

Lösungsansatz für den Ersatz von beschichteten Blechtablaren zur Optimierung des PCF / LCA

Abschlussbericht EUT-P6-HS25



Abbildung 1: Symbolbild (eigene Darstellung)

Studenten	Pascal Limacher
Fachbetreuer/in	Meylan Grégoire, Projektcoach
Auftraggeber	Laube Christian, Leiter Entwicklung
Projektnummer	EUT-P6-HS25
Studiengang	Energie- und Umwelttechnik
Projektstart	22.09.2025
Projektende	22.03.2026

Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Technik
Windisch, März 2026

Management Summary

Ziel dieser Bachelorarbeit war die ökologische Bewertung alternativer Werkstoffe für ein Tablar der peka-metall AG mit dem Schwerpunkt auf der Reduktion des Product Carbon Footprint (PCF). Das bestehende Produkt besteht aus beschichtetem DC01-Stahl. Untersucht wurden als Alternativen ein Tablar aus Polypropylen (PP), eine Multiplex-Holzlösung sowie Varianten mit erhöhtem Recyclingstahlanteil. Die Analyse erfolgte mittels Life Cycle Assessment (LCA) in SimaPro auf Basis der Ecoinvent-Datenbank. Betrachtet wurden sowohl Cradle-to-Gate- als auch Cradle-to-Grave-Systemgrenzen. Als funktionelle Einheit diente ein Tablar mit identischer Tragfähigkeit und Geometrie. Die Ergebnisse zeigen, dass das heutige DC01-Stahltablar einen PCF von 3.17 kg CO₂-eq pro Tablar aufweist. Durch den Einsatz von Recyclingstahl kann dieser Wert auf 1.59 kg CO₂-eq reduziert werden, was einer Emissionsreduktion von rund 50 Prozent entspricht. Diese Optimierung erfordert keine grundlegenden Anpassungen am Produktdesign oder an der bestehenden Produktionsinfrastruktur und stellt somit eine unmittelbar umsetzbare Massnahme dar.

Ein Tablar aus Polypropylen verursacht mit 5.5 kg CO₂-eq im Cradle-to-Grave-Szenario deutlich höhere Emissionen. Haupttreiber sind die energieintensive Primärpolymerherstellung sowie die fossile Kohlenstofffreisetzung am Lebensende. Trotz potenzieller Vorteile in der Formfreiheit ist PP aus ökologischer Sicht keine geeignete Substitutionslösung. Die untersuchte Multiplex-Variante erreicht im Cradle-to-Gate-Vergleich 1.36 kg CO₂-eq und weist damit die geringste Klimawirkung auf. Dieser Vorteil ist primär auf die biogene Kohlenstoffspeicherung im Holz zurückzuführen. Die Umsetzung würde jedoch strukturelle Anpassungen der bestehenden Produktionsprozesse erfordern. Eine vollständige Materialsubstitution ist daher mit erhöhtem technischem und organisatorischem Aufwand verbunden.

Die Sensitivitätsanalyse bestätigt, dass der Recyclinganteil des eingesetzten Stahls den grössten Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Zwischen Primärstahl und Recyclingstahl ergeben sich signifikante Unterschiede im Treibhauspotenzial, während geometrische Anpassungen oder Transportvariationen einen vergleichsweise geringeren Einfluss aufweisen. Die Ergebnisse basieren auf modellierten Hintergrunddaten der Ecoinvent-Datenbank und unterliegen den üblichen Unsicherheiten von LCA-Modellen. Die relative Vorteilhaftigkeit von Recyclingstahl bleibt jedoch in sämtlichen Sensitivitätsbetrachtungen bestehen. Zusammenfassend zeigt die Untersuchung, dass die ökologische Optimierung des bestehenden Stahlkonzepts durch einen erhöhten Recyclinganteil die technisch und wirtschaftlich sinnvollste Lösung darstellt. Eine vollständige Materialsubstitution ist aus ökologischer Sicht nicht notwendig, um substantielle Emissionsreduktionen zu erzielen.

Inhaltsverzeichnis

Management Summary	2
Abbildungsverzeichnis.....	5
1 Ausgangslage und Problemstellung	6
2 Ziele und Rahmenbedingungen.....	8
2.1 Ziele.....	8
2.2 Nichtziele	8
3 Theoretische Grundlagen.....	10
3.1 Life Cycle Assessment (LCA).....	10
3.2 Product Carbon Footprint (PCF)	10
4 Projektbeschreibung und Datenbasis	12
4.1 Unternehmen und Produkt	12
4.2 Systemgrenzen und Betrachtungsrahmen	13
4.3 Datengrundlage	13
5 Methodik	14
5.1 Ziel und Vergleichskonzept	14
5.2 Referenz Produkt Metallische Werkstoffe (Stahl)	14
5.2.1 Referenz Material.....	15
5.2.2 Szenario A – DC01 auf Basis von Primärstahl	15
5.2.3 Szenario B – DC01 auf Basis von Recyclingstahl.....	16
5.2.4 Weiterverarbeitung – Walzprozess.....	17
5.2.5 Oberflächenbehandlung – Pulverbeschichtung	17
5.2.6 End-of-Life – Stahlrecycling	18
5.3 Bewertungskriterien	18
5.4 Modellierung in SimaPro	19
5.5 Annahmen und Limitationen.....	20
6 Untersuchung alternativer Werkstoffe.....	22
6.1 Polypropylen, (PP).....	22
6.1.1 Materialwahl.....	22
6.1.2 Modellierung in SimaPro	23
6.1.3 Mengenermittlung	23
6.1.4 Oberflächenbehandlung.....	24
6.1.5 End-of-Life-Szenario	25
6.1.6 Systemabgrenzung innerhalb der Modellierung	26

6.1.7	Ökologische Einordnung	27
6.2	Holzbaasierte Werkstoffe	28
6.2.1	Materialwahl	28
6.2.2	Modellierung in SimaPro	28
6.2.3	Mengenermittlung	29
6.2.4	Oberflächenbehandlung	30
6.2.5	End-of-Life-Szenario	30
6.2.6	Systemabgrenzung innerhalb der Modellierung	31
6.2.7	Ökologische Einordnung	31
6.3	Bewertung weiterer Werkstoffoptionen (ohne Modellierung)	32
6.3.1	Polyamid 6 (PA 6)	32
6.3.2	Polyvinylchlorid ohne Weichmacher (PVC-U).....	32
6.3.3	Polyethylen (PE)	33
6.3.4	Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (WPC).....	34
7	Ergebnisse	35
7.1	Ergebnisse ökologische Knappheit Cradle-to-Gate	35
7.2	Ergebnisse ökologische Knappheit Cradle-to-Grave	36
7.3	Ergebnisse Product Carbon Footprint (PCF) Cradle-to-Gate.....	37
7.4	Ergebnisse Product Carbon Footprint (PCF) Cradle-to-Grave.....	38
8	Diskussion.....	39
8.1	Heavy metals into water	39
8.2	Global warming	39
8.3	Energy resources	40
8.4	Carcinogenic substances into air.....	41
8.5	Product Carbon Footprint (PCF)	42
8.6	Unterschied Cradle-to-Gate und Cradle-to-Grave	42
8.7	Einordnung im technischen und unternehmerischen Kontext	43
8.8	Einordnung der Ergebnisse in den Stand der Forschung	44
8.9	Nachfrage bei Vertreibern	45
9	Handlungsempfehlung.....	46
10	Fazit.....	47
11	Ausblick	48
12	Ehrlichkeitserklärung.....	49
13	Hilfsmittelverzeichnis	49
14	Anhang	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Symbolbild (eigene Darstellung)	1
Abbildung 2: peka-metall AG	12
Abbildung 3: Symbolbild Stahl (eigene Darstellung)	15
Abbildung 4: Symbolbild PP (eigene Darstellung).....	22
Abbildung 5: Symbolbild Sperrholz (eigene Darstellung)	28
Abbildung 6: Übernommene Darstellung von plasticker.de.....	32
Abbildung 7: Ergebnisdarstellung der LCA Cradle-to-Gate	35
Abbildung 8: Ergebnisdarstellung der LCA Cradle-to-Grave	36
Abbildung 9: PCF-Ergebnisse Cradle-to-Gate	37
Abbildung 10: PCF-Ergebnisse Cradle-to-Grave	38

1 Ausgangslage und Problemstellung

Die Firma peka-metall AG entwickelt und produziert hochwertige Stauraumlösungen für Küchen. Ein zentraler Bestandteil dieser Systeme sind beschichtete Tablare aus Stahlblech. Dieses Material erfüllt hohe Anforderungen an Stabilität, Langlebigkeit und Qualitätskonstanz und ist im bestehenden Produktsystem fest etabliert. Gleichzeitig wächst im industriellen Umfeld der Druck, Produkte nicht nur funktional und wirtschaftlich, sondern auch unter ökologischen Gesichtspunkten zu bewerten und weiterzuentwickeln. Für peka-metall AG ergibt sich daraus die Herausforderung, die Umweltwirkungen ihrer Produkte gezielt zu reduzieren, ohne dabei die funktionalen, gestalterischen und produktionstechnischen Anforderungen wesentlich zu beeinträchtigen.

Die ökologische Bewertung von Produkten gewinnt in der industriellen Produktentwicklung zunehmend an Bedeutung. Insbesondere bei Bauteilen aus Metall und Kunststoff entstehen relevante Umweltwirkungen nicht erst in der Nutzungsphase, sondern bereits in der Rohstoffbereitstellung, der Materialherstellung und der Verarbeitung. Gerade die Materialwahl ist dabei von zentraler Bedeutung, da sie wesentliche Produkteigenschaften wie Ressourcenbedarf, Energieeinsatz, Verarbeitbarkeit und Verwertbarkeit am Lebensende massgeblich mitbestimmt. Unterschiedliche Werkstoffe und Herstellverfahren können deshalb trotz gleicher Funktion zu deutlich unterschiedlichen Umweltprofilen führen. Life Cycle Assessments ermöglichen es, diese Umweltwirkungen systematisch über den gesamten Lebenszyklus zu erfassen und die wesentlichen Belastungstreiber zu identifizieren. Damit schaffen sie eine fundierte Grundlage, um Materialien und Prozesse nicht nur technisch und wirtschaftlich, sondern auch ökologisch zu bewerten.

Neben internen Nachhaltigkeitszielen gewinnen auch externe Anforderungen an Umwelttransparenz und Emissionsbewertung zunehmend an Bedeutung. Mit der Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) hat die Europäische Union einen Rahmen geschaffen, um für Produkte künftig weitergehende Anforderungen an Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Umweltinformationen festzulegen. [1]

Ergänzend dazu zeigen freiwillige Rahmenwerke wie die Science Based Targets initiative (SBTI), dass Unternehmen ihre Treibhausgasemissionen zunehmend systematisch erfassen und reduzieren müssen. [2]

Vor diesem Hintergrund gewinnt die ökologische Bewertung von Produkten nicht nur als Analyseinstrument, sondern auch als strategische Entscheidungsgrundlage für die Materialwahl und die zukünftige Produktentwicklung an Bedeutung.

Die bestehende Literatur zeigt, dass im untersuchten Sektor bereits mehrere zentrale Einflussfaktoren vertieft analysiert wurden. Dazu zählen insbesondere die Umweltwirkungen der Materialbereitstellung von Stahl, der Einfluss unterschiedlicher Herstellrouten und Recyclinganteile sowie die Bedeutung der Oberflächenbehandlung. Für kaltgewalzte Stahlbleche liegen Environmental Product Declarations vor, welche die Umweltwirkungen der Materialbereitstellung transparent ausweisen und damit eine wichtige Grundlage für ökobilanzielle Bewertungen von Stahlprodukten schaffen. Die herangezogene EPD für kaltgewalzten DC01-Stahl nach EN 10130 weist für eine Tonne Material eine Klimawirkung von 2400 kg CO₂-eq aus und zeigt zudem, dass das Produkt teilweise aus recyceltem Stahl besteht. Bereits auf dieser Stufe wird deutlich, dass dem eingesetzten Vormaterial eine zentrale Bedeutung für die Gesamtbilanz zukommt. [3]

Darüber hinaus wurde der Einfluss von Stahlrecycling auf die Klimawirkung mehrfach untersucht. Die ausgewertete Fraunhofer-Studie zeigt, dass sich die Emissionen der Hochofenroute und der Elektrostrahlroute deutlich unterscheiden. Für Deutschland werden spezifische Emissionen von 1,744 t CO₂ pro Tonne Rohstahl für die Hochofenroute und 0,395 t CO₂ pro Tonne Rohstahl für den Elektrolichtbogenofen genannt. Zudem weist die Studie darauf hin, dass durch die Produktion von 12,6 Mio. Tonnen Rohstahl über die Elektrostrahlroute in Deutschland rund 17 Mio. Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr eingespart werden. Darüber hinaus kann pro Tonne eingesetztem Stahlschrott eine Einsparung von rund 1,5 Tonnen CO₂-Äquivalenten, 13,4 GJ-Primärenergie und 1,4 Tonnen Eisenerz erreicht werden. Daraus wird ersichtlich, dass nicht nur die Materialwahl an sich, sondern auch die zugrunde liegende Herstellroute und der Einsatz von Sekundärmaterial einen erheblichen Einfluss auf die Umweltwirkung von Stahlprodukten haben. [4]

Auch die Bedeutung der Oberflächenbehandlung wurde bereits untersucht. Die ECCA-Studie zum Haushaltsgerätebereich vergleicht vorbeschichteten und nachträglich beschichteten Stahl über den gesamten Lebenszyklus und verfolgt dabei ausdrücklich das Ziel, Umweltprofile zu vergleichen, Hotspots zu identifizieren und Verbesserungsbereiche abzuleiten. Die Untersuchung basiert auf einer Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus und umfasst unter anderem Rohstoffgewinnung, Stahlherstellung, Verzinkung, Beschichtung, Umformung, Transporte und End-of-Life. Die Ergebnisse zeigen, dass vorbeschichteter Stahl gegenüber nachträglich beschichtetem Stahl in nahezu allen untersuchten Umweltkategorien geringere Umweltwirkungen aufweist. Als wesentliche Ursachen nennt die Studie den geringeren Energiebedarf bei der Lackapplikation, den geringeren Farbmittelverbrauch sowie eine weniger intensive Vorbehandlung beim Coil-Coating. Zudem blieben die Schlussfolgerungen auch in Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen stabil, sowohl bei veränderten Upstream-Daten und Recyclingraten als auch bei der Anwendung einer alternativen Wirkungsabschätzungsmethode. Damit wird deutlich, dass die Umweltbilanz eines Stahlprodukts nicht allein durch das Grundmaterial bestimmt wird, sondern auch wesentlich von der gewählten Oberflächenbehandlung abhängt. [5]

Zusammenfassend zeigt die Literatur, dass die Umweltwirkungen in diesem Sektor insbesondere durch das eingesetzte Vormaterial, den Anteil an Recyclingmaterial, die gewählte Herstellroute sowie die nachgelagerten Verarbeitungs- und Beschichtungsprozesse geprägt werden. Die zentralen Einflussgrößen sind damit grundsätzlich bekannt. Eine produktspezifische Bewertung für die bei peka-metall AG eingesetzten beschichteten Tablett unter den konkreten Randbedingungen des Unternehmens fehlt jedoch bislang. Genau hier setzt die vorliegende Arbeit an.

2 Ziele und Rahmenbedingungen

Im Folgenden werden die Projektziele gemäss FHNW-Projektauftrag sowie die wesentlichen Rahmenbedingungen dargestellt. Die erhobenen Unternehmensdaten sind nicht vertraulich und dürfen nur in aggregierter Form veröffentlicht werden. Der Bearbeitungszeitraum der Arbeit war zwischen KW 38 (22.09.2025) bis KW 12 (22.03.2026).

2.1 Ziele

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, die Umweltwirkungen der aktuell eingesetzten beschichteten Blechtafeln der peka-metall AG systematisch zu erfassen und zu bewerten. Zu diesem Zweck wird zunächst die ökologische Gesamtbilanz des bestehenden Produkts ermittelt. Darauf aufbauend wird der daraus resultierende CO₂-Fussabdruck bestimmt, um die wesentlichen Einflussfaktoren entlang des Lebenszyklus zu identifizieren. Dadurch soll aufgezeigt werden, in welchen Lebenszyklusphasen und durch welche Prozesse die grössten Umweltwirkungen verursacht werden und an welchen Stellen ein ökologisches Verbesserungspotenzial besteht.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Entwicklung von zwei bis drei realistischen Massnahmen zur Reduktion der Umweltwirkungen des untersuchten Tablars. Diese sollen nicht nur aus ökologischer Sicht relevant sein, sondern auch im betrieblichen Kontext der peka-metall AG grundsätzlich realisierbar bleiben. Die erarbeiteten Massnahmen werden anschliessend hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkung bewertet und miteinander verglichen, um fundierte Aussagen über ihr jeweiliges Verbesserungspotenzial treffen zu können.

Darüber hinaus soll die Arbeit eine nachvollziehbare Entscheidungsgrundlage für die peka-metall AG schaffen. Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen in einem Abschlussbericht zusammengeführt. Ergänzend sollen, soweit dies im Rahmen der Arbeit sinnvoll und mit den verfügbaren Daten möglich ist, weitere Potenziale im Bereich Materialien und Verfahren aufgezeigt werden. Die Arbeit soll damit einen Beitrag dazu leisten, ökologische Überlegungen künftig stärker in die Produktentwicklung und Materialwahl einzubeziehen.

2.2 Nichtziele

Nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit sind experimentelle Materialtests, physische Versuche oder eigene Labormessungen. Die Untersuchung basiert auf vorhandenen Unternehmensdaten, Literaturquellen, technischen Annahmen sowie der Modellierung und Auswertung in SimaPro. Entsprechend werden keine werkstofftechnischen Prüfungen wie Festigkeits-, Dauerhaftigkeits-, Verschleiss- oder Oberflächenuntersuchungen durchgeführt. Auch eine praktische Validierung der betrachteten Materialalternativen durch Versuchsreihen erfolgt nicht.

Ebenfalls nicht Gegenstand der Arbeit ist die konstruktive oder technische Entwicklung neuer Produktlösungen. Zwar werden mögliche Material- und Verfahrensalternativen untersucht und hinsichtlich ihrer Umweltwirkung bewertet, jedoch erfolgt keine detaillierte technische Ausarbeitung im Sinne einer fertigungsgerechten Konstruktion, Bauteilauslegung oder produktionsreifen Lösung. Aspekte wie Werkzeugauslegung, konstruktive Detailoptimierung, Serieneinführung oder technische Freigabeprozesse werden daher nicht vertieft behandelt.

Auch der Bau von Prototypen sowie eine industrielle Umsetzung der untersuchten Varianten sind nicht Teil des Projekts. Die Arbeit konzentriert sich auf die ökobilanzielle Bewertung des heutigen Stahltablars sowie auf den Vergleich möglicher Optimierungsmassnahmen und Alternativen. Wirtschaftliche Gesamtbewertungen, detaillierte Investitionsrechnungen oder umfassende Marktanalysen werden ebenfalls nicht durchgeführt, da der Fokus auf der Analyse der Umweltwirkungen und der Ableitung ökologischer Handlungsempfehlungen liegt.

