

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
„Master of Science in Engineering“
im Studiengang Ökotoxikologie & Umweltmanagement

Entwicklung einer Auswahlmatrix zur frühen Materialbewertung auf Basis technischer Werkstoffeigenschaften und ökologischer Wirkungsindikatoren

Ausgeführt von: DI Gregor Wittmann

1. Begutachter: DI Michael Schwingshackl
2. Begutachterin: Sabrina Diniz MSc

Linz, 13.10.2025

Kurzfassung

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung einer zweistufigen Bewertungsmatrix zur gesamtheitlichen Beurteilung mechanischer und ökologischer Kennwerte von Faserverbundwerkstoffen. Grundlage bildet das *Material Design-for-X (M-DfX)*-Konzept, das hier auf duroplastische Harzsysteme übertragen wurde.

In der ersten Bewertung (Matrix I) erfolgt eine Vorauswahl anhand verfügbarer Datenblattwerte, die zweite Bewertung (Matrix II) basiert auf experimentell ermittelten mechanischen Kennwerten und Ökobilanzdaten. Die mechanischen Eigenschaften wurden im Dreipunkt-Biegeversuch bestimmt, die Umweltwirkungen wurden in einer Ökobilanz mit der Methode *Environmental Footprint 3.1* berechnet.

In dieser Arbeit wurden die verfügbaren Proxywerte aus dem ecoinvent Datensatz verwendet und mit mechanischen Kennwerten aus unterschiedlichen Literaturangaben in der Matrix I gegenübergestellt. Dabei zeigen die Ergebnisse, dass Epoxidharze und Vinylesterharze die höchsten Festigkeiten, jedoch auch die größten Umweltwirkungen aufweisen. Ungesättigte Polyester- und Phenolharze sind ökologisch günstiger, erreichen jedoch geringere mechanische Kennwerte. Der Vergleich mit den realen Harzsystemen zeigt, dass das GURIT SA 130FR die besten mechanischen Kennwerte und das SICOMIN SR FireGreen die besten ökologischen Kennwerte aufweist. Bei der Darstellung von Kennwerten von FVK-Coupons zeigt sich, dass die Wahl der Faser einen hohen Einfluss auf die mechanische Festigkeit hat, hingegen die ökologischen Auswirkungen nur teilweise starke Unterschiede zeigen.

Die entwickelte Matrix stellt ein Werkzeug dar, um die Materialauswahl ganzheitlich betrachten zu können und ökologische Kriterien bereits in frühen Konstruktionsphasen gemeinsam mit den klassischen mechanischen Kennwerten zu berücksichtigen.

Schlagwörter: Ökobilanz, FVK, Faserverbundkunststoffe, Composites, Materialauswahl

Abstract

This thesis describes the development of a two-stage evaluation matrix for the comprehensive assessment of mechanical and environmental properties of fiber-reinforced polymers. It is based on the *Material Design-for-X (M-DfX)* concept, which is adapted for thermoset resin systems.

In the first evaluation stage (Matrix I), a preliminary selection is made based on available datasheet values. The second stage (Matrix II) is based on experimentally determined mechanical properties and life cycle assessment (LCA) results. The mechanical properties were determined in a three-point-bending test, and the environmental impacts were calculated in a life cycle assessment using the *Environmental Footprint 3.1* method.

In the first assessment (Matrix I) a selection of Proxy values from the ecoinvent database was used and combined with mechanical properties from various literature sources. The results show that epoxy and vinylester resins have the highest mechanical strength but also the greatest environmental impact. Unsaturated polyester and phenolic resins are more environmentally friendly but have lower mechanical properties. The comparison with real resin systems shows that GURIT SA 130FR has the best mechanical properties and SICOMIN SR FireGreen has the best ecological properties. For FRP coupons, the choice of fiber type is strongly influencing the mechanical properties, whereas the environmental impact varied only slightly.

The developed evaluation matrix provides a practical tool for holistic material selection, enabling designers to consider environmental aspects alongside mechanical performance already in early design stages.

Keywords: LCA, Life Cycle Assessment, FRP, Fibre Reinforced Plastics, Composites, Material Selection

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Stand der Technik.....	10
2	Theoretische Grundlagen.....	12
2.1	Ökobilanz.....	12
2.1.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	13
2.1.2	Sachbilanzphase.....	14
2.1.3	Wirkungsabschätzung.....	15
2.1.4	Auswertung.....	16
2.2	Faserverbundkunststoffe.....	17
2.2.1	Matrixmaterialien.....	19
2.2.2	Fasermaterialien	22
2.2.3	Herstellungsverfahren	24
2.3	Mechanische Prüfverfahren	28
2.4	Anforderungen im Schienenverkehr	31
3	Methoden / Ansatz	33
3.1	Materialauswahl	33
3.2	Modellierung der Systeme	35
3.2.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	35
3.2.2	Sachbilanzphase LCI	36
3.2.2.1	Synthesepfad für SICOMIN System	39
3.2.2.2	Synthesepfad für GURIT System	51
3.2.3	Wirkungsabschätzung LCIA.....	54
3.3	Fertigung und Prüfung	55
3.4	Gegenüberstellung ökologischer und mechanischer Materialparameter	64
4	Ergebnisse.....	65
4.1	Ökologische Kennwerte	65
4.1.1	Auswertung.....	65
4.2	Mechanische Kennwerte.....	68
4.3	Gesamtheitliche Bewertung	70
5	Diskussion	75

Abbildungsverzeichnis.....	77
Tabellenverzeichnis.....	81
Abkürzungsverzeichnis.....	83
Anhang A: Tabellen für Harzsystem SICOMIN	84
Anhang B: Tabellen für Harzsystem GURIT	93
Anhang C: Formeln zur Matrix und Berechnung des Faservolumengehalt	95

1 Einleitung

Für die Konstruktion und Fertigung von Maschinen, Fahrzeugen, Flugzeugen, Zügen und vielen anderen Gewerken werden für die Auswahl überwiegend ihre mechanischen Eigenschaften und ökonomische Kriterien berücksichtigt. Das gewählte Material muss den Belastungen und Umwelteinflüssen standhalten, eine ausreichend lange Lebensdauer aufweisen und kostengünstig in der Herstellung sowie im Betrieb sein [1].

Mit der globalen Erderwärmung und den damit verbundenen Folgen rückt das Thema Nachhaltigkeit immer stärker in den Fokus. Auch der Schienenverkehr kann einen wesentlichen Beitrag zur Minimierung der Emissionen leisten. Da der Energiebedarf und folglich die Umweltwirkungen mit dem Fahrzeuggewicht verknüpft sind, gewinnt der Leichtbau zunehmend an Bedeutung. Eine Reduktion der Rohbaumasse wirkt sich unmittelbar auf den Beschleunigungswiderstand, den Energieverbrauch und die Radsatzlasten aus und trägt somit zur Senkung des Energiebedarfs und der Unterhaltungskosten bei.

Um diese Effekte zu realisieren, werden vermehrt Leichtbaustrukturen, auch Faserverbundwerkstoffe, eingesetzt. Diese Materialien ermöglichen hohe Festigkeiten bei geringem Gewicht und bieten durch ihre Fertigungsverfahren hohe Gestaltungsfreiheit. Am Beispiel in *Tabelle 1* des ICE-2-Mittelwagens zeigt, dass neben dem Gewicht des Wagenkastens insbesondere die Innenausstattung einen erheblichen Anteil am Gesamtgewicht besitzt [2].

Tabelle 1: Darstellung der Masse und des prozentuellen Anteiles eines ICE-2 Mittelwaggon [2].

	Wagenkasten 14460 kg; 30,1 %									Innenausbau 19110 kg; 39,8 %									Dreigestelle
	Wagenkastenrohbau	Bodenwanne	Zug- und Stoßeinrichtung	Bremse	Außentüren inkl. Anbau	Übergänge inkl. Anbau	Fenster	Anstrich	Innentüren inkl. Anbau	Wärmedämmung	Innenbekleidung	Inneneinrichtung	Sitze	Toiletten	Elektrische Ausrüstung	Klimaanlage	Beleuchtung	Informationssystem	
Masse [kg]	8.300	1.000	770	820	1.150	390	1.640	390	290	2.790	4.310	1.560	1.600	1.230	3.800	2.780	170	580	14.480
Anteil [%]	17,3%	2,1%	1,6%	1,7%	2,4%	0,8%	3,4%	0,8%	0,6%	5,8%	9,0%	3,2%	3,3%	2,6%	7,9%	5,8%	0,4%	1,2%	30,1%

Für Designer, Konstrukteure und Berechnungsingenieure ist es jedoch herausfordernd die mechanische Leistungsfähigkeit und die potenzielle Umweltauswirkung gemeinsam zu betrachten und bei der Wahl des Materials zu berücksichtigen. Mechanische Kennwerte, wie Zugfestigkeit, Biegefestigkeit oder der E-Modul sind meist gut in diversen Tabellen, Fachbüchern, oder auch Datenblättern der Hersteller verfügbar und können für die Berechnung verwendet werden. Weitgehend unberücksichtigt bei der Entscheidung des Materials bleiben die ökologischen Kennwerte, die auch aufgrund der Datenlage nicht immer bzw. in einer unzureichenden Qualität oder Tiefe verfügbar sind und folglich schwierig zu vergleichen sind. Im besten Fall können solche Daten durch reale Werte der Hersteller, aus Ökobilanzdatenbanken oder anhand bekannter Emissionswerte etablierter Prozesse ermittelt werden. So lassen sich beispielsweise die Emissionen aus der Verbrennung von Diesel anhand bekannter Oxidationsprozesse berechnen.

Kunststoffe werden zum überwiegenden Teil aus fossilen Rohstoffen gewonnen und ihre Reaktionsmechanismen sind ebenfalls zum Großteil bekannt. Mehrheitlich werden Kunststoffe aber nicht als Reinstoff genutzt, sondern mit verschiedenen Zusatzstoffen, den Additiven, versetzt. Folglich ist die Darstellung aller Komponenten und deren individueller Umweltauswirkungen überaus komplex [3]. Diese Gemische von Unternehmen sind sehr individuell, was damit begründet ist, dass das Material einerseits den spezifischen Anforderungen entsprechen muss, andererseits sich das Unternehmen vom Mitbewerber abheben möchte. Dies zeigt sich auch darin, dass viele Herstellungsprozesse nicht in Fachbüchern publiziert werden, sondern nur in Patenten veröffentlicht werden. Dementsprechend sind die Bestandteile oftmals nicht in der genauen Beimengung bekannt oder und nur in einem Wertebereich angegeben.

Manche Grundstoffe lassen sich auch von Quellen nachwachsender Rohstoffe herstellen. Dadurch lassen sich zwar in aller Regel die Treibhausgasemissionen reduzieren, hingegen andere Auswirkungen, wie beispielsweise die Landnutzung oder Eutrophierung, erhöht werden. Aufgrund dieser Vielzahl von Variablen, die mit unterschiedlich hohem Aufwand zu bestimmen sind, werden Polymere oft als reiner Stoff betrachtet. Dies kann zu Ungenauigkeiten führen, falls ein Additiv einen sehr hohen Anteil am Produkt einnimmt, oder eine Komponente deren Umweltwirkung sehr hoch ist.

Bei der Verarbeitung bzw. Verwendung von faserverstärkten Kunststoffen wird das Problem dahingehend verstärkt, dass neben unterschiedlichen Harzen und Härtern auch die Art der Faser eine entscheidende ökologische und festigkeitsbestimmende Rolle einnimmt.

In dieser Arbeit soll eine Methode entwickelt werden, die es erlaubt dem Nutzer einen Überblick über ausgewählte Faserverbundmaterialien zu geben, z. B. welche mechanischen Einbußen mit einem alternativen Material einhergehen. Anhand einer Marktanalyse, Herstellerangaben und anschließender Literaturrecherche werden die chemischen Komponenten bestimmt und deren Herstellungsprozesse in einer Ökobilanz modelliert. Analog dazu werden in verschiedenen Fertigungsverfahren Platten mit den modellierten Materialien hergestellt, verschiedene Prüfkörper gefertigt und die mechanischen Kennwerte bestimmt.

1.1 Stand der Technik

Einer der bekanntesten Autoren zu diesem Thema ist *Michael F. Ashby*, der in zahlreichen Publikationen stets die Komplexität der nachhaltigen Materialauswahl hervorhebt. Er beschreibt das Zusammenspiel aus den Markteinschränkungen bzw. Marktbedürfnisse. Beispielsweise sind Materialspezifische Eigenschaften die Leitfähigkeit, die Kompostierbarkeit, oder Anforderungen an Festigkeitskennwerte. Marktwirtschaftliche Einschränkungen ergeben können sich durch einzuhaltende Kosten ergeben, die einzuhalten sind, um am Markt wettbewerbsfähig zu sein. Produktionstechnisch können Mindestproduktionsmenge notwendig sein, um die Auslastung des Betriebs zu wahren. Ökologische Kennwerte können neben dem bekannten Klimawandel auch durch die Versauerung des Bodens, der Feinstaubbelastungen und weiteren Werten dargestellt werden. Ashby stellt sogenannte Materialeigenschaftsdiagramme vor, die unterschiedliche Materialfamilien anhand einer Kennzahl vergleichbar machen. Eine Einordnung in diese Klassen aufgrund mechanischer und eines einzelnen nachhaltigen Kennwerts zeigt das Diagramm in *Abbildung 1*. In diesem wird der E-Modul über die Masse an CO_2 per m^3 Material abgebildet. Andere Wirkungsindikatoren bleiben in diesen Diagrammen jedoch unberücksichtigt. Die Systematische Materialauswahl erfordert stets einen Kompromiss zwischen verschiedenen Anforderungen und muss je nach Einsatz bzw. Funktion individuell bewertet werden [4].

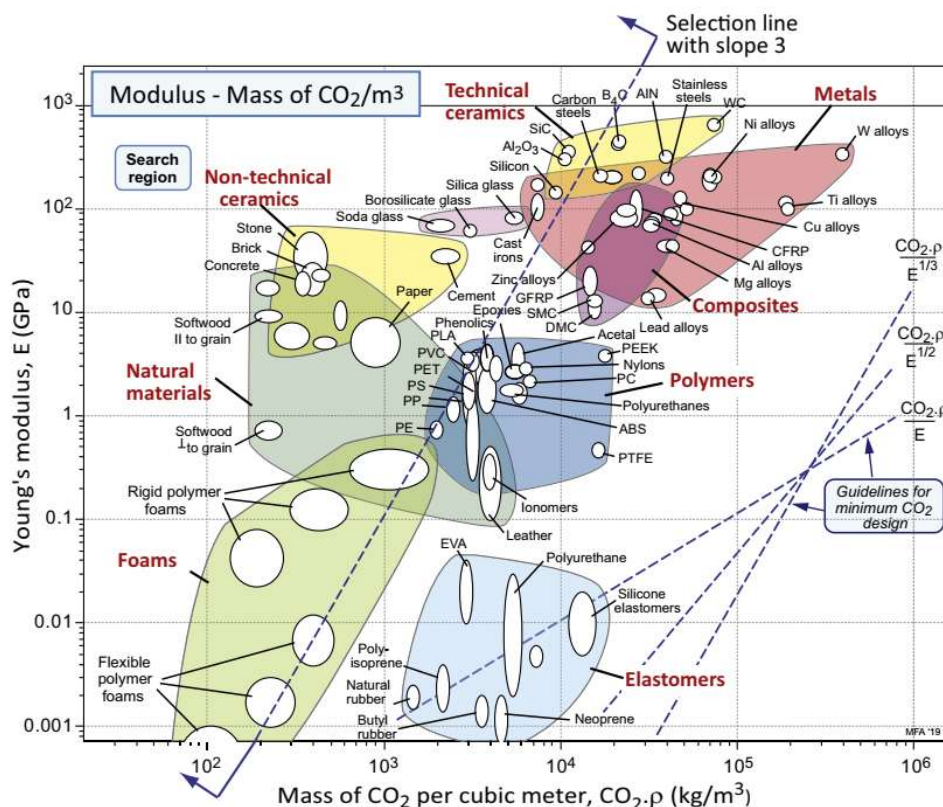


Abbildung 1: Materialeigenschaftsdiagramm, Darstellung des E-Moduls über die Masse CO_2 per Kubikmeter von verschiedenen Materialien [4].

Auch S. M. Sapuan beschreibt die Schwierigkeit der Materialauswahl und die Vielzahl an Materialien, die zur Verfügung stehen. Für Ingenieure ist es schwierig in all den unterschiedlichen Disziplinen, die für die richtige Entscheidung notwendig sind, das notwendige Wissen zu beherrschen. Bei den meisten Faserverbundwerkstoffen ist die Auswahl aufgrund der anisotropen Eigenschaften noch herausfordernder. Verschiedene Kombinationen aus Matrix und Verstärkungsfasern und folglich auch die Wahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens gestalten die Auswahl schwierig. Eine Miteinbeziehung von ökologischen Kennwerten ist in dieser Publikation nicht zu finden [5].

Barbara Pollini und Valentina Rognoli haben sich mit unterschiedlichen Werkzeugen für die Bewertung der Umweltauswirkungen beschäftigt. Dabei wurde festgestellt, dass für Designer Ökobilanz Software, wie GaBi, openLCA oder SimaPro teilweise zu umfangreich sind, um für den Auswahlprozess eines Konstrukteurs eingebunden zu werden. Die Notwendigkeit und die Lücke für die Integration einer nachhaltigen Betrachtung im Designprozess wird hervorgehoben, aber nicht genauer beschrieben [6].

Das sogenannte *Dresden Modell*, welches teilweise in der Wissensgemeinschaft des Leichtbaus bekannt ist, beinhaltet das Themenfeld der Ökologie bzw. der Umweltwirkungen auch eine Materialauswahl. Es wird die Wichtigkeit der Berücksichtigung von Ökobilanzen und Nachhaltigkeitsstrategien beschrieben, ohne dabei auf ein konkretes Werkzeug einzugehen [7].

Die Publikation von Oliveira et. al. beschreibt eine Bewertungsmatrix, die es erlaubt, Kennwerte von Materialien vergleichbar darzustellen, ohne eine aufwendige Multikriterien-Entscheidungsanalyse (engl. *multi-criteria-decision-making*, kurz *MCDM*) zu erstellen. Diese Matrix verfügt über Variablen, die je nach Anwendungsfall mit unterschiedlicher Gewichtung dargestellt werden können. Die gleiche Funktion kann unterschiedliche Anforderungen an das Material erfordern. Beispielsweise kann die Eigenschaft des Brandverhaltens eines Werkstoffs für den Schienenverkehr relevanter sein als für einen Einsatz im Bauwesen. Insgesamt werden sechs Bereiche angeführt, die unterschiedliche Gewichtungen durch den Anwender erhalten können [8].

M-DfX scorecard		PEEK-A + CF15	PEEK-C + CF10	PEEK-A	PEEK-C	PEEK + CF10	PEEK + CF20	PEEK + GF20	PEEK	PPSU	PSU	PEI + CF	PEI + CF (AERO)	PEI + GF 30	ULTEM 1010	ULTEM 9085
Weight																
Weighted Material Effectiveness		42%	41%	59%	61%	58%	41%	63%	66%	73%	78%	44%	38%	69%	74%	68%
X1 Mechanical	5	55%	50%	37%	50%	46%	52%	44%	78%	56%	53%	47%	42%	55%	38%	50%
X2 Thermal	10	83%	82%	60%	66%	75%	81%	80%	54%	81%	69%	81%	67%	82%	81%	66%
X3 Physical	0.1	93%	90%	98%	96%	89%	89%	86%	95%	97%	100%	95%	89%	82%	98%	93%
X4 Cost	4	38%	22%	27%	30%	26%	21%	27%	35%	69%	100%	44%	33%	44%	79%	70%
X5 Dielectrical	10	0%	0%	84%	80%	90%	0%	72%	89%	88%	100%	0%	0%	69%	87%	89%
X6 Environmental	1	60%	56%	57%	55%	60%	61%	67%	58%	78%	92%	84%	84%	96%	83%	83%

Abbildung 2: Darstellung des M-DfX Scoreboard nach Oliveira et. al. [8].

In den Publikationen wird die Notwendigkeit beschrieben, das komplexe Thema einer ökologischen Bewertung in die Materialauswahl zu integrieren, wird jedoch meist getrennt von technischen Kennzahlen erhoben. Lediglich Oliveira et al. zeigten eine kombinierte

Auswahlmatrix, die die technischen und ökologischen Werte übersichtlich darstellt. Diese Methode wird als Grundlage verwendet und mit der Wirkungsabschätzungsmethode des EF 3.1 kombiniert.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Ökobilanz

Um die Auswirkungen auf die Umwelt abschätzen zu können müssen komplexe und verschachtelte Abläufe und Prozesse eines Produkts oder einer Dienstleistung dargestellt werden. Dazu können verschiedene Softwares und Datenbanken eingesetzt werden, um die Auswirkungen zu berechnen. Sogenannte Systemgrenzen stecken den betrachteten Lebensweg ab, so kann ausgehend von der Rohstoffherzeugung bis zur Wiederverwendung eine Analyse durchgeführt werden. Die *Abbildung 3* zeigt je nach Studienziel unterschiedliche Systemgrenzen. Eine cradle-to-gate Betrachtung kann zum Beispiel für die primäre Rohstoffherzeugung und den ersten Herstellungsprozess verwendet werden. Vollständige Kreisläufe werden mit den Systemgrenzen cradle-to-cradle abgebildet [9, 10].

In der Ökobilanz (engl. *Life Cycle Assessment*, kurz *LCA*) lassen sich unterschiedliche Umweltindikatoren wie beispielsweise das globale Treibhausgaspotential (engl. *Global Warming Potential*, kurz: *GWP*) ermitteln und einer Umweltwirkungskategorie, z.B. dem Klimawandel zuordnen. Diese Art der Analyse kann bei der Entscheidung bei der Auswahl von umweltfreundlicheren Materialien helfen. Die Normen ISO 14040 und ISO 14044 beschreiben die standardisierte Vorgehensweise einer Ökobilanz [11, 12].

Man unterscheidet zwischen einer Konsequenz-orientierten (engl. *consequential*) und einer beschreibenden (engl. *attributional*) Ökobilanz. Wie der Name „Konsequenz“ andeutet, liegt der Fokus auf die Auswirkung einer Entscheidung. Zum Beispiel welchen Einfluss hat die Änderung eines Parameters im Prozess bzw. im Modell. Hingegen die beschreibende Ökobilanz den aktuell Stand eines Produkts oder Dienstleistung betrachtet [10].

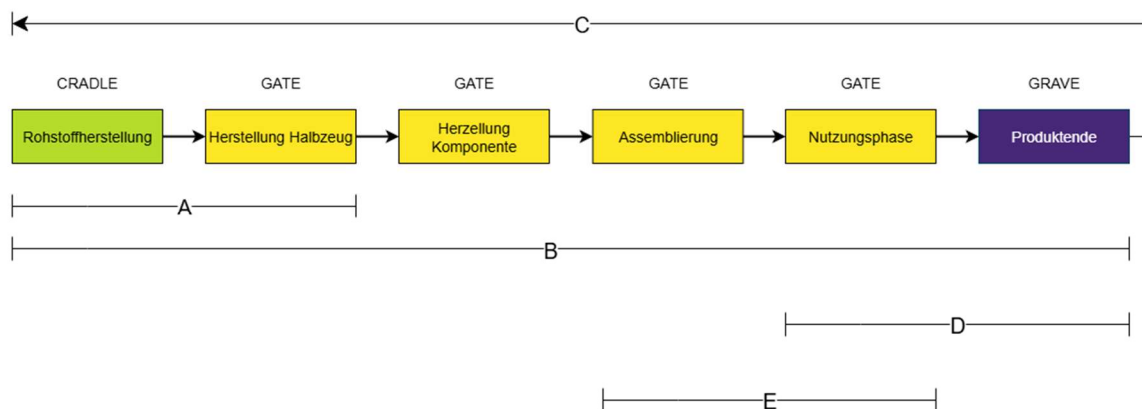


Abbildung 3: Beschreibung unterschiedlicher Lebensabschnitte in einer Ökobilanz [9, 10]

Die normierte Darstellung einer Ökobilanz umfasst vier Phasen, die in der nachfolgenden Reihenfolge beschrieben werden. Eine grafische Darstellung zeigt die *Abbildung 4* [12]:

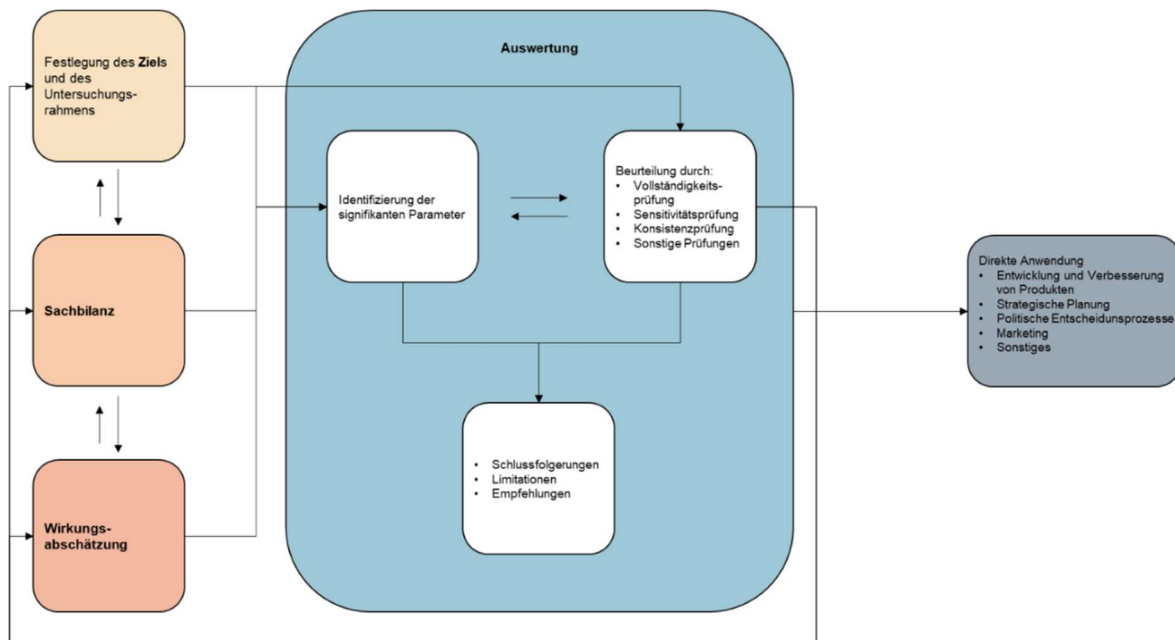


Abbildung 4 Phasen und Zusammenhänge der Ökobilanz, nach DIN EN ISO 14044 [12].

2.1.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Die DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 beschreiben in dieser ersten Phase, dass das Ziel durch Beschreibung der Anwendung auf das Produkt oder die Dienstleistung definiert werden muss. Es müssen sowohl die Gründe für die Durchführung als auch die angesprochene Zielgruppe erwähnt werden. Des Weiteren ist es notwendig zu erwähnen, ob die Ergebnisse veröffentlicht werden oder nicht. Um aufwendige Veränderungen der kompletten Studie zu vermeiden ist eine detaillierte Zieldefinition zu Beginn einer Ökobilanz zu empfehlen, obgleich eine spätere Veränderung bzw. Anpassung weiterhin möglich ist [13]. Im Untersuchungsrahmen wird beschrieben welches Produkt- oder Dienstleistungssystem behandelt wird und ob eine Konsequenz-bezogene oder beschreibende Ökobilanz durchgeführt wird [10]. Wesentlich ist hier bereits die funktionelle Einheit zu definieren, da auf diese durch den Referenzfluss Bezug genommen wird und die In- und Output-Daten darauf normiert werden. Die Wahl der funktionellen Einheit obliegt dem Ersteller, soll aber in Bezug auf die Qualität der Anwendung stehen.

Weiters wird in dieser Phase festgelegt, welche Systemgrenzen für das Modell gelten, und in welchem Detaillierungsgrad die Inputs und Outputs behandelt werden. Für die Wirkungsabschätzung werden die Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle in Abhängigkeit von der gewählten Bewertungsmethode festgelegt. In der Regel definiert die Auswahl einer Methode (z. B. ReCiPe 2016, ILCD 2011

oder Environmental Footprint 3.1) bereits die entsprechenden Wirkungskategorien und Indikatoren, sodass diese nicht separat ausgewählt werden müssen.

In einem eigenen Abschnitt ist die Datenqualität zu beschreiben, da dies ein wesentliches Grundgerüst der ganzen Analyse darstellt und die Nachvollziehbarkeit gegeben sein muss. Dabei können die Daten von primären Quellen, wie direkten Messungen, verwendet werden aber auch Daten aus sekundären Quellen, falls nur Informationen von Datenbanken zur Verfügung stehen. Welche Unsicherheiten, Annahmen und Zeitintervall bei den Daten berücksichtigt wurden [12].

2.1.2 Sachbilanzphase

Die zweite Phase beschreibt die Erfassung und Bilanzierung der Energie- und Stoffflüsse innerhalb der Systemgrenzen des untersuchten Produktsystems. Das Produktsystem stellt in der Ökobilanz eine vereinfachte Abbildung eines komplexen Wirtschaftsgutes dar und umfasst sämtliche Prozesse, die zur Erfüllung der definierten Funktion notwendig sind.

Das Produktsystem beschreibt alle Prozesse, die zur Erfüllung des Produktes notwendig sind, kann aber in einzelne Prozessmodule unterteilt werden, die jeweils eigene Input- und Outputflüsse besitzen. Die Systemgrenze legt dabei fest, welche dieser Prozesse in die Analyse einbezogen werden. Schematisch wird das in *Abbildung 5* dargestellt. Jeder Prozess mit seinen Input- und Outputströmen kann je nach Wahl der Systemgrenze selbst ein Input oder Output darstellen [11].

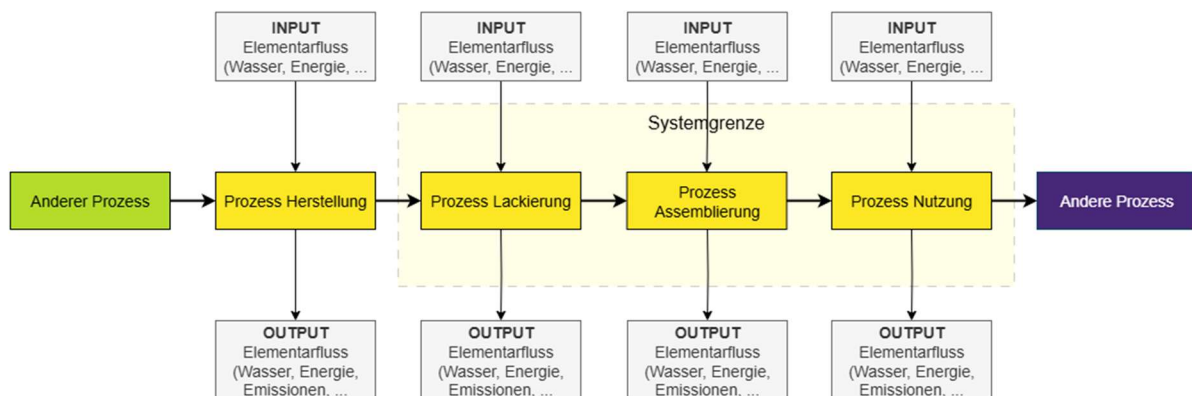


Abbildung 5: Beispiel eines Produktsystems mit einzelnen Prozessmodulen, Systemgrenze, Input und Outputflüssen sowie Elementarflüssen [11].

Ein wesentlicher Abschnitt dieser Phase ist die Datenerhebung, die für jedes einzelne Modul in einem Prozess erhoben wird. Die Datenerhebung soll schlüssig dargestellt werden und für alle Prozessmodule einheitlich sein. *Abbildung 6* zeigt eine schematische Darstellung der Sachbilanzphase. Auch die Berechnung der Daten muss dokumentiert werden und für den Betrachter nachvollziehbar sein. Eine Konsistenz von Berechnungswegen über die komplette Ökobilanz sollte eingehalten werden.

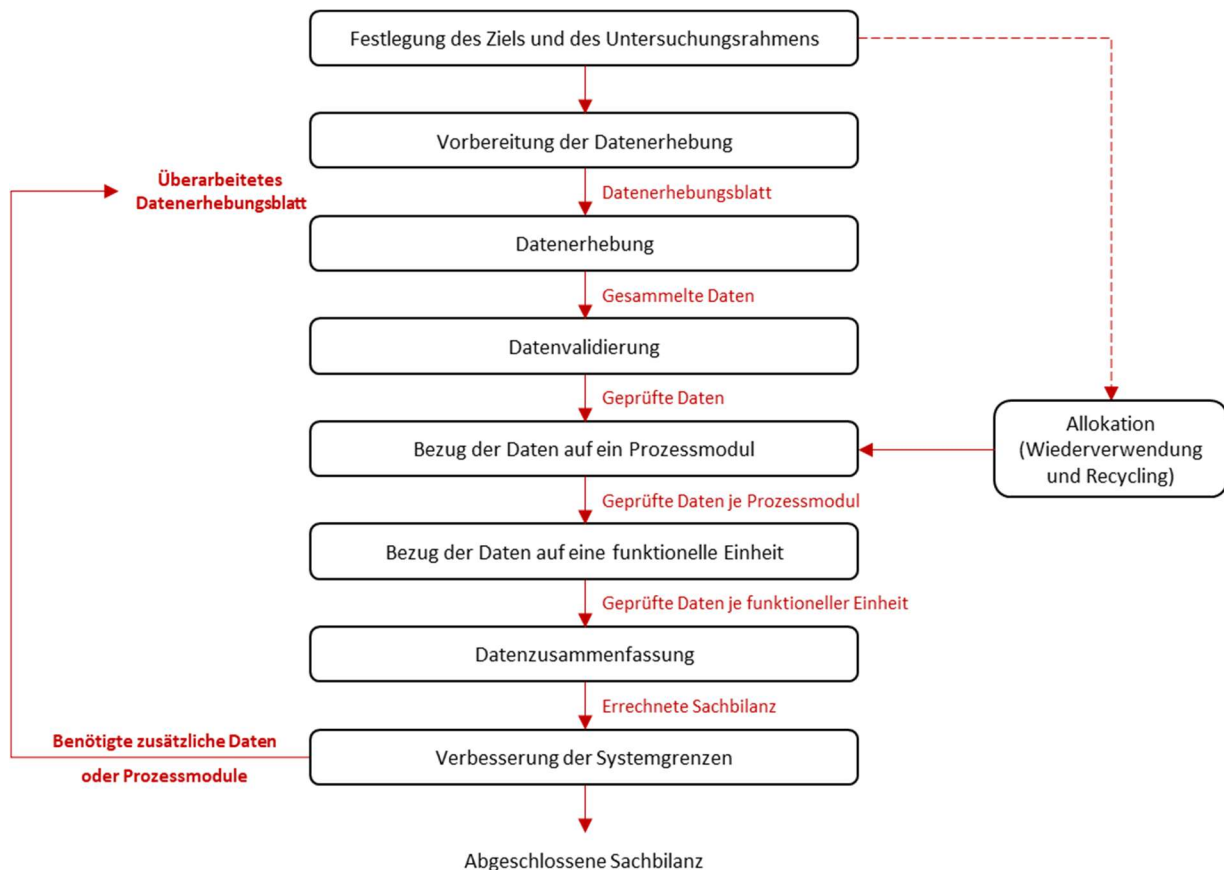


Abbildung 6 Verfahrensablauf in der Sachbilanzphase nach DIN EN ISO 14044:2020 [12].

2.1.3 Wirkungsabschätzung

Ausgehend von der Sachbilanz werden in der Wirkungsabschätzung (engl. *life cycle impact assessment*, kurz: *LCIA*) die relevanten Umweltauswirkungen eines Produktsystems bewertet. Dazu werden die in der Sachbilanz erhobenen Flüsse mit den Umweltwirkungen verknüpft. Die Vorgehensweise ist durch die DIN EN ISO 14044 definiert und besteht aus mehreren Teilschritten:

1. Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Modellen:

Wirkungskategorien stellen Klassen dar, die wichtige Umweltthemen repräsentieren und denen die Ergebnisse der Sachbilanz zugeordnet werden können. Beispielsweise kann dies der Klimawandel, die Versauerung oder der Ozonabbau sein.

Wirkungsindikatoren sind hingegen messbare Größen und beschreiben das Ausmaß einer bestimmten Wirkungskategorie. Beispielhaft wird das Treibhauspotential mit kg CO₂-Äquivalenten gemessen und dem Klimawandel zugeordnet.

Das Modell beschreibt, wie die Zusammenhänge also die Verknüpfung zwischen den Sachbilanzdaten und den Wirkungskategorien beschrieben werden können. Für den Klimawandel kann beispielsweise das IPCC-Modell verwendet werden.

2. Klassifizierung:

Die in der Sachbilanz erfassten Stoff und Energieflüsse werden mit den jeweiligen Wirkungskategorien verknüpft. CO₂, CH₄ und andere Emissionen werden der Kategorie Klimawandel zugeordnet. Es ist auch möglich und notwendig, dass bestimmte Flüsse auch anderen Wirkungskategorien zugeordnet werden.

