritt	Prozessmodul	GWP	Prozessmodul	GWP
	Substrat 1:	g CO <sub>2</sub> e/ 10cm <sup>2</sup>	Substrat 2:	g CO <sub>2</sub> e/ 10cm <sup>2</sup>
Konditionierung	<input type="text"/>	0	<input type="text"/>	0
Reinigen	<input type="text"/>	0	<input type="text"/>	0
	<input type="text"/>	0	<input type="text"/>	0
	<input type="text"/>	0	<input type="text"/>	0
DVB	<input type="text"/>	0	<input type="text"/>	0
	<input type="text"/>	0	<input type="text"/>	0
	<input type="text"/>	0	<input type="text"/>	0

Seite 1 von 3

Abbildung 5-10: „KlebFuß“-Bericht zur Berechnung (1/3)

**Prozesskette Kleben**

Prozessschritt	Prozessmodul	GWP in gCO <sub>2</sub> e/10cm <sup>2</sup>
Bewirren	<input type="text"/>	0
Fördern	<input type="text"/>	0
Dosieren	<input type="text"/>	0
Mischen	<input type="text"/>	0
Applizieren	<input type="text"/>	0
Fügen	<input type="text"/>	0
Finieren	<input type="text"/>	0
Bestrahlen	<input type="text"/>	0
Aushärten	<input type="text"/>	0

Seite 2 von 3

Abbildung 5-11: „KlebFuß“-Bericht zur Berechnung (2/3)

Die Eingaben aus den Formularen der Oberflächenbehandlung und des Klebens werden in den jeweiligen Gliederungsbereichen des Berichtes ausgewiesen. Ersichtlich werden einerseits die Bezeichnungen der ausgewählten Prozessmodule und zusätzlich die zugehörigen GWP-Werte pro FE. Für den Fall, dass für einzelne Prozessschritte keine Angaben gemacht werden, bleiben die dazugehörigen Textfelder im Bericht leer. Sobald die Berechnung gestartet wird, werden die GWP-Werte pro FE auf die Randparameter der spezifischen Klebanwendung bezogen und in der Gesamtberechnungsübersicht (siehe Abbildung 5-12) dargestellt. In dieser wird sowohl das GWP für die Prozessketten als auch das für die Prozessschritte ausgewiesen.

Am Ende der Gesamtberechnungsübersicht wird schließlich der berechnete minimale bzw. maximale PCF der Klebstoffanwendung ersichtlich. Zur Dokumentation der Ergebnisse kann der Bericht über den Drucken-Button gedruckt oder in ein PDF-Datei überführt werden.