3 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen definieren den methodischen Rahmen für die ökologische Bewertung der untersuchten Tablar Varianten. Im Zentrum stehen die Methodik des Life Cycle Assessment (LCA) sowie der Product Carbon Footprint (PCF) als zentrale Bewertungskennzahl. Die nachfolgenden Abschnitte erläutern die normativen Grundlagen, systemischen Abgrenzungen und methodischen Prinzipien, welche für die konsistente Durchführung und Interpretation der Analyse entscheidend sind.

3.1 Life Cycle Assessment (LCA)

Das Life Cycle Assessment (LCA), auch Ökobilanz genannt, ist eine standardisierte Methode zur Bewertung der Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen von Produkten, Prozessen oder Dienstleistungen über deren gesamten Lebenszyklus. Dabei werden sämtliche relevanten Phasen von der Rohstoffgewinnung über Herstellung und Nutzung bis hin zur Entsorgung oder zum Recycling berücksichtigt. [6]

Die methodischen Grundlagen des LCA sind in den Normen ISO 14040 und ISO 14044 festgelegt. Während ISO 14040 die Grundsätze und den Rahmen der Ökobilanz beschreibt, enthält ISO 14044 die Anforderungen und Leitlinien für deren Durchführung. Die Methodik gliedert sich in vier aufeinander aufbauende Phasen: die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung sowie die Interpretation der Ergebnisse. [6], [7]

Innerhalb der definierten Systemgrenzen werden sämtliche relevanten Input- und Outputströme eines Produktsystems erfasst und den entsprechenden Wirkungskategorien zugeordnet. Die Wahl der Systemgrenzen, beispielsweise Cradle-to-Gate oder Cradle-to-Grave, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse und muss daher eindeutig festgelegt werden. Ein zentrales Element der Ökobilanz ist zudem die funktionelle Einheit. Sie dient als vergleichbare Bezugsgrösse und stellt sicher, dass unterschiedliche Material- oder Konstruktionsvarianten hinsichtlich derselben Funktion sachlich korrekt miteinander verglichen werden können. [6], [7]

Für die Aussagekraft der Ergebnisse ist darüber hinaus die Qualität der verwendeten Daten von zentraler Bedeutung. Insbesondere Hintergrunddaten aus Datenbanken wie Ecoinvent unterliegen modellbedingten Unsicherheiten, ermöglichen jedoch gleichzeitig eine konsistente und transparente Abbildung komplexer Produktions-, Transport- und Entsorgungssysteme. Das LCA bildet damit eine fundierte methodische Grundlage, um Umweltwirkungen systematisch zu analysieren und verschiedene Produkt- oder Materialoptionen nachvollziehbar miteinander zu vergleichen. [7], [8]

3.2 Product Carbon Footprint (PCF)

Der Product Carbon Footprint (PCF) beschreibt die gesamten Treibhausgasemissionen eines Produkts innerhalb der definierten Systemgrenzen. Methodisch stellt er eine spezialisierte Auswertung einer LCA dar, welche sich ausschliesslich auf die Klimawirkung konzentriert. Die Berechnung erfolgt über die Wirkungskategorie Global Warming Potential (GWP 100). [8]

Dabei werden alle relevanten Treibhausgase, beispielsweise CO₂, CH₄ oder N₂O, anhand ihres relativen Treibhauspotenzials auf einen Zeitraum von 100 Jahren in CO₂-eq

umgerechnet und aggregiert ausgewiesen. Das Ergebnis wird in Kilogramm CO₂-eq pro funktioneller Einheit angegeben. Im Unterschied zur vollständigen Ökobilanz berücksichtigt der PCF keine weiteren Wirkungskategorien wie Versauerung, Eutrophierung oder Ressourcenverbrauch. Er eignet sich insbesondere für Entscheidungsprozesse mit Fokus auf Klimaschutz und Emissionsreduktion. Im Rahmen dieser Arbeit dient der PCF als zentrale Bewertungskennzahl zur vergleichenden Beurteilung des untersuchten Tablars. Ergänzend zur umfassenderen LCA ermöglicht er eine klare Fokussierung auf das Treibhauspotenzial als strategisch relevante Umweltkennzahl.

4 Projektbeschreibung und Datenbasis

Die vorliegende Untersuchung basiert auf einer klar definierten Abgrenzung des betrachteten Produktsystems sowie einer transparent dokumentierten Datengrundlage. Durch die präzise Festlegung der Systemgrenzen, der funktionellen Einheit und der zugrunde liegenden Datenquellen wird eine konsistente und reproduzierbare Modellierung gewährleistet.

4.1 Unternehmen und Produkt



Abbildung 2: peka-metall AG

Die peka-metall AG ist ein Schweizer Familienunternehmen mit Sitz in Mosen im Kanton Luzern und wurde 1964 gegründet. Das Unternehmen entwickelt und produziert funktionale Beschlags- und Auszugssysteme für die Möbel- und Küchenindustrie und hat sich auf hochwertige Innenausstattungs-lösungen spezialisiert. Das Produktportfolio umfasst unter anderem Auszugssysteme, Ecklösungen sowie weitere Komponenten für die Organisation von Küchen- und Stauraumsystemen. Die Produkte werden international vertrieben und sind in zahlreichen Märkten etabliert. Charakteristisch für das Unternehmen ist eine hohe Fertigungstiefe in der Metallverarbeitung. Zentrale Produktionsschritte wie Stanzen, Biegen, Schweißen sowie Oberflächenbehandlungen, insbesondere Pulverbeschichtungen, werden im eigenen Werk durchgeführt. Dadurch besteht eine direkte Kontrolle über Materialeinsatz, Energieverbrauch und Prozessqualität, was im Kontext einer ökologischen Bewertung von besonderer Bedeutung ist.

Im Zentrum der vorliegenden Untersuchung steht ein Tablar, das als tragendes und funktionales Element innerhalb eines Auszugssystems eingesetzt wird. Das Bauteil übernimmt eine strukturgebende Funktion und ist für die Stabilität sowie die langfristige Gebrauchstauglichkeit des Gesamtsystems entscheidend. Entsprechend bestehen definierte Anforderungen hinsichtlich mechanischer Belastbarkeit, Verformungssteifigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Oberflächenqualität. Die aktuelle Ausführung besteht aus beschichtetem Stahl, welcher zunächst mechanisch bearbeitet und anschliessend pulverbeschichtet wird. Materialeinsatz, Produktionsprozesse sowie Oberflächenbehandlung sind dabei zentrale Einflussfaktoren im Hinblick auf Umweltwirkungen und CO₂-eq-Emissionen. Das Tablar dient in dieser Arbeit als Referenzprodukt und bildet die Grundlage für die ökobilanzielle Analyse sowie den Vergleich möglicher Material- und Prozessvarianten im Rahmen der Life Cycle Assessment.

4.2 Systemgrenzen und Betrachtungsrahmen

Für die vorliegende Untersuchung wird die Systemgrenze primär als Cradle-to-Gate definiert. Berücksichtigt werden sämtliche relevanten Prozesse von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung der eingesetzten Ausgangsmaterialien bis hin zur Verarbeitung im Werk der peka-metall AG. Dazu zählen insbesondere die Herstellung der jeweils eingesetzten Werkstoffe, die Transportprozesse der Vorprodukte sowie die anschliessende mechanische Bearbeitung und gegebenenfalls Oberflächenbehandlung der untersuchten Produktvarianten. Die Festlegung der Systemgrenze erfolgt in Anlehnung an die methodischen Grundsätze der Ökobilanz gemäss ISO 14040 und ISO 14044. [6], [7]

Nicht Bestandteil der Hauptanalyse sind die Nutzungsphase des Produkts sowie nachgelagerte Entsorgungs- oder Verwertungsprozesse. Diese werden ergänzend betrachtet, jedoch nicht in die zentrale Vergleichsrechnung integriert. Der Fokus liegt somit auf den material- und produktionsbedingten Umweltwirkungen, da diese für die Bewertung unterschiedlicher Material- und Prozessoptionen massgebend sind. Die Bewertung erfolgt produktbezogen. Als funktionelle Einheit dient ein einzelnes Tablar in seiner jeweiligen Ausführung. Sämtliche Material- und Energieflüsse werden auf diese Bezugsgrösse normiert, wodurch eine konsistente und vergleichbare Darstellung der Ergebnisse gewährleistet wird. Die funktionelle Einheit sowie die transparente Abgrenzung des betrachteten Produktsystems entsprechen den zentralen methodischen Elementen einer normgerechten Ökobilanzierung. [6], [7]

4.3 Datengrundlage

Die Datengrundlage setzt sich aus Primär- und Sekundärdaten zusammen.

Primärdaten stammen von peka-metall AG und umfassen insbesondere:

- Bauteilgewicht
- Materialeinsatz
- Prozessschritte
- Oberflächenbehandlung
- interne Produktionsinformationen

Für vorgelagerte Prozesse wurden Sekundärdaten aus der Ecoinvent-Datenbank verwendet. Die Auswahl erfolgte unter Berücksichtigung:

- geografischer Repräsentativität (Europa bzw. Schweiz)
- technologischer Repräsentativität (aktueller Stand der Technik)
- zeitlicher Aktualität der Datensätze

Fehlende Detailinformationen, beispielsweise Transportdistanzen oder spezifische Recyclinganteile, wurden durch transparente Annahmen ergänzt. Dabei wurde auf realistische und konservative Werte zurückgegriffen. Die Kombination aus betriebsspezifischen Primärdaten und standardisierten Hintergrunddaten gewährleistet eine belastbare Modellbasis. Die Ergebnisse unterliegen den üblichen modellbedingten Unsicherheiten von LCA-Studien, insbesondere hinsichtlich der Hintergrunddatensätze.

5 Methodik

Die methodische Umsetzung der Untersuchung erfolgt durch die Modellierung der definierten Produktvarianten in der Software SimaPro. Auf Grundlage der zuvor festgelegten Systemgrenzen und der erhobenen Datengrundlage werden die relevanten Material- und Prozessketten strukturiert abgebildet und miteinander verknüpft. Die Auswahl geeigneter Hintergrunddatensätze, die Integration von Energie- und Transportprozessen sowie die Berücksichtigung von Recyclingstrukturen erfolgen entsprechend den definierten Rahmenbedingungen. Die Wirkungsabschätzung erfolgt auf Basis der gewählten Impact-Assessment-Methoden innerhalb von SimaPro unter konsistenter Anwendung des Cut-off-Systemmodells. Der Product Carbon Footprint wird dabei als aggregierte Klimawirkung in Kilogramm CO₂-eq ausgewiesen. Durch die transparente Dokumentation der Modellstruktur und der getroffenen Annahmen wird die Nachvollziehbarkeit und Konsistenz der Ergebnisse sichergestellt.

5.1 Ziel und Vergleichskonzept

Ziel der Untersuchung ist die strukturierte Analyse und der Vergleich unterschiedlicher Material- und Prozessvarianten eines funktional identischen Produkts hinsichtlich ihrer Klimawirkung. Neben der Ermittlung des aggregierten Product Carbon Footprint liegt der Schwerpunkt auf der Identifikation und Bewertung der einzelnen Emissionsbeiträge entlang der betrachteten Prozesskette. Dadurch sollen wesentliche Einflussfaktoren und Optimierungspotenziale innerhalb der Material- und Produktionsstruktur sichtbar gemacht werden. Das Vergleichskonzept basiert auf einer einheitlichen funktionellen Einheit sowie konsistent definierten Systemgrenzen. Die funktionelle Vergleichbarkeit der untersuchten Varianten bezieht sich auf dieselbe Anwendung, Geometrie und Zielnutzung des Tablars. Für alternative Werkstoffe wie Polypropylen und Sperrholz wurde die funktionelle Gleichwertigkeit jedoch nicht durch konstruktive Detailauslegung, mechanische Berechnung oder physische Versuche nachgewiesen, sondern im Rahmen dieser Arbeit auf Basis fachlich begründeter Annahmen angenähert. Die Ergebnisse sind daher als ökobilanzielle Vergleichsanalyse unter angenommener funktioneller Gleichwertigkeit zu verstehen und nicht als abschliessender Nachweis der technischen Austauschbarkeit aller Varianten.[6], [7]

5.2 Referenz Produkt Metallische Werkstoffe (Stahl)

Die funktionelle Einheit der Untersuchung ist ein Einhängetablar Libell Hochschrank Standard (Elementbreite EB 300, Breite B = 250 mm, Tiefe T = 468 mm, Höhe H = 92 mm) mit einer realen Bauteilmasse von 1.30 kg im pulverbeschichteten Zustand. Diese Bauteilmasse dient als mengenmässige Referenzgrösse für sämtliche Vergleichsvarianten. Alle alternativen Materialoptionen werden auf eine funktional äquivalente Ausführung dieses Tablars normiert.

Stahl stellt den bestehenden Referenzwerkstoff des untersuchten Produkts dar und bildet somit den Ausgangspunkt der Analyse. Das Tablar wird aus kaltgewalztem Stahlblech gefertigt und anschliessend umgeformt sowie pulverbeschichtet. Aufgrund seiner hohen mechanischen Festigkeit, Formstabilität und Dauerhaftigkeit ist Stahl für tragende, dünnwandige Blechbauteile geeignet, weist jedoch einen energieintensiven Herstellungsprozess auf. Im Rahmen der Lebenszyklusanalyse wird die gesamte Prozesskette von der Rohstahlproduktion über die Weiterverarbeitung bis zur Oberflächenbehandlung modelliert, um die ökologische

Ausgangssituation transparent abzubilden. Die Geometrie wurde nicht angepasst, um eine direkte Vergleichbarkeit der Materialvarianten sicherzustellen.

5.2.1 Referenz Material



Abbildung 3: Symbolbild Stahl (eigene Darstellung)

Für das Referenzprodukt wurde DC01-Stahl verwendet. Dabei handelt es sich um einen unlegierten Qualitätsstahl für Kaltumformanwendungen, der aufgrund seiner guten Umformeigenschaften und gleichmässigen Oberflächenbeschaffenheit häufig für dünnwandige Blechbauteile eingesetzt wird. Die Wahl dieses Werkstoffs entspricht dem bestehenden Produktdesign und bildet somit den realen Ausgangszustand der Untersuchung ab. [9]

Zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit und zur Verbesserung der Oberflächenqualität wird das Bauteil pulverbeschichtet. Diese Oberflächenbehandlung wurde in der Modellierung berücksichtigt, da sie sowohl material- als auch energiebezogene Prozessschritte umfasst und damit einen messbaren Einfluss auf die Umweltwirkungen hat.

5.2.2 Szenario A – DC01 auf Basis von Primärstahl

Im Szenario A wird der Werkstoff DC01 vollständig auf Basis von primär erzeugtem Stahl modelliert. Ziel dieses Szenarios ist die Abbildung eines Referenzfalls, in dem die Stahlherstellung ausschliesslich über die konventionelle Hochofen-Konverter-Route erfolgt. Zur Modellierung der Materialbereitstellung wurde der Datensatz

- steel, low-alloyed {GLO} | market for | Cut-off, U [10]

verwendet. Dieser repräsentiert die globale durchschnittliche Produktion von niedriglegiertem Stahl und umfasst sämtliche vorgelagerten Prozesse der Primärroute. Dazu zählen insbesondere die Eisenerzgewinnung, die Koksherstellung, der Hochofenprozess zur Roheisenerzeugung sowie der anschliessende Sauerstoffkonverter zur Rohstahlproduktion (BF-BOF-Verfahren). Im Gegensatz zur Recyclingvariante wird in diesem Szenario kein Elektroofenprozess auf Basis von Stahlschrott berücksichtigt. Der eingesetzte Stahl stammt vollständig aus primärer Rohstoffgewinnung, wodurch die energie- und emissionsintensiven Prozessschritte der Erzreduktion vollständig im System enthalten sind.

Durch die Verwendung eines globalen Markt-Datensatzes wird eine durchschnittliche internationale Produktionsstruktur abgebildet. Zusätzliche regionale Beschaffungsprozesse oder transportspezifische Annahmen wurden nicht modelliert. Dieses Szenario dient als Referenz zur Bewertung der Umweltwirkungen eines vollständig primär erzeugten Stahlprodukts und bildet die emissionsintensivere Herstellungsrouten innerhalb der untersuchten Stahlvarianten ab.

5.2.3 Szenario B – DC01 auf Basis von Recyclingstahl

Im Recyclingstahl-Szenario wurde kein Markt-Datensatz („market for steel“) verwendet, da in der ecoinvent-Datenbank kein passender „market for“-Datensatz für die gewählte Recyclingroute im Elektroofen (EAF) verfügbar ist. Stattdessen wurde der Produktionsdatensatz

- steel production, electric, low-alloyed {CH} | Cut-off, U [11]

Dieser Datensatz bildet ausschliesslich den industriellen Herstellungsprozess im Elektroofen (EAF) ab. Enthalten sind dabei:

- Einsatz und Aufbereitung von Stahlschrott
- elektrische Einschmelzung im Lichtbogenofen
- metallurgische Nachbehandlung
- prozessbedingte Emissionen
- energierelevante Vorketten

Nicht enthalten sind jedoch marktbezogene Distributionsstrukturen oder durchschnittliche Transportleistungen zwischen Produktions- und Verarbeitungsstandorten. Im Gegensatz dazu beinhalten „market for“-Datensätze typischerweise aggregierte Lieferstrukturen inklusive durchschnittlicher Transportanteile innerhalb der jeweiligen Region. Durch die bewusste Wahl eines Produktionsdatensatzes entfällt diese implizite Transportabbildung. Um eine konsistente Systemabgrenzung sicherzustellen, wurde der Transport des Stahlmaterials daher explizit modelliert. Hierzu wurde der Prozess

- transport, freight, lorry ... | Cut-off, U [12]

verwendet. Die Transportleistung wurde in Tonnenkilometern (tkm) berechnet und basiert auf der eingesetzten Stahlmasse sowie einer definierten Transportdistanz.

Durch diese explizite Modellierung wird:

- eine transparente Trennung zwischen Produktion und Distribution erreicht,
- eine potenzielle Doppelzählung vermieden,
- sowie die Vergleichbarkeit mit anderen Materialvarianten sichergestellt.

Im Primärstahl-Szenario wurde hingegen ein globaler Markt-Datensatz verwendet, in welchem durchschnittliche Distributionsanteile bereits integriert sind. Eine zusätzliche Transportmodellierung wäre dort methodisch inkonsistent gewesen. Die gewählte Vorgehensweise stellt somit sicher, dass beide Szenarien eine klar definierte und kontrollierte Systemgrenze aufweisen und Unterschiede in den Ergebnissen ausschliesslich auf die jeweilige Herstellungsrouten zurückzuführen sind.

5.2.4 Weiterverarbeitung – Walzprozess

Zur Abbildung der Herstellung des eingesetzten Stahlblechs wurde in beiden Szenarien der Datensatz

- hot rolling, steel {Europe without Austria} | Cut-off, U [13]

verwendet. Dieser Datensatz repräsentiert den industriellen Warmwalzprozess, bei dem zuvor hergestellter Rohstahl zu Flacherzeugnissen mit definierter Dicke umgeformt wird. Der Prozess umfasst das Wiedererwärmen des Vormaterials (z. B. Brammen), die mehrstufige thermomechanische Umformung in Walzgerüsten sowie die anschliessende Kühlung.

