

Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD)

Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik in Kooperation mit den Leibniz-Instituten FBH und IHP



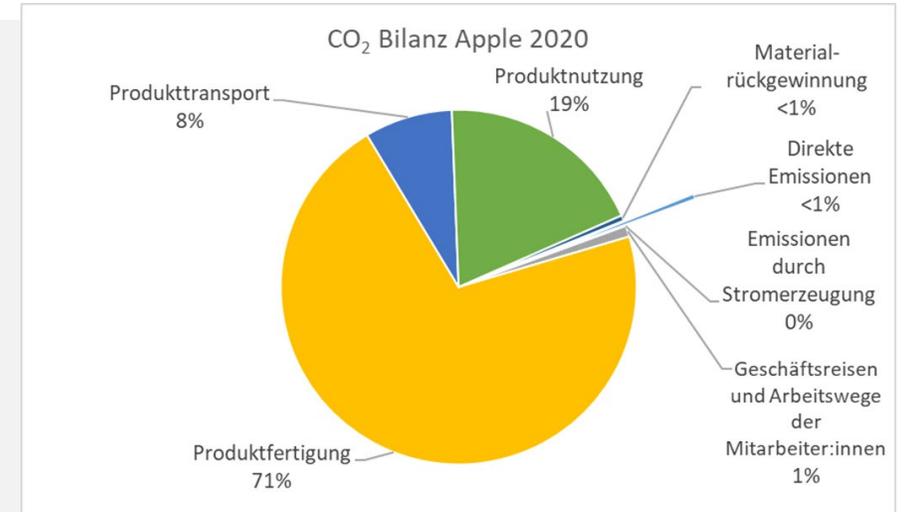
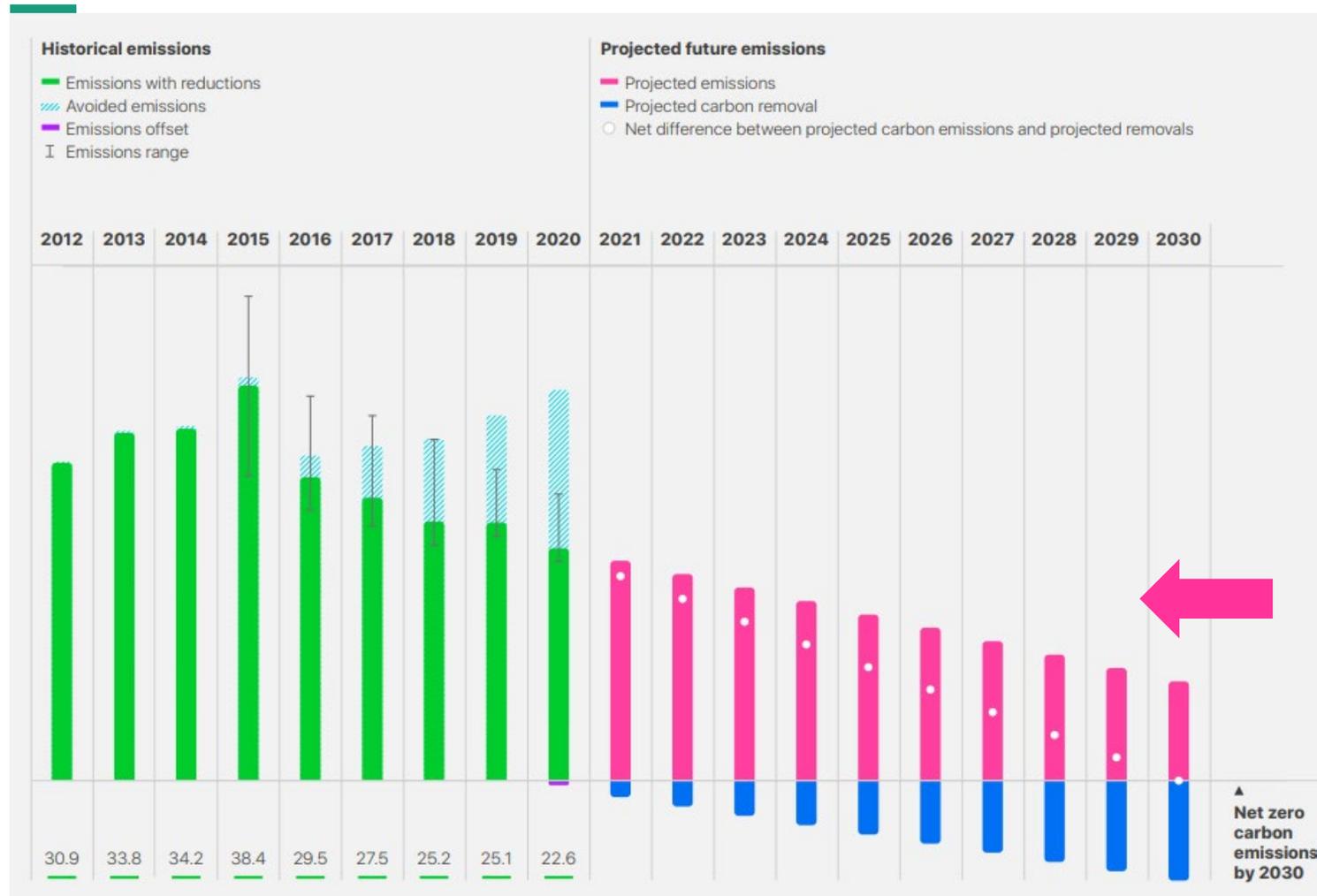
greenict.connect²³

Deep Dive – Ökobilanzierung und Ökodesign

Dr. Nils F. Nissen, Dr. Lutz Stobbe
Abteilung Environmental and Reliability Engineering
Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration
Berlin, 13.09.2023

Carbon Neutralität in der IKT Branche

Net Zero Ziele werden zur Triebkraft für Ökobilanzen und Ökodesign



Das ist die Herausforderung

71% des carbon footprint eines Smartphones resultiert aus der Herstellung des Produktes

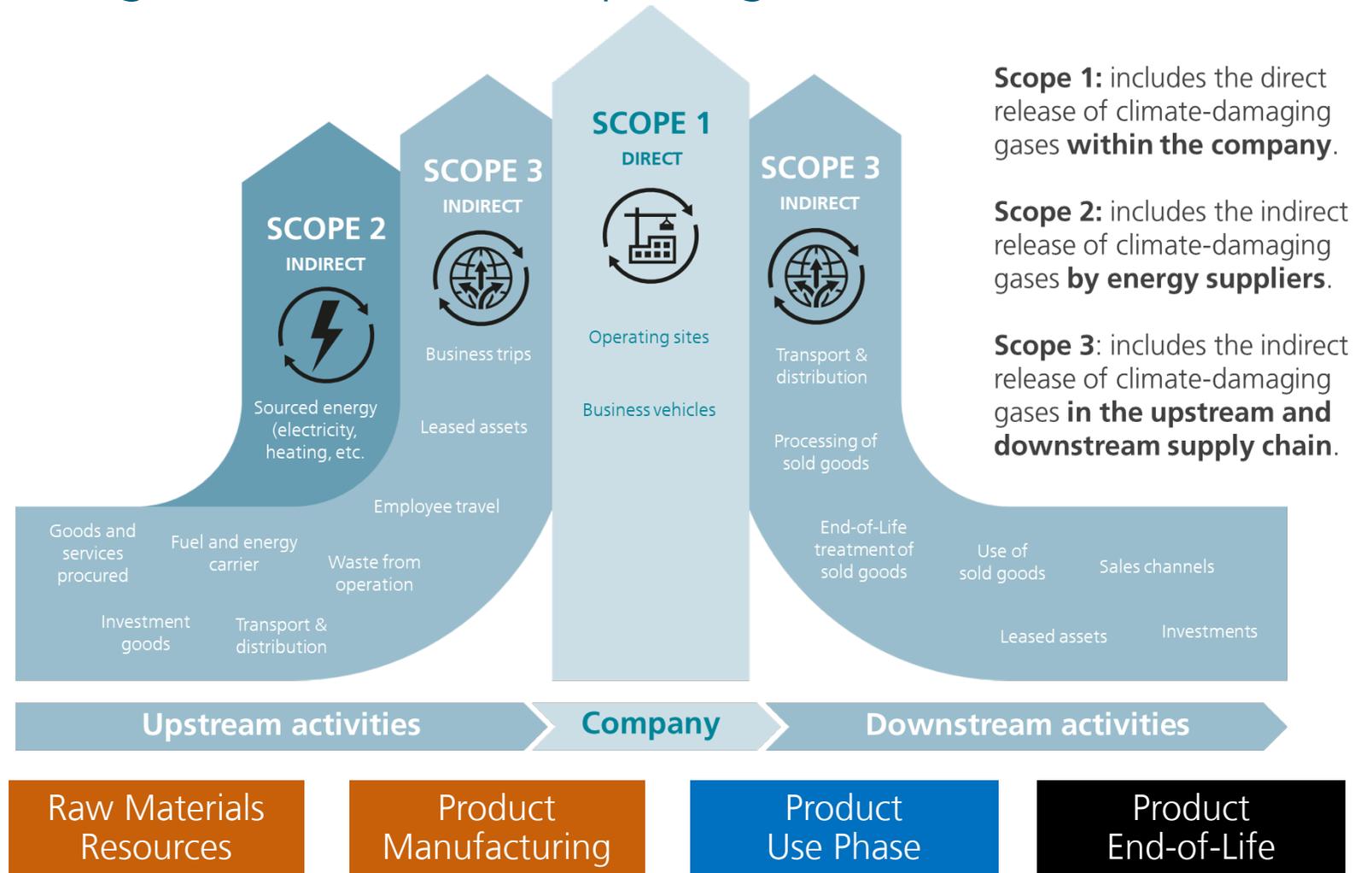
Diese CO₂-Emission müssten ab 2030 durch teure Zertifikate kompensiert werden

Quelle: Fortschrittsbericht zum Umweltschutz 2020, Apple

... kurzer Hinweis zur Terminologie

Direkte und Indirekte Treibhausgasemissionen im Reporting (nach GHG Protocol)