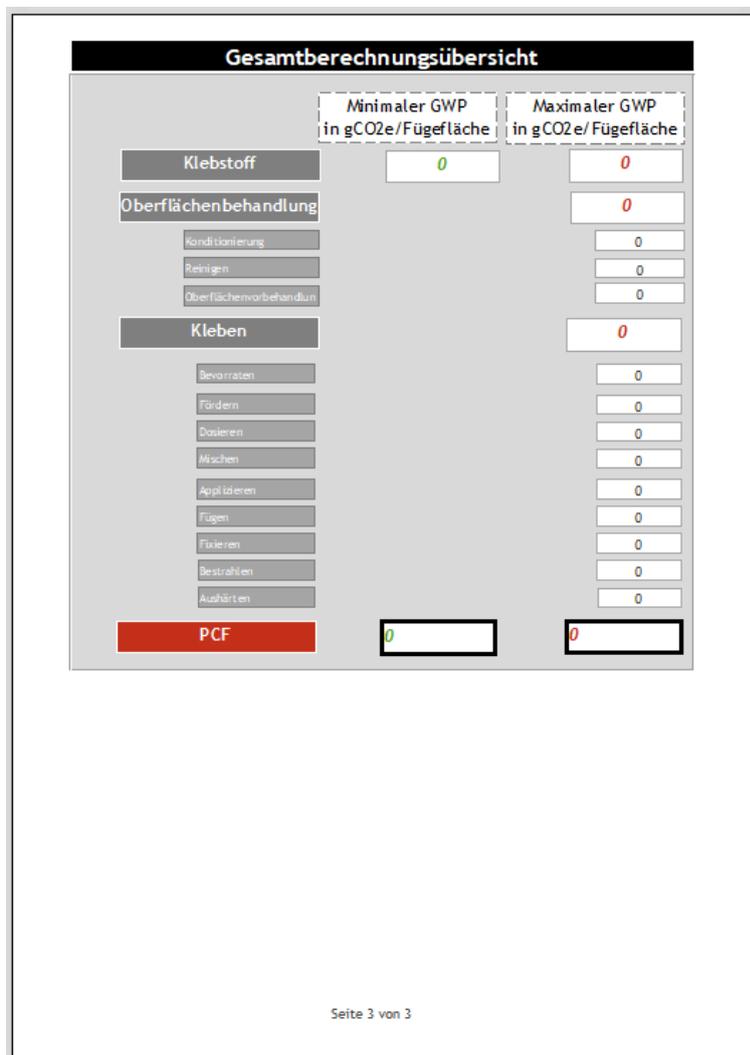


Abbildung 5-12: KlebFuß"- Bericht zur Berechnung (3/3)

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

---

### 6.1. Zusammenfassung

Der Klimawandel und seine Folgen beherrschen mehr denn je die aktuelle öffentliche Diskussion in Deutschland. Vielfach wird diskutiert, durch welche Maßnahmen eine Begrenzung der emittierten Treibhausgase (THG) und die damit verbundene Verhinderung des globalen mittleren Temperaturanstiegs möglich werden, um negative Auswirkungen auf das menschliche Leben und die Natur zu minimieren. Um die vom Weltklimarat IPCC prognostizierte globale Erwärmung um 1,5 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit zwischen 2030 - 2050 zu begrenzen bzw. nicht weiter zu beschleunigen (vgl. IPCC-Koordinierungsstelle, S. 8), ist neben der Gesellschaft und Politik auch die Industrie gefordert.

Das Fertigungsverfahren Kleben zählt zur Hauptgruppe Fügen (DIN 8593-8) und wird den stoffschlüssigen Fügeverfahren zugeordnet (vgl. Habenicht 2016a, S. 1). Im Vergleich zu anderen Fügeverfahren gibt es für das Kleben keine valide Datengrundlage, die der Klebstoffverarbeitenden Industrie eine auf wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhende Transparenz klebtechnisch bedingter THG-Emissionen ermöglicht.

Das übergeordnete Ziel dieses Projektes ist es, das Fügeverfahren Kleben unter treibhausgasbezogenen Aspekten zu bewerten. Im Detail wird damit beabsichtigt, den Beitrag klebtechnischer Prozesse zum Klimawandel transparent darzulegen. Dazu wurde ein Product Carbon Footprint (PCF) erarbeitet, welcher sowohl das Treibhauspotential für verschiedene Klebstoffe als auch für die Prozesse der Oberflächenbehandlung und des Klebens aufzeigt.

Damit ein Vergleich zwischen dem GWP der verschiedenen Phasen und Prozessschritten einer Klebung möglich ist, wurde eine funktionelle Einheit von  $A_{FE} = 10 \text{ cm}^2$  (bzw.  $A_{FE} = 1 \text{ m}^2$ ) festgelegt. Die ermittelten CO<sub>2</sub>e-Emissionen beziehen sich stets auf diese funktionelle Einheit, können aber leicht auf anwenderspezifische Werte umgerechnet werden.

Die Lebenszyklusphasen des PCF umfassen neben der Rohstoffgewinnung, der Produktion und der Distribution auch die Phasen der Nutzung und der Entsorgung. Der Untersuchungsrahmen dieser Arbeit umfasst dabei die Phasen von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Nutzung.

Zunächst erfolgte für die ersten drei Phasen des Lebenszyklus eine entsprechende Analyse verschiedener Klebstoffe. Die Bewertung dieser Klebstoffe wurde methodisch anhand von EPDs durchgeführt, aus welchen das GWP der Klebstoffe für die drei relevanten Phasen

entnommen wurde. Mit entsprechenden charakteristischen Klebstoffschichtdicken und der minimalen bzw. maximalen Dichten der Klebstoffe konnte das GWP in  $\text{gCO}_2\text{e}/10\text{cm}^2$  für die untersuchten Klebstoffe umgerechnet werden. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass sich sowohl für silanmodifizierte Polyurethane als auch für Silikone verhältnismäßig hohe THG-Emissionen bestimmen ließen. Andererseits ist das Treibhauspotential für Epoxidharze, Acrylate und Dispersionsklebstoffe eher als gering einzustufen.