3. Charakterisierung:

Nun werden die erfassten Stoffe mit Faktoren multipliziert, um die Wirkstärke zu ermitteln, da verschiedene Stoffe unterschiedliche Auswirkungen verursachen. Am Beispiel Methan wirkt dieses je nach Modell unterschiedlich stark auf den Klimawandel bzw. hat um bestimmte Faktoren eine höhere Auswirkung als das CO₂. Alle Emissionen werden aber immer auf das CO₂ bezogen [10].

Optionale Teile der Wirkungsabschätzung sind eine Normierung, Ordnung, Gewichtung und die Analyse der Datenqualität. Dabei können durch eine Normierung die berechneten Wirkungsindikatoren auf einen Referenzwert bezogen werden und gegebenenfalls eine bessere Vergleichbarkeit ermöglichen. Durch das Einführen einer Ordnung können Wirkungsindikatoren je nach Priorität oder anderen Maßstäben geordnet werden. Ähnlich kann die Gewichtung einzelner Werte für eine Vereinfachung verwendet werden. Abschließend wird mit der Analyse der Datenqualität die Unsicherheit der Eingabedaten untersucht und somit auch eine Aussagekraft auf die ermittelte Wirkungsabschätzung möglich [12].

2.1.4 Auswertung

Die Auswertung (engl. *Interpretation*) stellt die vierte und abschließende Phase einer Ökobilanz dar. In dieser Phase werden die Ergebnisse analysiert und im Hinblick auf das definierte Ziel und den Untersuchungsrahmen bewertet.

In der DIN EN ISO 14044 sind in dieser Phase drei wesentliche Schritte beschrieben:

1. Identifizierung signifikanter Parameter:

Prozesse, Materialien oder Lebenswegabschnitte, welche den größten Beitrag zu den Umweltwirkungen verursachen werden, bestimmt. Das sind in der Regel jene Teile einer Ökobilanz, die das Endergebnis am ehesten beeinflussen.

2. Beurteilung der Ergebnisse

Unter Berücksichtigung von Vollständigkeits-, Konsistenz- und Sensitivitätsprüfungen wird die Zuverlässigkeit der Daten und Methoden sichergestellt, um die Aussagekraft der Ökobilanz zu festigen.

3. Formulierung von Schlussfolgerungen und Empfehlungen:

Diese müssen aus der Studie hervorgehen und mit den anderen Bestandteilen der Auswertung vollzogen werden. Einschränkungen und mögliche Empfehlungen können abschließend an die Zielgruppe erläutert werden [9, 11, 12].

2.2 Faserverbundkunststoffe

Faserverbundkunststoffe, FVK (engl. *Fiber Reinforced Plastic*, kurz: *FRP* oder *Polymer Matrix Composite*, kurz *PMC*), sind Materialkombinationen aus mindestens zwei unterschiedlichen Stoffen, die sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften im Verbund von jenen als Einzelstoffe unterscheiden. Dabei dient ein Polymer als sogenannte Matrix und bettet das Verstärkungsmaterial als zweite Komponente ein. Die Hauptaufgabe der Kunststoffmatrix ist jene der Formgebung und Krafteinleitung. Um diese Vorgänge gewährleisten zu können ist es essenziell, dass eine ausreichende Bindung zwischen den beiden Materialien in der Grenzschicht vorhanden ist.

FVK sind anisotrope Werkstoffe und haben je nach Richtung der Kraftbeanspruchung unterschiedliche Eigenschaften. Dies bietet den Vorteil Bauteile in lastpfadorientiert zu fertigen, aber auch den Nachteil dass die dadurch während der Fertigung entstehenden Spannungen berücksichtigt werden müssen [1].

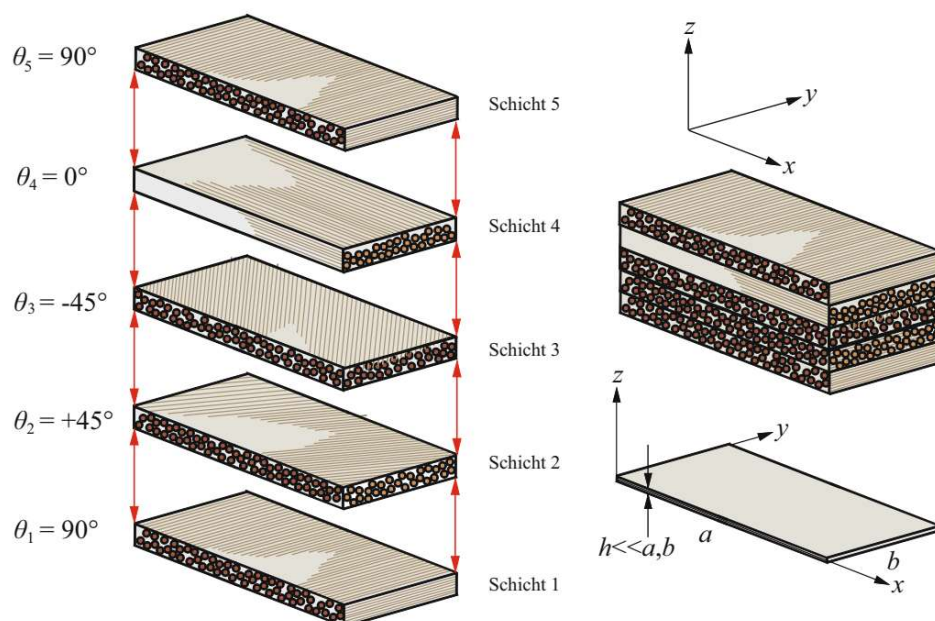


Abbildung 7: Darstellung eines Laminataufbaus aus unterschiedlich orientierten Einzelschichten [14].

Zusätzlich kann mit Kernmaterial als dritte Komponente eine sogenannte Sandwichstrukturen hergestellt werden. Dieses Material besitzt in der Regel eine sehr geringe Dichte. Er dient einerseits dazu die Außenstrukturen zu stützen, andererseits die Scherspannungen aufzunehmen. Typische Materialien sind Schäume aus Polymeren, Hölzer wie Balsa oder sogenannte Honigwaben aus Aramid Polymer oder Aluminium. [15].

Die Kombination der unterschiedlichen Materialien wird je nach den Anforderungen gewählt, dabei ist ein wichtiger Parameter der Faservolumengehalt. Dieser gibt den Anteil der Verstärkungsfasern zu jenen der Matrix an. Um möglichst hohe Festigkeitswerte zu erreichen ist ein hoher Wert anzustreben. Die maximalen Werte sind theoretische Werte und aufgrund der zufälligen und unkontrollierbaren Verteilung der Fasern finden die theoretischen Werte in Berechnungen wenig Beachtung. Das einfachste Modell ordnet die Fasern in einem rechteckigen Feld an und dementsprechend bleiben die Ecken frei und der maximale Faservolumengehalt liegt bei 78,5 %. Werden die Fasern im Modell versetzt, in einem hexagonalen Muster angelegt erhöht sich der Wert auf 90,65 %. Berechnet wird der Faservolumengehalt über die Massen und Dichten der eingesetzten Materialien, wie in der Formel (1) angeführt.

$$v_f = \frac{\frac{w_f}{\rho_f}}{\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m}} \quad (1)$$

w_f ... Fasergewicht

w_m ... Matrixgewicht

ρ_f ... Dichte der Faser

ρ_m ... Dichte der Matrix

Bio-Composites

Das Kapitel der biologisch basierten Werkstoffe sei in dieser Arbeit nur dahingehend erwähnt, dass einerseits Polymere aus Quellen biologischen Ursprungs erzeugt werden können und andererseits auch die Verstärkungsfasern wie in dieser Arbeit auch, ebenfalls aus biologischen Materialien hergestellt werden können.

Somit bietet sich für die Herstellung von Composites eine Vielzahl aus möglichen Kombinationen. Der Großteil der heute eingesetzten Polymere wird weiterhin aus Produkten der Erdölindustrie hergestellt [16]. In den vergangenen 25 Jahren entwickelten sich zum einen die biologisch abbaubaren Kunststoffe und Kunststoffe, die biologische Rohstoffe für die Polymerisation verwenden [17]. *Abbildung 8* zeigt auch jene Gruppe, die sowohl einen natürlichen Ursprung haben als auch die Fähigkeit besitzen kompostierbar zu sein. Die Unterscheidung ist nicht trivial, da es sowohl für fossil basierte Kunststoffe möglich ist, Kunststoffe zu entwickeln die sich kompostieren lassen, als auch die Möglichkeit besteht gegen Kompostierung beständige Kunststoffe zu entwickeln die Ihren Ausgang aber in biologischen Quellen haben.

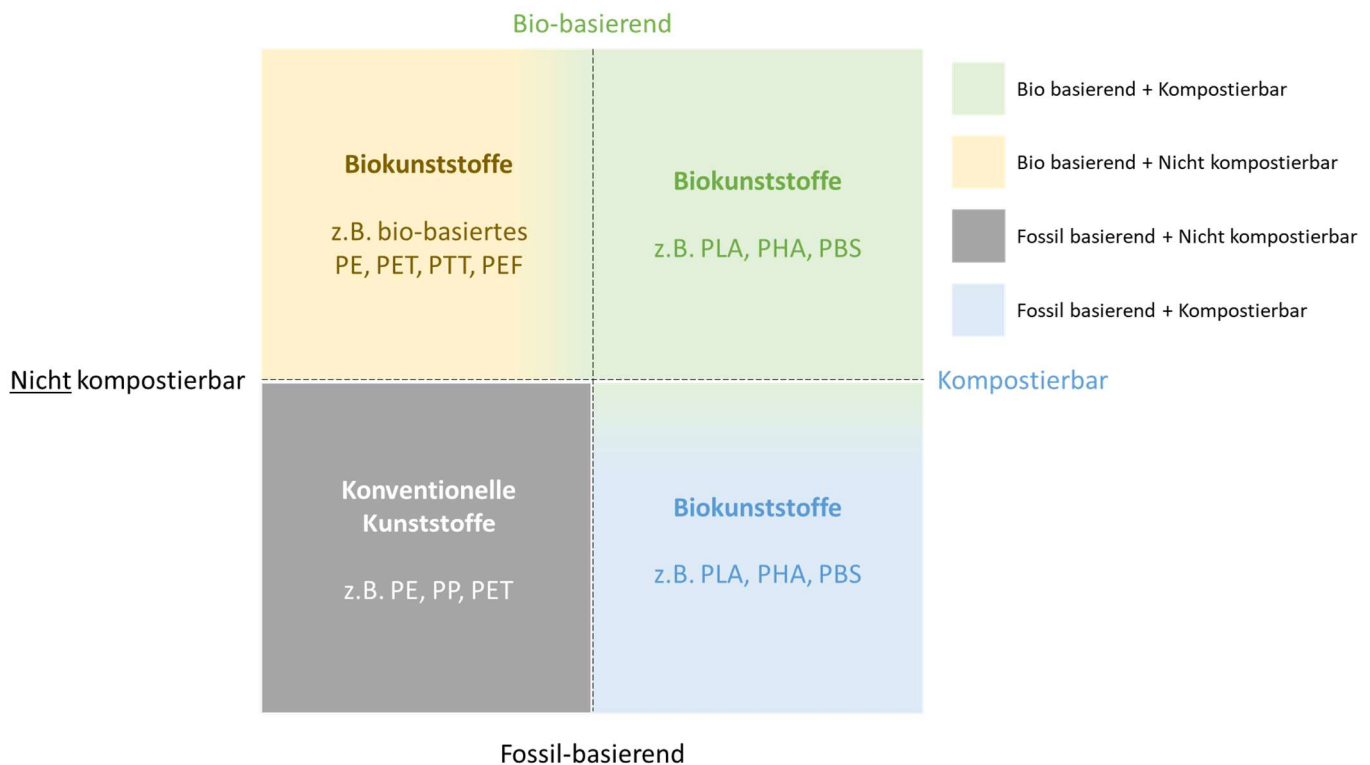


Abbildung 8: Gegenüberstellung von fossilen und biobasierenden Polymeren auf der Y-Achse zu deren Kompostierbarkeit auf der X-Achse, eigene Darstellung in Anlehnung an [18].

2.2.1 Matrixmaterialien

In jenen Composites, die in dieser Arbeit behandelt werden, werden ausschließlich Kunststoffe eingesetzt, dessen zentrale Aufgaben in der geometrischen Formbildung, der Einleitung von Kräften in den Verbund bzw. in die Fasern und eine gleichmäßige Kräfteverteilung zwischen den Fasern besteht [19]. Um die Aufgaben des Verbundes erfüllen zu können, ist es notwendig, dass eine gute Verbundenheit zwischen der Grenzfläche der Matrix und der Faser gegeben ist [19, 20]. Kunststoffe unterteilen sich in drei Untergruppen, den Thermoplasten, den Thermosets und den Elastomeren [21].

Thermoplaste sind, wie der Name andeutet, Kunststoffe, die sich unter dem Einfluss von Wärme formen lassen. Beim Abkühlprozess gibt es Strukturen, die sich sehr nahe aneinanderreihen und sogenannte kristalline Bereiche ausformen, ungeordnete Strukturbereiche werden amorph bezeichnet. Diese Bereiche sind mitentscheidend über die Transparenz eines Thermoplasts. Durch die thermische aber auch mechanische Beanspruchung während des Aufschmelzprozesses nehmen die Polymerketten Schaden und die Eigenschaften verändern sich [22]. Im Elastomer liegen die Strukturen nicht fadenförmig vor, sondern sind weit verzweigt und an einigen Punkten untereinander chemisch vernetzt und sind für die elastischen Eigenschaften des Werkstoffs verantwortlich. Wird für Verbundwerkstoffe in der Regel nicht verwendet [22]. Duomere (Thermosets) sind ebenfalls

vernetzte Polymere, bei der engmaschige Brücken während des sogenannten Aushärtens gebildet werden. Im Gegensatz zu den Elastomeren sind Thermosets hart und unter dem Einfluss von Wärme nicht bzw. nur in geringen Maßen formbar. Als Basis für Härtungsprozesse sind Harzsysteme auf unterschiedlicher chemischer Basis, die entweder mit oder ohne einer Härter Komponente vernetzt werden. Werden keine Härter eingesetzt findet die Vernetzung durch Wärme oder zum Beispiel unter UV-Strahlung statt [23]. Für die Herstellung von Faserverbundkunststoffen werden nachfolgende Duomere eingesetzt:

Formaldehyd Formassen (PF, RF, CF, XF, UF, MF)

Die Vernetzungsprodukte entstehen fast ausschließlich unter Abspaltung von Wasser in einer sogenannten Polykondensationspolymerisation. Beispielsweise werden beim PF stufenweise Methylolphenole gebildet die wieder mit weiteren Phenolen unter Abspaltung von Wasser Methylen- und Etherbrücken ausbilden. Läuft die Reaktion in einem basischen Milieu ab werden die Vorstufen der Polymere Resole genannt. Bei einer sauren Umgebung bilden sich sogenannte Novolake als Vorstufe. Beide Kondensationsreaktionen sind in *Abbildung 9* dargestellt [24].

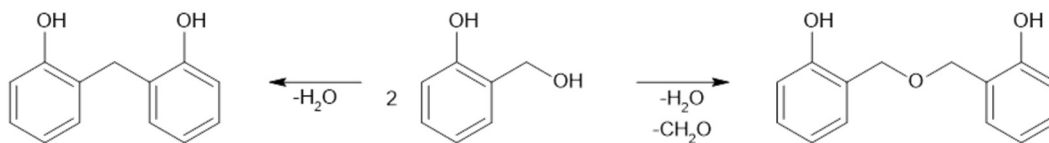


Abbildung 9: Schematische Reaktion zur Herstellung von Resol und Novolak [24].

Neben Phenol werden auch die Grundbausteine Kresol, Resorcin, Xylenol, Harnstoff oder Melamin für die Kondensationsvernetzung mit Formaldehyd verwendet. Jene Grundstoffe die Phenole enthalten werden als Phenoplaste bezeichnet, hingegen Strukturen, die nur stickstoffhaltig sind, werden Aminoplaste bezeichnet. Einen Überblick bietet die nachfolgend dargestellte *Abbildung 10* [3]. Zu erwähnen sei, dass Phenol-Formaldehyd-System aufgrund der hohen Temperaturbeständigkeit und der guten Brandeigenschaften auch für Anwendungen in Verkehrsmittel verwendet werden.

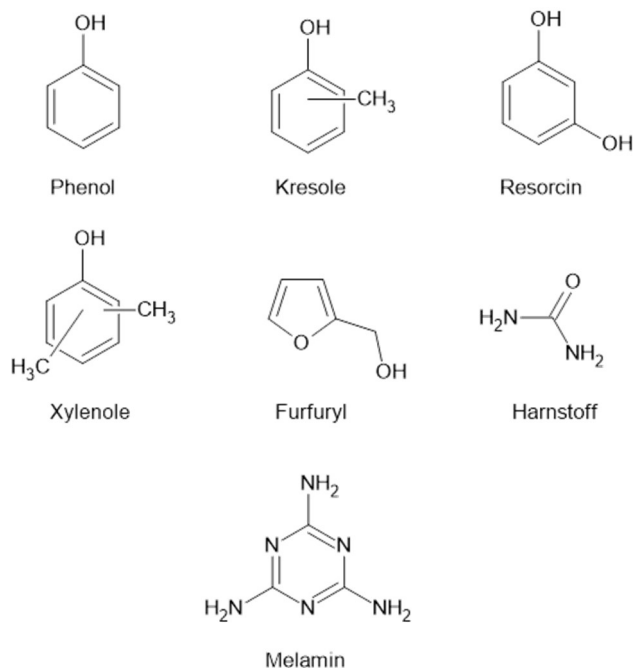


Abbildung 10: Grundmoleküle von Formaldehyd-basierenden Harzen [3].

Ungesättigte Polyesterharze (UP)

Zu Beginn wird ein linearer Polyester aus der Polykondensation einer Dicarbonsäure und eines zweiwertigen Alkohols hergestellt. Für die Vernetzung sind Doppelbindungen notwendig die von der Säure in den Polyester eingebracht werden. Die unter Temperatur durchgeführte Reaktion muss unter einer Schutzatmosphäre durchgeführt werden und die ungesättigten Polyester werden in 30 bis 40% Styrol gelöst. Die Kettenpolymerisation wird durch Zugabe von organischen Peroxiden gestartet und kann sowohl bei höheren Temperaturen als auch bei Raumtemperatur stattfinden [25, S. 456-463].

Epoxidharze (EP)

Die unvernetzten primären Epoxidharze werden durch Additions- und Kondensationsreaktionen aus Epoxid- Phenol- und Alkoholverbindungen hergestellt. Weit verbreitet ist die Verwendung von Epichlorhydrin als Epoxidverbindung und Bisphenol A als Phenol, wie in *Abbildung 11* dargestellt. An der Hydroxygruppe können wiederholt Reaktionen mit Bisphenol A folgen und so die Polymerkette des Diglycidyl-Polyethers bilden.

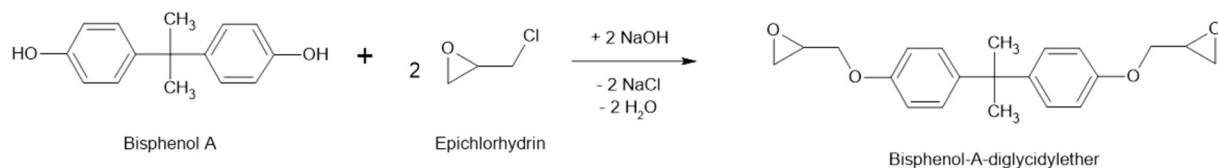


Abbildung 11: Reaktionsgleichung der basisch katalysierten Umsetzung von Bisphenol A mit Epichlorhydrin zu Bisphenol-A-Diglycidylether [25].

Je nach Anforderungen des späteren Einsatzzweckes kann durch die Ausgangsstoffe der Polymerbildung auf die Eigenschaften Einfluss genommen werden. So wird durch die Verwendung halogenhaltiger Polyphenolverbindungen das Brandverhalten verbessert oder für Anwendungen mit einem höheren T_G werden Glycidyl-Amin-Harze eingesetzt.

Die anschließende Vernetzung findet mit sogenannten Härtungsmitteln bzw. Härter statt die Wasserstoffmoleküle für die Reaktion bereitstellen, wie dies beispielsweise bei mehrwertigen Aminen oder Dicarbonsäuren der Fall ist. Die Reaktion startet meist bereits bei Raumtemperatur und muss unterkühlt werden, um eine Lagerfähigkeit zu ermöglichen. Aber auch eine Warmhärtung ist bei vielen Harzsystemen üblich. Die finale Vernetzung erfolgt durch eine Additionsreaktion wie in *Abbildung 12* gezeigt [25].

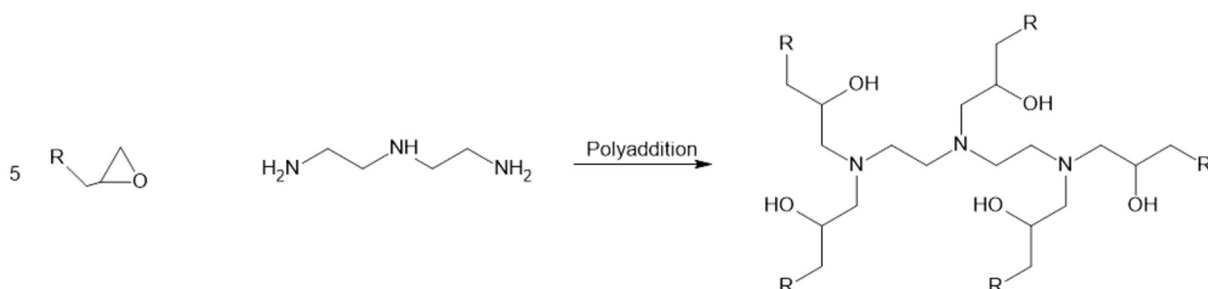


Abbildung 12: Vernetzung durch Polyaddition eines Epoxids mit Diethylentriamin [25].

Vinylesterharze (VE)

Auch bei den Vinylesterharzen sind die Ausgangsstoffe wie beim Epoxidharz Großteils Bisphenol A und Epichlorhydrin. Durch die Umsetzung mit Acrylsäure oder Methacrylsäure werden die Epoxidgruppen im Gegensatz zum Epoxidharz verestert [25].

Die Vernetzung findet dann wieder Ähnlichkeit mit dem UP, welche in Styrol gelöst sind und mit Peroxiden wie dem MEKP bei Raumtemperatur oder mit BPO unter Temperatureinwirkung zur Polymerisation führt [26].

2.2.2 Fasermaterialien

Fasern dienen in einem Faserverbundkunststoff als die tragende Komponente, die in Faserrichtung die Kräfte aufnehmen. Neben den verschiedenen Materialien die als Verstärkungsfasern Anwendung finden, unterscheidet man auch die Art der Faser wie sie im

Verbund vorliegt. Dies kann einerseits durch die unterschiedliche Faserlänge sein oder bei Langfasern durch die Web-Form [27].

Neben den in *Abbildung 13* dargestellten Chemiefasern werden auch Naturfasern wie in *Abbildung 14* als Verstärkungsfasern eingesetzt.

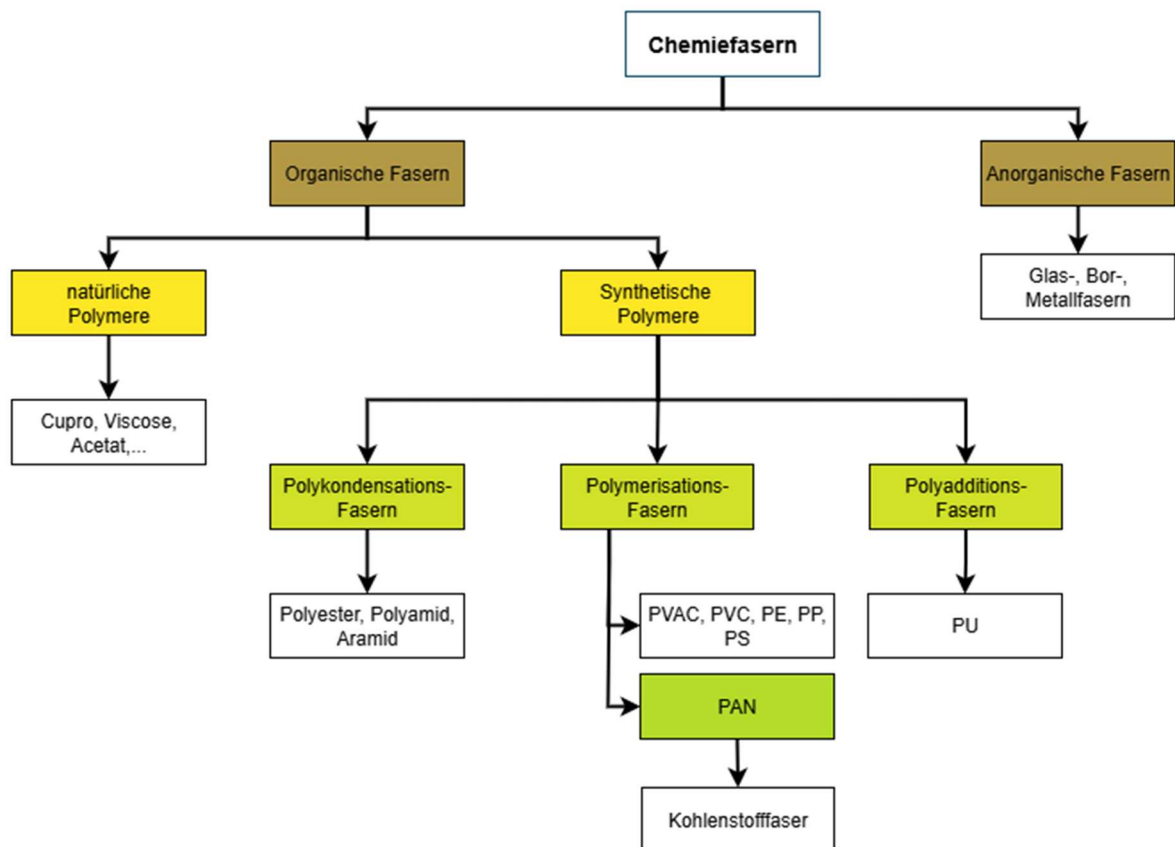


Abbildung 13: Darstellung unterschiedlicher Chemiefasern [3]

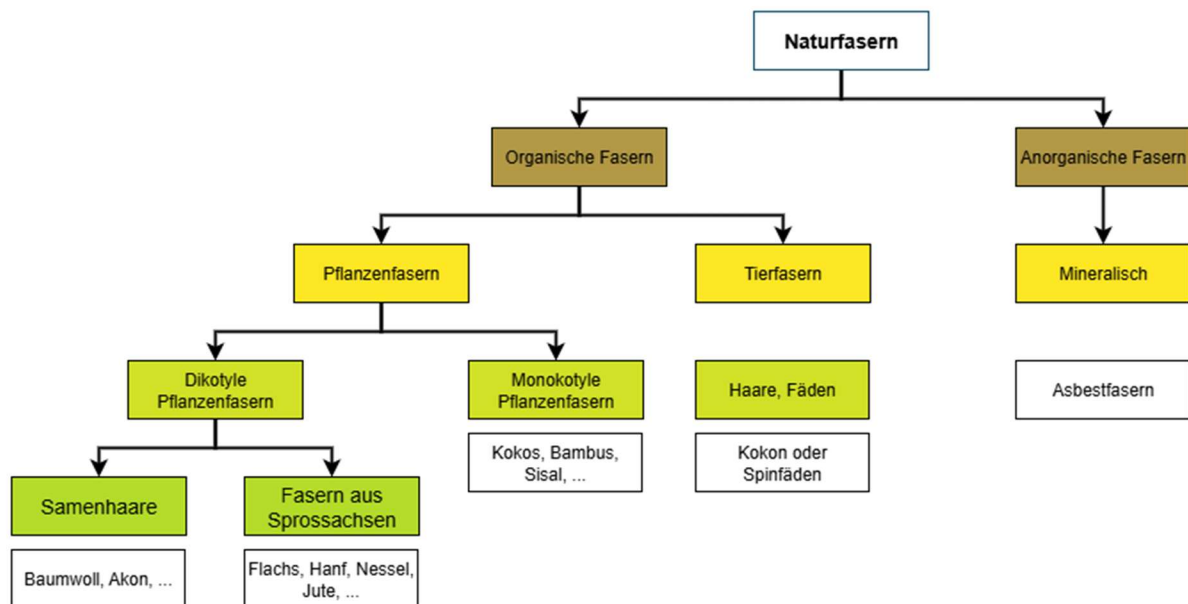


Abbildung 14: Darstellung unterschiedlicher Naturfasern [3]

2.2.3 Herstellungsverfahren

Faserverbundkunststoffe können als Matrix wie im *Abschnitt 2.2.1* erläutert entweder Thermoplaste oder Duroplaste enthalten. Die nachfolgenden Herstellungsverfahren beziehen sich aufgrund der Verwendung in dieser Arbeit ausschließlich auf die Verarbeitung von Duromeren. Diese Kunststoffklasse ist in Verbindung mit FVK jene die am häufigsten zur Anwendung kommt. Die Wahl eines geeigneten Prozesses ist unter anderem von der Faserlänge (kurz, lang, endlos) und Form (Lose, Roving, Gewebe, etc.) abhängig. Wobei die Einteilung der Faserlänge unterschiedlich sein kann und deshalb auch zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Fasermaterial unterschieden wird [1]. Ein weiterer Einfluss zu Auswahl stellt die Viskosität dar, wie in *Tabelle 2* gezeigt. In diesem Abschnitt wird wiederum aufgrund des gesetzten Schwerpunkts auf die Verarbeitung von kontinuierlichen Verstärkungsfasern eingegangen.

Tabelle 2: Viskositätswerte unterschiedlicher Stoffe bei 20°C [28]

Stoff	Viskosität [Pa.s]
Luft	10^{-5}
Wasser	10^{-3}
Typische Infusionsharze	$20 \cdot 10^{-3} - 500 \cdot 10^{-3}$
Speiseöl	70^{-3}
Thermoplast-Schmelzen (bei Verarbeitungstemperatur)	$10^2 - 10^6$

Handlaminieren (*Hand layup processing*)

Eine verbreitete Methode ist das Handlaminieren, wie in *Abbildung 15* dargestellt, und wird vor allem für große Bauteile wie Tanks oder Schiffe verwendet. Auch für geringe Stückzahlen oder generell für den Prototypenbau werden FVK in diesem Verfahren erzeugt. Dabei wird in einem Werkzeug abwechselnd Harz und Fasermaterial aufgetragen. Je nach Materialkombination oder späterem Anwendungszweck kann es notwendig sein, dass ein sogenannter Gelcoat vor dem ersten Laminataufbau aufgetragen werden muss. Diese Harzschicht verhindert das durchdrücken der Faserstruktur an die Bauteiloberfläche und kann zusätzlich auch additiviert (Flammschutz, Farbgebung, etc.) sein. Werden Faserverbundkunststoffe manuell hergestellt, ist es essenziell die Topfzeiten des Harzes zu beachten, da beim Angelieren eine Tränkung der Faser kaum mehr möglich ist. Bis zur Komplettierung des Lagenaufbaus muss Nass in Nass gearbeitet werden, um keine Trennebene und somit eine Bauteilschwächung zu erzeugen. Abschließend kann der so aufgebaute Lagenaufbau zusätzlich vakuumiert werden um einen höheren Faservolumengehalt zu erreichen [1].

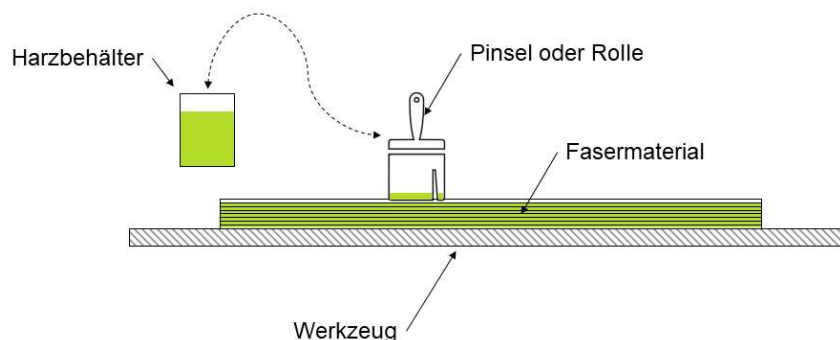


Abbildung 15: Schematische Darstellung eines möglichen Handlaminierprozesses [1]

Vakuuminfusion (*vacuum-assisted resin infusion, VARI*)

Bei diesem Verfahren werden die Faserlagen ohne vorherige Tränkung in der richtigen Faserorientierung am Werkzeug positioniert. Der Aufbau wird mit einer Kunststoffolie verschlossen und evakuiert. Ziel ist es die trockenen Lagen zu verpressen und für die anschließende Infusion mit einem niedrigviskosen Harz vorzubereiten. Je nach Bauteilgeometrie und Größe werden verschiedene Varianten dieses Verfahren und verschieden Angüsse bzw. Absaugpositionen angebracht. Das Harz-Härter-Gemisch wird vermischt und an die Harzleitung angeschlossen. Dieses Rohrsystem kann ebenfalls punktuell auf den Lagenaufbau treffen und in bestimmten Randbereichen oder umlaufend. Nach sorgfältiger Prüfung und Entlüftung der Leitungen sowie Dichteprüfung des Vakuumaufbaus wird durch den Unterdruck das Harz in den Aufbau gedrückt. Die Aushärtung kann unter den normalen Vakuumbedingungen oder bei erhöhtem Druck im Autoklav stattfinden [29].

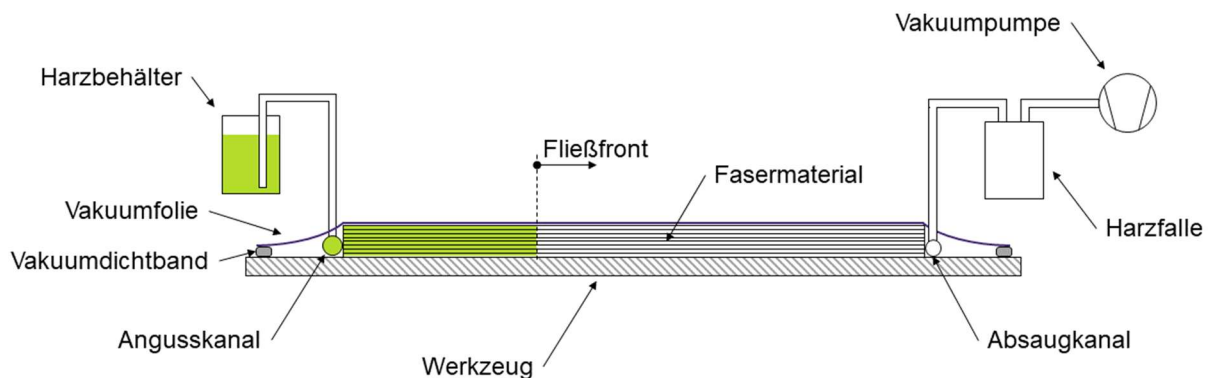


Abbildung 16: Schematische Darstellung eines möglichen Vakuuminfusionsprozess, in Anlehnung an [29].

RTM-Verfahren (*Resin Transfer Moulding*)

In diesem Verfahren wird das Harz zusätzlich zum Unterdruck, aktiv mittels eines Dosiersystems in die Kavität gepresst. Die Prozessdrücke sind höher als jene im Vakuumverfahren und der Atmosphärendruck reicht, nicht mehr aus um die Kavität geschlossen zu halten. Dementsprechend wird der Lagenaufbau durch zwei feste Formhälften verschlossen. Die Harzsysteme besitzen meist kürzere Erstarrungs- und Aushärtezeiten. Sowohl das Harz als auch die Werkzeughälften können temperiert sein, um die Viskosität weiter zu senken und die Aushärtegeschwindigkeit zu erhöhen [1].

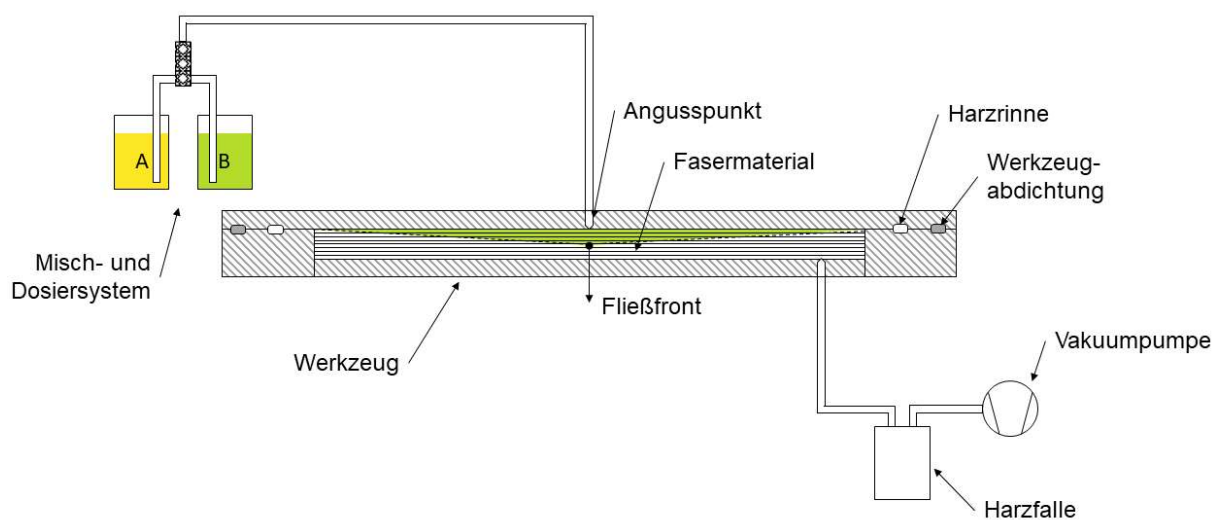


Abbildung 17: Schematische Darstellung eines möglichen RTM-Prozesses in Anlehnung an [1].