- Reporting nach GHG-Protokoll

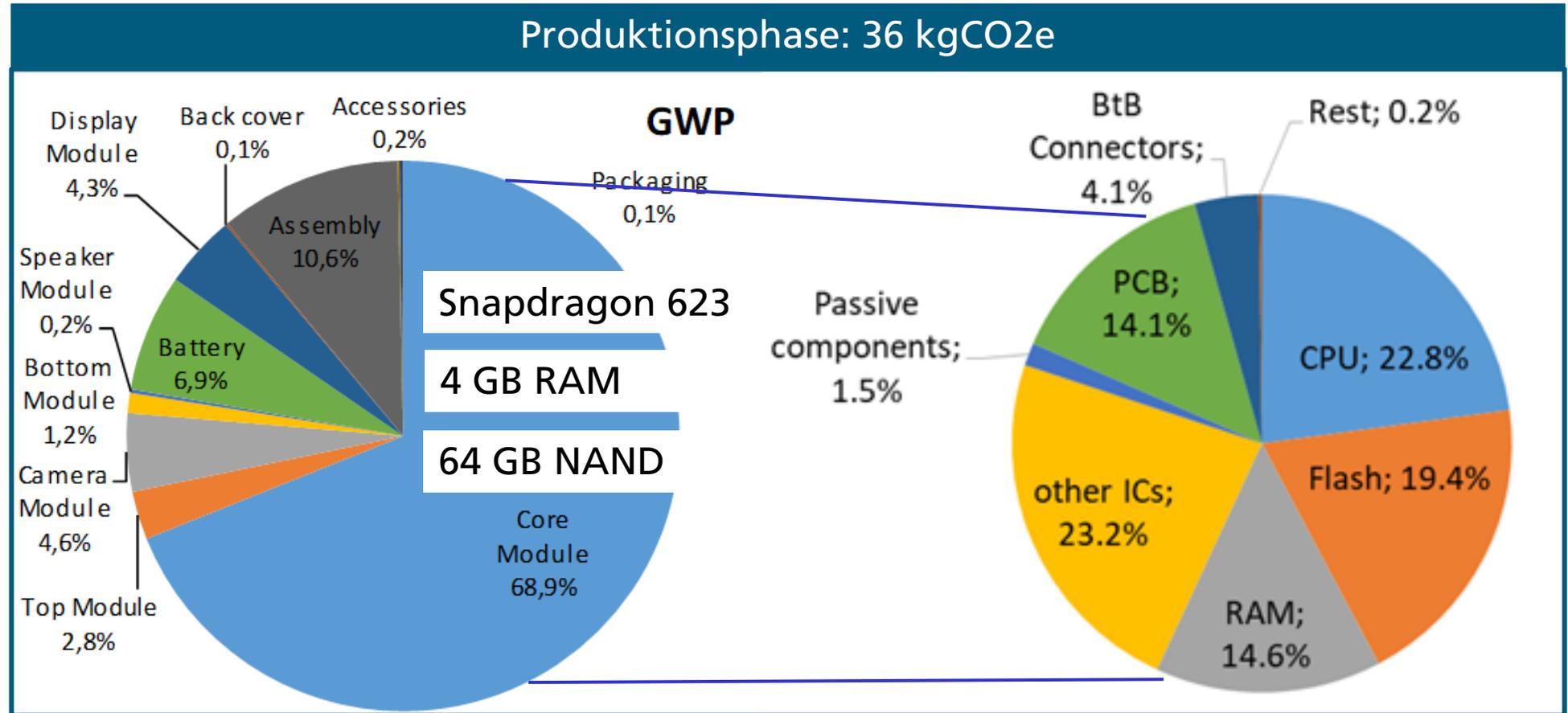


- LCA Sachbilanz

Halbleiter-Chips erzeugen 55% des Carbon Footprints

Die Halbleiterindustrie ist aber nicht nur energieintensiv ...

Fairphone 3 (2019): Carbon Footprint der Herstellung



Über 60% des Carbon Footprints der Halbleiterherstellung resultiert aus dem Energiebedarf der Produktion

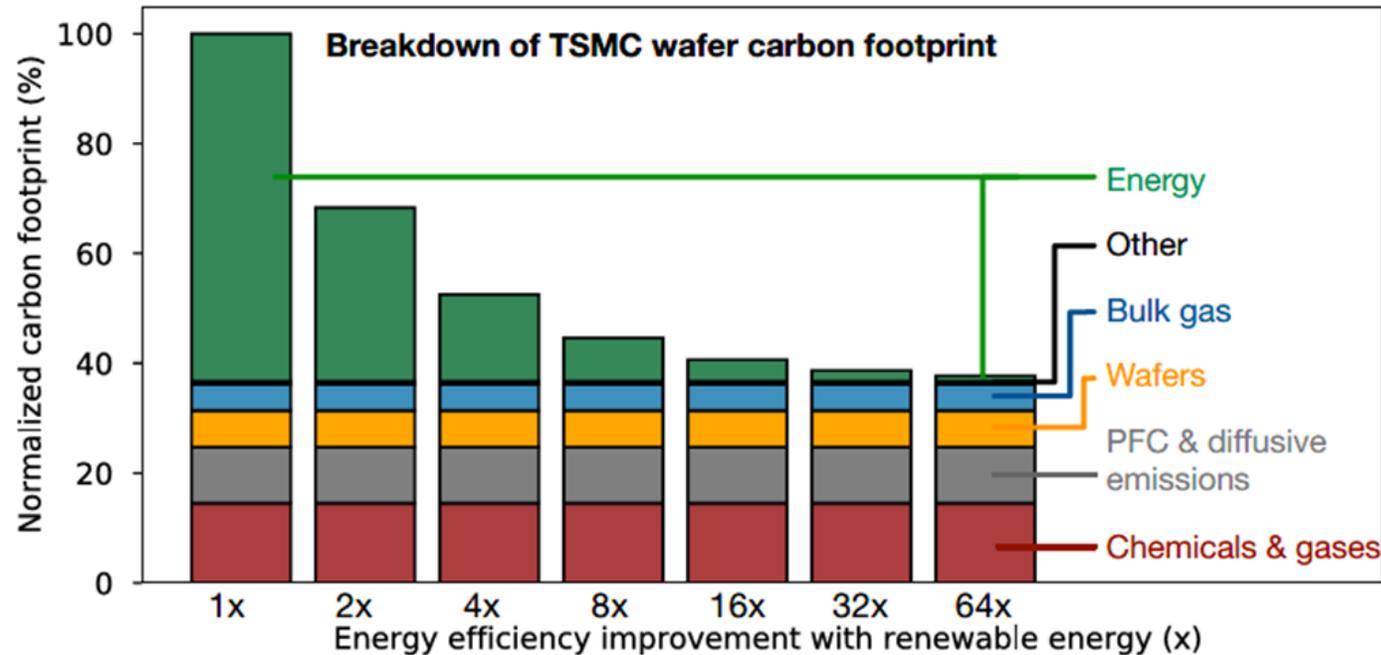


Fig. 14. Carbon-emissions breakdown for TSMC wafer manufacturing.

- Erneuerbare Energien könnten den Carbon Footprint stark senken
- Aber es gibt noch immer einen großen Anteil direkter CO₂-Emissionen, die gesenkt werden müssen, um Klimaneutral zu sein

Chasing Carbon: The Elusive Environmental Footprint of Computing (2020): Udit Gupta¹; Young Geun Kim³, Sylvia Lee², Jordan Tse², Hsien-Hsin S. Lee², Gu-Yeon Wei¹, David Brooks¹, Carole-Jean Wu²
1 Harvard University, 2 Facebook Inc., 3 Arizona State University

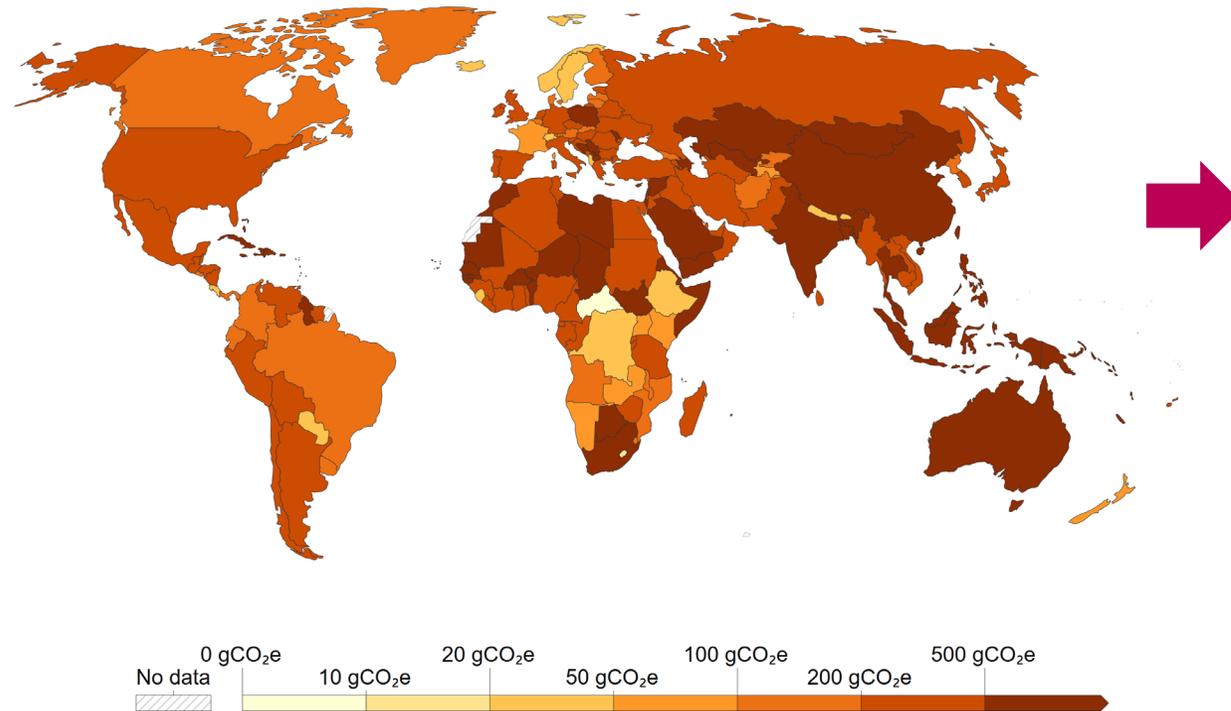
CO2 Intensität der Stromerzeugung, 2022

Strommix der Länder ohne Vorkette (der ist theoretisch noch etwas höher)

Country	gCO2e/kWh
Spain	217
France	85
Germany	385
UK	257
Ireland	345
NL	355
Austria	158
Italy	372
USA	367
Mexico	421
Brasil	102

Carbon intensity of electricity, 2022

Carbon intensity is measured in grams of carbon dioxide-equivalents emitted per kilowatt-hour of electricity.



