



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik **IWF**



Thementag Nachhaltigkeit

Life-Cycle Engineering für einen nachhaltigen und zirkulären Leitungssatz

Dr.-Ing. Steffen Blömeke

Thementag Nachhaltigkeit Leitungssatz

- 1 Vorstellung & Motivation
- 2 Grundlagen zu Life-Cycle Engineering (LCE)
- 3 LCE: Ansätze für den Leitungssatz
 - 1: *Life Cycle Assessment*
 - 2: *Recyclability Bewertung*
 - 3: *Produktauslegung und Materialauswahl*
- 4 LCE-Plattform
- 5 Abschluss und Fragen

Thementag Nachhaltigkeit Leitungssatz

1 Vorstellung & Motivation

2 Grundlagen zu Life-Cycle Engineering (LCE)

3 LCE: Ansätze für den Leitungssatz

1: Life Cycle Assessment

2: Recyclability Bewertung

3: Produktauslegung und Materialauswahl

4 LCE-Plattform

5 Abschluss und Fragen

Vorstellung



Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann

Head of Institute of Machine Tools and Production Technology (TU Braunschweig)

Director Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST

c.herrmann@tu-braunschweig.de

christoph.herrmann@ist.fraunhofer.de

Email:

c.herrmann@
tu-braunschweig.de

Phone:

+49 531/391-7682



Dr.-Ing. Steffen Blömeke

- Head of Department Life Cycle Engineering at IWF

- Dissertation:

- Title: Environmental Assessment and Engineering of Lithium-Ion Battery Recycling Systems

- Research fields:

- Environmental and economic assessment (LCC, LCA) of emerging technologies
 - Development of method and tools to support decision making in the context of Circular Economy

Email:

s.bloemeke@
tu-braunschweig.de

Phone:

+49 531/391-7682

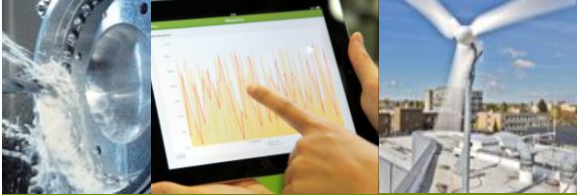
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF)

Professur für Nachhaltige Produktion und Life Cycle Engineering - Organigramm

Nachhaltige Produktion & Life Cycle Engineering

Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann, *stellv. Leitung: Dr.-Ing. Mennenga*

Abteilung
Nachhaltige Produktion & Fabrikssysteme
Dr.-Ing. Gabriela Ventura



- **Digitale Produktion**
Fr. Lindner
- **Nachhaltige Fertigung und Biologisierung**
Hr. Arafat

Team Nachhaltige Fahrzeugproduktion Hr. Hansen / Ohnesorge

Abteilung
Life Cycle Engineering
Dr.-Ing. Steffen Blömeke



- **Digitale Lebenszyklen**
Hr. Weise
- **Kreislaufwirtschaft**
Hr. Wanielik

Team Nachhaltige Batterieproduktion Fr. Wolf

Abteilung
System of Systems Engineering
Dr.-Ing. Mark Mennenga

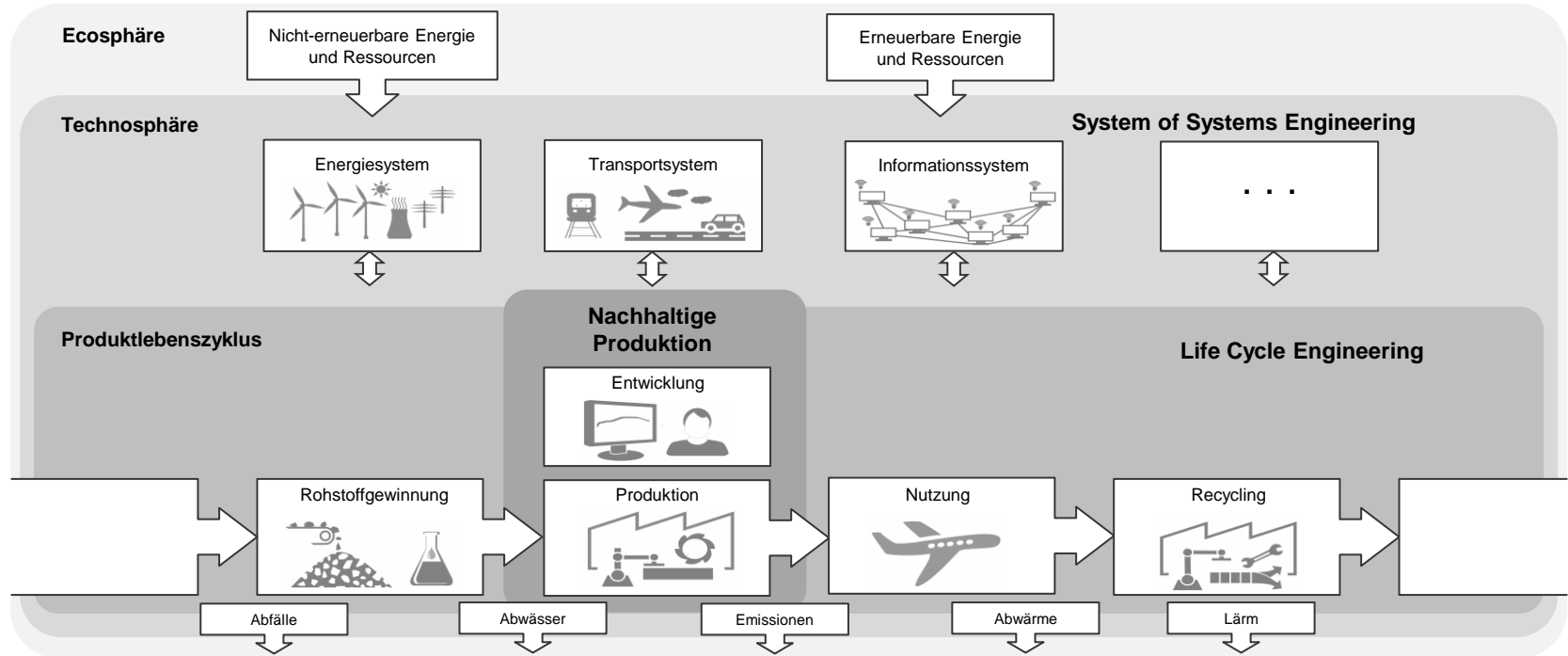


- **Energiesysteme**
Hr. Siemon
- **Nachhaltige & Resiliente Produktionsnetzwerke**
Hr. Niemeyer
- **Cyber-Physische Systeme**
Hr. Süß / Wojahn

Team Die Lernfabrik (Learning Factory) Hr. Wojahn / Süß

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF)

Professur für Nachhaltige Produktion und Life Cycle Engineering - Schwerpunkte



Motivation

LCE & Kreislaufwirtschaftsanforderungen aus dem Proposal der ELV Verord.

Art.	Inhalt	Inkrafttreten
4	Massenanteil von Altfahrzeugen, die zu mindestens 85 % recycelbar und zu 95 % verwertbar sind	bereits (AltFZ V)
4	Erhebung der erforderlichen (Material-)Daten aus der gesamten Lieferkette zur Bestimmung der Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit	Nach 72 Monaten
6	Mindestens 25 Gewichtsprozent des im Fahrzeug enthaltenen Kunststoffs müssen aus recyceltem Kunststoff bestehen, wovon 25 % aus Altfahrzeugen stammen müssen	Nach 72 Monaten
6	Überprüfung der Mindestgehalte an rezykliertem Stahl, Aluminium, Magnesium und seltenen Erden im Rahmen von Durchführungsrechtsakten	Nach 72 Monaten
7	Die Fahrzeuge müssen so konstruiert sein, dass der Ausbau bestimmter Bauteile nicht behindert wird (Batterien von Elektrofahrzeugen, Elektromotoren, Motoren, Katalysatoren usw.).	Nach 72 Monaten
9	Fahrzeuge benötigen eine Kreislaufwirtschaftsstrategie	Nach 36 Monaten
10	Hersteller veröffentlichen Rezyklat-Anteile von Neodym, Dysprosium, Praseodym, Terbium, Samarium und Bor in Permanentmagneten in elektrischen Antriebsmotoren, Aluminium, Magnesium und Stahl	Nach 36 Monaten
16	Erweiterte Herstellerverantwortung: Die Hersteller stellen sicher, dass die Fahrzeuge gemäß Artikel 4 (u.a.) recycelt werden.	Nach 36 Monaten

TEIL C	
OBLIGATORISCHE ENTFERNUNG VON TEILEN UND BAUTEILEN AUS ALTFahrzeugen	
1.	Elektrofahrzeugbatterien;
2.	Elektromotoren, einschließlich ihrer Gehäuse und aller zugehörigen Steuergeräte, der Verkabelung und anderer Teile, Bauteile und Werkstoffe;
3.	Starterbatterien im Sinne von Artikel 3 Nummer 12 der Verordnung (EU) 2023/****[über Batterien und Altfahrzeugen];
4.	Motoren;
5.	Katalysatoren;
6.	Schaltgetriebe;
7.	Windschutz-, Heck- und Seitenscheiben aus Glas;
8.	Räder;
9.	Reifen;
10.	Armaturenbretter;
11.	direkt zugängliche Teile des Infotainment-Systems, einschließlich Ton-, Navigations- und Multimedia-Steuerungselemente, darunter Anzeigen mit einer Oberfläche von mehr als 100 Quadratzentimetern;
12.	Scheinwerfer, einschließlich ihrer Aktuatoren;
13.	Kabelbäume;
14.	Stoßstangen;
15.	Flüssigkeitsbehälter;
16.	Wärmetauscher;
17.	jegliche andere Monomaterial-Metalbauteile mit einem Gewicht von mehr als 10 kg;
18.	jegliche andere Monomaterial-Kunststoffbauteile mit einem Gewicht von mehr als 10 kg;
19.	elektrische und elektronische Bauteile;
a)	Wechselrichter der Elektrofahrzeuge;
b)	Leiterplatten mit einer Oberfläche von mehr als 10 cm²;
c)	Fotovoltaikmodule mit einer Oberfläche von mehr als 0,2 m ² ;
d)	Steuermodule und Ventilgehäuse für das automatische Getriebe.