Prepreg-Verfahren

Die Imprägnierung einzelner Faserlagen wird bereits durch den Hersteller vorgenommen und ist auf einen bestimmten Faservolumengehalt abgestimmt. Da diese Halbzeuge bereits Harz und Härter enthalten hat die Vernetzung bereits bei dessen Herstellung begonnen. Um diesen Prozess stark zu verlangsamen, werden die Prepregs direkt nach der Herstellung eingefroren und ausgeliefert. Der Verarbeiter entnimmt nur diejenige Menge aus dem gekühlten Zustand, die für die Herstellung des Bauteils notwendig sind. Der Lagenaufbau erfolgt entweder manuell oder in einem automatisierten Prozess wie dem Tapelegeverfahren oder dem Wickelverfahren. Anschließend wird der fertige Aufbau mit einer Vakuumfolie abgedichtet und vakuumiert. Der Aushärtvorgang kann durch zusätzliche Temperatur beschleunigt werden und/oder durch zusätzlichen Druck in einem Autoklav kann der Faservolumengehalt erhöht werden [1].

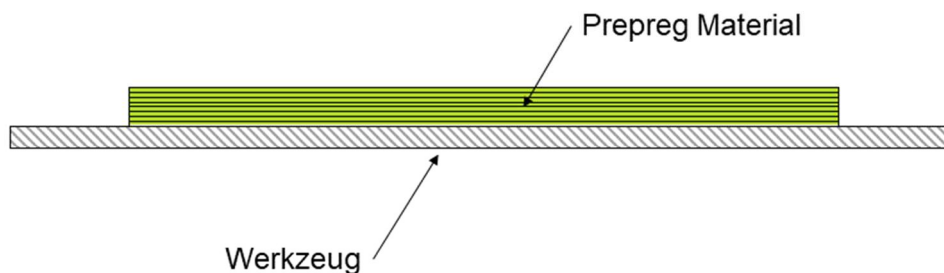


Abbildung 18: Schematische Darstellung eines möglichen Prepreglegeverfahren [1].

Quasi-Prepreg-Verfahren

Das Quasi-Prepreg-Verfahren ist dem Standard Prepreg-Legeprozess sehr ähnlich. Der Unterschied liegt im Vorliegen der einzelnen Komponenten. Ein sogenannter Harzfilm wird dabei vom Hersteller bereitgestellt. Dieser besteht entweder vollständig aus Harz oder ist durch ein feines Gewebe gestützt. Durch die bekannte Harzmenge in diesem Film, kann nun ein eigener Aufbau mit trockenen Fasern hergestellt werden. Wie in *Abbildung 19* dargestellt können die unterschiedlichen Lagen abwechselnd aufgebaut werden, um eine gleichmäßige Tränkung zu gewährleisten. Die Durchtränkung der Faser findet während der Erwärmung des Materials statt. Demzufolge beginnt auch der Aushärtprozess. Überschüssiges Harz kann durch zusätzlich beigelegte Vliese oder Abreißgewebe aufgenommen werden.

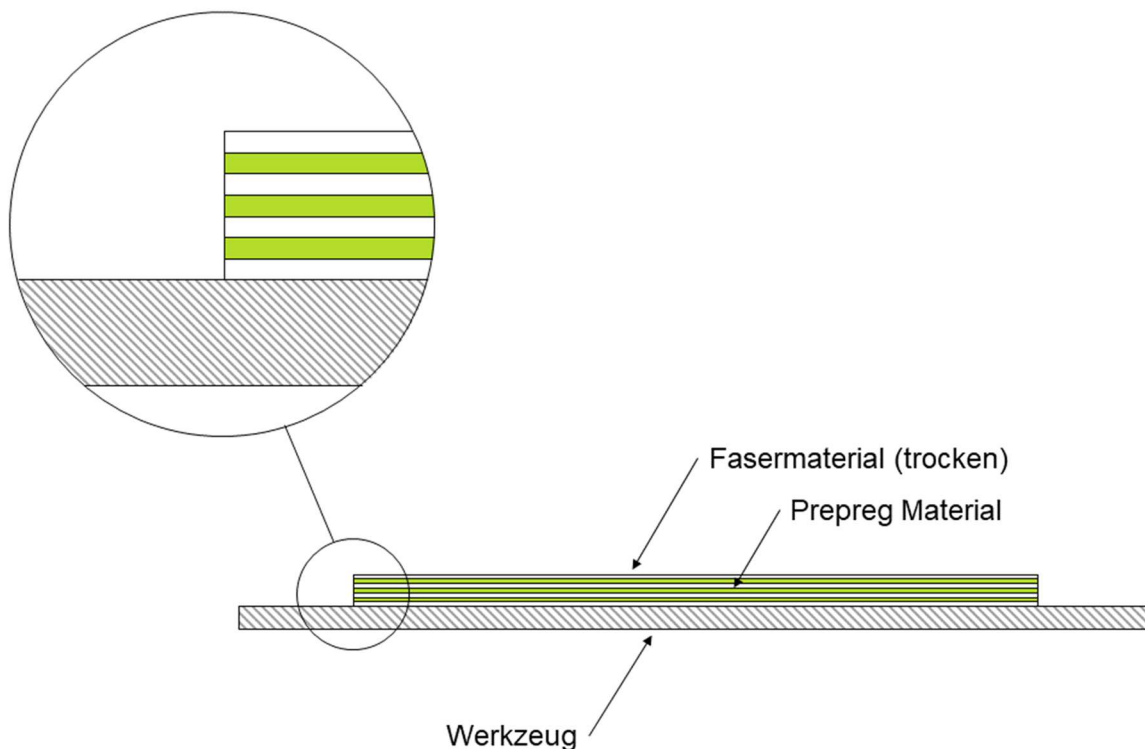


Abbildung 19: Schematische Darstellung eines möglichen Quasi-Prepreglegeverfahrens.

2.3 Mechanische Prüfverfahren

Bauteile sind unterschiedlichsten Beanspruchungen während der Lebensdauer ausgesetzt. Dies reicht von chemischen Einflüssen, über Temperaturänderungen bis zu mechanischen Belastungen. Ein Versagen tritt dann auf, wenn die im Bauteil wirkenden Spannungen infolge von Normalspannungen (Zug- oder Druckbelastung) oder Schubspannungen (z. B. Torsion) oder Überlagerungen die materialabhängige Tragfähigkeit überschreiten. Um einen sicheren Einsatz eines Bauteils zu gewährleisten, müssen einerseits Kennwerte für die mechanische Auslegung ermittelt werden und andererseits muss die Qualität dieser kontrolliert werden. Nachfolgend werden die zwei Prüfverfahren, die in dieser Arbeit Verwendung finden, vorgestellt.

Zugversuch

Dies ist eine rasche und daher auch oft verwendete Methode, um die Zugfestigkeit zu ermitteln. Dabei wird ein Probekörper zwischen zwei Aufnahmepunkten geklemmt und in Zugrichtung belastet. Die auftretende Kraft wird über eine Kraftmessdose gemessen, Dehnungen können indirekt über den Traversenweg berechnet oder mit externen Extensometern gemessen

werden. Neben der Spannung und Dehnung können auch der E-Modul und die Querkontraktionszahl ermittelt werden. Für Kunststoffe werden Zugprüfungen in der Normenreihe DIN ISO 527 beschrieben und für Faserverbunde in der Norm DIN EN ISO 527-4 (isotrope und anisotrope FVK) bzw. DIN EN ISO 527-5 (unidirektionale FVK). Je nach Versagensart am Einspannpunkt kann es notwendig werden, dass die Prüfkörper durch sogenannte Aufleimern (*Abbildung 20*) ergänzt werden müssen um die Krafteinleitung zu verbessern bzw. um Spannungsspitzen zu reduzieren [30].

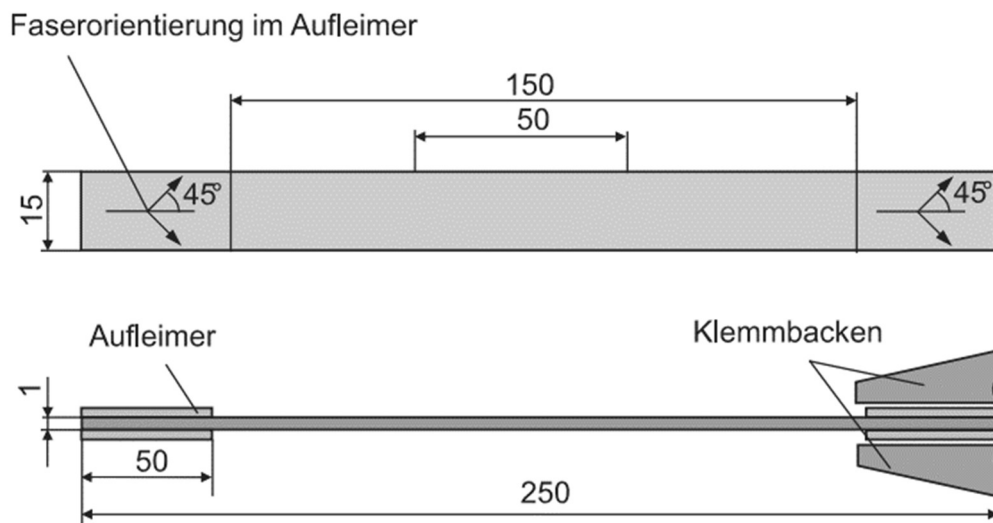


Abbildung 20: Prüfkörper nach DIN EN ISO 527-5 mit und ohne Aufleimer [30].

In der Norm DIN EN ISO 527-5 wird beim Probekörper zwischen Typ A und Typ B unterschieden. Wie in *Tabelle 3* ersichtlich, unterscheiden sich die Prüfkörper in der Dicke, als auch in der Breite, je nachdem in welche Richtung der Prüfkörper beansprucht wird. In *Abbildung 21* sind die drei unterschiedlichen Symmetrieachsen des Prüfkörpers abgebildet, wobei die Richtung 1 die Zugbeanspruchung in Faserrichtung und Richtung 2 die Beanspruchung quer zur Faserrichtung angibt [31].

Tabelle 3: Einteilung der Probenkörperklassen im Zugversuch nach DIN EN ISO 527-5 [31].

Werkstoff	Länge des Probekörpers [mm] <i>l</i>	Abstand zw. Einleitungspunkten [mm] <i>L</i>	Breite [mm] <i>b</i>	Dicke [mm] <i>h</i>
Typ A Prüfrichtung in Faserorientierung	80	64	10	4
Typ B Prüfrichtung quer (90°) zu Faserrichtung	80	64	15	4

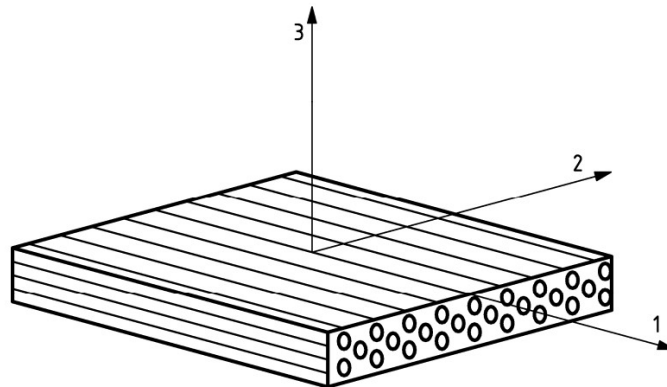


Abbildung 21: Symmetrieachsen des Prüfkörpers [31].

Biegeversuch

Die Beanspruchung durch Biegung tritt in realen Bauteilen sehr häufig auf und belastet ihn sowohl auf Druck als auch auf Zug. Deshalb wird für die Feststellung der Biegefestigkeit als auch für den Biegemodul dieser Messaufbau verwendet. Eine schematische Darstellung zeigt *Abbildung 22* [30]. Sowohl der Drei-Punkt- als auch der Vier-Punkt-Biegeversuch sind in den Normen geregelt. In dieser Arbeit werden die Werte im Drei-Punkt-Biegeversuch nach der Norm DIN EN ISO 14125 ermittelt. Darin ist unter anderem die Prüfgeschwindigkeit, Anzahl der Proben und die Art der Probekörper beschrieben.

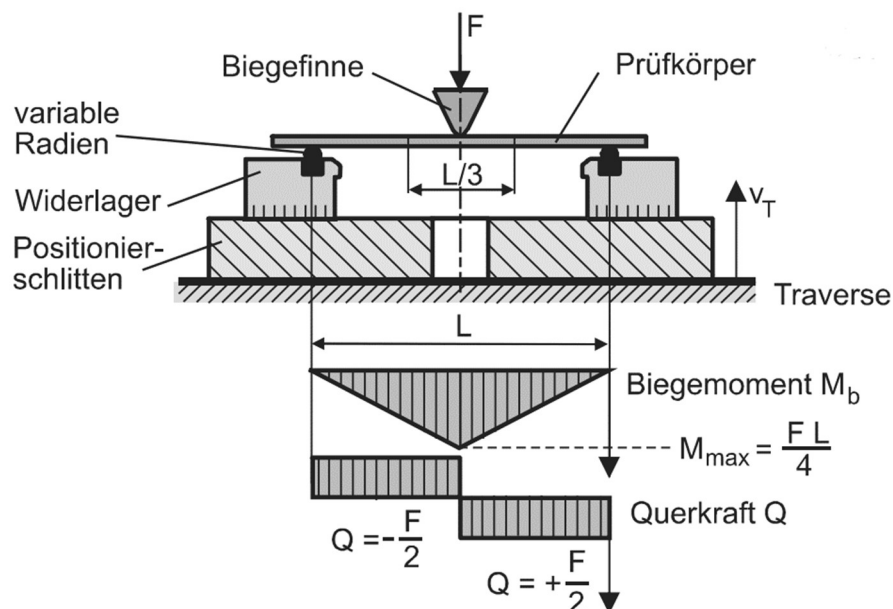


Abbildung 22: Schematischer Aufbau einer Drei-Punkt-Biegeprüfung mit auftretenden Kräften zwischen den Auflagern [30].

In der Norm werden für den Drei-Punkt-Biegeversuch vier unterschiedliche Klassen, je nach Zusammensetzung des Verbunds, wie in *Tabelle 4* dargestellt, angegeben. Besonderes

Augenmerk gilt dabei jenen der Klasse III und Klasse IV, welche für unidirektionale Verbundwerkstoffe Anwendung finden. Die Unterscheidung zwischen diesen beiden Klassen ist auf die eingesetzte Faser zurückzuführen. Für Fasern bei denen die Durchbiegung überwiegend durch die Biegung bestimmt wird, wie dies für Kohlefasern der Fall ist, werden Klasse IV-Prüfkörper mit längeren Stützweiten verwendet. Hingegen sind bei Fasern mit höheren Schubanteilen, wie bei Glas-, oder Naturfasern, die Klasse III Prüfkörper mit entsprechend kürzeren Stützweiten zu verwenden [32].

Tabelle 4: Einteilung der Probenkörperklassen im Biegeversuch nach DIN EN ISO 14125 [32].

Werkstoff	Länge des Probekörpers [mm] <i>l</i>	Stützweite [mm] <i>L</i>	Breite [mm] <i>b</i>	Dicke [mm] <i>h</i>
Klasse I Diskontinuierlich faserverstärkte Kunststoffe	80	64	10	4
Klasse II Mit Matten, kontinuierlichen Matten, mit Gewebe oder Mischformaten verstärkte Kunststoffe, z. B. DMC, BMC, SMC und GMT.	80	64	15	4
Klasse III Transverse (90°) unidirektionale Verbundstoffe Unidirektionale (0°) und multidirektionale Verbundstoffe mit $5 < E_{f1} / G_{13} \leq 15$ (z. B. Glasfasersysteme)	60	40	15	2
Klasse IV Unidirektionale (0°) und multidirektionale Verbundstoffe mit $5 < E_{f1} / G_{13} \leq 50$ (z. B. Kohlenstofffasersysteme)	100	80	15	2

2.4 Anforderungen im Schienenverkehr

Die eingesetzten Materialien im Schienenverkehr müssen verschiedenen Anforderungen standhalten. Vor allem die mechanischen Eigenschaften bei statischen und dynamischen Lasten müssen ausreichend hoch sein, um sicher Personen und Güter befördern zu können. Diese werden in den Norm EN 12663-1 beschrieben. Die Bestimmung der Festigkeitsnachweise werden in den EN 17149 ausgeführt. Kriterien der Aerodynamik werden in der EN 14067 und Brandschutzbestimmungen in der EN 45545 (Bestehend aus fünf Reihen) beschrieben. Die für die Harze besonders relevanten Flammeigenschaften werden

einerseits in den Anforderungen an das Material beschrieben andererseits für den bestimmungsmäßigen Einsatz. Besonders hoch sind dabei die Anforderungen bei einem Schlafwagen, der auch unterirdische Abschnitte durchfährt. Eine Übersicht mit den unterschiedlichen Gefahrenstufen (*engl. Hazard Level, kurz HL*) zeigt *Tabelle 5*. In der Norm EN 45545-2 sind viele Komponenten einer Gruppe zuordenbar und einer Anforderungsklasse zugeordnet, wie der Ausschnitt aus der Norm in *Tabelle 6* für einige Bauteile zeigt. Ohne diese Zuordnung ist die Auswahl nach *Tabelle 7* vorzunehmen [33].

Tabelle 5: Zuordnung der Gefährdungsstufen (HL) nach Bauartklasse [33].

Betriebsklasse	Bauartklasse			
	N: Standardfahrzeuge	A: Fahrzeuge für automatischen Fahrbetrieb, die kein für Notfälle geschultes Personal an Board haben	D: Doppelstockfahrzeuge	S: Schlafwagen und Liegewagen
1	HL 1	HL 1	HL 1	HL 2
2	HL 2	HL 2	HL 2	HL 2
3	HL 2	HL 2	HL 2	HL 3
4	HL 3	HL 3	HL 3	HL 3

Tabelle 6: Anforderungen an gelistete Komponenten [33].

Komponenten-Nummer	Name	Beschreibung	Anforderung
IN6B	Innere Oberflächen Wagenübergängen Typ B - Schienenfahrzeuge, in denen Feuerschutzabschlüsse an beiden Stirnseiten des Wagens vorgesehen sind.	Innenseite der Wagenübergangs-Umhüllung (Faltenbalge). Innenverkleidung des Obergangs (außer Fußboden).	R7
IN7	Fensterrahmen	Fenstereinfassung (einschließlich Dichtungsmaterialien und Dichtmanschetten).	R1
IN8	Vorhänge und Sonnenblenden in Fahrgast- und Personalbereichen sowie Abteilen für Personal	Vorhänge und Sonnenblenden. Außer einem doppelt verglasten Fenster eingeschlossen sind.	R2
IN9A	Oberseiten von Tischen und Klapp-tischen, und Waschbecken in Toiletten. Typ A - Nach oben gerichtete Oberflächen	Alle Tische und Waschbecken in Toiletten (einschließlich umliegender Komponenten).	R1
...	...	...	...

Tabelle 7: Anforderungen an nicht-gelistete Komponenten [33].

Exponierte Fläche	Einsatzort	Anforderungs-satz
> 0,2 m ²	innen	R1
> 0,2 m ²	außen	R7
≤ 0,2 m ²	innen	R22
≤ 0,2 m ²	außen	R23

3 Methoden / Ansatz

Wie im *Kapitel 1.1* vorgestellt wird die Bewertungsmatrix von *Oliveira et. al.* um die Wirkungsindikatoren des EF 3.1 ergänzt, um bei der Wahl des Werkstoffs auch die ökologischen Auswirkungen mitberücksichtigen zu können. Dabei werden zwei Matrizen erstellt. Die erste Matrix (Matrix I) dient zur Einordnung potenzieller Materialkandidaten anhand von Werten, die in der Regel einfach und in kurzer Zeit ermittelt werden können. Zum Beispiel können dies spezifische Kennzahlen, wie die technischen Informationen aus dem Datenblatt, den Preis oder die Brandschutzanforderungen oder auch Informationen zu den Verarbeitungsmethoden oder den Einsatzzweck sein. Da in den technischen Datenblättern in der Regel keine Angaben über die Festigkeiten des späteren Materialverbunds angeführt sind, enthält Matrix I nur Werte der Reinharzsysteme.

Nach diesem Screening können die selektierten Materialien in eine zweite Matrix (Matrix II) übernommen werden. In dieser werden gleiche und/oder weitere Kennwerte der Faserverbunde ermittelt. Demzufolge muss aus dem gewählten System ein Verbundwerkstoff hergestellt und anschließend geprüft werden. Zur Feststellung der Werte in Matrix II sind umfangreichere Arbeitsschritte erforderlich. Diese zusätzlichen Aufwände betreffen einerseits die Herstellung der Prüfkörper und andererseits die Materialprüfung dieser. Zusätzlich muss auch der Faseranteil in das Ökobilanzmodell aufgenommen werden und vollständig modelliert werden. Dazu ist es notwendig, dass die Sicherheitsdatenblätter vorhanden sind und ausreichend Informationen zur Verfügung stehen.

3.1 Materialauswahl

Für den Einsatz von Faserverbunden müssen zumindest die Anforderungen aus dem *Kapitel 2.4* eingehalten werden. Neben den mechanischen und sicherheitsrelevanten Kennwerten für die im Betrieb auftretenden Belastungen ist es auch notwendig fertigungsrelevante Anforderungen abzudecken. Die nachfolgende Darstellung in *Tabelle 8* zeigt mögliche Auswahlkriterien an FVK für den Schienenverkehr.

Tabelle 8: Mögliche Anforderungen an Polymerwerkstoff.

Menge	> 10 t/Jahr	Muss
Beanspruchungen	$T_G \geq 80\text{ °C}$	Muss
	Unverändertes Werkstoffverhalten zwischen -25 und +70 °C	Muss
	EN 45545	Soll
Werkstoffe	Thermoset	Muss
	Halogenfrei	Muss
	kein Phenolharz	Muss
	Biobasierend	Kann
LCA / Ökobilanz	Sicherheitsdatenblatt	Muss
	Informationen zu eingesetzten Komponenten	Soll
Verarbeitung	Vakuuminfusion > Prepreg OoA > Handlaminat	Muss
	Aushärtetemperatur $\leq 100\text{ °C}$	Muss

Im Zuge einer Marktanalyse wurden verschiedene Unternehmen identifiziert, die diese Anforderungen erfüllen könnten. Die *Tabelle 9* zeigt die ausgewählten Firmen, die für die Recherche herangezogen wurden. Mangels Zeit und teilweise Interesse der Hersteller konnten nur bereits vorhandene Harze für die Analyse herangezogen werden.

Tabelle 9: Potenzielle Harzhersteller für Anwendungen mit erhöhten Brandschutzanforderungen.

Hersteller	Polymer	Hersteller	Polymer
ANWIN Group	UP	Nord Composites	UP
AXIOM	EP	Notus	PF
Bakelit	Phenol	OLIN Epoxy	EP
Biesterfeld	EP, UP	Poliya	<u>UP, VE</u>
Boytek	UP	Polynt/Reichhold	<u>UP, VE</u>
Büfa	UP, VE, EP	PRO-SET	EP
Epotec	EP	Scott Bader	VE
Gurit	EP	SHD-Composites	EP
Hexcel	EP	Sicomini	EP
Huntsman	EP	SIMCAS Composites	PFA, EP
INEOS	UP	Solvay/Cytec	PF, EP
Krempel	EP, PF	Struktol	UP, EP
Lavesan	UP	Syensqu	EP
Mäder	EP	Westlake Epoxy	EP

3.2 Modellierung der Systeme

Die Ökobilanz wird, wie in *Abschnitt 2.1* beschrieben, in 4 Phasen gegliedert. Nachfolgend werden in diesem Abschnitt die Phasen 1-3 angeführt und die Phase 4 in den Ergebnissen beschrieben.

3.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Das Ziel dieser Methode ist die Ermittlung von Umweltauswirkungen von verschiedenen Reaktivharzsystemen, wie Epoxid-, Vinyl-, oder Polyesterharzen, die während der Herstellung dieser bzw. bei der Verarbeitung entstehen. Die Ergebnisse sollen gemeinsam mit mechanischen Kennwerten als Entscheidungsbasis für die Auswahl eines geeigneten Harzsystems verwendet werden.

Die Ökobilanzen werden in Anlehnung an die Normen ISO 14040 und ISO 14044 durchgeführt. Dabei wird die funktionelle Einheit bzw. die Bezugsgröße auf 1 kg eines Matrixsystems bzw. eines Faserverbundkunststoffs bezogen. Die primären Bestandteile der Reaktivharze werden von den Sicherheitsdatenblättern bezogen. Die Systemgrenzen beginnen auf der Rohstoffseite mit der Herstellung der einzelnen Komponenten und enden auf der Produktseite mit der Herstellung des Matrix- bzw. Faserverbundsystems (engl. *cradle-to-gate*).

In *Abbildung 23* ist beispielhaft ein Produktsystem dargestellt, welches einen Harztyp und ein Matrixsystem zeigt. Je nach Komponente kann ein Datensatz bereits in ecoinvent vorhanden sein, oder muss durch Recherche der Reaktionsgleichungen nachgebildet werden.

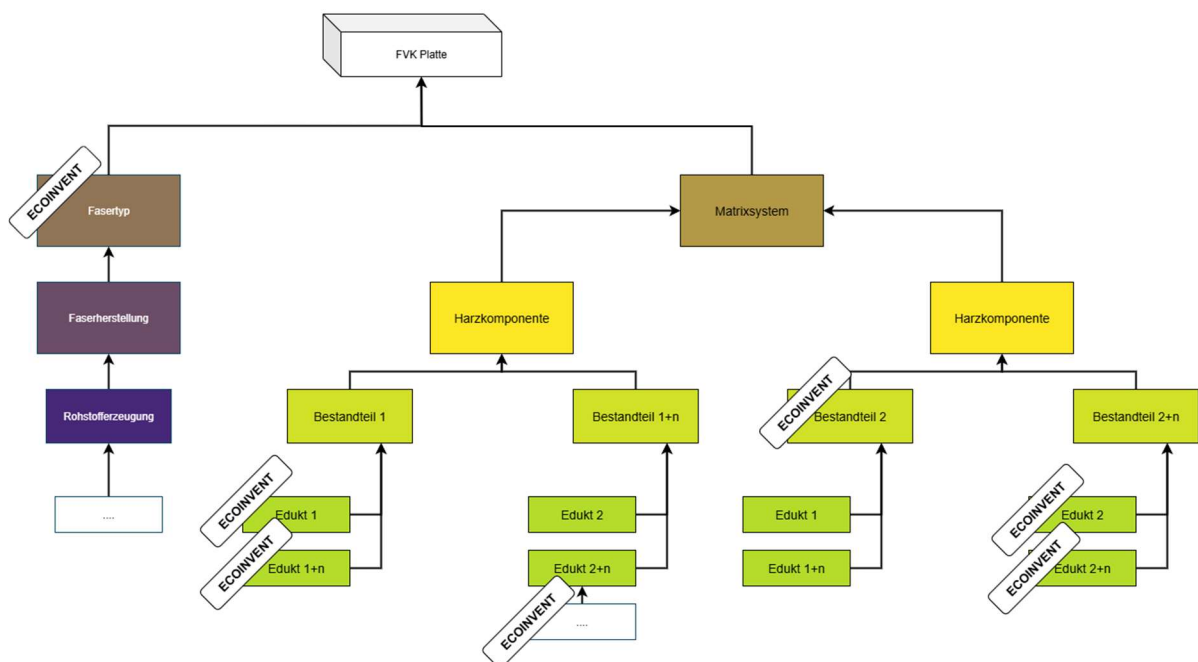


Abbildung 23: Darstellung eines Modell-Produktsystems mit einem Fasertyp und einem Matrixsystem, sowie unterschiedlichen Bestandteilen und Reaktionspartnern.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Cut-off-Ansatz angewendet. Dabei werden die Aufwende und Emissionen der Rohstoffgewinnung ausschließlich dem daraus erzeugten Primärmaterial und somit den Produkten zugerechnet, die dieses Material verwenden. Die durch das Recycling entstehenden Aufwendungen und Emissionen werden dagegen den resultierenden Sekundärrohstoffen zugerechnet [10].

Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden der Abteilung ECO (Abteilung Nachhaltigkeitstechnologien) und der Abteilung LIN (Abteilung Leichtbauinnovationen) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. zur Verfügung gestellt.

3.2.2 Sachbilanzphase LCI

In der Sachbilanzphase werden jene Stoffströme umfasst, die mit der Herstellung des Harzsystems bzw. der ausgehärteten Platte verbunden sind. Der Aufbau der Darstellung erfolgt in den aufeinanderfolgenden Schritten:

1. Stoffidentifikation anhand des Sicherheitsdatenblatts

Für die untersuchten duroplastischen Reaktivsysteme werden die durch den Hersteller bereitgestellten Sicherheitsdatenblätter für die Analyse der Bestandteile herangezogen. Die Hersteller sind verpflichtet zumindest die Stoffe anzugeben, denen eine Gefährdung zuzuordnen ist. Anhand der international anerkannten CAS-Nummer kann ein Stoff eindeutig identifiziert werden [34]. Die Bestandteile werden in einem prozentuellen Wertebereich angegeben und werden durch das Excel Solver Add-in optimiert. Die Hauptbedingung ist die Summe von 100 % aller Bestandteile, mit der Einhaltung der Nebenbedingungen, dass die Wertebereich eingehalten werden (Minimum und Maximum). Eine zusätzliche Nebenbedingung ist, dass gleiche Wertebereiche auch den gleichen Einzelwert erhalten müssen. Beispielhaft sind in der *Abbildung 24* die Bedingungen angeführt und in *Abbildung 25* die Ergebnisse der automatischen Auswertung.

Abbildung 24: Parameterfenster der Excel-Solver Funktion mit Haupt- und Nebenbedingungen und des gewählten Algorithmus "GRG Non-linear" aus 2025-08-15 Chemikalien für SICOMIN FireGreen.xlsx.

Typ	Name	CAS-Nr.	Literatur	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte
Produkt	SICOMIN SR FireGreen 37 (Harz)					100%
Bestandteil	Bisphenol-A-diglycidylether	1675-54-3	ok	25,00%	50,00%	50,00%
Bestandteil	1,4-bis(2,3-epoxypropoxy)butane	2425-79-8	ok	10,00%	25,00%	24,50%
Bestandteil	Formaldehyde, oligomeric reaction products with 1-chloro-2,3-epoxypropane and phenol	9003-36-5	ok	2,50%	10,00%	8,50%
Bestandteil	Dizinc pyrophosphate	7446-26-6	ok	2,50%	10,00%	8,50%
Bestandteil	1,3,5-triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione, compound with 1,3,5-triazine-2,4,6-triamine (1:1)	37640-57-6	ok	2,50%	10,00%	8,50%

Abbildung 25: Darstellung der Excel-Solver Auswertung mit den Bedingungen einzelner Bestandteile und der Gesamtsumme von 100 %.

2. Recherche der Synthese bzw. Herstellungsprozesse

Die Bestandteile von Reaktivsystemen werden meist durch die Ökobilanz-Datenbanken nicht direkt abgebildet und die Herstellung dieser Komponente wird durch Literaturrecherchen ermittelt. Der Vorgang der rekursiven Analyse der Bestandteile wird so lange wiederholt, bis ein Stoffdatensatz aus der Datenbank eingesetzt werden kann. Der Rückverfolgungspfad wird vollständig dokumentiert. Dabei werden als Quellen Fachbücher der organischen Chemie, Enzyklopädien, Onlinedatenbanken, Patente, und spezifische Fachartikel verwendet.

Wie die Daten für die einzelnen Chemikalien in ecoinvent ermittelt wurden wird im Life Cycle Inventories of Chemicals beschrieben [35]. Um eine möglichst vergleichbare Analyse zu erhalten, finden die Annahmen in Anlehnung an die Methode von Hischier et. al. statt. Es wird angenommen, dass aufgrund geistigen Eigentums weder eine genaue Zusammensetzung

noch der Herstellungsprozess veröffentlicht wurde. Demzufolge werden bestimmte Annahmen für die Synthesen angenommen. Annahmen betreffen zum Beispiel die Ausbeute, die laut *Hischier et.al.* mit 95 % beziffert wird. Sind jedoch genauere Angaben vorhanden, werden diese Angaben auch verwendet. Weitere Annahmen betreffen den Wasser- und Energieverbrauch, Transporte, Infrastruktur, Emissionen und Abfälle [36].

Die Werte, die im *Inventories of Chemicals* angegeben sind, beruhen auf Datenerhebungen und Schätzungen um das Jahr 2000 und wurden für die ecoinvent Datenbank v2.0 berücksichtigt. In der aktuellen Version v3.11 sind die Werte zum Teil stark unterschiedlich, eine Beschreibung der aktuellen Quellen wird jedoch nicht angegeben, bzw. wird auf jene Quellen aus dem Jahr 2000 referenziert. Für die Darstellung der Synthesen wurden die aktuellen Proxywerte übernommen. Ein Überblick aller berücksichtigten Angaben für die Produktion und Market RER und Market GLO Prozesse zeigt die *Tabelle 10*. Ergänzt werden diese Werte mit den aus den Recherchen ermittelten Synthesen und den entsprechenden Chemikalien. Es wird davon ausgegangen, dass die Produktion in Europa stattfindet und der Reaktivsystemhersteller keinen Bestandteil selbst herstellt. Dementsprechend muss für jedes Modell ein Prozess für die Produktion und einer für den Transport bzw. dem Markt erstellt werden, wobei letzterer Prozess die Produktion als Input-Flow besitzt. Die gewählte Vorgehensweise lehnt sich stark an jene von *Hischier et.al.* an, unterscheidet sich aber von der Annahme der Ausbeute, die in dieser Arbeit mit 100 % angenommen wurde [36].

Tabelle 10: Detaillierte Auflistung aller Inputs und Outputs, mit Proxywerten für unbekannte Herstellungsprozesse [37].

Direction of flow	Intermediate	unit	Activity		
			production	market - RER	market - GLO
→ Input	chemical factory, organics	Item(s)	4,00E-10		
→ Input	electricity, medium voltage	kWh	3,99E-01		
→ Input	heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,89E+00		
→ Input	heat, from steam, in chemical industry	MJ	2,08E-01		
→ Input	Water, cooling, unspecified natural origin	m³	1,47E-02		
→ Input	Water, river	m³	9,70E-04		
→ Input	Water, well, in ground	m³	8,20E-04		
→ Input	transport, freight, lorry, diesel, unspecified	t*km		2,19E-02	2,09E-01
→ Input	transport, freight train, fleet average	t*km		1,71E-01	3,09E-01
→ Input	transport, freight, inland waterways, barge, diesel	t*km		4,38E-02	2,46E-02
→ Input	transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil	t*km			5,99E-01
← Output	wastewater, average	m³	5,58E-08		
← Output	wastewater, average	m³	2,22E-06		

Für die Sachbilanzen werden sowohl Primärdaten (Sicherheitsdatenblätter, Produktdatenblätter) als auch Sekundärdaten verwendet. Fachliteratur und die eingesetzte Datenbank ecoinvent v3.11 gelten als sekundäre Datenquellen. Der Aufbau der Produktionssysteme wird möglichst vollständig und konsistent vollzogen. Sofern Reaktionsmechanismen zu spezifischen Chemikalien fehlen, werden nahe Substitute herangezogen bei denen angenommen wird, dass die Herstellung analog oder ähnlich abläuft. Der Einsatz von Proxys für ganze Bestandteile wird weitgehend vermieden. Analog dazu werden die Fasermaterialien modelliert.

3.2.2.1 Synthesepfad für SICOMIN System

Das *Sicomin* Harz ist halogenfreies Zwei-Komponenten Epoxidharzsystem mit feuerhemmenden und selbstverlöschenden Eigenschaften. Das System besteht aus dem Epoxidharz *SR FireGreen 37* (Abbildung 26) und kann mit zwei Härter verarbeitet werden, Standardhärter *SD8205* und der in dieser Analyse verwendete langsamere Härter *SD8202*, wie in Abbildung 27 gezeigt [38].



Abbildung 26: Produktdarstellung *Sicomin SR FireGreen 37* Epoxidharz Komponente [39].



Abbildung 27: Produktdarstellung *Sicomin SD8202* Epoxidhärter Komponente [40].

Tabelle 11 zeigt die Auflistung aller im Sicherheitsblatt bekanntgegebenen Bestandteile der **Harzkomponente**. Ergänzt wurde die Tabelle mit den durch den Excel-Solver berechneten prozentuellen Anteilen, der Summenformel und der molaren Masse. Mit dieser Funktion wurden je Angabe aus dem Sicherheitsdatenblatt der Minimum- und der Maximumwert gesetzt. Sowie die Bedingungen, dass die Summe aller Werte 100 % ergeben, und gleiche Grenzwertangaben auch gleiche Ergebnisse erhalten müssen.