In einem nächsten Schritt galt es, die nachfolgende Klebstoffanwendung zu untersuchen. Dafür wurden die verschiedenen Prozessschritte einer Klebanwendung und die diesen zugeordneten Prozessmodulen analysiert. Dahingehend wurden sowohl Primärdaten durch Messungen bei Prozessen in den Laboren des Fachgebiets tff als auch bei Industriepartnern erhoben. Zudem fand eine Akquise von Sekundärdaten, die durch die Analyse der Datenblätter von Prozessanlagen gewonnen wurden, statt. Der Bilanzrahmen umfasst dabei den Einsatz von elektrischer und thermischer Energie, wobei auch der Energiebedarf zum Betrieb der Druckluftversorgung berücksichtigt wurde. Die während einer Klebanwendung benötigten Betriebsstoffe waren nicht Teil der Bilanzierung. Zur Quantifizierung der benötigten Energie für den Druckluftbetrieb ist es gelungen, für verschiedene absolute Druckniveaus die spezifische Arbeit in  $\text{Wh}/\text{m}^3$  zu bestimmen. Methodisch wurden Energiedaten mit elektrischen Leistungsmessungen von Prozessanlagen oder auf theoretischer Basis gewonnen. Für diejenigen Prozessmodule, für die keine messtechnische Erfassung realisierbar war, ist die Ermittlung des elektrischen und thermischen Energieaufwands theoretisch mittels technischer Datenblätter erfolgt. Da im Laufe einer Klebanwendung des Öfteren Arbeitsschritte manuell durch den Menschen ausgeführt werden, galt es, auch den für diese Arbeiten benötigten Energieaufwand zu quantifizieren. Deshalb wurden klebanwendungsspezifische MET-Werte festgelegt, die es ermöglichen, die manuelle Energie in Wattstunden zu berechnen und dadurch eine direkte Vergleichbarkeit zu den anderen Energieformen sicherzustellen. Eine beabsichtigte Wirkungsabschätzung hinsichtlich des Treibhauspotentials dieser Arbeitsschritte machte es im Weiteren notwendig, Emissionsfaktoren für die sich unterschiedlich ernährenden Menschen zu bestimmen. Als Resultat ließ sich ein Emissionsfaktor für eine durchschnittliche Ernährung mit Fleisch in Höhe von  $1,298 \text{ gCO}_2\text{e}/\text{Wh}$  definieren, wohingegen sich für eine vegetarische und vegane Ernährung reduzierte Emissionswerte ergaben.

Zu Beginn der Analyse der Nutzungsphase wurde die Prozesskette der Oberflächenbehandlung (OB) thematisiert, die sich aus den Prozessschritten der Konditionierung, des Reinigens und der Oberflächenvorbehandlung (OVB) zusammensetzt. Auf Prozessschritzebene ergab die Analyse, dass das Reinigen und die OVB durchschnittlich

am emissionsintensivsten sind. Hinsichtlich des GWP hervorzuhebende Prozessmodule sind verschiedene Strahlvorgänge zur OVB sowie die Reinigung in einem Ultraschallbad.

In der nachfolgenden Prozesskette des Klebens lässt sich der Prozessschritt des Aushärtens als energieintensiv einstufen. Dementsprechend lieferte die nachfolgende Wirkungsabschätzung das Ergebnis, dass dieser Prozessschritt die durchschnittlich größte Menge an emittierten THG aufweist. Da im Rahmen dieser Prozesskette für eine Vielzahl der anderen Prozessschritte lediglich manuelle Tätigkeiten fokussiert wurden und diese einen geringeren Energiebedarf besitzen, ist das GWP verhältnismäßig gering.

Ein abschließender Vergleich der beiden Prozessketten der Nutzungsphase ließ ersichtlich werden, dass die OB im Durchschnitt energie- und emissionsintensiver ist. Bei dieser Untersuchung wurden die durchschnittlichen GWP-Werte sämtlicher Prozessschritte gegenübergestellt.