Motivation

Trends in der Leitungssatz-Branche

↗ **Variantevielfalt**

🔋 **Elektromobilität**

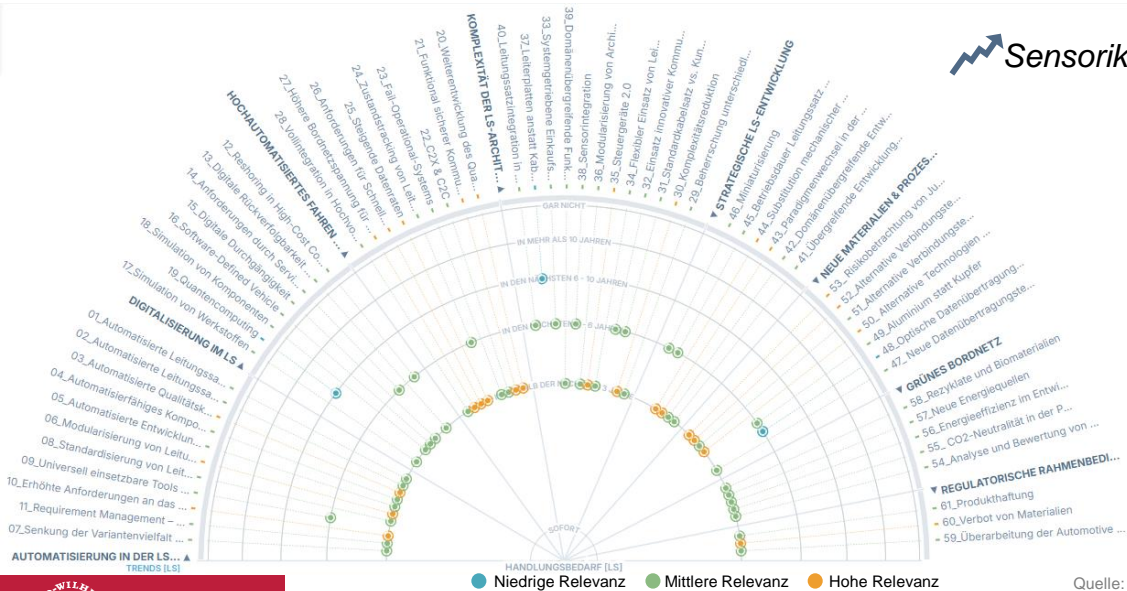
🔌 **Substitution mech. durch elektr. Komponenten**

↗ **Funktionsumfang**

↗ **Funktionsintegration**

⚠️ **Funktionale Sicherheit**

↗ **Sensorik**



→ Produkt- und Material-Komplexität steigen
 → Bewertungen (ökologisch und ökonomisch) werden aufwändiger

Quelle: Trendradar für den Leitungssatz, Transformations-Hub Leitungssatz, leitungssatz-hub.de/trendradar

Thementag Nachhaltigkeit Leitungssatz

1 Vorstellung & Motivation

2 Grundlagen zu Life-Cycle Engineering (LCE)

3 LCE: Ansätze für den Leitungssatz

1: Life Cycle Assessment

2: Recyclability Bewertung

3: Produktauslegung und Materialauswahl

4 LCE-Plattform

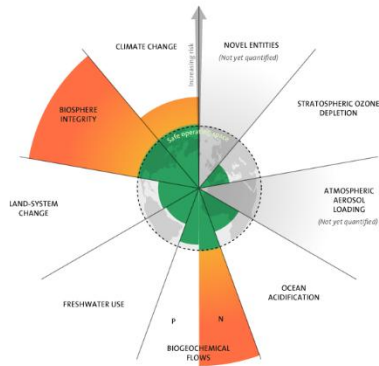
5 Abschluss und Fragen

Life Cycle Engineering

Umweltbelastungsgrenzen

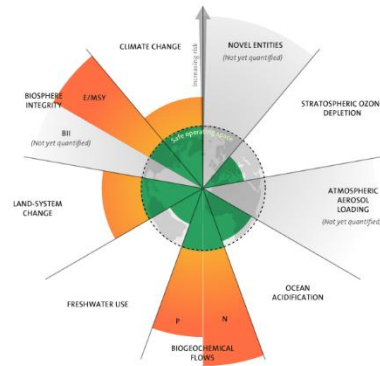
1 Umweltbelastungsgrenzen

2009



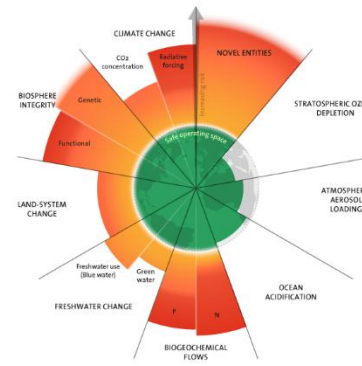
7 boundaries assessed,
3 crossed

2015



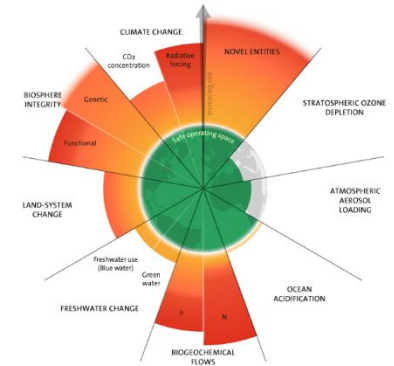
7 boundaries assessed,
4 crossed

2023



9 boundaries assessed,
6 crossed

2025



9 boundaries assessed,
7 crossed

Life Cycle Engineering

Gegenüberstellung der Umweltbelastungsgrenzen & IPAT-Gleichung

1 Umweltbelastungsgrenzen

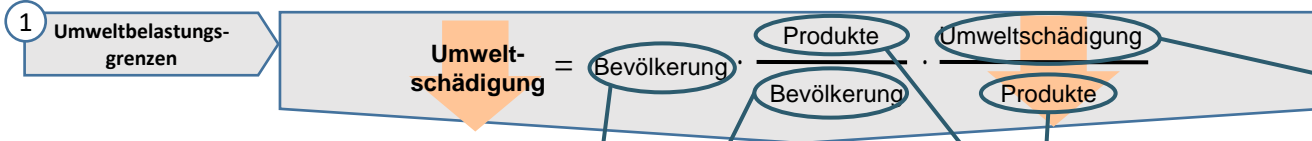
$$\text{Umwelt-schädigung} = \text{Bevölkerung} \cdot \frac{\text{Produkte}}{\text{Bevölkerung}} \cdot \frac{\text{Umweltschädigung}}{\text{Produkte}}$$

Kara, S., Herrmann, C., & Hauschild, M. (2023). Operationalization of life cycle engineering. Resources, Conservation and Recycling.

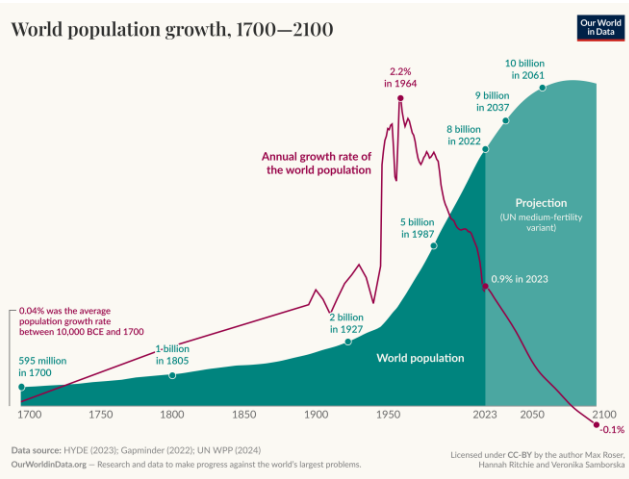
19.03.2026 | Dr.-Ing. Steffen Blömeke | Life Cycle Engineering | Folie 11

Life Cycle Engineering

Gegenüberstellung der Umweltbelastungsgrenzen & IPAT-Gleichung

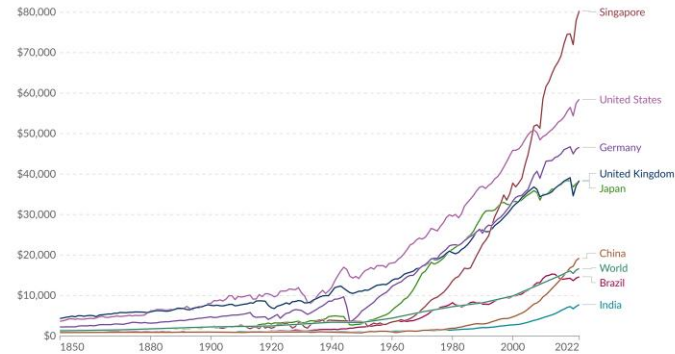


Wie viel Emissionen darf ein Produkt erzeugen, um innerhalb der planetaren Grenzen zu bleiben?



GDP per capita, 1850 to 2022

GDP per capita is a country's gross domestic product¹ divided by its population. This data is adjusted for inflation and differences in living costs between countries.