Tabelle 11: Bestandteile in absteigender Reihenfolge des prozentuellen Anteils im Epoxidharz *SICOMIN SR FireGreen 37* [38].

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Ursprung /Quelle
Produkt	SICOMIN SR FireGreen 37 (Harz)				100%	Gemisch
Bestandteil	Bisphenol-A-diglycidylether	1675-54-3	25,00%	50,00%	50,00%	Synthese
Bestandteil	1,4-Butandiol diglycidylether	2425-79-8	10,00%	25,00%	24,50%	Synthese
Bestandteil	Bisphenol-F-Diglycidether	9003-36-5	2,50%	10,00%	8,50%	Synthese
Bestandteil	Dizinkpyrophosphat	7446-26-6	2,50%	10,00%	8,50%	Synthese
Bestandteil	1,3,5-triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione, compound with 1,3,5-triazine-2,4,6-triamine (1:1)	37640-57-6	2,50%	10,00%	8,50%	Gemisch

Mit der extrahierten Information wird zunächst jeder Bestandteil in der ecoinvent Datenbank gesucht. Da keine der vorliegenden Chemikalien zu einer Übereinstimmung führte, wurde zu jedem Bestandteil eine Literaturrecherche durchgeführt, um festzustellen wie ein möglicher Herstellungsprozess gestaltet sein kann.

Bisphenol-A-Diglycidylether:

Tabelle 12 zeigt das Bisphenol-A- Diglycidylether, welches zugleich auch das bekannteste Epoxidharz darstellt. Dieses Harz wird auch in der ecoinvent Datenbank v3.11 als Produktionsprozess dargestellt wurde aber der Vollständigkeit halber ebenfalls analog modelliert.

Die Herstellung von Bisphenol-A-Diglycidylether ist die weitverbreitetste Synthese für Epoxidharze und läuft als zweistufiger Prozess ab. In einer alkalischen Umgebung reagiert die Hydroxygruppe wie in *Abbildung 28* unmittelbar mit dem Epichlorhydrin und führt im ersten Schritt zur Anlagerung des Epichlorhydrins an den Sauerstoff der Hydroxygruppe. Es bildet sich aus der neu entstandenen Hydroxygruppe und dem Chlor Chlorwasserstoff, der wie in *Abbildung 29* dargestellt im stöchiometrischen Gleichgewicht mit Natriumhydroxid zu Natriumchlorid und Wasser umgesetzt wird [41].

Tabelle 12: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Bisphenol-A-Diglycidylethers [41].

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel
Bestandteil	Bisphenol-A-diglycidylether	1675-54-3	$C_{21}H_{24}O_4$
Edukt	Bisphenol A	80-05-7	$C_{15}H_{16}O_2$
Edukt	Epichlorhydrin	106-89-8	C_3H_5ClO
Edukt	Natriumhydroxid	1310-73-2	NaOH
Nebenprodukt	Natriumchlorid	7647-14-5	NaCl
Nebenprodukt	Wasser	7732-18-5	H_2O

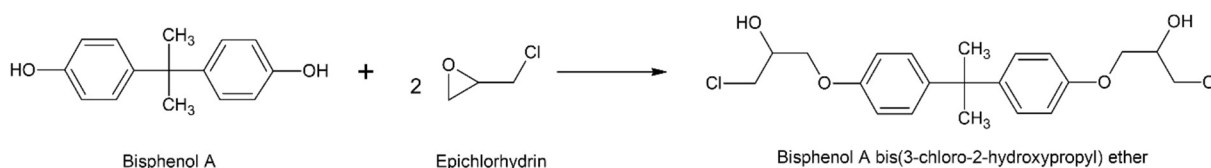


Abbildung 28: Reaktionsgleichung der basisch katalytischen Umsetzung von 1,4- Butandiol mit Epichlorhydrin [41].

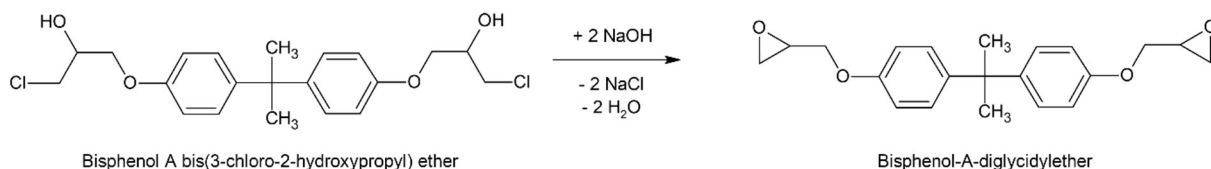


Abbildung 29: Reaktionsgleichung der Epoxidierung zu Bisphenol-A- Diglycidylether [41].

In der *Tabelle 13* werden anhand der Summenformel die einzelnen molaren Massen berechnet und anhand der Reaktionsgleichungen die notwendige Menge für die Herstellung. Die letzte Spalte dieser Tabelle zeigt das Bezugsgewicht von 1 kg und die Umrechnung der einzelnen

Stoffe, um diese Zielgröße herzustellen. In der *Tabelle 14* wird der Produktionsprozess für den Bisphenol-A-Diglycidylether dargestellt und in *Tabelle 15* der daraus erstellte Marketprozess, welcher für die Sachbilanz verwendet wird.

Tabelle 13: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg des Produkts [41].

Typ	Name	Molare Masse	Mol für Reaktion	Molare Masse	Gewichts- bezug
Bestandteil	Bisphenol-A-diglycidylether	340,42 g/mol	1	0,00 g/mol	1.000,00 g
Edukt	Bisphenol A	228,29 g/mol	1	228,29 g/mol	670,62 g
Edukt	Epichlorhydrin	92,52 g/mol	2	185,04 g/mol	543,58 g
Edukt	Natriumhydroxid	40,00 g/mol	2	79,99 g/mol	234,99 g
Nebenprodukt	Natriumchlorid	58,44 g/mol	2	116,88 g/mol	343,34 g
Nebenprodukt	Wasser	18,02 g/mol	2	36,03 g/mol	105,84 g

Tabelle 14: Produktionsprozess RER für Bisphenol-A-Diglycidylether

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	chemical factory, organics	Item(s)	4,00E-10
→ Input	electricity, medium voltage	kWh	3,99E-01
→ Input	heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,89E+00
→ Input	heat, from steam, in chemical industry	MJ	2,08E-01
→ Input	Water, cooling, unspecified natural origin	m ³	1,47E-02
→ Input	Water, river	m ³	9,70E-04
→ Input	Water, well, in ground	m ³	8,20E-04
← Output	production of Bisphenol-A-diglycidylether RER	g	1,00E+03
→ Input	market for Bisphenol A	g	6,71E+02
→ Input	market for epichlorohydrin GLO	g	5,44E+02
→ Input	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state RER	g	2,35E+02
← Output	Sodium Chloride	g	3,43E+02
← Output	Water	g	1,06E+02
← Output	wastewater, average	m ³	5,58E-08
← Output	wastewater, average	m ³	2,22E-06

Tabelle 15: Marktprozess RER für Bisphenol-A-Diglycidylether

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	transport, freight, lorry, diesel, unspecified	t*km	2,19E-02
→ Input	transport, freight train, fleet average	t*km	1,71E-01
→ Input	transport, freight, inland waterways, barge, diesel	t*km	4,38E-02
→ Input	transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil	t*km	
← Output	market for Bisphenol-A-diglycidylether RER	g	1,00E+03
→ Input	production of Bisphenol-A-diglycidylether RER	g	1,00E+03

1,4-Butandiol diglycidylether:

Die Herstellung von 1,4-Butandiol diglycidylether wird analog zum Bisphenol-A-Diglycidylether ebenfalls in zwei Schritten umgesetzt. Die an der Reaktion teilnehmenden Stoffe sind in *Tabelle 16* angeführt. Im ersten Schritt reagieren die Epoxidringe mit den Hydroxygruppen des Diols wie in *Abbildung 30*. *Abbildung 31* zeigt den zweiten Schritt, bei der das Zwischenprodukt

durch eine Dehydrochlorierung mit einem Alkalisalz zum 1,4-Butandiol diglycidylether umgesetzt wird [41]. Die dafür verwendeten Chemikalien 1,4- Butandiol, Epichlorhydrin und Natriumhydroxid sind in der ecoinvent Datenbank vorhanden.

Tabelle 16: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des 1,4-Butandiol diglycidylethers [41].

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel
Bestandteil	1,4-Butandiol diglycidylether	2425-79-8	$C_{10}H_{18}O_4$
Edukt	1,4-Butandiol	110-63-4	$C_4H_{10}O_2$
Edukt	Epichlorhydrin	106-89-8	C_3H_5ClO
Edukt	Natriumhydroxid	1310-73-2	NaOH
Nebenprodukt	Natriumchlorid	7647-14-5	NaCl
Nebenprodukt	Wasser	7732-18-5	H_2O

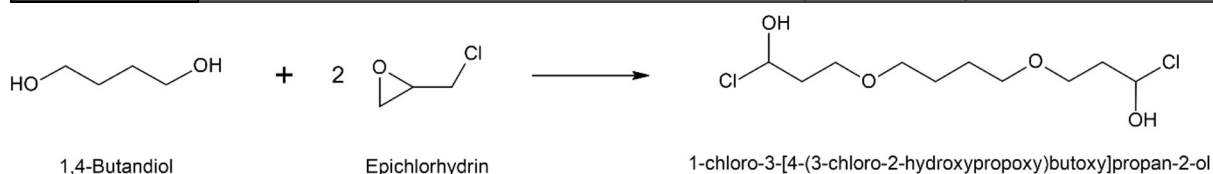


Abbildung 30: Reaktionsgleichung der basisch katalytischen Umsetzung von 1,4- Butandiol mit Epichlorhydrin [41].

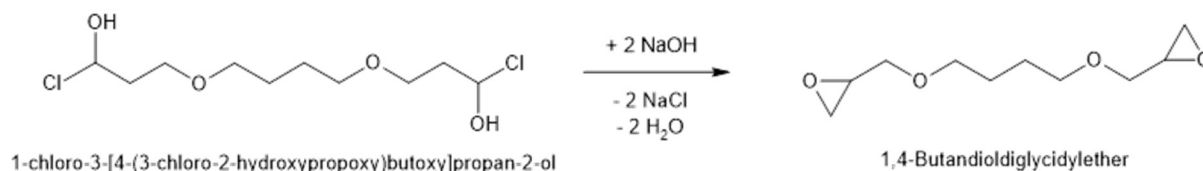


Abbildung 31: Reaktionsgleichung der Epoxidierung und Umsetzung mit Natriumhydroxid zu 1,4-Butandiol-diglycidylether [41].

Mit der Stoffmenge der jeweiligen Chemikalien lässt sich die Menge für die Herstellung von 1 kg des 1,4-Butandiol diglycidylethers, wie in *Tabelle 17* dargestellt, berechnen und in ecoinvent wird sowohl ein Produktions- als auch ein Marketprozess erstellt (*Tabelle 18, Tabelle 19*).

Tabelle 17: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg des Produkts [41].

Typ	Name	Molare Masse	Mol für Reaktion	Molare Masse	Gewichts- bezug
Bestandteil	1,4-Butandiol diglycidylether	202,25 g/mol	1	0,00 g/mol	1.000,00 g
Edukt	1,4-Butandiol	90,12 g/mol	1	90,12 g/mol	445,60 g
Edukt	Epichlorhydrin	92,52 g/mol	2	185,04 g/mol	914,93 g
Edukt	Natriumhydroxid	40,00 g/mol	2	79,99 g/mol	395,52 g
Nebenprodukt	Natriumchlorid	58,44 g/mol	2	116,88 g/mol	577,90 g
Nebenprodukt	Wasser	18,02 g/mol	2	36,03 g/mol	178,15 g

Tabelle 18: Produktionsprozess RER für 1,4-Butandiol diglycidylether

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	chemical factory, organics	Item(s)	4,00E-10
→ Input	electricity, medium voltage	kWh	3,99E-01
→ Input	heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,89E+00
→ Input	heat, from steam, in chemical industry	MJ	2,08E-01
→ Input	Water, cooling, unspecified natural origin	m³	1,47E-02
→ Input	Water, river	m³	9,70E-04
→ Input	Water, well, in ground	m³	8,20E-04
← Output	production of 1,4-Butanediol diglycidyl ether RER	g	1,00E+03
→ Input	market for 1,4-butanediol GLO	g	4,46E+02
→ Input	market for epichlorohydrin GLO	g	9,15E+02
→ Input	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state RER	g	3,96E+02
← Output	sodium chloride Emission to water	g	5,78E+02
← Output	Water	g	1,78E+02
← Output	wastewater, average	m³	5,58E-08
← Output	wastewater, average	m³	2,22E-06

Tabelle 19: Marktprozess RER für 1,4-Butandiol diglycidylether

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	transport, freight, lorry, diesel, unspecified	t*km	2,19E-02
→ Input	transport, freight train, fleet average	t*km	1,71E-01
→ Input	transport, freight, inland waterways, barge, diesel	t*km	4,38E-02
→ Input	transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil	t*km	
← Output	market for 1,4-Butanediol diglycidyl ether RER	g	1,00E+03
→ Input	production of 1,4-Butanediol diglycidyl ether RER	g	1,00E+03

Bisphenol-F-Diglycidylether:

Unter der CAS-Nummer 9003-36-5 ist in der PubChem lediglich ein Polymer aus den Stoffen Epichlorhydrin, Formaldehyde und Phenol beschrieben [42]. Ein Hinweis auf ein Bisphenol-F-Diglycidylether gibt die ECHA Datenbank bzw. die im SDS zusätzliche EG-Nummer (*engl. EC-No, European Community number*) [43].

Die Stoffe, die bei der Reaktion des Bisphenol-F-Diglycidylether beinhaltet sind, werden in der Tabelle 20 dargestellt. Das Bisphenol F ist in der ecoinvent Datenbank nicht dargestellt und muss daher ebenfalls als Synthese dargestellt werden. Die Herstellung von Bisphenol-F-Diglycidylether läuft analog zur Synthese für Bisphenol-A-Diglycidylether als zweistufiger Prozess ab. Dabei reagiert im Schritt 1, wie der *Abbildung 32* dargestellt, im basischen Milieu

die Hydroxygruppe mit dem Epichlorhydrin. Die entstandene Hydroxygruppe wird unter Zugabe von NaOH zu Chlorwasserstoff und Wasser abgetrennt, diese Reaktion ist in *Abbildung 33* ausgeführt [41].

Tabelle 20: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Bisphenol-F-Diglycidylether [41].

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel
Bestandteil	Bisphenol-F-Diglycidether	9003-36-5	$C_{19}H_{20}O_4$
Edukt	Epichlorhydrin	106-89-8	C_3H_5ClO
Edukt	Natriumhydroxid	1310-73-2	NaOH
Nebenprodukt	Natriumchlorid	7647-14-5	NaCl
Nebenprodukt	Wasser	7732-18-5	H_2O
Edukt	Bisphenol F	620-92-8	$C_{13}H_{12}O_2$

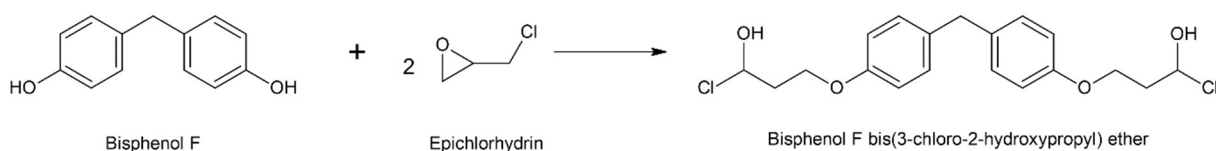


Abbildung 32: Reaktionsgleichung der basisch katalytischen Umsetzung von Bisphenol-F mit Epichlorhydrin [41].

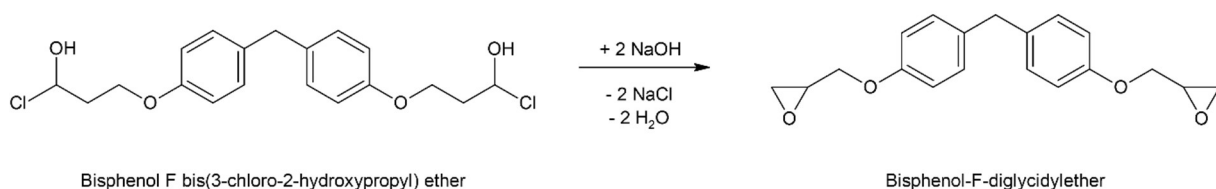


Abbildung 33: Reaktionsgleichung der Epoxidierung zu Bisphenol-F-Diglycidylether [41].

Die für die Menge von 1 kg notwendigen Chemikalien und entstehenden Nebenprodukte sind in der *Tabelle 21* angeführt. Der Produktionsprozess für die Herstellung des Bisphenol-F-Diglycidylethers ist in *Tabelle 22* und jener für den Marktprozess in *Tabelle 23* aufgelistet.

Tabelle 21: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg des Produkts [41].

Typ	Name	Molare Masse	Mol für Reaktion	Molare Masse	Gewichts-bezug
Bestandteil	Bisphenol-F-Diglycidether	312,37 g/mol	1	0,00 g/mol	1.000,00 g
Edukt	Epichlorhydrin	92,52 g/mol	2	185,04 g/mol	592,40 g
Edukt	Natriumhydroxid	40,00 g/mol	2	79,99 g/mol	256,09 g
Nebenprodukt	Natriumchlorid	58,44 g/mol	2	116,88 g/mol	374,18 g
Nebenprodukt	Wasser	18,02 g/mol	2	36,03 g/mol	115,35 g
Edukt	Bisphenol F	200,24 g/mol	1	200,24 g/mol	641,04 g

Tabelle 22: Produktionsprozess RER für Bisphenol-F-Diglycidylether

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	chemical factory, organics	Item(s)	4,00E-10
→ Input	electricity, medium voltage	kWh	3,99E-01
→ Input	heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,89E+00
→ Input	heat, from steam, in chemical industry	MJ	2,08E-01
→ Input	Water, cooling, unspecified natural origin	m ³	1,47E-02
→ Input	Water, river	m ³	9,70E-04
→ Input	Water, well, in ground	m ³	8,20E-04
← Output	production of Bisphenol-F Diglycidether RER	g	1,00E+03
→ Input	market Bisphenol F	g	6,41E+02
→ Input	market for epichlorohydrin GLO	g	5,92E+02
→ Input	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state RER	g	2,56E+02
← Output	Sodium Chloride	g	3,74E+02
← Output	Water	g	1,15E+02
← Output	wastewater, average	m ³	5,58E-08
← Output	wastewater, average	m ³	2,22E-06

Tabelle 23: Marktprozess RER für Bisphenol-F-Diglycidylether

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	transport, freight, lorry, diesel, unspecified	t*km	2,19E-02
→ Input	transport, freight train, fleet average	t*km	1,71E-01
→ Input	transport, freight, inland waterways, barge, diesel	t*km	4,38E-02
→ Input	transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil	t*km	
← Output	market for Bisphenol-F Diglycidether	g	1,00E+03
→ Input	production of Bisphenol-F Diglycidether RER	g	1,00E+03

Bisphenol F:

Mit einem Überschuss von Phenol und in Anwesenheit einer starken Säure wird Bisphenol F mit Formaldehyd umgesetzt. Es entstehen, wie in *Abbildung 34* dargestellt, verschiedene Isomere, wobei das o-, p-Isomer überwiegt. Nicht so häufig werden auch starke Basen für die Synthese eingesetzt, dadurch wird die o,o'-Isomerie bevorzugt [44, 45]. Die eingesetzten Chemikalien sind in der *Tabelle 24* angeführt. Die Menge an Stoffen für die Herstellung und die Sachbilanz des Produktions- und Marktprozesses sind im Anhang A detailliert dargestellt.

Tabelle 24: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Bisphenol-F [44, 45].

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel
Produkt	Bisphenol F	620-92-8	C ₁₃ H ₁₂ O ₂
Edukt	Formaldehyd	50-00-0	CH ₂ O
Edukt	Phenol	108-95-2	C ₆ H ₆ O
Nebenprodukt	Wasser	7732-18-5	H ₂ O

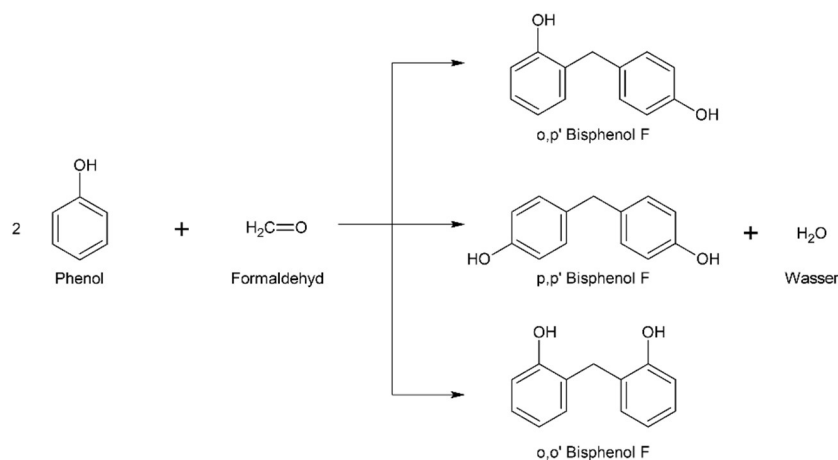


Abbildung 34: Herstellung von Bisphenol F ausgehend von Phenol und Formaldehyd unter Bildung unterschiedlicher Isomere [45].

Zinkpyrophosphat:

Dieser Bestandteil wird als weißer Pigmentfarbstoff verwendet [46]. *Tabelle 25* zeigt die Stoffe, die für die Herstellung des Zinkpyrophosphats verwendet werden [47]. Das Edukt Zinksulfat ist als *zinc monosulfat* und das Natriumdiphosphat als *sodium pyrophosphate* in der Datenbank enthalten.

Tabelle 25: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Zinkpyrophosphat [47].

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel
Bestandteil	Dizinkpyrophosphat	7446-26-6	Zn ₂ P ₂ O ₇
Edukt	Zinksulfat	7733-02-0	ZnSO ₄
Edukt	Natriumdiphosphat	7722-88-5	Na ₄ P ₂ O ₇
Nebenprodukt	Natriumsulfat	7757-82-6	Na ₂ SO ₄

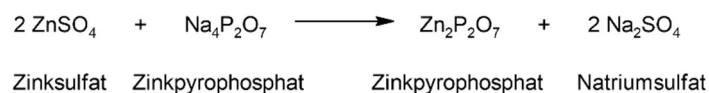


Abbildung 35: Reaktionsgleichung der Herstellung von Zinkdiphosphat [47].

Die ausführliche Auflistung der Mengen der eingesetzten Stoffe und die Darstellung der des Produktions- und Marketprozesses sind in Anhang A angeführt.

Melamin-Cyanursäure-Komplex

Dieser Stoff ist durch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen Melamin und Cyanursäure zu großen Molekülen verbunden. Dadurch besitzt dieser eine hohe Stabilität und wird als Flamschutzmittel eingesetzt [48, 49].

Tabelle 26: Edukte und Produkte für die Herstellung des Melamin-Cyanursäure-Komplex [48–50].

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel
Bestandteil	1,3,5-triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione, compound with 1,3,5-triazine-2,4,6-triamine (1:1)	37640-57-6	n.a.
Edukt	Melamin	108-78-1	$C_3H_6N_6$
Edukt	Cyanursäure	108-80-5	$C_3H_3N_3O_3$

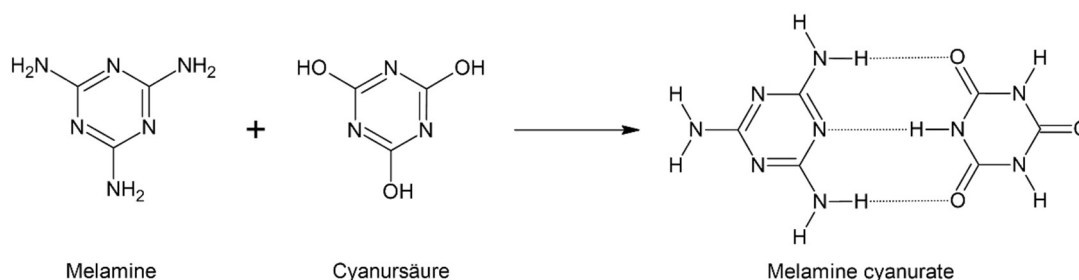


Abbildung 36: Wasserstoffbrückenbindung zwischen Melamin und Cyanursäure [48, 49].

Das Edukt Cyanursäure welches für die Herstellung des Komplexes notwendig ist, wird industriell durch Erhitzen von Harnstoff hergestellt, dabei spaltet sich Ammoniak ab [51].

Tabelle 27: Edukt, Nebenprodukt und Produkt für die Herstellung der Cyanursäure [51].

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel
Produkt	Cyanursäure	108-80-5	$C_3H_3N_3O_3$
Edukt	Harnstoff	57-13-6	CH_4N_2O
Nebenprodukt	Ammoniak	7664-41-7	NH_3

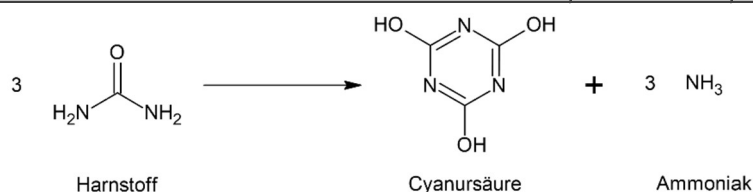


Abbildung 37: Reaktionsgleichung Herstellung Cyanursäure

Die detaillierte Modelldarstellung und die Bestandteile des Produktions- und Marketprozesses sind in Anhang A angeführt.

Tabelle 28 zeigt die für die **Härterkomponente** Sicomin SD8202 beinhalteten Stoffe aus dem Sicherheitsblatt. Analog zur Darstellung der Harzkomponente wurde die prozentuale Verteilung mit dem Excel-Solver berechnet.

Tabelle 28 Bestandteile in absteigender Reihenfolge des prozentuellen Anteils im Härter SD8202 [52].

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Ursprung /Quelle
Bestandteil	Polyetherdiamin	9046-10-0	25,00%	50,00%	26,88%	Synthese
Bestandteil	Polyethertriamin	39423-51-3	2,50%	10,00%	7,84%	Synthese
Bestandteil	Formaldehyd, Polymere mit Diethylentriamin und styreniertem Phenol	1293368-66-7	2,50%	10,00%	7,84%	Gemisch
Bestandteil	m-Xylylendiamin	1477-55-0	1,00%	2,50%	1,85%	Synthese
Bestandteil	1,3-Cyclohexanedimethanamine	2579-20-6	1,00%	2,50%	1,85%	Synthese
Bestandteil	Styrenated phenol	61788-44-1	1,00%	2,50%	1,85%	Synthese

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der einzelnen Prozesse der Chemikalien wurde anhand der bisherigen Methode fortgeführt. Die detaillierte Darstellung der Tabellen zu den einzelnen Stoffen ist im Anhang A angeführt.

Isophorondiamin:

Dieser Stoff gehört zu den sogenannten polyfunktionellen Aminen und dient der Kalthärtung von Epoxidharzsystemen [53]. Für die industrielle Herstellung werden die Firmen BASF und Degussa AG genannt. In Abbildung 38 ist das Edukt Isophoronitril abgebildet, welches durch Hydratisierung mit Ammoniak zu Isophorondiamin umgesetzt wird [54, 55].

Isophoronitril

Die Synthese des Isophoronitrils wird ebenfalls durch eine Recherche nachgebildet, der Herstellungsprozess startet vom Edukt Isophoron. Die Umsetzung erfolgt katalytisch mit Cyanwasserstoff. Dieses Verfahren wurde 2018 durch die *Evonik Degussa GmbH* zum Patent angemeldet [56]. Die Auflistung der eingesetzten Chemikalien sowie der Parameter findet sich in Anhang A.

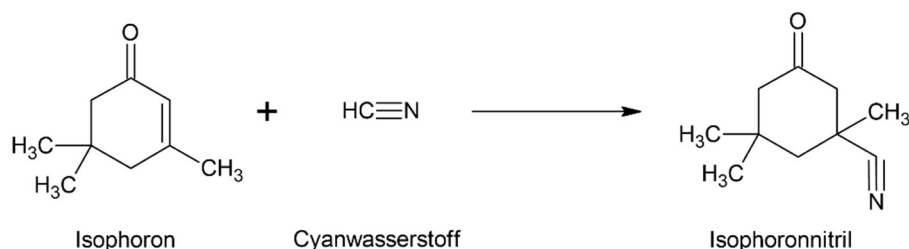


Abbildung 38: Reaktionsgleichung Herstellung Isophoronitril [56].

Polyetherdiamin:

Die Kombination der CAS Nummer und der EG-Nummer in der *ECHA* Datenbank beschreibt ein Reaktionsprodukt aus Di-, Tri- und Tetrapropylenoxid mit Ammoniak und ein Molekül mit den entsprechenden unterschiedlichen Wiederholungen der Monomereinheit wie in *Abbildung 39* dargestellt [43]. In der Analyse wird von einer mittleren Monomeranzahl von vier Einheiten ausgegangen.

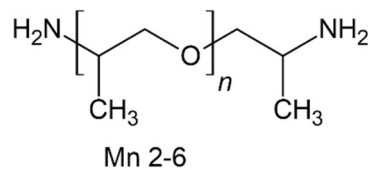


Abbildung 39: Darstellung des Moleküls mit der CAS-Nummer aus der ECHA Datenbank [43]

Die Herstellung des Polyetheramins beginnt bei der Reaktion von Propylenglykol mit Propylenoxid, dabei entstehen unterschiedliche Propylenglykol-Polymere, die anschließend in einer Destillationskolonne voneinander getrennt werden [57]. Ein Polyol dient als Startmolekül und in einer katalytischen Polymerisation kann ein Epoxid an jedes -OH-Gruppe angehängt werden [58]. Die Reaktion mit Propylenoxid ist analog zu jener mit Ethylenoxid, dabei ist die Reaktivität des Dreirings ausschlaggebend für die starke Reaktivität. Die durch die Addition neu entstehende Hydroxygruppe kann wieder ein weiteres Propylenoxid angehängt werden. Je höher der Propylenoxid-Überschuss in der Synthese ist, desto höhermolekular sind die Produkte. Die allgemeine Reaktion ist in *Abbildung 40*, die Auflistung der beteiligten Chemikalien sind in *Tabelle 34* dargestellt.

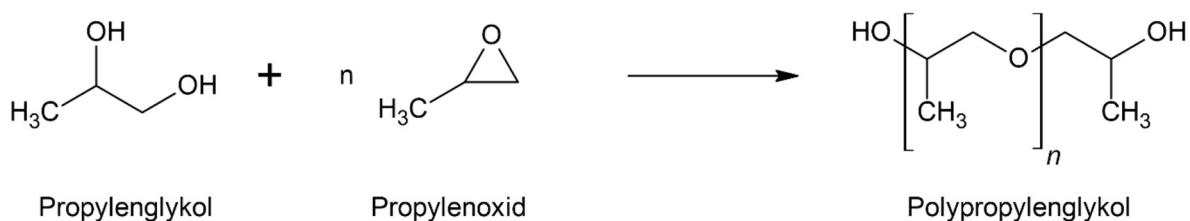


Abbildung 40: Ringöffnungspolymerisation von Propylenoxid mit Propylenglykol [59].

Es folgt der Schritt der Aminierung bzw. der Ammonolyse, bei der die Hydroxygruppe durch den Ammoniak ausgetauscht wird. Im ersten Schritt findet dabei ein Übergang zu einer Carbonylgruppe durch die katalytische Entnahme von Wasserstoff statt, ehe Ammoniak angelagert wird [60]. Die detaillierte Auflistung der beteiligten Chemikalien und Mengen sind im Anhang A angeführt.

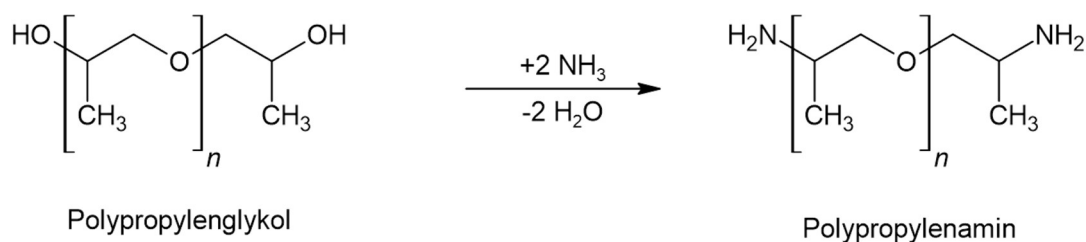


Abbildung 41: Aminierung des Polypropylenglykols [48, 61].

Polyethertriamin:

Die CAS-Nummer (39423-51-3) sowie die EG-Nummer (500-105-6) zeigen Hinweise auf ein Triamin bzw. den möglichen Handelsnamen Jeffamine T-403, von dem in dieser Analyse ausgegangen wird. Die Zusammenfassung der Jeffamine Polyetheramine sowie das Technische Produktblatt des Jeffamine T-403 von Huntsman zeigen eine allgemeine Formulierung des dreifachen Amins [62, 63]. Es wird davon ausgegangen, dass das Start-Polyol dabei das 1,1,1-Trimethylpropan (TMP) ist und durch Polymerisation mit einem Propylenoxid, wie in *Abbildung 42* und Aminierung zum Polypropylentriamin, wie in *Abbildung 43* synthetisiert in Analogie zum zuvor beschriebenen Polyetherdiamins wird. Das Produktblatt nennt eine Summe der Indizes x, y, z zwischen fünf und sechs Einheiten. Als vereinfachte Annahme wird von genau zwei Einheiten je Kette ausgegangen. Ein möglicher Herstellungsprozesse für Polyetheramin wird auch in der Patentschrift der Firma BASF beschrieben [61].

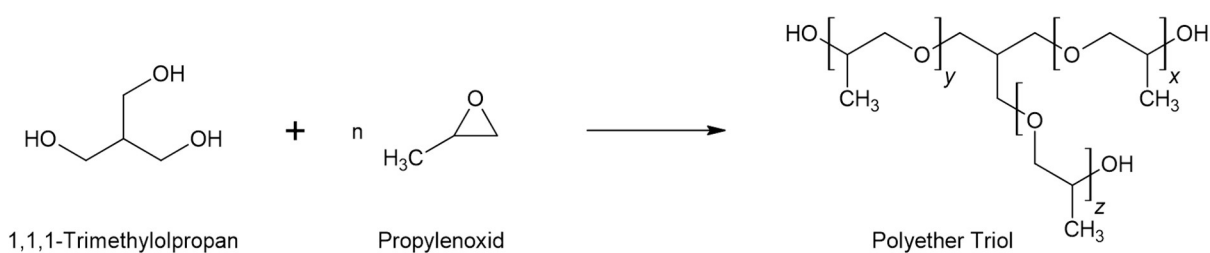


Abbildung 42: Synthese zum Polyethertriol [59].

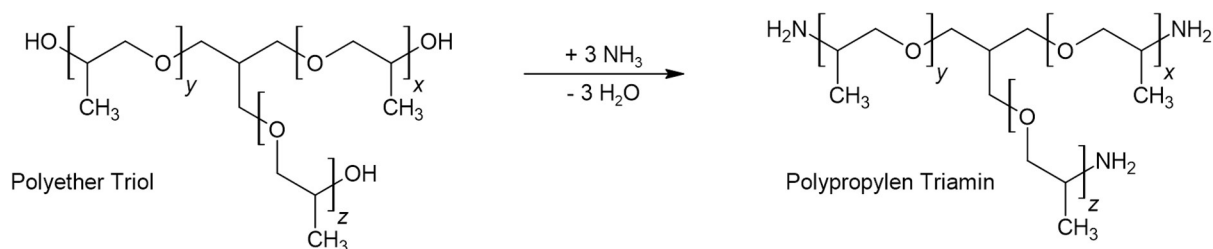


Abbildung 43: Aminierung zum Polypropylentriamin [48, 61].

Die ausführliche Beschreibung mit Tabellen aller weiteren Chemikalien des SICOMIN Systems ist im Anhang A angeführt und wurde nach der gleichen Methode modelliert.

3.2.2.2 Synthesepfad für GURIT System

Das *GURIT* System *SA 130FR* ist ein feuerhemmendes Harzsystem in der Form eines sogenannten Harzfilms und wird als Klebefilm eingesetzt. Da für den reinen Harzfilm keine mechanischen Werte im Produktblatt angeführt sind werden die Werte des *ST 130FR* verwendet. Dabei handelt es sich um das gleiche Harz ist jedoch bereits mit Fasern zu einem Prepreg verbunden [64]. Das Material wird dafür benutzt, um das Fasermaterial während des Vakuumaufbaus zu tränken und so einen Verbund herzustellen. Da die Vorgehensweise nach der Modellierung stets nach der gleichen Methode fortgeführt wurde, sind alle detaillierten Auflistungen des Systems *GURIT* im Anhang B angeführt.