Anschließend wurde ein übergeordneter Vergleich zwischen den Lebenszyklusphasen realisiert. Dieser gab zu erkennen, dass die der Nutzungsphase vorgelagerten Phasen, in der der Rohstoff der Klebstoffe gewonnen wird, die Klebstoffproduktion sowie die Distribution stattfindet, durchschnittlich einen größeren Beitrag zum gesamten GWP einer Klebanwendung leisten als die Nutzungsphase selbst.

An dieser Stelle sei auf die eingeschränkte Repräsentativität der Ergebnisse hingewiesen, da in der Datengrundlage weder alle Klebstofftypen noch sämtliche Prozessmodule berücksichtigt werden konnten. Es ist möglich, dass in Zukunft die Analyse weiterer Prozessmodule die GWP-Verteilung der Prozessschritte revidiert, da mögliche energieintensive bzw. energiearme Prozesse im Zuge des Projekts nicht bilanziert werden konnten.

Die aus Tabellen, Formularen und einem Bericht bestehende Datenbank wurde so aufgebaut, dass neben der Dokumentation der bisherigen Ergebnisse eine nachträgliche Datenpflege benutzerfreundlich ermöglicht wurde. Dafür wurden spezielle Eingabeformulare erstellt, die nachträglich generierte Emissionsdaten von Klebstoffen sowie von Prozessmodulen der OB und des Klebens in die Datenbank aufnehmen können.

Der Kern der entwickelten Datenbankanwendung ist die Bestimmung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes für einen anwendungsspezifischen Klebprozess. Diese wird durch die Eingabe der Klebstoffschichtdicke und der Klebfläche sowie der anschließenden Auswahl der angewandten Prozessmodule verwirklicht.

## 6.2. Fazit

Die in diesem Bericht aufgeführten Untersuchungen und deren Ergebnisse konnten die aufgetretenen Forschungshypothesen beantworten. Durch die Einbindung des gesamten Prozesses von der Klebstoffherstellung über die Oberflächenbehandlung und dem Fügen selbst, welche jeweils noch in die unterschiedlichen Anteile an elektrischer, thermischer bis hin zur manuellen Arbeit untergliedert wird, ist es möglich Aussagen über das GWP einer gesamten Anwendung zu treffen. Gerade die Inbezugnahme der manuellen Arbeit ist hier zu erwähnen.

Anhand der in diesem Projekt aufgestellten Unterteilung der Klebstoffe nach energetischen Gesichtspunkten kann einer modularisierten Beschreibung von Klebprozessen erfolgen.

Durch die Bilanzierung unterschiedlicher Anlagen und Prozesse mit Hilfe von Primär- und Sekundärdaten konnte ein grundlegendes Verständnis über die Entwicklung des GWPs von der Herstellung des Klebstoffes über die notwendigen Oberflächenbehandlungen bis hin zur Klebprozessen gewonnen werden.

Mit der Entwicklung der Datenbank können nun Prozessketten theoretisch betrachtet und hinsichtlich GWP berechnet werden. So können ggf. Optimierungspotentiale offengelegt werden. Die Pflege der Datenbank soll nach Projektende von einer zentralen Stelle übernommen werden.

Demnach kann das Projekt als erfolgreich abgeschlossen angesehen werden.

## 7. DANKSAGUNG

---

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse des Forschungsprojekts „Entwicklung und Validierung einer Bewertungsmethode zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Klebanwendungen – Klebfuß“ zusammen, das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse (upp) der Universität Kassel sowie mit dem Fachgebiet für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff) der Universität Kassel durchgeführt.

Für die Betreuung und Förderung sei der Forschungsvereinigung DECHEMA mit ihren Vertretern herzlich gedankt.

Allen Firmen, die Wissen zur Verfügung gestellt haben, Messungen im Betrieb möglich gemacht haben sei an dieser Stelle ebenfalls gedankt. Außerdem bedanken wir uns für interessante Diskussionen und Anregungen bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses:

