

LCA

Ökobilanz Matratzenrecycling

Auftraggeberin

Stiftung Pusch – Praktischer Umweltschutz Schweiz in Zusammenarbeit mit der Matratzen-Allianz

Verfasser*innen

Thomas Kägi und Mareike Weiner, Carbotech AG

Version 1.2. Zürich, 30.9.2024

Impressum

Auftraggeberin

Stiftung Pusch – Praktischer Umweltschutz Schweiz in Zusammenarbeit mit der Matratzen-Allianz

Auftragnehmerin

Carbotech AG, Basel

Projektleitung

Thomas Kägi, Carbotech AG

+41 44 444 20 17

t.kaegi@carbotech.ch

Autor*innen

Thomas Kägi und Mareike Weiner, Carbotech AG

Hinweis

Gegenüber der Version 1.0 enthält die Version 1.2 auch die Rückgewinnung des Stahls aus der KVA sowie eine Korrektur der involvierten Stofffraktionen.

Dieser Bericht wurde im Auftrag der Stiftung Pusch in Zusammenarbeit mit der Matratzen-Allianz verfasst. Für den Inhalt ist alleine die Auftragnehmerin verantwortlich.

—

Dieser Bericht wurde von der Carbotech AG mit Sorgfalt erarbeitet unter Verwendung aller uns zur Verfügung stehenden, aktuellen und angemessenen Hilfsmittel und Grundlagen, dies im Rahmen der vertraglichen Abmachung mit der Auftraggeberin unter Berücksichtigung der Vereinbarung bezüglich eingesetzter Ressourcen. Die verwendeten Daten und Grundlagen der Bewertungsmethode, auf welcher dieser Bericht basiert, können ändern. Danach sind die Schlussfolgerungen nicht mehr uneingeschränkt gültig und von der Auftraggeberin nur noch auf eigene Verantwortung verwendbar. Aus dem Inhalt dieses Berichtes hervorgehende Veröffentlichungen, welche Resultate und Schlussfolgerungen daraus nur teilweise und nicht im Sinne des Gesamtberichtes darstellen, sind nicht erlaubt. Insbesondere dürfen solche Veröffentlichungen diesen Bericht nicht als Quelle angeben oder es darf nicht anderweitig eine Verbindung mit diesem Bericht oder der Carbotech AG hergestellt werden können.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Ausgangslage und Auftrag	7
2 Vorgehen und Methodik	7
2.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung	7
2.2 Vorgehen bei der Ökobilanzierung	8
3 Zielsetzung und Rahmenbedingungen	9
3.1 Zielsetzung	9
3.2 Anwendung und Zielgruppe der Studie	9
3.3 Betrachtete Altmatratzenverwertungen	9
3.3.1 Verbrennung von Altmatratzen	9
3.3.2 Recycling von Altmatratzen	10
3.4 Vergleichsbasis: Die funktionelle Einheit	12
3.5 Systemgrenzen	12
3.6 Sachbilanz	13
3.6.1 Vordergrunddaten	14
3.6.2 Hintergrunddaten	14
3.7 Bestimmung der Umweltauswirkungen (Wirkbilanz)	14
3.8 Bewertung der Umweltbelastungen	14
3.8.1 Methode der ökologischen Knappheit (Umweltbelastungspunkte – UBP)	16
3.9 Grenzen der vorliegenden Untersuchung	16
3.9.1 Inhaltlich	16
3.9.2 Methodisch	17
3.10 Unsicherheiten	17
4 Resultate und Diskussion	18
4.1.1 Recycling vs. thermische Verwertung	18
4.1.2 Effekt, wenn Textilien nicht rezykliert werden	20
4.1.3 Unsicherheitsanalyse	22
5 Fazit	24
6 Literatur	25

Zusammenfassung

Ziel und Vorgehen

Jedes Jahr landen in der Schweiz geschätzte 1 Mio. Matratzen im Abfall und werden verbrannt (Stand 2022, matratzen-allianz.ch). Akteure aus der ganzen Matratzen-Wertschöpfungskette haben Ende September 2021 die Matratzen-Allianz gegründet, um einen sinnvolleren Umgang mit ausgedienten Matratzen zu finden. Das mittelfristige Ziel der Matratzen-Allianz ist, in der Schweiz eine kreislauffähige Matratze auf den Markt zu bringen. 2022 ist ein Recycling Pilotversuch geplant. Mit einer Ökobilanz möchte PUSCH in Zusammenarbeit mit der Matratzen-Allianz das Matratzenrecycling ökologisch bewerten lassen. Die Studie verfolgt das übergeordnete Ziel, mittels Ökobilanzierung aufzuzeigen:

- wie hoch der ökologische Nutzen des Recyclings von Matratzen im Vergleich zur Verbrennung der Matratzen in einer durchschnittlichen Schweizer Kehrrichtverbrennungsanlage (KVA) ist;
- welcher Nutzen durch die Wertstoffrückgewinnung und Weiterverwendung erzielt werden kann.

Entsprechend des Ökobilanz-Ansatzes wurden soweit möglich alle umweltrelevanten Prozesse über den gesamten Lebensweg von 1 t Altmatratzen und für die Bewertung der Effekte der Substitution der eingesparten Energien und Materialien berücksichtigt. Es wurden das Treibhauspotenzial gemäss IPCC 2021, GWP100 sowie der Umweltfussabdruck gemäss der Methode der ökologischen Knappheit 2021 berechnet.

Als Vergleichsgrösse wurde 1 Tonne Altmatratzen, ab Sammelstelle, betrachtet.

Resultate

Der Vergleich des stofflichen Matratzenrecyclings mit der thermischen Verwertung der Matratzen in einer KVA zeigt aus ökologischer Sicht, dass sich das stoffliche Recycling unter den betrachteten Rahmenbedingungen auf jeden Fall lohnt. Das Potential aus Sicht des Klimafussabdrucks liegt bei jährlich 20'000 t anfallenden Altmatratzen bei 48'000 - 58'000 t CO₂-eq.

Der Nettonutzen bildet sich als Differenz zwischen dem Fussabdruck des Matratzenrecyclings und dem Fussabdruck der thermischen Verwertung der Matratzen in einer KVA. Werden Matratzen statt thermisch verwertet einem stofflichen Recycling unterzogen, resultiert ein Klimanutzen von rund 2.9 t CO₂-eq pro t Matratzen resp. ein Umweltnutzen von rund 10.8 Mio. UBP. Ohne Textilrecycling liegt der Klimanutzen bei 2.4 t CO₂-eq pro t Matratzen resp. bei einem Umweltnutzen von rund 2.2 Mio. UBP.

Die Matratzensammlung bzw. die Transporte tragen rund 0.6 t CO₂-eq resp. 1 Mio. UBP pro t Matratzen zum Resultat bei. Der eigentliche Recyclingprozess weist dagegen einen wesentlich tieferen Beitrag auf. Dabei sind die beim Recyclingprozess anfallenden nicht verwertbaren und in der KVA entsorgten Fraktionen noch wesentlich relevanter (0.18 t CO₂-eq resp. 0.19 Mio. UBP pro t Matratzen). 90 % der Materialien können gemäss Aussage des Matratzenrecyclers wiederverwendet werden. Das in den Matratzen enthaltene Polyurethan generiert eine Gutschrift von rund 1.72 t CO₂-eq respektive 3.03 Mio. UBP pro t Matratzen. Das Textilrecycling trägt zu weiteren 0.62 t CO₂-eq resp. 8.67 Mio. UBP pro t Matratzen bei. Auffallend hier ist die wesentlich grössere Gutschrift beim Umweltfussabdruck. Der Grund dafür ist, dass bei den Textilien Baumwolle ersetzt wird. Der Baumwollanbau generiert v.a. auch andere Umweltbelastungen, welche im CO₂-Fussabdruck nicht berücksichtigt werden. Die restlichen Materialien (Stahlfedern, weitere Kunststoffe) tragen noch 0.56 t CO₂-eq resp. 1.1 Mio. UBP pro t Matratzen zum Resultat bei. Die dabei anfallenden Gutschriften für den Ersatz von Primärmaterialien übersteigen den Aufwand des Recyclings um ein Mehrfaches.

Bei der thermischen Verwertung der Matratzen in der KVA werden Entsorgungsemissionen von rund 1.8 t CO₂-eq resp. 1.9 Mio. UPB pro t Matratzen generiert. Demgegenüber stehen Gutschriften für die zurückgewonnene Menge an Stahl sowie für generierte Menge an Strom und Wärme von rund 1.1 t CO₂-eq resp. 2.8 Mio. UPB pro t Matratzen.