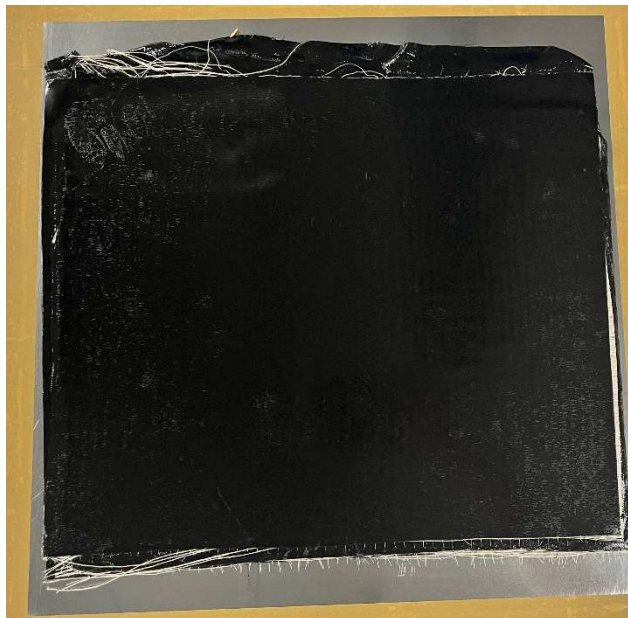


Abbildung 44: Produktdarstellung *GURIT* System *SA 130FR* auf Werkzeugplatte und darunter platzierten Glasfaser UD-Lagen

In *Tabelle 29* sind die im Sicherheitsdatenblatt angeführten Chemikalien aufgelistet. Die prozentuelle Verteilung ist als Bereich angegeben und die Bestimmung der einzelnen Anteile wurde unter Berücksichtigung der Bereiche und der Bedingung, dass alle Komponenten 100 % ergeben mit dem Excel-Solver berechnet. Anschließend wurde zu jedem der gelisteten Stoffe eine Literaturrecherche zu möglichen industriellen Herstellungsprozessen durchgeführt.

Tabelle 29: Bestandteile in absteigender Reihenfolge des prozentuellen Anteils im Harzfilms SA 130FR Resin Film [65]

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse	Ursprung /Quelle
Produkt	SA 130FR Resin Film (Fire retardant Epoxy)				100%			Gemisch
Bestandteil	Bisphenol-F-Diglycidether	9003-36-5	25,00%	50,00%	34,00%	$C_{19}H_{20}O_4$	312,37 g/mol	Synthese
Bestandteil	Ammonium polyphosphate	68333-79-9	25,00%	50,00%	34,00%	$(NH_4PO_3)_{70}$	6790,68 g/mol	Synthese
Bestandteil	Bisphenol-A-diglycidylether	25068-38-6	10,00%	25,00%	20,00%	$C_{21}H_{24}O_4$	340,42 g/mol	Synthese
Bestandteil	Formaldehyd-Polymer mit Epichlorhydrin und Bisphenol-A	28906-96-9	5,00%	10,00%	10,00%	n.a.	n.a.	Gemisch
Bestandteil	Titan(IV)-oxid	13463-67-7	1,00%	3,00%	2,00%	TiO_2	79,87 g/mol	ecoinvent

Bisphenol-F-Diglycidylether:

Dieser Stoff wurde bereits im Abschnitt 3.2.2.1 vollständig dargestellt und wird für die Modellierung des *GURIT SA 130FR* übernommen.

Ammonium-Polyphosphat:

Aufgrund der günstigen Herstellung und guten Flammsechutzeigenschaften wird dieser Stoff als Flammsechutzmittel in Polymeren bzw. Harzsystemen eingesetzt. Dabei wirkt der in der Verbindung enthaltene Phosphor als brandhemmend, welcher bei zunehmenden Temperaturen (Brand) freigesetzt wird [66].

Ammonium-Polyphosphate können in unterschiedlichen Strukturen und Monomer Wiederholungen vorliegen. Für den Einsatz als Flammschutzmittel werden meist APP-II oder APP-I eingesetzt [67]. Die im Sicherheitsdatenblatt angeführte CAS-Nummer lässt allein keinen Rückschluss auf die Struktur zu. Zusätzlich ist die EG-Nummer (European Community number) angegeben. Durch Eingabe dieser Nummer in der ECHA-Datenbank wird eine Monomer Wiederholung von kleiner 100 Einheiten angegeben. Damit kann der Rückschluss getroffen werden, dass es sich bei der verwendeten Struktur um das APP-I handelt [68].

Der etablierte Weg APP herzustellen, führt über die in der ecoinvent verfügbaren Stoffe Phosphorsäure, Ammoniak und Harnstoff, wie Abbildung 45 zeigt [69]. Für die Anzahl der wiederholenden Monomere wurde 70 Einheiten gewählt.

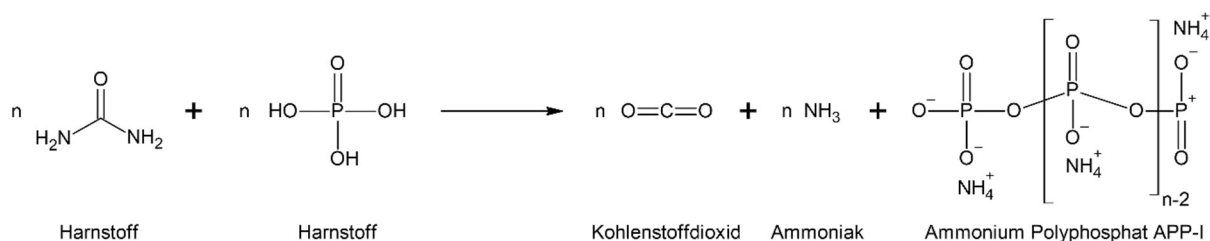


Abbildung 45: Reaktionsgleichung der Umsetzung von Ammonium Polyphosphat APP-I [69].

Über die molare Masse wird die Herstellung bezogen auf 1 kg berechnet und alle Input- und Output-ströme entsprechend umgerechnet. Mit den vorhandenen Stoffen in der ecoinvent-

Datenbank und den Proxywerten werden der Produktionsprozess und der Marktprozess erstellt.

Bisphenol-A-Diglycidylether:

Dieser Stoff wurde bereits im *Abschnitt 3.2.2.1* vollständig dargestellt und wird für die Modellierung des *GURIT SA 130FR* übernommen.

Formaldehyd-Polymer mit Epichlorhydrin und Bisphenol-A

Über diesen Stoff ist wenig bekannt, und wird auch bei der ECHA in der Liste über die Bewertung des regulatorischen Bedarfs angeführt. Unter der CAS Nummer ist nur die Information abrufbar, dass keine öffentlichen Informationen zur Verfügung stehen [70]. In dieser Analyse wird davon ausgegangen, dass es die im Text beschriebenen Substanzen zu gleichen Teilen enthalten sind.

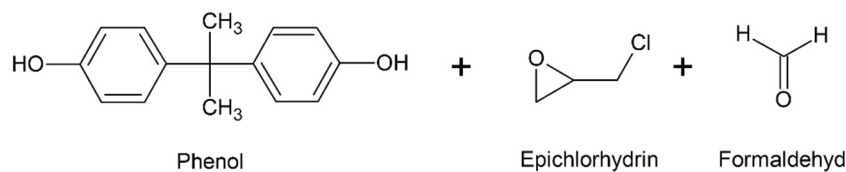


Abbildung 46: Chemische Struktur der Einzelstoffe Epichlorhydrin, Formaldehyd und Bisphenol-A

Titan (IV)-oxid:

Titandioxid wird überwiegend als Pigmentfarbe Weiß eingesetzt, da es von allen anorganischen Verbindungen den höchsten Brechungsindex besitzt. Die Herstellung erfolgt über zwei Titanerze, dem Ilmenit (FeTiO_3) und dem Rutil (TiO_2). Auch wenn Rutil chemisch bereits in der richtigen Form vorliegt, ist es für die direkte Verwendung mit anderen Stoffen verunreinigt und muss über das Chlorid-Verfahren aufgereinigt werden. Beim Ilmenit muss das Eisen, welches als Titanverbindung vorliegt im Sulfatverfahren mit Schwefelsäure zunächst aufgeschlossen und anschließend als Eisensulfatkomplex gefällt werden [71]. 2013 wurden 65 % des Titandioxids nach dem Chlorid-Verfahren hergestellt, daher wird in dieser Analyse der gleiche Wert verwendet. Ebenfalls dargestellt wird das Sulfatverfahren mit welcher die verbleibenden 35 % der Menge abdeckt [72]. Der in ecoinvent zur Verfügung stehende Marktprozess beinhaltet ein sehr ähnliches Verhältnis von 75,9 % im Sulfatverfahren und 24,1 % im Chlorid-Verfahren, welches auch in dieser Analyse direkt verwendet wird.

3.2.3 Wirkungsabschätzung LCIA

Die Auswahl der Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren erfolgte automatisiert nach Auswahl der Berechnungsmethode EF 3.1 in der Software *openLCA*. Alle 16 Kategorien wie in *Tabelle 30* wurden in der vergleichenden Bewertung eingeschlossen. Die Modellierung erfolgte anhand der Reaktionen und der daraus erzeugten Produktsysteme.

Tabelle 30: Wirkungskategorien EF 3.1 [73].

Kennwert	Symbol / Indikator	Einheit	Ziel
Versauerung	Kumulierte Überschreitung (AE)	mol H ⁺ -Äquivalent	min
Klimawandel insgesamt	Erderwärmungspotenzial (GWP100)	kg CO ₂ -Äq	min
Ökotoxizität, Süßwasser	Toxizitätsvergleichseinheit für Ökosysteme	CTU _e	min
Ressourcennutzung, fossil	Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	Krankheitsinzidenz	min
Eutrophierung, Süßwasser	Kumulierte Überschreitung (AE)	mol N-Äquivalent	min
Eutrophierung, Meer	Nährstoffanteil, der in das Süßwasser Endkompartiment gelangt (P)	kg P-Äquivalent	min
Eutrophierung, terrestrisch	Nährstoffanteil, der in das Meeres-Endkompartiment gelangt (N)	kg N-Äquivalent	min
Humantoxizität, kanzerogen	Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen	CTU _h	min
Humantoxizität, nicht kanzerogen	Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen	CTU _h	min
Ionisierende Strahlung	Wirkungsgrad der Exposition des Menschen gegenüber ²³⁵ U	kBq ²³⁵ U- Äquivalent	min
Landnutzung	Bodenqualitätsindex	Punkte (dimensionslos)	min
Ressourcennutzung, Mineralien & Metalle	Ozonabbaupotenzial (ODP)	kg FCKW-11-Äq.	min
Ozonabbau	Anstieg der Konzentration troposphärischen Ozons	g NMVOC-Äquivalent	min
Feinstaub	Abiotische Ressourcenerschöpfung – fossile Brennstoffe (ADP _{fossil})	MJ	min
Fotochemische Bildung von Ozon	Abiotische Ressourcenerschöpfung (ADP-Gesamtausbeute)	kg Sb-Äquivalent	min
Wassernutzung	Wassermangelpotenzial der Nutzer (Wasserverbrauch gewichtet nach Deprivation)	m ³ Wasser Äq. Wasserknappheit	min

3.3 Fertigung und Prüfung

Um Materialprüfungen durchführen zu können werden zunächst Lamine hergestellt, aus denen in weiterer Folge Prüfkörper in den entsprechenden Normen gefertigt werden. Wie im Kapitel,

Herstellungsverfahren, allgemein dargestellt, werden auch die Lamine mit unterschiedlichen Prozessen hergestellt. Die in dieser Arbeit eingesetzten Materialien werden entweder im Handlaminierverfahren und anschließender Aushärtung unter Vakuum oder im quasi Prepreg-Verfahren hergestellt. Maßgeblich für die Wahl des Fertigungsverfahrens für reine Harzsysteme ist die im technischen Datenblatt angegebene Viskosität bei Verarbeitungstemperatur. Die Laminatdicke wird durch die jeweilige Prüfnorm bestimmt, die Laminatgröße durch die Prüfmethode und Anzahl der Prüfkörper.

Für die Ermittlung der Biegeeigenschaften nach EN ISO 14125 der Klasse III ist eine Länge von 60 mm und eine Breite von 15 mm einzuhalten. Prüfkörper des Typs B nach EN ISO 527 erfordern eine Länge von mindestens 250 mm. Beide Normen geben eine Plattendicke von 2 mm vor und werden wie in *Abbildung 47* dargestellt gemeinsam gefertigt.

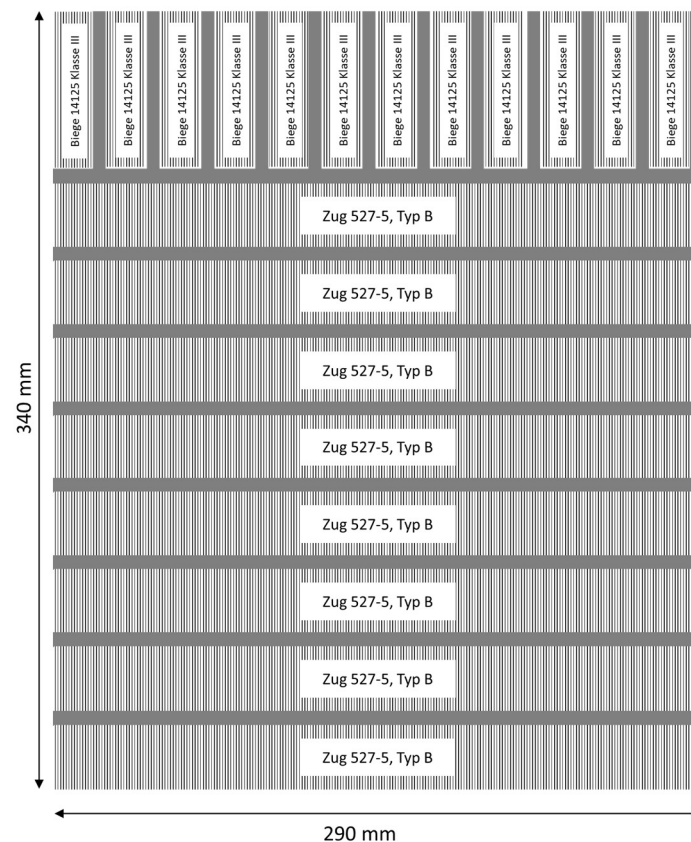


Abbildung 47: Plattengröße mit den darauf eingezeichneten Prüfkörpern EN ISO 14125 Klasse III und EN ISO 527 Typ B

Die Prüfkörper für die Zugprüfungen gemäß EN ISO 527 Typ A werden, wie in *Abbildung 48* dargestellt mit einer Plattenstärke von 1 mm gefertigt.

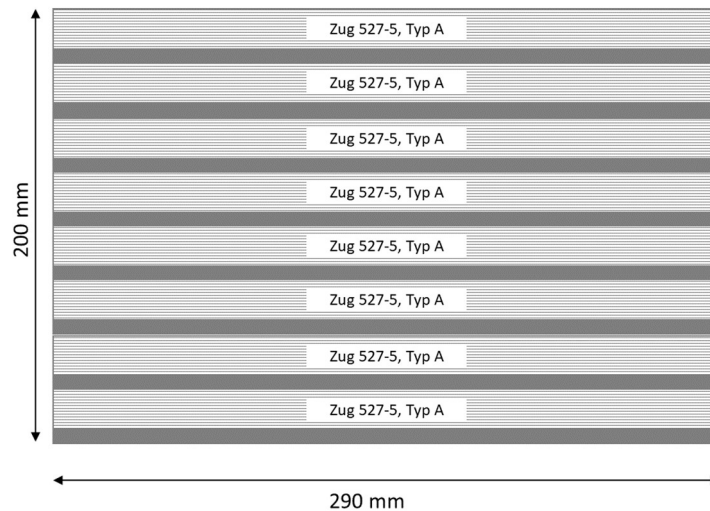


Abbildung 48: Plattengröße mit den darauf eingezeichneten Prüfkörpern EN ISO 527 Typ A

Für beide Herstellungsverfahren werden als Formwerkzeuge Stahlplatten mit einer Größe von 500 mm x 500 mm verwendet, dessen umlaufender Randbereich (ca. 50 mm) für die Siegelung des Vakuumaufbaus vorgesehen ist. Um die Lamine nach dem Aushärtvorgang von den Platten lösen zu können, müssen diese mit einem Trennmittel behandelt werden. Dazu wird das wasserbasierende System der Firma ChemTrend laut deren Verarbeitungshinweisen verwendet. Auf die Abfolge des Auftrags und die Abluftzeiten der unterschiedlichen Chemikalien sind dabei für eine gute Trennwirkung strikt einzuhalten [74–76]. Die nachfolgende *Tabelle 31* zeigt die verwendeten Matrixsysteme mit eingesetzten Fasern und den unterschiedlichen Verarbeitungsverfahren.

Tabelle 31: Übersicht der verarbeiteten Harz- und Fasertypen

Harz	Fasertyp	Bezeichnung lt. LDS	Verarbeitung	Produktbezeichnung	Hersteller	Flächengewicht der Faser
EP	Glas	RoSto-SIC-GF	Handlaminieren	SR FireGreen 37 + SD8202	SICOMIN	1.182 g/m ²
		RoSto-GUR-GF	Prepreg	Sprint SA-130FR	GURIT	
EP	Flax	RoSto-SIC-FF	Handlaminieren	SR FireGreen 37 + SD8202	SICOMIN	280 g/m ²
		RoSto-GUR-FF	Prepreg	Sprint SA-130FR	GURIT	

Mit Hilfe des Flächengewichts und der Faserdichte aus den technischen Produktblättern der unterschiedlichen Fasermaterialien, sowie einer Annahme für den Faservolumengehalt lässt sich die Laminatdicke mit der Formel (2) berechnen. Für das Handlaminat wurde ein Faservolumengehalt von 43 % angenommen. Anschließend lässt sich mit der Laminatstärke

des Gesamtlaminats das Volumen berechnen und mit dem Faservolumengehalt kann die benötigte Harzmenge berechnet werden.

$$\text{Laminatstärke} = \frac{\text{Flächengewicht pro Lage}}{\text{Faserdichte} * \text{Faservolumenanteil}} * \text{Anzahl der Lagen} \quad (2)$$

Der Aufbau erfolgte für die 2 mm-Platten mit Flaxfaser wie in *Abbildung 49* dargestellt direkt auf das Werkzeug und an der zum Werkzeug abgewandten Seite direkt zur Vakuumfolie. Hingegen bei den 1 mm-Platten zusätzlich auf der Unter- und Oberseite, wie in *Abbildung 50* dargestellt, ein Abreißgewebe eingelegt wurde. Dies ist damit begründet, dass bei Zugprüfungen die Notwendigkeit von Aufleimern gegeben sein kann, und durch die daraus entstehende raue Oberfläche ein zusätzliches Anschleifen der Prüfkörper vermieden werden kann.

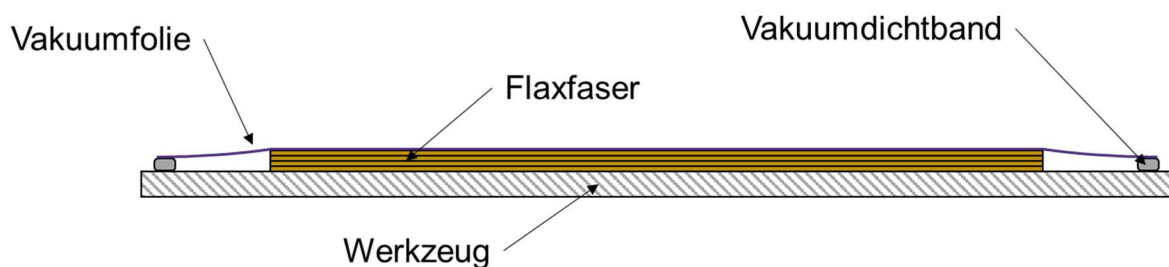


Abbildung 49: Schematischer Laminataufbau in der Stärke 2 mm mit Flaxfaser (braun), Vakuumfolie (lila) und Dichtband (grau) auf Stahlplatte.

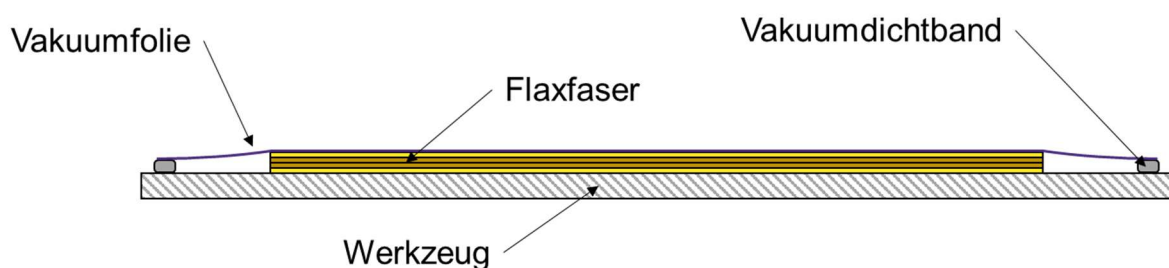


Abbildung 50: Schematischer Laminataufbau in der Stärke 1 mm mit Flaxfaser (braun), Abreißgewebe (gelb), Vakuumfolie (grün) und Dichtband (grau) auf Stahlplatte.

Das verwendete Epoxidharzsystem von Sicomin besteht aus der Harzkomponente *SR FireGreen 37* und dem langsamen Härter *SD8202*. Die Viskosität liegt zwischen 2.100 mPa.s (20 °C) und 730 mPa.s (30 °C) und wird demzufolge nur im Handlaminierverfahren verarbeitet.

Das Harzsystem wird im Mischungsverhältnis 100:20 (Gewicht) Harz zu Härter in einem Harzbecher eingewogen und 5 Minuten mit einem Spatel sorgfältig verrührt. Mit einem Pinsel

wird das Harz auf das Abreißgewebe bzw. direkt auf die Faserlagen aufgetragen bis dieses vollständig durchtränkt ist. Gleiches erfolgt mit dem weiteren Lagenaufbau, bis abschließend ggf. noch eine Lage Abreißgewebe aufgebracht wird. Der Aufbau wird mit einem Vakuumsack und einem Siegelband verschlossen und durch eine Vakuumdurchführung evakuiert. Die Aushärtung erfolgt bei Raumtemperatur (ca. 25 °C) für 24 h und anschließender Wärmebehandlung bei 60 °C für 16 h [77]. Die Aufbauten mit der Flaxfaser sind in *Abbildung 51* und jene mit Glasfaser in *Abbildung 52* dargestellt.



Abbildung 51: Aufbau im Handlaminierverfahren mit Flaxfasern *Bcomp ampliTex™ 5025* und *Sicomini SR FireGreen 37 + SD8202*



Abbildung 52: Aufbau im Handlaminierverfahren mit Glasfaser *Seartex U-E-1182g/m²-1270mm* und *Sicomini SR FireGreen 37 + SD8202*

Die Verarbeitung des Epoxidsystems von *GURIT* erfolgt im „quasi“ Prepregverfahren, da dieses System als Reinharzfilm vorliegt. Die Materialzuschnitte des Harzfilms entsprechen der berechneten Menge des benötigten Harzes zur Trennung der Fasern.

Um überschüssiges Harz aufzunehmen wurde der Aufbau wie in *Abbildung 53* dargestellt an der Oberseite mit einem Vlies bedeckt. Der fertige Aufbau mit Glasfasermaterial ist in *Abbildung 54* dargestellt. Die Herstellung mit Flaxfaser ist analog dazu und wird nicht gesondert dargestellt. Die einzelnen Lagen des Harzfilms und der Faser werden gemäß den Aufbauten abgelegt und mit einer Handrolle auf das Formwerkzeug angedrückt. Die Aushärtung erfolgt für 6 bei 85 °C [78].

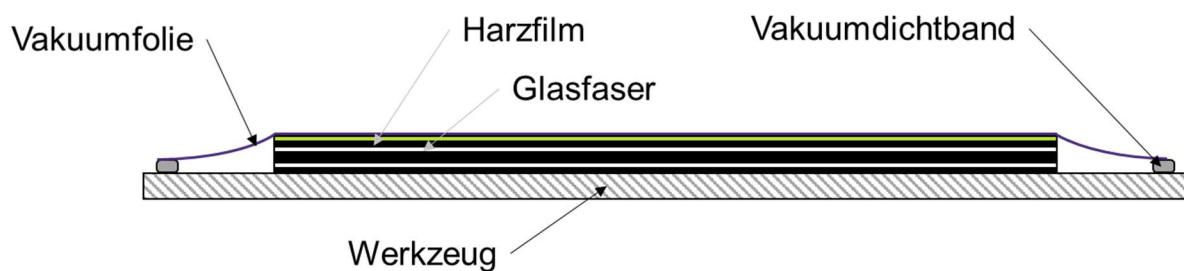


Abbildung 53: Schematischer Laminataufbau in der Stärke 2 mm mit Glasfaser (weiß), Harzfilm (schwarz), Vlies (grün), Vakuumfolie (lila) und Dichtband (grau) auf Stahlplatte.



Abbildung 54: Aufbau im „quasi“ Prepregverfahren mit Glasfaser *Seartex U-E-1182g/m²-1270mm* und *GURIT SA-130FR*

Nach dem Aushärtezyklus und der Entformung wurden die Platten mit einer Säge besäumt und der Bereich der Prüfkörper eingezeichnet. Zusätzlich wurde eine V-Form eingezeichnet um im Fall von Abweichungen bei der Prüfung gegebenenfalls einen Rückschluss zur Platte

bzw. zur Fertigung ziehen zu können (siehe *Abbildung 55*). Die Platte wurde gewogen und jede Seitenlänge wurde abgemessen. Mit dem eingesetzten Flächengewicht je Fasertyp wurde der tatsächliche Faservolumengehalt berechnet, wie im Anhang C angeführt.

Anschließend wurden die Prüfkörper für der Klasse III nach DIN EN ISO 14125 aus den Platten zugeschnitten und fortlaufend mit der Probennummer wie in *Abbildung 56* gezeigt beschriftet. Die Prüfungen in Zugrichtung in und quer zur Faser nach DIN ISO 527 wurden aus Kapazitätsgründen nicht durchgeführt.

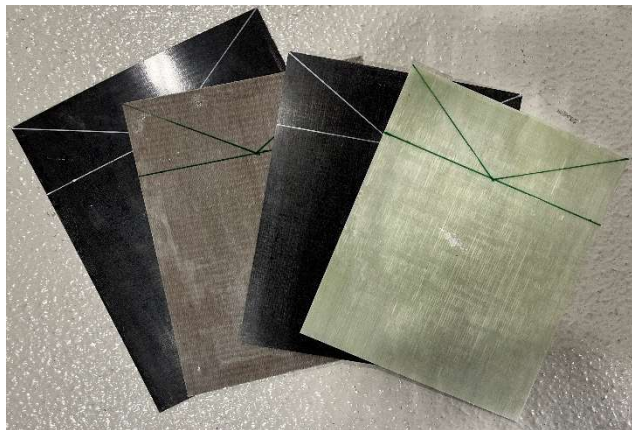


Abbildung 55: Ausgehärtete und besäumte Faserverbundplatten mit Markierung



Abbildung 56: Beschriftete Probenkörper nach DIN EN ISO 14125 Klasse III am Beispiel Sicomin Harz mit Glasfaser

Bevor Dreipunkt-Biegeprüfungen durchgeführt werden können, ist es notwendig, dass die Prüfkörper vermessen werden. Die nachfolgenden *Tabelle 32*, *Tabelle 33* und *Tabelle 34* zeigen beispielhaft die notwendigen Messungen in Länge, Breite und Höhe.

Tabelle 32: Beispielhafte Darstellung der Messungen der Prüfkörperhöhe (Prüfkörperdicke) im Vermessungsprotokoll

Probennummer	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	h Mittelwert [mm]	Max. Abweichung von h Mittelwert
RoSto-GF-SIC-3PB-01	2,01	1,97	1,93	1,97	0,041
RoSto-GF-SIC-3PB-02	2,04	1,95	1,93	1,98	0,067
RoSto-GF-SIC-3PB-03	1,92	1,95	2,03	1,97	0,061
RoSto-GF-SIC-3PB-xx	...	...	...	...	...

Tabelle 33: Beispielhafte Darstellung der Messungen der Prüfkörperbreite im Vermessungsprotokoll

Probennummer	b1 [mm]	b2 [mm]	b3 [mm]	b Mittelwert [mm]	Max. Abweichung von b Mittelwert
RoSto-GF-SIC-3PB-01	15,02	15,00	15,00	15,01	0,013
RoSto-GF-SIC-3PB-02	14,98	14,97	14,98	14,98	0,008
RoSto-GF-SIC-3PB-03	15,04	15,04	15,03	15,04	0,006
RoSto-GF-SIC-3PB-xx	...	...	...	...	...

Tabelle 34: Beispielhafte Darstellung der Messungen der Prüfkörperlänge im Vermessungsprotokoll

Probennummer	l [mm]
RoSto-GF-SIC-3PB-01	82,3
RoSto-GF-SIC-3PB-02	82,3
RoSto-GF-SIC-3PB-03	82,3
RoSto-GF-SIC-3PB-xx	...

An der Prüfmaschine *Zwick 1484* werden je nach Prüfkörperlänge die Stützweiten zwischen den Auflagern unter Berücksichtigung dessen Radien mit einem Urmaß eingestellt und fixiert. Nach dem in der *Abbildung 57* dargestellten Vorgang werden die geometrischen Werte in die Software der Prüfmaschine je Probennummer eingetragen und der Prüfvorgang wird gestartet.

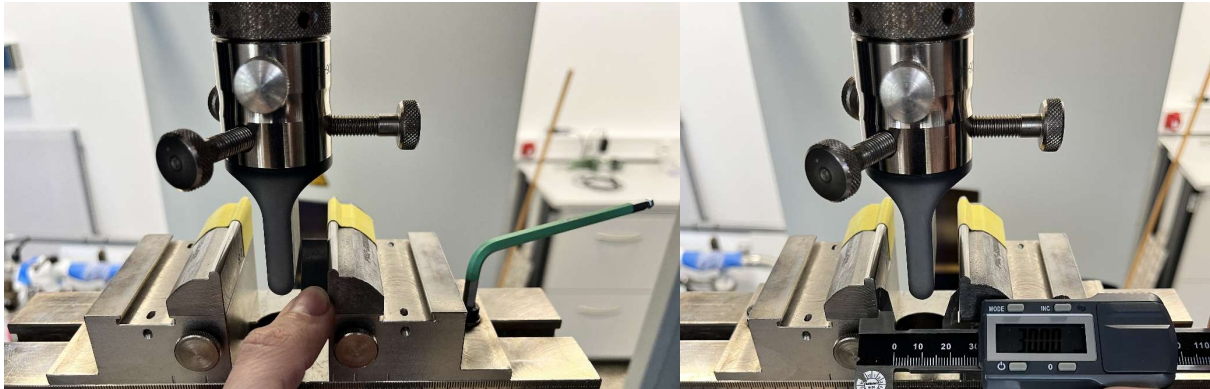


Abbildung 57: Einstellvorgang der Prüfvorrichtung für den Dreipunktbiegeversuch gemäß DIN EN ISO 14125

Die Prüfmaschine verfährt den Prüfstempel an die Probe, bis die Kraft von 5 N erreicht wurde. Danach startet der eigentliche Prüfvorgang. Dieser läuft so lange, bis ein ausreichendes Versagen durch Abfall der Kraft eintritt oder er durch den Prüfer abgebrochen wird. Ein exemplarischer Prüfvorgang wird in der *Abbildung 58* gezeigt.



Abbildung 58: Darstellung der Dreipunktbiegeprüfung gemäß DIN EN ISO 14125, links bei Prüfbeginn, rechts bei Prüfende durch Versagen

Da bei allen Prüfkörpern größere Durchbiegungen ($> 0,1 L$) aufgetreten sind, muss die Biegespannung laut der Norm mit der Formel (3) gesondert berechnet werden. Die Dehnung muss ebenfalls mit der korrigierten Formel (4) ermittelt werden.

$$\sigma_f = \frac{3F \cdot L}{2b \cdot h^2} \left\{ 1 + 6 \left(\frac{s}{L} \right)^2 - 3 \frac{s \cdot h}{L^2} \right\} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{h}{L} \left\{ 6 \frac{s}{L} - 24,37 \left(\frac{s}{L} \right)^3 + 62,17 \left(\frac{s}{L} \right)^5 \right\} \quad (4)$$

- s ... Durchbiegung der Balkenmitte, (mm)
- σ_f ... Biegespannung, (MPa)
- F ... Kraft, (N)
- L ... Stützweite, (mm)
- h ... Dicke des Probekörpers, (mm)
- b ... Breite des Probekörpers, (mm)

Die Angaben zur Biegefestigkeit beziehen sich auf den Faser-Matrix-Verbund mit einem bestimmten Faservolumengehalt. Dieser wird durch das Flächengewicht und die geometrischen Abmessungen der gefertigten Platten ermittelt.

3.4 Gegenüberstellung ökologischer und mechanischer Materialparameter

Für die Darstellung bzw. Gegenüberstellung von verschiedenen Eigenschaften von Materialien wurde auf die Methode von Oliveira et al. herangezogen. Dabei wird auf eine Multi-Kriterien-Entscheidungsanalyse wie beispielsweise AHP oder TOPSIS verzichtet. Mit der Begründung, dass diese sehr aufwendig umzusetzen sind. Die Matrix von Oliveira et. al. bietet einen gesamtheitlichen Überblick über alle Materialeigenschaften, die für einen Vergleich herangezogen werden sollen. Die Eigenschaften werden in nachfolgende Kategorien eingeteilt und die jeweiligen Kennzahlen darunter dargestellt:

- **X1 Mechanische Eigenschaften**
z. B. Festigkeit, Modul, Dehnung
- **X2 Thermische Eigenschaften**
z. B. Glasübergangstemperatur, Wärmeformbeständigkeit
- **X3 Physikalische Eigenschaften**
z. B. Dichte
- **X4 Kosten**
z. B. Materialkosten
- **X5 Dielektrische Eigenschaften**
z. B. elektrische Durchschlagsfestigkeit
- **X6 Ökologische Eigenschaften**
z. B. CO₂-Fußabdruck

Alle Eigenschaften in einer Kategorie werden auf einer Skala normiert und anschließend in einer prozentuellen Wertung gegenübergestellt. Der Maximalwert bildet dabei die 100 % Obergrenze und alle anderen Werte nehmen zu diesem Höchstwert Bezug. Zu unterscheiden ist zwischen maximierenden und minimierenden Kennzahlen. Beispielsweise müssen Festigkeitswerte ein Maximum erreichen, Umweltauswirkungen hingegen ein Minimum [8].

4 Ergebnisse

4.1 Ökologische Kennwerte

4.1.1 Auswertung

Für die Darstellung der Ergebnisse der Ökobilanz wurde auf eine Gewichtung verzichtet, da alle Werte gleichermaßen verglichen werden. Jedoch wäre eine Gewichtung je nach Priorität einfach umzusetzen. Die *Abbildung 59* zeigt die Datenbankwerte der in ecoinvent enthaltenen Harze als Proxywerte. Ebenfalls im Vergleich sind die modellierten Harze aus den Inhaltsstoffen der Sicherheitsdatenblätter, *Gurit SA140FR* und *Sicomins FR FireGreen* Harz. Da die Proxyharze ohne Härter modelliert sind wurde auch beim System des Sicomins die Härterkomponente ausgeschlossen. Dies ist auch ein möglicher Grund, warum teilweise höhere Werte beim Gurit System vorzufinden sind. Bei diesem Harzfilm sind im Sicherheitsdatenblatt alle Chemikalien zusammen angegeben und eine eindeutige Identifizierung des Härteranteils ist nicht möglich. Vergleicht man jedoch die Epoxidharze Sicomins FireGreen mit dem Proxy Epoxid, sind die meisten Indikatoren beim Sicomins niedriger und folglich ökologisch sinnvoller. Beim Indikator Klimawandel schneidet das Proxy-System jedoch deutlich besser ab.

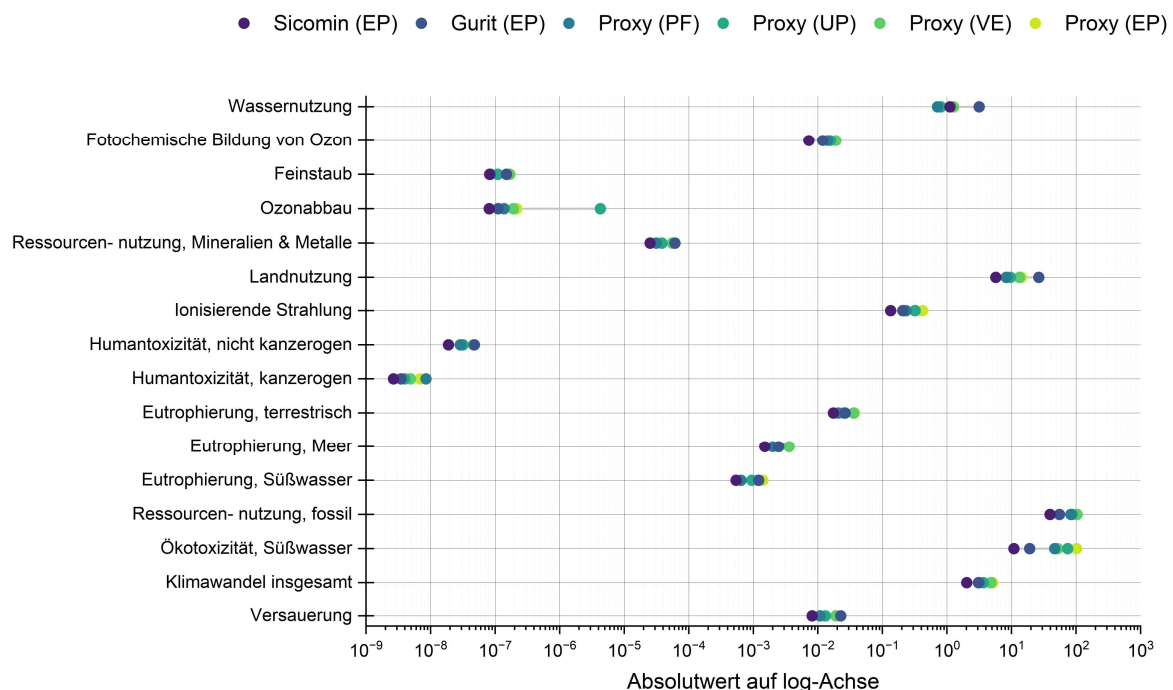


Abbildung 59: Vergleich der 16 Wirkindikatoren in absoluten Werten von Proxyharzsystemen mit modellierten Epoxidharzen auf logarithmischer X-Achse.