Dr. Hermann Onusseit	Industrieverband Klebstoffe e.V.
Dr.-Ing. Dirk Hasenberg	3M Deutschland GmbH
Dr.-Ing. Matthias Geistbeck	Airbus Group
Dr. Christoph Üffing	Bosch GmbH
Dipl.-Phys. Veronika Katzy	Clean-Lasersysteme GmbH
Ralf J. Müller	Fritz Häcker GmbH + Co. KG
Dr. Axel Hessland	Industrieverband Klebstoffe e.V.
Dr. Hartmut Henneken	Jowat SE
Dr. MarkJunge	Limón GmbH
Sven Krumbiegel	Miele & Cie. KG
Jürgen Stichling	PE International GmbH
Bernd Faller	RAMPF Production Systems GmbH & Co. KG
Dipl.-Ing. Hartmut Storz	RAMPF Production Systems GmbH & Co. KG
Dipl.-Ing (FH) Till Odilo Kegel	Toconus Klebetechnik
Dr. Andreas Fricke	Volkswagen AG
Alf Birkenstock	WKW-Erbslöh Automotive GmbH

Autoren:

N. Ratsch<sup>1</sup>, S. Böhm<sup>1</sup>, M. Burnett<sup>1</sup>, F. Ebersold<sup>2</sup>, J. Hesselbach<sup>2</sup>

## 8. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

Abbildung 1-1: Phasen eines PCF einer Klebung (in Anlehnung an BMU/BDI 2012).....	9
Abbildung 1-2: Vorgehensweise PCF (in Anlehnung an BMU/BDI 2012).....	10
Abbildung 2-1: Übersicht der Feritungsverfahren nach DIN 8593-8.....	21
Abbildung 2-2: Klebtechnische Begriffe (Habenicht 2016b) .....	22
Abbildung 2-3: Polymerbildung (Habenicht 2016).....	23
Abbildung 2-4: Bindungskräfte im Grenzschichtbereich (Doobe 2018) .....	24
Abbildung 2-5: Treibhauseffekt (Brasseur et al. 2017) .....	26
Abbildung 2-6: Lebenszyklus eines PCF (Bundesministerium für Umwelt,Naturschutz und Reaktorsicherheit) .....	27
Abbildung 2-7: Phasen eines Product Carbon Footprints Bild 1 - Phasen einer Ökobilanz (DIN 2009, S. 20).....	28
Abbildung 2-8 Grundlegender Aufbau einer Durchflussmessung mit Ultraschall (Hesselbach 2012).....	31
Abbildung 3-1: Klebstoffproduktion in 100.000 t (adhäsion 2017, 61(11) .....	33
Abbildung 3-2: Einteilung der Klebstoffsysteme nach energetischen Gesichtspunkten.....	34
Abbildung 3-3: Klebstoffübersicht aus EPDs .....	35
Abbildung 3-4: Prozessschritte und Prozessmodule der Oberflächenvorbehandlung nach DIN SPEC 2305-1 .....	36
Abbildung 3-5: Darstellung der Adhäsionskräfte bei Verunreinigungen der Oberfläche (Habenicht 2016).....	37
Abbildung 3-6: Oberflächenarten (Habenicht 2016).....	39
Abbildung 3-7: SACO-Verfahren (Rasche 2012) .....	40
Abbildung 3-8: Prozessschritte und Prozessmodule des Klebens .....	41
Abbildung 3-9: Systemgrenzen im Kontext des Lebenszyklus einer Klebstoffanwendung ....	46
Abbildung 3-10: GWP-Berechnungsmatrix für beispielhafte Epoxidharze.....	49
Abbildung 3-11: Spezifischer Leistungsbedarf von Kompressoren (IHK Nürnberg für Mittelfranken 2012).....	53
Abbildung 3-12: MET-Werte für klebstoffspezifische Prozesse.....	56
Abbildung 3-13: Direkte Treibhausgasemissionen pro Kopf durch Ernährung in Deutschland (noleppa).....	57
Abbildung 4-1: Grafische Darstellung des GWP einzelner Klebstoffsysteme .....	61
Abbildung 4-2 Beispielhafte Prozesskette an den Laboranlagen .....	62
Abbildung 4-3 GWP der untersuchten Prozessketten.....	62