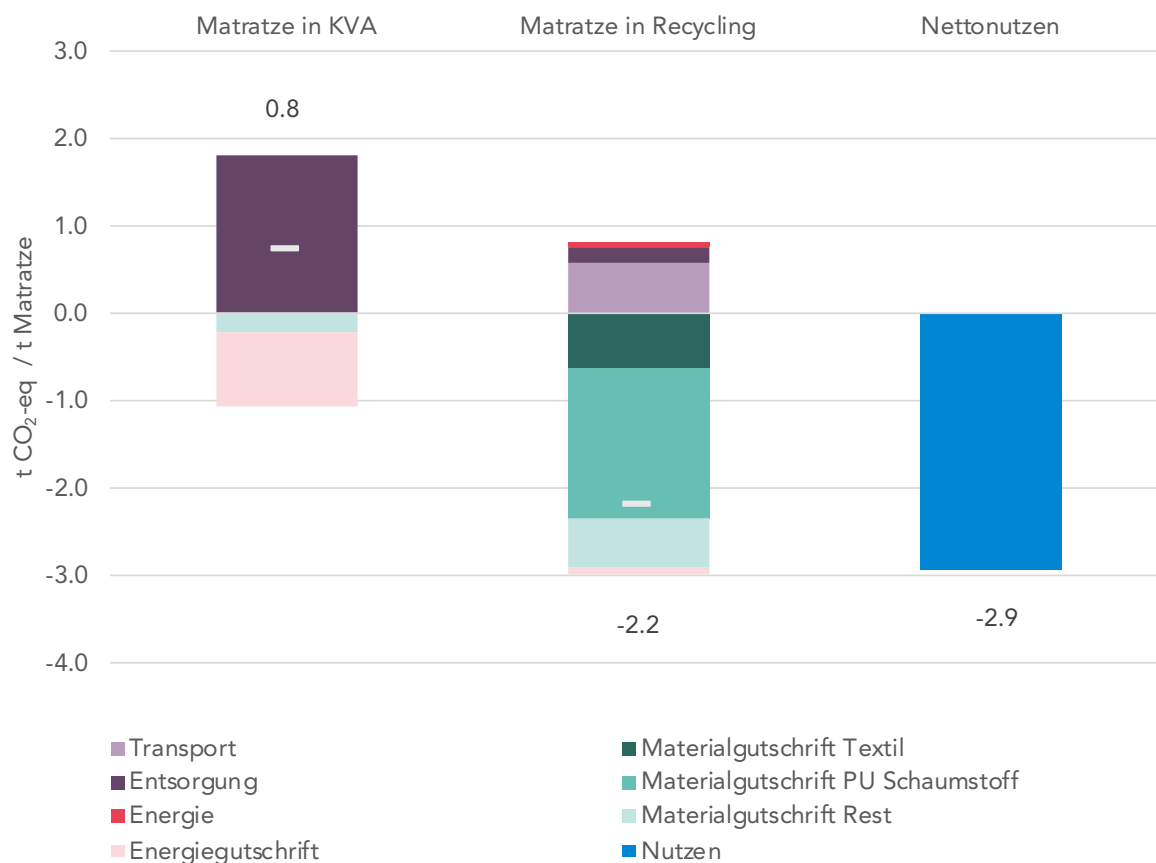


Abbildung 1: CO₂-Fussabdruck der beiden Matratzenverwertungen sowie Nettonutzen

CO₂-eq: IPCC 2021 (GWP100)

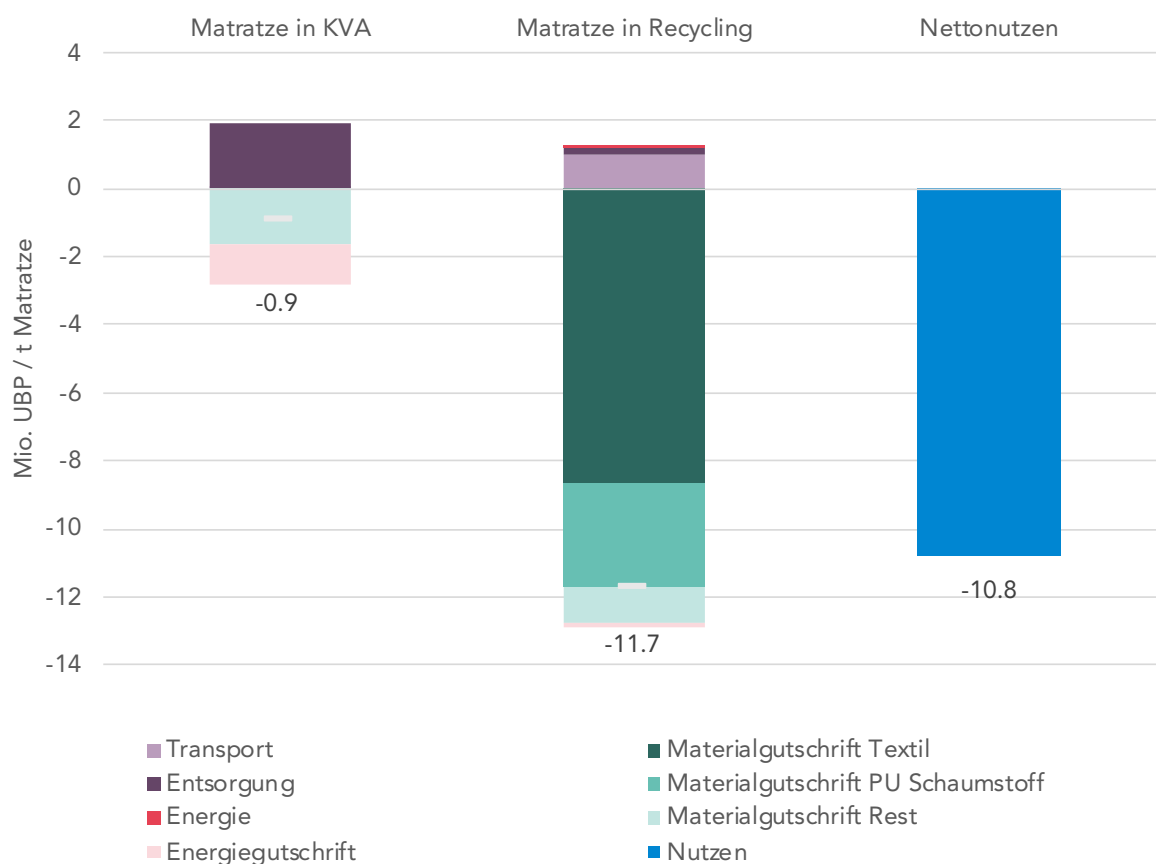


Abbildung 2: Umweltfußabdruck der beiden Matratzenverwertungen sowie Nettonutzen

UBP: Methode der ökologischen Knappheit 2021

1 Ausgangslage und Auftrag

Jedes Jahr landen in der Schweiz geschätzte 1 Mio. Matratzen im Abfall und werden verbrannt (Stand 2022, [matratzen-allianz.ch](https://www.matratzen-allianz.ch)). Akteure aus der ganzen Matratzen-Wertschöpfungskette haben Ende September 2021 die Matratzen-Allianz gegründet, um einen sinnvolleren Umgang mit ausgedienten Matratzen zu finden. In einem ersten Schritt soll das Recycling nicht mehr gebrauchter Matratzen in der Schweiz vorangetrieben und aufgebaut werden. In einem nächsten Schritt sollen ein Finanzierungssystem für Matratzenrecycling aufgebaut und Absatzmärkte für das Matratzen-Rezyklat (Schaumstoff als Sekundärrohstoff) etabliert werden. Gleichzeitig setzt die Matratzen-Allianz beim Eco Design an, mit Fokus auf Langlebigkeit sowie einfache Wieder- oder Weiterverwertbarkeit von Matratzenkomponenten. Das mittelfristige Ziel der Matratzen-Allianz ist, in der Schweiz eine kreislauffähige Matratze auf den Markt zu bringen.

2022 ist ein Recycling Pilotversuch geplant. Mit einer Ökobilanz möchte PUSCH in Zusammenarbeit mit der Matratzen-Allianz das Matratzenrecycling ökologisch bewerten lassen.

2 Vorgehen und Methodik

Die Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanzierung zählt zu den umfassendsten und aussagekräftigsten Methoden, um die Umweltauswirkungen von Produkten und Systemen zu beurteilen. Daher wird diese Methode verwendet, um die Umweltauswirkungen der betrachteten Holznutzungen zu eruieren.

In diesem Kapitel werden die verwendete Methode, das Vorgehen, die verwendeten Daten sowie die getroffenen Annahmen beschrieben.

2.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung oder Lebenszyklusanalyse («Life Cycle Assessment», kurz LCA) ist eine Methode, um die Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten auf die Umwelt zu erfassen, zu beurteilen und daraus Optimierungspotentiale abzuleiten. Aufgrund der Komplexität der Natur und des globalen Wirtschaftssystems reicht es nicht, nur einzelne Problemstoffe oder lokale Auswirkungen zu betrachten. Aus dem Anspruch an eine umfassende Bewertung ergeben sich die folgenden Anforderungen an die Methode:

- Möglichst umfassende Berücksichtigung der verschiedenen Umweltauswirkungen
- Berücksichtigung des gesamten Lebensweges
- Quantifizierung der Umweltauswirkungen
- Bewertung der verschiedenen Auswirkungen als Basis für Entscheidungen
- Wissenschaftlich abgestützt, um eine hohe Zuverlässigkeit und Akzeptanz zu erreichen

Die Ökobilanzierung ist diejenige Methode, welche heute diese Anforderungen am besten erfüllt. Die Ergebnisse der Ökobilanz können folgendermassen eingesetzt werden:

- als Entscheidungshilfen bei verschiedenen Varianten
- zur Erfassung der relevanten Auswirkungen

- in der strategischen Planung zur Ermittlung von Optimierungspotentialen
- zur Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren
- zur Beurteilung von Massnahmen
- und zur Ableitung von Handlungsempfehlungen

2.2 Vorgehen bei der Ökobilanzierung

Nachdem die Fragestellung und die zu untersuchende Systeme definiert sind, werden die Waren-, Stoff- und Energieflüsse sowie der Ressourcenbedarf erfasst. Anschliessend werden die Auswirkungen auf die Umwelt mit Hilfe von gewählten Indikatoren, welche diese Wirkungen beschreiben, bestimmt. Mit dem Ziel, die Ergebnisse mit einer Kennzahl auszudrücken und damit die Auswertung zu ermöglichen oder zumindest zu erleichtern, kann eine Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen durch eine entsprechende Gewichtung erfolgen.