Country	gCO2e/kWh
PR China	531
South Korea	436
Japan	483
Taiwan	561
Vietnam	377
Thailand	502
Singapore	489
Malaysia	544
Indonesia	623
Philippines	582
India	632

Source: Ember Climate (from various sources including the European Environment Agency and EIA) OurWorldInData.org/energy • CC BY

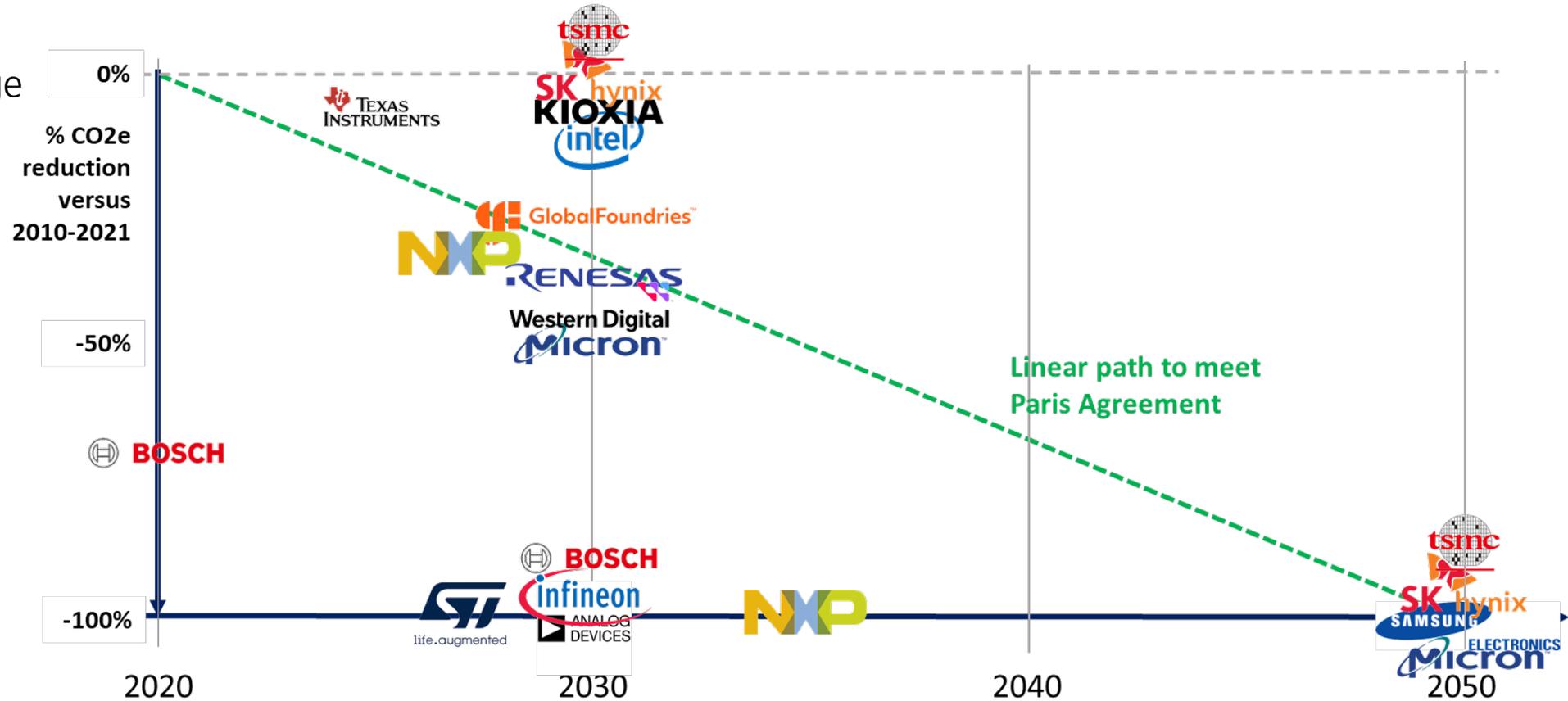
<https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity>

Carbon Neutralität in der IKT Branche

Unterschiedliche Ausgangslagen und Zielstellungen in der Halbleiterindustrie

- Die noch immer geringe Verfügbarkeit von Erneuerbaren Energien in den asiatischen Fertigungsstandorten limitiert die Möglichkeiten für ein schnelles Erreichen der Klimaneutralität

Semiconductor industry climate policy goals (scope 1 and 2)



Aufteilung zwischen „wir schaffen das bis 2030/35“ und „erst in 2050 möglich“

Exkurs: Intensität von CO₂-Emissionen für unterschiedliche Energiequellen und Strommix in Deutschland



greenict.connect²³

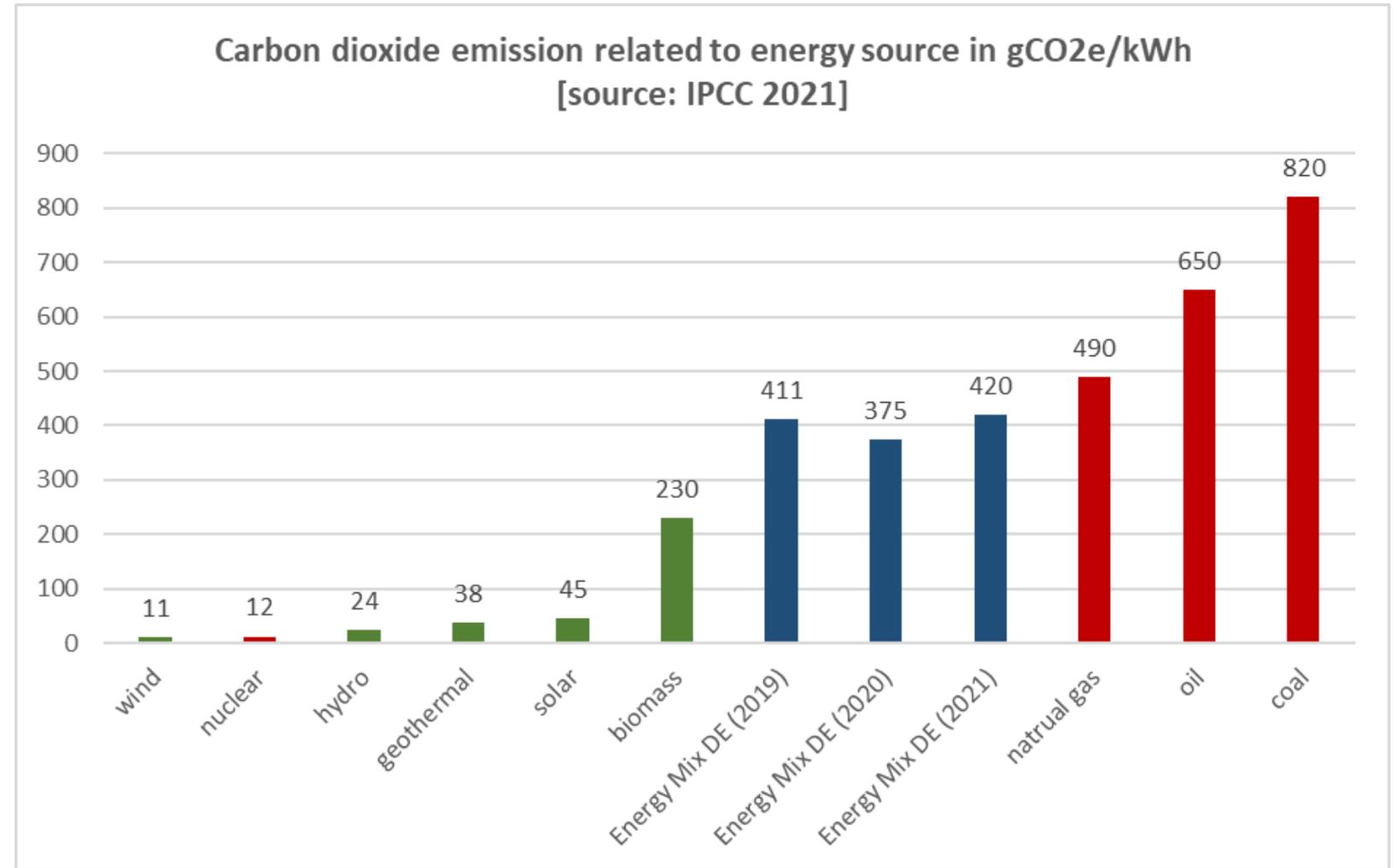
... Hinweise zur Terminologie

„Location based energy mix“:

- Deutschland ca. 400g/kWh
- Location-based bedeutet der reale Energiemix im lokalen Netz

„Market based energy mix“:

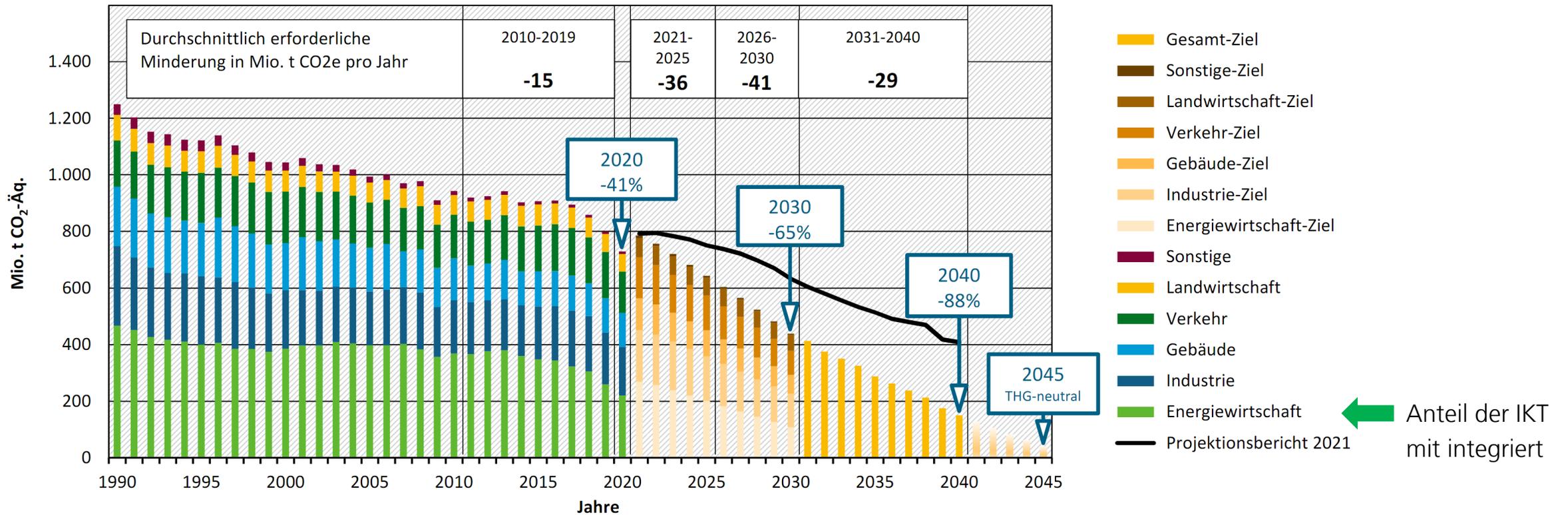
- Market-based bedeutet, der über ausgleichende Zertifikate erworbene Energiemix (z.B. aus Norwegen)
- die z.B. in Deutschland real anfallenden Emissionen müssen im Land des Zertifikats (Norwegen) angerechnet werden (so die Theorie)