Im Datensatz enthalten sind insbesondere:

- Energieeinsätze für Ofen- und Walzaggregate
- Brennstoffe zur Wiedererwärmung des Vormaterials
- Strom für Antriebe, Fördertechnik und Hilfsaggregate
- Hilfsstoffe wie Walzemulsionen und Kühlmedien
- prozessbedingte Emissionen aus Verbrennungs- und Umformprozessen

Nicht enthalten sind nachgelagerte spezifische Bauteilumformungen (z. B. Tiefziehen oder Abkanten), da diese separate Verarbeitungsschritte darstellen und im Verhältnis zur Stahlherstellung einen deutlich geringeren Energieanteil aufweisen. Der Warmwalzprozess stellt einen wesentlichen Zwischenschritt zwischen Rohstahlproduktion und weiter verarbeitbarem Blech dar und ist daher in beiden Stahl-Szenarien identisch modelliert. Dadurch wird gewährleistet, dass Unterschiede in den Ergebnissen ausschliesslich aus der jeweiligen Stahlherstellungsrouten resultieren und nicht aus nachgelagerten Verarbeitungsschritten.

5.2.5 Oberflächenbehandlung – Pulverbeschichtung

Zur Abbildung der Oberflächenbehandlung wurde in beiden Stahl-Szenarien der Datensatz

- powder coat, steel {RER} | Cut-off, U [14]

verwendet. Dieser Datensatz repräsentiert die industrielle Pulverbeschichtung von Stahlbauteilen im europäischen Durchschnitt. Der Prozess umfasst sowohl die Herstellung des Beschichtungspulvers als auch dessen Applikation und Aushärtung.

Im Datensatz enthalten sind insbesondere:

- Herstellung des Pulverlacks (Harzsysteme, Additive, Pigmente)
- elektrostatische Applikation des Pulvers
- Energieeinsatz der Beschichtungsanlage
- thermischer Einbrennprozess zur Aushärtung
- prozessbedingte Emissionen aus Energieeinsatz und Materialherstellung

Der Einbrennprozess stellt den energetisch dominanten Schritt dar, da das beschichtete Bauteil auf erhöhte Temperaturen erwärmt werden muss, um eine dauerhafte Vernetzung der

Beschichtung zu gewährleisten. Nicht enthalten sind mechanische Vorbehandlungen wie Strahlen oder separate chemische Vorreinigungsbäder, da diese im gewählten Datensatz nicht separat ausgewiesen sind und für beide Stahl-Szenarien identisch angenommen werden. Die Pulverbeschichtung wurde in beiden Stahlvarianten unverändert modelliert, da Geometrie, Oberfläche und Beschichtungsdicke identisch sind. Dadurch wird sichergestellt, dass Unterschiede zwischen Szenario A und B ausschliesslich aus der jeweiligen Stahlherstellungsrouten resultieren.

5.2.6 End-of-Life – Stahlrecycling

Für das Lebensende des Stahl-Tablars wurde ein Recyclingpfad über den Datensatz

- Iron scrap, sorted, pressed {CH} | tinplate scrap, sorted to generic market for iron scrap, sorted, pressed | Cut-off, U [15]

modelliert. Dieser Datensatz repräsentiert die Bereitstellung von aufbereitetem Eisenschrott (gepresst, sortiert) als Sekundärrohstoff für den weiteren Einsatz in der Stahlproduktion. Abgebildet wird dabei der Zustand des Materials nach Sammlung und mechanischer Aufbereitung.

Der Datensatz folgt der Cut-off-Systematik der ecoinvent-Datenbank. Dabei gilt:

- Das betrachtete Produktsystem trägt die Aufwendungen bis zum Punkt der Schrottbereitstellung.
- Das Recyclingmaterial verlässt das System ohne Gutschrift für die Substitution von Primärstahl.
- Die Umweltlasten der weiteren Stahlherstellung aus dem Sekundärmaterial werden dem nachfolgenden Produktsystem zugerechnet.

Es erfolgt somit keine direkte Anrechnung einer Primärstahl-Substitution im untersuchten System. Stahl weist eine sehr hohe Recyclingquote auf und kann ohne relevante Qualitätsverluste mehrfach wiederverwertet werden. Die Modellierung über einen Schrottdatensatz im europäischen bzw. schweizer Kontext stellt daher eine realistische Abbildung des End-of-Life-Szenarios für ein metallisches Bauteil dar. Da in beiden Szenarien (Primärstahl und Recyclingstahl) derselbe End-of-Life-Datensatz verwendet wird, beeinflusst dieser Prozess nicht die Differenz zwischen Szenario A und B, sondern lediglich die absolute Höhe der Umweltwirkungen.

5.3 Bewertungskriterien

Die Auswahl potenzieller Material- und Prozessalternativen erfolgte auf Basis klar definierter Bewertungskriterien. Ziel war es, nur solche Optionen weiterzuverfolgen, die unter realistischen industriellen Bedingungen grundsätzlich umsetzbar erscheinen und gleichzeitig ein relevantes Potenzial zur Reduktion der Klimawirkung aufweisen. Ein zentrales Kriterium stellte die technische Machbarkeit dar. Dabei wurde geprüft, ob die jeweilige Material- oder Prozessalternative die funktionellen Anforderungen des Referenzprodukts erfüllt. Insbesondere wurden Aspekte wie Tragfähigkeit, Formstabilität, Dauerhaftigkeit sowie die Eignung für die vorgesehene Anwendung berücksichtigt. Varianten, bei denen aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften keine ausreichende Steifigkeit oder Belastbarkeit zu erwarten war, wurden ausgeschlossen. Neben der technischen Bewertung erfolgte eine grobe

wirtschaftliche Einschätzung. Diese basierte nicht auf einer detaillierten Kostenrechnung, sondern auf einer qualitativen Beurteilung des zu erwartenden Material- und Produktionsaufwands im Vergleich zum bestehenden Produkt. Optionen mit deutlich erhöhtem Ressourcenbedarf oder unverhältnismässigem Produktionsaufwand wurden nicht weiter vertieft.

Ein weiteres wesentliches Kriterium war die industrielle Umsetzbarkeit. Dabei wurde berücksichtigt, ob die jeweiligen Materialien oder Verfahren mit bestehenden oder realistisch anpassbaren Produktionsprozessen vereinbar sind und die geforderte Serientauglichkeit im Bereich von 50'000 bis 150'000 Stück pro Jahr gewährleisten können. Ergänzend wurde geprüft, ob geeignete Datensätze für eine konsistente ökobilanzielle Modellierung verfügbar sind. Nur Varianten, die sowohl technisch nachvollziehbar als auch datenbasiert im Rahmen der LCA abbildbar waren, wurden in die vertiefte Analyse aufgenommen. Auf Grundlage dieser Kriterien wurde eine Vorauswahl geeigneter Alternativen getroffen, welche im folgenden Kapitel detailliert untersucht und ökologisch bewertet werden.

5.4 Modellierung in SimaPro

Die ökobilanzielle Modellierung der untersuchten Materialvarianten wurde mit der Software SimaPro unter Verwendung der ecoinvent-Datenbank durchgeführt. Als Systemmodell kam das Cut-off-Modell zur Anwendung, wodurch Recyclingströme gemäss der definierten Allokationslogik berücksichtigt werden. Die Analyse basiert auf einer klar definierten Cradle-to-Gate-Systemgrenze und umfasst sämtliche relevanten Prozesse von der Rohstoffbereitstellung über vorgelagerte Produktionsschritte bis zur Fertigung des betrachteten Produkts. [6], [7]

Die Modellierung erfolgte unter Verwendung der ecoinvent-Datenbank Version 3.8 mit dem Systemmodell „allocation, cut-off by classification“, wodurch konsistente Hintergrunddaten für Materialproduktion, Energieversorgung, Transport und Entsorgungsprozesse bereitgestellt werden. Für jede Materialvariante wurde ein eigenständiges, jedoch strukturell identisch aufgebautes Produktsystem modelliert. Abgebildet wurden Materialbereitstellung, energiebezogene Vorketten, Transportprozesse sowie relevante Verarbeitungsschritte. Durch die einheitliche Modellstruktur wird sichergestellt, dass Unterschiede in den Ergebnissen ausschliesslich auf material- oder prozessbedingte Veränderungen zurückzuführen sind. Zur Bewertung der Umweltwirkungen wurden zwei unterschiedliche Wirkungsmethoden angewendet. Für die ganzheitliche ökologische Bewertung wurde die Methode der ökologischen Knappheit 2021 verwendet. Diese Methode basiert auf der Gewichtung von Emissionen und Ressourcenverbräuchen gemäss den in der Schweiz definierten Umweltzielen und weist die Ergebnisse in Umweltbelastungspunkten aus. Die Darstellung erfolgt in Kilopunkten (kPt). [8]

Ergänzend wurde für die Bestimmung des Product Carbon Footprint (PCF) die Methode IPCC 2021 GWP100 angewendet. Diese Methode erfasst ausschliesslich die Klimawirkung über einen Zeithorizont von 100 Jahren und weist die Ergebnisse in Kilogramm CO₂-Äquivalenten aus. Der berechnete PCF entspricht somit der Summe aller innerhalb der definierten Systemgrenze modellierten Treibhausgasemissionen pro funktionelle Einheit. Die Kombination dieser beiden Methoden ermöglicht einerseits eine gesamtheitliche Umweltbewertung mit Bezug zu den Schweizer Umweltzielen und andererseits eine gezielte Analyse der Klimawirkung als zentrale Zielgrösse dieser Arbeit. [8]

Neben dem aggregierten Gesamtwert der Methode der ökologischen Knappheit 2021 wurden zur vertieften Interpretation der Resultate **die sechs einflussreichsten beziehungsweise relevantesten Wirkungskategorien separat ausgewertet**. Diese Auswahl dient der übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse und fokussiert auf jene Umweltbereiche, welche in den untersuchten Produktsystemen den grössten Beitrag zur Gesamtwirkung leisten. Dabei handelt es sich um folgende Kategorien: [8]

- **Global warming:** Beschreibt die Klimawirkung durch Treibhausgasemissionen.
- **Carcinogenic substances into air:** Umfasst krebserregende Emissionen in die Luft mit potenziellen Gesundheitswirkungen.
- **Main air pollutants and particulates:** Berücksichtigt klassische Luftschadstoffe wie Stickoxide, Schwefeldioxid und Feinstaub.
- **Heavy metals into water:** Erfasst die Freisetzung von Schwermetallen in Gewässer.
- **Heavy metals into air:** Beschreibt Schwermetallemissionen in die Atmosphäre.
- **Energy resources:** Bildet den Verbrauch nicht erneuerbarer Energieträger ab.

Diese Auswahl ermöglicht eine differenzierte Betrachtung klimarelevanter, gesundheitsbezogener sowie ressourcenbezogener Umweltwirkungen. Ergänzend wurde die Wirkungskategorie IPCC 2021 GWP100 zur Bestimmung des Product Carbon Footprint angewendet. Diese Methode quantifiziert die Klimawirkung über einen Zeithorizont von 100 Jahren und weist sämtliche relevanten Treibhausgase in Kilogramm CO₂-eq aus. Der berechnete PCF entspricht der Summe aller innerhalb der definierten Systemgrenze modellierten Treibhausgasemissionen pro funktionelle Einheit. Durch die kombinierte Anwendung beider Bewertungsmethoden wird sowohl eine ganzheitliche Umweltbewertung als auch eine spezifische Analyse der Klimawirkung sichergestellt. Die identische Anwendung der methodischen Rahmenbedingungen auf sämtliche Varianten gewährleistet die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. [8]

5.5 Annahmen und Limitationen

Die vorliegende Analyse basiert auf definierten Systemgrenzen, verfügbaren Primär- und Sekundärdaten sowie modelltechnischen Annahmen. Trotz sorgfältiger Modellierung unterliegt jede ökobilanzielle Untersuchung daten- und methodenbedingten Unsicherheiten, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Produktspezifische Primärdaten wurden in Abstimmung mit der peka-metall AG erhoben und betreffen insbesondere Materialeinsatz, Bauteilgewichte sowie definierte Verarbeitungsschritte. Die Abbildung dieser Daten erfolgt innerhalb von SimaPro auf Basis standardisierter ecoinvent-Prozessdatensätze, welche reale industrielle Prozesse in aggregierter Form repräsentieren. Unternehmensspezifische Detailparameter, beispielsweise exakte Maschineneinstellungen oder interne Logistikstrukturen, können daher nur näherungsweise berücksichtigt werden.

Für einzelne alternative Produktvarianten lagen keine vollständigen Primärdaten vor. In diesen Fällen wurde die Modellierung auf Basis technologisch vergleichbarer Datensätze sowie fachlich begründeter Annahmen durchgeführt. Die Auswahl erfolgte unter Berücksichtigung technologischer Plausibilität, geografischer Relevanz und aktueller Datenverfügbarkeit. Die Hauptbewertung basiert auf einer Cradle-to-Gate-Systemgrenze. Nutzungsphase und End-of-Life-Prozesse werden ergänzend betrachtet, jedoch nicht in die quantitative Hauptbewertung integriert. Veränderungen in der Lebensdauer, im Nutzungsverhalten oder in zukünftigen Entsorgungsstrukturen sind somit nicht Bestandteil der ausgewiesenen PCF-Werte. Die Modellierung erfolgt gemäss dem Cut-off-Systemmodell der standardisierte

Prozessdatensätze der ecoinvent Datenbank Version 3.8. Recyclingströme werden entsprechend dieser Allokationslogik behandelt, wodurch keine direkten Substitutionsgutschriften für zukünftige Materialrückführungen innerhalb des betrachteten Produktsystems angerechnet werden. [8]

Hintergrunddatensätze repräsentieren durchschnittliche technologische und regionale Bedingungen. Zeitliche Entwicklungen, Effizienzsteigerungen oder Veränderungen im Energiemix können zu abweichenden zukünftigen Emissionswerten führen. Die dargestellten Resultate stellen daher eine modellbasierte Momentaufnahme unter definierten Rahmenbedingungen dar. Die Ergebnisse ermöglichen eine belastbare relative Bewertung der untersuchten Varianten. Eine exakte Prognose realer zukünftiger Emissionsmengen ist nicht Ziel der Untersuchung.

6 Untersuchung alternativer Werkstoffe

6.1 Polypropylen, (PP)

Zur Untersuchung einer werkstofflich unterschiedlichen Lösungsstrategie wurde ein Tablar aus Polypropylen modelliert. Dabei wird das Bauteil nicht aus einem metallischen Halbzeug umgeformt, sondern durch thermoplastische Formgebung direkt aus Kunststoffgranulat hergestellt. Für die ökologische Bewertung wurden sowohl die Rohmaterialbereitstellung als auch der Formgebungsprozess berücksichtigt.

6.1.1 Materialwahl



Abbildung 4: Symbolbild PP (eigene Darstellung)

Polypropylen (PP) ist ein teilkristalliner Thermoplast mit geringer Dichte (ca. 0.9 g/cm^3), guter chemischer Beständigkeit sowie vorteilhaften Verarbeitungseigenschaften im Spritzgussverfahren. Aufgrund seiner niedrigen Schmelztemperatur und guten Fließfähigkeit eignet sich PP besonders für die Herstellung komplexer Bauteilgeometrien in einem einstufigen Formgebungsprozess. Diese Eigenschaften machen PP zu einem der weltweit am häufigsten eingesetzten Standardkunststoffe. [16]

Im Vergleich zu metallischen Werkstoffen weist PP eine geringere Steifigkeit und Festigkeit auf. Für eine funktionale Vergleichbarkeit mit dem Referenzprodukt ist daher eine angepasste konstruktive Auslegung erforderlich. Gleichzeitig ermöglicht die geringe Dichte eine reduzierte Bauteilmasse bei entsprechender Geometriegestaltung. Die Wahl von PP erlaubt somit die Untersuchung eines material- und prozesstechnisch eigenständigen Alternativkonzepts, bei dem das Bauteil direkt aus polymerem Rohmaterial geformt wird und nicht aus einem metallischen Halbzeug entsteht.

6.1.2 Modellierung in SimaPro

Zur Abbildung der Rohmaterialbereitstellung wurde der Datensatz

- Polypropylene, granulate {GLO} | market for | Cut-off, U [17]

verwendet. Dieser Markt-Datensatz repräsentiert die durchschnittliche europäische Bereitstellung von Polypropylen-Granulat.

Im Datensatz enthalten sind insbesondere:

- Gewinnung und Aufbereitung fossiler Rohstoffe (Rohöl / Erdgas)
- Steamcracking zur Herstellung von Propylen
- Polymerisation zu Polypropylen
- Energiebezogene Vorkettenprozesse
- Marktübliche Distributionsanteile innerhalb der Region

Die Herstellung von Polypropylen basiert auf der polymerchemischen Umwandlung von Propylen, einem Nebenprodukt der petrochemischen Raffination. Dabei entstehen sowohl prozessbedingte Emissionen aus der Rohstoffgewinnung als auch energiebedingte Emissionen aus der Polymerisation. Durch die Verwendung eines Markt-Datensatzes werden durchschnittliche europäische Produktions- und Lieferstrukturen abgebildet. Eine separate Modellierung vorgelagerter Transporte ist daher nicht erforderlich, da marktübliche Distributionsanteile bereits integriert sind.