Nach ISO 14'040 (ISO, 2006a) und ISO 14'044 (ISO, 2006b) umfasst eine Ökobilanz die folgenden Schritte:

- Festlegen der Zielsetzungen und Systemgrenzen (Rahmenbedingungen)
- Erfassen der relevanten Stoff- und Energieströme sowie den Ressourcenbedarf (Sachbilanz)
- Bestimmen der Auswirkungen auf die Umwelt (Wirkbilanz)
- Interpretation der Umweltauswirkungen aufgrund der Zielsetzungen
- Erarbeiten von Massnahmen (Optimierung)

Wie Abbildung 3 zeigt, ist dies kein linearer Prozess, sondern ein interaktiver Erkenntnis- und Optimierungsprozess.

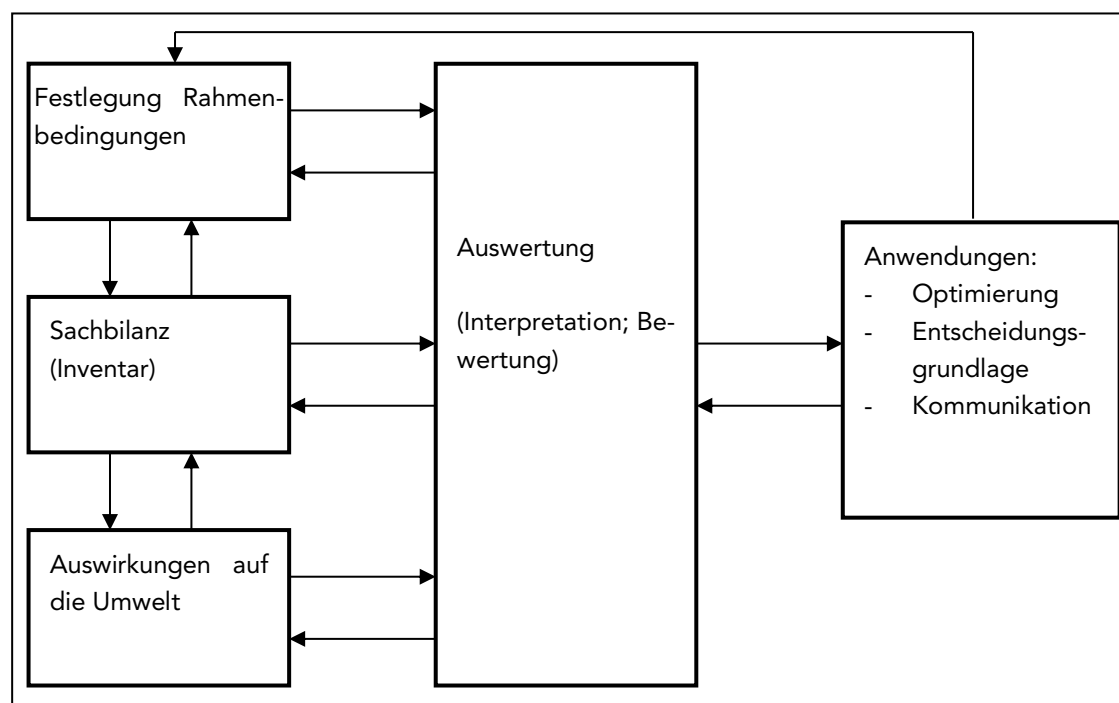


Abbildung 3: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14040

Die vorliegende Studie richtet sich weitgehend nach der Norm ISO 14'040; das Vorgehen entspricht in den wesentlichen Aspekten deren Anforderungen. In gewissen Punkten, wie der Verwendung von gesamt aggregierenden Methoden, geht die vorliegende Studie jedoch über die Norm hinaus.

3 Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Die Definition der zu untersuchenden und vergleichenden Systeme hängt von der Zielsetzung bzw. Fragestellung ab. Daraus ergeben sich unterschiedliche Rahmenbedingungen und Systemgrenzen. Die Systemgrenzen definieren, welche Prozesse und vorgelagerten Prozesse berücksichtigt werden. Dabei müssen der zeitliche und geographische Rahmen der verwendeten Daten sowie die zu untersuchenden Umweltauswirkungen festgelegt werden. Dies ist der erste und sehr wichtige Schritt bei der Erstellung einer Ökobilanz.

3.1 Zielsetzung

Die Studie verfolgt das übergeordnete Ziel, mittels Ökobilanzierung aufzuzeigen:

- wie hoch der ökologische Nutzen des Recyclings von Matratzen im Vergleich zur Verbrennung der Matratzen in einer durchschnittlichen Schweizer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) ist;
- welcher Nutzen durch die Wertstoffrückgewinnung und Weiterverwendung erzielt werden kann.

3.2 Anwendung und Zielgruppe der Studie

Die Studie richtet sich in erster Linie an die Auftraggeberin.

3.3 Betrachtete Altmatratzenverwertungen

3.3.1 Verbrennung von Altmatratzen

Die Altmatratzen werden mit einem LKW 16-32t zur nächstgelegenen KVA transportiert und dort verbrannt. Der untere Heizwert wurde über alle Bestandteile gewichtet und somit 20.8 GJ/t angenommen. Die Energieeffizienz der durchschnittlichen Schweizer KVA beträgt gemäss Rytec AG (2023) 30.6 % für Wärme und 13.5 % für Strom.

Es wurde angenommen, dass die Wärme aus der KVA in erster Linie Wärme aus Erdgas und der Strom aus der KVA in erster Linie Importstrom (angenähert mit Europäischem Strommix) ersetzt.

Tabelle 1: Altmatratze in KVA, pro t Altmatratzen

Aufwand		
Transport zur KVA	15 tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U
Entsorgung		
PU und gemischter Schaumstoff	500 kg	Waste polyurethane {CH} treatment of waste polyurethane, municipal incineration with fly ash extraction Cut-off, U
Latex	100 kg	Waste rubber, unspecified {CH} treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration with fly ash extraction Cut-off, U
Stahl	222 kg	Scrap steel {CH} treatment of scrap steel, municipal incineration with fly ash extraction Cut-off, U
Textilien	167 kg	Waste textile, soiled {CH} treatment of waste textile, soiled, municipal incineration with fly ash extraction Cut-off, U
PE	11.1 kg	Waste plastic, mixture {CH} treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration with fly ash extraction Cut-off, U
Gutschrift		
Wärme	7.07 GJ	Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW Cut-off, U
Strom	3.12 GJ	Electricity, high voltage {ENTSO-E} market group for electricity, high voltage Cut-off, U

3.3.2 Recycling von Altmatratzen

Die Altmatratzen werden in einem Container mit einem LKW 16-32t von den Logistikzentren zur Sammelstelle (Öko-Service Schweiz) transportiert. Von dort werden die Container mit Altmatratzen mit einem LKW >32t zur Recyclingstätte in den Niederlanden transportiert. 90 % der Materialien der Matratzen können recycelt werden, 10 % werden in der KVA verbrannt (Energiegutschriften analog Altmatratze in KVA).

Tabelle 2: Altmatratze in Recycling, pro t Altmatratzen

Aufwand		
Transport der Matratzen vom Logistikzentrum zur Sammelstelle	179 vkm ¹	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Alloc Rec, U
Transport von der Sammelstelle zur Recyclingstätte	236 vkm ²	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 Cut-off, U
Energie	0.08 MWh	Electricity, low voltage {NL} market for electricity, high voltage Cut-off, U
Entsorgung (10 %)		
PU und gemischter Schaumstoff	50 kg	Waste polyurethane {CH} treatment of waste polyurethane, municipal incineration with fly ash extraction Cut-off, U
Latex	10 kg	Waste rubber, unspecified {CH} treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration with fly ash extraction Cut-off, U
Stahl	22.2 kg	Scrap steel {CH} treatment of scrap steel, municipal incineration with fly ash extraction Cut-off, U
Textilien	16.7 kg	Waste textile, soiled {CH} treatment of waste textile, soiled, municipal incineration with fly ash extraction Cut-off, U
PE	1.11 kg	Waste plastic, mixture {CH} treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration with fly ash extraction Cut-off, U
Gutschrift		
Wärme (Verbrennung vom nicht recycelbaren Anteil von 10 %)	0.707 GJ	Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW Cut-off, U
Strom (Verbrennung vom nicht recycelbaren Anteil von 10 %)	0.312 GJ	Electricity, high voltage {ENTSO-E} market group for electricity, high voltage Cut-off, U
Materialeinsparungen (90 %)³		
PU und gemischter Schaumstoff	405 kg	Polyurethane, flexible foam {RER} market for polyurethane, flexible foam Cut-off, U
Latex	81 kg	Latex {RER} latex production Cut-off, U
Stahl ⁴	200 kg	Steel, low-alloyed, hot rolled {RER} steel production, low-alloyed, hot rolled Cut-off, U
Textilien	150 kg	Fibre, cotton {GLO} market for fibre, cotton Cut-off, U
PE	9 kg	Polyethylene, high density, granulate {RER} polyethylene production, high density, granulate Cut-off, U

¹ Distanz: 161 km (Mittelwert von 4 Standorten); 2 Fahrten (Hin- und Rückfahrt); 1 Container à 1.8 t Matratzen

² Distanz: 637 km; 2 Fahrten (Hin- und Rückfahrt); 3 Container à 5.4 t Matratzen

³ Ersatzfaktor von 0.9 für Kunststoffe

⁴ Der Aufwand für die Stahlverarbeitung ist hier nicht aufgeführt, wurde jedoch berücksichtigt.

