

**SUMATRA FORSCHUNGSPROJEKT**  
ABSCHLUSSDOKUMENTATION DES PROJEKTS

# INHALT

EINLEITUNG .....	Seite 3
NACHHALTIGKEIT .....	Seite 4
Nachhaltigkeit – eine Definition .....	Seite 5
Umwelt-Wirkungskategorien in Ökobilanzen .....	Seite 6-7
Versuche der Quantifizierung von Nachhaltigkeit (ökologisch) .....	Seite 8
Erderwärmung – Global Warming.....	Seite 9
Das 1,5°-Ziel ist eine Notwendigkeit.....	Seite 10
Ursache und Gegenmaßnahmen.....	Seite 11
Treibhausgase und CO <sub>2</sub> -Äquivalente .....	Seite 13
Abiotische Ressourcen.....	Seite 14
Fünfte Liste der kritischen Rohstoffe (CRMs 2023) .....	Seite 15
Kunststoffe .....	Seite 16
Nachhaltiges Szenario für Kunststoffe .....	Seite 17
ENERGIEWENDE UND DEFOSSILIERUNG .....	Seite 18
Umweltwirkungen.....	Seite 19
Modellierung der Energiewende.....	Seite 20
Parallele Zukunftsprognosen.....	Seite 21
Ökobilanzen.....	Seite 22
LED-Module .....	Seite 23
EVGs .....	Seite 24
Fazit.....	Seite 25
Transport und Verpackungen.....	Seite 26
Ökobilanzen Portfolioübersicht – Absolutwerte .....	Seite 27
Ökobilanzen Portfolioübersicht – Normiert.....	Seite 28

RECYCLING .....	Seite 29
Feuchtraumleuchte .....	Seite 30
Wege einer Leuchte in die Recycling-Betriebe .....	Seite 31
Vorgeschlagenes Reference End-of-Life Treatment Scenario.....	Seite 32
Mindest-Anforderung nach WEEE und ElektroG.....	Seite 33
Standard-Werte für Recyclingraten .....	Seite 34
Die Kupfer-Schmelze .....	Seite 35
Recycling von LED-Modulen .....	Seite 36-37
Weitere Metall-Schmelzen und das „Metallrad“ .....	Seite 38
Recyclingfähigkeit von LED-Modulen .....	Seite 39
Recyclingfähigkeit von EVGs .....	Seite 40-41
FOLGERUNGEN .....	Seite 42
Kreislaufwirtschaft.....	Seite 43

# SUMATRA – SUSTAINABLE MATERIALS IN FUTURE LUMINAIRE DESIGNS.

PROJEKTPARTNER, FÖRDERUNG UND  
ENTSTEHUNG DES PROJEKTS

„Wir sind das erste Projekt  
im Forschungsbereich  
„Ressourceneffizienz im Kontext der  
Energiewende“.

Laufzeit: 01.06.2021 – 30.09.2023

**TRILUX** LED-Leuchten

**Inventronics** LED-Systeme

**Fraunhofer** IZM Ökobilanzierung

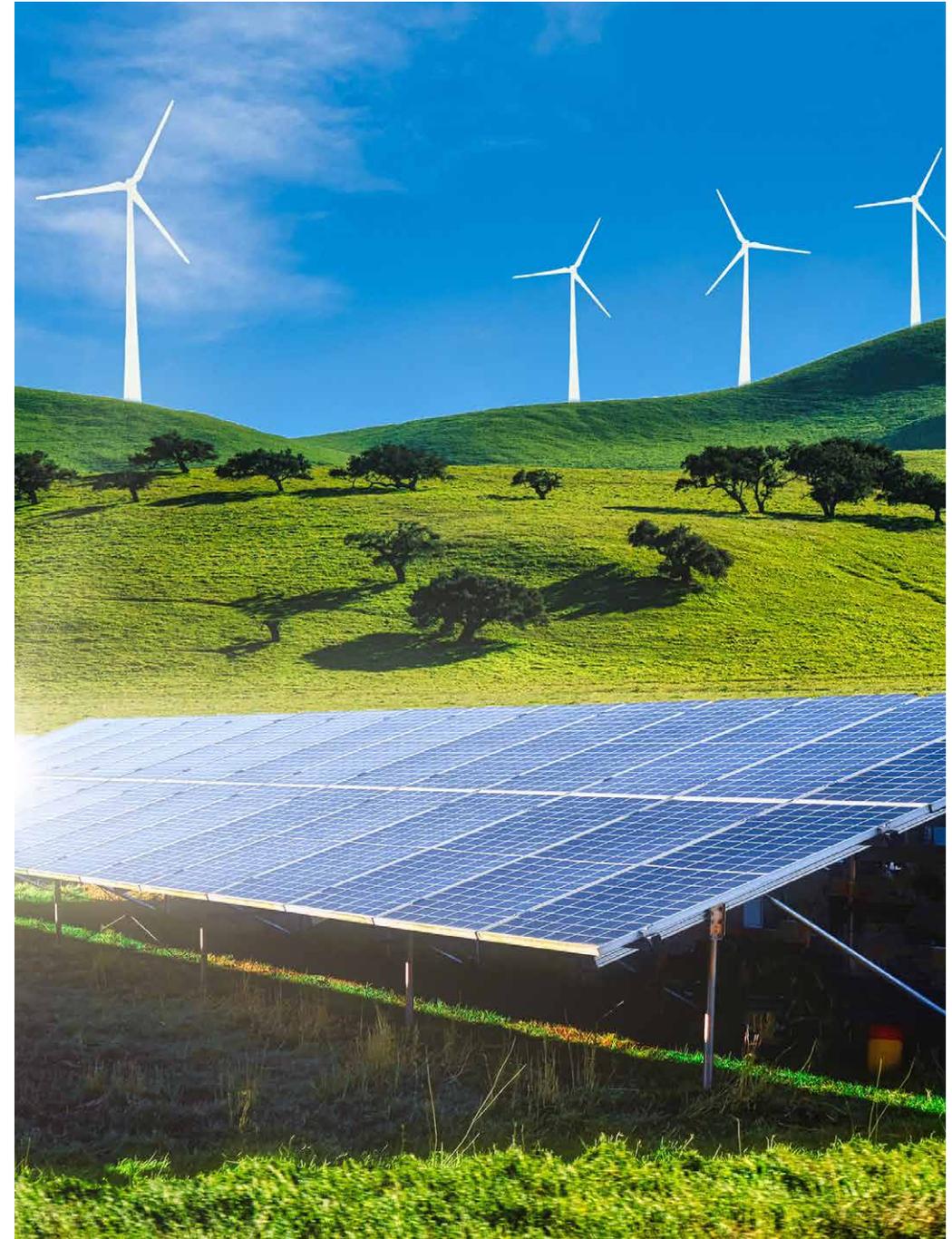
**Interzero** Recycling



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages





# WAS IST NACHHALTIGKEIT?

## EINE DEFINITION

Der einfache Kern: So zu handeln, dass wir im Grunde für immer so weitermachen können. Damit ist die Definition nah an der ursprünglichen Bedeutung des deutschen Begriffs **nachhaltig** (auf längere Zeit anhaltend und wirkend, Deutsches Wörterbuch der Brüder Grimm, 1869) und an der erstmaligen Verwendung des Begriffs in der **Forstwirtschaft** (nicht mehr Holz zu fällen, als nachwachsen kann, Hans Carl von Carlowitz, 1713).

## WISSENSCHAFTLICHE LITERATUR

Ausführlichere Beschreibungen der Facetten von Nachhaltigkeit bieten folgende Publikationen:

- Drei-Säulen-Modell (1990er Jahre, Deutschland) - ökologische, soziale und ökonomische Nachhaltigkeit
- 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (UN 2016)

## ÜBERGEORDNETE STRATEGIE

**Drei Leitstrategien** helfen beim Erreichen einer nachhaltigen Entwicklung.

- Suffizienz: genügsamer Konsum – wieviel (Produkte, Dienstleistungen) brauche ich?
- Effizienz: erzeuge die gleiche Leistung mit weniger Aufwand (Ressourcen, Energie)
- Konsistenz: verwende umweltverträgliche Stoffe – insbesondere bei Stoffen, die nicht störsicher im abgeschlossenen technischen Kreislauf geführt werden

**„Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.“**

United Nations, Our Common Future (1987)



# DIE BAUSTEINE DER NACHHALTIGKEIT

## UMWELT-WIRKUNGSKATEGORIEN IN ÖKOBILANZEN UND MÖGLICHE AUSWIRKUNGEN AUF DIE UMWELT

In den Ökobilanzen des Projekts SUMATRA wurden die unten aufgeführten Umwelt-wirkungen betrachtet. Eine Schlussfolgerung, wie sich eine „absolute“ Nachhaltigkeit nach den Prinzipien des Ecological Footprints oder der Planetary Boundaries Modelle erreichen lässt, war im Rahmen des Projektes nicht möglich.

### ADP ELEMENTS

Abiotic depletion potential, elements

Nutzung von Ressourcen (Mineralien, Metallerze), die beschränkt auf der Erde vorhanden sind.



### ADP FOSSIL

Abiotic depletion potential, fossil

Verbrauch von fossilen Rohstoffen (Öl, Kohle, Gas), die endlich sind.



### GWP

Global Warming Potential

Verursachung von Treibhausgas-Emissionen, gemessen in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent.



### TOXICITIES

Fresh Water / Marine / Terrestrial / Human

Freisetzung giftiger Substanzen. Hier gibt es allerdings methodische Schwierigkeiten.



**„Konzepte im Zusammenhang mit Nachhaltigkeit sind äußerst kompliziert und werden noch untersucht. Gegenwärtig gibt es keine bestimmten Verfahren zur Messung von Nachhaltigkeit oder zu ihrer Bestätigung.“**

ISO 14021: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen –  
Umweltbezogene Anbietererklärungen (2021)

**AP**

Acidification potential

Emission von Stoffen wie Schwefeldioxid, die z.B. sauren Regen verursachen.

**EP**

Eutrophication potential

Gewässer werden mit Nährstoffen angereichert (z.B. Phosphate); hat nachteilige Effekte wie Algenblüte.

**ODP**

Ozone Depletion Potential.

Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre (die unser natürlicher UV-C-Blocker ist).

**POCP**

Photochemical Ozone Creation

Erzeugung von Ozon in Bodennähe, welches hoch reaktiv ist und ungesund einzuatmen ist.



# WIE WIRD NACHHALTIGKEIT ERMITTELT?

## VERSUCHE DER QUANTIFIZIERUNG VON NACHHALTIGKEIT (ÖKOLOGISCH)

### ANSATZ1: DER ÖKOLOGISCHE FUSSABDRUCK

#### The Ecological Footprint

Der Fußabdruck misst, wieviel biologisch produktive Fläche benötigt wird, um alle menschlichen Aktivitäten zu ermöglichen und deren Auswirkungen zu kompensieren. Dem gegenüber steht die Biokapazität des Landes bzw. der Erde. Gemessen wird u.a.:

- Absorption von CO<sub>2</sub>
- Anbau von Nahrungsmitteln
- Weideland
- Anbau von Forst-Produkten
- bebaute Flächen
- ...



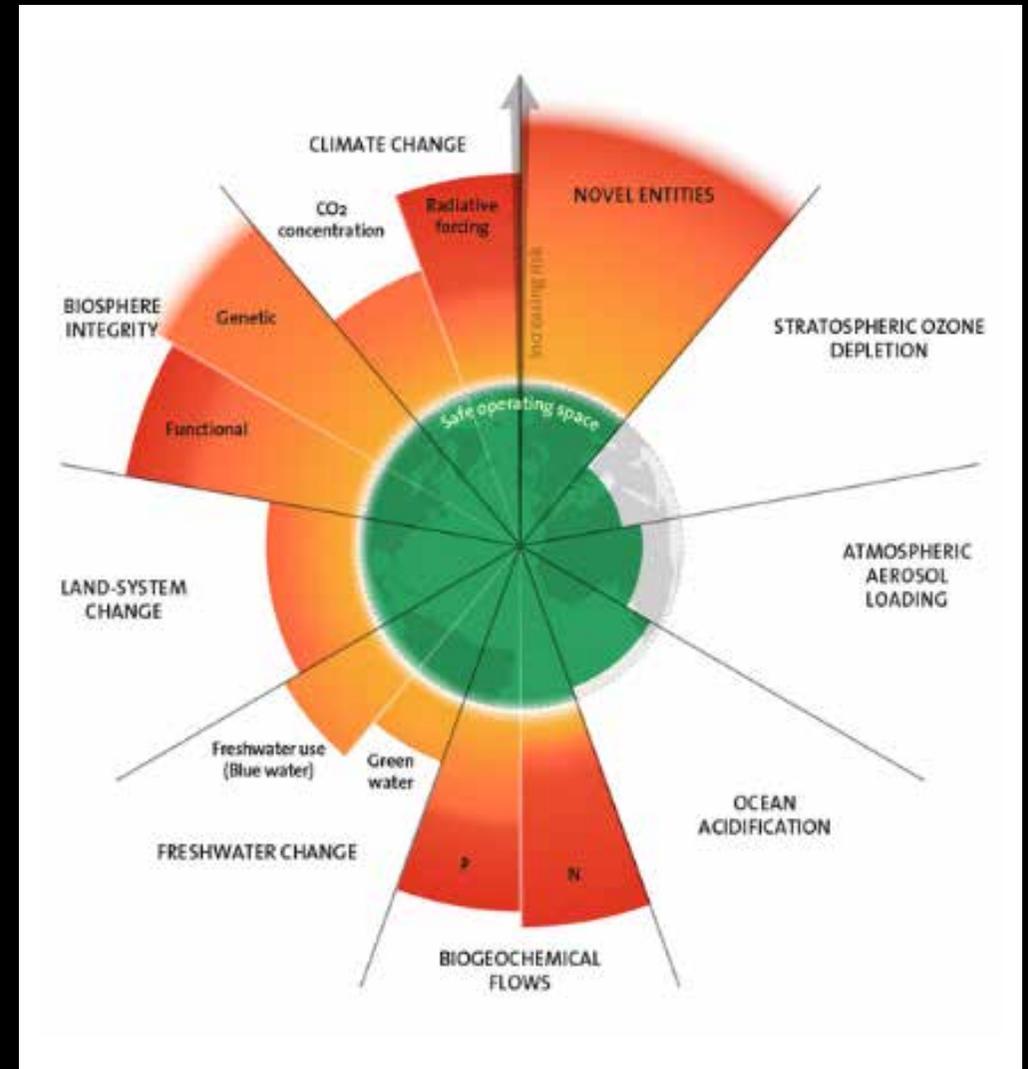
Der ökologische Fußabdruck dient zur Berechnung des Earth Overshoot Days. Dieser beschreibt, wann wir die Biokapazität der Erde erschöpft haben. 2024 wurde dieser kritische Punkt weltweit am 1. August erreicht, in Deutschland sogar bereits am 4. Mai.

### ANSATZ2: PLANETARE GRENZEN

#### Planetary Boundaries Framework

Das Planetary Boundaries Framework beschreibt die planetare Gesundheit anhand von neun Kategorien, die zu globalen Umweltveränderungen führen können. Entwickelt wurde das Modell von Rockström et al. (2009), derzeit gibt es eine dritte Aktualisierung von Röckström et al. (Nature, 2023).