Abbildung 4-4: Vorbereitende Tätigkeiten (a) Reinigungsschliff; b) Grundieren) .....	65
Abbildung 4-5: Prozesskette beim Verlegen von Designbeläge mit diversen Varianten.....	66
Abbildung 4-6: Prozesskette: Verlegen von Parkett in unterschiedlichen Varianten.....	67
Abbildung 4-7: GWP Verlegen von Designböden unterteilt nach einzelnen Prozessen .....	68
Abbildung 4-8: GWP Verlegen von Designbelägen (kumulierte Ansicht) .....	69
Abbildung 4-9: GWP: Verlegen von Parkett unterteilt nach einzelnen Prozessschritten.....	70
Abbildung 4-10: GWP: Verlegen von Parkett unterteilt nach Varianten.....	70
Abbildung 4-11 Dispersionsauftrag.....	71
Abbildung 4-12 GWP Dispersionsauftrag .....	72
Abbildung 4-13 Fügen mit Flachpresse .....	72
Abbildung 4-14 GWP Prozesskette Dispersionsauftrag und Flachpresse .....	73
Abbildung 4-15: GWP Prozesskette Dispersionsauftrag (kumulierte Ansicht).....	73
Abbildung 4-16 Spanplatte-Platte vor und nach dem Kantenleimprozess .....	74
Abbildung 4-17 Kantenfräsanlage .....	74
Abbildung 4-18 GWP Kantenleimen und Polyolefinrezepturen .....	75
Abbildung 4-19 Substrate und Spiegel- und Plattenverbund.....	76
Abbildung 4-20 Aufschmelzen der Polyurethankerze .....	76
Abbildung 4-21 Flatlaminationsanlage (links) und Flachpresse (rechts) .....	77
Abbildung 4-22 GWP Flatlaminierung, Flachpresse und Herstellung Polyurethan .....	77
Abbildung 4-23 Optical Bonding-Prozess .....	78
Abbildung i-4-24 GWP Prozesskette Optical Bonding.....	79
Abbildung 4-25: GWP Hypothetischer Prozess.....	80
Abbildung 4-26: Sachbilanz nach Energieträgern für die Prozessmodule der Oberflächenbehandlung .....	83
Abbildung 4-27: Sachbilanz nach Energieträgern der Prozessmodule Kleben.....	86
Abbildung 4-28: Grafische Darstellung des GWP der Prozessmodule Oberflächenbehandlung .....	89
Abbildung 4-29: GWP-Verhältnis zwischen den Prozessmodulen der Oberflächenbehandlung .....	90
Abbildung 4-30: Grafische Darstellung des GWP der Prozessmodule (Kleben).....	92
Abbildung 4-31: GWP-Verhältnis zwischen den Prozessschritten des Klebens .....	93
Abbildung 4-32 GWP-Vergleich zwischen den Prozessketten (Oberflächenbehandlung und Kleben) und Vergleich der Lebenszyklusphasen .....	94
Abbildung 4-33: GWP-Vergleich zwischen den Lebenszyklusphasen.....	95
Abbildung 5-1: In der Datenbank hinterlegte Tabellen .....	97
Abbildung 5-2: Modell der "KleFuß" Datenbank.....	98
Abbildung 5-3: Access-Benutzeroberfläche (Navigationsmenü) .....	102

Abbildung 5-4: „KleFuß“-Formular zur Datenverwaltung der Prozesskette Oberflächenbehandlung .....	103
Abbildung 5-5: „KleFuß“-Formular zur Datenverwaltung der Klebstofftypen .....	105
Abbildung 5-6: „KleFuß“-Formular zur Verwaltung der Klebstoffdaten .....	106
Abbildung 5-7: „KleFuß“-Formular zur Eingabe der Randbedingungen .....	107
Abbildung 5-8: „KleFuß“-Formular zur Klebstoffauswahl.....	108
Abbildung 5-9: „KleFuß“-Formular zur Auswahl der Prozessmodule der Oberflächenbehandlung .....	109
Abbildung 5-10: „KleFuß“-Bericht zur Berechnung (1/3) .....	110
Abbildung 5-11: „KleFuß“-Bericht zur Berechnung (2/3) .....	110
Abbildung 5-12: KleFuß"- Bericht zur Berechnung (3/3) .....	111