Es sei erwähnt, dass die logarithmische Darstellung der Werte den Vorteil einer Einteilung in Bereiche erlaubt. Die logarithmische Skala erlaubt die Einteilung von Absolutwerten in verschiedene Bereiche, bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass negative Werte nicht angezeigt werden. Vergleicht man also Systeme, in denen ein Indikator eine ökologisch positive Wirkung zeigt, muss das Diagramm in einer anderen Skala aufgetragen werden. Eine Möglichkeit zeigt *Abbildung 60*, bei der alle Werte in Relation zur Gruppe gesetzt werden. Der niedrigste Wert bildet das Minimum von 0 % und der höchste Wert das Maximum von 100 %. Der Nachteil dieser Darstellung ist, dass Werte, die sehr nah aneinander liegen teilweise oder ganz überdeckt werden.

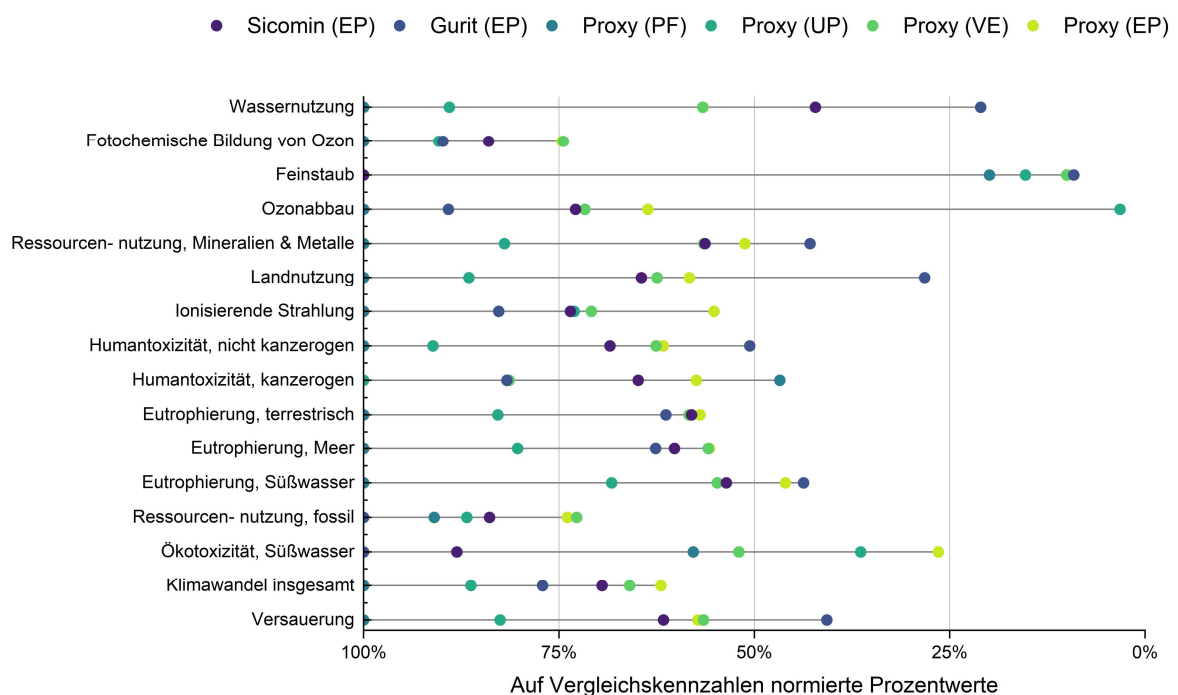


Abbildung 60: Vergleich der 16 Wirkindikatoren in normierten Prozentwerten von Proxyharzsystemen mit modellierten Epoxidharzen auf logarithmischer X-Achse.

Da das Sicomin-System sehr gute und das Gurit System ausreichend gute ökologische Werte zeigte, wurden diese vollständig modelliert. Zusätzlich zu dem bereits dargestellten System wurde das Fasermaterial, Glasfaser und Flaxfaser, im Modell ergänzt. Ebenfalls wurde für das Sicomin-System die Härterkomponente ergänzt. In der in *Abbildung 61* dargestellten Analyse zeigt sich, dass der Einfluss der Härterkomponente groß ist und in vielen Indikatoren das Gurit-System das Sicomin-System in der ökologischen Performance übertrifft. Ein weiterer zu beobachtender Einfluss ist jener des Fasertyps. So zeigen Indikatoren, die eine landwirtschaftliche Nutzung vermuten lassen bei Flaxfasern einen schlechteren Wert. Hingegen unter anderem Indikatoren wie Humantoxizität, Ressourcenverbrauch und Klimawandel ökologisch besser abschneiden. Dieser Unterschied ist vor allem bei Verwendung der Gurit-Matrix zu beobachten, da der schlechte Einfluss der Härterkomponente jene positiven Aspekte der Flaxfaser überdeckt.

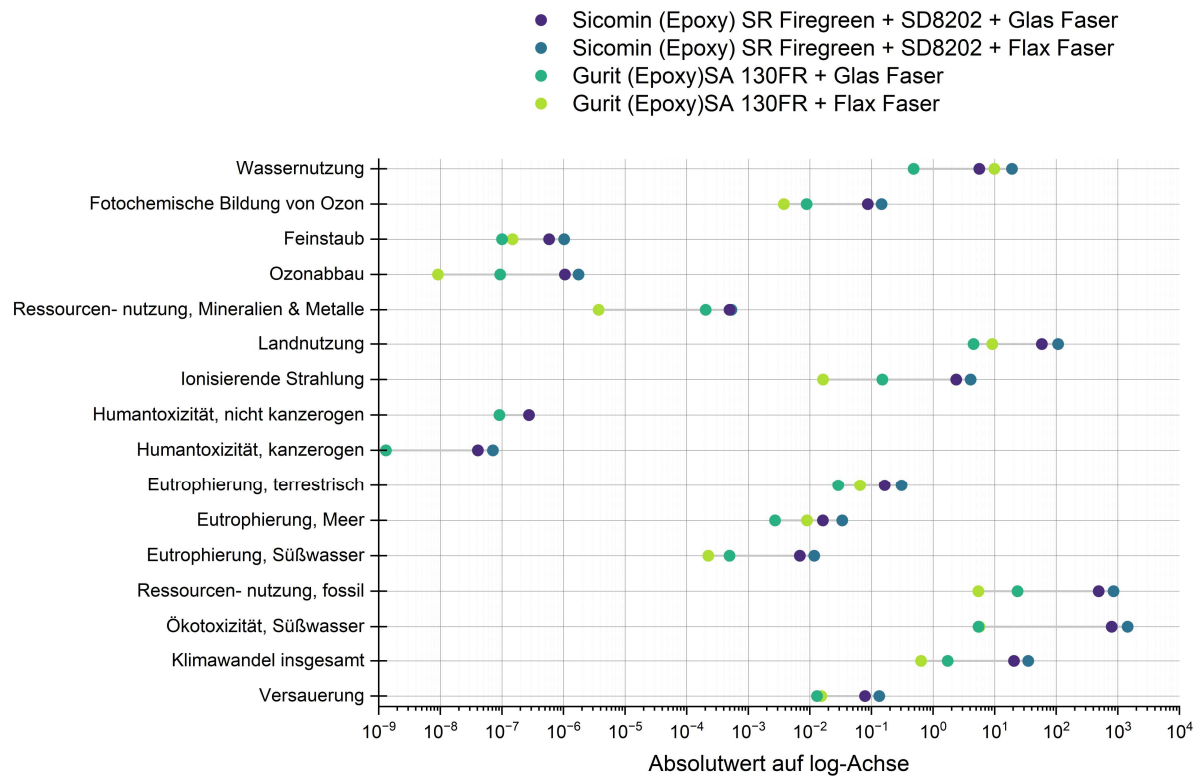


Abbildung 61: Vergleich der 16 Wirkindikatoren in absoluten Werten von modellierten FVK mit unterschiedlichen Matrix- und Fasermaterialien.

Da in der kanzerogenen und nichtkanzerogenen Humantoxizität zwei Indikatoren mit ökologisch positiven Werten dargestellt werden müssen, kann die logarithmische Darstellung wie in der *Abbildung 61* nur bedingt verwendet werden. *Abbildung 62* zeigt erneut die zueinander normierte prozentuelle Darstellung der analysierten Modelle. Die Reihenfolge ist identisch mit jener aus *Abbildung 61*. Nun werden aber auch die beiden Werte der Humantoxizität angezeigt.

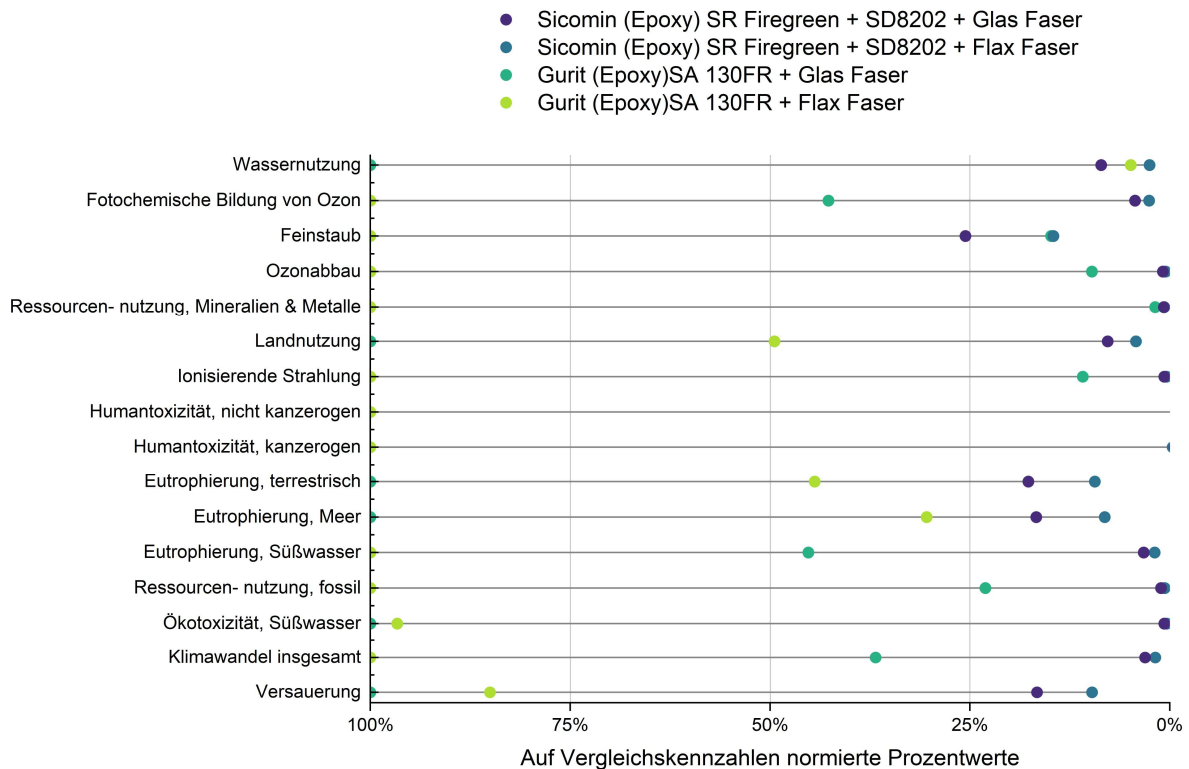


Abbildung 62: Vergleich der 16 Wirkindikatoren in normierten Prozentwerten von modellierten FVK mit unterschiedlichen Matrix- und Fasermaterialien.

4.2 Mechanische Kennwerte

Die Ergebnisse des Dreipunktbiegeversuchs sind in *Abbildung 63* dargestellt. Es ist ein deutlicher Vorteil der Glasfaser gegenüber der Flaxfaser zu sehen. Die Vergleiche auf Matrixebene fallen hingegen unterschiedlich aus. So sind die Biegefestigkeitswerte der Flaxfaser mit Gurit etwas besser als mit dem Sicomin. Dieser Unterschied ist bei der Verwendung genau umgekehrt und deutlicher. Eine Erklärung ist, dass die Durchtränkung der Glasfaser wesentlich schlechter ist, als bei Flaxfaser und sich dies bei der Verwendung des Gurit Harzfilm noch deutlicher zeigt. Die hohe Standardabweichung wird dadurch erklärt, dass die Probekörper mit Glasfasern öfter zu Delaminationsversagen neigen, wie in der *Abbildung 64*.

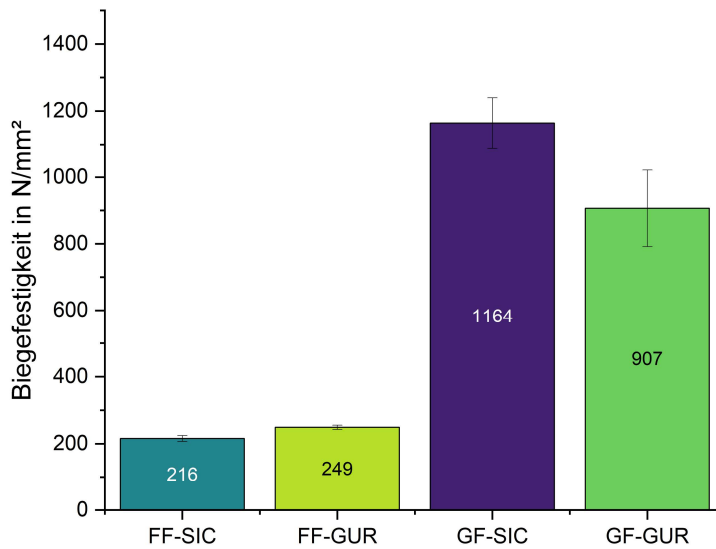


Abbildung 63: Vergleich der Biegefestigkeiten unterschiedlicher Faser-Matrix-Kombinationen nach dem Dreipunktbiegeversuch (FF=Flaxfaser, GF=Glasfaser).

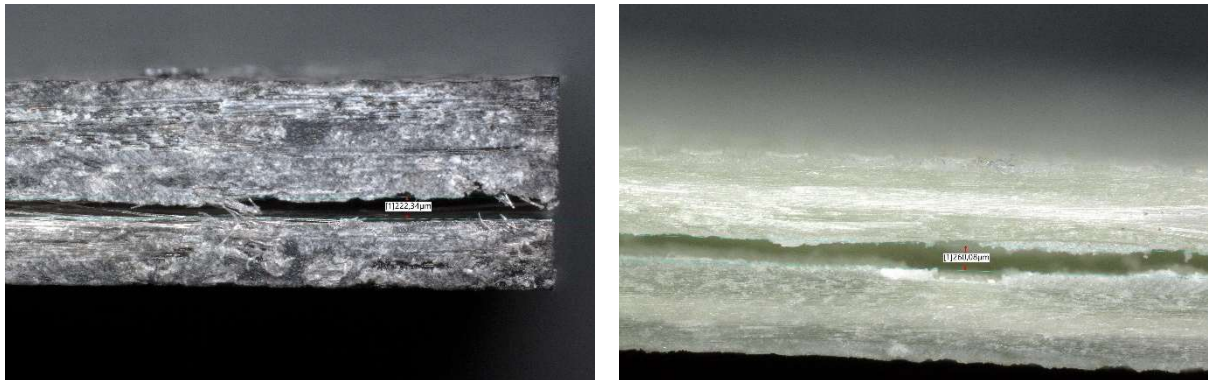


Abbildung 64: Delamination der Prüfkörper, links: Glasfaser + Gurit, rechts: Glasfaser + Sicomin

Die Biegemodule folgen, wie in *Abbildung 65* dargestellt, den Werten jener der Datenblätter und sowohl bei der Flaxfaser als auch bei der Glasfaser ist die ermittelte Kennzahl in Kombination mit dem Gurit Epoxidharz am höchsten. Diese klare Tendenz wird damit begründet, dass das E-Modul im kleinen elastischen Bereich des Dreipunktbiegeversuchs ermittelt wird und somit keine Versagenseinflüsse auftreten.

Weitere mechanische Materialprüfungen wurden aus Kapazitätsgründen nicht durchgeführt. Zu empfehlen sind jedenfalls Zugprüfungen in und quer zur Faser gemäß der in *Abschnitt 2.3* beschriebenen Norm. Die berechnete Faservolumengehalt der vier Probenplatten ist in Tabelle 35 angeführt.

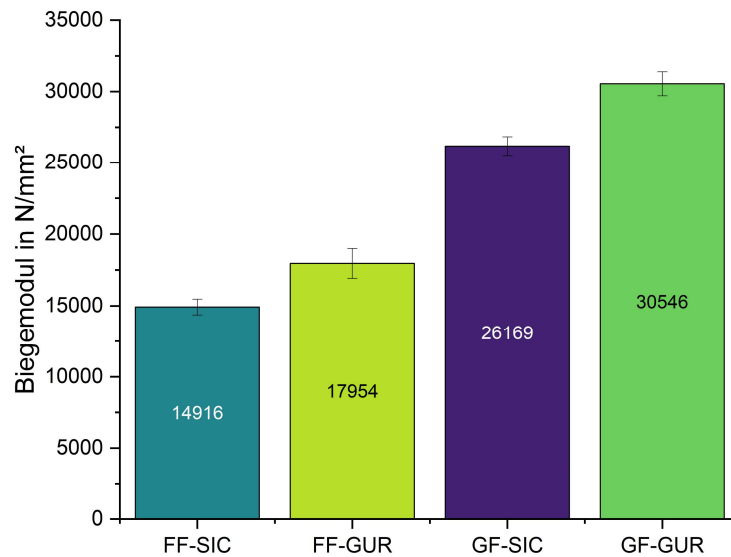


Abbildung 65: Vergleich der (Biege-) E-Module unterschiedlicher Faser-Matrix-Kombinationen nach dem Dreipunktbiegeversuch (FF=Flaxfaser, GF=Glasfaser).

Tabelle 35: Faservolumengehalt der hergestellten FVK-Platten

	Faservolumengehalt
FF-SIC	41,77 %
FF-GUR	44,45 %
GF-SIC	53,28 %
GF-GUR	54,29 %

4.3 Gesamtheitliche Bewertung

Die in *Abbildung 66* dargestellte Kombination von mechanischen und ökologischen Kennwerten zeigt beim Vergleich mit den Proxywerten, dass das Sicomin in den mechanischen am niedrigsten, dafür in den ökologischen Kennwerten am höchsten bewertet wird. Auch in dieser Analyse ist zu beachten, dass die Härterkomponente noch nicht berücksichtigt wurde, um den Vergleich zu den Proxywerten zu wahren. Weiters zu erwähnen ist ebenfalls, dass mechanische Eigenschaften auch von der Wahl des Härters abhängig sind und die angegebenen Proxywerte gemittelte Literaturwerte darstellen.

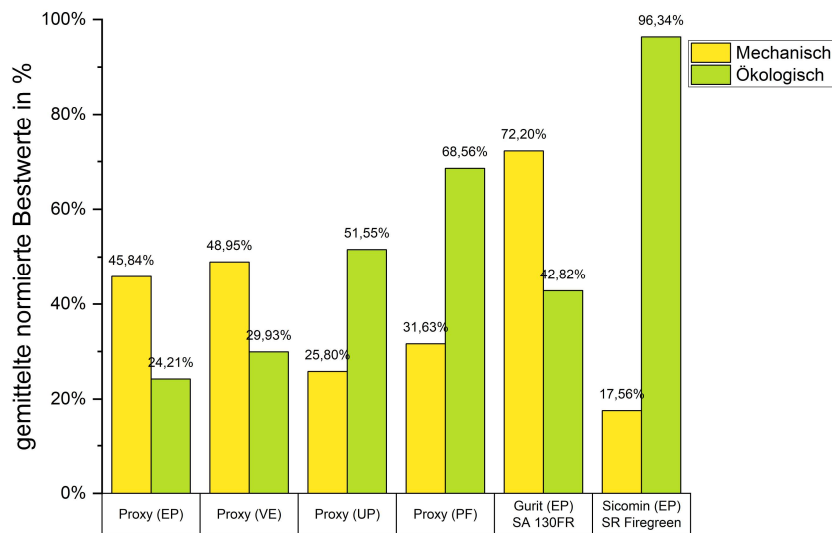


Abbildung 66: Vergleich der zueinander normierten mechanischen und ökologischen Kennwerte von ecoinvent-Proxywerten und Datenblatt-Werten

Werden die Verbundstrukturen wie in *Abbildung 67* gezeigt miteinander verglichen, werden in den Modellen die Fasern ergänzt und beim Sicomin-System die Härterkomponente. Hier zeigt sich nun deutlich, dass der Einsatz von Flaxfasern die mechanischen Kennwerte dramatisch sinken lässt und nur einen kleinen ökologischen Einfluss zeigt.

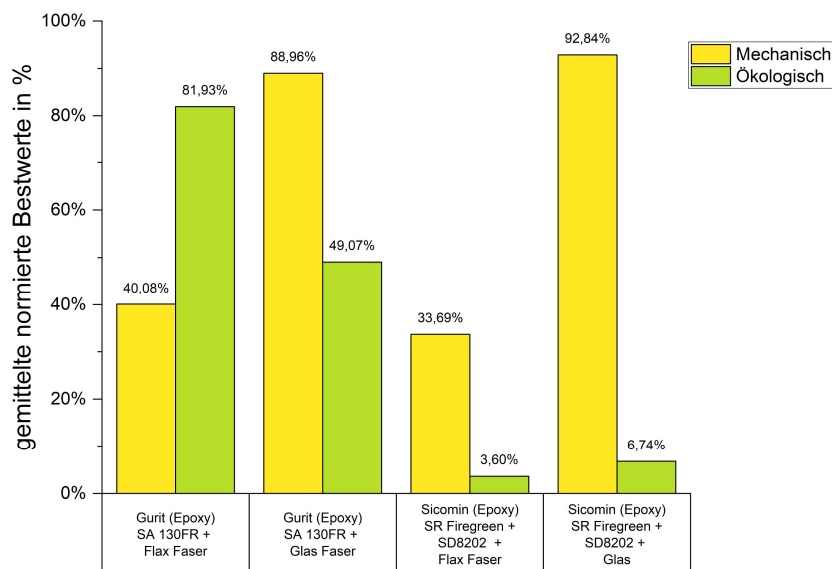


Abbildung 67: Vergleich der zueinander normierten mechanischen und ökologischen Kennwerte von ermittelten Werten.

Diese Darstellung zeigt nur gemittelte Werte über die Bereiche der mechanischen oder ökologischen Kennwerte und ermöglicht keinen detaillierten Einblick auf die dahinterliegenden

Daten zu. Daher wurde die Methode von Oliveira et. al. verwendet und die Daten der Ökobilanz ergänzt. In Abbildung 68 sind die Proxywerte und die beiden Epoxidharze dargestellt. Diese Matrixdarstellung erlaubt einen schnellen Vergleich von mechanischen Kennwerten (X1) und ökologischen Kennwerten aus der Ökobilanz (X6). Die zusätzliche Bezeichnung der Kategorien mit einem „X“ wurde von der Methode nach Oliveira et. al. beibehalten. Die Parameter können jedoch beliebig ergänzt werden. Zu Darstellungszwecken wurden Literaturwerte bzw. Werte aus den technischen Datenblättern der Systeme Gurit und Sicomin ergänzt. Ein thermischer Parameter ist die Glasübergangstemperatur, ein physikalischer Wert die Dichte und ein weiterer Wert könnte zum Beispiel der Preis sein.

Abbildung 68 zeigt, dass das reine Harz von Sicomin eine sehr gute ökologische Wirkung hat, mechanische Kennwerte jedoch gering sind. Hingegen bilden bis auf den Indikator der Klimawirkung alle Werte des Proxy-Epoxids das Minimum. Bei der Darstellung der Faserverbundplatten in *Abbildung 69*, zeigt sich, dass sowohl die mechanischen als auch die ökologischen Kennzahlen der Faser-Matrix-Kombination, Flaxfaser mit Sicomin, das Minimum bilden. Sowohl die Kombination Flaxfaser mit Gurit als auch Glasfaser mit Gurit befinden sich im obersten ökologischen Bereich, hingegen konnte mechanisch die Flaxfaser nur geringe Werte bei der Materialprüfung erzielen. Die verwendeten Formeln sind in Anhang C angeführt.

Bereich	Kennwert	Symbol/Wirkungsindikator	Einheit	Ziel	Harztyp											
					Epoxy Proxy		Vinylester Proxy		Unsaturated Polyester Proxy		Phenolic Proxy		Gurit (Epoxy) SA 130FR		Sicomini (Epoxy) SR Firegreen	
XX	Gesamtbewertung gemittelte normierte Bestwerte				65,9%		62,1%		41,5%		81,9%		57,4%		52,5%	
X1	Mechanisch gemittelte normierte Bestwerte				72,8%		65,3%		63,3%		51,7%		82,4%		52,4%	
X1.1	Zug E-Modul	E _T	MPa	max	2979	57%	3529	68%	3900	75%	4000	77%	5200	100%	4000	77%
X1.2	Zugfestigkeit	σ _T	MPa	max	85	97%	88	100%	80	91%	34,5	39%	45	51%	27	31%
X1.3	Biege E-Modul	E _F	MPa	max	2550	48%	3100	58%	3600	68%			5300	100%	3700	70%
X1.4	Biegefestigkeit	σ _c	MPa	max	120	94%	128	100%	105	82%	86	68%	77	60%	54	42%
X1.5	Druckfestigkeit	σ _c	MPa	max	125	68%					137,9	75%	185	100%	78	42%
X2	Thermisch gemittelte normierte Bestwerte				36,7%		60,8%		30,4%		100,0%		11,4%		0,0%	
X3	Physikalisch gemittelte normierte Bestwerte				100,0%				0,0%		87,3%		74,6%		88,7%	
X6	Ökologisch EF 3.1-Indikatoren gemittelte Bestwerte				54,2%		60,2%		72,1%		88,5%		61,3%		68,9%	
X6.1	Versauerung	Kumulierte Überschreitung (AE)	mol H ⁺ -Äquivalent	min	1,88E-02	57%	1,90E-02	57%	1,30E-02	83%	1,08E-02	100%	2,64E-02	41%	1,75E-02	62%
X6.2	Klimawandel insgesamt	Erdenwärmepotenzial (GWP100)	kg CO ₂ -Äq	min	5,09E+00	62%	4,78E+00	66%	3,66E+00	86%	3,15E+00	100%	4,09E+00	77%	4,54E+00	69%
X6.3	Ökotoxizität, Süßwasser	Toxizitätsvergleichseinheit für Ökosysteme	CTU _e	min	1,02E+02	26%	5,18E+01	52%	7,40E+01	36%	4,66E+01	58%	2,69E+01	100%	3,06E+01	88%
X6.4	Ressourcennutzung, fossil	Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	Krankheitsinzidenz	min	1,02E+02	74%	1,04E+02	73%	8,69E+01	87%	8,29E+01	91%	7,54E+01	100%	8,99E+01	84%
X6.5	Eutrophierung, Süßwasser	Kumulierte Überschreitung (AE)	mol N-Äquivalent	min	1,40E-03	46%	1,18E-03	55%	9,44E-04	68%	6,44E-04	100%	1,47E-03	44%	1,20E-03	54%
X6.6	Eutrophierung, Meer	Nährstoffanteil, der in das Süßwasser Endkompartiment gelangt (P)	kg P-Äquivalent	min	3,58E-03	56%	3,57E-03	56%	2,49E-03	80%	2,00E-03	100%	3,19E-03	63%	3,31E-03	60%
X6.7	Eutrophierung, terrestrisch	Nährstoffanteil, der in das Meeres-Endkompartiment gelangt (N)	kg N-Äquivalent	min	3,67E-02	57%	3,58E-02	58%	2,52E-02	83%	2,09E-02	100%	3,41E-02	61%	3,60E-02	58%
X6.8	Humantoxizität, kanzerogen	Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen	CTU _h	min	6,90E-09	57%	4,87E-09	81%	3,96E-09	100%	8,47E-09	47%	4,85E-09	82%	6,10E-09	65%
X6.9	Humantoxizität, nicht kanzerogen	Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen	CTU _h	min	4,68E-08	62%	4,61E-08	63%	3,17E-08	91%	2,89E-08	100%	5,71E-08	51%	4,22E-08	68%
X6.10	Ionisierende Strahlung	Wirkungsgrad der Exposition des Menschen gegenüber ²²⁶ Ra	kBq ²²⁶ Ra-Äquivalent	min	4,19E-01	55%	3,26E-01	71%	3,16E-01	73%	2,31E-01	100%	2,79E-01	83%	3,14E-01	74%
X6.11	Landnutzung	Bodenqualitätsindex	Punkte (dimensionslos)	min	1,42E+01	58%	1,33E+01	62%	9,57E+00	87%	8,28E+00	100%	2,93E+01	28%	1,28E+01	64%
X6.12	Ressourcennutzung, Mineralien & Metalle	Ozonabbaupotenzial (ODP)	kg FCKW-11-Äq.	min	6,12E-05	51%	5,55E-05	56%	3,82E-05	82%	3,13E-05	100%	7,31E-05	43%	5,56E-05	56%
X6.13	Ozonabbau	Anstieg der Konzentration troposphärischen Ozons	g NMVOC-Äquivalent	min	2,15E-07	64%	1,91E-07	72%	4,26E-06	3%	1,37E-07	100%	1,54E-07	89%	1,88E-07	73%
X6.14	Feinstaub	Abiotische Ressourcenerschöpfung – fossile Brennstoffe (ADP _{fossil})	MJ	min	1,70E-07	10%	1,67E-07	10%	1,10E-07	15%	8,44E-08	20%	1,84E-07	9%	1,68E-08	100%
X6.15	Fotochemische Bildung von Ozon	Abiotische Ressourcenerschöpfung (ADP _{Gesamtausbeute})	kg Sb-Äquivalent	min	1,89E-02	75%	1,90E-02	74%	1,56E-02	90%	1,41E-02	100%	1,57E-02	90%	1,68E-02	84%
X6.16	Wassernutzung	Wassermangelpotenzial der Nutzer (Wasserverbrauch gewichtet nach Deprivation)	m ³ Wasser Äq. Wasserknappheit	min	1,26E+00	57%	1,26E+00	57%	8,01E-01	89%	7,13E-01	100%	3,39E+00	21%	1,69E+00	42%

Abbildung 68: Bewertungsmatrix mit Kennwerten aus verschiedenen Eigenschaftsbereichen angelehnt an Oliveira et.al. [8], Eigene Darstellung, Berechnungen in Microsoft Excel 365; siehe Anhang C.

Bereich	Kennwert	Symbol / Indikator	Einheit	Ziel	Gewichtung	Faserverbund Typ							
						Gurit (Epoxy) SA 130FR + Flax Faser		Gurit (Epoxy) SA 130FR + Glas Faser		Sicommin (Epoxy) SR Firegreen + SD8202 + Flax Faser		Sicommin (Epoxy) SR Firegreen + SD8202 + Glas	
XX	Gesamtbewertung gemittelte normierte Bestwerte					61,0%		69,0%		18,6%		49,8%	
X1	Mechanisch gemittelte normierte Bestwerte					40,1%		89,0%		33,7%		92,8%	
X1.1	Zug E-Modul	E _T	MPa	max									
X1.2	Zugfestigkeit	σ _T	MPa	max									
X1.3	Biege E-Modul	E _F	MPa	max		17.954	59%	30.546	100%	14.916	49%	26.169	86%
X1.4	Biegefestigkeit	σ _F	MPa	max		249	21%	907	78%	216	19%	1.164	100%
X1.5	Druckfestigkeit	σ _C	MPa	max									
X2	Thermisch gemittelte normierte Bestwerte												
X2	Glasübergangstemperatur	T _G	°C	max	max								
X3	Physikalisch gemittelte normierte Bestwerte												
X3	Dichte	ρ	kg/dm ³	min	min								
X6	Ökologisch (EF 3.1) gemittelte normierte Bestwerte					81,9%		49,1%		3,6%		6,7%	
X6.1	Versauerung	Kumulierte Überschreitung (AE)	mol H ⁺ -Äquivalent	min		1,53E-02	85%	1,30E-02	100%	1,34E-01	10%	7,82E-02	17%
X6.2	Klimawandel insgesamt	Enderwärmungspotenzial (GWP100)	kg CO ₂ -Äq	min		6,36E-01	100%	1,73E+00	37%	3,49E+01	2%	2,06E+01	3%
X6.3	Ökotoxizität, Süßwasser	Toxizitätsvergleichseinheit für Ökosysteme	CTU _e	min		5,63E+00	97%	5,44E+00	100%	1,44E+03	0%	7,91E+02	1%
X6.4	Ressourcennutzung, fossil	Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	Krankheitsinzidenz	min		5,41E+00	100%	2,34E+01	23%	8,49E+02	1%	4,87E+02	1%
X6.5	Eutrophierung, Süßwasser	Kumulierte Überschreitung (AE)	mol N-Äquivalent	min		2,24E-04	100%	4,95E-04	45%	1,18E-02	2%	6,83E-03	3%
X6.6	Eutrophierung, Meer	Nährstoffanteil, der in das Süßwasser Endkompartiment gelangt (P)	kg P-Äquivalent	min		8,93E-03	30%	2,71E-03	100%	3,34E-02	8%	1,62E-02	17%
X6.7	Eutrophierung, terrestrisch	Nährstoffanteil, der in das Meeres-Endkompartiment gelangt (N)	kg N-Äquivalent	min		6,50E-02	44%	2,89E-02	100%	3,08E-01	9%	1,63E-01	18%
X6.8	Humantoxizität, kanzerogen	Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen	CTU _h	min		-2,43E-10	100%	1,31E-09	0%	7,13E-08	0%	4,06E-08	0%
X6.9	Humantoxizität, nicht kanzerogen	Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen	CTU _h	min		-5,99E-08	100%	9,07E-08	0%	2,75E-07	0%	2,75E-07	0%
X6.10	Ionisierende Strahlung	Wirkungsgrad der Exposition des Menschen gegenüber ²²⁶ U	kBq ²²⁶ U-Äquivalent	min		1,63E-02	100%	1,50E-01	11%	4,05E+00	0%	2,37E+00	1%
X6.11	Landnutzung	Bodenqualitätsindex	Punkte (dimensionslos)	min		9,14E+00	49%	4,52E+00	100%	1,07E+02	4%	5,82E+01	8%
X6.12	Ressourcennutzung, Mineralien & Metalle	Ozonabbaupotenzial (ODP)	kg FCKW-11-Äq.	min		3,72E-06	100%	2,03E-04	2%	5,30E-04	1%	4,94E-04	1%
X6.13	Ozonabbau	Anstieg der Konzentration troposphärischen Ozons	g NMVOC-Äquivalent	min		9,12E-09	100%	9,36E-08	10%	1,75E-06	1%	1,05E-06	1%
X6.14	Feinstaub	Abiotische Ressourcenerschöpfung – fossile Brennstoffe (ADP fossil)	MJ	min		1,49E-07	100%	1,00E-06	15%	1,02E-06	15%	5,83E-07	26%
X6.15	Fotochemische Bildung von Ozon	Abiotische Ressourcenerschöpfung (ADP Gesamtausbeute)	kg Sb-Äquivalent	min		3,78E-03	100%	8,86E-03	43%	1,46E-01	3%	8,68E-02	4%
X6.16	Wassernutzung	Wassermangelpotenzial der Nutzer (Wasserverbrauch gewichtet nach Deprivation)	m ³ Wasser Äq. Wasserknappheit	min		9,87E+00	5%	4,83E-01	100%	1,91E+01	3%	5,62E+00	9%

Abbildung 69: Matrixdarstellung der mechanischen und ökologischen Werte von gefertigten und modellierten Faserverbundsystemen, Eigene Darstellung, Berechnungen in Microsoft Excel; siehe Anhang C.

5 Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es ein Bewertungsschema zu erstellen, welches es ermöglicht, technische und ökologische Kennwerte von Faserverbundwerkstoffen in der frühen Konstruktionsphase gemeinsam zu betrachten. Ausgangspunkt war die Methode von Oliveira et al., die eine Bewertungsmatrix für verschiedene Kennwerte und für unterschiedliche Hochleistungspolymere entwickelte.