- Mehrere Grenzen sind bereits überschritten.
- Besonders bedeutsam:
  - Klimawandel
  - Integrität der Biosphäre (Biodiversität)



# TEMPERATURVERGLEICH

## ERDERWÄRMUNG – GLOBAL WARMING

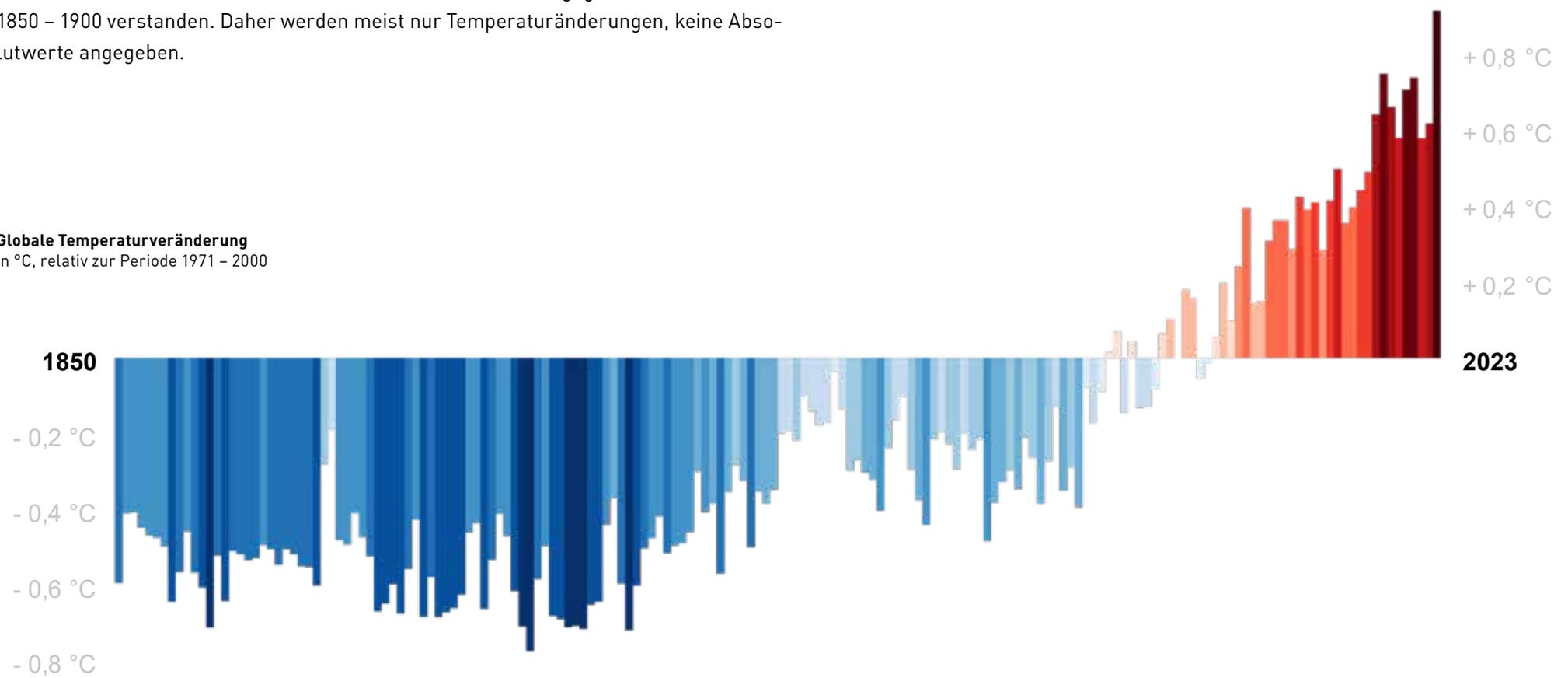
### MESSBARE TEMPERATURERHÖHUNG ZUR VOR-INDUSTRIELLEN ZEIT

Das Klima wandelt sich: Die globale Durchschnittstemperatur ist bereits über 1,2 °C höher als in der vor-industriellen Zeit. Als „vor-industriellen Zeit“ hat das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) den Zeitraum 1850 - 1900 ausgewählt. Während dieser Referenzperiode betrug die globale Durchschnittstemperatur ca. 14 °C. Das vom IPCC verabschiedete Klimaziel von 1,5 °C wird gegenüber dem Zeitraum 1850 – 1900 verstanden. Daher werden meist nur Temperaturänderungen, keine Absolutwerte angegeben.

### ANSCHAUICHE DARSTELLUNG MIT WARMING STRIPES

Die Warming Stripes des Klimatologen Ed Hawkins sind eine vielbeachtete, ausgezeichnete und oft wiedergegebene Visualisierung des Temperaturverlaufs. Die Bezugsperiode ist hier allerdings 1971 - 2000, die vor-industrielle Zeit findet sich ersten Viertel der Zeitachse.

**Globale Temperaturveränderung**  
in °C, relativ zur Periode 1971 – 2000



# KIPPPUNKTE DROHEN

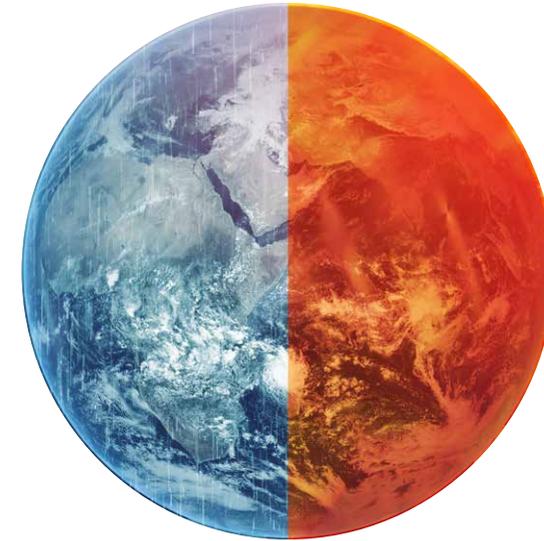
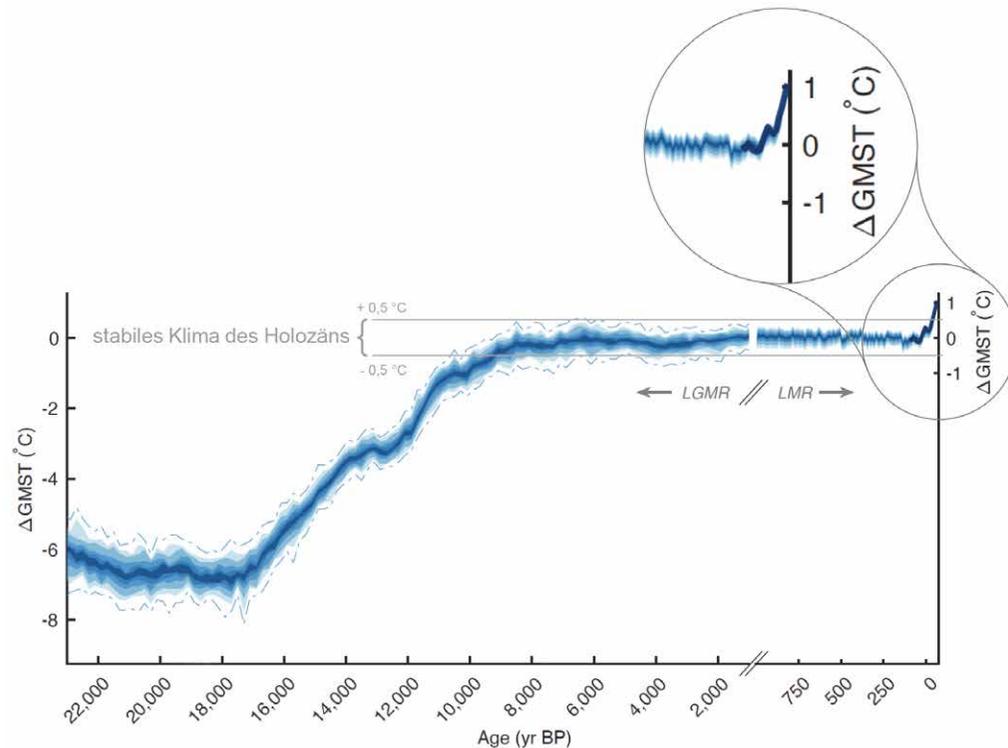
DAS 1,5°-ZIEL IST KEINE POLITISCHE FRAGE, SONDERN EINE NOTWENDIGKEIT

## DAS HOLOZÄN - 11.000 JAHRE STABILES KLIMA

Das Holozän ist die Epoche der vergangenen 11.000 Jahre Erdgeschichte. Sie zeichnet sich durch eine sehr geringe Variabilität der Klimabedingungen aus. Landwirtschaft und Hochkulturen entwickelten sich in dieser Epoche.

## KIPPPUNKTE - ACHTUNG, IRREVERSIBLE PROZESSE

Untersuchungen zeigen, dass bereits bei 1,5 °C Erderwärmung erste Kippunkte im System Erde erreicht werden, z.B. das Abschmelzen des Grönland-Eisschildes und das Absterben aller tropischen Korallenriffe.



**„Das Holozän ist der Referenzpunkt eines wünschenswerten Planeten. Wir sind schon weit im Anthropozän – der Epoche, in welcher der Mensch die Erde formt.“**

Prof. Johann Rockström, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Frontiers Forum 2023

### Global Mean Surface Temperature (GMST)

Änderung über die letzten 24.000 Jahre auf Basis der Last Glacial Maximum Reanalysis (LGMR), der Last Millennium Reanalysis (LMR) und des HadCRUT5 Messdatensatzes (durchgezogene Linie). Die Vergrößerung zeigt, wie schnell wir derzeit die stabile Phase des Holozäns (Variabilität ± 0,5 °C) verlassen. [Osman et al. 2021]

# WÄRMESTRAHLUNG IM UNGLEICHGEWICHT

## TREIBHAUSGASE UND CO<sub>2</sub>-ÄQUIVALENTE

### KLIMAWIRKSAMKEIT BERECHNEN

Neben dem Kohlendioxid gibt es weitere Treibhausgase, die eine ähnliche Auswirkung auf die Strahlungsbilanz der Erde haben, und damit den Klimawandel verursachen, z.B. Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O), etc. Ihre Klimawirksamkeit wird in Form einer CO<sub>2</sub>-Äquivalente beschrieben.

#### Umrechnungsfaktoren in CO<sub>2</sub>-Äquivalente

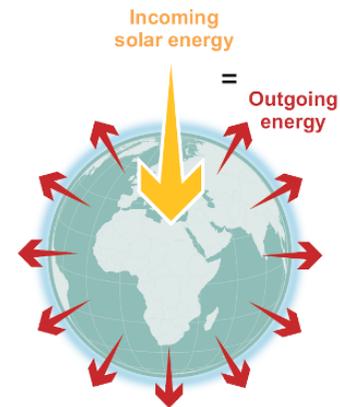
Zur Bewertung des Klimawandelpotentials werden alle Emissionen von Treibhausgasen gemäß ihrer Wirkung in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet.

Da die Gase unterschiedliche Verweildauern in der Atmosphäre haben, hängen die Umrechnungsfaktoren vom betrachteten Zeitraum der Auswirkung ab. Die gängigste Betrachtung läuft über 100 Jahre und wird als GWP-100 (Global Warming Potential, 100 Jahre) bezeichnet.

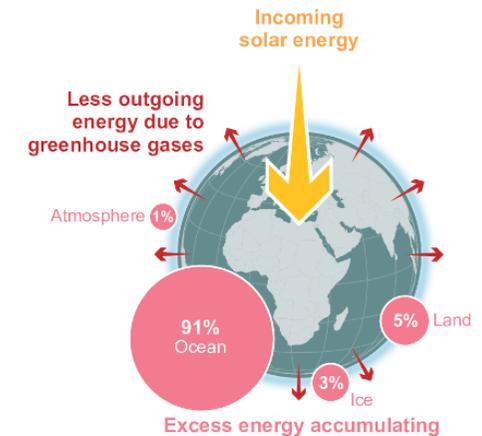
	Lebensdauer	GWP-100
CO <sub>2</sub>	multiple	1
CH <sub>4</sub> -fossil	11,8 Jahre	29,8
CH <sub>4</sub> -non fossil	11,8 Jahre	27,0
N <sub>2</sub> O	109 Jahre	273

[Tab. 7.15 in IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis]

### Stabiles Klima: Gleichgewicht



### Heute: Ungleichgewicht



[FAQ 7.1 Figure 1 in IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis]

### GEFANGENE STRAHLUNGSENERGIE

Klimawirksame Gase führen zu einer Verkleinerung des „atmosphärischen Fensters“, in welchem Wärmestrahlung von der Erdoberfläche in den Weltraum abgestrahlt wird. Dies führt zum „Strahlungsantrieb“ (radiative forcing) des Klimawandels.

### KLIMAWIRKSAME GASE

Die Erderwärmung wird angetrieben durch die Emission von CO<sub>2</sub>, welches zuvor in fossilen Ressourcen im Boden gespeichert war. Hinzu kommen Emissionen von z.B. Methan, Distickstoffmonoxid, Aerosolen, ... welche die Erderwärmung verstärken.



# WAS WIR TUN KÖNNEN UND WAS ES BRINGT

## URSACHE UND GEGENMASSNAHMEN

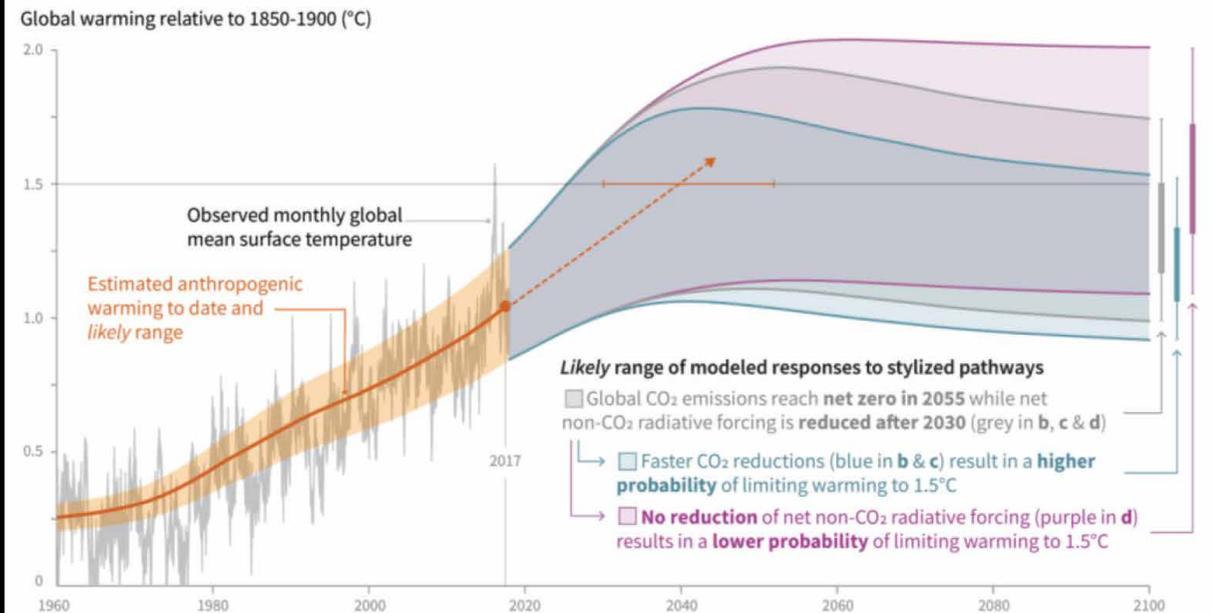
### SZENARIEN MIT UND OHNE GEGENMASSNAHMEN

Die Projektionen des IPCC (Special Report, 2018) zeigen mögliche zukünftige Temperaturverläufe, abhängig von getroffenen Gegenmaßnahmen:

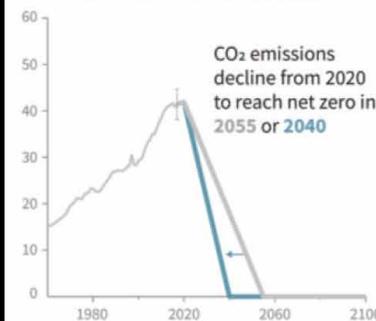
- Orange: ohne Gegenmaßnahmen wird das 1,5 °C Ziel zwischen 2030 und 2052 überschritten
- Graue Projektion: CO<sub>2</sub>-Emissionen werden bis 2055 auf (netto) Null gebracht (siehe b, c), und die anderen Klimagase werden ebenfalls reduziert (d).
- Blaue Projektion: wie grau, aber beschleunigte CO<sub>2</sub>-Reduktion (netto Null in 2040)
- Violette Projektion: wie grau aber ohne Reduktion der anderen Klimagase

Die vertikale Achse in c) und d) sind so skaliert, dass sie ähnliche große Erwärmungseffekte repräsentieren.