Life Cycle Engineering

Betrachtung des gesamten Lebenswegs

1 Umweltbelastungs-
grenzen

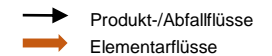
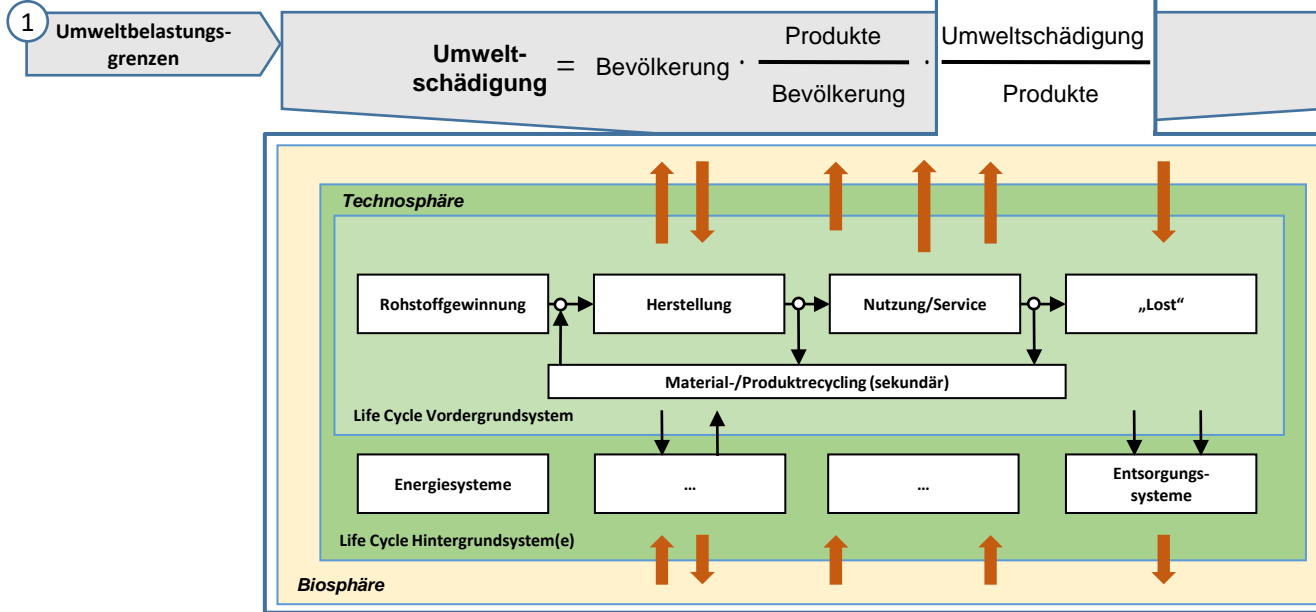
$$\text{Umwelt-
schädigung} = \text{Bevölkerung} \cdot \frac{\text{Produkte}}{\text{Bevölkerung}} \cdot \frac{\text{Umweltschädigung}}{\text{Produkte}}$$

Kara, S., Herrmann, C., & Hauschild, M. (2023). Operationalization of life cycle engineering. Resources, Conservation and Recycling.

19.03.2026 | Dr.-Ing. Steffen Blömeke | Life Cycle Engineering | Folie 13

Life Cycle Engineering

Betrachtung des gesamten Lebenswegs

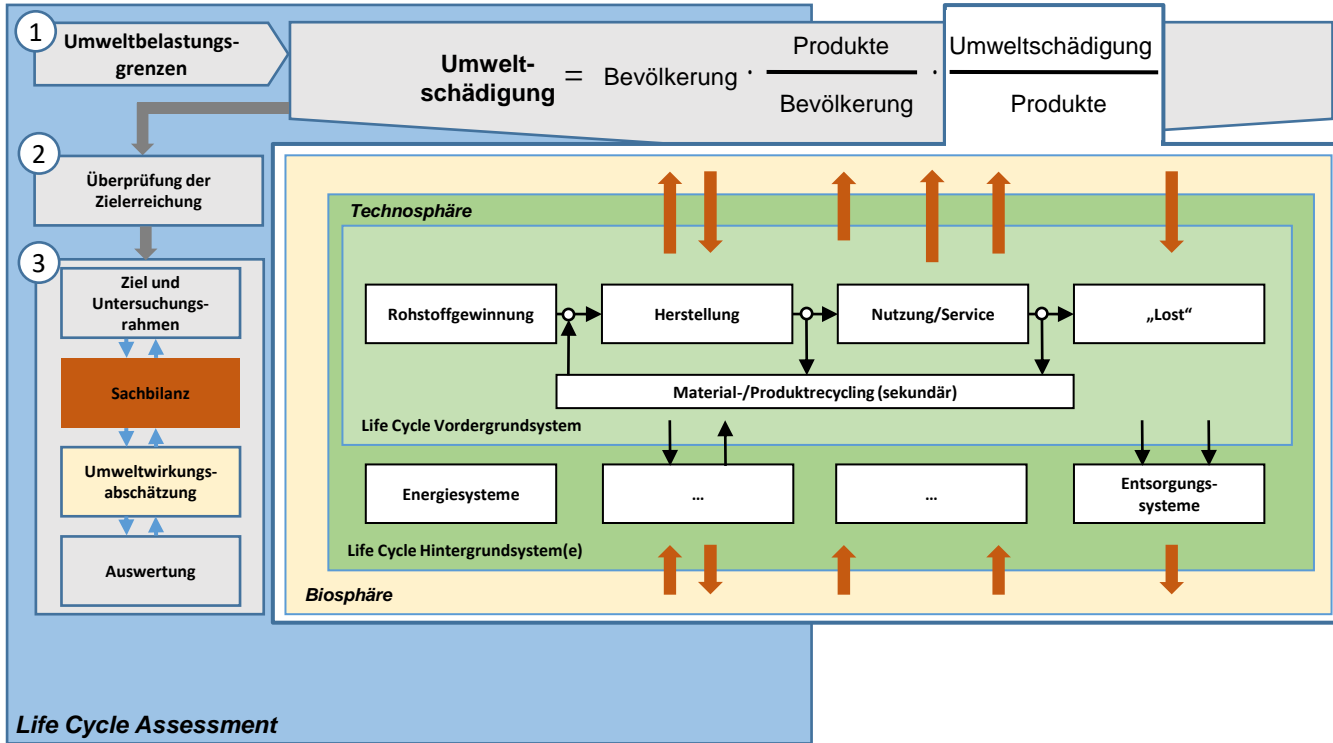


Kara, S., Herrmann, C., & Hauschild, M. (2023). Operationalization of life cycle engineering. Resources, Conservation and Recycling.

19.03.2026 | Dr.-Ing. Steffen Blömeke | Life Cycle Engineering | Folie 14

Life Cycle Engineering

Einbindung einer quantitativen Umweltbewertung (Ökobilanz)

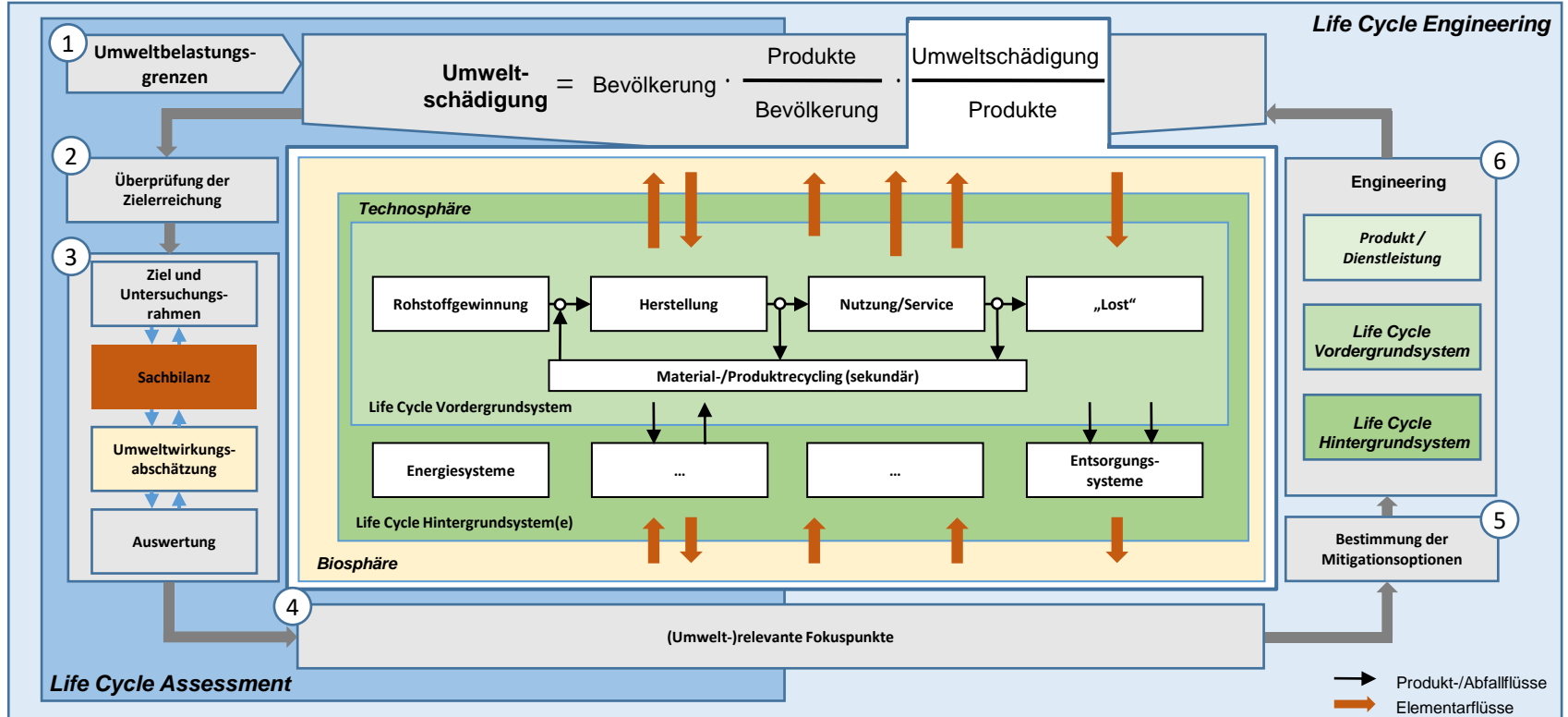


Kara, S., Herrmann, C., & Hauschild, M. (2023). Operationalization of life cycle engineering. Resources, Conservation and Recycling.