3.4 Vergleichsbasis: Die funktionelle Einheit

Die Bewertung eines Produktes oder Prozesses muss immer relativ zu Alternativen erfolgen, welche denselben Nutzen erbringen bzw. dieselbe Funktion erfüllen. Die Grösse, auf welche sich der Vergleich bezieht, wird als funktionelle Einheit bezeichnet.

Als funktionelle Einheit wird für diese Untersuchung verwendet:

- 1 t Altmatratzen, ab Sammelstelle

3.5 Systemgrenzen

Die Ökobilanz betrachtet die potentiellen ökologischen Auswirkungen der verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten von Matratzen. Entsprechend des Ökobilanz-Ansatzes werden soweit möglich für die Subprozesse die ökologischen Auswirkungen „von der Wiege bis zum Grab“, also von der Extraktion der Rohstoffe über die einzelnen Schritte der Produktionskette der Inhaltstoffe bis zur Entsorgung des Produkts berücksichtigt. Da einige Schritte auf dem Lebensweg der Matratzen sich für die 2 betrachteten Varianten (Matratze in KVA und Matratze in Recycling) nicht unterscheiden, wurden diese nicht analysiert (u.a. Herstellung der Matratze, Nutzungsphase).

Inhaltliche Systemgrenzen

Die vorliegende Studie umfasst im Wesentlichen die folgenden Prozesse und Dienstleistungen (siehe auch Abbildung 4):

- Transport von der Sammelstelle zur Recyclingstätte
- Transport in die KVA
- Bereitstellung der Energieträger wie Erdöl, Erdgas, Kohle oder Strom etc.
- Entsorgung des Produktes
- Herstellung der durchs Recycling ersetzten Primärprodukte und Rohstoffe. Diese werden als Gutschriften ausgewiesen.
- Herstellung von durch die thermische Verwertung ersetztem Strom und Wärme. Diese werden als Gutschriften ausgewiesen

Für alle diese Prozesse werden die Auswirkungen durch Emissionen in Boden, Luft und Wasser sowie der Ressourcenbedarf, wie energetische Ressourcen oder Landnutzung, berücksichtigt.

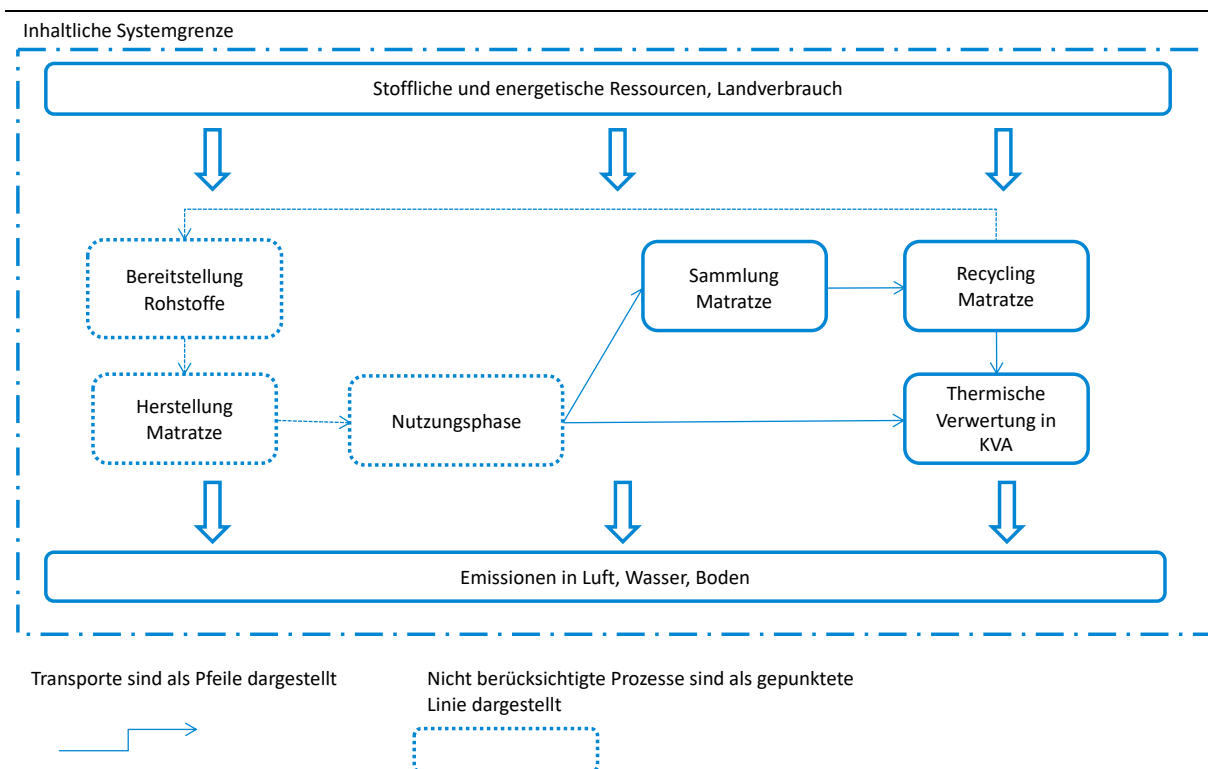


Abbildung 4: Schematische Darstellung der inhaltlichen Systemgrenze

Zeitliche Systemgrenzen

Für die Aufbereitung und die daraus resultierenden Gutschriften sowie die Entsorgungsvarianten wird die heutige Situation betrachtet. Das heisst, es werden die aktuellsten Ökoinventare für die Material- und Energiebereitstellung verwendet. Bei der Energienutzung in der KVA wurde die durchschnittliche Energienutzung der schweizerischen KVAs im Jahre 2023 verwendet.

Räumliche Systemgrenzen

Der geographische Rahmen für die Vordergrunddaten (Kenngrößen der Systeme und Charakterisierung der Anwendungsbeispiele) dieser Studie ist die Schweiz für die Sammlung und Entsorgung der KVAs sowie die Niederlande für das Recycling der Matratzen.

3.6 Sachbilanz

In der Sachbilanz wird ein Modell für das zu bilanzierende Produktsystem entworfen und es werden die Energie- und Stoffflüsse der damit verbundenen Prozesse erfasst. Diese umfassen:

- Die Beziehungen eines Prozesses mit anderen Prozessen der Technosphäre, wie z. B. Menge an benötigten Rohmaterialien, Hilfsstoffen, Energiebedarf, Transporte oder Verwertungs- beziehungsweise Entsorgungssysteme.
- Die Beziehungen eines Prozesses mit seiner natürlichen Umwelt der Ökosphäre, wie z. B. Bedarf an Ressourcen (fossile Energieträger, Landressourcen etc.) und Emissionen, wie z. B. CO₂, VOC, Methan, Stickoxide u. a.

Für die Berechnung der Sachbilanz und der darauf folgenden Berechnung und Bewertung der Umweltwirkungen wurde die Ökobilanzsoftware SimaPro v9.5 (PRé Consultants, 2023) verwendet.

3.6.1 Vordergrunddaten

Siehe Kapitel 3.3.

3.6.2 Hintergrunddaten

Die Vordergrunddaten wurden mit den Hintergrunddaten der Ökobilanz-Datenbank ecoinvent 3.9.1 verknüpft. Die Verwendung von ecoinvent-Hintergrunddaten hat eine hohe Akzeptanz. Die Verwendung einer einheitlichen Grundlage erhöht die Konsistenz der Hintergrunddaten und ermöglicht damit eine bessere Vergleichbarkeit der Resultate.

3.7 Bestimmung der Umweltauswirkungen (Wirkbilanz)

In diesem Schritt wird die Sachbilanz bezüglich der Auswirkungen auf die Umwelt bewertet. Selbst die Beschränkung auf die «wichtigsten» Stoffe führt sofort zu unübersichtlichen Zahlentabellen, welche nur schwer oder gar nicht zu interpretieren sind. Zudem sind nicht die Stoffemissionen, sondern deren Auswirkungen auf die Umwelt von Bedeutung. Um diese zu bestimmen, wird folgendermassen vorgegangen:

- Klassifizierung (Einteilung der Einflüsse bezüglich ihrer Auswirkungen)
Die Stoffe werden nach ihren unterschiedlichen Wirkungen auf die Umwelt gruppiert.
- Charakterisierung (Berechnung der Auswirkungen auf die Umwelt):
Dabei werden die einzelnen Substanzen entsprechend ihres Schädigungspotentials bezüglich einer Leitsubstanz gegeneinander gewichtet. Daraus ergeben sich die Schädigungspotentiale bezüglich einer bestimmten Umweltauswirkung.

Die im Rahmen der Methode der ökologischen Knappheit 2021 verwendeten Umweltwirkungen (Midpoints) umfassen Wasser-, Energie-, mineralische und biotische Ressourcen, Landnutzung, Klimawandel, Ozonschichtabbau, Hauptschadstoffe und Partikel, krebserregende Stoffe und Schwermetalle in der Luft, Wasserschadstoffe, Schwermetalle sowie persistente organische Schadstoffe in Wasser und Boden, Pestizide in Boden, radioaktive Substanzen in Luft und Wasser, Lärm und nicht radioaktiver Abfall.

Auf Ebene der sogenannten Midpoints, wurden alle Indikatoren berechnet, jedoch nur der Indikator Treibhauspotential ausgewiesen.