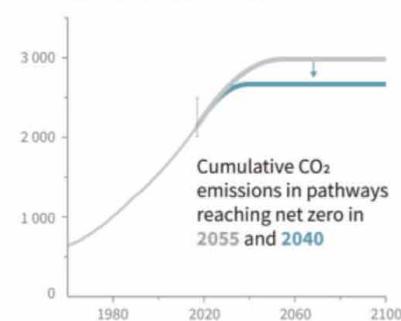
a) Observed global temperature change and modeled responses to stylized anthropogenic emission and forcing pathways



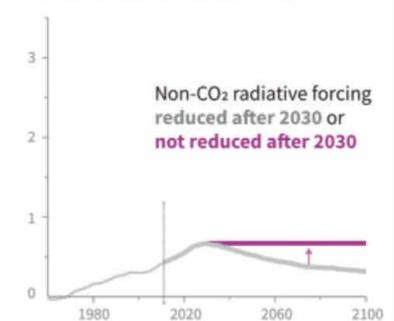
b) Stylized net global CO<sub>2</sub> emission pathways  
Billion tonnes CO<sub>2</sub> per year (GtCO<sub>2</sub>/yr)



c) Cumulative net CO<sub>2</sub> emissions  
Billion tonnes CO<sub>2</sub> (GtCO<sub>2</sub>)



d) Non-CO<sub>2</sub> radiative forcing pathways  
Watts per square metre (W/m<sup>2</sup>)



# WERTVOLLE ROHSTOFFE SCHONEN

## ABIOTISCHE RESSOURCEN

Der Mensch baut Rohstoffe (chemische Elemente und Verbindungen), die in der Erdkruste eingelagert sind, ab und verwendet sie zum Bau von Dingen, die für ihn eine Funktion haben. Dieses Vorgehen kann in Konflikt mit der Nachhaltigkeit stehen, da die Ressourcen begrenzt sind und sich nicht erneuern, d.h. nicht fortwährend in der Erde erzeugt werden.

### RESSOURCENVERBRAUCH MESSEN

Zur Quantifizierung des Ressourcenverbrauchs wird das **Abiotic Depletion Potential of the Elements ADP** herangezogen, gemessen in **kg Antimon-äquivalent**.

Die Gewichtungsfaktoren für den Verbrauch verschiedener Elemente  $i$  errechnen sich aus der Gesamtmenge in der Erdkruste  $R_i$  („ultimatereserve“, in kg) sowie der aktuellen Extraktionsrate  $DR_i$  (in kg/Jahr):

$$ADP_i = \frac{DR_i / R_i}{DR_{ref} / R_{ref}^2}$$

Element	ADP <sub>i</sub> [kg Sb-eq. / kg]
Aluminium	0,00000000109
Kupfer (Cu)	0,00137
Eisen (Fe)	0,0000000524
Gold (Au)	52,0
Silber (Ag)	1,18

...

Die Referenz ist Antimon (chem. Symbol Sb, es war bei der Entwicklung der Metrik das erste Element im Alphabet, für das die Daten für R und DR vollständig vorlagen).

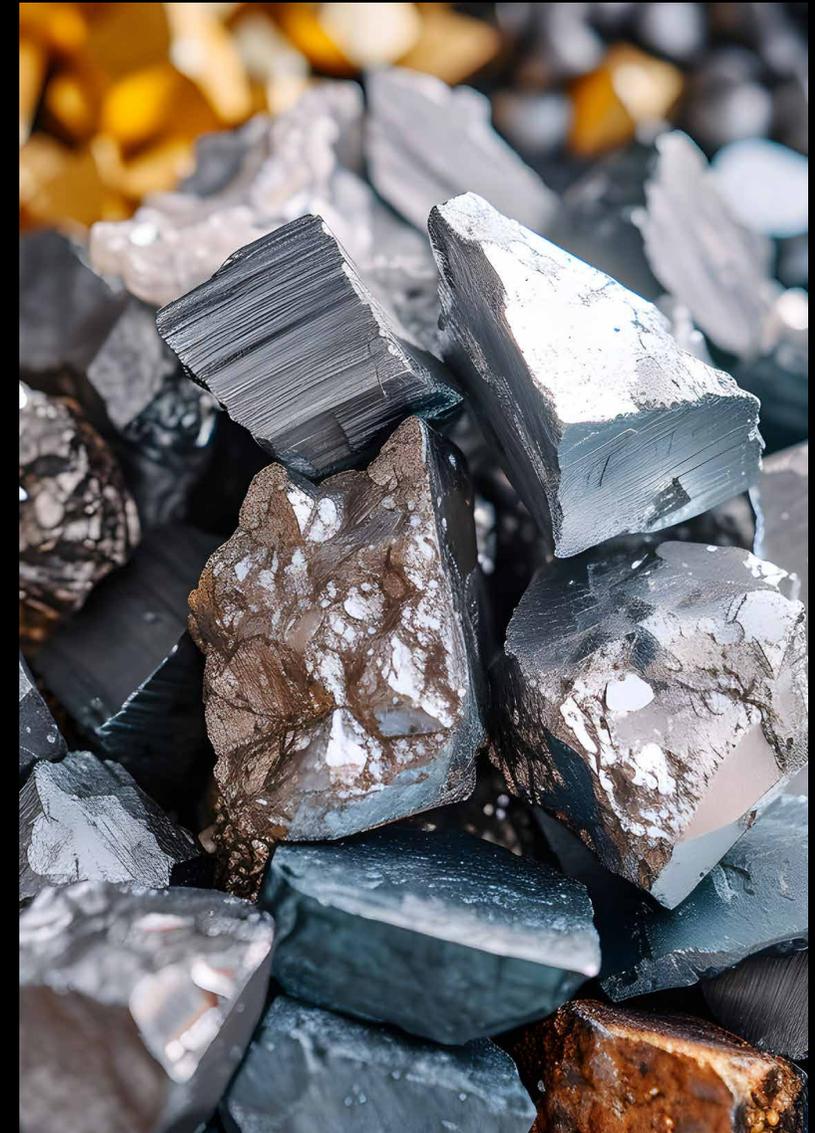
Die Metrik berücksichtigt nur das Vorhandensein der Elemente in der Erdkruste, aber keine geopolitischen Risiken. Dies wird in den CRMs (critical raw materials).



# IRDISCHE KOSTBARKEITEN - VON ANTIMON BIS VANADIUM

## FÜNFTE LISTE DER KRITISCHEN ROHSTOFFE (CRMS 2023)

Deutsch	Englisch	Bezug zur Lichtindustrie
Antimon	Antimony	Halbmetall, Anwendung als Flammschutzmittel
Arsen	Arsenic	
Aluminium und Bauxit	Aluminium and Bauxite	Gehäuse-Material
Baryt	Baryte	
Beryllium	Beryllium	
Bismut	Bismuth	
Bor	Boron	Verwendung in der Glasherstellung
Kobalt	Cobalt	
Kokskohle	Coking Coal	
Kupfer	Copper	Verdrahtung und elektronische Komponenten
Feldspat	Feldspar	Verwendung in der Glas-, Keramik- und Porzellanherstellung
Flussspat	Fluorspar	
Gallium	Gallium	Verwendung: ICs (75%), <b>LEDs (25%)</b> , Photovoltaik (5%)
Germanium	Germanium	
Hafnium	Hafnium	
Helium	Helium	
Schwere seltene Erden	Heavy Rare Earth Elements	
Leichte seltene Erden	Light Rare Earth Elements	Leuchtstoffe (und viele weitere Anwendungen – bei einigen Elementen macht <b>Beleuchtung bis zu 25%</b> der Verwendung aus)
Lithium	Lithium	
Magnesium	Magnesium	
Mangan	Manganese	Legierungselement in vielen Stahl-Sorten
Natürlicher Grafit	Natural Graphite	
Nickel - Batteriequalität	Nickel - battery grade	Legierungselement in vielen Stahl-Sorten
Niob	Niobium	Legierungselement in vielen Stahl-Sorten
Phosphorit	Phosphate rock	
Phosphor	Phosphorus	
Metalle der Platingruppe	Platinum Group Metals	
Scandium	Scandium	
Siliciummetall	Silicon metal	Alu-Guss-Legierungen, Silikone, Wafer für LED- und Chip-Produktion
Strontium	Strontium	
Tantal	Tantalum	Verwendung in Kondensatoren
Titanmetall	Titanium metal	in oxidierten Form (TiO <sub>2</sub> ) als Weiß-Pigment in Farben
Wolfram	Tungsten	früher verwendet für Glühlampen
Vanadium	Vanadium	Legierungselement in vielen Stahl-Sorten





## KUNSTSTOFFE

### FLUCH ODER SEGEN?

#### MINIMALES ADP

Kunststoffe sind langkettige Moleküle. Chemisch bestehen sie aus langen Ketten von Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O); Silikone bestehen aus langen Ketten von Silizium (Si) und Sauerstoff. Dies sind allesamt keine seltenen Elemente, und daher haben Kunststoffe verschwindend geringe Werte für den abiotischen Ressourcenverbrauch ADP.

#### DENNOCH PROBLEMATISCH

Warum gelten Kunststoffe in der Öffentlichkeit als besonders wenig nachhaltig?

1. Der hohe **CO<sub>2</sub>-Footprint der weltweiten Plastik-Industrie**: Unterm Strich wird Kohlenstoff bzw. Öl extrahiert und landet schlussendlich als CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre.
2. Langjährige **Umweltverschmutzung** durch Mikroplastik (Waschen von synthetischer Kleidung, Reifenabrieb) und Makroplastik (Verpackungen)
3. Einige **bedenkliche Substanzen** bei der Herstellung oder im Endprodukt (Halogene wie z.B. in PVC, Bisphenol-A in Polycarbonat, Flammschutzmittel, ...)

#### VERMEIDUNGSSTRATEGIE

Punkte 1 und teilweise 2 sind vor allem die Folge der **absurd hohen Menge** die wir produzieren und **unkontrollierbar** auf der Erde im Umlauf haben. Besonders kritisch ist das Verpackungsplastik. Einfach Plastik durch andere Stoffe zu ersetzen, greift zu kurz, da auch die alternativen Materialien Umweltwirkungen haben (siehe Fallbeispiel). Punkt 3 ist kritisch für **Tech-Plastik** und damit auf für den Beleuchtungsmarkt.

#### FALLBEISPIEL PLASTIKTÜTE

Eine Papier-Tüte hat einen höheren CO<sub>2</sub>-Footprint als eine Plastiktüte. Sie müsste 3x häufiger wiederverwendet werden als eine Plastiktüte, damit sich die Ökobilanzen angleichen.

Ein Baumwollbeutel hat sogar einen 50-150x höheren CO<sub>2</sub>-Footprint als eine Plastiktüte.

[NABU: Plastiktüten? Vermeiden statt ersetzen!]

# NACHHALTIGES SZENARIO FÜR KUNSTSTOFFE

## STEIGENDE NACHFRAGE ALS HERAUSFORDERUNG

In dem Paper Towards circular plastics within planetary boundaries (Bachmann et al., Nature, 2023) wird untersucht, ob die weltweite Plastikindustrie innerhalb der planetaren Grenzen funktionieren kann. Die Ergebnisse zeigen, vor welchen Herausforderungen die globale Wirtschaft steht.

### NACHHALTIGES SZENARIO 2030

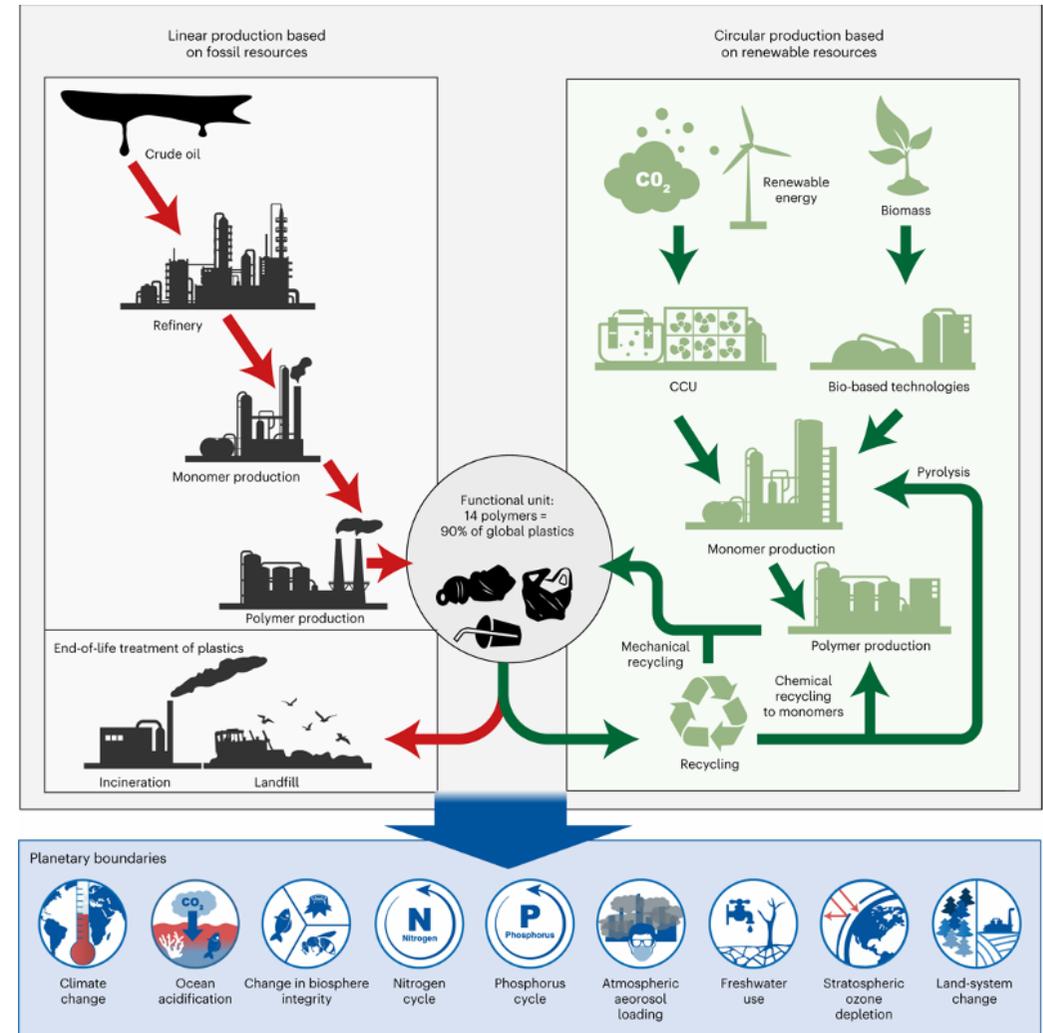
Die Kunststoffnachfrage 2030 könnte nachhaltig produziert werden - allerdings nur, wenn die Recyclingquote auf > 75 % erhöht wird (aktuell 23 %).

### KEIN NACHHALTIGES SZENARIO FÜR 2050 MÖGLICH

Die hohe prognostizierte Nachfrage für 2050 kann selbst bei 95 % Recyclingquote nicht nachhaltig erzeugt werden.

### HEBEL ZUM NACHHALTIGEN EINSATZ VON KUNSTSTOFFEN

- **Mechanisches Recycling** für Verpackungsplastik, chemisches Recycling für Tech-Kunststoffe
- **Biobasierter Kunststoff** ist zwar klimafreundlich, kann aber nicht hochskaliert werden ohne die planetaren Grenzen des Stickstoffkreislaufs und der Biosphären-Integrität zu überschreiten
- Daher sind **CCU** (carbon capture and use) Verfahren notwendig. Sie lohnen sich, sobald genug erneuerbarer Strom verfügbar ist.