Geplante Entwicklung der CO₂-Emissionen in Deutschland

Klimaschutzziele der Bundesregierung bis 2045 CO₂-neutral

Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen nach Quellbereichen (1990–2045)



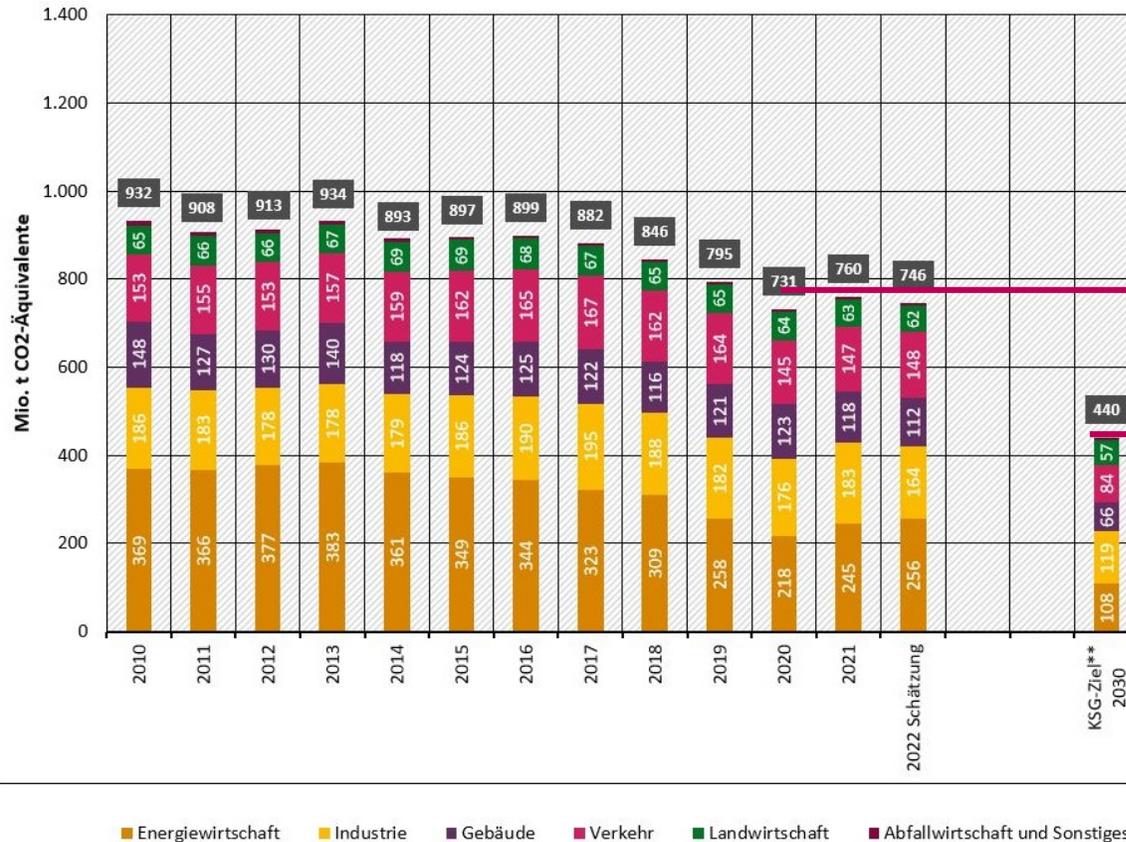
Quelle: Historische Daten Umweltbundesamt THG-Inventar; Projektion Öko-Institut/Fraunhofer-ISI/IREES

Aktuelle Entwicklung der CO2-Emissionen in Deutschland

Status 2023 laut Umweltbundesamt

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland

in der Abgrenzung der Sektoren des Klimaschutzgesetzes (KSG) *



Stagnation in der Entwicklung

- u.a. keine Verbesserung des Strommixes
- Die Klimaneutralität in der IKT wird zur Herausforderung

Zielsetzungen der Bundesregierung

- 2030 (-65%) 440 Mt CO₂e
- 2040 (-88%) 150 Mt CO₂e
- 2045 (-100%)

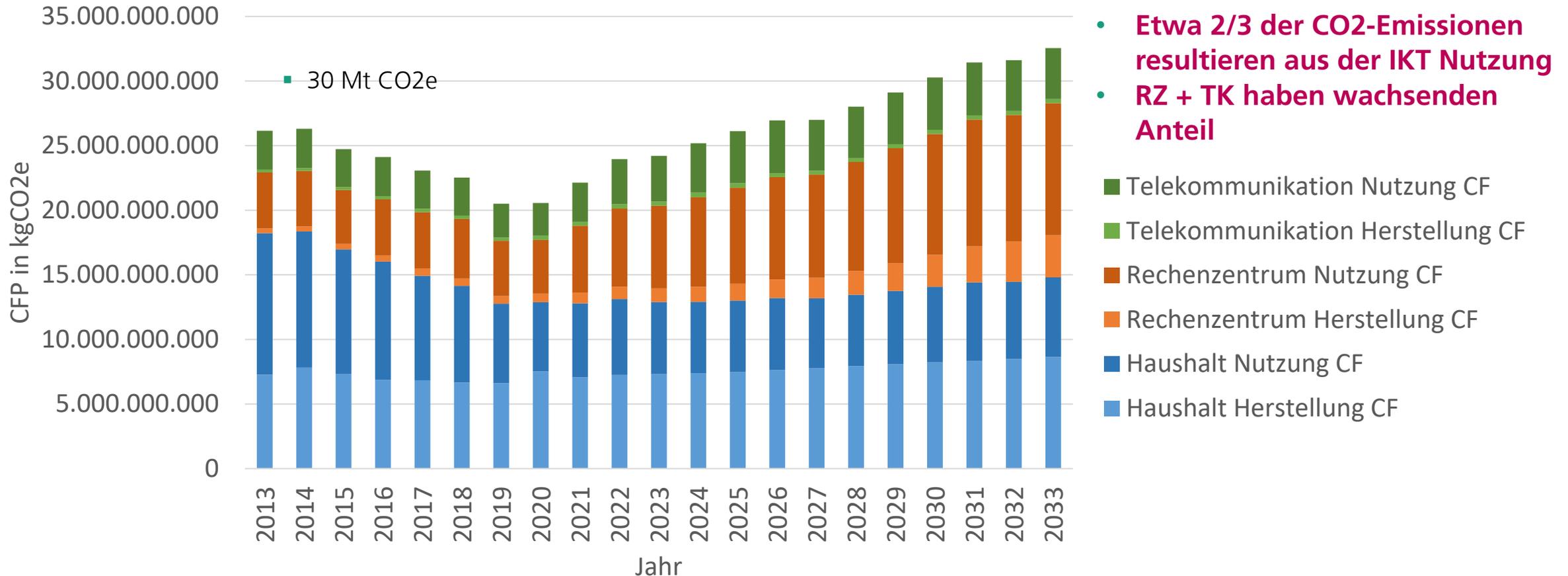
* Die Aufteilung der Emissionen weicht von der UN-Berichterstattung ab, die Gesamtemissionen sind identisch
 ** entsprechend der Novelle des Bundes-KSG vom 12.05.2021, Jahre 2022-2030 angepasst an Über- & Unterschreitungen

Quelle: Umweltbundesamt 15.03.2023

Carbon Footprint der Herstellung und Nutzung von IKT

Erste vorläufige Ergebnisse einer Studie im Rahmen von Green ICT @ FMD

Carbon Footprint (Herstellung + Nutzung; konventioneller Energiemix)



... gibt es deutliche Unterschiede bei Produktgruppen

Thematische Schwerpunkte im Ökodesign

Telekommunikationsnetze und Rechenzentren



- Kleine Stückzahlen
- Mittlere bis lange Produktlebensdauer
- Hoher Strombedarf in der Nutzung
- Carbon Footprint der **Nutzungsphase ist dominant**

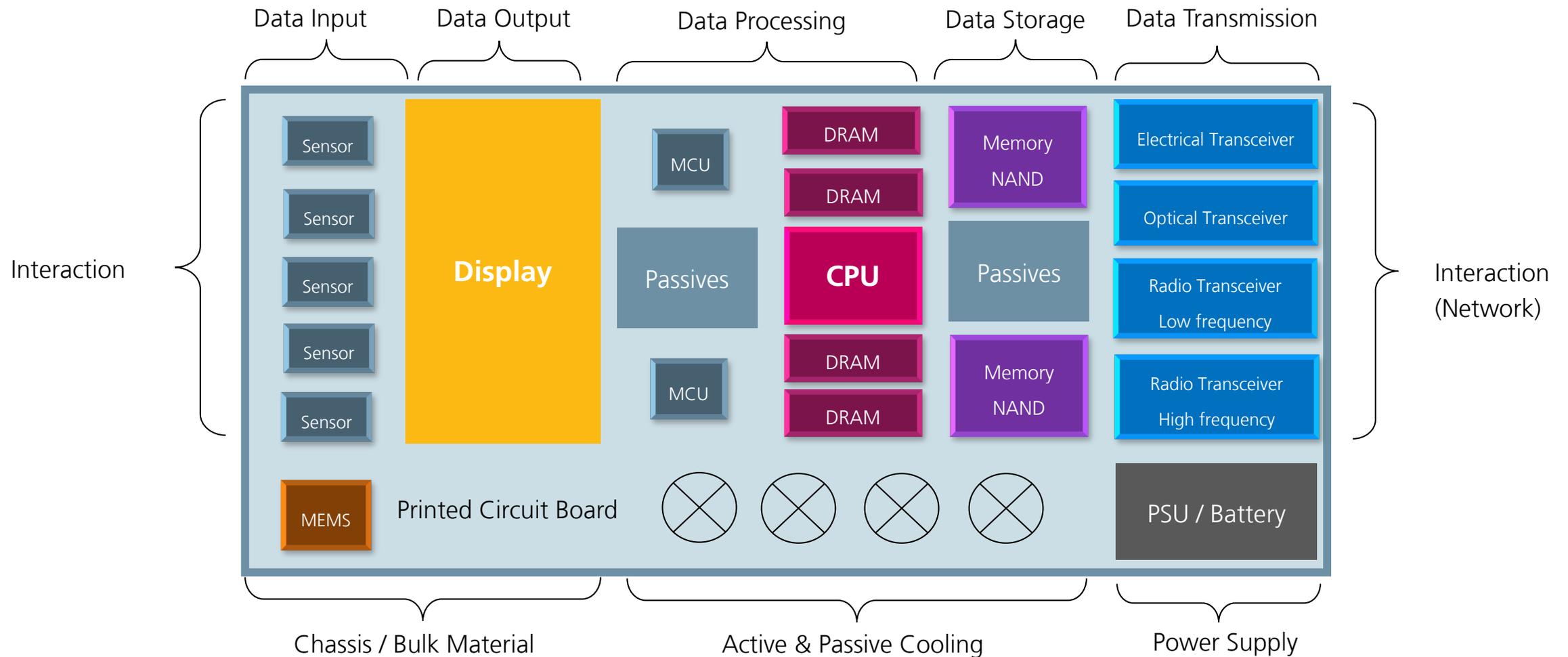
Endgeräte in Haushalten und Büros



- Sehr hohe Stückzahlen
- Kurze bis mittlere Produktlebensdauer
- Geringer Strombedarf in der Nutzung
- Carbon Footprint der **Herstellungsphase ist dominant**