- Treibhauspotential (GWP100)
Einfluss auf das Klima infolge der Emission von klimawirksamen Stoffen wie Kohlendioxid (CO₂), Lachgas (N₂O) oder Methan (CH₄). Diese Auswirkung wird gemäss IPCC aus dem Jahr 2021 (IPCC, 2021) berechnet und in diesem Bericht ausgewiesen.

3.8 Bewertung der Umweltbelastungen

Jede Umweltwirkung (Midpoint) der Wirkungsbilanz deckt nur einen Teilbereich der gesamten Umweltauswirkungen ab. Erst die Berücksichtigung der verschiedenen Auswirkungen gibt jedoch ein umfassendes Bild der ökologischen Auswirkungen. Die Berechnung dieser Indikatoren basiert auf wissenschaftlichen Modellen, daher haben diese Indikatoren auch eine hohe Akzeptanz.

Ein Interpretationsproblem besteht dann, wenn die verschiedenen Auswirkungen unterschiedliche Schlüsse zulassen. So kann zum Beispiel ein untersuchtes Produkt wesentlich geringere Auswirkungen auf das Klima haben als ein anderes, jedoch viel grössere Auswirkungen auf die Gewässer und es stellt sich die Frage, was bei den untersuchten Produkten oder Systemen entscheidend ist. Problematisch dabei ist, dass die Ergebnisse der verschiedenen Wirkkategorien nicht direkt miteinander verglichen werden können. Einerseits sind die Einheiten und damit die Dimensionen unterschiedlich und andererseits wird keine Aussage gemacht, wie problematisch die betreffende Wirkung relativ zur anderen ist. Um diese verschiedenen Auswirkungen zu einer Kennzahl zusammenzufassen oder zumindest die Relevanz der verschiedenen Auswirkungen zu erkennen, wird in zwei Schritten vorgegangen:

- Normalisierung der verschiedenen Auswirkungen, um vergleichbare Grössenordnungen zu erhalten
- Gewichtung der normalisierten Auswirkungen relativ zu einander oder relativ zu Zielvorgaben

Normalisierung

Bei der Normalisierung werden die verschiedenen Wirkungen mit entsprechenden Grössen (Normalisierungsgrösse) normiert. Als Normalisierungsgrösse werden oft die Auswirkungen der durchschnittlichen Bevölkerung im Untersuchungsgebiet verwendet. Das heisst, es werden die gesamten Umweltauswirkungen für ein Land, Europa oder die ganze Welt in einem Jahr berechnet. Dabei werden u. a. Daten über Energiebedarf, benötigte Mengen an Lebensmittel, Konsumgüter und Chemikalien sowie Bautätigkeiten und Transporte etc. verwendet. Die durchschnittliche Auswirkung pro Einwohner*in ergibt sich aus diesen berechneten Umweltauswirkungen durch Division durch die Bevölkerungszahl im betrachteten Gebiet. Mit der Normalisierung wird erreicht, dass die verschiedenen Wirkungen dieselbe Einheit (Anteil an der Normalisierungsgrösse) und vergleichbare Grössenordnungen erhalten. Die Einheit wird als person equivalent (PE, Personen Äquivalent) bezeichnet.

Die normalisierten Umweltauswirkungen sagen somit aus, welche Anteile die untersuchte Technologie, Dienstleistung oder das untersuchte Produkt an den Umweltauswirkungen einer durchschnittlichen Person im Gebiet der Normalisierung während einem Jahr ausmachten.

Gewichtung

Um die verschiedenen Resultate der Indikatoren zu interpretieren und damit eine fundierte Entscheidungsbasis zu erhalten, müssen die verschiedenen Auswirkungen gewichtet und zu einer Kennzahl zusammengefasst werden. Diese Gewichtung kann nicht mehr auf der Basis von wissenschaftlichen Modellen erfolgen, da es keine wissenschaftliche Grundlage gibt, welche es zum Beispiel erlaubt, die menschliche Gesundheit mit dem Einfluss auf das Klima zu verrechnen. Diese Gewichtung erfolgt auf der Basis von gesellschaftlichen Wertesystemen.

Als Entscheidungshilfe für die Beurteilung werden in dieser Arbeit die folgenden Methoden verwendet, welche die Umweltauswirkungen zu einer Kennzahl (Indikator) zusammenfassen:

- Hauptmethode: Methode der ökologischen Knappheit 2021 (BAFU (Hrsg.), 2021)

Da die Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen von Wertmassstäben abhängig ist, werden diese gesamtaggrierenden Methoden teilweise abgelehnt, z.B. auch von der ISO-Norm 14'044 für Vergleiche, welche für die Öffentlichkeit bestimmt sind. Dabei ist zu beachten, dass auch die Auswahl der Umweltauswirkungen subjektiv ist. Falls nur ein Teil der Auswirkungen, z.B. Kumulierter Energieaufwand (KEA) und Treibhauspotential betrachtet werden, kommt dies einer Gewichtung der anderen Auswirkungen mit Null gleich. Die Betrachtung der einzelnen Wirkkategorien kann durchaus hilfreich sein, z.B. zur Ermittlung der Ursachen von spezifischen Auswirkungen und Erarbeitung von möglichen Optimierungspotentialen. Als Entscheidungsgrundlage oder für die Betrachtung der gesamten Umweltauswirkungen dürfen jedoch nicht einzelne

Umweltaspekte ausgeklammert werden. Dafür sind gesamt aggregierende Bewertungsmethoden nicht nur hilfreich sondern notwendig, siehe zur Diskussion dieses Themas auch (Kägi et al., 2016). Betreffend die Verwendung gesamt aggregierender Methoden richtet sich die vorliegende Studie nicht nach der ISO Norm 14'040, sondern weicht von dieser ab.

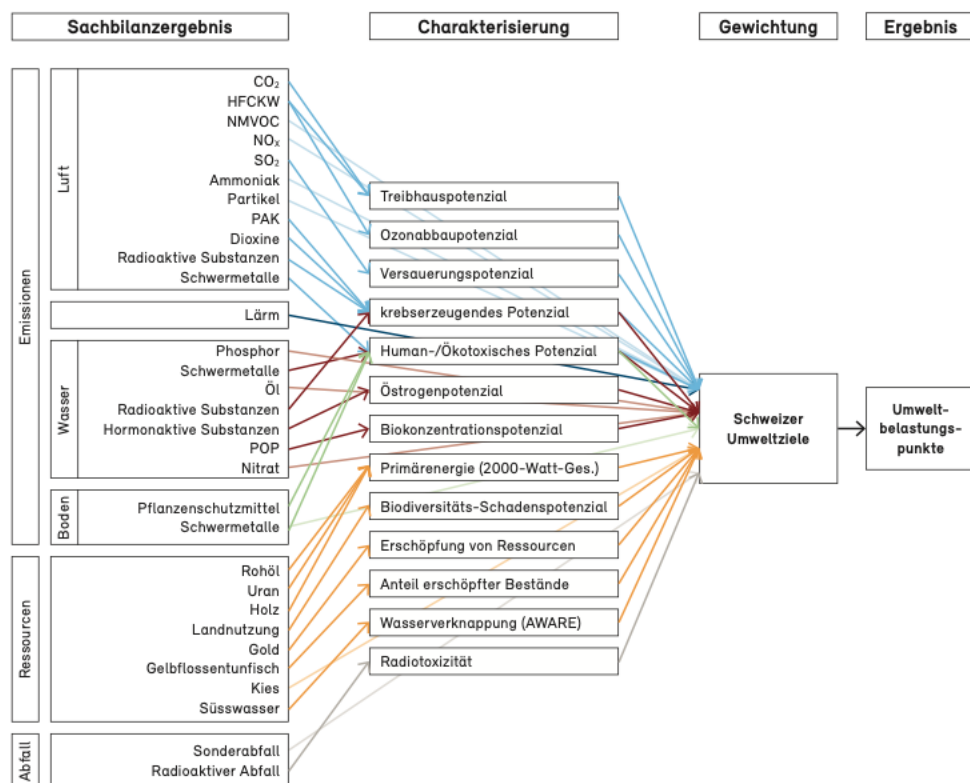


Abbildung 5: Grundschemata der Methode der ökologischen Knappheit (BAFU (Hrsg.), 2021)

3.8.1 Methode der ökologischen Knappheit (Umweltbelastungspunkte – UBP)

Diese Methode (BUWAL 1990, Überarbeitung 1997, 2006, 2013 und 2021) wurde mit dem Ziel entwickelt, die verschiedenen Umweltauswirkungen zu einer einzigen Kenngrösse (Umweltbelastungspunkte) zusammenzufassen. Es handelt sich um eine Stoffflussmethode, bei der neben den bereits bestehenden Belastungen die umweltpolitischen Ziele der Schweiz berücksichtigt werden. Je grösser die Umweltbelastung eines Produktes ist, desto mehr Umweltbelastungspunkte erzeugt seine Bewertung. In diesem Projekt wurde die Version 2021 (BAFU (Hrsg.), 2021) als Hauptbewertungsmethode verwendet.

3.9 Grenzen der vorliegenden Untersuchung

3.9.1 Inhaltlich

Die Resultate und Erkenntnisse gelten, solange die Aufwände des Recyclingprozesses sowie die ausgewiesenen stofflichen Fraktionen den in dieser Studie hinterlegten Angaben entsprechen. Sollten sich an der Art und Ausprägung der untersuchten Anwendungen sowie an den Verwertungswegen grundlegende

Änderungen ergeben, so muss überprüft werden, ob die für diese Erhebung getroffenen Annahmen und Berechnungen weiterhin Gültigkeit haben.