19.03.2026 | Dr.-Ing. Steffen Blömeke | Life Cycle Engineering | Folie 15

Life Cycle Engineering

Gezieltes Engineering von Produkt, Vorder- und Hintergrundsystem

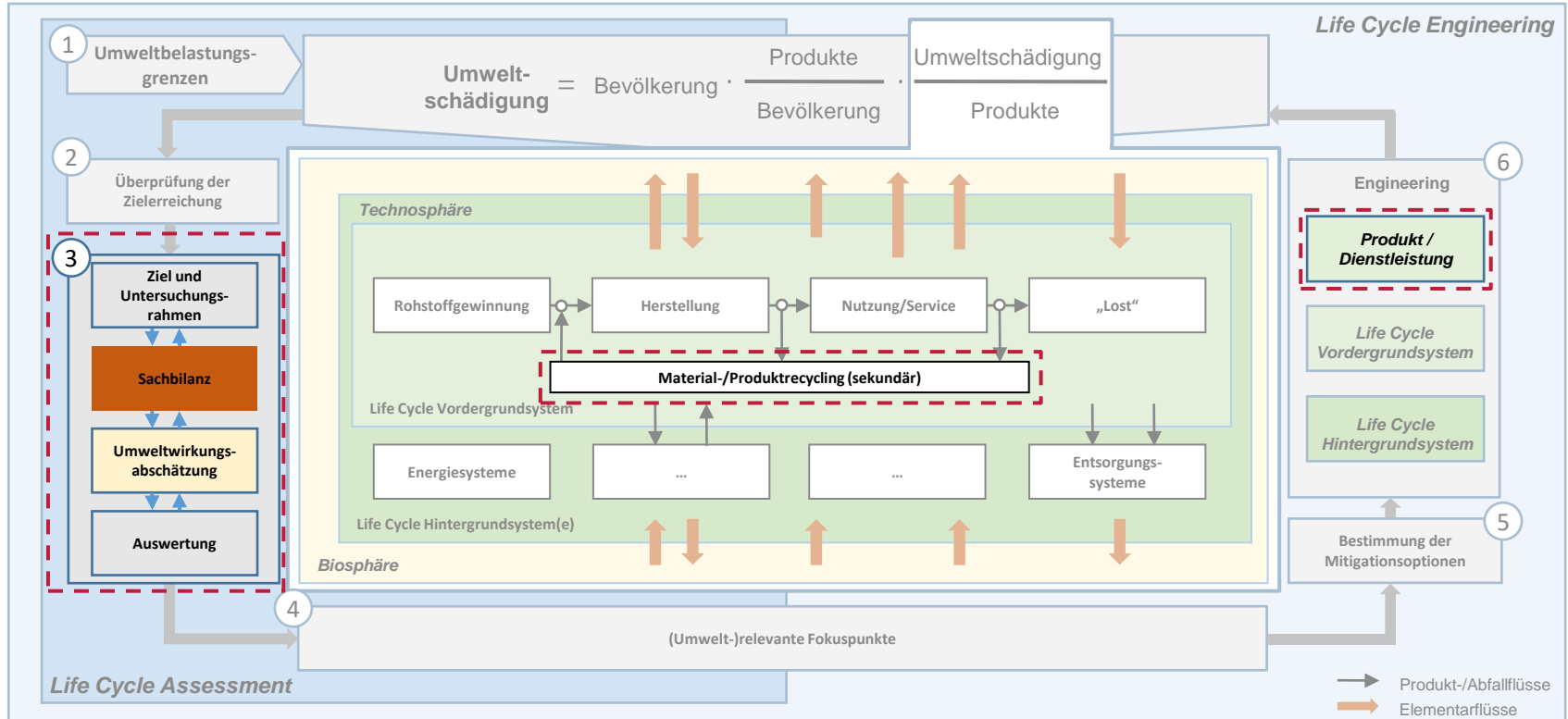


Kara, S., Herrmann, C., & Hauschild, M. (2023). Operationalization of life cycle engineering. Resources, Conservation and Recycling.

19.03.2026 | Dr.-Ing. Steffen Blömeke | Life Cycle Engineering | Folie 16

Life Cycle Engineering

Gezieltes Engineering von Produkt, Vorder- und Hintergrundsystem



Kara, S., Herrmann, C., & Hauschild, M. (2023). Operationalization of life cycle engineering. Resources, Conservation and Recycling.

19.03.2026 | Dr.-Ing. Steffen Blömeke | Life Cycle Engineering | Folie 17

Thementag Nachhaltigkeit Leitungssatz

- 1 Vorstellung & Motivation
- 2 Grundlagen zu Life-Cycle Engineering (LCE)

3 LCE: Ansätze für den Leitungssatz

1: Life Cycle Assessment

2: Recyclability Bewertung

3: Produktauslegung und Materialauswahl

- 4 LCE-Plattform
- 5 Abschluss und Fragen

Thementag Nachhaltigkeit Leitungssatz

- 1 Vorstellung & Motivation
 - 2 Grundlagen zu Life-Cycle Engineering (LCE)
 - 3 LCE: Ansätze für den Leitungssatz
-

1: Life Cycle Assessment

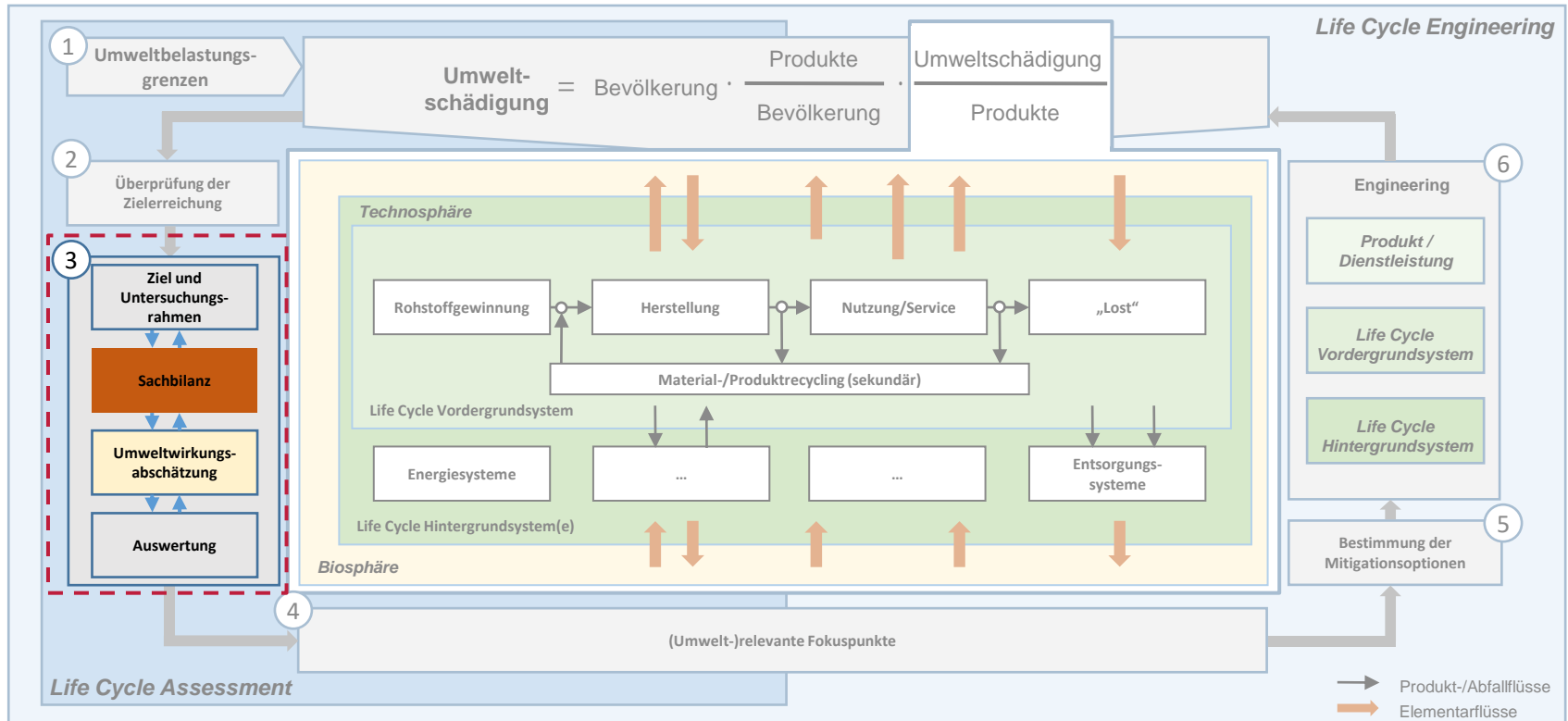
2: Recyclability Bewertung

3: Produktauslegung und Materialauswahl

- 4 LCE-Plattform
- 5 Abschluss und Fragen

Life Cycle Engineering

Gezieltes Engineering von Produkt, Vorder- und Hintergrundsystem



Kara, S., Herrmann, C., & Hauschild, M. (2023). Operationalization of life cycle engineering. Resources, Conservation and Recycling.