6.1.3 Mengenermittlung

Zur Bestimmung der Materialmenge eines funktional vergleichbaren Polypropylen-Tablars wurde eine vereinfachte geometrische Modellierung durchgeführt. Ausgangspunkt bildet das Referenzprodukt aus Stahl mit den Abmessungen $B = 250$ mm, $T = 468$ mm und $H = 92$ mm sowie einer Masse von 1.30 kg. Da Polypropylen eine deutlich geringere Steifigkeit als Stahl aufweist, wurden erhöhte Wandstärken angenommen. Für die Berechnung wurden folgende konstruktive Annahmen getroffen:

- Bodenplatte: Wanddicke $t_{Boden} = 4\text{mm} = 0.004$ m
- Seitenwände: Wanddicke $t_{Wand} = 5\text{mm} = 0.005$ m
- Dichte Polypropylen: $\rho = 910\text{ kg/m}^3$ [18]

Volumen Bodenplatte

$$V_{Boden} = (T \cdot B) \cdot t_{Boden}$$
$$V_{Boden} = (0.468 \cdot 0.250) \cdot 0.004 = 0.117 \cdot 0.004 = 0.00047\text{ m}^3$$

Volumen Seitenwände

Zunächst wird die Mantelfläche der vier Seiten bestimmt:

$$A_{Wände} = 2(T \cdot H) + 2(B \cdot H)$$
$$A_{Wände} = 2(0.468 \cdot 0.092) + 2(0.250 \cdot 0.092)$$
$$A_{Wände} = 2(0.043) + 2(0.023) = 0.086 + 0.046 = 0.132\text{ m}^2$$

Das Volumen der Seitenwände ergibt sich zu:

$$\begin{aligned}V_{W\ddot{a}nde} &= A_{W\ddot{a}nde} \cdot t_{W\ddot{a}nd} \\V_{W\ddot{a}nde} &= 0.132 \cdot 0.005 = 0.00066 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Gesamtvolumen und Masse

$$\begin{aligned}V_{gesamt} &= V_{Boden} + V_{W\ddot{a}nde} \\V_{gesamt} &= 0.00047 + 0.00066 = 0.00113 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Die Materialmasse ergibt sich über:

$$\begin{aligned}m &= \rho \cdot V_{gesamt} \\m &= 910 \cdot 0.00113 = 1.03 \text{ kg}\end{aligned}$$

Damit ergibt sich unter den getroffenen Annahmen für das PP-Tablar eine rechnerische Bauteilmasse von rund 1.03 kg. Zur Vereinfachung wird 1 kg angenommen. Zusätzliche Querstreben mit geringer Stegdicke tragen aufgrund ihres kleinen Volumenanteils nur marginal zur Gesamtmasse bei und wurden daher nicht gesondert berücksichtigt. Die vorgenommene Berechnung stellt eine vereinfachte geometrische Abschätzung dar. Bei Kunststoffbauteilen spielt die konstruktive Auslegung eine zentrale Rolle für Masse und Stabilität. Insbesondere Anzahl, Anordnung und Höhe von Rippen, lokale Verstärkungen, Radien sowie Übergangsbereiche zwischen Boden und Seitenwänden beeinflussen sowohl die mechanische Steifigkeit als auch den Materialeinsatz erheblich. Die hier gewählten Wandstärken von 4 mm (Boden) und 5 mm (Seitenwände) stellen eine konservative Annahme dar, um die geringere Steifigkeit von Polypropylen gegenüber Stahl pauschal zu kompensieren. Eine detaillierte konstruktive Optimierung mittels Finite-Elemente-Analyse oder spritzgusstechnischer Auslegung wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Da keine konkrete PP-Konstruktion vorliegt und die Berechnung nicht durch einen Konstrukteur validiert wurde, sind die gewählten Geometrieannahmen als methodische Näherung zu verstehen. [19]

6.1.4 Oberflächenbehandlung

Polypropylen wird im Spritzgussverfahren verarbeitet. Dabei wird das Kunststoffgranulat plastifiziert, in ein formgebendes Werkzeug eingespritzt und unter Druck abgekühlt. Die Oberflächenstruktur des Bauteils wird unmittelbar durch die Werkzeugoberfläche definiert. Je nach Ausführung des Werkzeugs können glatte, strukturierte oder matte Oberflächen direkt im Formgebungsprozess erzeugt werden. Da Polypropylen korrosionsbeständig ist und keine Feuchtigkeit aufnimmt, ist im Innenanwendungsbereich keine zusätzliche Oberflächenbehandlung erforderlich. Die im Spritzguss erzeugte Oberfläche erfüllt sowohl funktionale als auch optische Anforderungen. Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen ist kein Korrosionsschutz notwendig, und im Gegensatz zu Holzwerkstoffen ist keine Beschichtung zum Schutz vor Feuchtigkeit oder Verschmutzung zwingend erforderlich. Zusätzliche Lackierungen oder Beschichtungen werden bei PP-Bauteilen in der Regel nur aus gestalterischen oder funktionalen Gründen eingesetzt (z. B. UV-Schutz oder spezielle Haptik), sind jedoch für die vorliegende Anwendung nicht erforderlich. Aus diesem Grund wurde im Modell keine separate Oberflächenbehandlung für die PP-Variante berücksichtigt. [20]

6.1.5 End-of-Life-Szenario

Für das Lebensende des PP-Tablars wurde ein kombiniertes Entsorgungsszenario modelliert. Hierzu wurden die folgenden Datensätze verwendet:

- Waste polypropylene {CH} | treatment of municipal incineration | Cut-off, U [21]
- PP (waste treatment) {GLO} | recycling of PP | Cut-off, U [22]

Die Verteilung beträgt 80 % thermische Verwertung und 20 % werkstoffliches Recycling. Eine Deponierung wurde nicht berücksichtigt. Der Datensatz *Waste polypropylene {CH} | treatment of municipal incineration | Cut-off, U* bildet die Behandlung von Polypropylenabfällen in einer Schweizer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) ab. Die Modellierung basiert auf der aktuellen Entsorgungsstruktur der Schweiz. Gemäss Angaben des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) werden brennbare Siedlungsabfälle überwiegend energetisch verwertet. Eine Deponierung brennbarer Abfälle ist in der Schweiz seit dem Jahr 2000 gesetzlich untersagt. Kunststoffabfälle gelangen daher im Regelfall in Kehrichtverbrennungsanlagen, wo sie unter kontrollierten Bedingungen thermisch behandelt und zur Energiegewinnung genutzt werden. [23]

Ergänzend wurde ein Recyclinganteil von 20 % über den Datensatz *PP (waste treatment) {GLO} | recycling of PP | Cut-off, U* modelliert. Dieser Datensatz repräsentiert die werkstoffliche Aufbereitung von PP-Abfällen zu Sekundärmaterial. Die geografische Referenz {GLO} wurde gewählt, da kein spezifischer Schweizer Recyclingdatensatz für Polypropylen verfügbar ist. Vor diesem Hintergrund wurde für das PP-Tablar ein Entsorgungsanteil von 80 % thermischer Verwertung und 20 % Recycling angesetzt. Die gewählte Verteilung trägt der dominierenden thermischen Behandlung in der Schweiz Rechnung, berücksichtigt jedoch gleichzeitig die grundsätzlich vorhandene Recyclingfähigkeit von Polypropylen. Bei fest verbauten Möbelkomponenten ist eine sortenreine Trennung am Ende der Nutzungsphase technisch möglich, jedoch nicht flächendeckend etabliert. Der Recyclinganteil stellt daher eine modellhafte Annahme dar. Die verwendeten Datensätze umfassen:

- Transport des Abfalls zur jeweiligen Behandlungsanlage
- Thermische Behandlung im Ofen bzw. mechanische Aufbereitung beim Recycling
- Direkte prozessbedingte Emissionen
- Energierückgewinnung im Fall der Verbrennung
- Bereitstellung von Sekundärmaterial im Fall des Recyclings

Im Rahmen der angewendeten Cut-off-Methodik werden dem betrachteten Produktsystem keine Gutschriften für potenzielle Sekundärmaterialien angerechnet. Das System trägt ausschliesslich die Umweltwirkungen der Entsorgungsbehandlung. Eine allfällige Substitution von Primär-PP wird dem nachfolgenden Produktsystem zugerechnet.

Durch die Berücksichtigung sowohl der thermischen Verwertung als auch eines anteiligen Recyclings wird ein konsistentes Cradle-to-Grave-Modell sichergestellt, welches die Umweltwirkungen des PP-Tablars von der Rohmaterialbereitstellung bis zur finalen Entsorgung im Schweizer Kontext realitätsnah abbildet.

6.1.6 Systemabgrenzung innerhalb der Modellierung

Die ökobilanzielle Modellierung des PP-Tablars erfolgt nach einem Cradle-to-Grave-Ansatz. Berücksichtigt werden sämtliche relevanten Prozessschritte von der Rohmaterialbereitstellung über die industrielle Formgebung bis zur thermischen Verwertung am Lebensende.

Die Systemgrenze umfasst:

- Bereitstellung von Polypropylen-Granulat („polypropylene, granulate {RER} | market for | Cut-off, U“) [24]
- Vorgelagerte petrochemische Prozesse (Rohstoffgewinnung, Steamcracking, Polymerisation)
- Marktübliche Transportanteile innerhalb der Versorgungsstruktur
- Spritzgussprozess zur Bauteilherstellung („injection moulding | processing | Cut-off, U“) [25]
- Elektrischer Energieeinsatz für die Formgebung
- Optional modellierte Produktionsinfrastruktur (Werkzeugstahl und Kunststoffverarbeitungsanlage)
- End-of-Life-Behandlung durch thermische Verwertung in einer Schweizer Kehrichtverbrennungsanlage

Die Bereitstellung des Granulats ist im Markt-Datensatz bereits bis zum Werkstor abgebildet. Eine separate Modellierung einzelner petrochemischer Vorstufen oder zusätzlicher Transportleistungen ist daher nicht erforderlich. Zur Vollständigkeit wurde neben dem reinen Spritzgussprozess auch die Produktionsinfrastruktur modelliert. Hierbei wurden der Werkzeugstahlanteil sowie die Kunststoffverarbeitungsanlage über angenommene Lebensdauer und Produktionsmenge auf ein einzelnes Tablar allokiert. Die Auswertung zeigt jedoch, dass der Einfluss dieser Infrastruktur auf die Umweltwirkungen vernachlässigbar ist und keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamtbewertung hat. Dominierend sind vielmehr die Rohmaterialbereitstellung des Polypropylen-Granulats sowie der Energieeinsatz im Spritzgussprozess.

Nicht berücksichtigt wurden:

- Investitionsgüter ausserhalb der direkt modellierten Produktionsinfrastruktur
- Individuelle Distributionswege zum Endkunden
- Nutzungsphase, da diese für alle Materialvarianten funktional identisch angenommen wird
- Potenzielle zukünftige Recyclingtechnologien

Die gewählte Systemabgrenzung entspricht jener der metallischen und holzbasierten Vergleichsvarianten. Dadurch wird sichergestellt, dass Unterschiede in den Ergebnissen ausschliesslich auf material- und prozessbedingte Eigenschaften zurückzuführen sind und nicht auf abweichende Modellannahmen.

6.1.7 Ökologische Einordnung

Polypropylen ist ein thermoplastischer Kunststoff auf fossiler Rohstoffbasis. Die Herstellung erfolgt über petrochemische Prozesse, beginnend mit der Gewinnung von Erdöl oder Erdgas, gefolgt von Steamcracking zur Erzeugung von Propylen und anschließender Polymerisation zu Polypropylen. Diese Prozesskette ist energieintensiv und mit direkten fossilen CO₂-Emissionen verbunden. [16]

Im Vergleich zu metallischen Werkstoffen zeichnet sich PP durch eine deutlich geringere Dichte aus (ca. 0.9 g/cm³), wodurch bei geeigneter konstruktiver Auslegung eine geringere Bauteilmasse erreicht werden kann. Diese Massenreduktion kann sich positiv auf materialbedingte Umweltwirkungen auswirken. Gleichzeitig weist PP jedoch eine geringere Steifigkeit und Festigkeit im Vergleich zu Stahl auf, was konstruktive Verstärkungen wie Rippen oder erhöhte Wandstärken erforderlich machen kann. Die ökologische Bewertung ist daher stark von der gewählten Geometrie und dem resultierenden Materialeinsatz abhängig. Die dominierenden Umweltwirkungen entstehen in der Regel in der Phase der Rohmaterialbereitstellung. Die Herstellung des Polymergranulats trägt wesentlich zu den Treibhausgasemissionen sowie zum Verbrauch fossiler Ressourcen bei. Der Energieeinsatz im Spritzgussprozess hat im Vergleich dazu einen geringeren, aber messbaren Anteil an den Gesamtemissionen. [26]

Am Lebensende wird PP im Schweizer Kontext überwiegend thermisch verwertet. Dabei werden die im Material gebundenen fossilen Kohlenstoffanteile vollständig als CO₂ freigesetzt. Gleichzeitig erfolgt eine energetische Nutzung in Kehrlichtverbrennungsanlagen, wodurch Strom und Wärme erzeugt und fossile Energieträger substituiert werden. Im Rahmen der angewendeten Cut-off-Methodik wird diese energetische Substitution im Entsorgungsdatensatz berücksichtigt, jedoch erfolgt keine Gutschrift für potenzielles werkstoffliches Recycling im betrachteten Produktsystem. Zusammenfassend weist Polypropylen eine Umweltwirkungsstruktur auf, die stark durch fossile Ressourcenabhängigkeit und direkte CO₂-Emissionen geprägt ist. Vorteile können sich durch die geringe Dichte und effiziente industrielle Verarbeitung ergeben, während die Rohmaterialherstellung und die fossile Kohlenstofffreisetzung am Lebensende die zentralen ökologischen Belastungsschwerpunkte darstellen.

6.2 Holzbasierte Werkstoffe

Im Rahmen der Untersuchung potenzieller Materialalternativen zum bestehenden DC01-Stahltaflar wurde Holz als biobasierter Werkstoff analysiert. Ziel war die Auswahl eines technisch geeigneten Holzwerkstoffs, der hinsichtlich Tragfähigkeit, Dimensionsstabilität und industrieller Verarbeitbarkeit mit dem bestehenden Produkt vergleichbar ist.

6.2.1 Materialwahl



Abbildung 5: Symbolbild Sperrholz (eigene Darstellung)

Als Referenzmaterial wurde Sperrholz (Multiplex) gewählt. Sperrholz besteht aus mehreren kreuzweise verleimten Furnierlagen. Durch die kreuzweise Anordnung der Faserrichtungen werden Quell- und Schwindbewegungen reduziert und die mechanische Stabilität erhöht. Im Vergleich zu Massivholz weist Sperrholz eine deutlich höhere Formstabilität sowie homogenere mechanische Eigenschaften auf. Diese Eigenschaften sind insbesondere bei belasteten Innenanwendungen relevant, da sich Massivholz bei wechselnder Luftfeuchtigkeit stärker verformen kann. Sperrholz ermöglicht demgegenüber eine technisch reproduzierbare Lösung mit vergleichbarer Steifigkeit bei begrenztem Materialeinsatz. [27]

Die Wahl von Sperrholz erlaubt somit eine realistische und konstruktiv geeignete Abbildung eines tragenden Holz-Tablars.

6.2.2 Modellierung in SimaPro

Die ökologische Modellierung des Holz-Tablars erfolgte in SimaPro unter Verwendung der ecoinvent-Datenbank (Cut-off by classification, Unit-Process-System). Als zentraler Materialdatensatz wurde

- Market for plywood {RER} | Cut-off, U [28]

verwendet. Der gewählte Markt-Datensatz repräsentiert die durchschnittliche europäische Versorgungsstruktur für Sperrholz. Er beinhaltet neben der eigentlichen Plattenproduktion auch vorgelagerte Prozesse wie:

- Rundholzbereitstellung aus forstwirtschaftlicher Nutzung

- Entrindung und Furnierherstellung
- Trocknung der Furniere
- Verleimung und Pressvorgang
- Energiebezogene Vorketten
- Marktübliche Transportanteile innerhalb der europäischen Lieferstruktur

Durch die Verwendung eines Markt-Datensatzes wird die reale durchschnittliche Materialbereitstellung innerhalb der Region Europa (RER) abgebildet. Zusätzliche vorgelagerte Produktionsschritte mussten daher nicht separat modelliert werden.

6.2.3 Mengenermittlung

Die Materialmenge des Holz-Tablars wurde auf Basis der realen Geometrie des Referenzprodukts bestimmt (EB 300, B = 250 mm, T = 468 mm, H = 92 mm). Ziel ist die Abbildung eines konstruktiv tragfähigen Tablars aus Sperrholz mit angepasster Materialstärke.

Für die Berechnung wurden folgende konstruktive Annahmen getroffen:

- Bodenplatte: Wanddicke t_{Boden} 12 mm = 0.012 m
- Seitenwände: Wanddicke t_{Wand} 10 mm = 0.010 m
- Mittlere Rohdichte Sperrholz: $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ [29]

Volumen Bodenplatte

$$V_{Boden} = (T \cdot B) \cdot t_{Boden}$$

$$V_{Boden} = (0.468 \cdot 0.25) \cdot 0.0012 = 0.117 \cdot 0.012 = 0.0014 \text{ m}^3$$

Volumen Seitenwände

Zunächst wird die Mantelfläche der vier Seiten bestimmt:

$$A_{Wände} = 2(T \cdot H) + 2(B \cdot H)$$

$$A_{Wände} = 2(0.468 \cdot 0.092) + 2(0.25 \cdot 0.092)$$

$$A_{Wände} = 0.132 \text{ m}^2$$

Das Volumen der Seitenwände ergibt sich zu:

$$V_{Wände} = A_{Wände} \cdot t_{Wand}$$

$$V_{Wände} = 0.132 \cdot 0.010$$

$$V_{Wände} = 0.0013 \text{ m}^3$$

Gesamtvolumen und Masse

$$V_{gesamt} = V_{Boden} + V_{Wände}$$

$$V_{gesamt} = 0.0014 + 0.0013 = 0.0027 \text{ m}^3$$

Die Materialmasse ergibt sich aus:

$$m = \rho \cdot V_{gesamt}$$
$$m = 700 \cdot 0.0027 = 1.9 \text{ kg}$$

Damit ergibt sich für das Holz-Tablar unter den getroffenen Annahmen eine rechnerische Bauteilmasse von rund 1.9 kg. Die Berechnung basiert auf einer vereinfachten geometrischen Modellierung und dient der konsistenten ökologischen Vergleichbarkeit mit den übrigen Materialvarianten. [30]

6.2.4 Oberflächenbehandlung

Da unbehandeltes Holz im Innenbereich gegenüber Feuchtigkeit, Verschmutzung und mechanischer Beanspruchung nur eingeschränkt widerstandsfähig ist, wurde eine Oberflächenbehandlung in der Modellierung berücksichtigt. Eine Beschichtung reduziert die Feuchteaufnahme, verbessert die Reinigungsfähigkeit und erhöht die Oberflächenhärte. Damit wird die funktionale Vergleichbarkeit mit beschichteten Stahl- und Kunststoffvarianten sichergestellt. Als Proxy wurde ein Alkydharz-basierter Lack verwendet („alkyd resin, long oil {RER}“). [31]

Alkydharze stellen ein etabliertes Bindemittelsystem für Holzlacke im Innenausbau dar und werden insbesondere für transparente oder leicht pigmentierte Beschichtungen eingesetzt. Der gewählte Datensatz bildet die Herstellung des Bindemittels inklusive der vorgelagerten chemischen Prozesse ab. Die aufgetragene Lackmenge wurde mit rund 0.03 kg/m² angesetzt. Dieser Wert entspricht einer typischen Trockenfilmmenge für eine einmalige Beschichtung im Innenbereich. Bei einer Tablarfläche von ca. 0.13 m² ergibt sich eine modellierte Lackmenge von rund 0.004 kg. Der Massenanteil der Oberflächenbehandlung liegt damit unter 1 % der Gesamtmasse des Bauteils. Entsprechend ist der Einfluss auf die Gesamtumweltwirkung im Vergleich zur Materialherstellung des Holzträgers gering. Dennoch wurde die Beschichtung berücksichtigt, um eine realistische und technisch vollständige Systemabbildung sicherzustellen. Es wurde davon ausgegangen, dass keine mehrschichtige Spezialbeschichtung oder zusätzliche Grundierung erforderlich ist. Damit wird eine konservative, aber praxisnahe Annahme getroffen, ohne das Modell unnötig zu verkomplizieren. [30], [32]

6.2.5 End-of-Life-Szenario

Für das Lebensende des Holz-Tablars wurde eine thermische Verwertung modelliert

- Treatment of waste wood, municipal incineration {CH}. [33]

Dieser Datensatz bildet die Verbrennung von Altholz in einer Schweizer Kehrichtverbrennungsanlage inklusive Energieerzeugung und Emissionsbilanzierung ab. Gemäss den Abfallstatistiken des Bundesamtes für Umwelt wird Altholz in der Schweiz überwiegend energetisch verwertet. Eine stoffliche Wiederverwendung ist bei lackierten oder verleimten Holzwerkstoffen im Möbelbereich nur eingeschränkt realistisch. Die thermische Verwertung stellt daher das wahrscheinliche Entsorgungsszenario dar. [23]

Im Rahmen der Lebenszyklusmodellierung werden bei der Verbrennung die biogenen CO₂-Emissionen freigesetzt, welche während der Wachstumsphase des Baumes durch Photosynthese gebunden wurden. Diese Emissionen werden gemäss gängiger LCA-Methodik

separat bilanziert und sind Teil des biogenen Kohlenstoffkreislaufs. Zusätzlich wird bei der thermischen Verwertung nutzbare Energie (Wärme und Strom) erzeugt, wodurch fossile Energieträger substituiert werden. Dieser Substitutionseffekt ist im verwendeten Datensatz bereits berücksichtigt. Die gewählte Modellierung stellt somit eine technisch und regulatorisch realistische Abbildung des Lebensendes eines innen eingesetzten Holzprodukts im Schweizer Kontext dar.