Die vorliegende Ökobilanzierung beschränkt sich auf die ökologischen Wirkungen der Matratzenverwertung. Andere Aspekte wie zum Beispiel soziale Auswirkungen, ökonomische Faktoren oder technische Machbarkeiten sind nicht Inhalt der vorliegenden Studie.

In dem Sinne handelt es sich bei der vorliegenden Studie nicht um eine umfassende Entscheidungsgrundlage, sondern um eine umfassende Analyse des Teilaspektes Umwelt. Diese muss ggf. durch weitere Aspekte entsprechend ergänzt werden.

3.9.2 Methodisch

In dieser Studie wurden neben dem Wirkindikator GWP100 auch eine gesamttaggregierende Bewertungsmethode verwendet. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Bewertungen der verschiedenen Auswirkungen nicht auf wissenschaftlicher Basis allein beruhen können, sondern auch auf gesellschaftlichen Zielen, Prioritäten und Erkenntnissen. Daher werden diese Methoden teilweise auch abgelehnt bzw. ISO 14'040 empfiehlt, diese nicht für vergleichende Ökobilanzen, die für die Öffentlichkeit bestimmt sind, zu verwenden.

Trotz der Empfehlung der ISO-Norm entschieden wir uns, aus den folgenden Gründen diese Methoden zu verwenden (siehe dazu auch (Kägi et al., 2016)):

- Die Ergebnisse von gesamttaggregierenden Methoden erlauben eine Gewichtung der verschiedenen Auswirkungen und geben dadurch eine gute Entscheidungsbasis.
- Auch wenn die Gewichtungen nicht «absolut» sind, so sind deren Ergebnisse aussagekräftiger, als die Beschränkung auf einige wenige Auswirkungen.
- Die Darstellung von allen Auswirkungen gemäss ISO-Norm ist geeignet für die Schwachstellenanalyse und das Finden von Optimierungen. Oft lassen sich jedoch keine (Management-) Entscheidungen daraus ableiten, da die verschiedenen Auswirkungen im Allgemeinen unterschiedliche Resultate zeigen.
- Um bei einer Beschränkung auf die verschiedenen Wirkungen (Midpoint-Indikatoren) dennoch zu einer Aussage zu kommen, wird oft eine Beschränkung auf wenige Auswirkungen vorgenommen oder eine verbal argumentative Bewertung der verschiedenen Auswirkungen gemacht. Zumindest ist dieses Vorgehen ebenfalls durch subjektive Entscheide des Lesenden geprägt und es besteht dabei die Gefahr von Beliebigkeit oder Manipulation.
- Die Resultate der gesamttaggregierenden Methoden lassen sich gut kommunizieren.

3.10 Unsicherheiten

Modellierungen von komplexen Systemen, wie dies bei der Ökobilanzierung der Fall ist, sind immer mit Unsicherheiten verbunden. Dabei sind folgende Arten von Unsicherheiten zu unterscheiden:

Messungenaugigkeit

Diese treten zum Beispiel bei der Datenerfassung auf, aufgrund von Messfehlern, älteren Daten, fehlenden Daten oder der Verwendung von Durchschnittsangaben. Dies Art der Unsicherheit wurde mittels Monte Carlo Analyse quantifiziert (siehe Kap. 4.1.3)

Systemische Ungenauigkeit

Bei der Modellierung müssen immer wieder Annahmen getroffen werden, z. B. unterschiedliche Transportwege je nach betrachteter Region oder je nach Abfüllvariante oder Anzahl der Recyclingzyklen. Diese Art der Unsicherheit wurde berücksichtigt, indem die Aussagekraft der Ergebnisse mit Hilfe von Relevanz- und Sensitivitätsanalysen überprüft wurde.

Unschärfe oder Unsicherheit

Die Berechnung der Umweltauswirkungen basiert auf Modellen, welche nur bis zu einem gewissen Grad überprüft werden können, zum Beispiel weil die Prognosen in der Zukunft liegen oder die Auswirkungen nicht direkt gemessen werden können, zum Beispiel Humantoxizität. Zudem basieren die Gewichtungen der verschiedenen Auswirkungen auf gesellschaftlichen Werten, welche sich verändern können.

4 Resultate und Diskussion

4.1.1 Recycling vs. thermische Verwertung

Abbildung 6 zeigt den CO₂-Fussabdruck der beiden betrachteten Matratzenvarianten. Abbildung 7 stellt den Umweltfussabdruck dar.

Matratzenrecycling

Die Matratzensammlung (Transporte) tragen rund 0.6 t CO₂-eq resp. 1 Mio. UPB pro t Matratzen zum Resultat bei. Der eigentliche Recyclingprozess weist dagegen einen wesentlich tieferen Beitrag auf. Dabei sind die beim Recyclingprozess anfallenden nicht verwertbaren und in der KVA entsorgten Fraktionen noch wesentlich relevanter (0.18 t CO₂-eq resp. 0.19 Mio. UPB pro t Matratzen).

90 % der Materialien können gemäss Aussage des Matratzenrecyclers wiederverwendet werden. Das in den Matratzen enthaltene Polyurethan generiert eine Gutschrift von rund 1.72 t CO₂-eq respektive 3.03 Mio. UPB pro t Matratzen. Das Textilrecycling trägt zu weiteren 0.62 t CO₂-eq resp. 8.67 Mio. UPB pro t Matratzen bei. Auffallend hier ist die wesentlich grössere Gutschrift beim Umweltfussabdruck. Der Grund dafür ist, dass bei den Textilien angenommen wurde, dass Baumwolle ersetzt wird. Der Baumwollanbau generiert v.a. auch andere Umweltbelastungen, welche im CO₂-Fussabdruck nicht berücksichtigt werden. Die restlichen Materialien (Stahlfedern, weitere Kunststoffe) tragen noch 0.56 t CO₂-eq resp. 1.1 Mio. UPB pro t Matratzen zum Resultat bei.

Die dabei anfallenden Gutschriften für den Ersatz von Primärmaterialien übersteigt den Aufwand des Recyclings um ein Mehrfaches.

Thermische Verwertung der Matratzen in der KVA

Bei der thermischen Verwertung der Matratzen in der KVA werden Entsorgungsemissionen von rund 1.8 t CO₂-eq resp. 1.9 Mio. UPB pro t Matratzen generiert. Demgegenüber stehen Gutschriften für die zurückgewonnene Menge an Stahl sowie für generierte Menge an Strom und Wärme von rund 1.1 t CO₂-eq resp. 2.8 Mio. UPB pro t Matratzen.

Die Verbrennungsemissionen sind aus Sicht des CO₂-Fussabdruckes in diesem Fall grösser als die erreichten Gutschriften, aus Sicht des Umweltfussabdrucks jedoch tiefer.

Nettonutzen

Der Nettonutzen bildet sich als Differenz zwischen dem Fussabdruck des Matratzenrecyclings und dem Fussabdruck der thermischen Verwertung der Matratzen in einer KVA. Werden Matratzen statt thermisch verwertet einem stofflichen Recycling unterzogen, resultiert ein Klimanutzen von rund 2.9 t CO₂-eq pro t Matratzen resp. ein Umweltnutzen von rund 10.8 Mio. UBP.

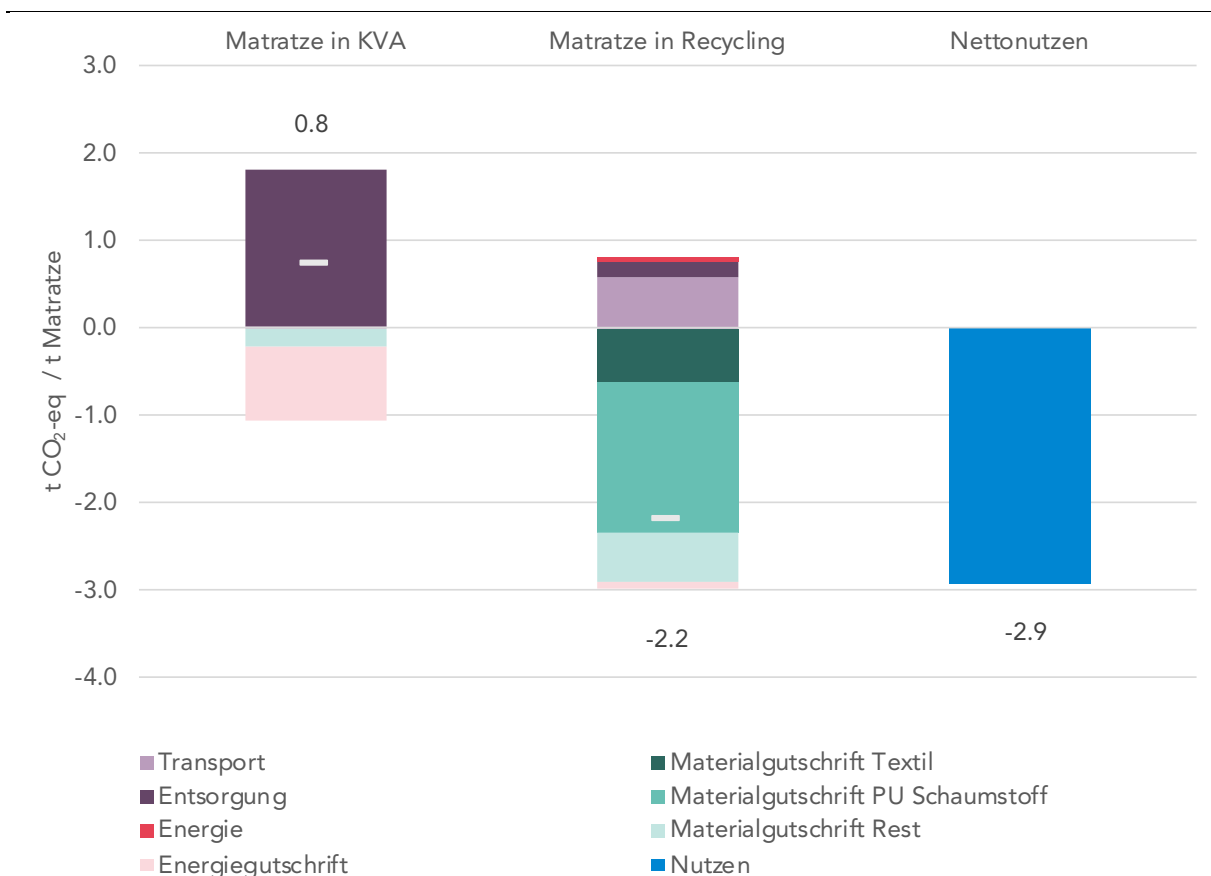


Abbildung 6: CO₂-Fussabdruck der beiden Matratzenverwertungen sowie Nettonutzen

CO₂-eq: IPCC 2021 (GWP100)