19.03.2026 | Dr.-Ing. Steffen Blömeke | Life Cycle Engineering | Folie 20

Life Cycle Engineering

Life Cycle Assessment (LCA) Framework | ISO 14040

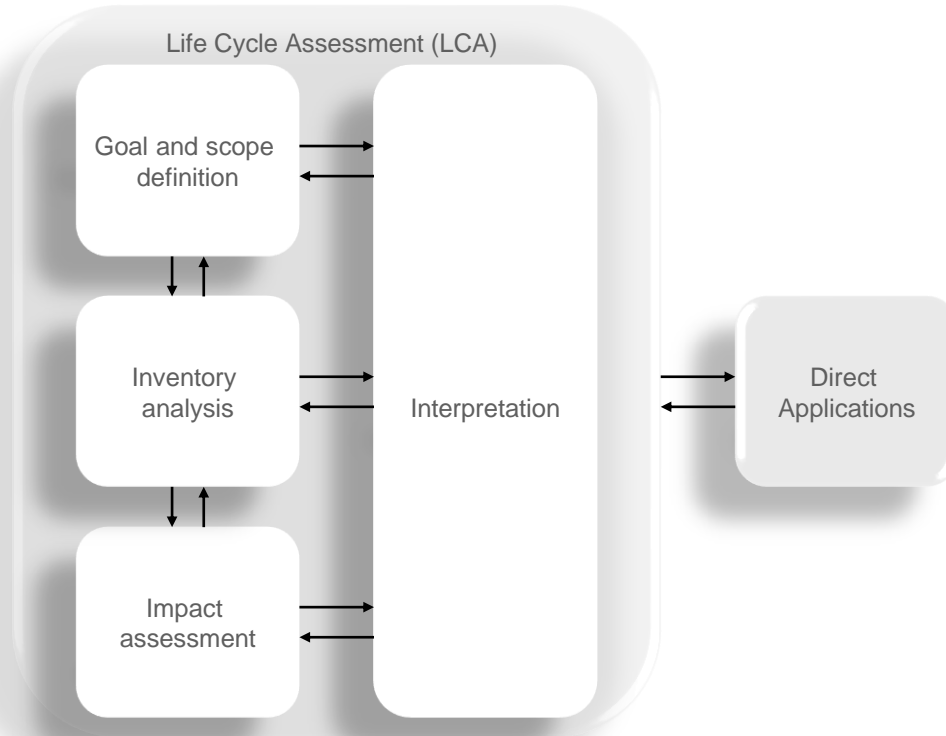
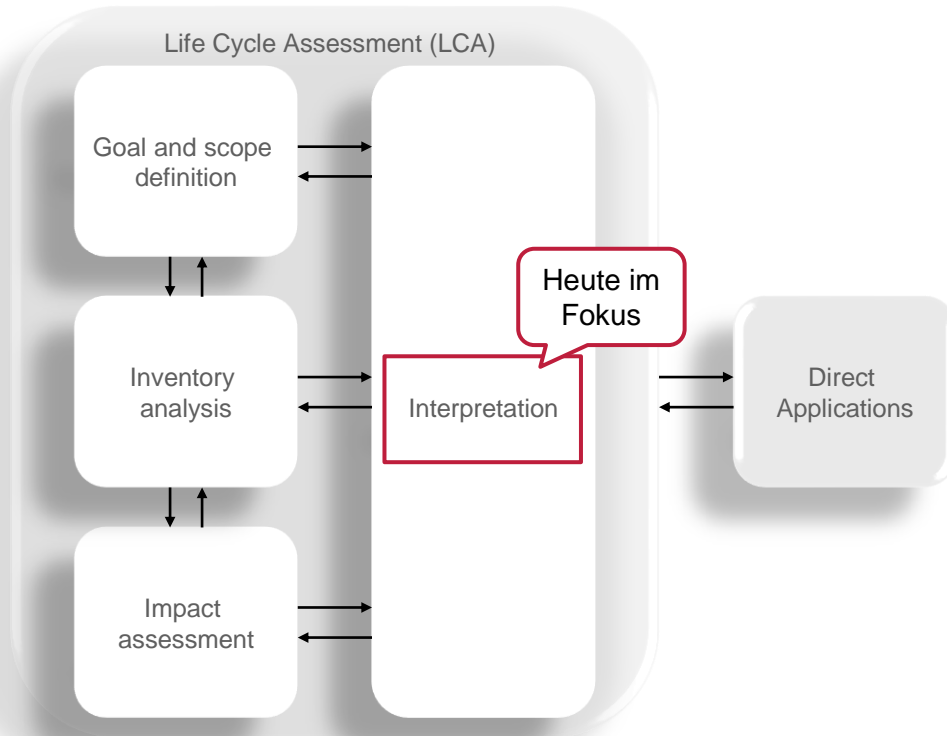


Image Source: ISO 14040:2009-11

Life Cycle Engineering

Life Cycle Assessment (LCA) Framework | ISO 14040



1. Goal and scope definition:

- Festlegung von Ziel, Zweck und Umfang der Studie

2. Inventory analysis

- Ermittlung des Ressourcen- und Energiebedarfs sowie der damit verbundenen Emissionen über den gesamten Lebenszyklus des Produkts

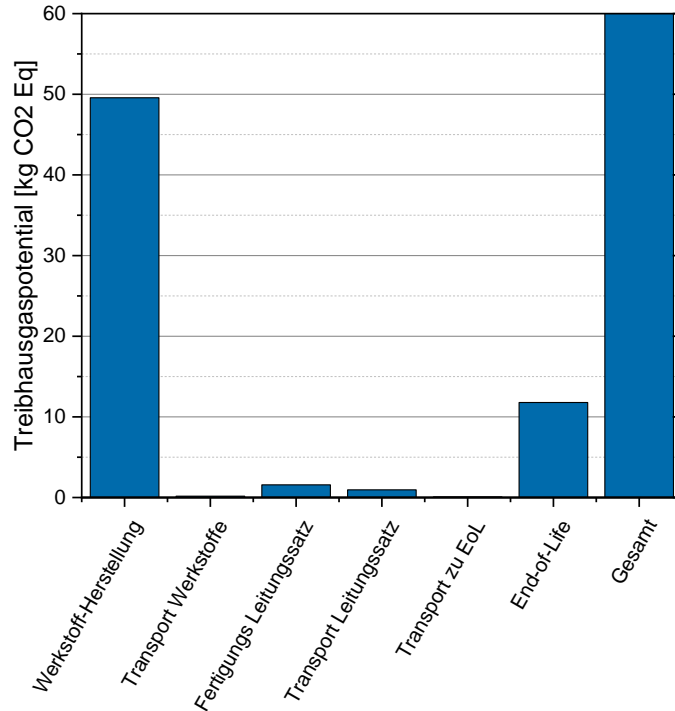
3. Impact assessment

- Bewertung der Umweltauswirkungen, die sich aus den analysierten Emissionen ergeben

4. Interpretation

- Ergebnisse ermitteln, überprüfen und validieren

Image Source: ISO 14040:2009-11



LCA-Erkenntnis: Die **Werkstoff-Herstellung** ist beim Leitungssatz der zentrale Treiber der CO₂-Bilanz.



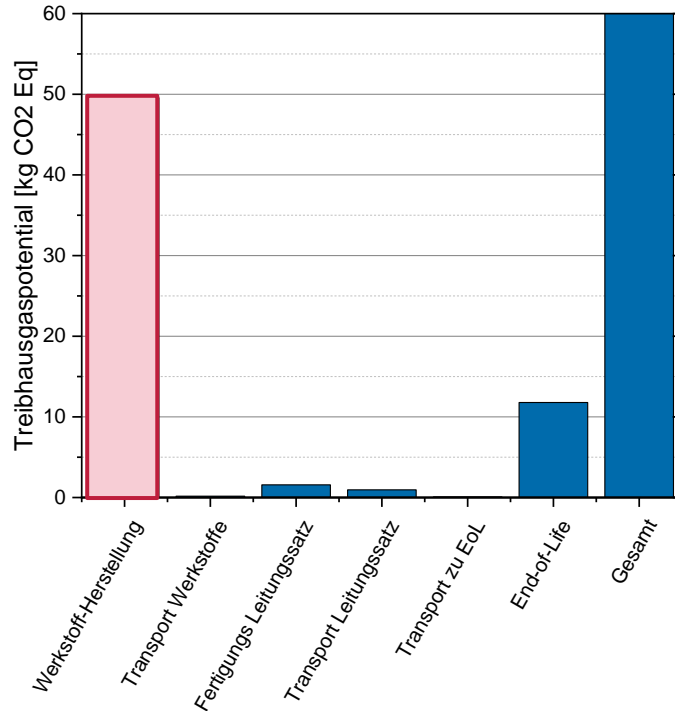
LCE-Fragestellung: Welche **Maßnahmen** kann man ergreifen?

Ansatz 1: Recycling

- Wie wirkt sich die Verwendung von Rezyklatmaterial aus?
- Ist der Leitungssatz recyclingfähig?

Ansatz 2: Material-Substitution

- Welchen Einfluss haben alternative Materialien?
- Welche technischen Einschränkungen gibt es in Bezug auf die Ersetzbarkeit?



LCA-Erkenntnis: Die **Werkstoff-Herstellung** ist beim Leitungssatz der zentrale Treiber der CO₂-Bilanz.