6.2.6 Systemabgrenzung innerhalb der Modellierung

Die Modellierung des Holzwerkstoffs umfasst somit:

- Rohstoffbereitstellung
- Industrielle Sperrholzproduktion
- Marktübliche Lieferstruktur innerhalb Europas
- Mechanische Bauteilbearbeitung
- Oberflächenbehandlung (separat modelliert)
- End-of-Life (separat modelliert)

Nicht berücksichtigt wurden:

- Produktionsinfrastruktur (Maschinen, Gebäude)
- Individuelle Logistik ausserhalb der Marktstruktur
- Nutzungseinflüsse (da funktional identisch zu den Vergleichsvarianten)

6.2.7 Ökologische Einordnung

Holz ist ein biogener, nachwachsender Rohstoff. Der im Material enthaltene Kohlenstoff wurde während des Wachstumsprozesses des Baumes durch Photosynthese aus der Atmosphäre aufgenommen und im Holz gebunden. Im Gegensatz zu Metallen oder fossilen Kunststoffen ist für die Bereitstellung des Grundmaterials kein energieintensiver chemischer Umwandlungsprozess erforderlich. Dadurch ist der Herstellungsenergiebedarf in der Regel geringer als bei Stahl oder petrochemisch basierten Kunststoffen. Die Umweltwirkungen von Holzwerkstoffen entstehen hauptsächlich durch forstwirtschaftliche Tätigkeiten, Transport, Trocknung sowie durch die Herstellung und Verwendung von Bindemitteln. Bei Sperrholz tragen insbesondere die eingesetzten Leime und Harze anteilig zu fossilen Emissionen bei. Holzprodukte sind daher nicht emissionsfrei, weisen jedoch eine andere Emissionsstruktur auf als metallische oder fossilbasierte Materialien.

Neben den Treibhausgasemissionen sind auch Landnutzungswirkungen zu berücksichtigen. Die forstwirtschaftliche Nutzung von Flächen beeinflusst Ökosysteme und wird in der Wirkungsabschätzung über entsprechende Kategorien wie Land use abgebildet. Diese Wirkungskategorie kann bei Holzprodukten im Vergleich zu Stahl oder Kunststoff relativ stärker ausgeprägt sein. Insgesamt stellt Sperrholz eine technisch geeignete und ökologisch nachvollziehbare Referenzlösung innerhalb der untersuchten Materialalternativen dar. Es ermöglicht eine konstruktiv belastbare Ausführung bei moderatem Materialeinsatz und weist gleichzeitig eine differenzierte Umweltwirkungsstruktur auf, die im Rahmen der Lebenszyklusanalyse transparent bewertet werden kann.

6.3 Bewertung weiterer Werkstoffoptionen (ohne Modellierung)

6.3.1 Polyamid 6 (PA 6)

Polyamid 6 (PA 6) ist ein technischer Thermoplast mit höheren mechanischen Kennwerten als Standardkunststoffe wie Polypropylen. Der Werkstoff zeichnet sich durch erhöhte Steifigkeit, Festigkeit sowie gute Verschleiss- und Abriebeigenschaften aus und weist zudem eine höhere Wärmeformbeständigkeit auf. Gleichzeitig besitzt PA 6 eine höhere Dichte von etwa 1.13–1.15 g/cm³ gegenüber rund 0.90 g/cm³ bei PP. Bei gleicher Bauteilgeometrie führt dies zu einer höheren Bauteilmasse. Darüber hinaus ist PA 6 hygroskopisch, wodurch die Aufnahme von Feuchtigkeit mechanische Eigenschaften sowie die Masshaltigkeit beeinflussen kann und bei der Bauteilauslegung berücksichtigt werden muss. [34]

Auch wirtschaftlich unterscheidet sich PA 6 deutlich von PP. Wie in Abbildung 6 dargestellt, liegt der Preis für Polypropylen-Granulat im betrachteten Zeitraum durchschnittlich bei etwa 0.75–0.82 EUR/kg, während PA 6 Preisbereiche von ca. 1.46–2.04 EUR/kg erreicht. PA 6 ist damit etwa zwei- bis zweieinhalbmal teurer als PP. Der Preisunterschied ergibt sich aus der komplexeren chemischen Herstellung von Polyamiden sowie aus dem höheren technischen Leistungsniveau des Materials. [35]

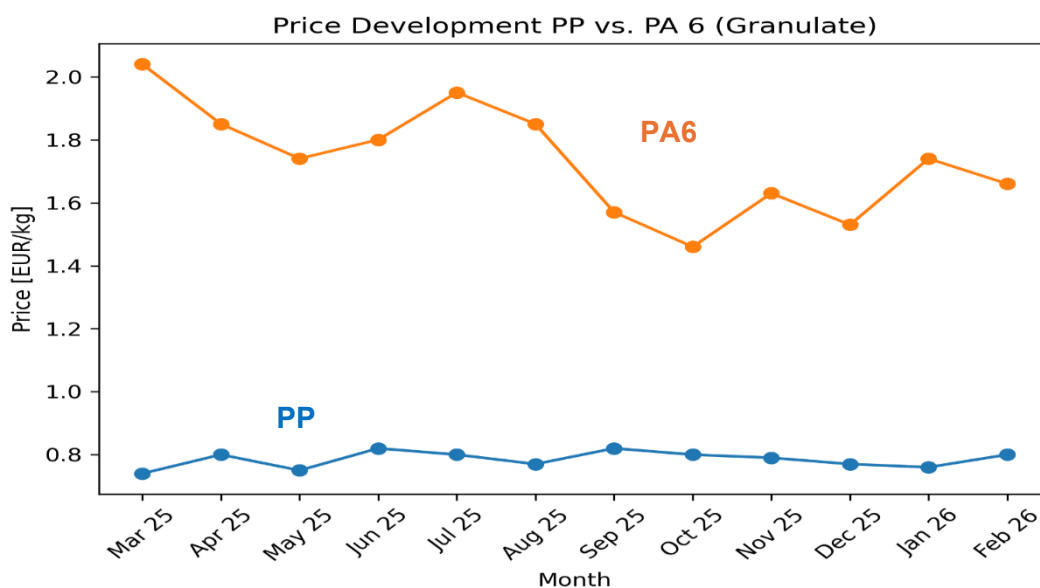


Abbildung 6: Übernommene Darstellung von plasticker.de

Für das untersuchte Möbel-Tablar stellt PA 6 somit eine mechanisch leistungsfähigere, jedoch deutlich kostenintensivere Alternative dar. Die funktionalen Anforderungen hinsichtlich Tragfähigkeit, Formstabilität und Dauerhaftigkeit können jedoch bereits mit unverstärktem PP durch konstruktive Anpassungen wie optimierte Wandstärken und Rippengeometrien erfüllt werden. Ein zusätzlicher funktionaler Nutzen ergibt sich im betrachteten Anwendungskontext nicht. PA 6 wird daher nicht als eigenständige Variante modelliert, sondern dient als technische Referenz zur Einordnung höherwertiger Thermoplaste.

6.3.2 Polyvinylchlorid ohne Weichmacher (PVC-U)

PVC-U wurde als mögliche Materialoption geprüft. Der Werkstoff weist im Vergleich zu PP eine höhere Steifigkeit sowie eine deutlich höhere Dichte von etwa 1.38–1.45 g/cm³ auf,

während PP eine Dichte von rund 0.90 g/cm^3 besitzt. Bei gleicher Bauteilgeometrie würde dies zu einer signifikant höheren Bauteilmasse führen. [36]

Zudem zeigt PVC-U eine geringere Schlagzähigkeit und ein insgesamt spröderes Materialverhalten, insbesondere bei tieferen Temperaturen. Für dünnwandige, mechanisch beanspruchte Möbelbauteile stellt dies einen konstruktiven Nachteil dar, da lokale Spannungsspitzen oder Kerbwirkungen das Risiko von Rissbildung erhöhen können. [16]

Ein weiterer relevanter Aspekt ist das Verarbeitungsfenster. PVC-U besitzt eine geringere thermische Stabilität und erfordert eine präzise Prozessführung sowie den Einsatz von Stabilisatoren, um eine thermische Zersetzung während der Verarbeitung zu vermeiden. PP weist demgegenüber eine höhere thermische Verarbeitungsrobustheit auf und lässt sich im Spritzguss mit geringerem Additivbedarf verarbeiten. Ökologisch ist zu berücksichtigen, dass PVC aufgrund seines Chloranteils eine komplexere Entsorgungs- und Recyclingstruktur aufweist. Die stoffliche Verwertung ist anspruchsvoller als bei Polyolefinen wie PP, und bei thermischer Verwertung entstehen chlorhaltige Emissionen, die entsprechende Abgasbehandlung erfordern. PP hingegen gehört zur Gruppe der Polyolefine, die eine etablierte Recyclinginfrastruktur und eine vergleichsweise unproblematische energetische Verwertung besitzen. Vor dem Hintergrund der mechanischen Anforderungen, der verarbeitungstechnischen Robustheit sowie der ökologischen Rahmenbedingungen wurde PVC-U nicht weiter modelliert. PP stellt für das untersuchte Tablar die konstruktiv geeignetere und systemisch konsistentere Werkstoffoption dar.

6.3.3 Polyethylen (PE)

Polyethylen (PE) wurde als potenzielle Materialalternative untersucht. Der Werkstoff zeichnet sich durch eine hohe Zähigkeit, gute chemische Beständigkeit sowie eine geringe Dichte von etwa $0.91\text{--}0.96 \text{ g/cm}^3$ aus und liegt damit in einem ähnlichen Bereich wie Polypropylen (PP). PE wird häufig für Verpackungen, Behälter sowie Anwendungen mit überwiegend chemischer oder geringer mechanischer Beanspruchung eingesetzt. [37]

Im Vergleich zu PP weist PE jedoch eine geringere Steifigkeit sowie ein niedrigeres E-Modul auf. Dies führt bei gleicher Bauteilgeometrie zu einer höheren Durchbiegung unter Last. Für ein dünnwandiges, tragendes Möbel-Tablar stellt die Biegesteifigkeit jedoch ein zentrales Auslegungskriterium dar. Um vergleichbare mechanische Eigenschaften zu erreichen, wären grössere Wandstärken oder zusätzliche Verstärkungsrippen erforderlich, was den Materialeinsatz erhöhen und die konstruktive Effizienz reduzieren würde. [16]

Zusätzlich zeigt PE ein ausgeprägteres Kriechverhalten unter Dauerbelastung. Aufgrund der niedrigeren Wärmeformbeständigkeit und der höheren molekularen Beweglichkeit neigt PE stärker zu zeitabhängigen Verformungen. Bei langfristiger statischer Belastung kann dies zu einer erhöhten bleibenden Durchbiegung führen. Für ein Möbel-Tablar, das über längere Zeit belastet wird, ist dieser Effekt konstruktiv relevant. Auch hinsichtlich der Temperaturbeständigkeit liegt PE unterhalb von PP. Mit steigender Temperatur reduziert sich die Steifigkeit deutlicher, wodurch die Formstabilität zusätzlich beeinflusst werden kann. PP besitzt im Vergleich ein günstigeres Verhältnis zwischen Steifigkeit und Dichte und eignet sich daher besser für strukturelle Spritzgussteile mit mechanischer Beanspruchung. Da PE im betrachteten Anwendungskontext keine funktionalen Vorteile gegenüber PP bietet, jedoch konstruktive Nachteile hinsichtlich Steifigkeit, Kriechverhalten und Formstabilität aufweist, wurde PE nicht als eigenständige Variante modelliert.

6.3.4 Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (WPC)

Wood Plastic Composites bestehen aus einer thermoplastischen Matrix, typischerweise Polypropylen oder Polyethylen, kombiniert mit einem hohen Anteil an Holzfasern oder Holzmehl sowie verschiedenen Additiven. Es handelt sich somit um einen mehrkomponentigen Verbundwerkstoff und nicht um ein Monomaterial. [30]

Im Gegensatz zu reinem Polypropylen, das werkstofflich relativ einfach wiederaufbereitet und erneut im Spritzguss eingesetzt werden kann, ist eine stoffliche Trennung der einzelnen Bestandteile bei WPC technisch nicht praktikabel. Das Material verbleibt auch nach dem Recycling als Verbundsystem mit eingeschränkter Eigenschaftsstabilität. Eine Rückführung in gleichwertige, mechanisch beanspruchte Bauteile ist daher nur begrenzt möglich. Die Kombination aus Holzfasern, Polymermatrix und Additiven führt zudem zu einer komplexeren Materialzusammensetzung, wodurch sich die Recyclingströme im Vergleich zu monomaterialbasierten Polyolefinen weniger eindeutig erfassen und verarbeiten lassen. Insbesondere im Kontext einer Lebenszyklusanalyse mit Fokus auf Kreislauffähigkeit und Materialreinheit stellt dies einen systemischen Nachteil dar. Da für das untersuchte Tablar eine möglichst klare Materialstruktur mit guter werkstofflicher Rezyklierbarkeit angestrebt wird, wurde WPC nicht weiter in die vertiefte ökobilanzielle Modellierung aufgenommen.

7 Ergebnisse

7.1 Ergebnisse ökologische Knappheit Cradle-to-Gate

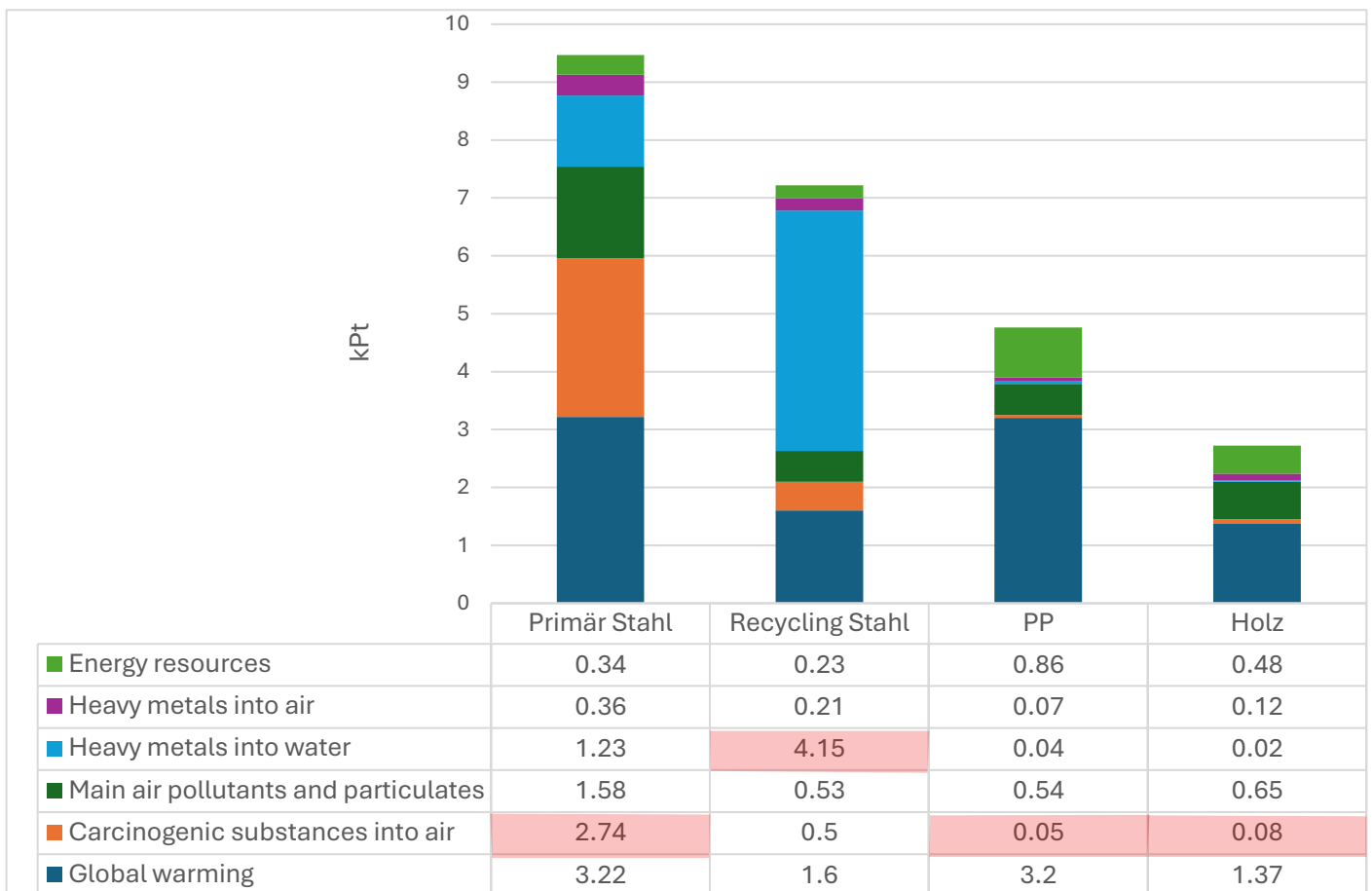


Abbildung 7: Ergebnisdarstellung der LCA Cradle-to-Gate

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der Bewertung nach der Methode der ökologischen Knappheit in Kilopunkten (kPt) für die untersuchten Materialvarianten Primärstahl, Recyclingstahl, Polypropylen (PP) und Holz. Dargestellt sind die Wirkungskategorien:

- Global warming
- Carcinogenic substances into air
- Main air pollutants and particulates
- Heavy metals into water
- Heavy metals into air
- Energy resources.

Für das Referenzprodukt aus Primärstahl ergibt sich eine Gesamtbelastung von 9.47 kPt. Die grössten Beiträge entstehen in den Kategorien Global warming (3.22 kPt) sowie Carcinogenic substances into air (2.74 kPt).