# **ENERGIEWENDE UND DEFOSSILIERUNG**

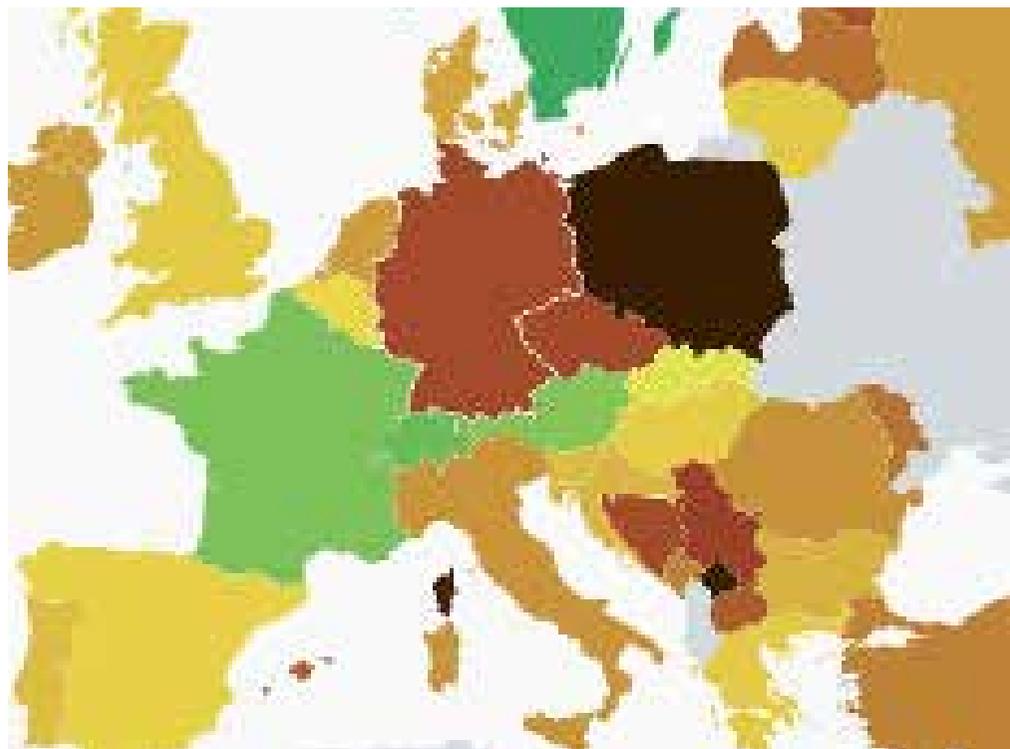
# GRÜNER STROM FÜR NAHCHALTIGES LICHT

## UMWELTWIRKUNGEN DER STROMERZEUGUNG UND ENERGIEWENDE

Bei energieverbrauchsrelevanten Produkten wie Leuchten entstehen die größten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Regel durch den Stromverbrauch in der Nutzungsphase. Abhängig vom Strommix ergeben sich unterschiedliche **Emissionsfaktoren** (kg CO<sub>2</sub>-eq pro kWh).

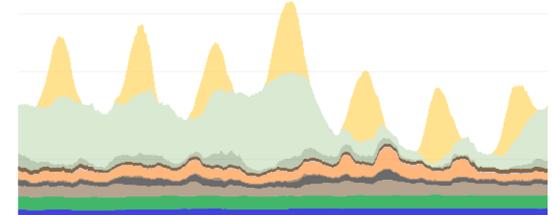
### CO<sub>2</sub>-Emissionen im europäischen Vergleich

Deutschland liegt im Mittelfeld



CO<sub>2</sub>-Intensität (gCO<sub>2</sub>-eq/kWh)  
 0 300 600 900 1200 1500

Quelle: [electricitymaps.com](http://electricitymaps.com) für den 22.08.2023



■ Solar      ■ Müll      ■ Braunkohle  
■ Wind Onshore      ■ Erdgas      ■ Biomasse  
■ Wind Offshore      ■ Steinkohle      ■ Laufwasser

### REGENERATIVE ENERGIEN AUF EINEM GUTEN WEG

Zeitweise besteht der Großteil der Stromerzeugung aus erneuerbarer Energie.

Öffentliche Nettostromerzeugung KW 31/2023  
 [Fraunhofer ISE]



### GUTE PROGNOSE BIS 2050

Der Emissionsfaktor ist gesunken und Studien zeigen Wege für den künftigen Verlauf der Energiewende.

[Umweltbundesamt 2023, Agora Energiewende 2020]



## MODELLIERUNG DER ENERGIEWENDE

Mit der Energiewende sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen, aber es steigt der abiotische Ressourcenverbrauch für die Produktion von elektrischem Strom.

Letzteres liegt vor allem an der Photovoltaik – für Solarpanels werden ähnliche Ressourcen verwendet wie auch beim Bau von Leuchten, und auch sie haben eine endliche Lebensdauer.

Generell werden wir auch mit 100% grüner Energie im Netz niemals mit Energie prassen können, wie es uns beliebt: Denn dann hätten wir ja eine Überproduktion installiert. Energie wird auch im Laufe der Energiewende ein knappes Gut bleiben.

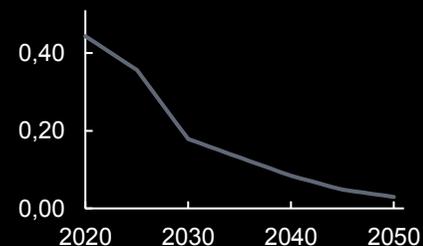
### Modell der Energiewende gemäß

- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland. Datenanhang. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. (Szenario „KN50“ – Klimaneutral 2050)
- Ökobilanzierung des Szenarios durch Fraunhofer IZM (Grafik auf Seite 21)

#### Treibhauspotential pro kWh

kg CO<sub>2</sub>-eq. / kWh

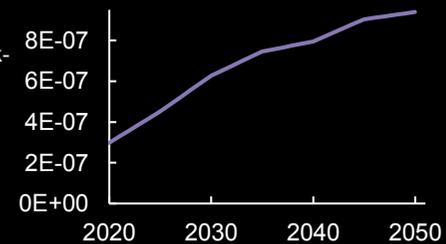
Ausbau der erneuerbaren Energien führt zu sinkenden CO<sub>2</sub>-Emissionen



#### Abiotischer Ressourcenverbrauch pro kWh

kg Sb.-eq. / kWh

hoher Photovoltaik-Anteil führt zu steigendem abiotischen Ressourcenverbrauch



# WAS PASSIERT BIS 2050?

## PARALELLE ZUKUNFTSPROGNOSEN

Im Umfeld der Beleuchtung wird sich im Übergang zu einer nachhaltigen Wirtschaft parallel folgendes bis 2050 entwickeln (müssen).

### STEIGENDER STROMBEDARF, MEHR NACHHALTIGKEIT

Die Stromerzeugung wird bis 2050 steigen, die regenerativen Anteile aus Photovoltaik, Wind on- und offshore wachsen.

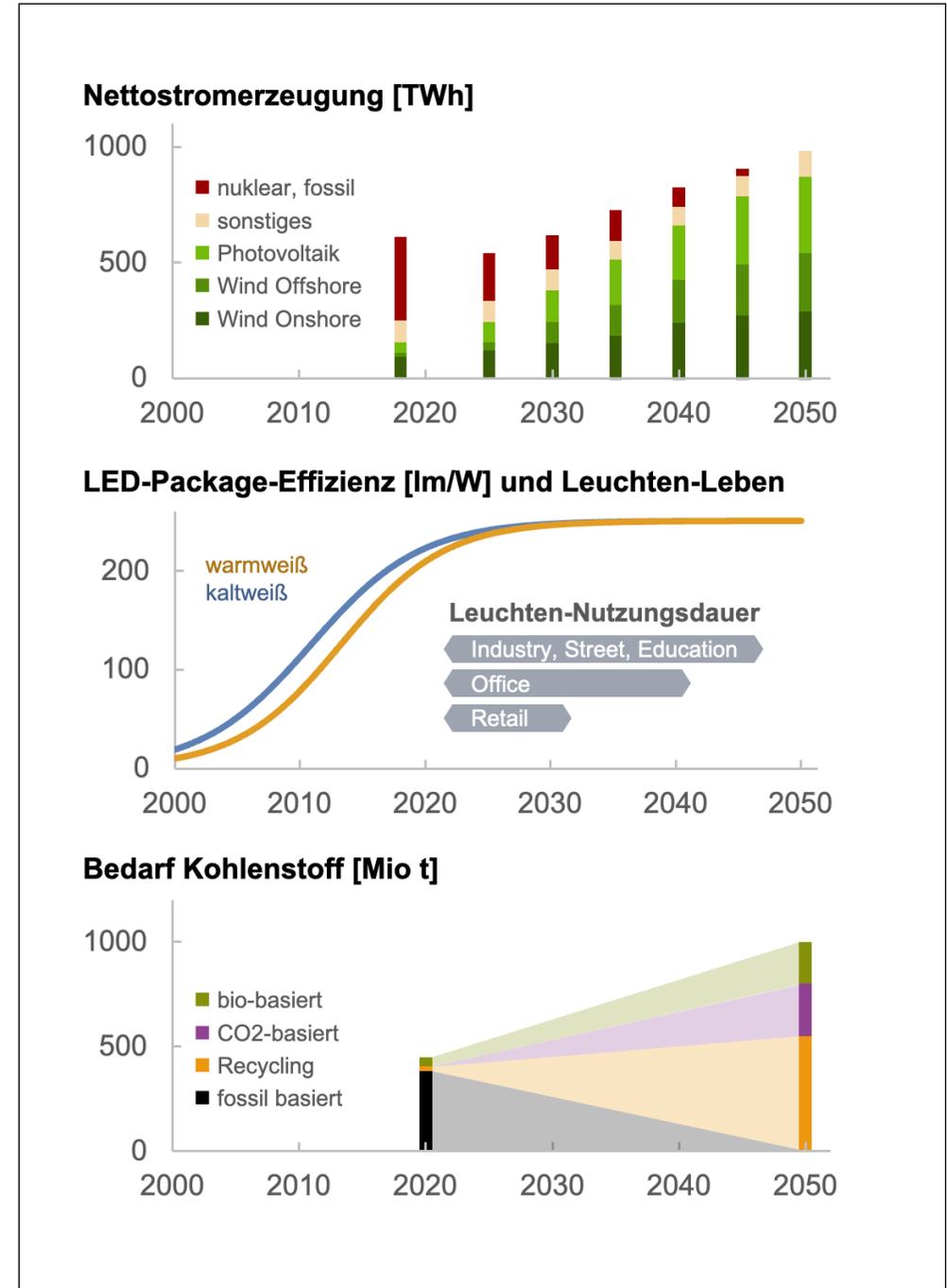
### ENTWICKLUNG DER LED-BELEUCHTUNG

- Die Effizienz ist schon jetzt so gut wie ausgereizt
- Eine jetzt installierte Leuchte wird in einigen Anwendungen so lange leben, bis die Energiewende nahezu komplett vollzogen ist
- Internen Schätzungen zufolge dürften im Jahr 2022 ca. 30% der Leuchten im Feld LED-Leuchten sein
- Wir sollten jetzt möglichst schnell alles auf LED umrüsten, um möglichst viel des aktuell noch fossil erzeugten Stroms einzusparen

### SCHLUSS MIT FOSSILEM KOHLENSTOFF

Chemikalien und daraus abgeleiteter Materialien werden ebenfalls defossiliert Kohlenstoff ist essentieller Bestandteil der Materialien. Er muss künftig auf andere Weise gewonnen werden.

- aus der **Technosphäre (Recycling)**
- aus der **Atmosphäre (CO<sub>2</sub>-capture-and-use Verfahren)**
- aus der **Biosphäre (bio-basierte Rohstoffe)**





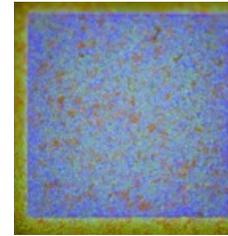
## **ÖKOBILANZEN – MODELLIERUNG EINZELNER TEILE UND PROZESSE**



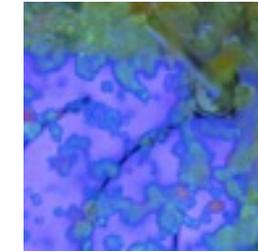
# ÖKOBILANZIERUNG DER LED-MODULE

## HOHE EINSARPOTENZIALE

Besonders kritisch sind LEDs, wenn sie Bonddrähte (Gold-Legierung) enthalten. LEDs mit Bonddraht haben einen 500x höheren abiotischen Ressourcenverbrauch als Flip-Chip LEDs, welche ohne Bonddraht auskommen.



LED mit Flip-Chip (Kontaktierung des Chips von unten)



LED mit Bonddraht zur Kontaktierung (oben rechts)

### Anmerkungen zu den Leiterplatten

- Die bilanzierte Fläche entspricht bei runden Leiterplatten dem umschließenden Quadrat (Verschnitte)
- Die Umweltwirkungen gelten für Leiterplatten aus China (single-sided, FR4, lead-free HAL (SnCu) coating)

### Anmerkungen zu den LEDs

- der hohe abiotische Ressourcenverbrauch wird fast ausschließlich vom Gold im Bonddraht verursacht
- Flip-Chip LEDs (ohne Bonddraht) sind der neuere Stand der Technik, sind vermutlich robuster (da der Bonddraht nicht reißen kann) und mindestens ebenso effizient » bieten nur Nachhaltigkeits-Vorteile

### Fazit zum nachhaltigen LED-Modul-Design

- **Flip-Chip LEDs** haben einen deutlich geringeren abiotischen Ressourcenverbrauch als LEDs mit **Bonddraht**
- Fläche des LED-Moduls ist relevant und sollte möglichst klein gehalten werden

### Beispielhafte Ökobilanzen

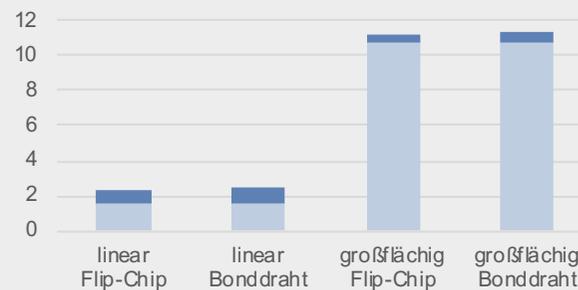
der Herstellung von LED-Modulen

linear:  
71,9 x 2,3 cm mit 96 LEDs

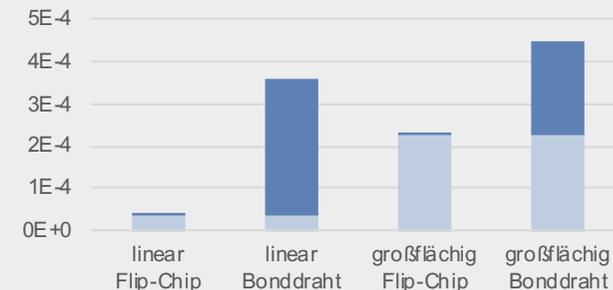
großflächig:  
33,6 cm Durchmesser mit 64 LEDs

- LEDs
- Leiterplatte

GWP [kg CO<sub>2</sub>-eq.]



ADP [kg Sb-eq.]



# EVG - ÖKOBILANZIERUNG DER HERSTELLUNG

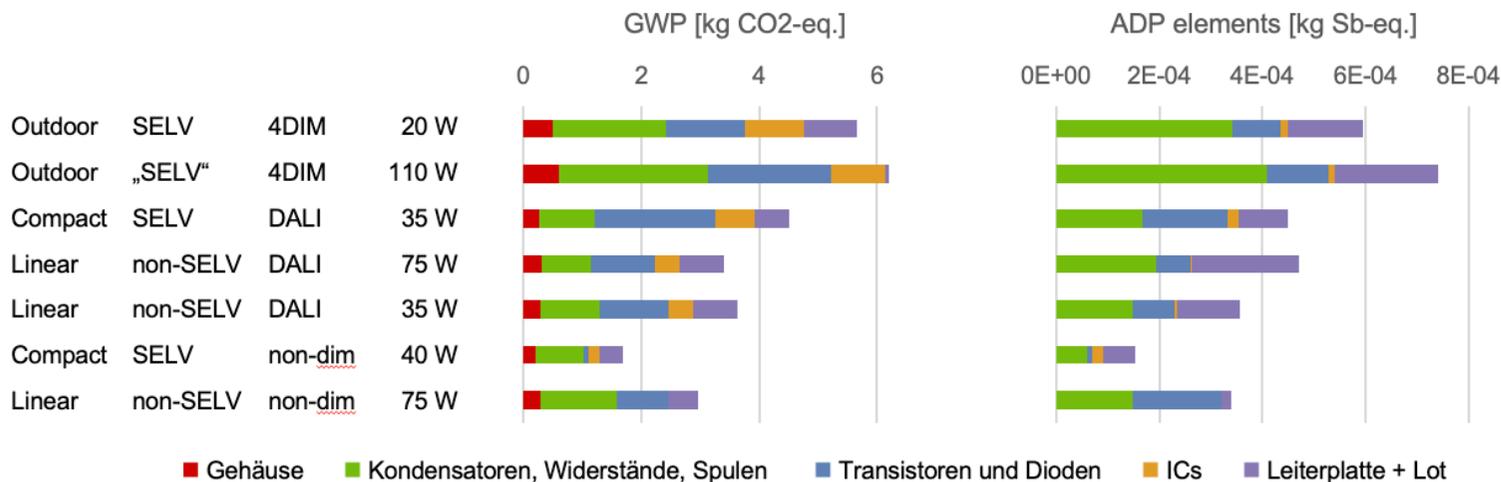
## HÖCHSTER EINFLUSS AUF DAS ADP

Im SUMATRA Projekt wurden 7 EVGs des Konsortialpartners Inventronics bilanziert. Sie wurden so ausgewählt, dass folgende Eigenschaften und ihr Einfluss auf die Ökobilanz verglichen werden können:

- Abhängigkeit von der Leistung
- DALI gegenüber schaltbar
- SELV gegenüber non-SELV

Im Kontext der Gesamt-Leuchte ist vor allem das ADP bedeutsam (siehe Portfolioübersicht).