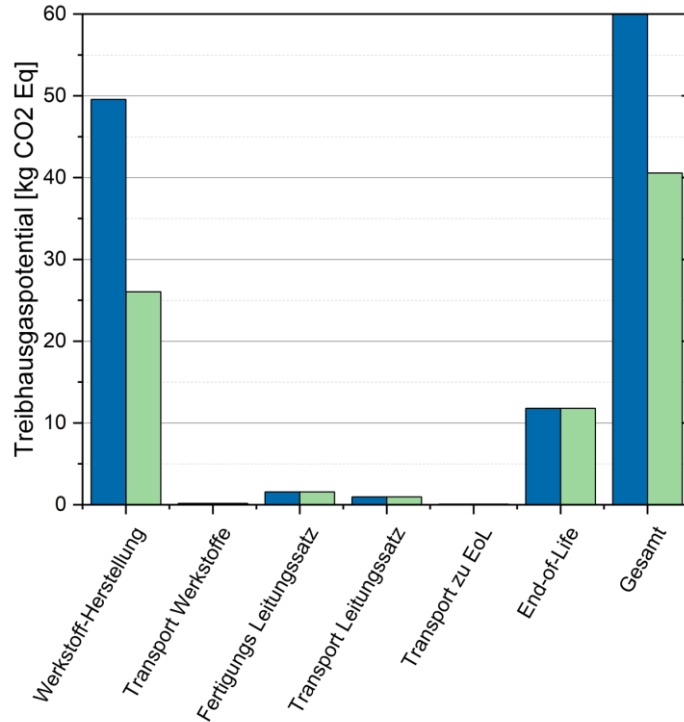
LCE-Fragestellung: Welche **Maßnahmen** kann man ergreifen?

Ansatz 1: Recycling

- Wie wirkt sich die Verwendung von Rezyklatmaterial aus?
- Ist der Leitungssatz recyclingfähig?

Ansatz 2: Material-Substitution

- Welchen Einfluss haben alternative Materialien?
- Welche technischen Einschränkungen gibt es in Bezug auf die Ersetzbarkeit?



LCA-Erkenntnis: Die **Werkstoff-Herstellung** ist beim Leitungssatz der zentrale Treiber der CO₂-Bilanz.

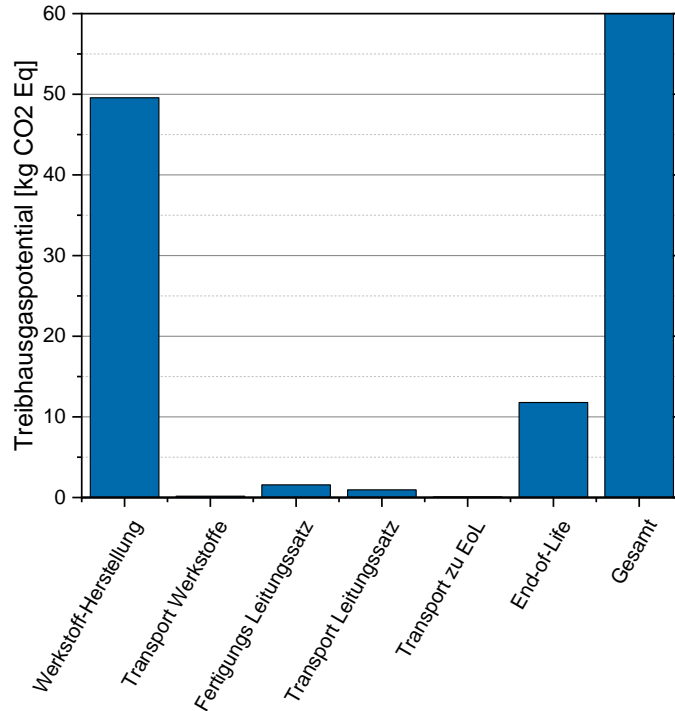


LCE-Fragestellung: Welche **Maßnahmen** kann man ergreifen?

Ansatz 1: Recycling

a) Wie wirkt sich die Verwendung von Rezyklatmaterial aus?

→ Die Verwendung von Kupfer-Rezyklat bei der Herstellung kann zu einer Reduktion des Treibhausgaspotenzials um ca. 30 % führen.



LCA-Erkenntnis: Die **Werkstoff-Herstellung** ist beim Leitungssatz der zentrale Treiber der CO₂-Bilanz.



LCE-Fragestellung: Welche **Maßnahmen** kann man ergreifen?

Ansatz 1: Recycling

- a) Wie wirkt sich die Verwendung von Rezyklatmaterial aus?
- b) Ist der Leitungssatz recyclingfähig?

Ansatz 2: Material-Substitution

- a) Welchen Einfluss haben alternative Materialien?
- b) Welche technischen Einschränkungen gibt es in Bezug auf die Ersetzbarkeit?

Thementag Nachhaltigkeit Leitungssatz

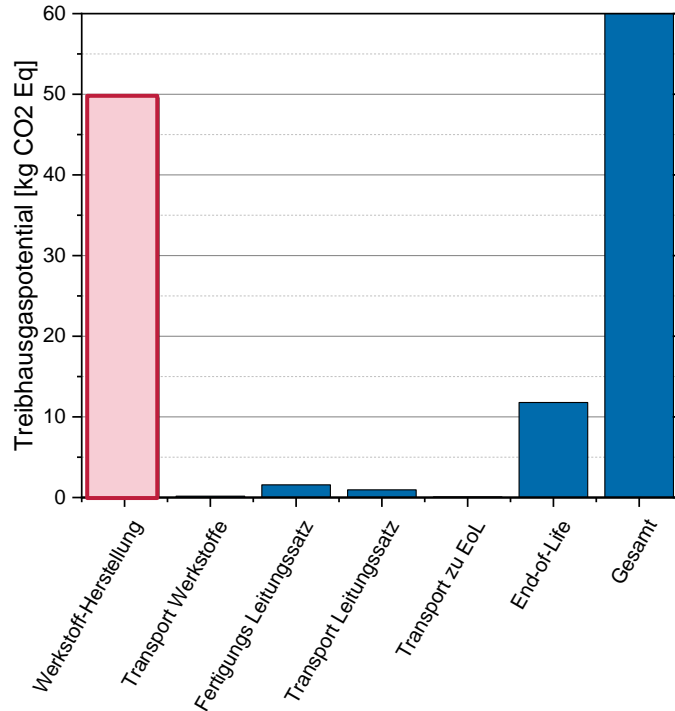
- 1 Vorstellung & Motivation
- 2 Grundlagen zu Life-Cycle Engineering (LCE)
- 3 LCE: Ansätze für den Leitungssatz

1: Life Cycle Assessment

2: Recyclability Bewertung

3: Produktauslegung und Materialauswahl

- 4 LCE-Plattform
- 5 Abschluss und Fragen



LCA-Erkenntnis: Die **Werkstoff-Herstellung** ist beim Leitungssatz der zentrale Treiber der CO₂-Bilanz.



LCE-Fragestellung: Welche **Maßnahmen** kann man ergreifen?

Ansatz 1: Recycling

- a) Wie wirkt sich die Verwendung von Rezyklatmaterial aus?
- b) Ist der Leitungssatz recyclingfähig?

Ansatz 2: Material-Substitution

- a) Welchen Einfluss haben alternative Materialien?
- b) Welche technischen Einschränkungen gibt es in Bezug auf die Ersetzbarkeit?

Materialkomplexität

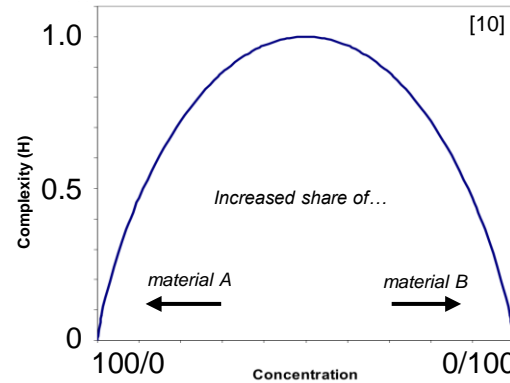
Abschätzung der Recyclingfähigkeit anhand der statistischen Entropie

Einführung von *Statistical Entropy Assessment - SEA*

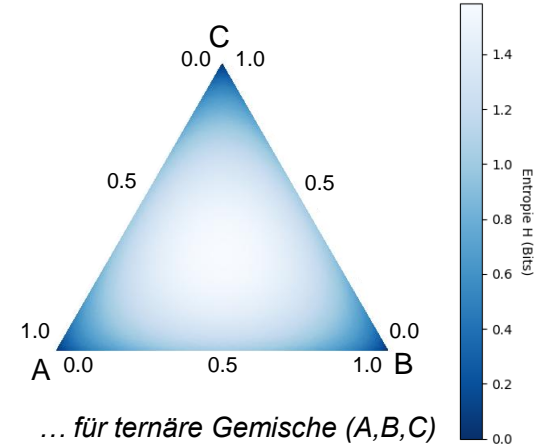
$$H = - \sum_{i=0}^{N_e} c_i \log_2(c_i) \quad [10] \quad H = \text{Statistical Entropy [Bits]}$$

$N_e = \text{Number of materials}$
 $c_i = \text{share of material } i$

- **Indirekte Bewertung** von Recycling-Systemen
- Bewertung der **Materialkomplexität**
- Abhängig von der **Anzahl versch. Materialien** und deren **Verteilung**



SEA: ...von binären Gemischen (A,B)