Ökobilanzierung und Ökodesign von IKT

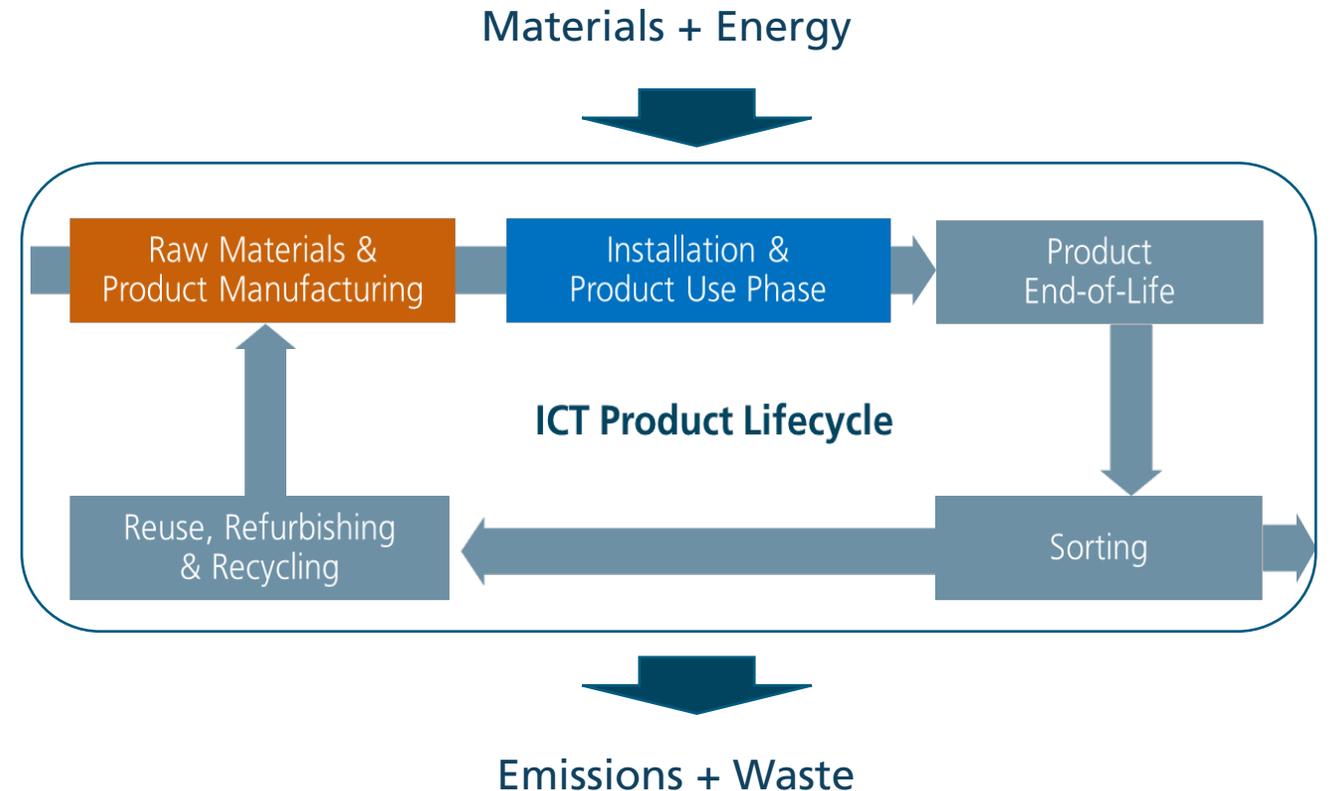
Ähnliche funktionale Komponenten die einzeln und in ihrer Interaktion optimiert werden müssen



Ökobilanzierung / Life Cycle Assessment (LCA)

Eine standardisierte Methode nach EN ISO 14040/14044

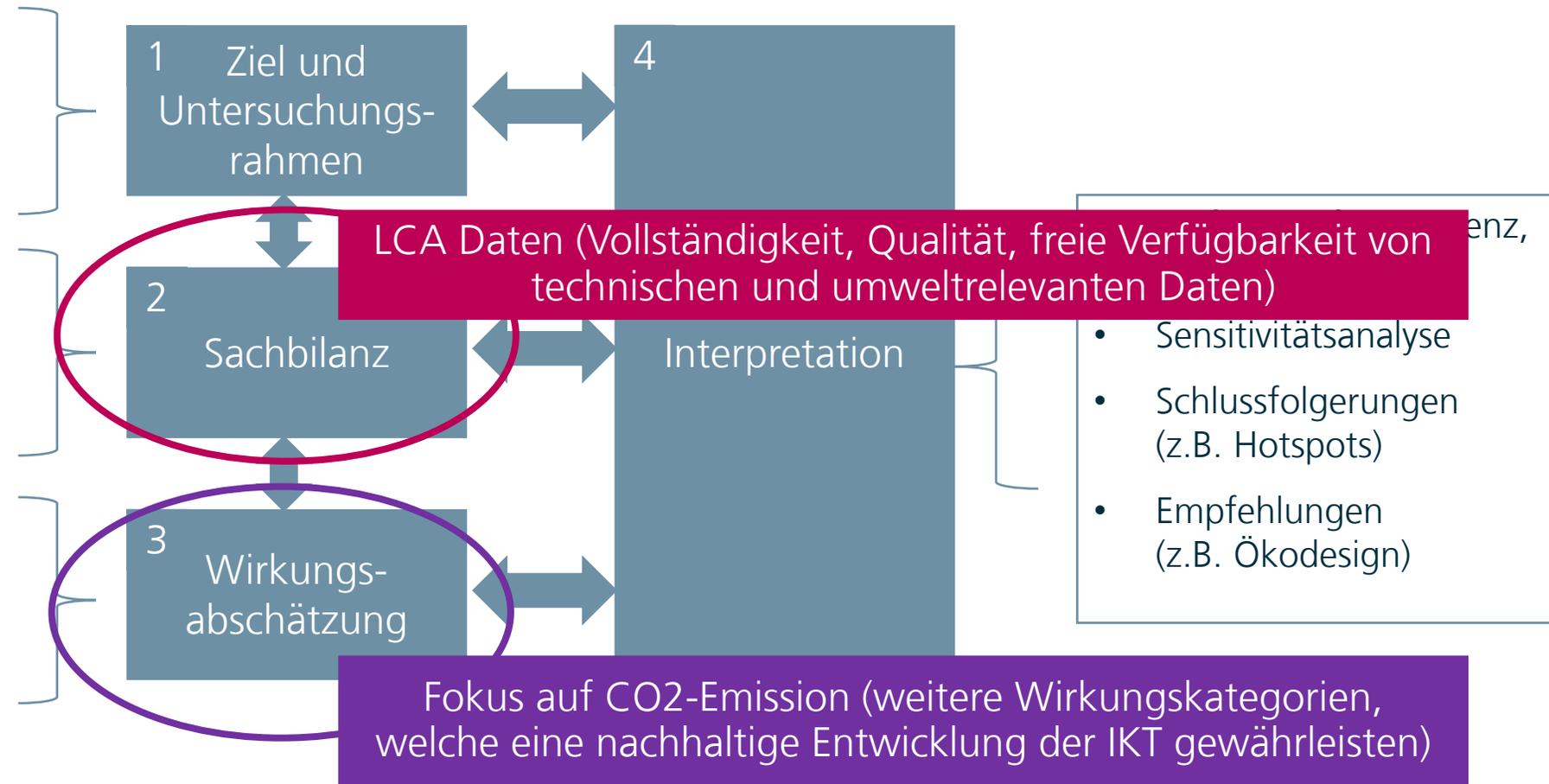
- Bilanzierung der Umweltlast von Produkten, Dienstleistungen, Unternehmen, Systemen, Märkte
- lebenszyklusbasiert: alle Phasen von Rohstoffgewinnung, Produktion, Transport, Nutzung bis Lebensende (Recycling)
- ganzheitlich: alle direkten und indirekten Umweltlasten (z.B. Vorketten oder Rebound-Effekte, Folgen)
- quantitativ: Objektivität durch mengenmäßige Erfassung der Inputs und Outputs (Sachbilanz)
- wissenschaftlich: Einigung auf gemeinsame Faktoren der Wirkungsabschätzung