### ABHÄNGIGKEIT DES GWP und ADP VOM EVG-TYP



# ÖKOBILANZIERUNG UNBEKANNTER EVGS

## EVGS – ZUSAMMENHÄNGE INNERHALB EINER BAUREIHE

### BEKANNTE EVGS ALS BASISWERT NUTZEN

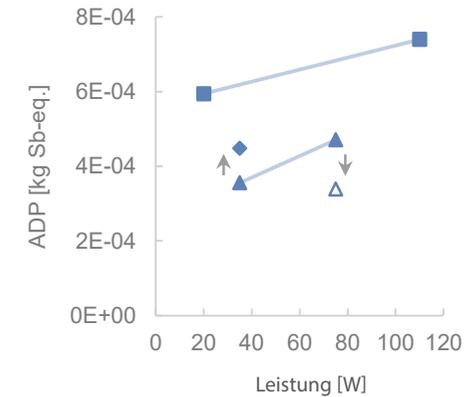
Um die Ökobilanz eines unbekanntes EVGs abzuschätzen, lassen sich die Werte eines bereits bilanzierten EVGs nutzen - vorausgesetzt, es ist einem bekannten EVG sehr ähnlich und unterscheidet sich nur in der elektrischen Leistung oder einem anderen Merkmal. Der Korrekturfaktor lässt sich anhand der Steigungen und Offsets aus den Tabellen bestimmen. Der Wert für das GWP kann im Anschluss aus der Korrelation von GWP und ADP abgeschätzt werden:

$$GWP = ADP \cdot 7934 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq.}}{\text{kg Sb-eq.}} + 0,49 \text{ kg CO}_2\text{-eq.}$$

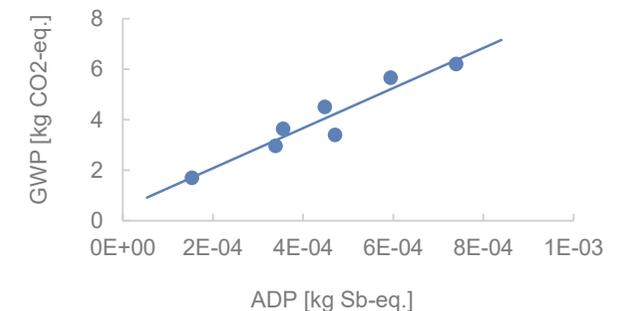
### DIE WICHTIGSTEN ERGEBNISSE

- Je höher die Leistung, desto höher der ADP Wert – dieser Zusammenhang gilt jedoch nur innerhalb einer Baureihe und bei identischen weiteren Merkmalen
- Ein non-dim Gerät spart etwas ADP gegenüber einem DALI Gerät
- Ein SELV Gerät benötigt etwas mehr ADP als ein non-SELV Gerät

### Korrekturfaktoren zur Ökobilanzierung unbekannter EVGs



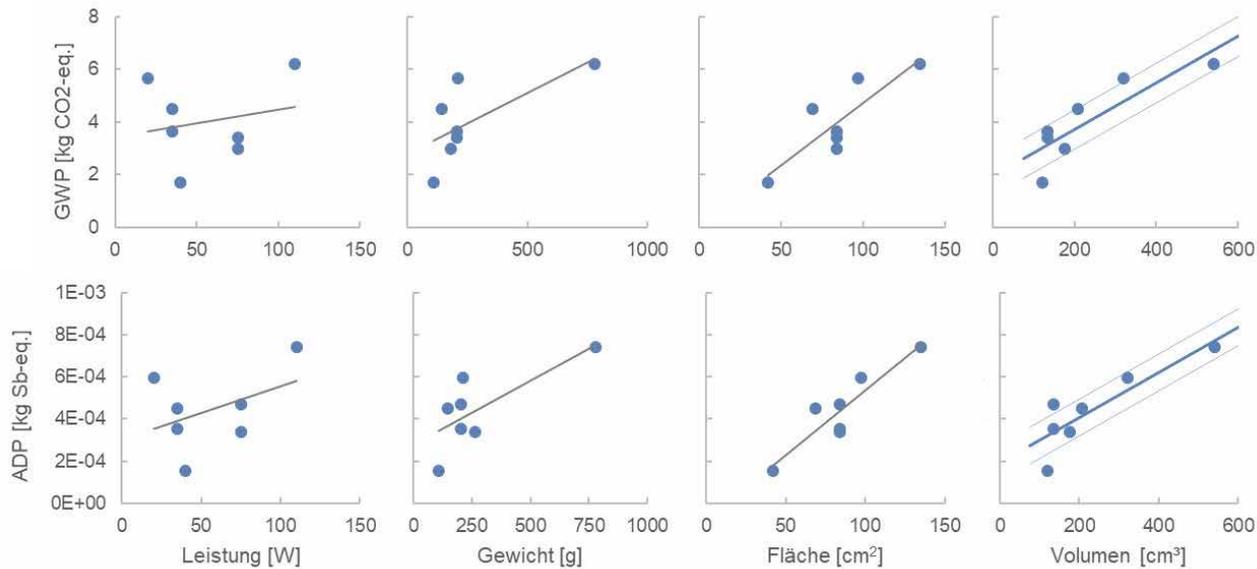
<b>■ Outdoor · 4DIM</b>		
Steigung $\Delta ADP / \Delta P$	1,6e-6	kg Sb-eq. / Watt
<b>▲ Indoor · DALI · non-SELV · linear</b>		
Steigung $\Delta ADP / \Delta P$	2,9e-6	kg Sb-eq. / Watt
<b>Offsets</b>		
DALI → non-dim (△)	- 1,3e-4	kg Sb-eq. (- 28 %)
non-SELV → SELV (◆)	+ 9,3e-5	kg Sb-eq. (+ 26 %)



# LEISTUNG, GEWICHT, FLÄCHE, VOLUMEN

## EVGS – ZUSAMMENHÄNGE INNERHALB EINER BAUREIHE

### ABHÄNGIGKEIT DES GWP und ADP VON UNTERSCHIEDLICHEN VORSCHALTGERÄTEN



Für ein ansonsten unbekanntes Gerät können die Werte für GWP und ADP auf Basis des Volumens  $V$  (in  $\text{cm}^3$ ) des EVGs abgeschätzt werden:

#### Schätzung des GWP

$$GWP = V \cdot 0,0089 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq.}}{\text{cm}^3} + 1,94 \text{ kg CO}_2\text{-eq.}$$

#### Schätzung des ADP elements

$$ADP = V \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg Sb-eq.}}{\text{cm}^3} + 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ kg Sb-eq.}$$

Es ergeben sich root-mean-square Abweichungen von  $\pm 0,75 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$  beziehungsweise  $\pm 8,8\text{e-}5 \text{ kg Sb-eq}$ .

### DIE WICHTIGSTEN ERGEBNISSE

- Keine Korrelation mit der Leistung – hier sind andere Faktoren zu wichtig (EVG-Typ)
- Keine Korrelation mit dem Gewicht – Faktoren wie Vergussmasse oder Gehäuse sind hier ausschlaggebender
- passable Korrelationen für Fläche und Volumen – plausibler ist das Volumen, da das Volumen meist einfach vom größten Bauteil (Spule, Kondensator) bestimmt wird und damit ein Indikator für die insgesamt Materialmenge ist

# EVGS – EIN ÜBERBLICK

## FAZIT ZUM NACHHALTIGEN EVG-DESIGN

### MINIMALE VERLUSTLEITUNG

Energieeffizienz ist der wichtigste Stellhebel zur Reduktion des GWP. Verbesserungen rechnen sich in der Total Cost of Ownership.

- Bsp.-EVG mit 100 W: bei nur 0,5% Effizienz-Verbesserung ergeben sich 50 kWh Energieeinsparung nach 100.000 h

### STRATEGIEN

- Verzichte auf die Antiglow-Schaltung im EVG, setze stattdessen Widerstände auf dem LED-Modul ein (ca. 1%-Punkt Effizienzverbesserung im EVG)
- Nutzung hoher Sekundärspannungen (da Verluste  $\sim I^2$ )
- Wähle optimalen Arbeitspunkt (in der Kombination LEDM/EVG), ansonsten werden bis zu 8% Effizienz verschenkt
- Reduziere den Standby-Verbrauch von DALI-EVGs so weit wie möglich (EU-Vorgabe ist 500 mW)
- Setze bei Bedarf dimmbare EVGs ein, damit die Leuchten mit einem Lichtmanagement betrieben werden können.

### MATERIALEFFIZIENZ

Der Betrieb mehrerer Leuchten an einem EVG reduziert Materialaufwand und Kosten durch eingesparte EVGs

- ADP und Kosten sind unterproportional zur EVG-Leistung

### GEHÄUSE

- Alu- und Stahlblech haben ähnliches ADP
- Wenn das Gehäuse weggelassen werden kann, ergibt dies vor allem einen Kostenvorteil (kaum Vorteile für GWP/ADP)
- Nutze recycelten Kunststoff

### KOMPONENTEN

- bei Spulen, Transistoren, ICs gilt: je kleiner, desto geringer ist das ADP
- Kondensatoren können platinhaltig sein (hohes ADP)
- Leiterplatten: Surface Finish HAL Pb-free ist am besten. Je weniger Lagen, desto besser. ADP proportional zur Fläche.
- Vermeidung von giftigen Stoffen, z.B. mittels halogenfreier Leiterplatten und Bauteilen, die intern ohne bleihaltiges Hochtemperaturlot auskommen



# MODELLIERUNG DER NUTZUNGSPHASE EINER LEUCHE

## GRUNDANNAHMEN ZUR BILANZIERUNG

Um den ökologischen Einfluss einer Leuchte während der Nutzungsphase zu ermitteln und um eine Vergleichbarkeit sicherzustellen, werden verschiedene Rahmenbedingungen als Baseline definiert.

### STROMMIX

Vorausgesetzt wird ein konstanter Strommix (Deutschland 2019), mit GWP 0,452 kg CO<sub>2</sub>-eq. / kWh und ADP 2,95 · 10<sup>-2</sup> kg Sb-eq. / kWh

### DIMMLEVEL

Für den Betrieb der Leuchte wird ein Dimmlevel von 100 Prozent angenommen.

### NUTZUNGSDAUER

Zur Berechnung wird die Nutzung der Leuchte über die gesamte Lebensdauer postuliert (vom Hersteller angegebene Bemessungslebensdauer). Die unten stehende Tabelle zeigt, was das für verschiedene Applikationen und Einsatzszenarien bedeutet.

#### jährliche Standard-Nutzungsstunden

Office	Industry	Retail	24/7
2.500 h/a	4.000 h/a	5.000 h/a	8.760 h/a

Leuchten- Lebensdauer	maximal mögliche Nutzungsdauer (Jahre)			
	2.500 h/a	4.000 h/a	5.000 h/a	8.760 h/a
50.000 h	20 a	12,5 a	10 a	5,7 a
70.000 h	28 a	17,5 a	14 a	8,0 a
100.000 h	40 a	25 a	20 a	11,4 a

# ENTWICKLUNG BIS 2040

## MODELLIERUNG DER NUTZUNGSPHASE EINER LEUCHTE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER ENERGIEWENDE

Wie wirkt sich die Energiewende in den kommenden Jahren auf die Ökobilanz einer Leuchte aus? Berechnet wurden die Umweltwirkungen anhand einer 2020 in Betrieb genommenen Referenzleuchte nach den Annahmen auf Seite 28)

### Beispiel

Umweltwirkungen durch den Stromverbrauch beim Betrieb einer Leuchte in Deutschland

- 47 W elektrische Leistung
- 4.000 h/a über 17,5 Jahre, beginnend mit 2020
- insgesamt 70.000 h

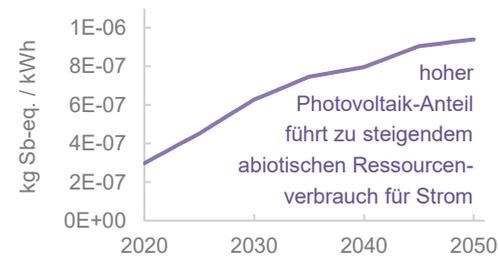
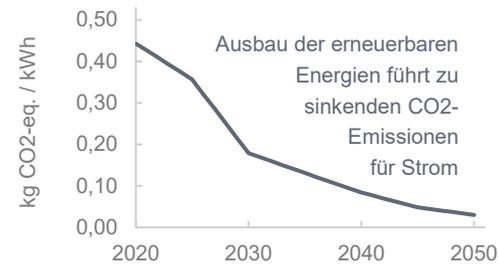
grau: Global Warming Potential

violett: Abiotic Depletion Potential

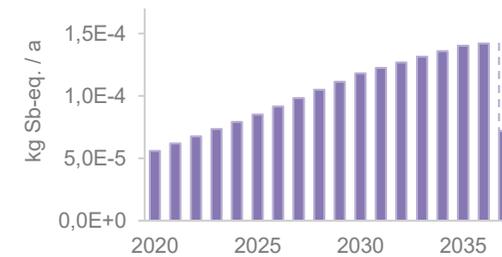
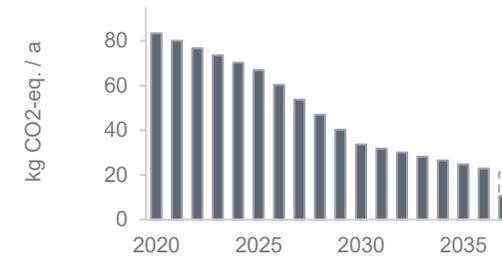
### Ergebnis

- GWP = 861 kg CO<sub>2</sub>-eq.
- ADP = 1,8 · 10<sup>-3</sup> kg Sb-eq.

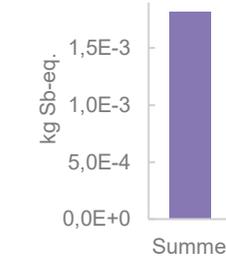
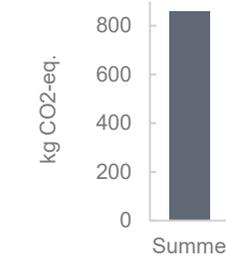
### Umweltwirkung pro kWh der Stromerzeugung



### jährliche Umweltwirkung durch die Nutzung der Leuchte



### Summe der Nutzungsphase



### DIE WICHTIGSTEN ERGEBNISSE

- Der Ausbau der erneuerbaren Energien führt zu sinkenden CO<sub>2</sub>-Emissionen für Strom
- Ein hoher Photovoltaik-Anteil führt zu steigendem abiotischen Ressourcenverbrauch für Strom

# PRODUKTION UND NUTZUNG

## ÖKOBILANZEN PORTFOLIOÜBERSICHT – ABSOLUTWERTE

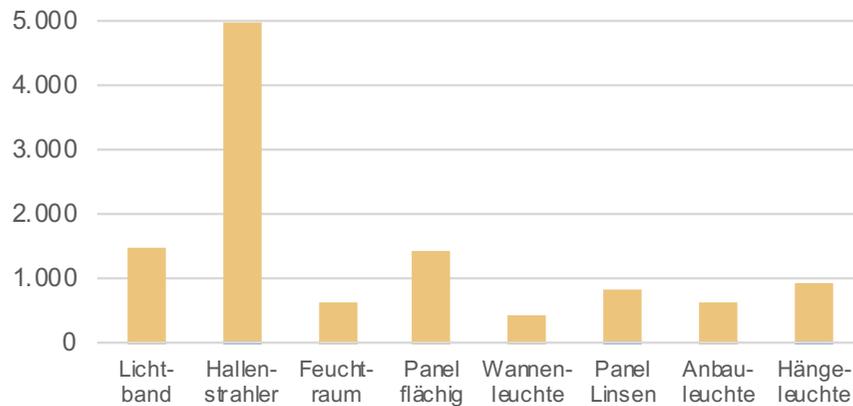
Abb. 1 zeigt die Ergebnisse der Ökobilanz für die **Produktion** der Leuchte sowie die **Nutzung** über die gesamte Lebensdauer der Leuchte - immer im Bezug auf die jeweilige Applikation.