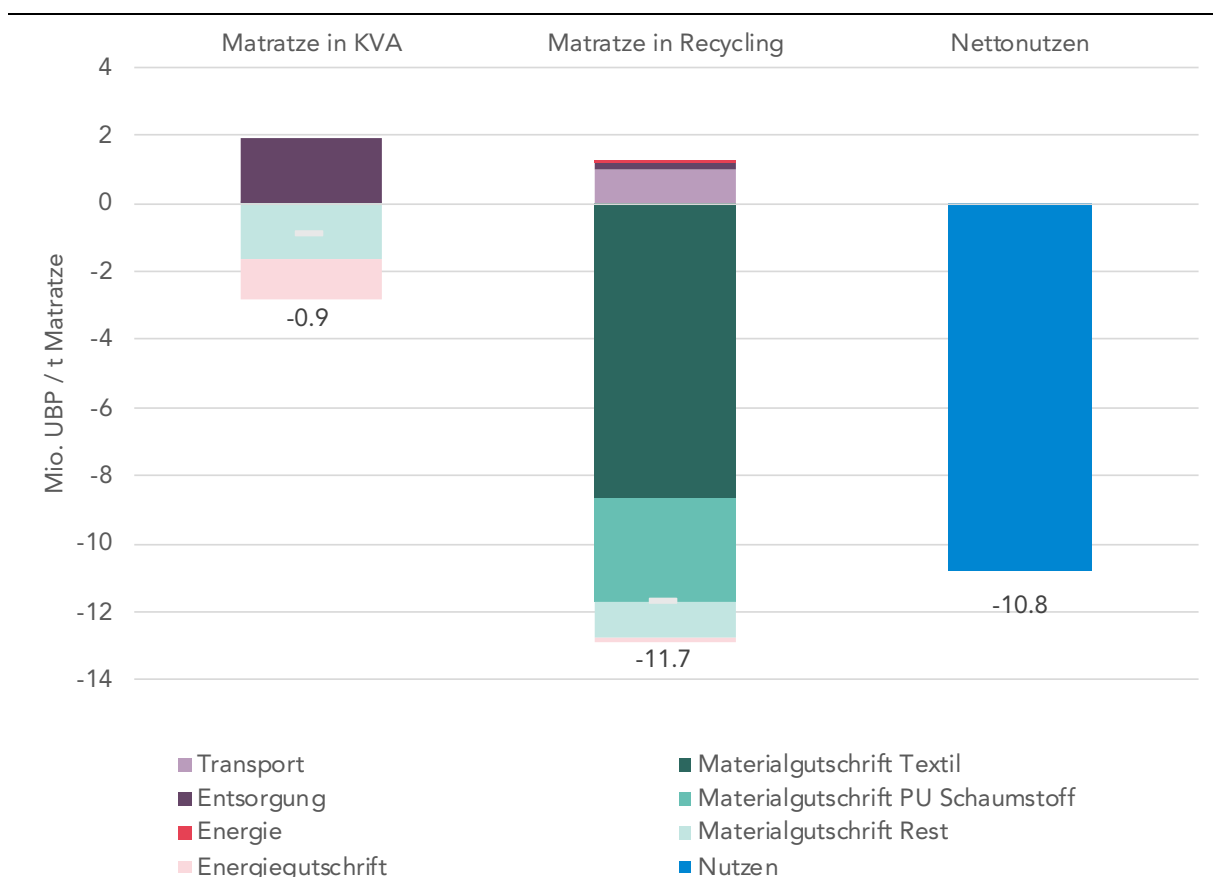


Abbildung 7: Umweltfussabdruck der beiden Matratzenverwertungen sowie Nettonutzen
 UBP: Methode der ökologischen Knappheit 2021

4.1.2 Effekt, wenn Textilien nicht recycelt werden

Da vom Recyclingunternehmen nur wenige Daten und Angaben zu den Recyclingfraktionen zu Verfügung gestellt wurden, haben wir in einer Sensitivitätsanalyse ermittelt, wie hoch der Nutzen ausfällt, wenn die Textilfraktion nicht recycelt wird.

Auch in diesem Fall weist das Matratzenrecycling einen Nettonutzen auf, der bei 2.4 t CO₂-eq resp. 2.2 Mio. UBP pro t Matratzen liegt. Während der Klimanutzen sich nur leicht reduziert (von 2.9 auf 2.4 t CO₂-eq pro t Matratzen), ist die Reduktion beim Umweltnutzen wesentlich grösser (von 10.8 Mio. auf 2.2 Mio. UBP pro t Matratzen).

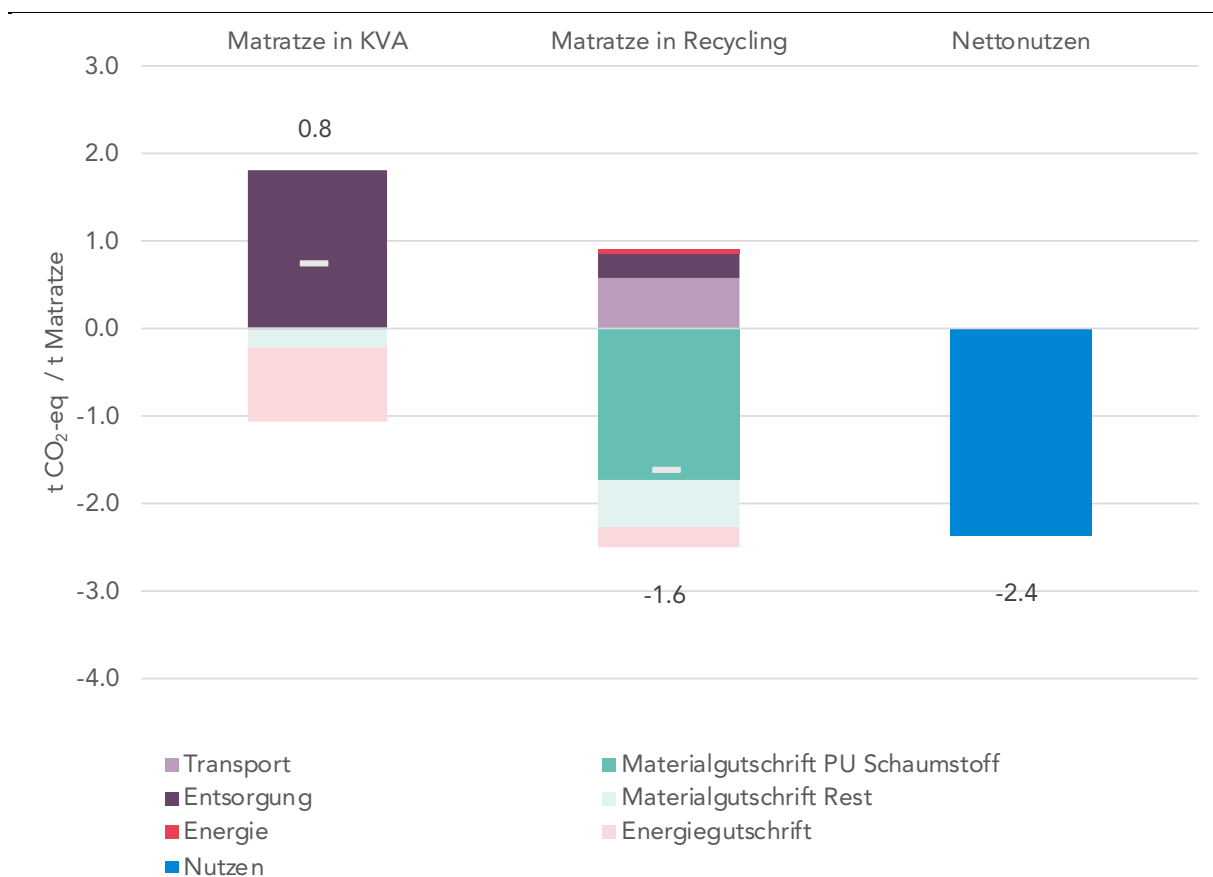


Abbildung 8: CO₂-Fussabdruck der beiden Matratzenverwertungen sowie Nettonutzen
 CO₂-eq: IPCC 2021 (GWP100)