Die Kombination aus experimenteller Prüfung und Ökobilanzierung hat sich für eine erste Erprobung der Methode geeignet. Die Berücksichtigung weiterer mechanischer Prüfverfahren und folglich die Ermittlung weiterer Kennwerte würden die Aussagekraft der Matrix verbessern. Die Bewertung ist zweigeteilt, in eine Matrix I die eine rasche Einschätzung aufgrund von Datenbankwerten liefert. Sowie eine Matrix II, die anschließend durch verschiedene mechanische Prüfungen und eine ausführlichere Ökobilanzierung genauere Ergebnisse bereitstellt. Die Zweiteilung der Bewertung in eine produktblattbasierte Analyse (Matrix I) und eine mit empirischen Daten gestützte Analyse (Matrix II) hat sich als praktikabel erwiesen. Diese Vorgehensweise erlaubt, dass eine detailliertere Analyse nur mehr von vorausgewählten Materialien notwendig ist. Folglich ist der Arbeitsaufwand bei der Materialauswahl reduziert.

Zentrale Herausforderungen bestehen in der richtigen Wahl der Methode, die für die Modellierung der Ökobilanz verwendet wird und der zugrunde liegenden Daten, die zur Verfügung stehen. Die Arbeit von Hischier et al. beschreibt eine klare Struktur und Methode wie Synthesen zu modellieren sind. Es ist anzunehmen, dass für viele chemische Prozesse diese Verallgemeinerung nicht gültig ist und stark von den Annahmen abweicht. Die Schwierigkeit besteht darin möglichst realistische Daten für Synthesewege zu erhalten, was aber zum Teil mit einem sehr hohen Rechercheaufwand in Literaturen und Patentschriften sowie mit einem tiefen chemischen Verständnis gebunden ist. Hinzu kommen zum Teil unterschiedliche Datengrundlagen wie das Beispiel des Härters zeigt (Abbildung 70), bei dem eine Vielzahl an unterschiedlichen Versionen des SDS des gleichen Systems vorhanden war und die chemische Zusammensetzung stets unterschiedlich war. Hinzu kam in dem konkreten Fall ein Übersetzungsfehler, und eine abweichende chemische Struktur wurde aufgelistet.

Die Bewertung durch die Matrix II zeigt, dass ökologisch sinnvollere Materialien wie die Flaxfaser mechanische Defizite aufweisen. Sowie dass die positiven Auswirkungen durch den Einsatz der biologischen Faser durch große negative Auswirkungen der Matrix nicht ausreichend sind.

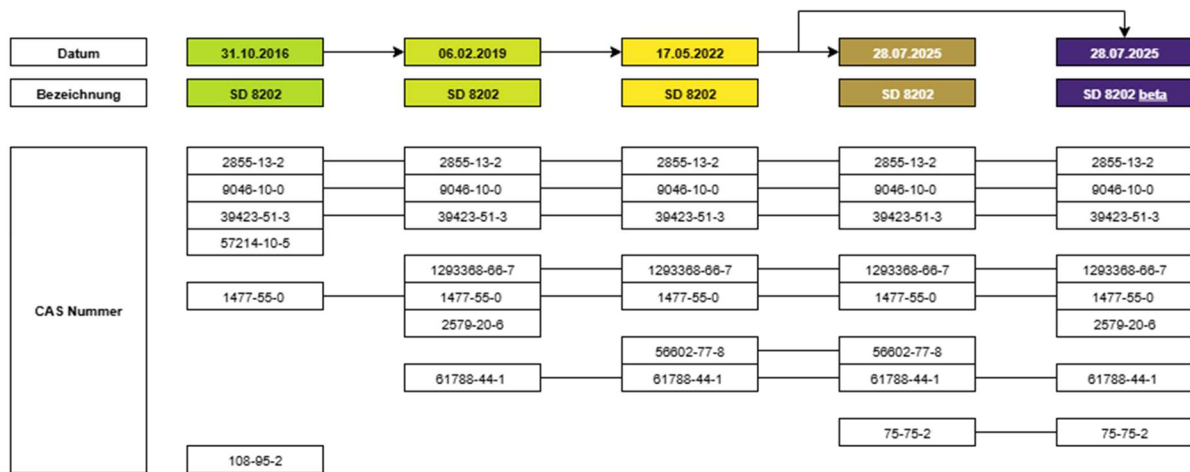


Abbildung 70: Zeitstrahl Härterkomponenten

Die Korrelation zwischen den beiden Kennwerten ist nicht linear und die Materialkombinationen müssen stets einzeln bewertet werden. Es bestätigt, dass eine mehrdimensionale Bewertung für die Materialauswahl einen gesamtheitlichen Überblick und eine Empfehlung geben kann. Die Matrix kann mit weiteren Kriterien befüllt werden, wie dies auch bei der Arbeit von Oliveira et al. gezeigt wurde. Beispielsweise werden in vielen Projekten auch wirtschaftliche Aspekte eine wesentliche Rolle spielen.

Die mechanische Bewertung wurde in dieser Arbeit nur auf Coupon Ebene durchgeführt und folglich wurden einzelne spezifische mechanische Kennzahlen dazu ermittelt. Bei der Ökobilanz wurde die gleiche Menge an Material berücksichtigt, was zu falschen Annahmen führen kann. Da je nach Wahl des Verbundwerkstoffes höhere Festigkeiten erzielt werden können, muss dementsprechend muss für das gewählte Bauteil weniger Material verwendet werden. Folglich kann dadurch die gesamte Umweltwirkung des Bauteils unter dieser Berücksichtigung des eingesetzten Gewichtes besser ausfallen als bei einem direkten Vergleich der gleichen Menge. Für zukünftige Analysen müssen die Bauteilgeometrie und die Gesamtmenge im späteren Einsatz bei der Bewertung mit betrachtet werden.

Auch die ausschließliche Ermittlung von mechanischen Kennwerten durch die Dreipunkt-Biegeprüfung wird als unzureichend erachtet und muss zumindest durch die beschriebene Zugprüfung ergänzt werden.

Eine detaillierte Analyse von Chemikalien ist für eine bessere Aussagekraft unabdingbar und ist kann durch Veröffentlichung von Ökobilanzen verbessert werden. Auch alternative Herstellungsprozesse mit Grundstoffen aus biologischen Quellen sollten bei zukünftigen Analysen Berücksichtigung finden. Dadurch kann eine klare Aussage getroffen werden, welche Umweltauswirkungen sich ändern und wie groß der Einfluss auf das finale Harzsystem ist.

Um die Bewertungsmethode zu verbessern, sollten weitere Datenquellen für die Modellierung der Ökobilanz eingebunden werden. Sofern möglich sind Primärdaten durch Kontakte oder Veröffentlichungen von Materialherstellern zu bevorzugen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Materialeigenschaftsdiagramm, Darstellung des E-Moduls über die Masse CO₂ per Kubikmeter von verschiedenen Materialien [4]. 10

Abbildung 2: Darstellung des M-DfX Scoreboard nach Oliveira et. al. [8]. 11

Abbildung 3: Beschreibung unterschiedlicher Lebensabschnitte in einer Ökobilanz [9, 10] 12

Abbildung 4 Phasen und Zusammenhänger der Ökobilanz, nach DIN EN ISO 14044 [12]. 13

Abbildung 5: Beispiel eines Produktsystems mit einzelnen Prozessmodulen, Systemgrenze, Input und Outputflüssen sowie Elementarflüssen [11]. 14

Abbildung 6 Verfahrensablauf in der Sachbilanzphase nach DIN EN ISO 14044:2020 [12]. 15

Abbildung 7: Darstellung eines Laminataufbaus aus unterschiedlich orientierten Einzelschichten [14]. 17

Abbildung 8: Gegenüberstellung von fossilen und biobasierenden Polymeren auf der Y-Achse zu deren Kompostierbarkeit auf der X-Achse, eigene Darstellung in Anlehnung an [18]. 19

Abbildung 9: Schematische Reaktion zur Herstellung von Resol und Novolak [24]. 20

Abbildung 10: Grundmoleküle von Formaldehyd-basierenden Harzen [3]. 21

Abbildung 11: Reaktionsgleichung der basisch katalysierten Umsetzung von Bisphenol A mit Epichlorhydrin zu Bisphenol-A-Diglycidylether [25]. 22

Abbildung 12: Vernetzung durch Polyaddition eines Epoxids mit Diethylentriamin [25]. 22

Abbildung 13: Darstellung unterschiedlicher Chemiefasern [3] 23

Abbildung 14: Darstellung unterschiedlicher Naturfasern [3] 24

Abbildung 15: Schematische Darstellung eines möglichen Handlaminierprozesses [1] 25

Abbildung 16: Schematische Darstellung eines möglichen Vakuuminfusionsprozess, i
n Anlehnung an [29].

26

Abbildung 17: Schematische Darstellung eines möglichen RTM-Prozesses in Anlehnung an [1]. 26

Abbildung 18: Schematische Darstellung eines möglichen Prepreglegeverfahren [1]. 27

Abbildung 19: Schematische Darstellung eines möglichen Quasi-Prepreglegeverfahrens. 28

Abbildung 20: Prüfkörper nach DIN EN ISO 527-5 mit und ohne Aufleimer [30].	29
Abbildung 21: Symmetrieachsen des Prüfkörpers [31].	30
Abbildung 22: Schematischer Aufbau einer Drei-Punkt-Biegeprüfung mit auftretenden Kräften zwischen den Auflagern [30].	30
Abbildung 23: Darstellung eines Modell-Produktsystems mit einem Fasertyp und einem Matrixsystem, sowie unterschiedlichen Bestandteilen und Reaktionspartnern.	35
Abbildung 24: Parameterfenster der Excel-Solver Funktion mit Haupt- und Nebenbedingungen und des gewählten Algorithmus "GRG Non-linear" aus 2025-08-15 Chemikalien für SICOMIN FireGreen.xlsx.	37
Abbildung 25: Darstellung der Excel-Solver Auswertung mit den Bedingungen einzelner Bestandteile und der Gesamtsumme von 100 %.	37
Abbildung 26: Produktdarstellung <i>Sicomini SR FireGreen</i> Epoxidharz Komponente [39].	39
Abbildung 27: Produktdarstellung <i>Sicomini SD8202</i> Epoxidhärter Komponente [40].	39
Abbildung 28: Reaktionsgleichung der basisch katalytischen Umsetzung von 1,4-Butandiol mit Epichlorhydrin [41].	40
Abbildung 29: Reaktionsgleichung der Epoxidierung zu Bisphenol-A- Diglycidylether [41].	40
Abbildung 30: Reaktionsgleichung der basisch katalytischen Umsetzung von 1,4-Butandiol mit Epichlorhydrin [41].	42
Abbildung 31: Reaktionsgleichung der Epoxidierung und Umsetzung mit Natriumhydroxid zu 1,4-Butandiol-diglycidylether [41].	42
Abbildung 32: Reaktionsgleichung der basisch katalytischen Umsetzung von Bisphenol-F mit Epichlorhydrin [41].	44
Abbildung 33: Reaktionsgleichung der Epoxidierung zu Bisphenol-F-Diglycidylether [41].	44
Abbildung 34: Herstellung von Bisphenol F ausgehend von Phenol und Formaldehyd unter Bildung unterschiedlicher Isomere [45].	46
Abbildung 35: Reaktionsgleichung der Herstellung von Zinkdiphosphat [47].	46
Abbildung 36: Wasserstoffbrückenbindung zwischen Melamin und Cyanursäure [48, 49].	47
Abbildung 37: Reaktionsgleichung Herstellung Cyanursäure	47
Abbildung 38: Reaktionsgleichung Herstellung Isophoronitril [56].	48
Abbildung 39: Darstellung des Moleküls mit der CAS-Nummer aus der ECHA Datenbank [43]	49
Abbildung 40: Ringöffnungspolymerisation von Propylenoxid mit Propylenglykol [59].	49
Abbildung 41: Aminierung des Polypropylenglykols [48, 61].	50
Abbildung 42: Synthese zum Polyethertriol [59].	50
Abbildung 43: Aminierung zum Polypropylentriamin [48, 61].	50

- Abbildung 44: Produktdarstellung *GURIT System SA 130FR* auf Werkzeugplatte und darunter platzierten Glasfaser UD-Lagen 51
- Abbildung 45: Reaktionsgleichung der Umsetzung von Ammonium Polyphosphat APP-I [69]. 52
- Abbildung 46: Chemische Struktur der Einzelstoffe Epichlorhydrin, Formaldehyd und Bisphenol-A 53
- Abbildung 47: Plattengröße mit den darauf eingezeichneten Prüfkörpern EN ISO 14125 Klasse III und N ISO 527 Typ B 55
- Abbildung 48: Plattengröße mit den darauf eingezeichneten Prüfkörpern EN ISO 527 Typ A 56
- Abbildung 49: Schematischer Laminataufbau in der Stärke 2 mm mit Flaxfaser (braun), Vakuumfolie (lila) und Dichtband (grau) auf Stahlplatte. 57
- Abbildung 50: Schematischer Laminataufbau in der Stärke 1 mm mit Flaxfaser (braun), Abreißgewebe (gelb), Vakuumfolie (grün) und Dichtband (grau) auf Stahlplatte. 57
- Abbildung 51: Aufbau im Handlaminierverfahren mit Flaxfasern *Bcomp ampliTex™ 5025* und *Sicomini SR FireGreen 37 + SD8202* 58
- Abbildung 52: Aufbau im Handlaminierverfahren mit Glasfaser *Seartex U-E-1182g/m²-1270mm* und *Sicomini SR FireGreen 37 + SD8202* 58
- Abbildung 53: Schematischer Laminataufbau in der Stärke 2 mm mit Glasfaser (weiß), Harzfilm (schwarz), Vlies (grün), Vakuumfolie (lila) und Dichtband (grau) auf Stahlplatte. 59
- Abbildung 54: Aufbau im „quasi“ Prepregverfahren mit Glasfaser *Seartex U-E-1182g/m²-1270mm* und *GURIT SA-130FR* 59
- Abbildung 55: Ausgehärtete und besäumte Faserverbundplatten mit Markierung 60
- Abbildung 56: Beschriftete Probenkörper nach DIN EN ISO 14125 Klasse III am Beispiel Sicomini Harz mit Glasfaser 60
- Abbildung 57: Einstellvorgang der Prüfvorrichtung für den Dreipunktbiegeversuch gemäß DIN EN ISO 14125 62
- Abbildung 58: Darstellung der Dreipunktbiegeprüfung gemäß DIN EN ISO 14125, links bei Prüfbeginn, rechts bei Prüfende durch Versagen 62
- Abbildung 59: Vergleich der 16 Wirkindikatoren in absoluten Werten von Proxyharzsystemen mit modellierten Epoxidharzen auf logarithmischer X-Achse. 65
- Abbildung 60: Vergleich der 16 Wirkindikatoren in normierten Prozentwerten von Proxyharzsystemen mit modellierten Epoxidharzen auf logarithmischer X-Achse. 66
- Abbildung 61: Vergleich der 16 Wirkindikatoren in absoluten Werten von modellierten FVK mit unterschiedlichen Matrix- und Fasermaterialien. 67
- Abbildung 62: Vergleich der 16 Wirkindikatoren in normierten Prozentwerten von modellierten FVK mit unterschiedlichen Matrix- und Fasermaterialien. 68

- Abbildung 63: Vergleich der Biegefestigkeiten unterschiedlicher Faser-Matrix-Kombinationen nach dem Dreipunktbiegeversuch (FF=Flaxfaser, GF=Glasfaser). 69
- Abbildung 64: Delamination der Prüfkörper, links: Glasfaser + Gurit, rechts: Glasfaser + Sicomin 69
- Abbildung 65: Vergleich der (Biege-) E-Module unterschiedlicher Faser-Matrix-Kombinationen nach dem Dreipunktbiegeversuch (FF=Flaxfaser, GF=Glasfaser). 70
- Abbildung 66: Vergleich der zueinander normierten mechanischen und ökologischen Kennwerte von ecoinvent-Proxywerten und Datenblatt-Werten 71
- Abbildung 67: Vergleich der zueinander normierten mechanischen und ökologischen Kennwerte von ermittelten Werten. 71
- Abbildung 68: Bewertungsmatrix mit Kennwerten aus verschiedenen Eigenschaftsbereichen angelehnt an Oliveira et.al. [8], Eigene Darstellung, Berechnungen in Microsoft Excel 365; siehe Anhang C. 73
- Abbildung 69: Matrixdarstellung der mechanischen und ökologischen Werte von gefertigten und modellierten Faserverbundsystemen, Eigene Darstellung, Berechnungen in Microsoft Excel; siehe Anhang C. 74
- Abbildung 70: Zeitstrahl Härterkomponenten 76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Darstellung der Masse und des prozentuellen Anteiles eines ICE-2 Mittelwaggon [2].	8
Tabelle 2: Viskositätswerte unterschiedlicher Stoffe bei 20°C [28]	24
Tabelle 3: Einteilung der Probenkörperklassen im Zugversuch nach DIN EN ISO 527-5 [31].	29
Tabelle 4: Einteilung der Probenkörperklassen im Biegeversuch nach DIN EN ISO 14125 [32].	31
Tabelle 5: Zuordnung der Gefährdungsstufen (HL) nach Bauartklasse [33].	32
Tabelle 6: Anforderungen an gelistete Komponenten [33].	32
Tabelle 7: Anforderungen an nicht-gelistete Komponenten [33].	33
Tabelle 8: Mögliche Anforderungen an Polymerwerkstoff.	34
Tabelle 9: Potenzielle Harzhersteller für Anwendungen mit erhöhten Brandschutzanforderungen.	34
Tabelle 10: Detaillierte Auflistung aller Inputs und Outputs, mit Proxywerten für unbekannte Herstellungsprozesse [37].	38
Tabelle 11: Bestandteile in absteigender Reihenfolge des prozentuellen Anteils im Epoxidharz <i>SICOMIN SR FireGreen</i> 37 [38].	39
Tabelle 12: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Bisphenol-A-Diglycidylethers [41].	40
Tabelle 13: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg des Produkts [41].	41
Tabelle 14: Produktionsprozess RER für Bisphenol-A-Diglycidylether	41
Tabelle 15: Marktprozess RER für Bisphenol-A-Diglycidylether	41
Tabelle 16: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des 1,4-Butandiol diglycidylethers [41].	42
Tabelle 17: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg des Produkts [41].	43
Tabelle 18: Produktionsprozess RER für 1,4-Butandiol diglycidylether	43
Tabelle 19: Marktprozess RER für 1,4-Butandiol diglycidylether	43
Tabelle 20: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Bisphenol-F-Diglycidylether [41].	44
Tabelle 21: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg des Produkts [41].	44
Tabelle 22: Produktionsprozess RER für Bisphenol-F-Diglycidylether	45
Tabelle 23: Marktprozess RER für Bisphenol-F-Diglycidylether	45
Tabelle 24: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Bisphenol-F [44, 45].	45

Tabelle 25: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Zinkpyrophosphat [47].	46
Tabelle 26: Edukte und Produkte für die Herstellung des Melamin-Cyanursäure-Komplex [48–50].	47
Tabelle 27: Edukt, Nebenprodukt und Produkt für die Herstellung der Cyanursäure [51].	47
Tabelle 28 Bestandteile in absteigender Reihenfolge des prozentuellen Anteils im Härter SD8202 [52].	48
Tabelle 29: Bestandteile in absteigender Reihenfolge des prozentuellen Anteils im Harzfilms <i>SA 130FR</i> Resin Film [65]	52
Tabelle 30: Wirkungskategorien EF 3.1 [73].	54
Tabelle 31: Übersicht der verarbeiteten Harz- und Fasertypen	56
Tabelle 32: Beispielhafte Darstellung der Messungen der Prüfkörperhöhe (Prüfkörperdicke) im Vermessungsprotokoll	61
Tabelle 33: Beispielhafte Darstellung der Messungen der Prüfkörperbreite im Vermessungsprotokoll	61
Tabelle 34: Beispielhafte Darstellung der Messungen der Prüfkörperlänge im Vermessungsprotokoll	61
Tabelle 35: Faservolumengehalt der hergestellten FVK-Platten	70

Abkürzungsverzeichnis

OoA	Out of Autoclave (Autoklavenfreie Aushärtung)
CAS	Chemical Abstracts Service (Nummer zur Stoffidentifikation)
CFK	Carbonfaser verstärkter Kunststoff
DIN EN ISO	Deutsche/Europäische/Internationale Norm
EF 3.1	Environmental Footprint Methode Version 3.1
EP	Epoxidharz
FRP	Fiber Reinforced Plastic
FVK	Faserverbundkunststoffen
GFK	Glasfaser verstärkter Kunststoff
GLO	Region Global (Standortdefinition in ecoinvent)
HL	Hazard Level (Gefährdungsstufe)
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
LCI	Life Cycle Inventory (Sachbilanzphase)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (Wirkungsabschätzung)
MF	Melamin(formaldehyd)harz
NFK	Naturfaser verstärkter Kunststoff
PF	Phenol(formaldehyd)harz
RER	Region Europe (Standortdefinition Standortdefinition in ecoinvent)
SDS	Safety Data Sheet (Sicherheitsdatenblatt)
T _G	Glasübergangstemperatur
UF	Harnstoff(formaldehyd)harz
UP	Ungesättigtes Polyesterharz
VE	Vinylesterharz

Anhang A: Tabellen für Harzsystem SICOMIN

Anhang A - Tabelle 1: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg des Produkts

Typ	Name	Molare Masse	Mol für Reaktion	Molare Masse	Gewichts- bezug
Produkt	Bisphenol F	200,24 g/mol	1	0,00 g/mol	1.000,00 g
Edukt	Formaldehyd	30,03 g/mol	1	30,03 g/mol	149,95 g
Edukt	Phenol	94,11 g/mol	2	188,23 g/mol	940,02 g
Nebenprodukt	Wasser	18,02 g/mol	1	18,02 g/mol	89,97 g

Anhang A - Tabelle 2: Produktionsprozess RER für Bisphenol-F

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	chemical factory, organics	Item(s)	4,00E-10
→ Input	electricity, medium voltage	kWh	3,99E-01
→ Input	heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,89E+00
→ Input	heat, from steam, in chemical industry	MJ	2,08E-01
→ Input	Water, cooling, unspecified natural origin	m³	1,47E-02
→ Input	Water, river	m³	9,70E-04
→ Input	Water, well, in ground	m³	8,20E-04
← Output	production of Bisphenol-F RER	g	1,00E+03
→ Input	market for formaldehyde RER	g	1,50E+02
→ Input	market for phenol RER	g	9,40E+02
← Output	Water	g	9,00E+01
← Output	wastewater, average	m³	5,58E-08
← Output	wastewater, average	m³	2,22E-06

Anhang A - Tabelle 3: Marktprozess RER für Bisphenol-F-Diglycidylether

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	transport, freight, lorry, diesel, unspecified	t*km	2,19E-02
→ Input	transport, freight train, fleet average	t*km	1,71E-01
→ Input	transport, freight, inland waterways, barge, diesel	t*km	4,38E-02
→ Input	transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil	t*km	
← Output	market for Bisphenol-F	g	1,00E+03
→ Input	Bisphenol-F production RER	g	1,00E+03

Anhang A - Tabelle 4: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg Dizinkpyrophosphat

Typ	Name	Molare Masse	Mol für Reaktion	Molare Masse	Gewichts- bezug
Bestandteil	Dizinkpyrophosphat	304,70 g/mol	1	0,00 g/mol	1.000,00 g
Edukt	Zinksulfat	161,44 g/mol	2	322,87 g/mol	1059,64 g
Edukt	Natriumdiphosphat	265,90 g/mol	1	265,90 g/mol	872,66 g
Nebenprodukt	Natriumsulfat	142,04 g/mol	2	284,07 g/mol	932,30 g

Anhang A - Tabelle 5: Produktionsprozess RER für Zinkdipyrophosphat

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	chemical factory, organics	Item(s)	4,00E-10
→ Input	electricity, medium voltage	kWh	3,99E-01
→ Input	heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,89E+00
→ Input	heat, from steam, in chemical industry	MJ	2,08E-01
→ Input	Water, cooling, unspecified natural origin	m ³	1,47E-02
→ Input	Water, river	m ³	9,70E-04
→ Input	Water, well, in ground	m ³	8,20E-04
← Output	production of Zinc pyrophosphate RER	g	1,00E+03
→ Input	market for zinc monosulfate RER	g	1,06E+03
→ Input	market for sodium pyrophosphate GLO	g	8,73E+02
← Output	market for sodium sulfate, anhydrite RER	g	9,32E+02
← Output	wastewater, average	m ³	5,58E-08
← Output	wastewater, average	m ³	2,22E-06

Anhang A - Tabelle 6: Marktprozess RER für Zinkdipyrophosphat

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	transport, freight, lorry, diesel, unspecified	t*km	2,19E-02
→ Input	transport, freight train, fleet average	t*km	1,71E-01
→ Input	transport, freight, inland waterways, barge, diesel	t*km	4,38E-02
→ Input	transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil	t*km	
← Output	market for Zinc pyrophosphate RER	g	1,00E+03
→ Input	production of Zinc pyrophosphate RER	g	1,00E+03

Anhang A - Tabelle 7: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg Cyansäure

Typ	Name	Molare Masse	Mol für Reaktion	Molare Masse	Gewichts- bezug
Produkt	Cyanursäure	129,08 g/mol	1	0,00 g/mol	1.000,00 g
Edukt	Harnstoff	60,06 g/mol	3	180,17 g/mol	1395,84 g
Nebenprodukt	Ammoniak	17,03 g/mol	3	51,09 g/mol	395,84 g

Anhang A - Tabelle 8: Produktionsprozess RER für Cyanursäure

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	chemical factory, organics	Item(s)	4,00E-10
→ Input	electricity, medium voltage	kWh	3,99E-01
→ Input	heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,89E+00
→ Input	heat, from steam, in chemical industry	MJ	2,08E-01
→ Input	Water, cooling, unspecified natural origin	m ³	1,47E-02
→ Input	Water, river	m ³	9,70E-04
→ Input	Water, well, in ground	m ³	8,20E-04
← Output	production of Cyanuric acid RER	g	1,00E+03
→ Input	market for urea RER	g	1,40E+03
← Output	market for ammonia, anhydrous, liquid RER	g	3,96E+02
← Output	wastewater, average	m ³	5,58E-08
← Output	wastewater, average	m ³	2,22E-06

Anhang A - Tabelle 9: Marktprozess RER für Cyanursäure

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	transport, freight, lorry, diesel, unspecified	t*km	2,19E-02
→ Input	transport, freight train, fleet average	t*km	1,71E-01
→ Input	transport, freight, inland waterways, barge, diesel	t*km	4,38E-02
→ Input	transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil	t*km	
← Output	market for Cyanuric acid RER	g	1,00E+03
→ Input	production of Cyanuric acid RER	g	1,00E+03

Tabelle 45: Edukte und Nebenprodukte für die Herstellung des Isophorondiamin

Anhang A - Tabelle 10: Edukte und Nebenprodukte für die Herstellung des Isophorondiamin [54, 55].

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel
Bestandteil	Isophorondiamin	2855-13-2	$C_{10}H_{22}N_2$
Edukt	Ammoniak	7664-41-7	NH_3
Edukt	Wasserstoff	1333-74-0	H_2
Nebenprodukt	Wasser	7732-18-5	H_2O
Edukt	Isophoronitril	7027-11-4	$C_{10}H_{15}NO$

Anhang A - Tabelle 11: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg Isophorondiamin [54, 55].

Typ	Name	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts-bezug
Bestandteil	Isophorondiamin	170,30 g/mol	1	0,00 g/mol	1.000,00 g
Edukt	Ammoniak	17,03 g/mol	1	17,03 g/mol	100,01 g
Edukt	Wasserstoff	2,02 g/mol	3	6,05 g/mol	35,51 g
Nebenprodukt	Wasser	18,02 g/mol	1	18,02 g/mol	105,78 g
Edukt	Isophoronitril	165,24 g/mol	1	165,24 g/mol	970,26 g

Anhang A - Tabelle 12: Auflistung der Edukte zur Herstellung von Isophoronitril [56].

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel
Produkt	Isophoronitril	7027-11-4	$C_{10}H_{15}NO$
Edukt	Cyanwasserstoff	74-90-8	HCN
Edukt	Isophoron	78-59-1	$C_9H_{14}O$

Anhang A - Tabelle 13: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg Isophoronnitril [56].

Typ	Name	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts-bezug
Produkt	Isophoronnitril	165,24 g/mol	1	0,00 g/mol	1.000,00 g
Edukt	Cyanwasserstoff	27,03 g/mol	1	27,03 g/mol	163,56 g
Edukt	Isophoron	138,21 g/mol	1	138,21 g/mol	836,44 g

Anhang A - Tabelle 14: Produktionsprozess RER für Isophoronnitril

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	chemical factory, organics	Item(s)	4,00E-10
→ Input	electricity, medium voltage	kWh	3,99E-01
→ Input	heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,89E+00
→ Input	heat, from steam, in chemical industry	MJ	2,08E-01
→ Input	Water, cooling, unspecified natural origin	m ³	1,47E-02
→ Input	Water, river	m ³	9,70E-04
→ Input	Water, well, in ground	m ³	8,20E-04
← Output	production of Isophoronnitril RER	g	1,00E+03
→ Input	market for Isophorone RER	g	1,64E+02
→ Input	market for hydrogen cyanide RER	g	8,36E+02
← Output	wastewater, average	m ³	5,58E-08
← Output	wastewater, average	m ³	2,22E-06

Anhang A - Tabelle 15: Marktprozess RER für Isophoronnitril

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	transport, freight, lorry, diesel, unspecified	t*km	2,19E-02
→ Input	transport, freight train, fleet average	t*km	1,71E-01
→ Input	transport, freight, inland waterways, barge, diesel	t*km	4,38E-02
→ Input	transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil	t*km	
← Output	market for Isophoronnitril RER	g	1,00E+03
→ Input	production of Isophoronnitril RER	g	1,00E+03

Anhang A - Tabelle 16: Auflistung der Edukte zur Herstellung von Isophoron [75].

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel
Produkt	Isophoron	74-90-8	C ₉ H ₁₄ O
Edukt	Aceton	67-64-1	C ₃ H ₆ O
Nebenprodukt	Wasser	7732-18-5	H ₂ O

Anhang A - Tabelle 17: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg Isophoron [75].

Typ	Name	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts-bezug
Produkt	Isophoron	138,21 g/mol	1	0,00 g/mol	1.000,00 g
Edukt	Aceton	58,08 g/mol	3	174,24 g/mol	1260,69 g
Nebenprodukt	Wasser	18,02 g/mol	2	36,03 g/mol	260,69 g

Anhang A - Tabelle 18: Produktionsprozess RER für Isophoron.

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	chemical factory, organics	Item(s)	4,00E-10
→ Input	electricity, medium voltage	kWh	3,99E-01
→ Input	heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,89E+00
→ Input	heat, from steam, in chemical industry	MJ	2,08E-01
→ Input	Water, cooling, unspecified natural origin	m ³	1,47E-02
→ Input	Water, river	m ³	9,70E-04
→ Input	Water, well, in ground	m ³	8,20E-04
← Output	production of Isophorone RER	g	1,00E+03
→ Input	market for acetone, liquid	g	1,26E+03
→ Input	water	g	2,61E+02
← Output	wastewater, average	m ³	5,58E-08
← Output	wastewater, average	m ³	2,22E-06

Anhang A - Tabelle 19: Marktprozess RER für Isophoron.

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	transport, freight, lorry, diesel, unspecified	t*km	2,19E-02
→ Input	transport, freight train, fleet average	t*km	1,71E-01
→ Input	transport, freight, inland waterways, barge, diesel	t*km	4,38E-02
→ Input	transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil	t*km	
← Output	market for Isophorone RER	g	1,00E+03
→ Input	production of Isophorone RER	g	1,00E+03

Anhang A - Tabelle 20: Produktionsprozess RER für Isophorondiamin

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	chemical factory, organics	Item(s)	4,00E-10
→ Input	electricity, medium voltage	kWh	3,99E-01
→ Input	heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,89E+00
→ Input	heat, from steam, in chemical industry	MJ	2,08E-01
→ Input	Water, cooling, unspecified natural origin	m ³	1,47E-02
→ Input	Water, river	m ³	9,70E-04
→ Input	Water, well, in ground	m ³	8,20E-04
← Output	production of Isophorondiamin RER	g	1,00E+03
→ Input	market for ammonia, anhydrous, liquid	g	1,00E+02
→ Input	market for hydrogen, gaseous, low pressure	g	3,55E+01
← Output	Water	g	1,06E+02
→ Input	market for Isophoronnitril RER	g	9,70E+02
← Output	wastewater, average	m ³	5,58E-08
← Output	wastewater, average	m ³	2,22E-06

Anhang A - Tabelle 21: Marktprozess RER für Isophorondiamin.

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	transport, freight, lorry, diesel, unspecified	t*km	2,19E-02
→ Input	transport, freight train, fleet average	t*km	1,71E-01
→ Input	transport, freight, inland waterways, barge, diesel	t*km	4,38E-02
→ Input	transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil	t*km	
← Output	market for Isophorondiamin RER	g	1,00E+03
→ Input	production of Isophorondiamin RER	g	1,00E+03

Anhang A - Tabelle 22: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Polypropylenglykols.

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Ursprung /Quelle	Input / Output
Produkt	Polypropylenglykol	<u>25322-69-4</u>				$C_{15}H_{32}O_6$	308,42 g/mol	Synthese	→ Output
Edukt	Propylenglykol	<u>57-55-6</u>				$C_3H_8O_2$	76,10 g/mol	ecoinvent	← Input
Edukt	Propylenoxid	<u>75-56-9</u>				$C_3H_6O_2$	58,08 g/mol	ecoinvent	← Input

Anhang A - Tabelle 23: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg Polypropylenglykols.

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts-bezug
Produkt	Polypropylenglykol	<u>25322-69-4</u>	$C_{15}H_{32}O_6$	308,42 g/mol	1		1.000,00 g
Edukt	Propylenglykol	<u>57-55-6</u>	$C_3H_8O_2$	76,10 g/mol	1	76,10 g/mol	246,73 g
Edukt	Propylenoxid	<u>75-56-9</u>	$C_3H_6O_2$	58,08 g/mol	4	232,32 g/mol	753,27 g

Anhang A - Tabelle 24: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Polyetherdiamins

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Ursprung /Quelle	Input / Output
Bestandteil	Polyetherdiamin	<u>9046-10-0</u>	25,00%	50,00%	26,88%	$C_{15}H_{34}N_2O_4$	306,45 g/mol	Synthese	→ Output
Edukt	Ammoniak	<u>7664-41-7</u>				NH_3	17,03 g/mol	ecoinvent	← Input
Nebenprodukt	Wasser	<u>7732-18-5</u>				H_2O	18,02 g/mol	ecoinvent	→ Output
Edukt	Polypropylenglykol	<u>25322-69-4</u>				$C_{15}H_{32}O_6$	308,42 g/mol	Synthese	← Input

Anhang A - Tabelle 25: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg Polyetherdiamin.

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts-bezug
Bestandteil	Polyetherdiamin	<u>9046-10-0</u>	$C_{15}H_{34}N_2O_4$	306,45 g/mol	1		1.000,00 g
Edukt	Ammoniak	<u>7664-41-7</u>	NH_3	17,03 g/mol	2	34,06 g/mol	111,15 g
Nebenprodukt	Wasser	<u>7732-18-5</u>	H_2O	18,02 g/mol	2	36,03 g/mol	117,57 g
Edukt	Polypropylenglykol	<u>25322-69-4</u>	$C_{15}H_{32}O_6$	308,42 g/mol	1	308,42 g/mol	1006,42 g

Anhang A - Tabelle 26: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Polyethertriamins.

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Ursprung /Quelle	Input / Output
Bestandteil	Polyethertriamin	<u>39423-51-3</u>	2,50%	10,00%	7,84%	$C_{24}H_{53}N_3O_6$	479,70 g/mol	Synthese	→ Output
Edukt	Ammoniak	<u>7664-41-7</u>				NH_3	17,03 g/mol	ecoinvent	← Input
Nebenprodukt	Wasser	<u>7732-18-5</u>				H_2O	18,02 g/mol	ecoinvent	→ Output
Edukt	Polyethertriol	<u>n.a.</u>				$C_{24}H_{50}O_9$	482,66 g/mol	Synthese	← Input

Anhang A - Tabelle 27: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg Polyethertriamin.

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts-bezug
Bestandteil	Polyethertriamin	<u>39423-51-3</u>	$C_{24}H_{53}N_3O_6$	479,70 g/mol	1		1.000,00 g
Edukt	Ammoniak	<u>7664-41-7</u>	NH_3	17,03 g/mol	3	51,09 g/mol	106,51 g
Nebenprodukt	Wasser	<u>7732-18-5</u>	H_2O	18,02 g/mol	3	54,05 g/mol	112,66 g
Edukt	Polyethertriol	<u>n.a.</u>	$C_{24}H_{50}O_9$	482,66 g/mol	1	482,66 g/mol	1006,15 g

Anhang A - Tabelle 28: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Polyethertriol.

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Ursprung /Quelle	Input / Output
Produkt	Polyethertriol	n.a.				$C_{24}H_{50}O_9$	482,66 g/mol	Synthese	→ Output
Edukt	Propylenoxid	75-56-9				$C_3H_6O_2$	58,08 g/mol	ecoinvent	← Input
Edukt	1,1,1-Trimethylolpropan	77-99-6				$C_6H_{14}O_3$	134,18 g/mol	Synthese	← Input

Anhang A - Tabelle 29: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg Polyethertriol.