- Dargestellt sind die Absolutwerte. Beim ADP wird die Verpackung nicht dargestellt, da ihre Produktion < 0,05 % Anteil hat.
- Die Nutzungsphase wird mit statischem Strommix (Deutschland 2019) und Betrieb bei 100% Dimmlevel modelliert.
- Der Hallenstrahler sticht besonders hervor. Dies liegt beim GWP vor allem an der hohen Leistung (157 W) und beim ADP an der hohen Zahl LEDs (600 Stück). Dafür erhält man auch sehr viel Licht (26.700 lm und 70.000 h Lebensdauer).



### Global Warming Potential

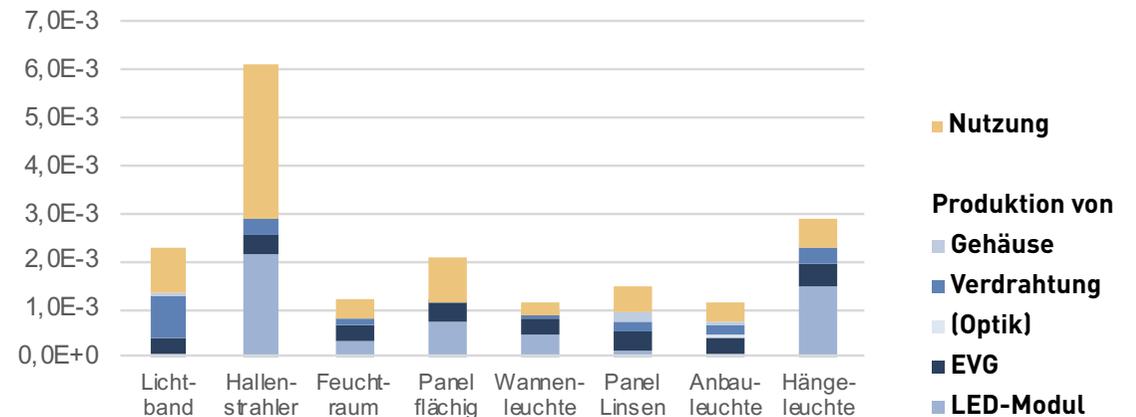
kg CO<sub>2</sub>-eq. (Absolutwerte)



Das GWP reicht von 470 bis 5.000 kg CO<sub>2</sub>-äquivalent.  
Die Produktionsphase macht nur 1 – 5 % aus.)

### Abiotic Depletion Potential

kg Sb-eq. (Absolutwerte)



Das ADP reicht von  $1,1 \cdot 10^{-3}$  bis  $6,1 \cdot 10^{-3}$  kg Antimon-äquivalent.  
Die Produktionsphase macht 47 – 79 % aus.

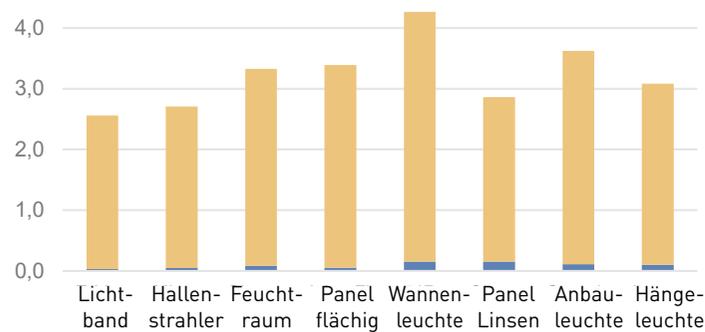
# VERGLEICHBARKEIT HERSTELLEN

## ÖKOBILANZEN PORTFOLIOÜBERSICHT – NORMIERT

Durch die Normierung der Ergebnisse aus den Ökobilanzen lassen sich die Leuchten aus verschiedenen Applikationen objektiv miteinander vergleichen. In den folgenden Abbildungen wurden die Werte auf 1.000 lm Lichtstrom und 1.000 Stunden Nutzungsdauer normiert.

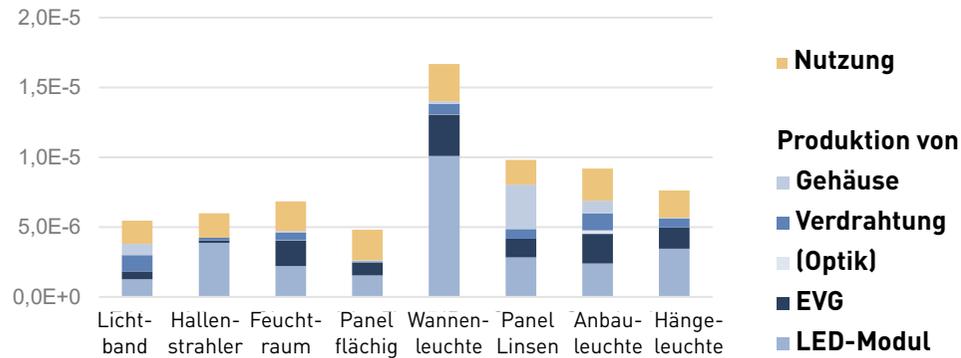
### Global Warming Potential

kg CO<sub>2</sub>-eq. pro 1.000 lm x 1.000 h



### Abiotic Depletion Potential

kg Sb-eq. pro 1.000 lm x 1.000 h



### DIE WICHTIGSTEN ERGEBNISSE

- Beim GWP liegen die Leuchten aufgrund ähnlicher Lichtausbeute nah beieinander.
- Beim ADP fällt nun die Wannenleuchte auf, wo für relativ wenig Licht (2.200 lm) ein sehr großes LED-Modul (33 cm Durchmesser) eingesetzt wird.

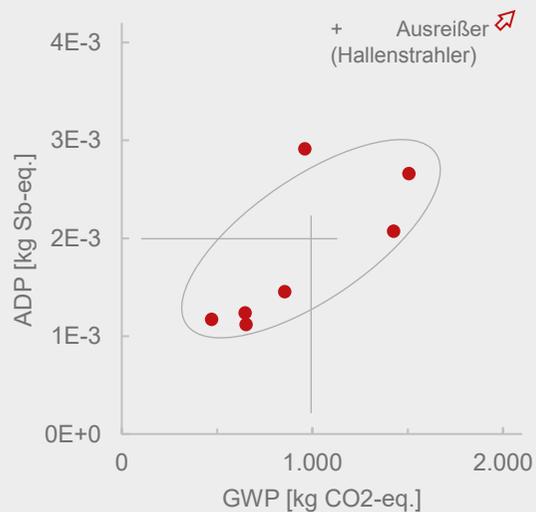
# ADP ODER GWP - WAS IST WICHTIGER?

## RELEVANZ IM VERGLEICH ZUR JÄHRLICHEN GLOBALEN UMWELTWIRKUNG

Die Frage, ob das von der Beleuchtung verursachte Treibhauspotential oder der abiotische Ressourcenverbrauch „wichtiger“ ist, lässt sich nicht objektiv beantworten. Ein Gefühl liefert der Vergleich mit Normierungsfaktoren (NF).

### GWP UND ADP

Darstellung des Global Warming Potentials und Abiotic Depletion Potentials für das analysierte Leuchten-Portfolio (ohne Hallenstrahler). Für die Definition einer „repräsentativen Leuchte“ bieten sich 1.000 kg CO<sub>2</sub>-eq. und 0,002 kg Sb-eq. als glatte Werte an (Nutzung über die gesamte Leuchtenlebensdauer mit Strommix DE 2019).



### NORMIERUNGSFAKTOREN

Die Normierungsfaktoren NF werden von der EU für die Bewertung von Environmental Footprints empfohlen und beschreiben die globale Umweltwirkung aller menschlichen Aktivitäten (ermittelt für 2010), pro Kopf und pro Jahr. [JRC 2022].

	eine LED-Leuchte	NF	Anteil
<b>GWP</b> [kg CO <sub>2</sub> -eq.]	1.000	7.550 (pro Person)	13 %
<b>ADP</b> [kg Sb-eq.]	2·10 <sup>-3</sup>	6,36·10 <sup>-2</sup> (pro Person)	3 %

} GWP und ADP sind beide ähnlich bedeutsam (in der gleichen Größenordnung)

Darüber hinaus ist bekannt, dass Beleuchtung 12,9% des gesamten deutschen Stromverbrauchs ausmacht [AG Energiebilanzen, Datenbestand 2021], und damit auch einen nicht zu vernachlässigenden Teil der energiebedingten Treibhausgasemissionen Deutschlands. Wir müssen den Beitrag von Beleuchtung also ernst nehmen.

Fazit: Das Treibhauspotential und der abiotische Ressourcenverbrauch durch Beleuchtung sind beide bedeutsam.



## RECYCLING

# KLÄRUNG DER BEGRIFFE

## DEFINITION RECYCLING

**Recycling ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.**

[Kreislaufwirtschaftsgesetz, §3 (25)]

Verwertung		Beseitigung
<b>stoffliche Verwertung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wiederverwendung</li> <li>• Recycling</li> <li>• Verfüllung</li> </ul>	<b>energetische Verwert.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbrennung</li> <li>• Aufbereitung zu Brennstoff</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deponien</li> <li>• Einleitung in Gewässer</li> <li>• Dauerlagerung (siehe Atommüll)</li> <li>• ...</li> </ul>

### ABGRENZUNG ZWISCHEN VERWERTUNG UND BESEITIGUNG

Verwertung ist jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die Abfälle einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären.

Beseitigung ist jedes Verfahren, das keine Verwertung ist, auch wenn das Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden.

# THEORETISCH REICHT NICHT ANNÄHERUNG AN DEN BEGRIFF RECYCLINGFÄHIGKEIT

## WISSENSCHAFTLICHE DIFFERENZIERUNG

Prof. Roland Pomberger unterscheidet in seinem Artikel „Über theoretische und reale Recyclingfähigkeit (2020)“ zwischen

- theoretische Recyclingfähigkeit (des Werkstoffs an sich)
- technische Recyclingfähigkeit: der Werkstoff muss auch getrennt, erkannt und ausgeschleust werden können
- reale Recyclingfähigkeit: berücksichtigt Sammelsystem, regionales Vorhandensein von Sortieranlagen, reale Verschmutzung

## REFERENZ-SZENARIO ERSTELLEN

Die europäische Norm EN 45555 (General methods for assessing the recyclability and recoverability of energy-related products) beschreibt die Recyclingfähigkeit von energieverbrauchsrelevanten Produkten. Sie ist eigentlich nicht direkt zur Produktbewertung anwendbar, sondern ein Verfahren um produktspezifische Regeln zu erarbeiten. Erforderlich dafür ist ein repräsentatives Referenz-Szenario der End-of-Life Behandlung und Abschätzung der Materialverluste in jedem Schritt des Prozesses. Dieses Verfahren wurde für Smartphones durchgeführt und in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben, u.a. am Fraunhofer IZM durch Schischke et al. (2022).

## INFRASTRUKTUR BELEGEN

Auch die DIN EN ISO 14021 (Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Umweltbezogene Anbietererklärungen) fordert, dass bei Aussagen über die Recyclingfähigkeit von Produkten auch Nachweise über vorhandene Sammel-, Sortier- und Transportsystemen und deren Nutzung zu erbringen sind.

## FAZIT

Normen und Literatur sind sich einig: Eine Bewertung der theoretischen Recyclingfähigkeit des Werkstoffs an sich ist nicht ausreichend. Auch Schwachstellen im Prozess müssen mitkommuniziert werden.

# FEUCHTRAUMLEUCHE

Länge **1,2 m** | Gewicht **2,3 kg** | Gehäuse **Polycarbonat grau** | Optik **Polycarbonat klar**



Eisenmetalle



Leiterplatten & Nichteisenmetalle



Kunststoff



Reste



# STRASSENLEUCHE

Gewicht **17,2 kg** | Gehäuse **Alu Druckguss** | Optik **PMMA-Linse + Glasscheibe**

Eisenmetalle

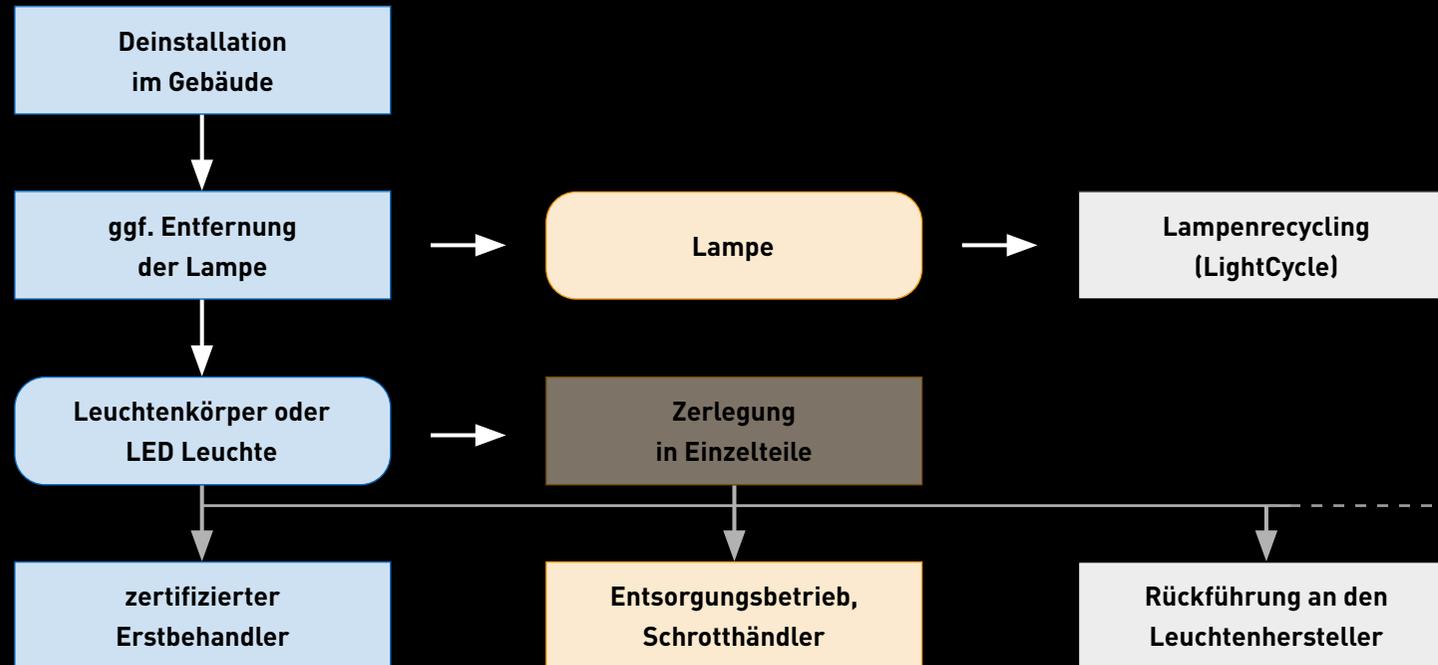
Nichteisenmetalle

Reste



# PROZESS UND ZUSTÄNDIGKEITEN

## WEGE EINER LEUCHE IN DIE RECYCLING-BETRIEBE



- rechtlich einwandfreier Weg
- Erstbehandler registriert die Geräte (Gewicht) und meldet an die Stiftung EAR
- trägt zur Erfüllung der Sammelquote bei
- kann über Dienstleister organisiert werden (Container-Gestellung, Logistik)

- über diesen Weg kann der Installateur ggf. noch ein wenig Geld für den Schrott hinzuverdienen (grau gezeichneter Pfad)
- Umgehung der Erstbehandlung umgeht auch die Registrierung als separat gesammelte Altgeräte
- werthaltige Komponenten landen korrekt im Recycling

- rechtlich möglich, wenn der Hersteller sich als Erstbehandler zertifizieren lässt
- Beispiel WIL0 (für Heizungspumpen)