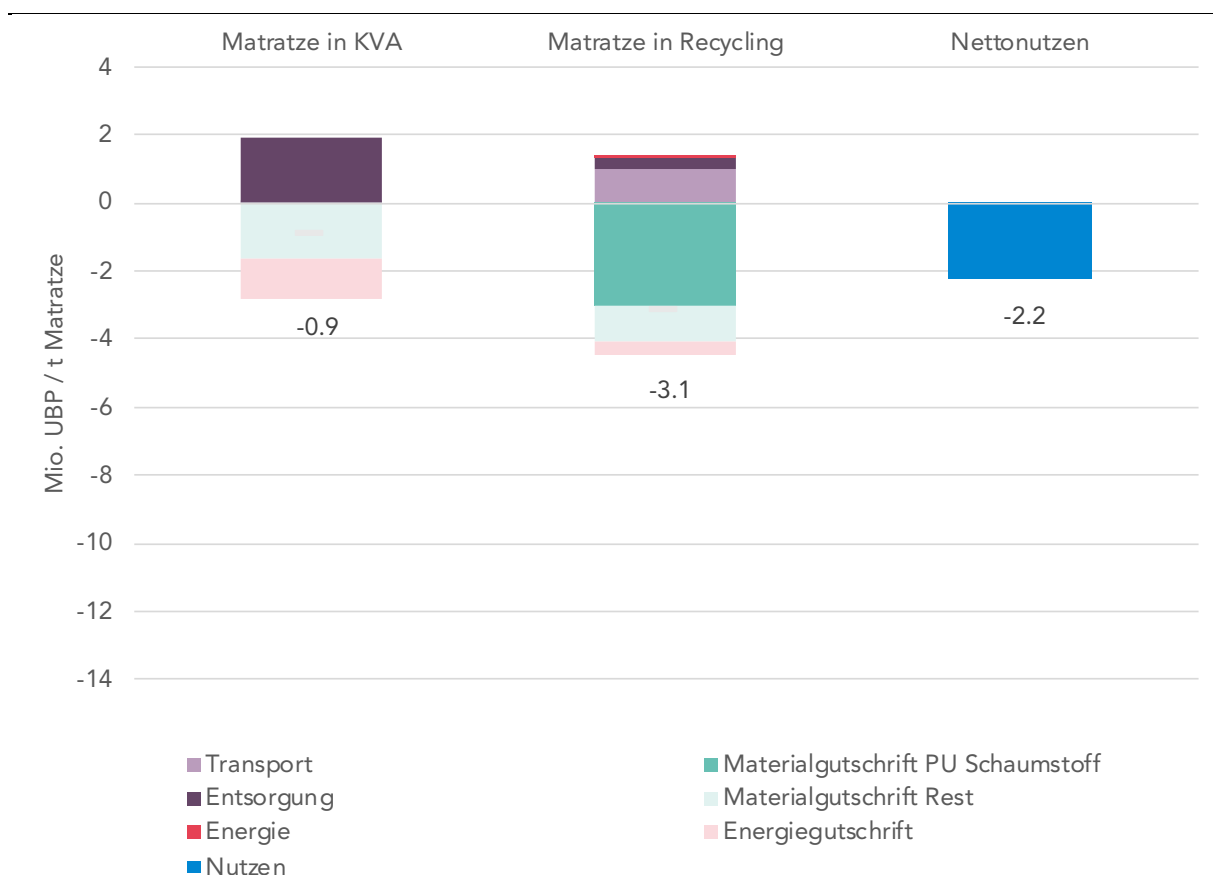


Abbildung 9: Umweltfussabdruck der beiden Matratzenverwertungen sowie Nettonutzen

UBP: Methode der ökologischen Knappheit 2021

4.1.3 Unsicherheitsanalyse

Mittels Monte Carlo Analyse (1'000 runs) wurde ermittelt, inwiefern der Nettonutzen wirklich signifikant ist (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11).

Der Nettonutzen bleibt unter Berücksichtigung der involvierten Datenunsicherheiten in jedem Fall bestehen, und zwar auch wenn wir davon ausgehen, dass die Textilfraktion nicht recycelt wird.

Somit kann geschlossen werden, dass sich das Matratzenrecycling unter den hier betrachteten Rahmenbedingungen aus ökologischer Sicht auf jeden Fall lohnt.

Unsicherheitsanalyse Klimanutzen

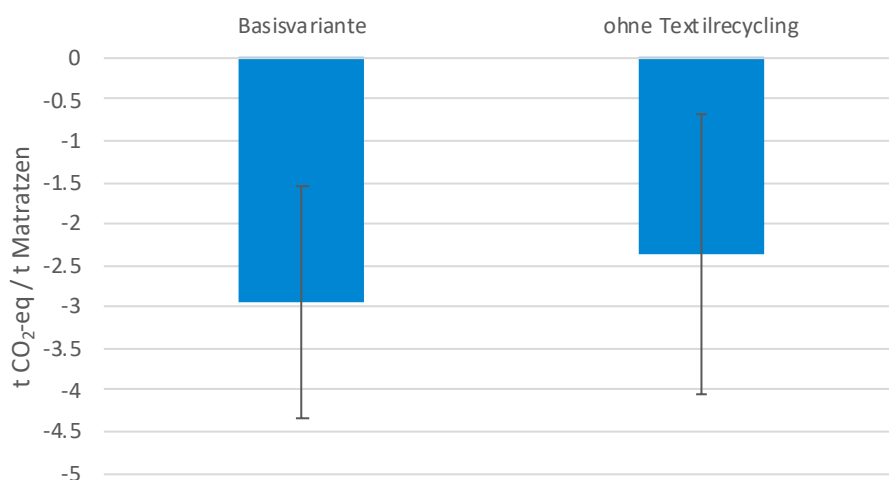


Abbildung 10: MC-Analyse (1000 runs): Darstellung der Unsicherheit auf dem 95% Niveau (in 95 % aller berechneten Fälle liegt der Nutzen innerhalb des Fehlerbalkens)

CO₂-eq: IPCC 2021 (GWP100)

Unsicherheitsanalyse Umweltnutzen

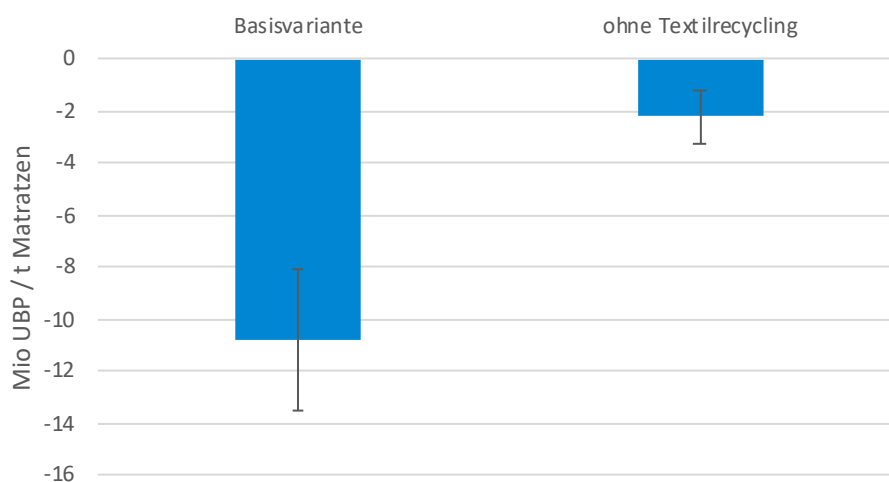


Abbildung 11: MC-Analyse (1000 runs): Darstellung der Unsicherheit auf dem 95% Niveau (in 95 % aller berechneten Fälle liegt der Nutzen innerhalb des Fehlerbalkens)

UBP: Methode der ökologischen Knappheit 2021

5 Fazit

Der Vergleich des stofflichen Matratzenrecyclings mit der thermischen Verwertung der Matratzen in einer KVA zeigt aus ökologischer Sicht, dass sich das stoffliche Recycling unter den betrachteten Rahmenbedingungen auf jeden Fall lohnt.

Bei jährlich rund 20'000 t anfallenden Matratzen entspräche das einem Klimanutzenpotenzial von rund 48'000 – 58'000 t CO₂-eq resp. einem Umweltnutzenpotential von 44 - 216 Mrd. UBP, je nachdem ob das Textilrecycling miteinberechnet wird oder nicht.

Dieses Nutzenpotenzial liegt im Bereich des Altmetallrecyclings (51'000 t CO₂-eq), resp. tiefer als der Nutzen des PET-Flaschen Recyclings (126'000 t CO₂-eq) und Glasflaschenrecyclings (97'000 t CO₂-eq) aber höher als der Nutzen des PE-Flaschen Recyclings (18'000 t CO₂-eq) gemäss Angaben Swissrecycling Leistungsbericht 2022.

6 Literatur

BAFU (Hrsg.). (2021). *Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz*. (p. 260). Bern: Bundesamt für Umwelt. Retrieved from <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaft-konsum/publikationen-studien/publikationen/oekofaktoren-schweiz.html>

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1017/9781009157896>

ISO. (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. Geneva: International Standard Organisation.

ISO. (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. Geneva: International Standard Organisation.

Kägi, T., Dinkel, F., Frischknecht, R., Humbert, S., Lindberg, J., De Mester, S., et al. (2016). Session “Midpoint, endpoint or single score for decision-making?”—SETAC Europe 25th Annual Meeting, May 5th, 2015. Conference Session Report. *Int J Life Cycle Assess*, 21(1), 129–132. <http://doi.org/10.1007/s11367-015-0998-0>

PRé Consultants. (2023). *SimaPro 9.5 (Version 9.5.0.0)*. PRé Consultants.