Prinzipielles Vorgehen nach ISO 14040/44

... zwei thematische Schwerpunkte der aktuellen Entwicklung

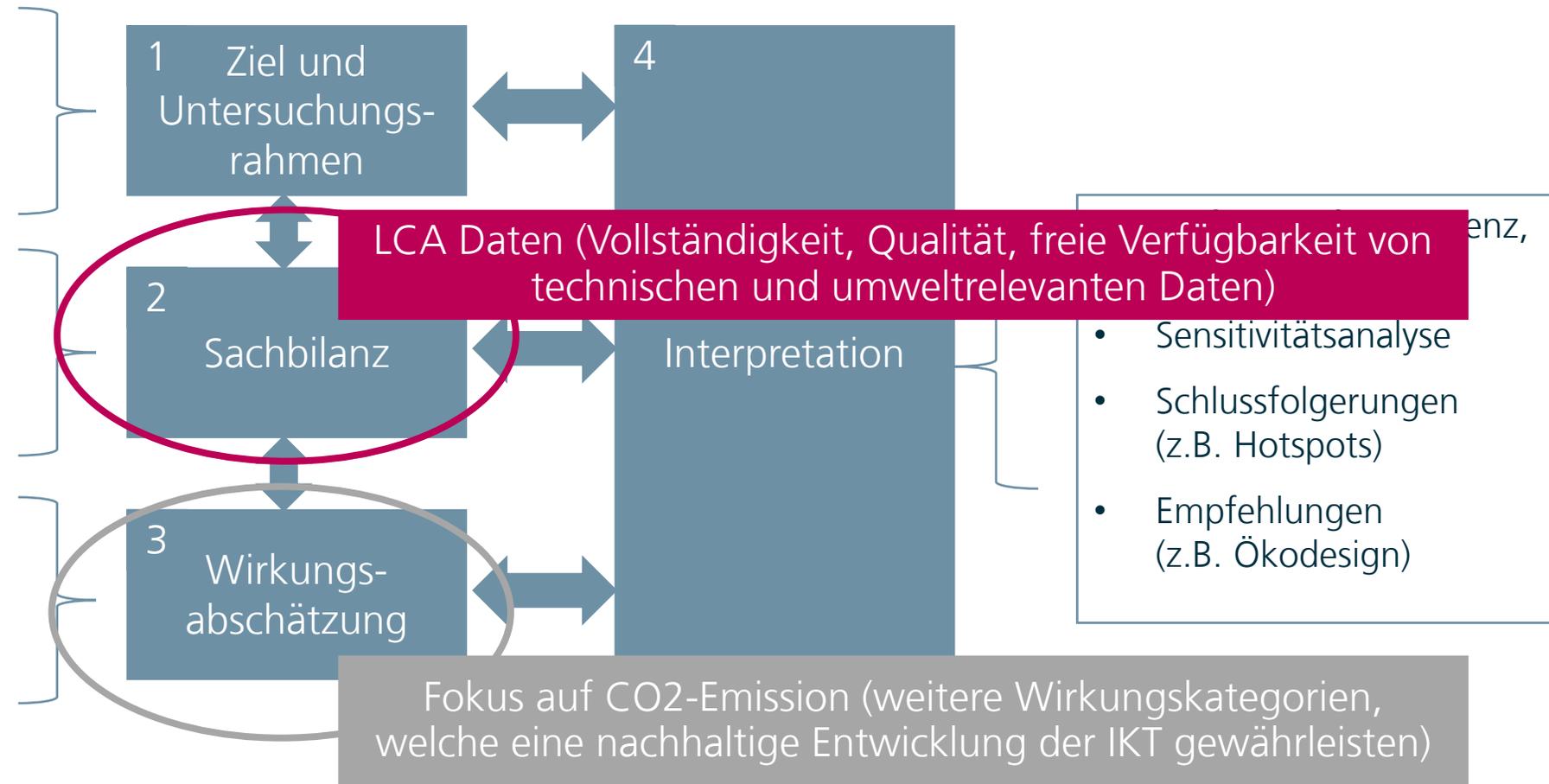
- Zielstellung
 - Systemgrenzen
 - funktionelle Einheit
 - Wirkungskategorien
- physischer Produktaufbau
 - Abschneidekriterien
 - Zuordnung von Stoff- und Energieflüssen
- Klassifizierung
 - Charakterisierung
 - Normierung, Gewichtung



Prinzipielles Vorgehen nach ISO 14040/44

... zwei thematische Schwerpunkte der aktuellen Entwicklung

- Zielstellung
 - Systemgrenzen
 - funktionelle Einheit
 - Wirkungskategorien
- physischer Produktaufbau
 - Abschneidekriterien
 - Zuordnung von Stoff- und Energieflüssen
- Klassifizierung
 - Charakterisierung
 - Normierung, Gewichtung

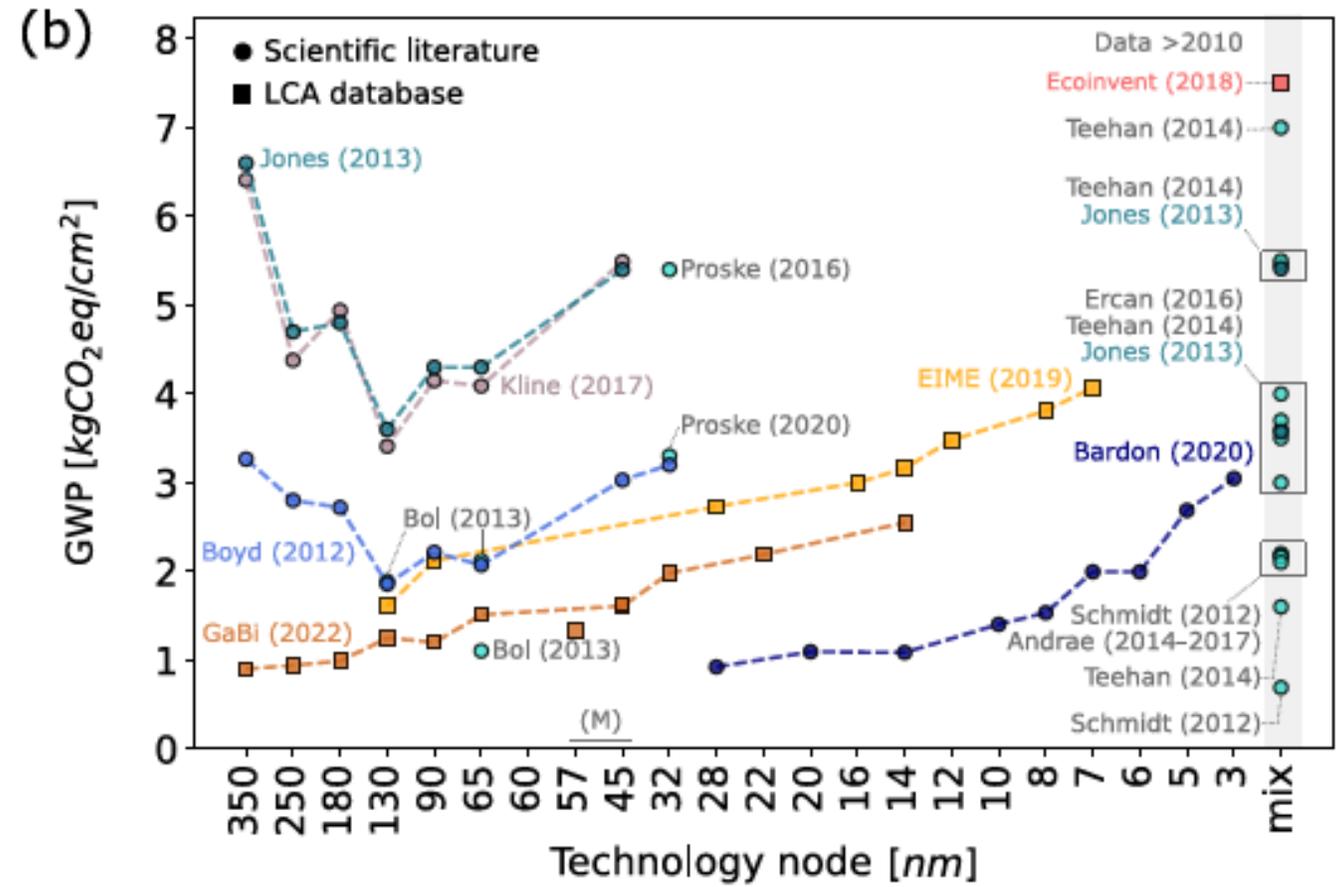


Vergleich von CFP Datensätze für IC Fertigung

Qualität und freie Verfügbarkeit von essentiellen Ökobilanzdaten für IKT

- Präzise IC-Datensätze werden benötigt
- Fehlende Transparenz existierender Datensätze (sowohl kommerzielle als auch frei verfügbare)
- Aktuell finden substantielle Bestrebungen der Großindustrie statt, die Datenlage zu verbessern (Motivation: Net Zero Ziele)
- IMEC – IC Front-end Fertigung (Die)
- IZM – IC Back-end Fertigung (Package)

Carbon Footprint (kgCO₂e/cm² die)



Quelle: Metastudie von Pirson et al. (2022)

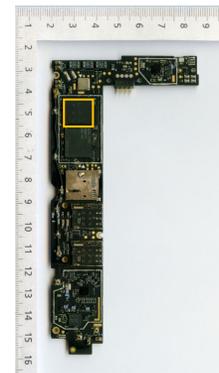
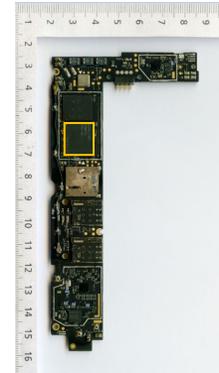
<https://doi.org/10.1109/ESSDERC55479.2022.9947198>

Example of methods to find multi-chip modules & actual die-to-package ratio

Study by Fraunhofer IZM (Mathilde Billaud)



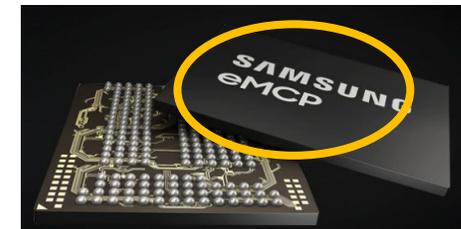
▪ Fairphone 3



- Qualcomm IC (SoC – single die)
NSP* package type: 12 x 14 mm²

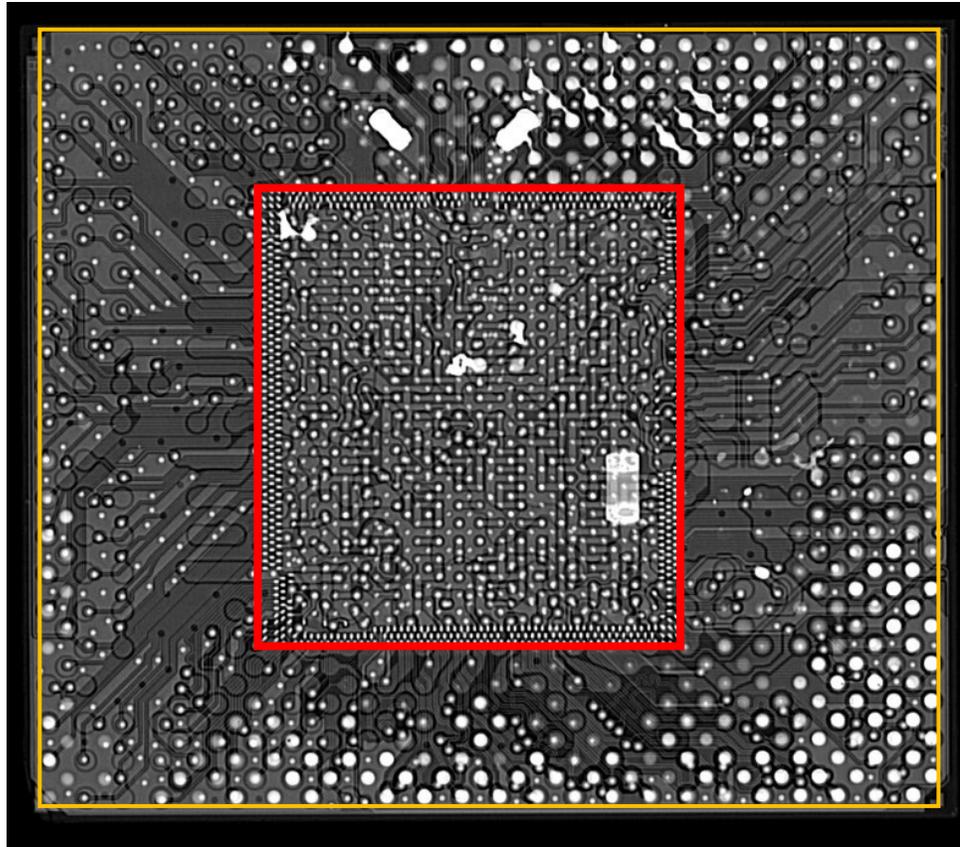


- Samsung Memory IC
FBGA package type: 12.9 x 11.5 mm²
eMCP „embedded Multi-Chip Package”