## 9. TABELLENVERZEICHNIS

---

Tabelle 3-1: Technische Spezifikationen des Ultraschallbads( <b>Allplax GmbH &amp; Co. KG 2018</b> ) .....	51
Tabelle 3-2: Spezifische Energiebedarfe von Kompressoren.....	53
Tabelle 3-3: Technische Spezifikationen Befeuchtungsanlage( <b>Arcotec GmbH 2009</b> ) .....	54
Tabelle 3-4: Spezifische Emissionsfaktoren für die manuelle Arbeit .....	57
Tabelle 3-5: Verwendete Emissionsfaktoren.....	58
Tabelle 4-1: GWP der Klebstoffsysteme .....	60
Tabelle 4-2: Sachbilanz der Prozessmodule Oberflächenbehandlung .....	82
Tabelle 4-3: Sachbilanz der Prozessmodule Kleben.....	85
Tabelle 4-4: Wirkbilanz der Prozessmodule Oberflächenbehandlung .....	88
Tabelle 4-5: Wirkbilanz der Prozesskette Kleben.....	91
Tabelle 5-1: Eine die Normalform verletzende Tabelle .....	99

## 10. LITERATUR

---

Allpax GmbH & Co. KG (2018): Bedienungsanleitung Ultraschall-Reinigungsgeräte UD- und UI-Serie. Hg. v. Allpax GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter [https://media.allpax.de/media/products/manual\\_ultraschallreiniger\\_de.pdf](https://media.allpax.de/media/products/manual_ultraschallreiniger_de.pdf), zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Arcotec GmbH (2009): Flammbehandlung FTS. Hg. v. Arcotec GmbH. Online verfügbar unter <http://www.arcotec.com/Flyer-web/FTS.pdf>, zuletzt geprüft am 06.11.2019.

Bernstein, Lenny (2008): Climate Change 2007: Synthesis report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC. Online verfügbar unter [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf).

Brasseur, Guy; Jacob, Daniela; Schuck-Zöller, Susanne (Hg.) (2017): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin: Springer Spektrum.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.): Produktbezogene Klimaschutzstrategien. Product Carbon Footprint verstehen und nutzen. Online verfügbar unter [https://bdi.eu/media/presse/publikationen/PCF-Leitfaden\\_100810\\_Online.pdf](https://bdi.eu/media/presse/publikationen/PCF-Leitfaden_100810_Online.pdf).

Chauvin Arnoux Group (2019): Bedienungsanleitung C.A 8331, C.A 8333. Analysator für Drehstromnetze. Hg. v. Chauvin Arnoux Group.

DIN (2009): DIN EN ISO 14040, zuletzt geprüft am 11.01.2021.

DIN (2019): Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung. 2019-02: Beuth (13.020.40), zuletzt geprüft am 11.01.2021.

Doobe, Marlene (Hg.) (2018): Kunststoffe erfolgreich kleben. Grundlagen, Klebstofftechnologien, Best-Practice-Beispiele. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. 1. Auflage 2018. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Dr. Andreas Winkel (2018a/2019): Klebtechnische Fertigungsverfahren. Oberflächenvorbehandlung.

Ebnesajjad, Sina; Ebnesajjad, Cyrus F. (2014): Surface treatment of materials for adhesive bonding. Second edition. Amsterdam, Boston, Heidelberg: William Andrew an imprint of Elsevier.

FEICA - Association of the European Adhesive and Sealant Industry (2018): Reactive resins based on polyurethane or silane modified polymers, containing solvent, solvent content between 10% and 50%.

DIN 8580, September 2003: Fertigungsverfahren Begriffe, Einteilung.

DIN 8593-8, September 2003: Fertigungsverfahren Fügen Teil 8: Kleben Einordnung, Unterteilung, Begriffe.

generaldigital (2021): Optical Bonding of Flat Panel Displays | General Digital. Online verfügbar unter <https://www.generaldigital.com/optical-bonding-of-flat-panel-displays>, zuletzt aktualisiert am 08.03.2021, zuletzt geprüft am 08.03.2021.

Habenicht, Gerd (2009): Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 6., aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).

Habenicht, Gerd (2016a): Kleben - erfolgreich und fehlerfrei. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Habenicht, Gerd (2016b): Kleben - erfolgreich und fehlerfrei. Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie. 7., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch).

Heckert, André (2019): Oberflächenstrukturierung von Aluminium mittels gepulster Laserstrahlung für das thermische Fügen an endlosfaserverstärkte Thermoplaste. Unter Mitarbeit von Michael Zäh. München: Universitätsbibliothek der TU München.