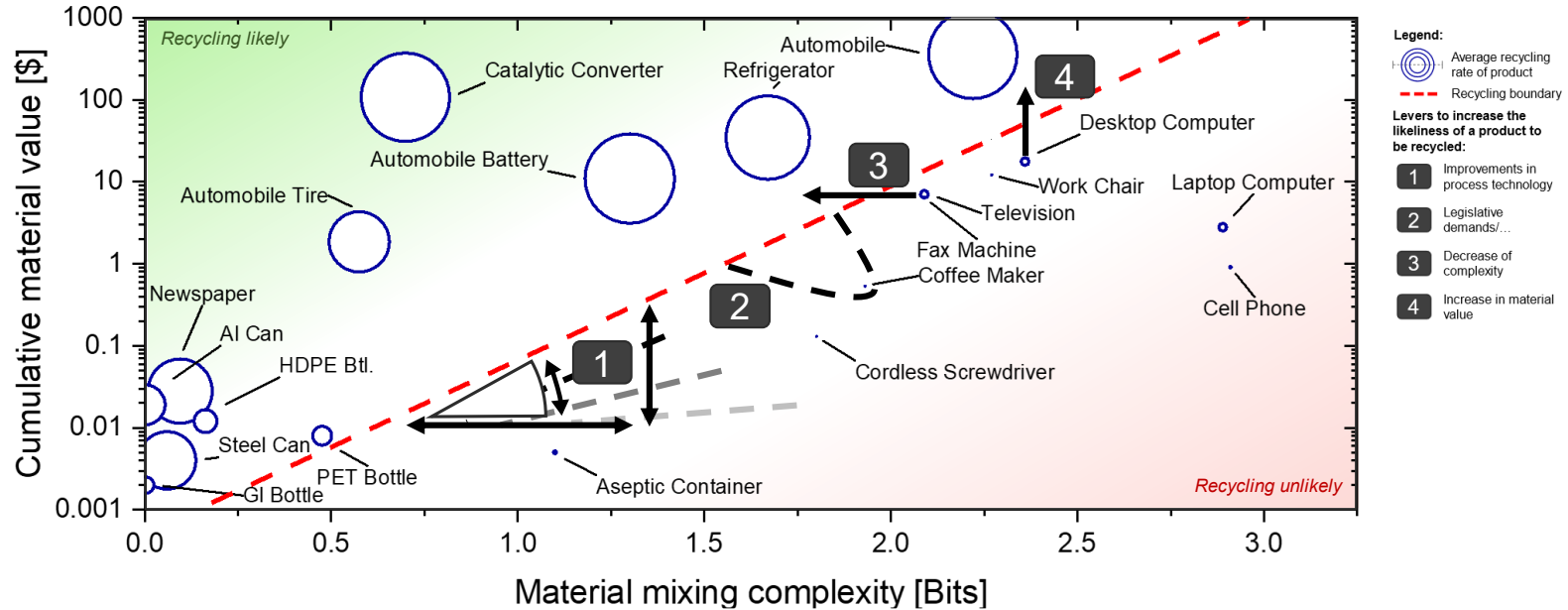


Vorherige Anwendungen in Bewertungen von Recycling-Systemen

- ▶ Wurde angewendet, um die Reduzierung der Komplexität durch Recyclingsysteme zu verfolgen und Zielmaterialien zu identifizieren [11]
- ▶ Erste Anwendungen zur Bewertung der Recyclingfähigkeit; Relative produktspezifische Recyclingfähigkeit (RPR) [12]
- ▶ Anwendung zur Ableitung einer scheinbaren Recyclinggrenze (RB) in Abhängigkeit von Materialwert und Komplexität [13]

Materialkomplexität

Ist der Leitungssatz als solcher recyclingfähig?

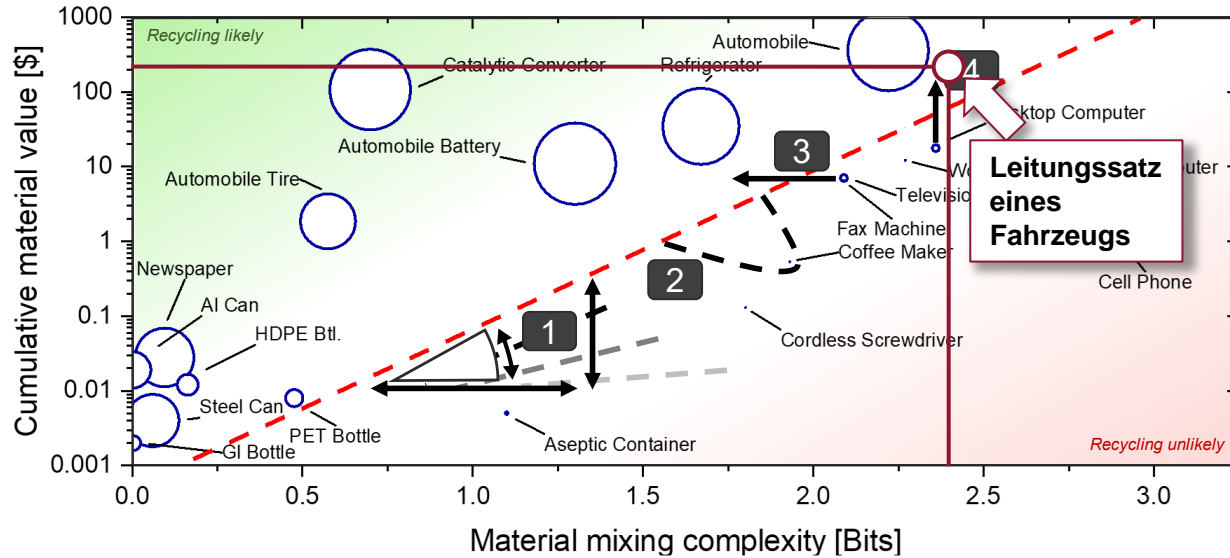


Daten aus Datenbank GaBi (Februar 2020)

[Hansen et al. 2026]

Materialkomplexität

Ist der Leitungssatz als solcher recyclingfähig?



Leitungssatz:

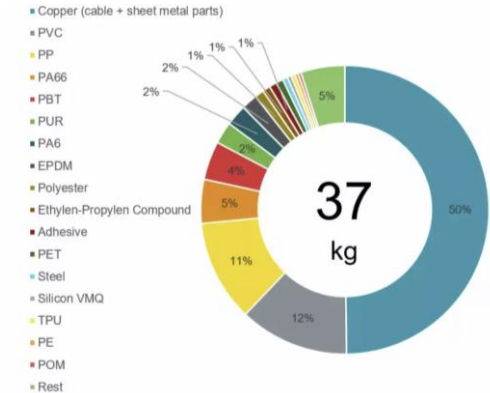
Material mixing complexity = 2,4 [Bits]

Materialwert: ~187€ = ~220\$

Annahmen:

Kupferpreis: 9.5€/kg

Kupferanteil: 50%



Daten aus Datenbank GaBi (Februar 2020)

[Hansen et al. 2026]

Thementag Nachhaltigkeit Leitungssatz

- 1 Vorstellung & Motivation
- 2 Grundlagen zu Life-Cycle Engineering (LCE)

3 LCE: Ansätze für den Leitungssatz

1: Life Cycle Assessment

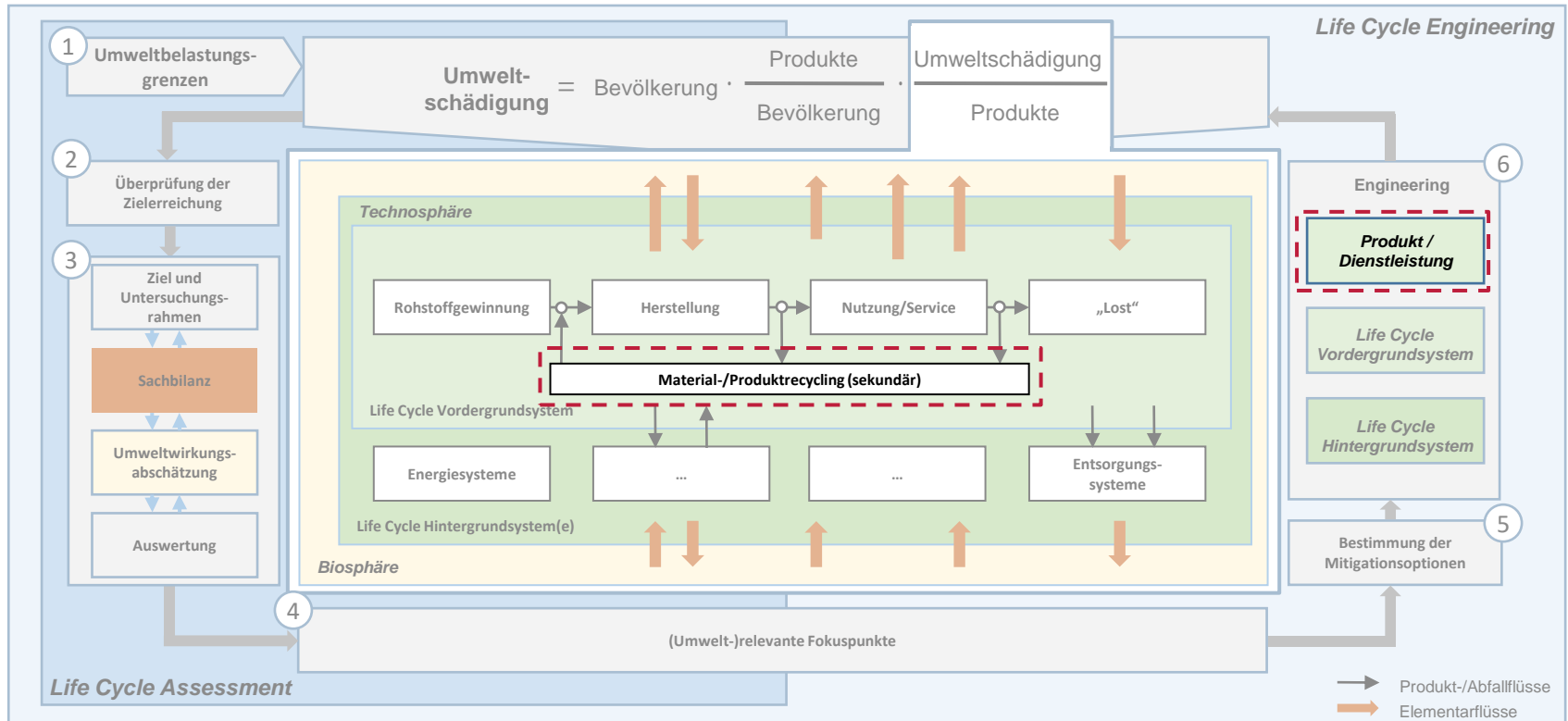
2: Recyclability Bewertung

3: Produktauslegung und Materialauswahl

- 4 LCE-Plattform
- 5 Abschluss und Fragen

Life Cycle Engineering

Gezieltes Engineering von Produkt, Vorder- und Hintergrundsystem



Kara, S., Herrmann, C., & Hauschild, M. (2023). Operationalization of life cycle engineering. Resources, Conservation and Recycling.