Non-destructive analysis: plan-view X-ray

System-on-chip (SoC)



Near-scale package (NSP) package type:

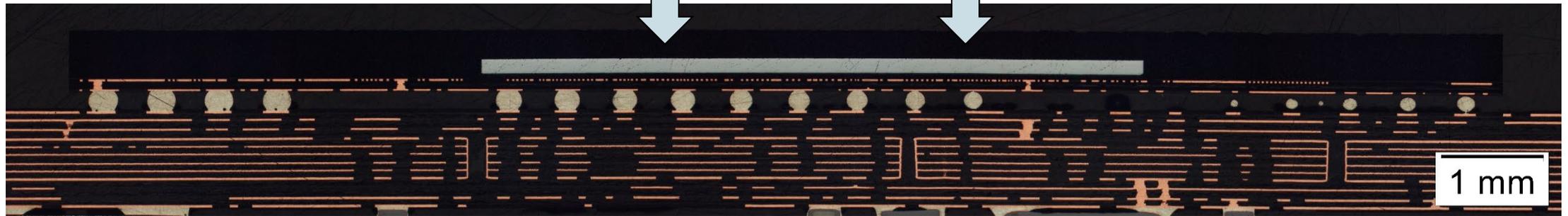
- Package area: 12 x 14 mm² (1.68 cm², large IC package)
- **Yellow line** shows outline of BGA (NSP)
- Fan-out trend: ball area can be much larger than die area
- **Red line** shows high density of small contact pads or solder bumps in the center → **indication for die area**
- Calculated **die area** based on X-ray analysis = **44 mm²**
- Calculated Die-to-Package-Ratio (DPR) = 26%

Destructive analysis

System-on-chip (SoC)



- 1x die in the package (system on chip)



By destructive analysis:

Die area = 47 mm²

DPR = 28%

By X-ray analysis:

Die area = 44 mm²

DPR = 26%

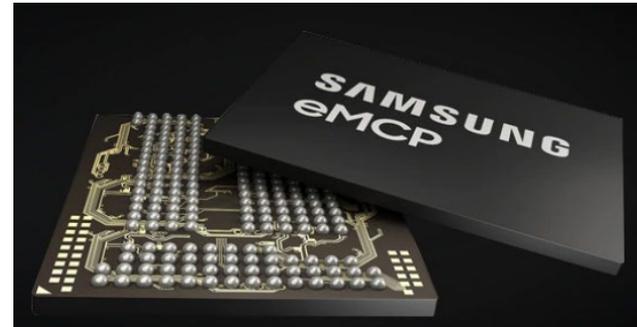
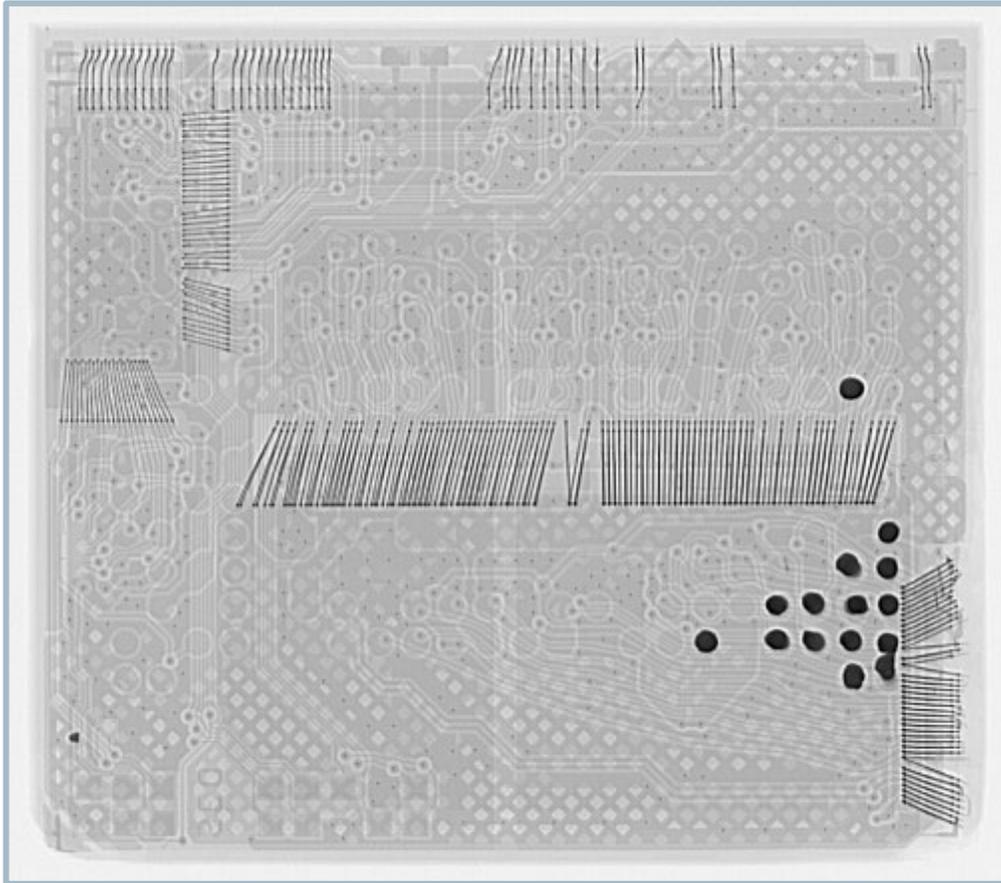
▪ GaBi estimation

Die area = 134 mm²

DPR = 80%

Non-destructive analysis: plan-view X-ray

Programmable Memory IC



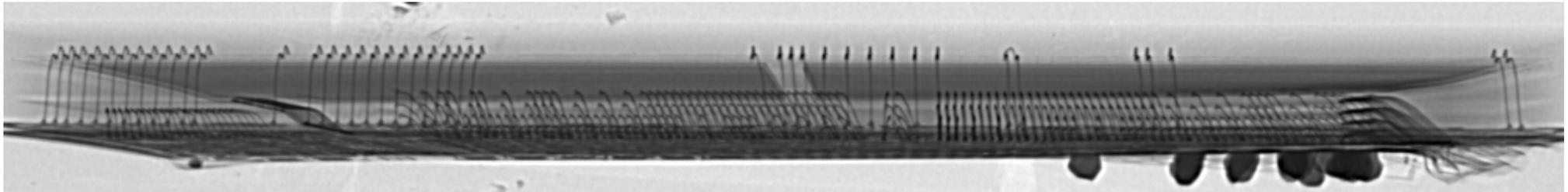
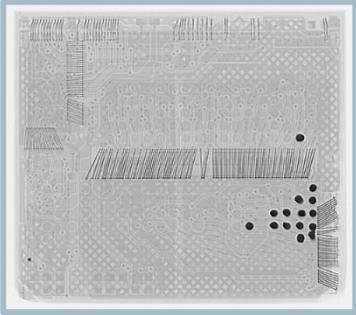
- Samsung Memory IC

FBGA package type
12.9 x 11.5 mm²

- Fine-pitch Ball Grid Array (FBGA) package type
- Package size: 12.9 x 11.5 mm² (1.48 cm² large IC package)
- eMCP „embedded Multi-Chip Package“
- Silicon is not visible by X-Ray when it is surrounded by other elements with much higher nuclear charge number and density
- The distribution of wire bondings indicate the presence of multiple chips (exact number is not detectable)
- Die area can not be obtained exactly by X-ray

Non-destructive analysis: side-view X-ray

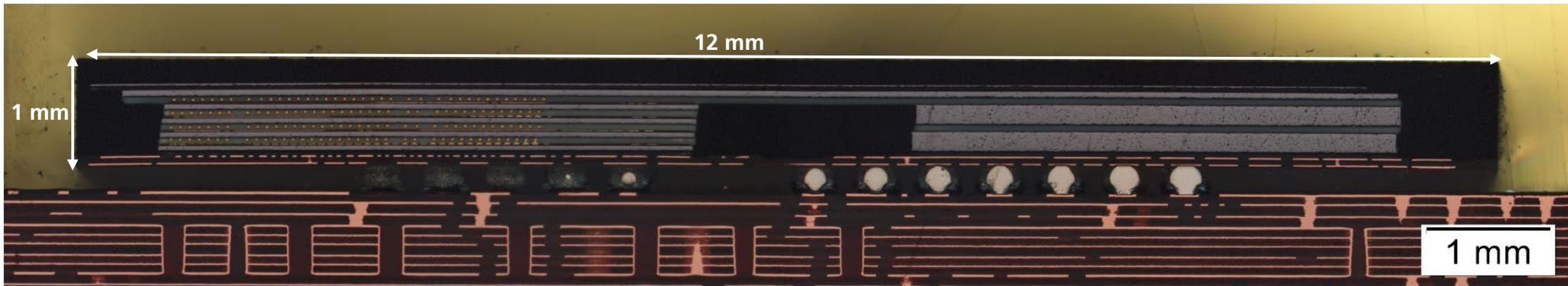
Programmable Memory IC



- Side-view picture confirms that several chips are present at different levels → system in package (SiP)
- Die Area is not really identifiable from top & side view only

Destructive analysis

9 dies are embedded in the Memory IC (System-in-Package)



- 9 dies are embedded in the package:
 - 4 DRAM stacked dies
 - 2 NAND dies
 - 1 eMMC controller
 - 1 application processor (APU)
 - 1 small non-identified die