### Anmerkungen zum Recycling-Prozess

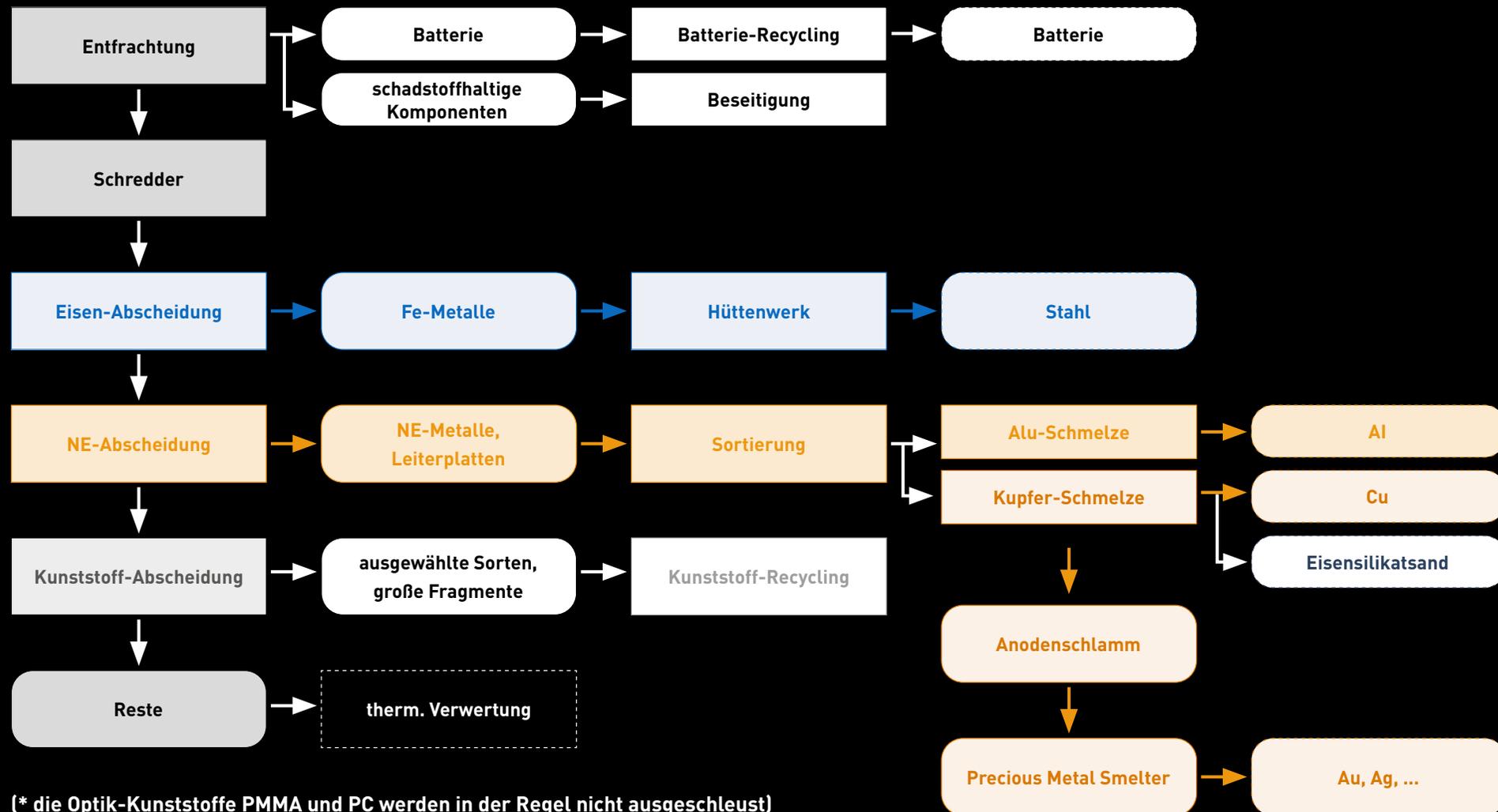
Bei der Erstbehandlung erfolgt zunächst eine Entfrachtung von Schadstoffen. Dies können bei Leuchten vor allem Batterien (Notleuchten) oder PCB-haltige Kondensatoren (bei Leuchtstofflampen) sein.

Im Recyclingprozess ist die strittigste Frage, ob Kunststoff (bei Leuchten vor allem PC, PMMA) ausgeschleust und recycelt wird oder nicht. Unser Schredder-Test lieferte keine nennenswerten Mengen separat sortierten Kunststoffs. Rückmeldungen von Interzero, LightCycle und aus dem Plenum bei Lighting-Europe (21.02.2023) sprechen ebenfalls davon, dass Kunststoff in der Regel thermisch verwertet wird.

Die genannten Gründe dafür sind einerseits mögliche Kontaminationen mit bromierten Flammschutzmitteln (wodurch eine ganze Charge unbrauchbar wird). Außerdem kommen PC und PMMA im gesamten Strom der Elektroklein- und -großgeräte in relativ geringen Mengen vor.

# VORGESCHLAGENES REFERENCE END-OF-LIFE TREATMENT SCENARIO FÜR RECYCLINGFÄHIGKEITSBEWERTUNGEN IN ANLEHNUNG AN EN 45555

Mit einem sogenannten Referenzszenario zur Behandlung eines Produktes an seinem Lebensende lassen sich detaillierte Aussagen zum Recycling der verschiedenen Ressourcen und Stoffgruppen treffen.





## MINDEST-ANFORDERUNG NACH WEEE UND ELEKTROG

Das ElektroG (Elektro- und Elektronikgerätegesetz) setzt die europäische WEEE-Richtlinie (Waste of Electrical and Electronic Equipment) 2012/19/EU in deutsches Recht um



**Im ElektroG sind einige Mindest-Anforderungen an das Recycling festgeschrieben:**

- Mindest-Anforderung an die selektive Behandlung von Bauteilen aus Elektro-Altgeräten nach WEEE Annex 7
- Leiterplatten über 10 cm<sup>2</sup> (\*)
- Kunststoff mit bromiertem Flammenschutz
- Gasentladungslampen
- Batterien
- externe elektrische Leitungen
- PCB-haltige Kondensatoren

(\* bei Leiterplatten wird dies praktisch durch Schreddern und Aussortieren erledigt – bei Batterien wäre das hingegen hochgefährlich)

# METALLE WERDEN BESSER RECYCELT ALS KUNSTSTOFFE

## BERECHNUNG ANHAND VON STANDARD-WERTEN FÜR RECYCLINGRATEN

Spezifische Informationen zu Recyclingraten von Materialien im Elektroschrott sind in der IEC / TR 62635:2012 angegeben, differenziert zwischen manueller Zerlegung und Schreddern mit anschließender Sortierung. Angaben in Gewichts-%.

**FAZIT: Die relevanten Metalle werden mit hohen Raten recycelt. Die bei Leuchten relevanten Kunststoffe (PMMA, PC) werden nach dem Schreddern nicht recycelt.**

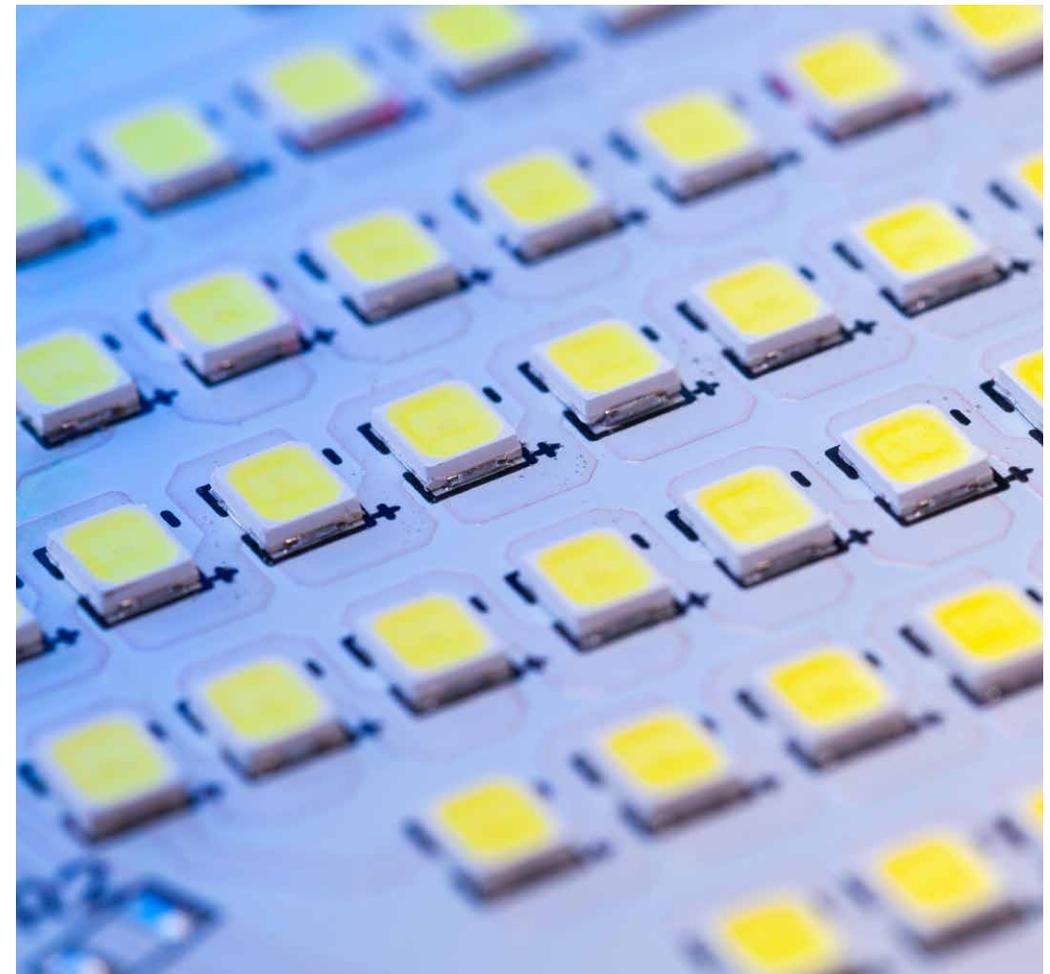
Material	Recycling-Rate	
	manuelle Zerlegung	schreddern
ABS	94 %	74 %
ABS mit Additiven	94 %	0 %
PP	94 %	90 %
PP + EPDM	94 %	90 %
PP + Glasfasern	94 %	90 %
PP + Naturfasern	0 %	0 %
PP mit anderen Additiven	94 %	0 %
HIPS	94 %	83 %
HIPS mit Additiven	94 %	0 %
PE	94 %	90 %
SAN	94 %	0 %
PC mit oder ohne Additive	94 %	0 %
ABS-PC Blend	94 %	0 %
PA, PA-6 mit oder ohne Additive	94 %	0 %
andere Polymere	0 %	0 %
Stahl	95 %	94 %
Aluminium	95 %	91 %
Kupfer	95 %	85 %
andere Metalle	95 %	70 %

### Repräsentativität der Daten

**Produktgruppen:** Haushaltsklein- und -großgeräte, IT- und Telekommunikationsgeräte, Unterhaltungselektronik

**Geografisch:** Europa

**Zeitlich:** bis 2013 (Datenermittlung war 2005 – 2008)



## DIE KUPFER-SCHMELZE: RECYCLING VON LED-MODULEN UND VORSCHALTGERÄTEN

Elektronik-Komponenten werden in der Kupfer-Schmelze recycelt und in einer Elektrolyse verfeinert. Als Nebenprodukt entsteht ein Anodenschlamm, aus welchem Edelmetalle wiedergewonnen werden.

Die Schmelze wird gefüllt mit

- Kupferschrott, Leiterplatten
  - Eisenschrott als Reduktionsmittel
  - Sand
- } ergibt große Mengen  
} Eisensilikatsand

Stahl- und Alu-Bestandteile gehen in die Schlacke, welche als Eisensilikatsand z.B. für das Baugewerbe vermarktet wird und somit als Recyclingprodukt zählt. Für eine stoffspezifische Nutzung gehen Stahl und Alu hier jedoch verloren, daher zählen wir sie im Folgenden nicht zur Ausbeute des Recyclings.

Organische Bestandteile (Kunststoff, Leiterplattensubstrate) dienen im Ofen als Brennstoff und sind für den CO<sub>2</sub>-Handel des Betriebs relevant.

### Übersicht Recycling-Raten

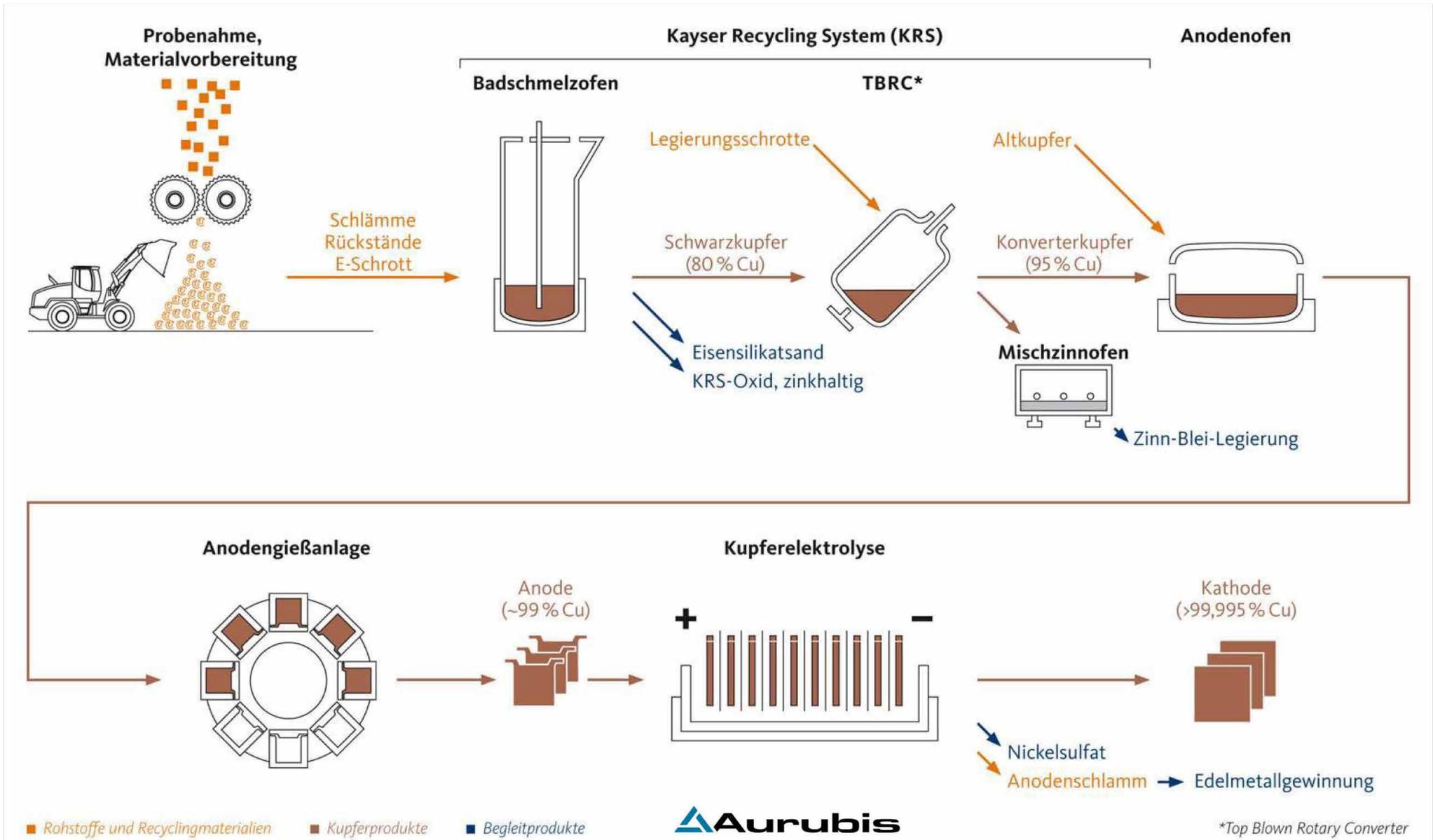
in der Kupfer-Schmelze bei Aurubis, Lünen  
Angaben in Gewichts-%.