19.03.2026 | Dr.-Ing. Steffen Blömeke | Life Cycle Engineering | Folie 33

Materialauswahl

Welcher Werkstoff erfüllt technische und ökologische Kriterien?



**GRANTA
SELECTOR**

Mit Datenbanken wie dem Ansys Granta Material Selector können Werkstoffe anhand mehrerer, zu optimierender Eigenschaften verglichen werden.

→ Schnellerer, einfacherer Auswahlprozess

Thementag Nachhaltigkeit Leitungssatz

- 1 Vorstellung & Motivation
- 2 Grundlagen zu Life-Cycle Engineering (LCE)
- 3 LCE: Ansätze für den Leitungssatz

1: Life Cycle Assessment

2: Recyclability Bewertung

3: Produktauslegung und Materialauswahl

4 LCE-Plattform

- 5 Abschluss und Fragen



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik **WTF**

 **Fraunhofer**
IST

Joint Life Cycle Engineering Platform

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik & Fraunhofer IST

Motivation



Die quantitative **Nachhaltigkeitsbewertung** stellt eine **zentrale Voraussetzung** für heutige Innovationen dar.



Ökobilanzen (LCAs) bieten hierfür die methodische Grundlage, erfordern jedoch auch eine **Darstellung von Unsicherheiten und Variabilität** hinsichtlich der Repräsentativität (geografisch, zeitlich, technologisch) der verwendeten Daten.



Der Fokus herkömmlicher **Tools und Software** für Ökobilanzen liegt bisher vor allem auf dem Reporting einzelner KPIs und kaum auf dem Einsatz als Werkzeug im Rahmen von Life Cycle Engineering.



IWF & Fraunhofer IST haben in den letzten Jahren die **wissenschaftliche Grundlage** und mehrere **Prototypen** nach einem **modellbasierten Ansatz** für **LCA und LCE** geschaffen.

Life Cycle Engineering Plattform

Modellbeispiele:

Lieferketten

Produktions-
technologien

Energiemix

Produkt-
anwendungen

End-of-life
management

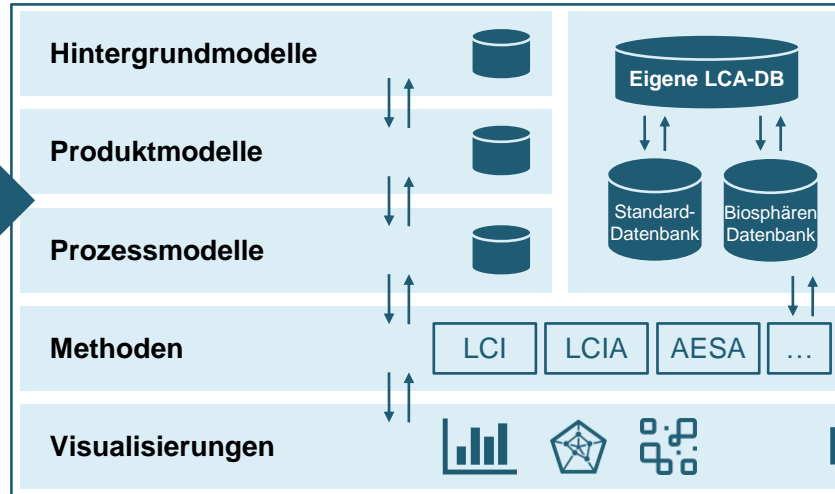


Benutzende

Produktentwickler*in
Portfolio- &
Nachhaltigkeitsmanager

Inputs

- Stückliste:
Massen & Material-
zusammensetzung
- Material- &
Energiebedarf der
Produktionsprozesse
- ...



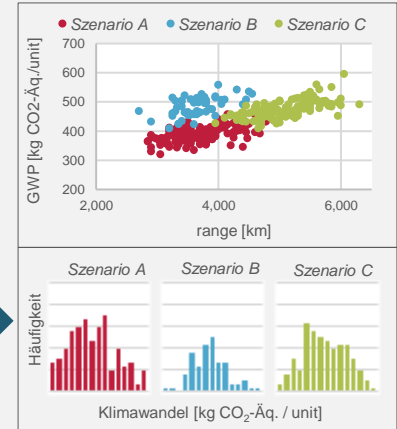
Plattform-Ebenen nach Cerdas 2022: Integrated Computational Life Cycle Engineering for Traction Batteries (Dissertation) DOI: 10.1007/978-3-030-82934-6



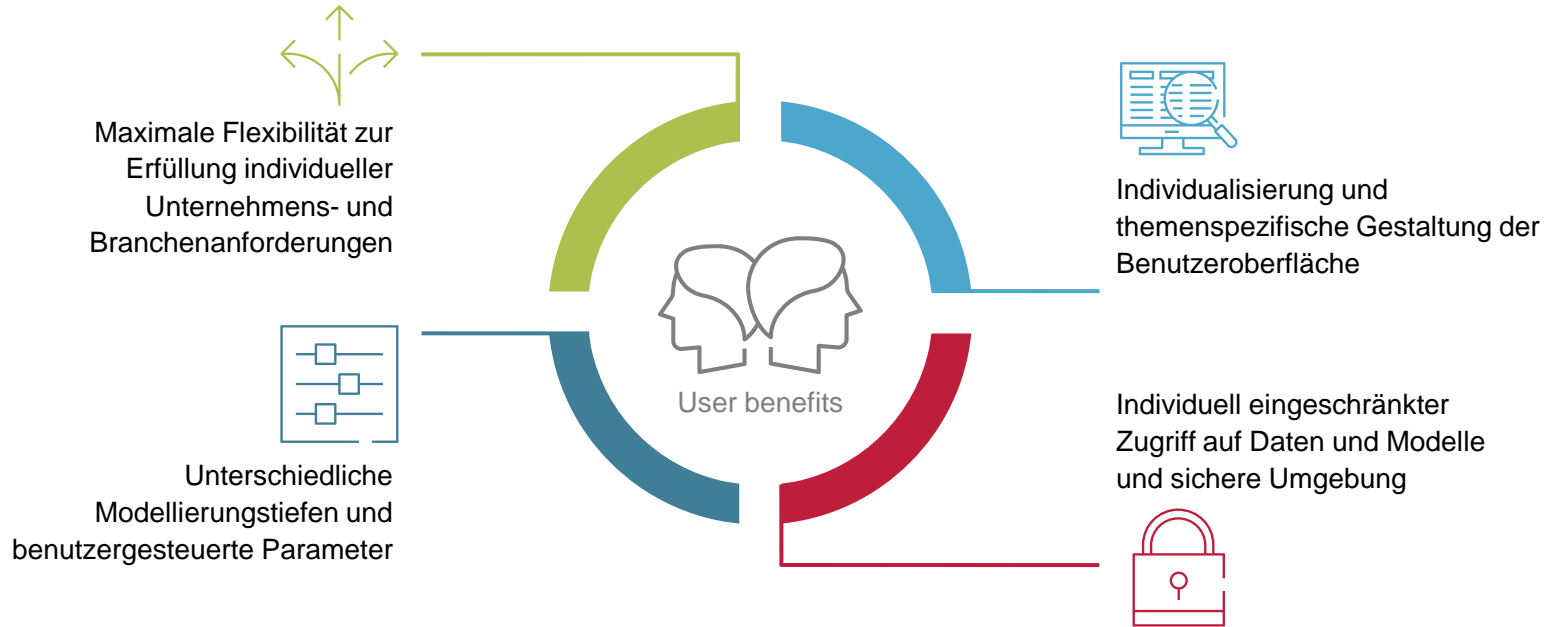
Optional: **Unterstützung** bei der Datenerfassung & -aufbereitung durch LCA-Expert*innen

Analyse der Umweltauswirkungen und Kostenoptimierung:

Beispiele:



Benutzerorientiertes Plattformdesign



Thementag Nachhaltigkeit Leitungssatz

- 1 Vorstellung & Motivation
- 2 Grundlagen zu Life-Cycle Engineering (LCE)
- 3 LCE: Ansätze für den Leitungssatz

1: Life Cycle Assessment

2: Recyclability Bewertung

3: Produktauslegung und Materialauswahl

- 4 LCE-Plattform

-
- 5 Abschluss und Fragen
-



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik **IWF**

Ihre Fragen?

34th CIRP Conference on
Life Cycle Engineering 2027,
30.03.-02.04.2027
in Braunschweig
www.lce2027.de



Thementag Nachhaltigkeit
**Life-Cycle Engineering für
einen nachhaltigen und
zirkulären Leitungssatz**

Dr.-Ing. Steffen Blömeke
Technische Universität Braunschweig
Abteilungsleitung Life Cycle Engineering
s.bloemeke@tu-braunschweig.de
+49 531/391-7682