Heidi Hottenroth, Bettina Joa, Prof. Dr. Mario Schmidt (2013): Carbon Footprints für Produkte. Handbuch für die betriebliche Praxis kleiner und mittlerer Unternehmen 2013. Online verfügbar unter [https://www.hs-pforzheim.de/fileadmin/user\\_upload/uploads\\_redakteur/Forschung/INEC/Dokumente/Publicationen/Hottenroth\\_et\\_al\\_Carbon\\_Footprints\\_fuer\\_Produkte\\_web.pdf](https://www.hs-pforzheim.de/fileadmin/user_upload/uploads_redakteur/Forschung/INEC/Dokumente/Publicationen/Hottenroth_et_al_Carbon_Footprints_fuer_Produkte_web.pdf).

Hesselbach, Jens (2012): Energie- und klimaeffiziente Produktion. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, zuletzt geprüft am 21.01.2021.

IHK Nürnberg für Mittelfranken (2012): Druckluft effizient nutzen. Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung der Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken. Nürnberg: IHK Nürnberg für Mittelfranken. Online verfügbar unter <https://www.ihk-nuernberg.de/de/media/PDF/Innovation-Umwelt/Energie/leitfaden-druckluft-effizient-nutzen.pdf>.

Institut Bauen und Umwelt e.V. (Hg.): EPD Programm. Online verfügbar unter <https://ibu-epd.com/epd-programm/>, zuletzt geprüft am 24.07.2019.

IPCC-Koordinierungstelle (Hg.): 1,5 °C Globale Erwärmung. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger.

Laube, Michael (2017): Einstieg in SQL. 1. Auflage. Bonn: Rheinwerk Verlag GmbH (Rheinwerk Computing). Online verfügbar unter [https://www.rheinwerk-verlag.de/einstieg-in-sql\\_4389/](https://www.rheinwerk-verlag.de/einstieg-in-sql_4389/).

Limón GmbH: Theoretische Ermittlung des Energieverbrauchs mittels eines Korrekturfaktors an Marius Naumann.

Luke, Andrea Dr.-Ing. (2018): Technische Thermodynamik 1. Universität Kassel.

Noleppa, Steffen (2012): Klimawandel auf dem Teller. Ernährung, Nahrungsmittelverluste, Klimawirkung. Stand Oktober 2012. Berlin: WWF Deutschland (WWF Studie).

Onusseit, H. (2019): Kleben - das Fügeverfahren des 21. Jahrhunderts. Online verfügbar unter <https://www.klebstoffe.com/fileadmin/redaktion/ivk/Klebstoff-Onusseit.pdf>.

Onusseit, Hermann (Hg.) (2008): Praxiswissen Klebtechnik. Heidelberg, Berlin: Hüthig; Beuth.

Rasche, Manfred (2012): Handbuch Klebtechnik.

Reichmann Industrieservice: Anwendungshinweise um richtig mit Ultraschall zu reinigen. Online verfügbar unter <https://www.ultraschall-anlagen.de/Anwendungshinweise-Ultraschallreinigung>, zuletzt geprüft am 21.10.2019.

Silva, Lucas Filipe Martins da; Öchsner, Andreas; Adams, Robert D. (2011): Handbook of Adhesion Technology. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10490169>.

Spieß, Sabine; Swoboda, Birgit (2013): Xpert Datenbankanwendung mit Access 2016. Mit HERDT BuchPlus. Bodenheim: Herdt. Online verfügbar unter <https://herdt-campus.de/product/XP-ACC2016>.

Stemper, Theodor: Was ist MET? In: Fitness und Gesundheit, S. 82–83. Online verfügbar unter [https://www.fitness-gesundheit.uni-wuppertal.de/fileadmin/fitness-gesundheit/pdf-Dokumente/Publicationen/2013/WasistMET\\_S.82-83.pdf](https://www.fitness-gesundheit.uni-wuppertal.de/fileadmin/fitness-gesundheit/pdf-Dokumente/Publicationen/2013/WasistMET_S.82-83.pdf), zuletzt geprüft am 21.10.2019.

Stephan et. (2009): Thermodynamik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Theis, Thomas (2016): Microsoft Access für Einsteiger. 1. Auflage. Bonn: Rheinwerk Verlag GmbH (Rheinwerk Computing). Online verfügbar unter <http://www.rheinwerk-verlag.de/3790>.

DIN EN ISO 14067, 2019: Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten.

Umweltbundesamt (Hg.) (2013): Wie funktioniert der Treibhauseffekt? Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-funktioniert-der-treibhauseffekt>.