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts-bezug
Produkt	Polyethertriol	n.a.	$C_{24}H_{50}O_9$	482,66 g/mol	1		1.000,00 g
Edukt	Propylenoxid	75-56-9	$C_3H_6O_2$	58,08 g/mol	6	348,48 g/mol	722,01 g
Edukt	1,1,1-Trimethylolpropan	77-99-6	$C_6H_{14}O_3$	134,18 g/mol	1	134,18 g/mol	277,99 g

Anhang A - Tabelle 30: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des 1,1,1-Trimethylolpropan.

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Ursprung /Quelle	Input / Output
Produkt	1,1,1-Trimethylolpropan	77-99-6				$C_6H_{14}O_3$	134,18 g/mol	Synthese	→ Output
Edukt	Formaldehyd	50-00-0				CH_2O	30,03 g/mol	ecoinvent	← Input
Edukt	Natriumhydroxid	1310-73-2				NaOH	40,00 g/mol	ecoinvent	← Input

Anhang A - Tabelle 31: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg 1,1,1-Trimethylolpropan.

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts-bezug
Produkt	1,1,1-Trimethylolpropan	77-99-6	$C_6H_{14}O_3$	134,18 g/mol	1		1.000,00 g
Edukt	Formaldehyd	50-00-0	CH_2O	30,03 g/mol	3	90,08 g/mol	671,35 g
Edukt	Natriumhydroxid	1310-73-2	NaOH	40,00 g/mol	1	40,00 g/mol	298,10 g
Nebenprodukt	Natriumformiat	141-53-7	$CHNaO_2$	68,01 g/mol	1	68,01 g/mol	506,85 g
Edukt	Butanal	123-72-8	$C_4H_8O_2$	72,11 g/mol	1	72,11 g/mol	537,41 g

Anhang A - Tabelle 32: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Butanals.

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Ursprung /Quelle	Input / Output
Produkt	Butanal	123-72-8				$C_4H_8O_2$	72,11 g/mol	Synthese	← Input
Edukt	Propylene	115-07-1				C_3H_6	42,08 g/mol	ecoinvent	← Input
Edukt	Wasserstoff	1333-74-0				H_2	2,02 g/mol	ecoinvent	← Input
Edukt	Kohlenmonoxid	630-08-0				CO	28,01 g/mol	ecoinvent	← Input

Anhang A - Tabelle 33: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg Butanal.

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts-bezug
Produkt	Butanal	123-72-8	$C_4H_8O_2$	72,11 g/mol	1		1.000,00 g
Edukt	Propylene	115-07-1	C_3H_6	42,08 g/mol	1	42,08 g/mol	583,59 g
Edukt	Wasserstoff	1333-74-0	H_2	2,02 g/mol	1	2,02 g/mol	27,96 g
Edukt	Kohlenmonoxid	630-08-0	CO	28,01 g/mol	1	28,01 g/mol	388,45 g

Anhang A - Tabelle 34: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Gemischs aus Formaldehyd, Polymere mit Diethylentriamin und styreniertem Phenol.

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Ursprung /Quelle	Input / Output
Bestandteil	Formaldehyd, Polymere mit Diethylentriamin und styreniertem Phenol	1293368-66-7	2,50%	10,00%	7,84%	n.a.	761,10 g/mol	Gemisch	→ Output
Edukt	Formaldehyd	50-00-0				CH ₂ O	30,03 g/mol	ecoinvent	← Input
Edukt	Polyethertriemin	39423-51-3				C ₂₄ H ₅₃ N ₃ O ₆	479,70 g/mol	Synthese	← Input
Edukt	Styrenated phenol	61788-44-1				n.a.	251,37 g/mol	Synthese	← Input

Anhang A - Tabelle 35: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg des Gemischs aus Formaldehyd, Polymere mit Diethylentriamin und styreniertem Phenol.

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts- bezug
Bestandteil	Formaldehyd, Polymere mit Diethylentriamin und styreniertem Phenol	1293368-66-7	n.a.	761,10 g/mol	1		1.000,00 g
Edukt	Formaldehyd	50-00-0	CH ₂ O	30,03 g/mol	1	30,03 g/mol	39,45 g
Edukt	Polyethertriemin	39423-51-3	C ₂₄ H ₅₃ N ₃ O ₆	479,70 g/mol	1	479,70 g/mol	630,28 g
Edukt	Styrenated phenol	61788-44-1	n.a.	251,37 g/mol	1	251,37 g/mol	330,27 g

Anhang A - Tabelle 36: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des m-Xylylendiamin.

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Ursprung /Quelle	Input / Output
Bestandteil	m-Xylylendiamin	1477-55-0	1,00%	2,50%	1,85%	C ₈ H ₁₂ N ₂	136,20 g/mol	Synthese	→ Output
Edukt	Wasserstoff	1333-74-0				H ₂	2,02 g/mol	ecoinvent	← Input
Edukt	Benzol-1,3-dicarbonitril	626-17-5				C ₈ H ₄ N ₂	128,13 g/mol	Synthese	← Input

Anhang A - Tabelle 37: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg m-Xylylendiamin.

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts- bezug
Bestandteil	m-Xylylendiamin	1477-55-0	C ₈ H ₁₂ N ₂	136,20 g/mol	1		1.000,00 g
Edukt	Wasserstoff	1333-74-0	H ₂	2,02 g/mol	4	8,06 g/mol	59,21 g
Edukt	Benzol-1,3-dicarbonitril	626-17-5	C ₈ H ₄ N ₂	128,13 g/mol	1	128,13 g/mol	940,76 g

Anhang A - Tabelle 38: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des Benzol-1,3-dicarbonitril.

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Ursprung /Quelle	Input / Output
Produkt	Benzol-1,3-dicarbonitril	626-17-5				C ₈ H ₄ N ₂	128,13 g/mol	Synthese	→ Output
Edukt	m-Xylol (1,3-Dimethylbenzol)	108-38-3				C ₈ H ₁₀	106,17 g/mol	ecoinvent	← Input
Edukt	Ammoniak	7664-41-7				NH ₃	17,03 g/mol	ecoinvent	← Input
Edukt	Sauerstoff	7782-44-7				NH ₃	32,00 g/mol	ecoinvent	← Input
Nebenprodukt	Wasser	7732-18-5				H ₂ O	18,02 g/mol	ecoinvent	→ Output

Anhang A - Tabelle 39: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg Benzol-1,3-dicarbonitril.

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts- bezug
Produkt	Benzol-1,3-dicarbonitril	626-17-5	C ₈ H ₄ N ₂	128,13 g/mol	1		1.000,00 g
Edukt	m-Xylol (1,3-Dimethylbenzol)	108-38-3	C ₈ H ₁₀	106,17 g/mol	1	106,17 g/mol	828,60 g
Edukt	Ammoniak	7664-41-7	NH ₃	17,03 g/mol	2	34,06 g/mol	265,84 g
Edukt	Sauerstoff	7782-44-7	NH ₃	32,00 g/mol	3	95,99 g/mol	749,19 g
Nebenprodukt	Wasser	7732-18-5	H ₂ O	18,02 g/mol	6	108,09 g/mol	843,60 g

Anhang A - Tabelle 40: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des 1,3-Cyclohexanedimethanamin.

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Ursprung /Quelle	Input / Output
Bestandteil	1,3-Cyclohexanedimethanamine	2579-20-6	1,00%	2,50%	1,85%	C ₈ H ₁₈ N ₂	142,25 g/mol	Synthese	→ Output
Edukt	m-Xylylendiamin	1477-55-0				C ₈ H ₁₂ N ₂	136,20 g/mol	Synthese	← Input
Edukt	Wasserstoff	1333-74-0				H ₂	2,02 g/mol	ecoinvent	← Input

Anhang A - Tabelle 41: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg 1,3-Cyclohexanedimethanamin.

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts-bezug
Bestandteil	1,3-Cyclohexanedimethanamine	2579-20-6	C ₈ H ₁₈ N ₂	142,25 g/mol	1		1.000,00 g
Edukt	m-Xylylendiamin	1477-55-0	C ₈ H ₁₂ N ₂	136,20 g/mol	1	136,20 g/mol	957,48 g
Edukt	Wasserstoff	1333-74-0	H ₂	2,02 g/mol	3	6,05 g/mol	42,52 g

Anhang A - Tabelle 42: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des styrolisiertem Phenol.

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Ursprung /Quelle	Input / Output
Bestandteil	Styrenated phenol	61788-44-1	1,00%	2,50%	1,85%	n.a.	251,37 g/mol	Synthese	→ Output
Produkt	MSP	4237-44-9 1988-89-2				C ₁₄ H ₁₄ O	198,27 g/mol	Synthese	→ Output
Produkt	DSP	2769-94-0 4237-28-9				C ₂₂ H ₂₂ O	302,42 g/mol	Synthese	→ Output
Produkt	TSP	18254-13-2				C ₃₀ H ₃₀ O	406,57 g/mol	Synthese	→ Output
Edukt	Phenol	108-95-2				C ₆ H ₆ O	94,11 g/mol	ecoinvent	← Input
Edukt	Styrol	100-42-5				C ₈ H ₈	104,15 g/mol	ecoinvent	← Input

Anhang A - Tabelle 43: Menge der beteiligten Stoffe an der Herstellung von 1 kg styrolisierten Phenol.

Typ	Name	CAS-Nr.	Summenformel	Molare Masse d. Stoffes	Mol für Reaktion	Molare Masse für Reaktion	Gewichts-bezug
Bestandteil	Styrenated phenol	61788-44-1	n.a.	251,37 g/mol	1		1.000,00 g
Produkt	MSP	4237-44-9 1988-89-2	C ₁₄ H ₁₄ O	198,27 g/mol	0,57	113,01 g/mol	449,58 g
Produkt	DSP	2769-94-0 4237-28-9	C ₂₂ H ₂₂ O	302,42 g/mol	0,35	105,85 g/mol	421,08 g
Produkt	TSP	18254-13-2	C ₃₀ H ₃₀ O	406,57 g/mol	0,08	32,53 g/mol	129,39 g
Edukt	Phenol	108-95-2	C ₆ H ₆ O	94,11 g/mol	1	94,11 g/mol	374,40 g
Edukt	Styrol	100-42-5	C ₈ H ₈	104,15 g/mol	1,5	156,23 g/mol	621,51 g

Anhang B: Tabellen für Harzsystem GURIT

Anhang B - Tabelle 1: Edukte, Produkte und Nebenprodukte bei der Herstellung des APP-I [69].

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse
Bestandteil	Ammonium polyphosphate	68333-79-9	25,00%	50,00%	34,00%	$(\text{NH}_4\text{PO}_3)_{70}$	6790,68 g/mol
Edukt	Phosphorsäure					H_3PO_4	97,99 g/mol
Edukt	Harnstoff					$\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$	60,06 g/mol
Nebenprodukt	Kohlendioxid					CO_2	44,01 g/mol
Nebenprodukt	Ammoniak					NH_3	17,03 g/mol

Anhang B - Tabelle 2: Berechnung der Masse der Edukte für die Herstellung von 1 kg APP-I [69].

Typ	Name	Summenformel	Molare Masse	Mol für Reaktion	Molare Masse	Gewichtsbezug
Bestandteil	Ammonium polyphosphate	$(\text{NH}_4\text{PO}_3)_{70}$	6790,68 g/mol	1		1.000,00 g
Edukt	Phosphorsäure	H_3PO_4	97,99 g/mol	70	6859,57 g/mol	1010,14 g
Edukt	Harnstoff	$\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$	60,06 g/mol	70	4203,92 g/mol	619,07 g
Nebenprodukt	Kohlendioxid	CO_2	44,01 g/mol	70	3080,63 g/mol	453,66 g
Nebenprodukt	Ammoniak	NH_3	17,03 g/mol	70	1192,17 g/mol	175,56 g

Anhang B - Tabelle 3: Produktionsprozess RER für APP-I

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	chemical factory, organics	Item(s)	4,00E-10
→ Input	electricity, medium voltage	kWh	3,99E-01
→ Input	heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,89E+00
→ Input	heat, from steam, in chemical industry	MJ	2,08E-01
→ Input	Water, cooling, unspecified natural origin	m ³	1,47E-02
→ Input	Water, river	m ³	9,70E-04
→ Input	Water, well, in ground	m ³	8,20E-04
← Output	production APP RER	g	1,00E+03
→ Input	market for phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state GLO	g	1,01E+03
→ Input	market for urea RER	g	6,19E+02
← Output	Carbon Dioxid	g	4,54E+02
← Output	Ammonia	g	1,76E+02
← Output	wastewater, average	m ³	5,58E-08
← Output	wastewater, average	m ³	2,22E-06

Anhang B - Tabelle 4: Marktprozess RER für APP-I

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	transport, freight, lorry, diesel, unspecified	t*km	2,19E-02
→ Input	transport, freight train, fleet average	t*km	1,71E-01
→ Input	transport, freight, inland waterways, barge, diesel	t*km	4,38E-02
→ Input	transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil	t*km	
← Output	market for APP	g	4,54E+02
→ Input	production APP RER	g	1,00E+03

Anhang B - Tabelle 5: Edukte und Produkte für die Zusammensetzung des Gemischs [70].

Typ	Name	CAS-Nr.	MIN Anteil	MAX Anteil	SOLVER Werte	Summenformel	Molare Masse
Bestandteil	Formaldehyd-Polymer mit Epichlorhydrin und Bisphenol-A	28906-96-9	5,00%	10,00%	10,00%	n.a.	n.a.
Edukt	Bisphenol A	80-05-7				C ₁₅ H ₁₆ O ₂	228,29 g/mol
Edukt	Epichlorhydrin	106-89-8				C ₃ H ₅ ClO	92,52 g/mol
Edukt	Formaldehyd	50-00-0				CH ₂ O	30,03 g/mol

Anhang B - Tabelle 6: Produktionsprozess RER für Formaldehyd-Polymer mit Epichlorhydrin und Bisphenol-A.

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	chemical factory, organics	Item(s)	4,00E-10
→ Input	electricity, medium voltage	kWh	3,99E-01
→ Input	heat, district or industrial, natural gas	MJ	1,89E+00
→ Input	heat, from steam, in chemical industry	MJ	2,08E-01
→ Input	Water, cooling, unspecified natural origin	m ³	1,47E-02
→ Input	Water, river	m ³	9,70E-04
→ Input	Water, well, in ground	m ³	8,20E-04
→ Input	market for bisphenol A, powder RER	g	6,71E+02
← Output	market for epichlorohydrin GLO	g	2,72E+02
→ Input	market for formaldehyde RER	g	8,82E+01
← Output	wastewater, average	m ³	5,58E-08
← Output	wastewater, average	m ³	2,22E-06

Anhang B - Tabelle 7: Marktprozess RER für Formaldehyd-Polymer mit Epichlorhydrin und Bisphenol-A

Direction of flow	Intermediate	unit	amount
→ Input	transport, freight, lorry, diesel, unspecified	t*km	2,19E-02
→ Input	transport, freight train, fleet average	t*km	1,71E-01
→ Input	transport, freight, inland waterways, barge, diesel	t*km	4,38E-02
→ Input	transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil	t*km	
→ Input	Formaldehyd-Polymer mit Epichlorhydrin und Bisphenol-A RER	g	1,00E+03

Anhang C: Formeln zur Matrix und Berechnung des Faservolumengehalts

XX	Gesamtbewertung gemittelte normierte Bestwerte				=WENNFEHLER(MITTELWERT(F4:F10;F12:F14);"")
X1	Mechanisch gemittelte normierte Bestwerte				=WENNFEHLER(MITTELWERT(G5:G9);"")
X1.1	Zug E-Modul	E_t	MPa	max	=WENN(ODER(ISTLEER(F5);MAX(\$F5:\$H5,\$J5:\$L5,\$N5:\$P5)=0); ""; F5/MAX(\$F5:\$H5,\$J5:\$L5,\$N5:\$P5))
X1.2	Zugfestigkeit	σ_t	MPa	max	=WENN(ODER(ISTLEER(F6);MAX(\$F6:\$H6,\$J6:\$L6,\$N6:\$P6)=0); ""; F6/MAX(\$F6:\$H6,\$J6:\$L6,\$N6:\$P6))
X1.3	Biege E-Modul	E_f	MPa	max	=WENN(ODER(ISTLEER(F7);MAX(\$F7:\$H7,\$J7:\$L7,\$N7:\$P7)=0); ""; F7/MAX(\$F7:\$H7,\$J7:\$L7,\$N7:\$P7))
X1.4	Biegefestigkeit	σ_f	MPa	max	=WENN(ODER(ISTLEER(F8);MAX(\$F8:\$H8,\$J8:\$L8,\$N8:\$P8)=0); ""; F8/MAX(\$F8:\$H8,\$J8:\$L8,\$N8:\$P8))
X1.5	Druckfestigkeit	σ_c	MPa	max	=WENN(ODER(ISTLEER(F9);MAX(\$F9:\$H9,\$J9:\$L9,\$N9:\$P9)=0); ""; F9/MAX(\$F9:\$H9,\$J9:\$L9,\$N9:\$P9))
X2	Thermisch gemittelte normierte Bestwerte				=WENNFEHLER(MITTELWERT(G11);"")
X2	Glasübergangstemperatur	T_G	°C	max	=WENN(ODER(ISTLEER(#BEZUG1);#BEZUG1)=0);"";WENN(MAX(#BEZUG1;#BEZUG1;#BEZUG2;#BEZUG3;#BEZUG4;#BEZUG5;#BEZUG6;#BEZUG7;#BEZUG8;#BEZUG9;#BEZUG10;#BEZUG11;#BEZUG12;#BEZUG13;#BEZUG14;#BEZUG15;#BEZUG16;#BEZUG17;#BEZUG18;#BEZUG19;#BEZUG20;#BEZUG21;#BEZUG22;#BEZUG23;#BEZUG24;#BEZUG25;#BEZUG26;#BEZUG27;#BEZUG28;#BEZUG29;#BEZUG30;#BEZUG31;#BEZUG32;#BEZUG33;#BEZUG34;#BEZUG35;#BEZUG36;#BEZUG37;#BEZUG38;#BEZUG39;#BEZUG40;#BEZUG41;#BEZUG42;#BEZUG43;#BEZUG44;#BEZUG45;#BEZUG46;#BEZUG47;#BEZUG48;#BEZUG49;#BEZUG50;#BEZUG51;#BEZUG52;#BEZUG53;#BEZUG54;#BEZUG55;#BEZUG56;#BEZUG57;#BEZUG58;#BEZUG59;#BEZUG60;#BEZUG61;#BEZUG62;#BEZUG63;#BEZUG64;#BEZUG65;#BEZUG66;#BEZUG67;#BEZUG68;#BEZUG69;#BEZUG70;#BEZUG71;#BEZUG72;#BEZUG73;#BEZUG74;#BEZUG75;#BEZUG76;#BEZUG77;#BEZUG78;#BEZUG79;#BEZUG80;#BEZUG81;#BEZUG82;#BEZUG83;#BEZUG84;#BEZUG85;#BEZUG86;#BEZUG87;#BEZUG88;#BEZUG89;#BEZUG90;#BEZUG91;#BEZUG92;#BEZUG93;#BEZUG94;#BEZUG95;#BEZUG96;#BEZUG97;#BEZUG98;#BEZUG99;#BEZUG100)=0);"";#BEZUG1)
X3	Physikalisch gemittelte normierte Bestwerte				=WENNFEHLER(MITTELWERT(G13);"")
X3	Dichte	ρ	kg/dm³	min	=WENN(ODER(ISTLEER(#BEZUG1);#BEZUG1)=0);"";WENN(MAX(#BEZUG1;#BEZUG2;#BEZUG3;#BEZUG4;#BEZUG5;#BEZUG6;#BEZUG7;#BEZUG8;#BEZUG9;#BEZUG10;#BEZUG11;#BEZUG12;#BEZUG13;#BEZUG14;#BEZUG15;#BEZUG16;#BEZUG17;#BEZUG18;#BEZUG19;#BEZUG20;#BEZUG21;#BEZUG22;#BEZUG23;#BEZUG24;#BEZUG25;#BEZUG26;#BEZUG27;#BEZUG28;#BEZUG29;#BEZUG30;#BEZUG31;#BEZUG32;#BEZUG33;#BEZUG34;#BEZUG35;#BEZUG36;#BEZUG37;#BEZUG38;#BEZUG39;#BEZUG40;#BEZUG41;#BEZUG42;#BEZUG43;#BEZUG44;#BEZUG45;#BEZUG46;#BEZUG47;#BEZUG48;#BEZUG49;#BEZUG50;#BEZUG51;#BEZUG52;#BEZUG53;#BEZUG54;#BEZUG55;#BEZUG56;#BEZUG57;#BEZUG58;#BEZUG59;#BEZUG60;#BEZUG61;#BEZUG62;#BEZUG63;#BEZUG64;#BEZUG65;#BEZUG66;#BEZUG67;#BEZUG68;#BEZUG69;#BEZUG70;#BEZUG71;#BEZUG72;#BEZUG73;#BEZUG74;#BEZUG75;#BEZUG76;#BEZUG77;#BEZUG78;#BEZUG79;#BEZUG80;#BEZUG81;#BEZUG82;#BEZUG83;#BEZUG84;#BEZUG85;#BEZUG86;#BEZUG87;#BEZUG88;#BEZUG89;#BEZUG90;#BEZUG91;#BEZUG92;#BEZUG93;#BEZUG94;#BEZUG95;#BEZUG96;#BEZUG97;#BEZUG98;#BEZUG99;#BEZUG100)=0);"";#BEZUG1)
X6	Ökologisch EF 3.1-Indikatoren gemittelte Bestwerte				=WENNFEHLER(MITTELWERT(G15:G30);"")
X6.1	Versauerung	Kumulierte Überschreitung (AE)	mol H⁺-Äquivalent	min	=WENN(ODER(ISTLEER(F15);MIN(\$F15:\$H15,\$J15:\$L15,\$N15:\$P15)=0); ""; MIN(\$F15:\$H15,\$J15:\$L15,\$N15:\$P15)/F15)
X6.2	Klimawandel insgesamt	Erdenwärmepotenzial (GWP100)	kg CO2-Äq	min	=WENN(ODER(ISTLEER(F16);MIN(\$F16:\$H16,\$J16:\$L16,\$N16:\$P16)=0); ""; MIN(\$F16:\$H16,\$J16:\$L16,\$N16:\$P16)/F16)
X6.3	Ökotoxizität, Süßwasser	Toxizitätsvergleichseinheit für Ökosysteme	CTUe	min	=WENN(ODER(ISTLEER(F17);MIN(\$F17:\$H17,\$J17:\$L17,\$N17:\$P17)=0); ""; MIN(\$F17:\$H17,\$J17:\$L17,\$N17:\$P17)/F17)
X6.4	Ressourcennutzung, fossil	Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	Krankheitsinzidenz	min	=WENN(ODER(ISTLEER(F18);MIN(\$F18:\$H18,\$J18:\$L18,\$N18:\$P18)=0); ""; MIN(\$F18:\$H18,\$J18:\$L18,\$N18:\$P18)/F18)
X6.5	Eutrophierung, Süßwasser	Kumulierte Überschreitung (AE)	mol N-Äquivalent	min	=WENN(ODER(ISTLEER(F19);MIN(\$F19:\$H19,\$J19:\$L19,\$N19:\$P19)=0); ""; MIN(\$F19:\$H19,\$J19:\$L19,\$N19:\$P19)/F19)

Anhang C - Tabelle 1: Formel der Excel Berechnung des Scoreboards

Gewicht der fertigen Platten GURIT	195,80 g	
Abmaße		
Länge	300,50 mm	301,00 mm
Breite	268,50 mm	268,50 mm
Fläche	0,080684 m²	0,080819 m²
Mittelwert	0,080751 m²	
Flächengewicht	2.424,73 g/m²	
Fasergewicht auf Fläche der Platte	90,4415 g	
Harzgewicht	105,36 g	
Harzvolumen	76,90 cm³	
Faservolumen	61,52 cm³	
Faservolumengehalt	44,45%	

Anhang C - Tabelle 2: Berechnung Faservolumengehalt am Beispiel FF-GUR

Gewicht der fertigen Platten GURIT	195,8	
Abmaße		
Länge	300,5	301
Breite	268,5	268,5
Fläche	=(B46*B47)/10^6	=(C46*C47)/10^6
Mittelwert	=MITTELWERT(B49:C49)	
Flächengewicht	=B44/B50	
Fasergewicht auf Fläche der Platte	=B50*B2*B5	
Harzgewicht	=B44-B52	
Harzvolumen	=B53/B8	
Faservolumen	=B52/B3	
Faservolumengehalt	=B55/(B55+B54)	

Anhang C - Tabelle 3: Formeln zur Berechnung Faservolumengehalt am Beispiel FF-GUR

6 Literatur

- [1] E. Moeller, Hg. *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*, 2. Aufl. München, Wien: Hanser, 2020.
- [2] J. Ihme, *Schienefahrzeugtechnik*, 3. Aufl. (Lehrbuch). Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/978-3-658-42976-8>
- [3] E. Baur, D. Drummer, T. A. Osswald und N. Rudolph, *Saechtling Kunststoff-Handbuch*, 32. Aufl. München: Hanser, 2022.
- [4] M. F. Ashby, *Materials and the environment: Eco-informed material choice* (Engineering professional collection). Oxford, Cambridge, MA: Butterworth-Heinemann imprint of Elsevier, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128215210>
- [5] S. M. Sapuan, "Materials Selection for Composites: Concurrent Engineering Perspective," in *Composite Materials*, Elsevier, 2017, S. 209–271.
- [6] B. Pollini und V. Rognoli, "Early-stage material selection based on life cycle approach: tools, obstacles and opportunities for design," *Sustainable Production and Consumption*, Jg. 28, S. 1130–1139, 2021, doi: 10.1016/j.spc.2021.07.014.
- [7] R. Kupfer, L. Schilling, S. Spitzer, M. Zichner und M. Gude, "Neutral lightweight engineering: a holistic approach towards sustainability driven engineering," *Discov Sustain*, Jg. 3, Nr. 1, 2022, doi: 10.1007/s43621-022-00084-9.
- [8] B. F. Oliveira *et al.*, "Material design-for-X: A decision-making tool applied for high-performance applications," *Materials Today Communications*, Jg. 41, S. 111032, 2024, doi: 10.1016/j.mtcomm.2024.111032.
- [9] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum und S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment*. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [10] R. Frischknecht, *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [11] *DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*, EN ISO 14040:2006 + A1:2020, Sep. 2020.
- [12] *DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*, EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020, Sep. 2020.
- [13] M. A. Curran, *Goal and Scope Definition in Life Cycle Assessment*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017.
- [14] C. Mittelstedt, *Mechanik geschichteter Strukturen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2025.
- [15] *Composites engineering handbook* (Materials engineering 11). New York, NY: Dekker, 1997. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0647/97004058-d.html>
- [16] Pia Skoczinski, Michael Carus, Gillian Tweddle, Pauline Ruiz, Lara Dammer, Ann Zhang, Narendar Poranki, Lars Börger, Doris de Guzman, Rick Passenier, Tanver Ali,

- Harald Káb, Matthew Hartley and Achim Raschka. "Plastics Production From 1950 to 2023 | Renewable Carbon Publications." Zugriff am: 17. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: <https://renewable-carbon.eu/publications/product/plastics-production-from-1950-to-2023-png/>
- [17] L. Shen, E. Worrell und M. Patel, "Present and future development in plastics from biomass," *Biofuels Bioprod Bioref*, Jg. 4, Nr. 1, S. 25–40, 2010, doi: 10.1002/bbb.189.
- [18] European Bioplastics. "What are bioplastics?: Material types, terminology, and labels - an introduction." Zugriff am: 16. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: https://docs.european-bioplastics.org/publications/fs/EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf
- [19] G. W. Ehrenstein, *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*, 2. Aufl. (Hanser eLibrary). München: Hanser, 2006. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446457546>
- [20] M. Neitzel, P. Mitschang und U. Breuer, *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, 2. Aufl. (Hanser eLibrary). München: Hanser, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446436978>
- [21] P. Elsner, *DOMININGHAUS - Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*, 8. Aufl. (VDI-Buch). Dordrecht: Springer, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=968733>
- [22] C. Bonten, *Plastics technology: Introduction and fundamentals* (Hanser eLibrary). Munich, Cincinnati: Hanser, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hanser-elibrary.com/isbn/9781569907672>
- [23] E. Baur, D. Drummer, T. A. Osswald und N. Rudolph, *SAAAAAA Kunststoff-Handbuch*, 32. Aufl. München: Hanser, 2022.
- [24] S. Koltzenburg, M. Maskos und O. Nuyken, *Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024.
- [25] W. Kaiser, *Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung*, 5. Aufl. (Hanser eLibrary). München: Hanser, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446466029>
- [26] G. Pritchard, *Developments in Reinforced Plastics—1*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1980.
- [27] C. Cherif, *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [28] *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [29] A. Hindersmann, "Confusion about infusion: An overview of infusion processes," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 126, S. 105583, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105583.
- [30] W. Grellmann und S. Seidler, *Kunststoffprüfung*, 4. Aufl. München: Hanser, 2025.
- [31] *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (ISO 527-5:2009); Deutsche*

- Fassung EN ISO 527-5:2009, 527-5, DIN Deutsches Institut für Normung e. V, Jan. 2010.
- [32] *Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften (ISO 14125:1998 + Cor.1:2001 + Amd.1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 14125:1998 + AC:2002 + A1:2011*, 14125, DIN Deutsches Institut für Normung e. V, Mai. 2011.
- [33] *DIN EN 45545-2, Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 2: Anforderungen an das Brandverhalten von Materialien und Komponenten; Deutsche Fassung EN 45545-2:2020+A1:2023*, 45545-2, DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF), Dez. 2023.
- [34] American Chemical Societ. "CAS Registry." Zugriff am: 18. Juli 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.cas.org/cas-data/cas-registry>
- [35] H.-J. Althaus *et al.* "Life Cycle Inventories of Chemicals: Data v2.0 (2007)."
- [36] R. Hischier, S. Hellweg, C. Capello und A. Primas, "Establishing Life Cycle Inventories of Chemicals Based on Differing Data Availability (9 pp)," *Int J Life Cycle Assessment*, Jg. 10, Nr. 1, S. 59–67, 2005, doi: 10.1065/lca2004.10.181.7.
- [37] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz und B. Weidema, "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology," *Int J Life Cycle Assessment*, Jg. 21, Nr. 9, S. 1218–1230, 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- [38] SICOMIN Composites. "Sicherheitsdatenblatt SICOMIN SR Firegreen 37." Zugriff am: 18. Juli 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.timeout.de/sicomin-sr-firegreen-37-5kg-selbstverloschendes-harzsystem-halogenfrei>
- [39] Time Out Composite oHG. "SICOMIN SR Firegreen 37, 5kg, selbstverlöschendes Harzsystem, halogenfrei." Zugriff am: 18. Juli 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.timeout.de/sicomin-sr-firegreen-37-5kg-selbstverloschendes-harzsystem-halogenfrei>
- [40] Time Out Composite oHG. "SICOMIN SD8202 Härter für SR8200, 0,93 kg, sehr langsamer Härter." Zugriff am: 18. Juli 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.timeout.de/sicomin-sd8202-haerter-fuer-sr8200-0-93-kg-sehr-langsamer-haerter>
- [41] B. Ellis, *Chemistry and Technology of Epoxy Resins*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993.
- [42] National Center for Biotechnology Information. "PubChem Verbindungszusammenfassung für CID 197114, 2-(Chloromethyl)oxirane;formaldehyde;phenol." [Online.] Verfügbar: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/197114>
- [43] ECHA. "ECHA CHEM - Echa Chemicals Database." [Online.] Verfügbar: <https://chem.echa.europa.eu/>
- [44] T. Meyer, Hg. *Handbook of polymer reaction engineering*. Weinheim: Wiley-VCH, 19XX-.
- [45] L. Pilato und L. A. Pilato, Hg. *Phenolic resins: a century of progress*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [46] D. L. Perry, *Handbook of Inorganic Compounds*. CRC Press, 2016.

- [47] R. Ochs, *Praktikum der Qualitativen Analyse*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1926.
- [48] Wiley-VCH, Hg. *Macromolecular engineering: Precise synthesis, materials properties, applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2007.
- [49] J. L. Murphy, *Additives for plastics handbook*, 2. Aufl. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2001.
- [50] PubChem. "Melamine cyanurate." Zugriff am: 12. Oktober 2025. [Online.] Verfügbar: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/93198>
- [51] H.-G. Elias, *Makromoleküle: Band 3: Industrielle Polymere und Synthesen*, 6. Aufl. Weinheim, New York: Wiley-VCH, 2001. [Online.] Verfügbar unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527626519>
- [52] SICOMIN Composites. "Sicherheitsdatenblatt SICOMIN SD8202." Zugriff am: 18. Juli 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.timeout.de/sicomин-sd8202-haerter-fuer-sr8200-0-93-kg-sehr-langsamer-haerter>
- [53] H.-G. Elias, *Makromoleküle*, 6. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2001.
- [54] OECD. "Final Assessment Report 3-Aminomethyl-3,5,5-trimethylcyclohexylamine CAS 2855-13-2." SIDS (Screening Information Dataset). Zugriff am: 23. Juli 2025.
- [55] K. Eller, E. Henkes, R. Rossbacher und H. Höke, "Amines, Aliphatic," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley, 2003.
- [56] M. Schwarz, A. Merkel und J.-J. Nitz, "Verfahren zur Herstellung von 3-cyano-3,5,5-trimethylcyclohexanon," EP 2721002B1, Apr 23, 2014.
- [57] C. J. Sullivan, A. Kuenz und K.-D. Vorlop, "Propanediols," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley, 2003, S. 1–15.
- [58] M. Ionescu, *Chemistry and technology of polyols for polyurethanes*. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire: A Smithers Group Company, 2016. [Online.] Verfügbar unter: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1237420>
- [59] M. Baerns *et al.*, *Technische Chemie*. Weinheim: Wiley-VCH, 2013. [Online.] Verfügbar unter: <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1823957>
- [60] P. Roose, K. Eller, E. Henkes, R. Rossbacher und H. Höke, "Amines, Aliphatic," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley, 2003, S. 1–55.
- [61] C. W. Wigbers, W. Mägerlein, T. Krug und J.-P. Melder, "Process for Preparing a Polyetheramine," US10414716B2.
- [62] B. Burton, D. Alexander, H. Klein, A. Garibay-Vasquez, A. Pekarik und C. Henkee. "Epoxy Formulations Using JEFFAMINE® Polyetheramines." Zugriff am: 5. Oktober 2025. [Online.] Verfügbar: https://polymerinnovationblog.com/wp-content/uploads/2020/08/Huntsman-epoxy_formulations_using_jeffamine_polyetheramines.pdf
- [63] Huntsman Corporation. "JEFFAMINE® T-403 Polyetheramine." Zugriff am: 5. Oktober 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.nmt.edu/academics/mtls/faculty/mccoy/docs2/chemistry/JEFFAMINE_T_403.pdf

- [64] Gurit. "ST 130FR: 130°C TG Fire retardant low smoke Sprint™." Order Code PA11-7954, PDS-ST130FR-5-0220. [Online.] Verfügbar: <https://www.gurit.com/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2022/08/ST-130FR.pdf>
- [65] Gurit. "2024-10-07 SDS Gurit SA 130FR Resin Film: Safety Data Sheet."
- [66] C. A. Wilkie, Hg. *Fire retardancy of polymeric materials*, 2. Aufl. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2010.
- [67] I. Hansen–Bruhn, J. Laura Craig, M. Hinge und T. R. Hull, "Ammonium polyphosphates: Correlating structure to application," *European Polymer Journal*, Jg. 223, S. 113644, 2025, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113644.
- [68] G. S. Liu und Y. L. Liu, "Selection of Dehydration Temperature to Prepare Ammonium Polyphosphate with Crystalline Form V by Phosphoric Acid Process," *AMR*, Jg. 668, S. 203–206, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.668.203.
- [69] S. Havelange *et al.*, "Phosphoric Acid and Phosphates," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley, 2003, S. 1–55.
- [70] ECHA. "Assessment of regulatory needs for Bisphenols." Zugriff am: 30. Juli 2025.
- [71] M. Binnewies, M. Finze, M. Jäckel, P. Schmidt, H. Willner und G. Rayner-Canham, *Allgemeine und anorganische Chemie*, 3. Aufl. (Lehrbuch). Berlin: Springer Spektrum, 2016.
- [72] H. Sitzmann, H.-J. Wölk, M. Groteklaes und J. Hartmann-Schreier, *Titandioxid*. Thieme Gruppe, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-20-01896>
- [73] European Commission. "European Platform on LCA | EPLCA." Zugriff am: 12. Oktober 2025. [Online.] Verfügbar: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.html>
- [74] Chem-Tremd L.P., Hg., "Zyvax® Fresh Start™: Wasserbasierter Form- und Fertigteil-Reiniger," Dez. 2021.
- [75] Chem-Tremd L.P., Hg., "Zyvax® PreFlight™: Wasserbasierter Formversiegler," Dez. 2021.
- [76] R. Pokorny, "Zyvax® Departure™: Wasserbasiertes semi-permanentes Trennmittel," Feb. 2025.
- [77] SICOMIN Composites, Hg., "SR FireGreen 37 / SD 820x: Bio-basierte Feuerhemmende Epoxydsysteme," Sep. 2020.
- [78] Gurit, Hg., "ST 130FR: 130°C TG FIRE RETARDANT LOW SMOKE SPRINT™," Rep. PDS-ST130FR-5-0220.