Die Variante aus Recyclingstahl weist mit 7.22 kPt eine geringere Gesamtbelastung auf. Der grösste Beitrag entfällt hier auf die Kategorie Heavy metals into water (4.15 kPt).

Für das spritzgegossene PP-Tablar ergibt sich eine aggregierte Belastung von 4.76 kPt. Der dominierende Beitrag entsteht ebenfalls in der Kategorie Global warming (3.20 kPt).

Das Holz-Tablar weist mit 2.72 kPt die geringste Gesamtbelastung der untersuchten Varianten auf. Auch hier stellt die Kategorie Global warming (1.37 kPt) den grössten Anteil dar.

7.2 Ergebnisse ökologische Knappheit Cradle-to-Grave

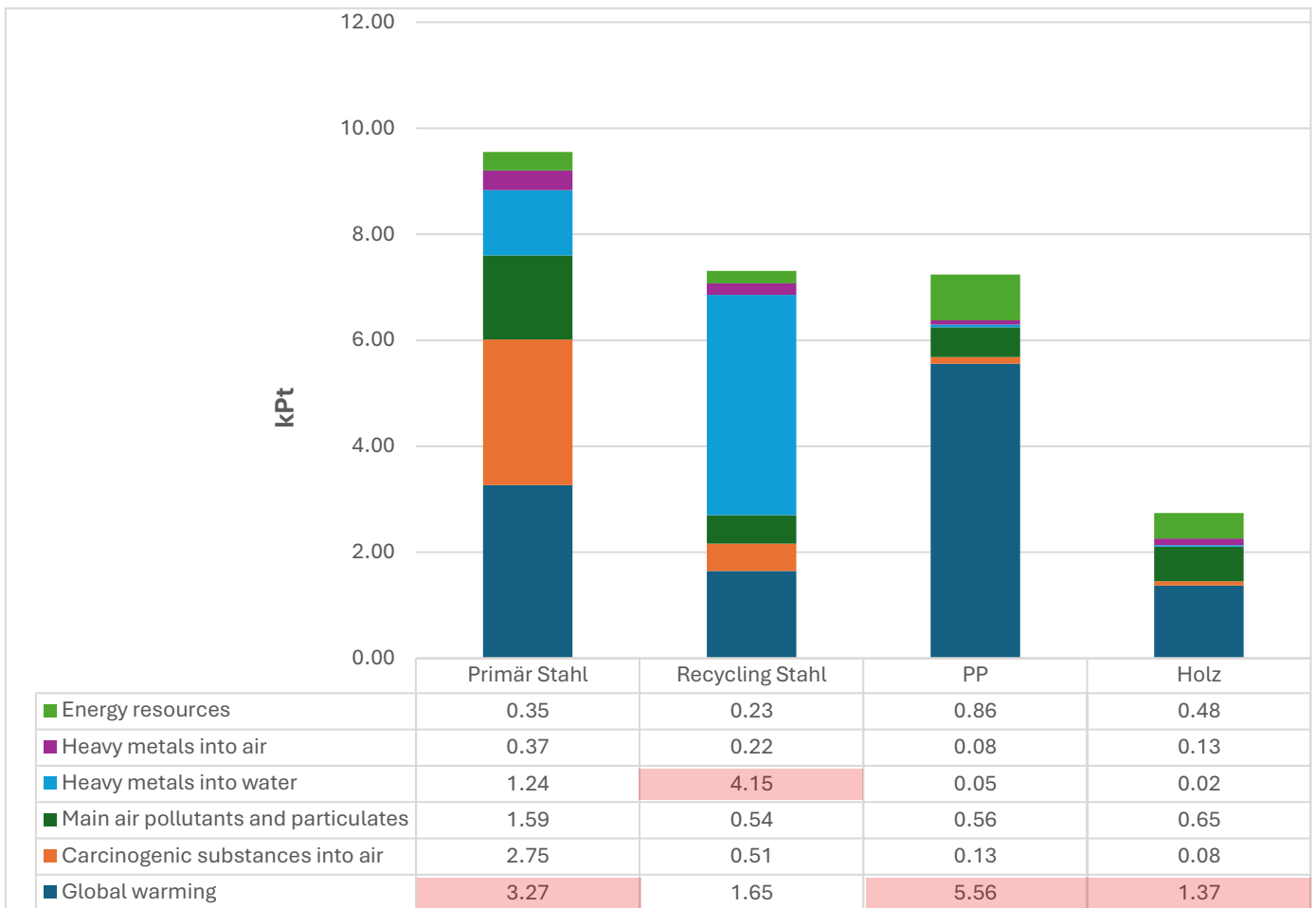


Abbildung 8: Ergebnisdarstellung der LCA Cradle-to-Grave

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Bewertung nach der Methode der ökologischen Knappheit unter Berücksichtigung der gesamten Lebenszyklusphase (Cradle-to-Grave).

Für die Variante aus Primärstahl ergibt sich eine Gesamtbelastung von 9.57 kPt, während die Recyclingstahlvariante eine Belastung von 7.30 kPt aufweist.

Für das PP-Tablar steigt die Gesamtbelastung auf 7.24 kPt, was im Wesentlichen auf die thermische Verwertung des Kunststoffes am Lebensende zurückzuführen ist.

Das Holz-Tablar weist mit 2.73 kPt weiterhin die geringste Umweltbelastung auf. Der Unterschied zwischen Cradle-to-Gate und Cradle-to-Grave fällt hier gering aus, da Holz überwiegend biogene Kohlenstoffflüsse aufweist.

7.3 Ergebnisse Product Carbon Footprint (PCF) Cradle-to-Gate

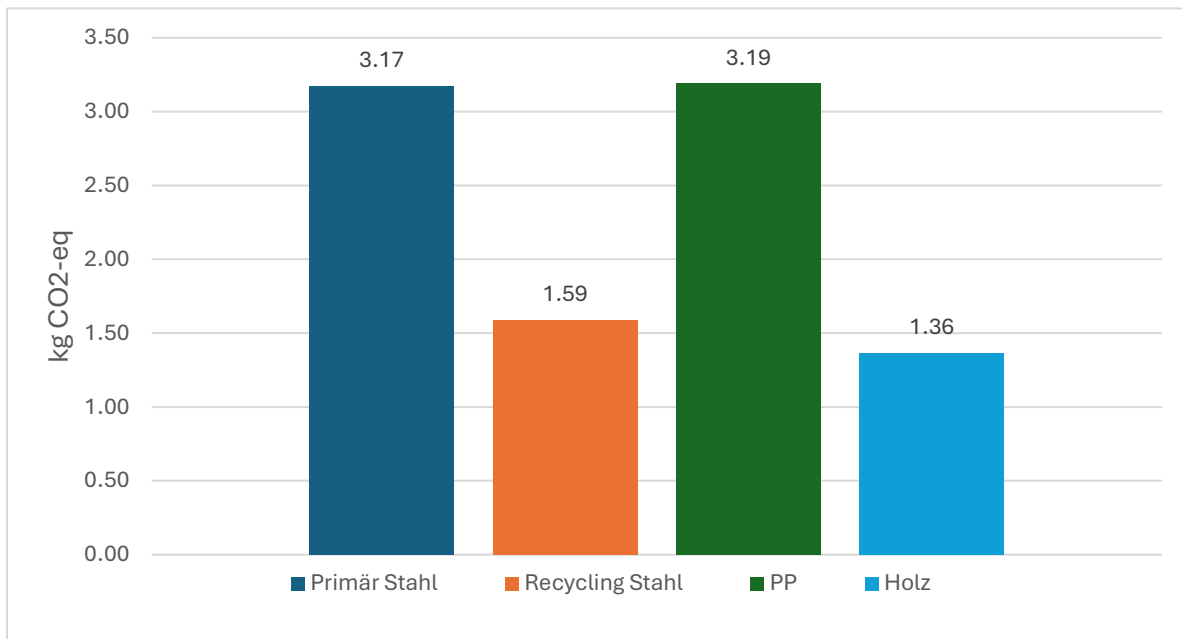


Abbildung 9: PCF-Ergebnisse Cradle-to-Gate

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse des Product Carbon Footprint für die untersuchten Materialvarianten. Die Berechnung erfolgte auf Grundlage der Wirkungskategorie IPCC 2021 GWP100 und wird in kg CO₂-eq pro funktioneller Einheit ausgewiesen.

Für das Referenzprodukt aus Primärstahl ergibt sich ein PCF von 3.17 kg CO₂-eq.

Die Variante auf Basis von Recyclingstahl weist mit 1.59 kg CO₂-eq eine Reduktion von rund 50 % gegenüber Primärstahl auf.

Für das spritzgegossene PP-Tablar ergibt sich ein PCF von 3.19 kg CO₂-eq, welcher nahezu identisch mit dem Wert der Primärstahlvariante ist.

Das Holz-Tablar erreicht mit 1.36 kg CO₂-eq den niedrigsten Wert innerhalb der untersuchten Varianten.

7.4 Ergebnisse Product Carbon Footprint (PCF) Cradle-to-Grave

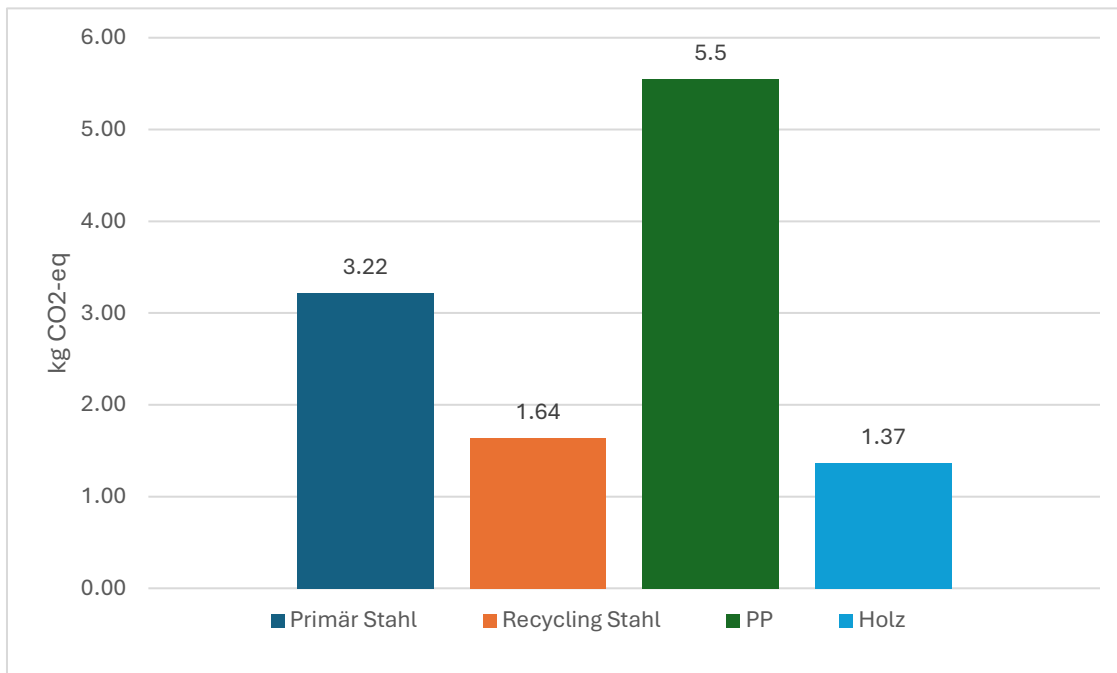


Abbildung 10: PCF-Ergebnisse Cradle-to-Grave

Die Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse des Product Carbon Footprint unter Berücksichtigung der gesamten Lebenszyklusphase inklusive End-of-Life.

Für das Primärstahl-Tablar ergibt sich ein PCF von 3.22 kg CO₂-eq, während die Recyclingstahlvariante 1.64 kg CO₂-eq erreicht.

Das PP-Tablar weist mit 5.5 kg CO₂-eq die höchste Klimawirkung der untersuchten Varianten auf. Der deutliche Anstieg im Vergleich zur Cradle-to-Gate-Betrachtung ist hauptsächlich auf die thermische Verwertung des Kunststoffes zurückzuführen, bei der der fossile Kohlenstoff vollständig als CO₂ freigesetzt wird.

Das Holz-Tablar weist mit 1.37 kg CO₂-eq weiterhin den geringsten Wert auf. Die Unterschiede zwischen Cradle-to-Gate und Cradle-to-Grave sind gering, da die freigesetzten CO₂-Emissionen biogenen Ursprungs sind.

8 Diskussion

8.1 Heavy metals into water

Die Recyclingstahlvariante reduziert die Gesamtbelastung deutlich auf 7.22 kPt. Diese Reduktion ist primär auf den geringeren Energiebedarf der Sekundärstahlproduktion im Elektrolichtbogenofen zurückzuführen. Auffällig ist jedoch der hohe Beitrag in der Kategorie *Heavy metals into water*, welcher die Gesamtbilanz signifikant beeinflusst. Dieser hohe Wert ist im Modell wesentlich auf den Prozess *Electric arc furnace slag {RoW} | treatment of electric arc furnace slag, residual material landfill | Cut-off, U* zurückzuführen. [38]

Bei der Stahlherstellung im Elektrolichtbogenofen fallen erhebliche Mengen an Nebenprodukten an, insbesondere Schlacken. Pro Tonne Stahl entstehen rund 450–500 kg Nebenprodukte, wovon etwa 80 % Schlacken sind. Ein Teil dieser Schlacken wird deponiert, insbesondere in sogenannten *Residual Material Landfills*, die für überwiegend anorganische Abfälle ausgelegt sind.

Im ecoinvent-Datensatz werden dabei sowohl kurzfristige Emissionen über Sickerwasser als auch langfristige Emissionen ins Grundwasser modelliert. Aufgrund der im Schlackenmaterial enthaltenen Schwermetalle wie Chrom, Nickel, Mangan oder Zink entstehen Beiträge in der Wirkungskategorie *Heavy metals into water*. Die erhöhte Umweltbelastung ist somit nicht primär auf den Energieeinsatz zurückzuführen, sondern auf modellierte Auswaschungsprozesse aus deponierter Elektroofenschlacke. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass in der Praxis ein zunehmender Anteil von Elektroofenschlacken intern wiederverwertet oder in anderen Industrien genutzt wird. Die modellierte Deponierung stellt daher eine konservative Annahme im Rahmen des verwendeten Datensatzes dar. Der hohe Beitrag in der Kategorie *Heavy metals into water* ist somit stark datensatzgetrieben und reflektiert insbesondere die im Modell enthaltenen Langzeitemissionen aus Deponien. [39]

Im Gegensatz dazu fällt dieser Effekt bei der Primärstahlroute deutlich geringer aus. In der Hochofen- bzw. Konverterroute entstehen zwar ebenfalls Schlacken, jedoch werden Hochofenschlacken in Europa heute zu einem sehr grossen Anteil stofflich verwertet, insbesondere als Zuschlagstoff in der Zement- und Baustoffindustrie. Dadurch werden sie im Modell häufig nicht als deponierter Reststoff, sondern als Nebenprodukt mit weiterer Nutzung abgebildet. Folglich werden im zugrunde liegenden Datensatz für Primärstahl deutlich geringere langfristige Auswaschungsemissionen ins Grundwasser modelliert. Die Kategorie *Heavy metals into water* wird daher bei der Primärstahlvariante weniger stark durch Deponieprozesse beeinflusst. Der Unterschied zwischen Primär- und Recyclingstahl ist somit weniger materialbedingt, sondern vielmehr eine Folge der im jeweiligen Datensatz modellierten Behandlung der Nebenprodukte. Während bei der Elektrolichtbogenroute ein Teil der Elektroofenschlacke als residual deponiert angenommen wird, ist die Hochofenschlacke im Modell stärker in Verwertungsprozesse integriert. Die erhöhte Belastung bei Recyclingstahl ist daher primär datensatz- und modellannahmen getrieben und nicht als generelle Aussage über die Umweltrelevanz von Sekundärstahl zu interpretieren.

8.2 Global warming

Die Auswertung der Wirkungskategorie Global warming innerhalb der Methode der ökologischen Knappheit unter der Cradle-to-Gate-Systemgrenze zeigt deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Materialvarianten. Für das Primärstahl-Tablar ergibt sich ein

Beitrag von 3.22 kPt, während die Recyclingstahlvariante mit 1.60 kPt rund halb so hoch liegt. Das PP-Tablar weist mit 3.20 kPt einen nahezu identischen Wert wie Primärstahl auf, während das Holz-Tablar mit 1.37 kPt die geringste Klimawirkung innerhalb der betrachteten Optionen erreicht.

Eine detaillierte Analyse der Prozessbeiträge verdeutlicht die Ursachen dieser Unterschiede. Beim Primärstahl dominieren insbesondere Prozesse der Roheisenherstellung, darunter pig iron production, iron sinter production sowie die Nutzung von Koks und Steinkohle. Diese Prozesse sind stark energieintensiv und führen durch den Einsatz fossiler Reduktionsmittel zu erheblichen direkten CO₂-Emissionen. Zusätzlich tragen Wärmebereitstellung aus Erdgas sowie industrielle Hochtemperaturprozesse signifikant zur Klimawirkung bei. [40]

Im Gegensatz dazu entfällt bei der Recyclingstahlvariante die energie- und emissionsintensive Erzreduktion. Die Klimawirkung wird hier primär durch den Strombedarf des Elektrolichtbogenofens bestimmt. Entsprechend treten Prozesse der Stromerzeugung, insbesondere aus fossilen Quellen wie Kohle oder Gas, als relevante Beiträge in Erscheinung. Trotz dieser Stromabhängigkeit bleibt die Gesamtklimawirkung deutlich unter jener der Primärroute, was die ökologische Vorteilhaftigkeit der Sekundärstahlproduktion im Herstellungsstadium bestätigt. [41]

Beim PP-Tablar ergibt sich eine andere Belastungsstruktur. Die Hauptbeiträge stammen aus der Propylen- und Polymerproduktion, einschliesslich fossiler Vorstufenprozesse der petrochemischen Industrie. Der in den fossilen Rohstoffen gebundene Kohlenstoff wird im Rahmen der Bilanzierung als klimarelevant berücksichtigt. Hinzu kommt der Energiebedarf für Polymerisation und Spritzguss. Dadurch erreicht das PP-Tablar trotz geringerer Gesamtbelastung in der Methode der ökologischen Knappheit eine Klimawirkung auf dem Niveau von Primärstahl. [16]

Das Holz-Tablar weist im Cradle-to-Gate-Vergleich die geringste Klimawirkung auf. Die relevanten Beiträge entstehen vor allem durch Energieeinsatz in der Holzbearbeitung sowie durch Wärmebereitstellung. Der im Holz gebundene biogene Kohlenstoff wird in dieser Betrachtung nicht als zusätzliche Belastung angerechnet, da er im Rahmen des natürlichen Wachstumsprozesses der Atmosphäre entzogen wurde. Dadurch bleibt die Klimawirkung im Vergleich zu fossilen Materialien deutlich niedriger. Zusammenfassend zeigt die Analyse, dass die Kategorie Global warming im Herstellungsstadium stark von der Rohstoffbasis und der eingesetzten Energieträgerstruktur geprägt ist. Während Primärstahl und PP vor allem durch fossile Prozessketten dominiert werden, profitiert Recyclingstahl vom Wegfall der Erzreduktion. Holz weist aufgrund seiner biogenen Herkunft die geringste Klimawirkung auf.