Metall	Recycling-Rate
Kupfer	> 90 %
Silber	> 90 %
Gold	> 90 %
Palladium	> 90 %
Blei	> 90 %
Zinn	> 75 %
Nickel	> 90 %
Antimon	> 80 %

[Chancerel & Marwede, Feasibility study for setting-up reference values to support the calculation of recyclability/recoverability rates of electr(on)ic products, JRC technical reports (2016)]



# RECYCLING VON LED-MODULEN



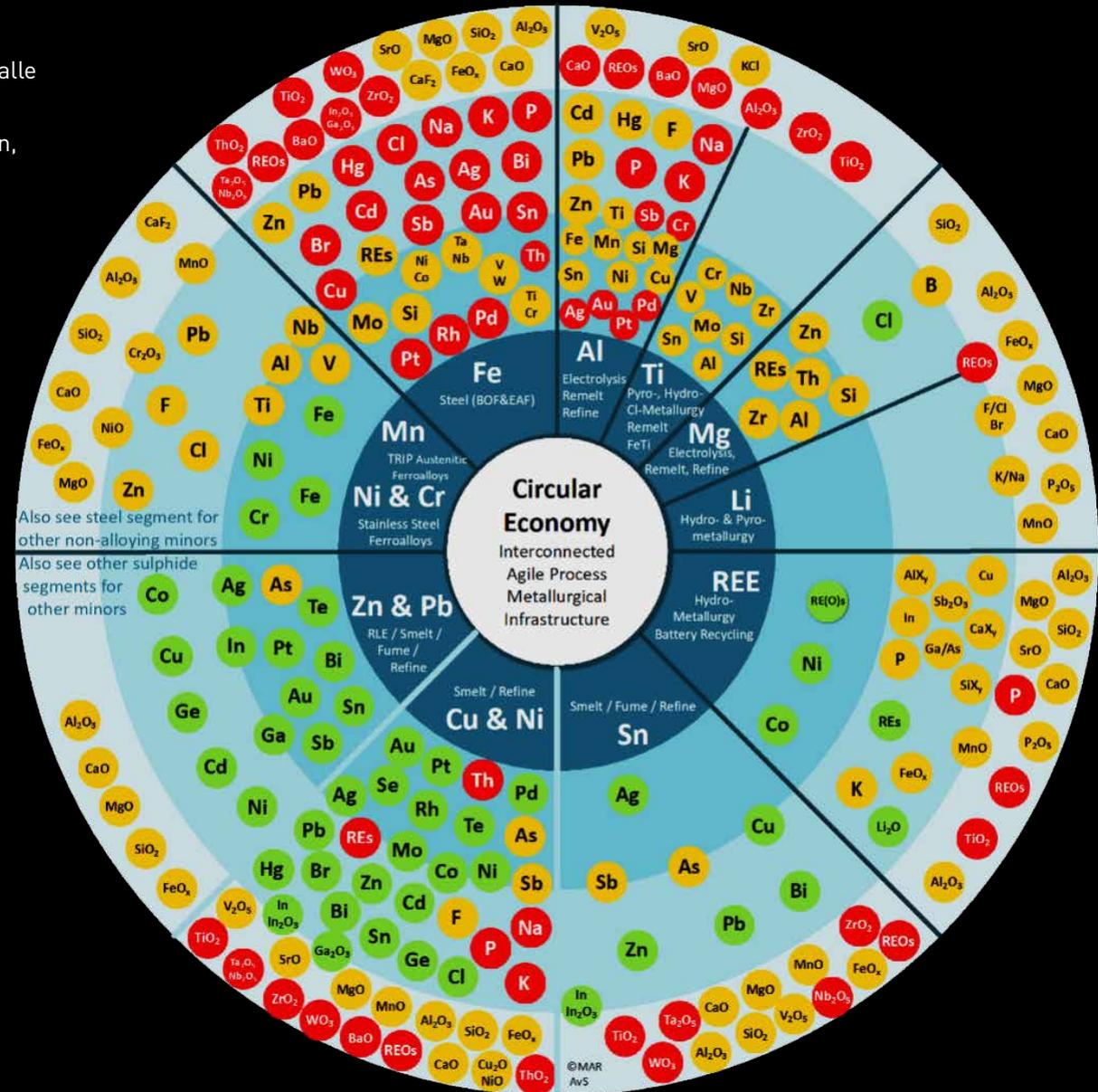


# TRENNEN, SCHMELZEN, NUTZEN

## WEITERE METALL-SCHMELZEN UND DAS „METALLRAD“

Im Recyclingsystem gibt es noch weitere Schmelzen für andere Basismetalle (Sektoren des Metallrads). Welche Metalle in welchen Schmelzen wiedergewonnen werden, verloren gehen, oder gar zu Qualitätsproblemen führen, zeigt das Metallrad. Hier kann man ablesen:

- Alu und Eisen gehen in der Kupfer-Schmelze verloren (in die Schlacke, äußerster Ring, in oxidiert Form FeO<sub>x</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- Kupfer und Edelmetalle gehen in der Eisen- oder Kupfer-Schmelze verloren oder verunreinigen diese sogar: „Kupfer ist Gift im Eisen-Recycling“.



### FAZIT

Leuchtenkörper sollten in kompatible Fraktionen (gem. Metallrad) aufgetrennt werden können, sonst gehen sie für eine stoffspezifische Weiternutzung verloren.

- in der Metallphase
- in Schlacke/Flugstaub, Aufbereitung möglich
- in Schlacke/Flugstaub
- rückgewinnbare Elemente
- nicht separierbar, verbleibt als funktioneller Bestandteil
- nicht separierbar, qualitätsmindernd für das Hauptmetall

# PRAKTISCHE ERGEBNISSE

## RECYCLING VON LED-MODULEN

Beim korrekten Recycling landen LED-Module in der Kupferschmelze.  
Die größte Masse macht das Leiterplattensubstrat aus. Hier gibt es zwei Fälle:

- Organik Substrat (z.B. FR4, CEM3) verbrennt in der Kupferschmelze
- Alu-Kern Leiterplatte: Das Substrat ist nicht von Leiterbahnen und Bauteilen zu trennen und oxidiert in der Kupferschmelze (dient als Reduktionsmittel und landet in der Schlacke). Trotz der großen Alu-Menge sollten Alu-Kern Leiterplatten nicht in der Alu-Schmelze verwertet werden, da das eingeschleppte Kupfer Gift für die Alu-Schmelze ist. Außerdem werden in der Kupfer-Schmelze die knapperen Metalle (gemäß ADP elements) wiedergewonnen

### Emissionsfaktoren für Transporte und Fahrten

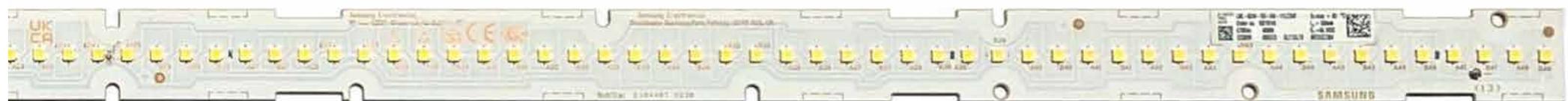
LED-Modul	Recycling-Rate $R_{cyc}$
CEM3 Substrat (731x22 mm) mit 96 Mid-power LEDs	11 %
Alu-Substrat (147x45 mm) mit 12 High-power LEDs	8 %

$R_{cyc}$  ist der Gewichtsanteil der Recycling-Ausbeute am Gewicht des Moduls.



### ERKENNTNISSE AUS DEN DETAILLIERTEN BEWERTUNGEN:

- Es wird nur ein kleiner Teil der Masse recycelt, dies sind jedoch die Metalle mit dem größten ADP elements Beitrag.
- Aufbringung von Leiterbahnen und LEDs auf Alu oder direkt auf Stahlblech verhindert das Recycling des Alus bzw. Stahls.
- Ergebnisse von 8-11 % sind noch geringer als die Standardwerte für arm bestückte Leiterplatten aus der IEC TR62635:2012



# PRAKTISCHE ERGEBNISSE

## RECYCLING VON VORSCHALTGERÄTEN

Es wurden zwei Szenarien betrachtet, von denen aktuell nicht eingeschätzt werden kann, welches realistischer ist:

- 1) Gehäuse und Leiterplatte werden im Schredderprozess separiert und einer getrennten Verwertung zugeführt
- 2) Das EVG geht ohne Separierung komplett in die Kupfer-Schmelze, das Gehäuse verbrennt als Reduktionsmittel

Vorschaltgerät	R <sub>cyc</sub> mit Separierung von Gehäuse und PCB	R <sub>cyc</sub> ohne Separierung
Outdoor	unmöglich	12 %
Compact	15 %	14 %
Linear DALI	50 %	13 %
Linear non-dim	59 %	15 %

Angaben in Gewichts-%



**Pauschale Werte**  
für die weitere Verwendung

Outdoor EVG	12 %
EVG (Kunststoff)	15 %
EVG (Blech)	55 %

### ERKENNTNISSE AUS DEN DETAILLIERTEN BEWERTUNGEN

- Die wesentlichen Recycling-Gewichtsanteile stammen vom Gehäuse (sofern Blech) und vom Kupfer.
- Bei EVGs mit Kunststoffgehäusen (Outdoor, Compact) wird das Gehäuse nicht recycelt, was zu geringen Recyclingraten von 12-15% führt. Eine Vergussmasse verhindert eine Separierung von Gehäuse und Leiterplatte definitiv.
- EVGs mit Blechgehäusen erreichen Recyclingraten  $\geq 50\%$ , wenn Gehäuse und Leiterplatte einfach separierbar sind, d.h. wenn sie sich schon im Schredder voneinander trennen.

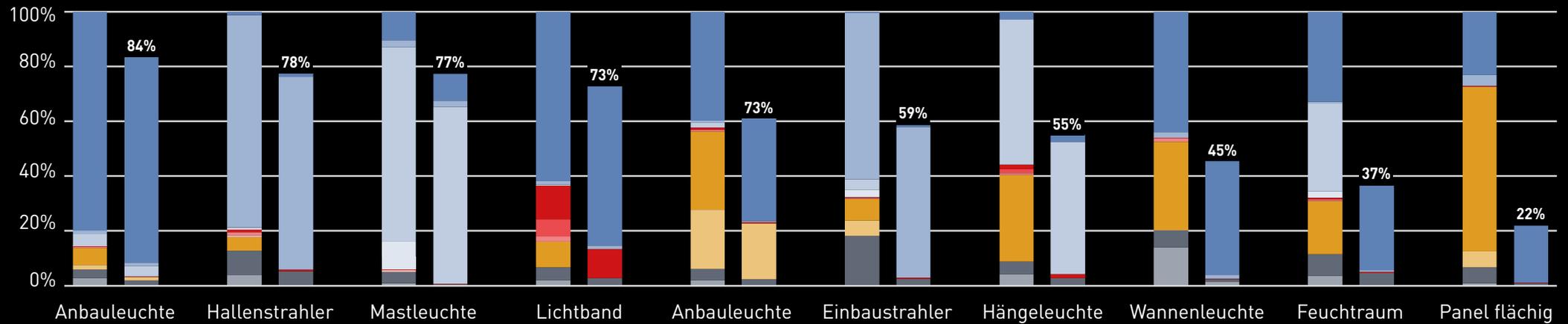


# VERLUSTRECHNUNG

## WAS NACH DEM RECYCLING ÜBRIGBLEIBT

Die linke Säule zeigt die Gewichts-Zusammensetzung der Leuchte im Neuzustand, und die rechte Säule zeigt, was nach dem Recycling davon übrig bleibt.

Mechanik ■ ■ ■      Optik ■ ■ ■  
 Verdrahtung ■ ■ ■      Elektronik ■ ■ ■



■ PMMAOptik



■ PC-Optik



■ Glasscheibe  
 ■ EVG, vergossen



■ Leitungs-Isolierung  
 ■ PMMA Optik



■ PMMA Teile der Optik



■ PC-Optik, relativ schweres EVG



■ PMMAOptik



■ PMMA Wanne  
 ■ großes LED-Modul



■ Gehäuseteil und Optik aus PC



■ relativ schwere PMMA Scheiben

# DIE GÄNGIGE PRAXIS

## RECYCLING VON KUNSTSTOFF NACH DEM END OF LIFE

Nach dem heutigen Stand der Technik wird der Kunststoff aus LED-Leuchten verbrannt

- weil es in zu geringen Mengen im allgemeinen Strom von Elektroschrott vorkommt (PC und PMMA)
- weil es mit Flammschutzmitteln belastet sein könnte

### FAZIT

Es ist unsicher, welche Recycling-Technologien in 20 Jahren Stand der Technik sind, und welche Stoffe dann verboten sein werden. Selbst bei sortenreiner Trennung von Leuchtenwannen oder -gehäusen gibt es noch genug Herausforderungen beim Recycling:

transparentes PC – vergilbt



graues PC – verschmutzt und mit Anhaftungen



weißes PMMA – verschmutzt mit Staub und Wandfarbe



# SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR EINE RECYCLING-GERECHTE LEUCHTENKONSTRUKTION

## Metalle

Leuchtenkörper sollten in metallurgisch kompatible Fraktionen aufgetrennt werden können, wie sie dem Metallrad zu entnehmen sind. +

organische Anhaftungen (Lack, Kunststoff, Klebstoff) an Metallfraktionen sind tolerierbar, verbrennen im Schmelzofen ●

keine Kupfer-Anhaftungen an Stahl, wenn es ins Stahlrecycling soll (Bsp: vernickelte Federn, unterverkupfert) -

keine Kupfer-Anhaftungen an Alu, wenn es ins Alu-Recycling soll -

## Kunststoffe

Im aktuellen Stand der Recyclingtechnik werden die relevanten Kunststoffe für Leuchten nur bei manueller Entnahme recycelt. ●

Anhaftungen (Metall, Klebstoff, Gummi, ...) an Kunststoff verhindern das Recycling. -

Flammhemmer im Kunststoff verhindern das Recycling. -



Polymer/Polymer clipping, polymer/foam sticking, polymer/metal insertion, metal screwing [Fotos: Maris et al. 2015]

## Elektronik

Leiterplatten sollten von Gehäusematerialien leicht ablösbar sein (im Schredder). +

Wiedergewonnen werden hauptsächlich die (edleren) Metalle wie Cu, Ag, Au, ... +

Andere kritische Rohstoffe wie Gallium oder seltene Erden werden nicht wiedergewonnen, da sie im Prozess oxidieren. -

# VOM PRODUKT ZURÜCK ZUM ROHSTOFF

## WERTSCHÖPFUNG UND -VERNICHUNG

Beim Recycling wird ein Teil der Rohstoffe zurückgewonnen. Dabei geht der Großteil des „Wertes“ verloren, da dieser gar nicht in den Rohstoffen steckt, sondern in der Art und Weise, wie diese Stoffe zu einer nützlichen Einheit zusammengesetzt sind.

**Rohstoffe: ca. 5 €**

– Stahl, Kupfer, Alu, Edelmetalle (gemäß Börsenpreisen), Kunststoff-Granulat

**Herstellkosten: 40-50 €**

– Einkaufspreise der Komponenten, Halbzeuge und Materialien  
– Blechbearbeitung, montieren, prüfen, verpacken

**Listenpreis: einige hundert €**

– Richtwert für den Endkunden (beinhaltet dreistufigen Vertrieb)

**Schrottwert: knapp über 1 €**

– bei sortenreinem Verkauf von lackiertem Stahl, Kunststoffen, Kabelschrott, bestückte Leiterplatten



**FAZIT:** Weil der Wert des Produktes den den recycelten Rohstoffes mehrfach übertrifft, ist es ökonomisch und ökologisch sinnvoll, das Produkt möglichst lange zu nutzen.

# KREISLAUFWIRTSCHAFT

## ALTERNATIVEN ZUM RECYCLING

### Vorläufiges Fazit

Es scheint, als wäre Recycling (auch wirtschaftlich) die unvorteilhafteste Option der Kreislaufwirtschaft. Es ist der „letzte Ausweg“, nicht die erste Wahl.

### Höherwertige Strategien

In der Literatur werden 5-10 „R-Strategien“ als Teile der Kreislaufwirtschaft diskutiert: re-think, repair, re-use, ... die alle höher priorisiert werden als Recycling, da sie größere Einsparungen versprechen. Im Butterfly Diagramm (siehe rechts) beschreiben die besten Strategien die kleinsten Kreise – da hier am wenigsten Aufwand im Prozess steckt, die Materialien wieder in eine Nutzung (grauer Kreis) zu bringen.

### Unsere Herausforderung im professionellen Lichtmarkt

Die Nutzungsdauern sind meist sehr lang. Wir bekommen heute Leuchten zurück, die mit 25 Jahre völlig veraltet sind. Und unsere heutigen Leuchten bekommen wir großteils erst in 25 Jahren zurück.