8.3 Energy resources

Die Wirkungskategorie Energy resources zeigt im Cradle-to-Gate-Vergleich deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Materialvarianten. Das PP-Tablar weist mit 0.86 kPt den höchsten Wert auf, gefolgt vom Holz-Tablar mit 0.48 kPt. Das Tablar aus Primärstahl erreicht 0.34 kPt, während Recyclingstahl mit 0.23 kPt die geringste Belastung in dieser Kategorie aufweist. Die erhöhten Beiträge beim PP-Tablar sind im Wesentlichen auf die fossile Rohstoffbasis zurückzuführen. Die Herstellung von Propylen sowie die vorgelagerten petrochemischen Prozesse führen zu einem erheblichen Verbrauch nicht erneuerbarer Energieträger. In der Prozessanalyse treten insbesondere Propylen Produktion, Erdgasförderung sowie Erdöl- und Gasgewinnung als dominante Beiträge hervor. Dies

verdeutlicht die starke Abhängigkeit von fossilen Ressourcen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Polypropylen.

Beim Primärstahl entstehen die Belastungen in dieser Kategorie vor allem durch den Einsatz von Kohle, Koks und Erdgas in der Hochofenroute. Die Prozesse der Kohleförderung sowie der fossilen Energiebereitstellung tragen signifikant zur Ressourceninanspruchnahme bei. Dennoch liegt der aggregierte Wert unter jenem des PP-Tablars, da fossile Emissionen im Rahmen der Methode der ökologischen Knappheit zusätzlich in der Wirkungskategorie Global warming berücksichtigt werden. Die Recyclingstahlvariante zeigt die geringste Belastung hinsichtlich Energy resources. Durch die Nutzung von Stahlschrott entfällt die energieintensive Erzreduktion, wodurch insbesondere der Bedarf an fossilen Reduktionsmitteln deutlich sinkt. Der verbleibende Ressourcenverbrauch ist primär stromgetrieben und fällt insgesamt geringer aus als bei der Primärroute.

Das Holz-Tablar weist einen mittleren Wert auf. Die Belastungen entstehen hauptsächlich durch den Einsatz von Energie in der Holzverarbeitung sowie durch Wärmebereitstellung. Im Gegensatz zu fossilen Materialien basiert der Rohstoff selbst auf einem erneuerbaren Kohlenstoffkreislauf, wodurch die Inanspruchnahme nicht erneuerbarer Energieressourcen vergleichsweise moderat bleibt. Insgesamt zeigt die Kategorie Energy resources, dass insbesondere kunststoffbasierte Materialien aufgrund ihrer fossilen Rohstoffbasis eine erhöhte Ressourceninanspruchnahme aufweisen, während Recyclingstahl im Herstellungsstadium die ressourcenschonendste Variante darstellt.

8.4 Carcinogenic substances into air

Die Wirkungskategorie *Carcinogenic substances into air* weist im Cradle-to-Gate-Vergleich erhebliche Unterschiede zwischen den Materialvarianten auf. Das Tablar aus Primärstahl erreicht mit 2.74 kPt den mit Abstand höchsten Wert. Recyclingstahl liegt mit 0.508 kPt deutlich darunter, während PP mit 0.058 kPt und Holz mit 0.081 kPt nur sehr geringe Beiträge aufweisen. Die Analyse der Prozessbeiträge zeigt, dass die Belastung bei Primärstahl nahezu vollständig durch Koks- und Sinterprozesse dominiert wird. Insbesondere der Prozess *Coke {RoW} | coking | Cut-off, U* stellt mit einem Beitrag von rund 2.68 kPt den zentralen Treiber dar. [42]

Auch die Eisensinterproduktion trägt zusätzlich zur Belastung dieser Wirkungskategorie bei. Diese Prozesse sind mit Emissionen aromatischer Kohlenwasserstoffe und weiterer potenziell kanzerogener Stoffe verbunden, die in der Methode der ökologischen Knappheit entsprechend gewichtet werden. Bei Recyclingstahl entfällt die Erz- und Koksroute weitgehend, wodurch die Beiträge deutlich sinken. Zwar treten weiterhin Emissionen aus vorgelagerten Energie- und Materialprozessen auf, jedoch ist deren Einfluss im Vergleich zur Primärroute wesentlich geringer. Der Rückgang um rund 80 Prozent gegenüber Primärstahl verdeutlicht den starken Einfluss der Hochofenroute auf diese Wirkungskategorie.

Das PP-Tablar weist in dieser Kategorie nur sehr geringe Beiträge auf. Die dominanten Prozesse liegen im Bereich der petrochemischen Vorstufen und der Energieversorgung, erreichen jedoch bei weitem nicht das Niveau der metallurgischen Koksprozesse. Ähnliches gilt für das Holz-Tablar, bei dem die Beiträge hauptsächlich aus Energiebereitstellung und geringfügigen Emissionen in der Verarbeitung resultieren. Insgesamt zeigt die Kategorie *Carcinogenic substances into air*, dass insbesondere die Primärstahlproduktion aufgrund der koks-basierten Hochofenroute stark belastend wirkt. Der Wechsel zu Recyclingstahl reduziert

diese Belastung signifikant. Kunststoff- und Holzvarianten spielen in dieser Kategorie eine untergeordnete Rolle.

8.5 Product Carbon Footprint (PCF)

Die Auswertung des Product Carbon Footprint (PCF) auf Basis der Wirkungskategorie GWP100 zeigt deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Materialvarianten. Das Primärstahl-Tablar erreicht 3.17 kg CO₂-eq pro funktioneller Einheit. Die Recyclingstahlvariante liegt mit 1.59 kg CO₂-eq rund 50 % darunter. Das PP-Tablar weist mit 3.19 kg CO₂-eq einen nahezu identischen Wert wie Primärstahl auf, während das Holz-Tablar mit 1.36 kg CO₂-eq die geringste Klimawirkung erzielt.

Die Emissionsstruktur unterscheidet sich jedoch zwischen den Materialien deutlich. Beim Primärstahl entstehen die Treibhausgasemissionen überwiegend durch die rohstoffbasierte Produktionsroute mit direkter CO₂-Freisetzung aus der Erzreduktion sowie durch den Einsatz fossiler Energieträger. Die Recyclingstahlroute vermeidet diese emissionsintensive Reduktionsstufe, wodurch sich die Klimawirkung signifikant reduziert. Die verbleibenden Emissionen sind primär energiebedingt. Beim PP-Tablar resultiert die Klimawirkung aus der fossilen Rohstoffbasis des Polymers sowie aus energieintensiven petrochemischen Vorstufen. Im Gegensatz zu Stahl entstehen die Emissionen hier nicht aus Reduktionsprozessen, sondern aus der Herstellung und Verarbeitung kohlenstoffbasierter Ausgangsstoffe. [41]

Das Holz-Tablar weist die geringste Klimawirkung auf. Die Emissionen stehen hauptsächlich im Zusammenhang mit Energieeinsatz in der Verarbeitung. Der biogene Kohlenstoff wird im Cradle-to-Gate-Ansatz nicht als zusätzliche Belastung berücksichtigt, wodurch sich ein vergleichsweise niedriger PCF ergibt. Insgesamt bestätigt der PCF-Vergleich die strukturellen Unterschiede der Produktionsrouten: Sekundärstahl und Holz zeigen im Herstellungsstadium klare klimatische Vorteile, während Primärstahl und Polypropylen aufgrund ihrer fossilen Prozessketten höhere Treibhausgasemissionen verursachen.

8.6 Unterschied Cradle-to-Gate und Cradle-to-Grave

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit unterschiedlichen Systemgrenzen zeigt deutlich, wie stark die Einbeziehung der Nutzungs- und End-of-Life-Phase die ökologische Bewertung beeinflusst. Während die Cradle-to-Gate-Betrachtung ausschliesslich die Rohstoffgewinnung, Materialproduktion und Fertigung berücksichtigt, umfasst die Cradle-to-Grave-Systemgrenze zusätzlich die Entsorgungsphase des Produkts.

Veränderung der Gesamtbelastung

Bei den Stahlvarianten zeigt sich nur eine geringe Differenz zwischen den beiden Systemgrenzen. Das Primärstahl-Tablar steigt von 9.47 kPt auf 9.57 kPt, Recyclingstahl von 7.22 kPt auf 7.30 kPt. Auch im PCF erhöht sich der Wert nur leicht (Primärstahl von 3.22 auf 3.27 kg CO₂-eq, Recyclingstahl von 1.59 auf 1.65 kg CO₂-eq).

Diese geringe Veränderung ist darauf zurückzuführen, dass Stahl am Lebensende weitgehend in einen Recyclingstrom überführt wird. Im gewählten Cut-off-Modell entstehen in der Entsorgungsphase keine erheblichen zusätzlichen Belastungen, da keine Substitutionsgutschriften angerechnet werden und das Material als Sekundärrohstoff aus dem System austritt.

Demgegenüber verändert sich die Bewertung des PP-Tablars deutlich. Während im Cradle-to-Gate-Vergleich 4.76 kPt bzw. 3.19 kg CO₂-eq ausgewiesen werden, steigt die Gesamtbelastung im Cradle-to-Grave-Szenario auf 7.24 kPt bzw. 5.56 kg CO₂-eq an. Diese Zunahme ist primär auf die modellierte thermische Verwertung zurückzuführen. Der im Polymer gebundene fossile Kohlenstoff wird am Lebensende vollständig als CO₂ freigesetzt, was die Klimawirkung signifikant erhöht.

Beim Holz-Tablar bleibt die Differenz hingegen minimal. Die Gesamtbelastung verändert sich nur geringfügig (2.72 auf 2.73 kPt; 1.36 auf 1.37 kg CO₂-eq). Dies liegt daran, da bei Holz keine zusätzliche fossile Kohlenstofffreisetzung entsteht. Der biogene Kohlenstoffkreislauf führt dazu, dass die Freisetzung am Lebensende der zuvor gebundenen Menge entspricht.

Einfluss auf die Rangfolge

Die Wahl der Systemgrenze beeinflusst insbesondere die relative Bewertung von Polypropylen. Im Cradle-to-Gate-Vergleich erscheint PP hinsichtlich der Gesamtbelastung deutlich günstiger als beide Stahlvarianten. Mit Einbezug der Entsorgungsphase verschiebt sich diese Einordnung jedoch deutlich: Im PCF weist PP im Cradle-to-Grave-Vergleich die höchste Klimawirkung aller Varianten auf. Die Rangfolge zwischen Primärstahl, Recyclingstahl und Holz bleibt hingegen weitgehend stabil. Recyclingstahl zeigt in beiden Systemgrenzen eine klare Verbesserung gegenüber Primärstahl, während Holz in beiden Betrachtungen die geringsten Umweltwirkungen aufweist.

Bedeutung für die Interpretation

Die Analyse verdeutlicht, dass eine ausschliessliche Cradle-to-Gate-Betrachtung insbesondere bei fossilen Kunststoffen zu einer unvollständigen Bewertung führen kann. Die End-of-Life-Phase ist bei Materialien mit fossiler Kohlenstoffbasis klimarelevant und kann die Gesamtbilanz entscheidend verändern. Die Wahl der Systemgrenze ist daher nicht nur eine methodische Entscheidung, sondern beeinflusst unmittelbar die ökologische Bewertung und die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen.

8.7 Einordnung im technischen und unternehmerischen Kontext

Die ökologische Bewertung allein reicht für eine fundierte Materialentscheidung nicht aus. Neben den Umweltwirkungen sind technische Anforderungen, bestehende Produktionsprozesse, Wirtschaftlichkeit sowie die strategische Positionierung des Unternehmens zu berücksichtigen. Der in der Schweiz bezogene DC01-Stahl wird in der Regel von europäischen Herstellern geliefert. Dabei ist nicht transparent ersichtlich, ob es sich um Stahl aus einer klassischen Primärroute oder um Material mit bereits integriertem Recyclinganteil handelt. In der europäischen Stahlproduktion existieren sowohl Hochofen- als auch Elektrolichtbogenwerke, wodurch viele Flachstahlprodukte einen unterschiedlichen Schrottanteil aufweisen. Ohne spezifische Lieferantendeklaration bleibt der tatsächliche Recyclinganteil des gelieferten DC01-Stahls jedoch unklar.

Die in dieser Arbeit vorgenommene Gegenüberstellung von Primärstahl und Recyclingstahl ist daher als modellhafte Abbildung zweier Referenzszenarien zu verstehen. Das real bezogene Material liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit zwischen diesen beiden Extremen. Eine transparente Deklaration sowie eine gezielte Beschaffung von Stahl mit dokumentiert hohem Recyclinganteil würden eine ökologische Optimierung ermöglichen, ohne konstruktive Anpassungen am Produkt oder grundlegende Änderungen der bestehenden

Produktionsprozesse zu erfordern. Stahl weist zudem eine hohe strukturelle Festigkeit, Formstabilität und Langlebigkeit auf und ist in der aktuellen Wertschöpfungskette etabliert.

Polypropylen bietet demgegenüber Vorteile hinsichtlich Gewichtes, Formfreiheit und Korrosionsbeständigkeit. Eine Umsetzung würde jedoch eine Umstellung der Fertigungstechnologie auf Spritzgussprozesse erfordern und damit Investitionen sowie strukturelle Anpassungen nach sich ziehen. Darüber hinaus zeigt sich insbesondere im Cradle-to-Grave-Vergleich eine erhöhte Klimawirkung aufgrund der fossilen Rohstoffbasis, wodurch die ökologische Vorteilhaftigkeit relativiert wird. Holz weist in der vorliegenden Untersuchung die geringsten Umweltwirkungen auf. Zahlreiche Möbelprodukte im Markt belegen, dass konstruktive Anforderungen wie Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Feuchtebeständigkeit durch geeignete Werkstoffwahl, Oberflächenbehandlung und konstruktive Auslegung technisch lösbar sind. Holz stellt somit grundsätzlich eine realistische Materialalternative dar, sofern es mit den funktionalen Anforderungen, dem Designkonzept, der Produktionsstrategie und der Markenpositionierung des Unternehmens vereinbar ist.

8.8 Einordnung der Ergebnisse in den Stand der Forschung

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich in ihrer grundsätzlichen Tendenz mit bestehenden Ökobilanzstudien und Branchenberichten in Einklang bringen, auch wenn keine identische Untersuchung zum betrachteten Tablar gefunden wurde. Der Literaturvergleich dient daher nicht einer direkten 1:1-Validierung, sondern der Einordnung der ermittelten Unterschiede zwischen Primärstahl, Recyclingstahl, Polypropylen und Holz in den aktuellen Stand der Forschung. [40] [3]

Für die Stahlvarianten bestätigt die Literatur, die in dieser Arbeit beobachtete Tendenz, dass primär erzeugter Stahl eine deutlich höhere Klimawirkung aufweist als schrottbasierter Recyclingstahl. Die IEA beschreibt die Stahlindustrie als einen der emissionsintensivsten Industriesektoren und weist darauf hin, dass die Primärroute stark von Kohle und fossilen Energieträgern geprägt ist, während der verstärkte Einsatz von Schrott und Elektrolichtbogenöfen ein zentraler Hebel zur Emissionsminderung ist. [40]

Diese Einordnung deckt sich mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, in der Recyclingstahl sowohl in der Kategorie Global warming als auch im Product Carbon Footprint deutlich besser abschneidet als Primärstahl.

Auch die Verwendung von kaltgewalztem DC01-Stahl als Referenzmaterial ist sachlich plausibel. Eine verifizierte EPD des International EPD System umfasst explizit kaltgewalzte Stahlbleche des Typs DC01 und zeigt damit, dass für diesen Werkstoff belastbare produktspezifische Lebenszyklusdaten verfügbar sind. [3]

Dies stützt die Wahl des Referenzmaterials in der vorliegenden Untersuchung.

Für die PP-Variante ist die in dieser Arbeit festgestellte Belastungsstruktur ebenfalls mit der Literatur vereinbar. Studien zur Ökobilanz von Polypropylen zeigen, dass die Umweltwirkungen von PP wesentlich durch die fossilbasierte Rohstoffbasis sowie die vorgelagerten petrochemischen Herstellungsprozesse geprägt werden. [43]

Ergänzend zeigen Untersuchungen zum Spritzguss, dass innerhalb der Verarbeitung insbesondere der Stromverbrauch des Spritzgussprozesses einen relevanten Beitrag zur Umweltwirkung leisten kann. [44]

Dies passt zu den Ergebnissen dieser Arbeit, wonach PP im Cradle-to-Gate-Vergleich zwar eine tiefere Gesamtbelastung als Primärstahl aufweist, beim PCF jedoch nahezu auf demselben Niveau liegt. Auch die deutliche Verschlechterung der PP-Variante im Cradle-to-Grave-Vergleich ist fachlich nachvollziehbar. Literatur zur Circular Economy von Kunststoffen zeigt, dass die End-of-Life-Phase bei fossilbasierten Kunststoffen eine zentrale Rolle spielt und insbesondere die thermische Verwertung mit relevanten Treibhausgasemissionen verbunden ist. [4]

Damit ist die in dieser Arbeit beobachtete starke Zunahme des PCF für PP bei Einbezug der Entsorgungsphase plausibel.

Auch die gute Bewertung der Holzvariante steht grundsätzlich im Einklang mit dem Stand der Forschung. Vergleichsstudien zwischen Holz und Stahl zeigen, dass Holz in frühen Lebenszyklusphasen häufig tiefere Treibhausgasemissionen aufweist als funktional vergleichbare Stahlalternativen, auch wenn die Resultate stark von den jeweiligen Annahmen und Systemgrenzen abhängen. [45]

Diese allgemeine Tendenz spiegelt sich auch in der vorliegenden Arbeit wider, in der das Holz-Tablar sowohl im Cradle-to-Gate- als auch im Cradle-to-Grave-Vergleich die geringsten Umweltwirkungen zeigt. Insgesamt sind die Resultate dieser Arbeit damit in ihrer Richtung mit dem Stand der Forschung vereinbar. Primärstahl weist die höchsten klimarelevanten Belastungen auf, Recyclingstahl reduziert diese deutlich, PP zeigt trotz gewisser Vorteile im Herstellungsstadium klare Nachteile aufgrund seiner fossilbasierten Rohstoffbasis und der Entsorgungsphase, und Holz schneidet ökologisch am günstigsten ab. Gleichzeitig zeigt der Vergleich mit der Literatur auch, dass konkrete Resultate stets stark von Datensätzen, Modellannahmen, Strommix, End-of-Life-Szenarien und der funktionellen Einheit abhängen. Die vorliegende Arbeit liefert daher keine allgemeingültige Aussage für alle Anwendungen, sondern eine belastbare produktspezifische Einordnung für das untersuchte Tablar von peka-metall AG.

8.9 Nachfrage bei Vertreibern

Zur Klärung der Materialherkunft sowie eines möglichen Recyclinganteils im eingesetzten DC01A-Stahl wurden im Rahmen dieser Arbeit mehrere Vertreter und Hersteller kontaktiert. Ziel war es, Transparenz hinsichtlich Produktionsroute und Rohstoffbasis zu erhalten. Von den angefragten Unternehmen ging lediglich eine Rückmeldung ein. Stahl Gerlafingen teilte mit, dass dort überwiegend im Elektrolichtbogenofen auf Basis von Stahlschrott produziert wird. Gleichzeitig wurde jedoch darauf hingewiesen, dass in diesem Werk keine kaltgewalzten Flachprodukte wie DC01A hergestellt werden. Eine direkte Aussage zum tatsächlich bezogenen DC01A-Stahl konnte somit nicht getroffen werden.

Von den weiteren kontaktierten Unternehmen erfolgte keine Rückmeldung. Dadurch blieb die konkrete Herkunft sowie der effektive Recyclinganteil des eingesetzten DC01A-Stahls ungeklärt. Es kann daher nicht abschliessend beurteilt werden, ob das Material aus einer klassischen Primärroute, aus einer Sekundärroute oder aus einer Mischproduktion mit variierendem Schrottanteil stammt. Die Modellierung von Primärstahl und Recyclingstahl in dieser Arbeit ist folglich als bewusste Abbildung zweier Referenzszenarien zu verstehen. Die reale Materialzusammensetzung liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit zwischen diesen beiden Extremen. Die eingeschränkte Datenverfügbarkeit verdeutlicht die begrenzte Transparenz entlang der Lieferkette und stellt eine methodische Unsicherheit in der Bewertung dar.

9 Handlungsempfehlung

Die durchgeführte LCA sowie die Auswertung des Product Carbon Footprint zeigen, dass Stahl unter Berücksichtigung der bestehenden Produktionsstruktur für peka-metall AG die sinnvollste Materialoption darstellt. Insbesondere Stahl mit erhöhtem Recyclinganteil weist sowohl in der Bewertung nach der Methode der ökologischen Knappheit als auch im PCF deutliche Vorteile gegenüber rein primär erzeugtem Stahl auf. Diese Optimierung kann umgesetzt werden, ohne dass konstruktive Anpassungen oder grundlegende Änderungen in der Fertigung erforderlich sind. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, den Fokus auf eine transparente Beschaffung mit möglichst hohem dokumentiertem Recyclinganteil zu legen. Eine enge Abstimmung mit Lieferanten sowie die Anforderung entsprechender Nachweise könnten die ökologische Positionierung des Unternehmens stärken und gleichzeitig innerhalb der bestehenden Wertschöpfungskette bleiben.

Holz weist in der vorliegenden Untersuchung die geringsten Umweltwirkungen auf. Rein ökologisch betrachtet stellt Holz somit die vorteilhafteste Materialoption dar. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass der Markt für holzbasierte Möbelprodukte stark etabliert ist und von spezialisierten Unternehmen im Premiumsegment ebenso wie im Niedrigpreissegment umfassend bedient wird. peka-metall AG ist technologisch und organisatorisch auf Metallverarbeitung ausgerichtet. Eine vollständige Umstellung auf Holz würde neue Kompetenzen, Investitionen in Maschinen und Prozesse sowie strukturelle Anpassungen erfordern. Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine vollständige Substitution des bestehenden Metallprodukts daher kritisch zu beurteilen.

Eine strategisch interessante Perspektive könnte jedoch in einer hybriden Produktentwicklung liegen. Denkbar ist die Entwicklung einer ökologisch positionierten Produktlinie, welche Metall und Holz kombiniert. Durch eine Kooperation mit einem spezialisierten Schreiner oder Holzverarbeiter könnte die metalltechnische Kompetenz von peka-metall AG mit den ökologischen Vorteilen und der gestalterischen Qualität von Holz verbunden werden. Ein solcher Ansatz würde es ermöglichen, die Kernkompetenz im Metallbereich zu erhalten und gleichzeitig eine nachhaltige Produktlinie zu etablieren, ohne die gesamte Produktionsstruktur umzustellen. Zusammenfassend wird empfohlen, kurzfristig den Recyclinganteil im eingesetzten Stahl zu klären und nach Möglichkeit zu erhöhen. Parallel dazu kann geprüft werden, ob eine hybride Produktstrategie mit Holz als Ergänzung zur bestehenden Metallkompetenz ein marktfähiges Innovationspotenzial bietet.

10 Fazit

Ziel dieser Arbeit war es, die Umweltwirkungen eines Tablarprodukts aus DC01-Stahl mit alternativen Werkstoffen zu vergleichen und auf Basis eines Life Cycle Assessment (LCA) eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Materialwahl zu schaffen. Hierzu wurden die Varianten Primärstahl, Recyclingstahl, Polypropylen sowie Holz unter den Systemgrenzen Cradle-to-Gate und Cradle-to-Grave untersucht. Zusätzlich wurde der Product Carbon Footprint (PCF) ausgewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass Recyclingstahl gegenüber Primärstahl eine deutliche ökologische Verbesserung darstellt. Insbesondere in der Kategorie Global warming sowie im Product Carbon Footprint reduziert sich die Belastung signifikant, ohne dass konstruktive oder produktionstechnische Anpassungen erforderlich sind. Die Analyse verdeutlicht, dass die Sekundärroute im Herstellungsstadium klare Vorteile aufweist.

Polypropylen erscheint im Cradle-to-Gate-Vergleich teilweise konkurrenzfähig, verliert jedoch bei Einbezug der Entsorgungsphase deutlich an Vorteil. Die fossile Rohstoffbasis und die thermische Verwertung am Lebensende führen zu einer erhöhten Klimawirkung im Cradle-to-Grave-Szenario.

Holz weist in beiden Betrachtungen die geringsten Umweltwirkungen auf. Rein ökologisch stellt Holz somit die vorteilhafteste Option dar. Die Bewertung zeigt jedoch auch, dass eine Materialentscheidung nicht ausschliesslich auf Umweltindikatoren basieren kann, sondern technische, wirtschaftliche und strategische Rahmenbedingungen berücksichtigen muss. Daher ist Holz nicht als kurzfristig naheliegende Substitutionslösung einzustufen.

Für die bestehende Produktionsstruktur von peka-metall AG stellt Recyclingstahl die ökologisch sinnvollste und gleichzeitig realistisch umsetzbare Optimierung dar. Eine transparente Klärung des effektiven Recyclinganteils in der Lieferkette ist dabei zentral. Die Arbeit zeigt insgesamt, dass die Wahl der Systemgrenze sowie die Modellannahmen einen wesentlichen Einfluss auf die Bewertung haben. Gleichzeitig verdeutlicht sie, dass ökologische Optimierungen innerhalb bestehender Strukturen möglich sind, ohne die technologische Identität des Unternehmens grundlegend zu verändern.

11 Ausblick

Die vorliegende Untersuchung verdeutlicht, dass durch eine gezielte Materialwahl ökologische Optimierungspotenziale innerhalb bestehender Produktstrukturen erschlossen werden können. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Aussagekraft einer LCA in hohem Masse von der Verfügbarkeit, Qualität und Transparenz der zugrunde liegenden Daten abhängt. Für weiterführende Untersuchungen erscheint daher eine vertiefte Analyse der tatsächlichen Materialherkunft zweckmässig. Insbesondere eine verbindliche Deklaration des Recyclinganteils im eingesetzten Stahl würde dazu beitragen, die ökologische Bewertung zu präzisieren und bestehende Unsicherheiten zu reduzieren. Ebenso könnte eine engere Zusammenarbeit mit Lieferanten zur Bereitstellung spezifischer Produktdaten oder Environmental Product Declarations (EPD) die Belastbarkeit der Datengrundlage wesentlich verbessern.

Darüber hinaus könnten weiterführende Analysen zusätzliche Optimierungspotenziale entlang des gesamten Produktlebenszyklus identifizieren. Von besonderem Interesse wären dabei Untersuchungen zur Reduktion des Materialeinsatzes, zur konstruktiven Gewichtsoptimierung sowie zur Verbesserung der Demontierbarkeit und Kreislauffähigkeit der Produkte. Auch die Entwicklung hybrider Materialkonzepte stellt ein potenzielles Innovationsfeld dar. Die Kombination metallischer Komponenten mit nachwachsenden Rohstoffen könnte ökologische Vorteile mit funktionalen und gestalterischen Differenzierungsmöglichkeiten verbinden und dadurch neue Marktsegmente erschliessen. Eine entsprechende Weiterentwicklung würde jedoch vertiefte technische, wirtschaftliche und marktorientierte Untersuchungen voraussetzen.

Langfristig ist zudem davon auszugehen, dass externe Anforderungen an Umwelttransparenz und Emissionsreduktion weiter an Bedeutung gewinnen werden. Dazu zählen sowohl regulatorische Entwicklungen wie die Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) als auch freiwillige Rahmenwerke wie die Science Based Targets initiative (SBTi). Für Unternehmen kann die frühzeitige Erhebung belastbarer ökologischer Kennzahlen sowie die transparente Gestaltung der Lieferkette eine wichtige Grundlage darstellen, um auf zukünftige Anforderungen vorbereitet zu sein und strategische Wettbewerbsvorteile zu erschliessen. Der Ausblick macht somit deutlich, dass die vorliegende Arbeit nicht als abschliessende Betrachtung, sondern als Ausgangspunkt für eine systematische ökologische Weiterentwicklung der Produktstrategie verstanden werden kann.

12 Ehrlichkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Projektarbeit selbständig und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen verfasst zu haben. Die wörtlich oder inhaltlich aus den aufgeführten Quellen entnommenen Stellen sind in der Arbeit als Zitat bzw. Paraphrase kenntlich gemacht. Diese Projektarbeit ist noch nicht veröffentlicht worden. Sie ist somit weder anderen Interessierten zugänglich gemacht noch einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Brugg, 22.03.2026

Name: Pascal Limacher

Unterschrift:



13 Hilfsmittelverzeichnis

ChatGPT	KI-Textassistent zur Unterstützung bei der strukturellen Gliederung der Arbeit, bei der Erstellung von Abbildungen sowie bei der Recherche von Quellen
---------	--

14 Anhang

Peka_Vordergrundsystem.xlsx

LCA_Auswertung.xlsx

Poster

15 Quellenverzeichnis

- [1] K. Speichern, „Die neue EU-Ökodesign-Verordnung (ESPR)“, IHK Hannover. Zugegriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ihk.de/hannover/hauptnavigation/sonderseiten/buerokratie/nachhaltigkeit/oekode-sign-vo>
- [2] SBTI, „Standards and guidance - Science Based Targets“, Science Based Targets Initiative. Zugegriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://sciencebasedtargets.org/standards-and-guidance>
- [3] Stena Stål AB, „Kaltgewalzte Stahlbleche“, EPD, EPD-IES-0004601:001 (SP-04601), Dez. 2021. Zugegriffen: 7. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd4601>
- [4] M. Hibel und J. Nühlen, „ZUKUNFT STAHLSCROTT“. Zugegriffen: 22. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/248e16d6-e699-4b04-9ddc-d3f1823c6ce2/content>
- [5] ECCA, „Comparative life cycle assessment of pre-painted (coil coated) and post-painted sheet steel for domestic appliance manufacture. Summary report“, 2019. Zugegriffen: 22. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.prepaintedmetal.eu/pdfs/lca-studies/ECCA_Steel%20for%20Domestic%20Appliance%20LCA_Summary%20Report%202019.pdf
- [6] SNV, Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14040:2006), 2006. Zugegriffen: 8. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/en/search?q=ISO+14040&scope=singleSearchField&narrowResultsOpen=true>
- [7] SNV, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006), 2006. Zugegriffen: 8. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/en/search?q=ISO+14044&scope=singleSearchField&narrowResultsOpen=true>
- [8] SimaPro, „Database Manual Methods“, Apr. 2025. Zugegriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2025/04/DatabaseManualMethods.pdf>
- [9] Nova Stahl, „DC01 Datenblatt“. Zugegriffen: 24. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.novastahl.ch/storage/download/datenblaetter/NovaStahl_DC01_Datenblatt.pdf
- [10] Ecoinvent, „market for steel, low-alloyed - Global - steel, low-alloyed | ecoQuery“. Zugegriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/7099/documentation>
- [11] M. Haupt, T. Kägi, und S. Hellweg, „Life cycle inventories of waste management processes“, Data Brief, Bd. 19, S. 1441–1457, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.dib.2018.05.067.
- [12] Ecoinvent, „market for transport, freight, lorry, unspecified - Europe - transport, freight, lorry, diesel, unspecified | ecoQuery“. Zugegriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/18337/documentation>

- [13] Ecoinvent, „hot rolling, steel - Europe without Austria - hot rolling, steel | ecoQuery“. Zugegriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/23503/documentation>
- [14] Ecoinvent, „powder coating, steel - Europe - powder coat, steel | ecoQuery“. Zugegriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/7307/documentation>
- [15] M. Haupt, T. Kägi, und S. Hellweg, „Life cycle inventories of waste management processes“, Data Brief, Bd. 19, S. 1441–1457, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.dib.2018.05.067.
- [16] Hanser Verlag, „Polypropylen | Thermoplaste mit vielen Anwendungsgebieten“, Kunststoffe: Nachrichten, Stellenmarkt, Produkte für die Kunststoffindustrie | Kunststoffe.de. Zugegriffen: 27. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polypropylen-pp-264406>
- [17] Ecoinvent, „polypropylene, pellets, recycled to generic market for polypropylene, granulate - Europe - polypropylene, granulate | ecoQuery“. Zugegriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/93209/documentation>
- [18] MatWeb, „Mitsubishi Chemical Advanced Materials Proteus™ Homopolymer PP White Polypropylene“, matweb.com. Zugegriffen: 27. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=5edf33ff6b564b81bc8b2e4cc35e82b3>
- [19] Chemie.de, „Polypropylen“, chemie.de. Zugegriffen: 27. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.chemie.de/lexikon/Polypropylen.html>
- [20] Hanser Verlag, „Spritzgiessen | Verarbeitungsverfahren für Kunststoffe“, Kunststoffe: Nachrichten, Stellenmarkt, Produkte für die Kunststoffindustrie | Kunststoffe.de. Zugegriffen: 28. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/spritzgiessen-254055>
- [21] Ecoinvent, „treatment of waste polypropylene, municipal incineration - Global - waste polypropylene | ecoQuery“. Zugegriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/29781/documentation>
- [22] Ecoinvent, „waste mixed polyolefins, processed, Recycled Content cut-off - Global - waste mixed polyolefins, processed | ecoQuery“. Zugegriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/92686/documentation>
- [23] BAFU, „Kunststoffe“. Zugegriffen: 28. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/de/kunststoffe>
- [24] Ecoinvent, „market for polypropylene, granulate - Europe - polypropylene, granulate | ecoQuery“. Zugegriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/276139/documentation>
- [25] Ecoinvent, „injection moulding - Europe - injection moulding | ecoQuery“. Zugegriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/3753/documentation>
- [26] B. Nowack und D. Kawecki-Wenger, „Modellierung von Plastik in der Umwelt“, 2020. Zugegriffen: 28. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/dam/en/sd-web/u5yMfcY6eRkV/artikel-modellierung-plastik-umwelt.pdf>

- [27] Sperrholz-Info, „Sperrholz-Grundtypen“, Sperrholz-Info. Zugriffen: 24. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://sperrholz-info.de/werkstoff/grundtypen/>
- [28] Ecoinvent, „market for plywood - Europe - plywood | ecoQuery“. Zugriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/22982/documentation>
- [29] Holzplatten.de, „Multiplex-Birke 4 mm, 9 mm, 12 mm, 15 mm, 18 mm, 21 mm“, Holzplatten.de. Zugriffen: 28. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://holzplatte.de/holzzuschnitt/multiplex-birke/109/multiplex-birke-4-mm-9-mm-12-mm-15-mm-18-mm-21-mm>
- [30] Chemie.de, „Wood-Plastic-Composite“, Chemie.de. Zugriffen: 1. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.chemie.de/lexikon/Wood-Plastic-Composite.html>
- [31] Ecoinvent, „alkyd resin production, long oil, product in 70% white spirit solution state - Europe - alkyd resin, long oil, without solvent, in 70% white spirit solution state | ecoQuery“. Zugriffen: 21. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/9620/documentation>
- [32] Ultra Nature, „TM-928-ULTRA-NATURE-Holzlack.pdf“. Zugriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ultranature.de/wp-content/uploads/2021/02/TM-928-ULTRA-NATURE-Holzlack.pdf>
- [33] Ecoinvent, „treatment of waste wood, untreated, municipal incineration FAE - Switzerland - electricity, for reuse in municipal waste incineration only | ecoQuery“. Zugriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/28421/documentation>
- [34] Ensinger, „PA Polyamidguss | Ensinger“, Gusspolyamid - Nylonguss. Zugriffen: 28. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ensingerplastics.com/de-de/thermoplastische-kunststoffe/polyamidguss>
- [35] Plasticker, „Rohstoffe & Preise“, plasticker.de. Zugriffen: 28. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://plasticker.de/preise/preise_monat_multi.php
- [36] Kunststoffe.de, „Polyvinylchlorid | Standardthermoplaste | Grundlagenartikel“, Kunststoffe: Nachrichten, Stellenmarkt, Produkte für die Kunststoffindustrie | Kunststoffe.de. Zugriffen: 1. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/weichmacherfreies-polyvinylchlorid-pvc-u-264398>
- [37] Kunststoffe.de, „Polyethylen (PE) | Alles über den bekanntesten Kunststoff“, Artikel. Zugriffen: 1. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polyethylen-pe-254120>
- [38] Ecoinvent, „treatment of electric arc furnace slag, residual material landfill - Rest-of-World - electric arc furnace slag | ecoQuery“. Zugriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/23609/documentation>
- [39] K. Schwarz, „Schlacken und Stäube aus der Stahlindustrie – Klassifizierung von Abfall und Nebenprodukt von Elektrolichtbogenöfen“. Zugriffen: 4. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://epub.jku.at/download/pdf/9279217.pdf>
- [40] IEA, „Iron and Steel Technology Roadmap – Analysis“, IEA. Zugriffen: 4. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>

[41] worldsteel, „Steel’s contribution to a low carbon future and climate resilient societies: worldsteel position paper“, 2020. Zugegriffen: 4. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.acero.org.ar/wp-content/uploads/2020/02/Position_paper_climate_2020_vfinal.pdf

[42] Ecoinvent, „coke production - Rest-of-World - coke | ecoQuery“. Zugegriffen: 21. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/9079/documentation>

[43] A. Alsabri, F. Tahir, und S. G. Al-Ghamdi, „Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region“, Mater. Today Proc., Bd. 56, S. 2245–2251, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.574.

[44] A. Elduque, D. Elduque, C. Javierre, Á. Fernández, und J. Santolaria, „Environmental impact analysis of the injection molding process: analysis of the processing of high-density polyethylene parts“, J. Clean. Prod., Bd. 108, S. 80–89, Dez. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.07.119.

[45] F. Morris, S. Allen, und W. Hawkins, „On the embodied carbon of structural timber versus steel, and the influence of LCA methodology“, Build. Environ., Bd. 206, S. 108285, Dez. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108285.