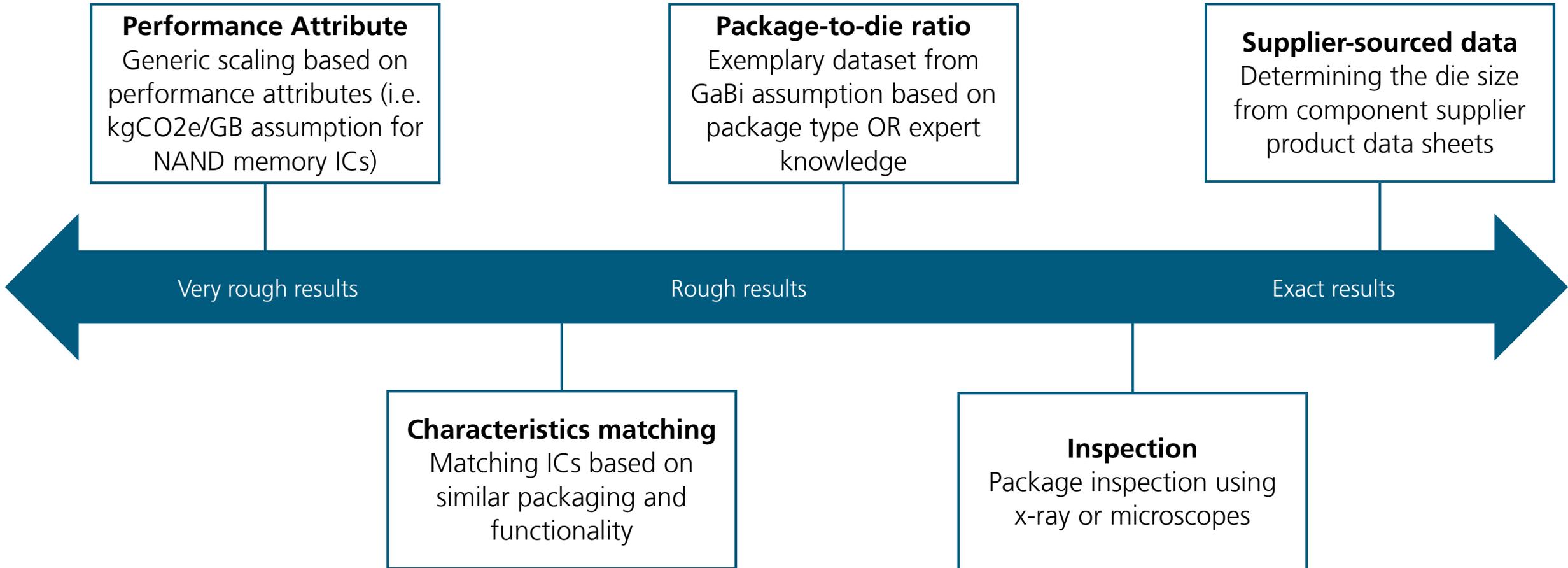
Die area = 508 mm²

DPR = 342%

- One package design is used for different die sizes

Five methods to determining IC die size

Supplier-sourced data still is the gold standard



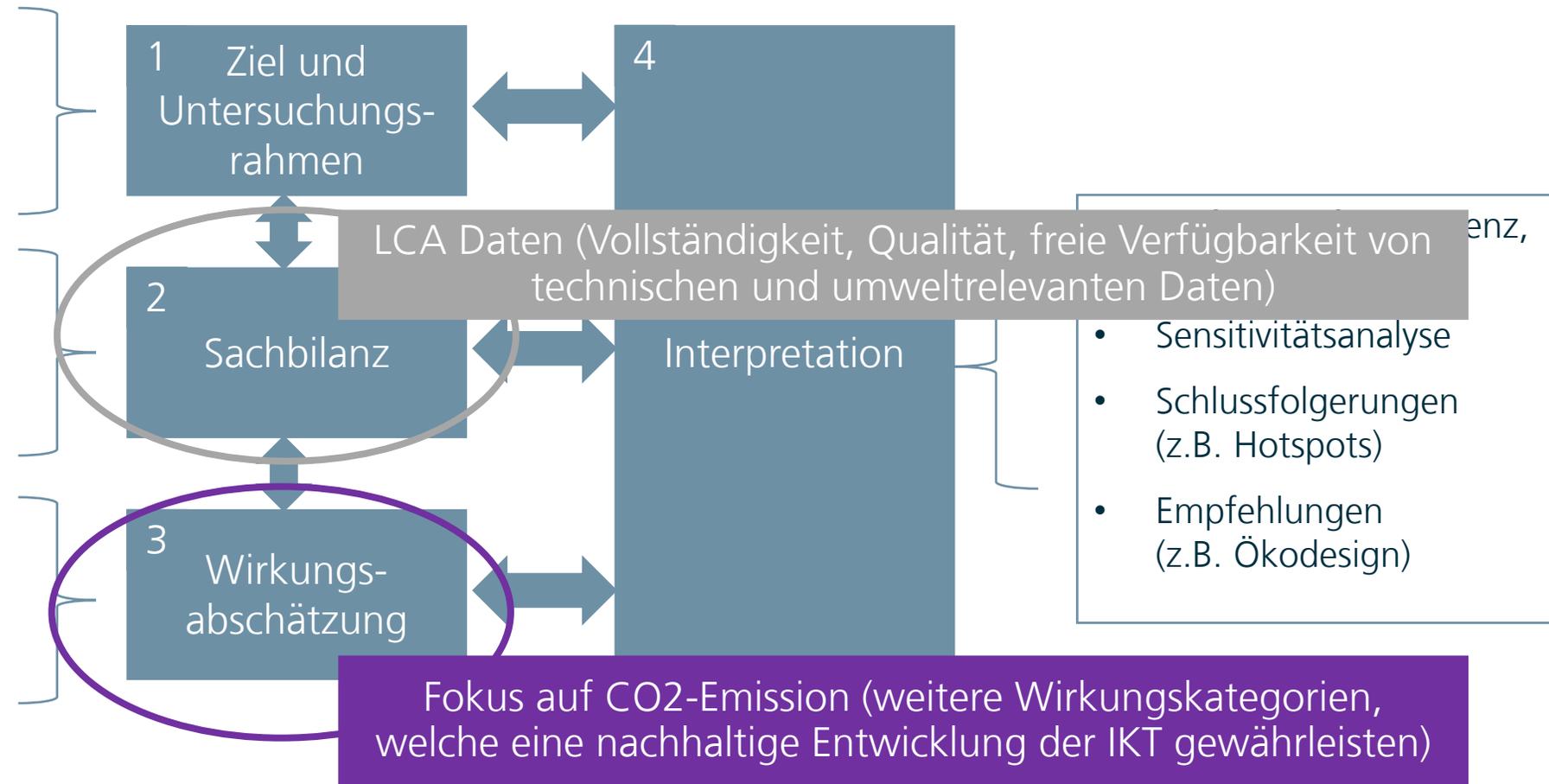
Prinzipielles Vorgehen nach ISO 14040/44

... zwei thematische Schwerpunkte der aktuellen Entwicklung

- Zielstellung
- Systemgrenzen
- funktionelle Einheit
- Wirkungskategorien

- physischer Produktaufbau
- Abschneidekriterien
- Zuordnung von Stoff- und Energieflüssen

- Klassifizierung
- Charakterisierung
- Normierung, Gewichtung



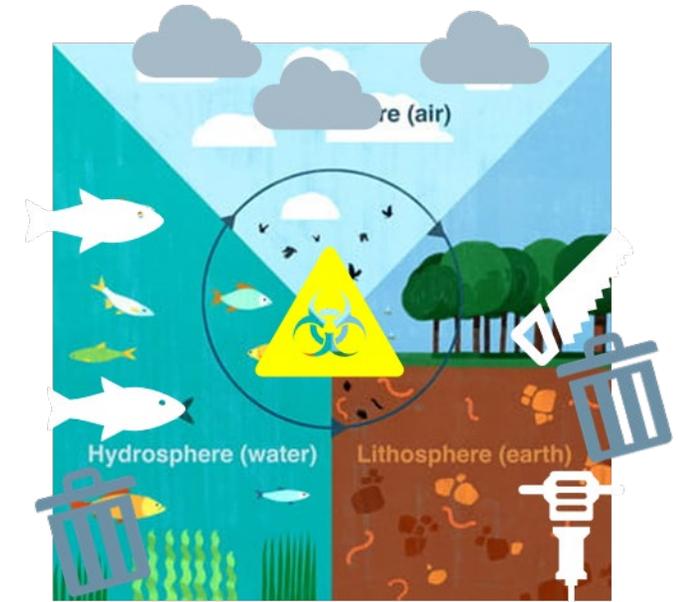
Umweltbewertung mit mehreren Wirkungskategorien

Wirkungsabschätzung: „Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient“

Wirkungskategorie: Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können" → Klimaänderung / Climate Change

Wirkungsindikator: quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie
→ GWP (mit messbarer Einheit)

Charakterisierungsfaktor: „Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird“



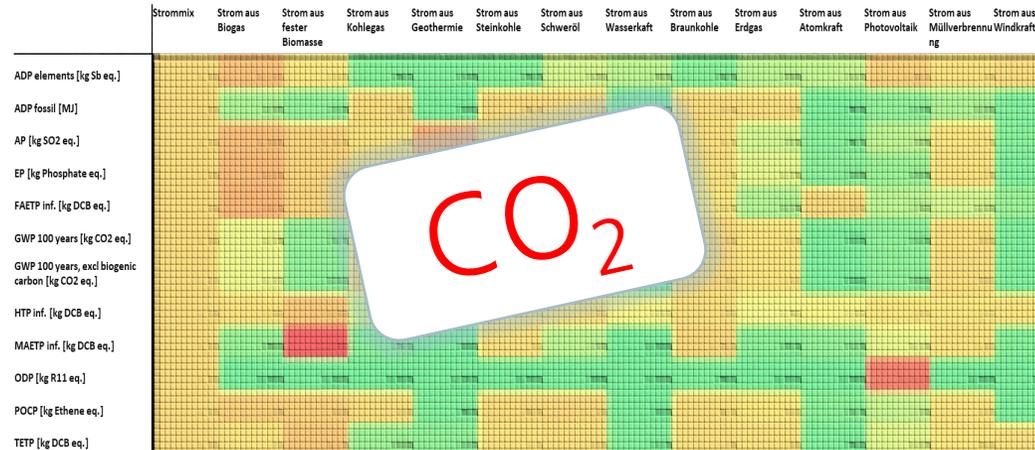
(DIN ISO 14040)

Evolution der umweltpolitischen Themenschwerpunkte

Früher (Waldsterben)



Heute (Klimawandel)



in Zukunft? (Wasser, Rohstoffe, etc.)

Verseuchtes Wasser, Sklaverei und Waffenhandel

Die Lithium-Batterie wird jahrelang vielseitig eingesetzt. Doch die Produktion bringt

15.10.2019 | 20:03 Uhr



Wirkungskategorien ... Zukunftsthemen

- Notwendigkeit einer multi-kriteriellen Bewertung
- Gewichtungsfaktoren (keine Gewichtung ist auch eine Gewichtung)
- Auswahl der Wirkungskategorien könnte bspw. lokalen Bedürfnissen entsprechen

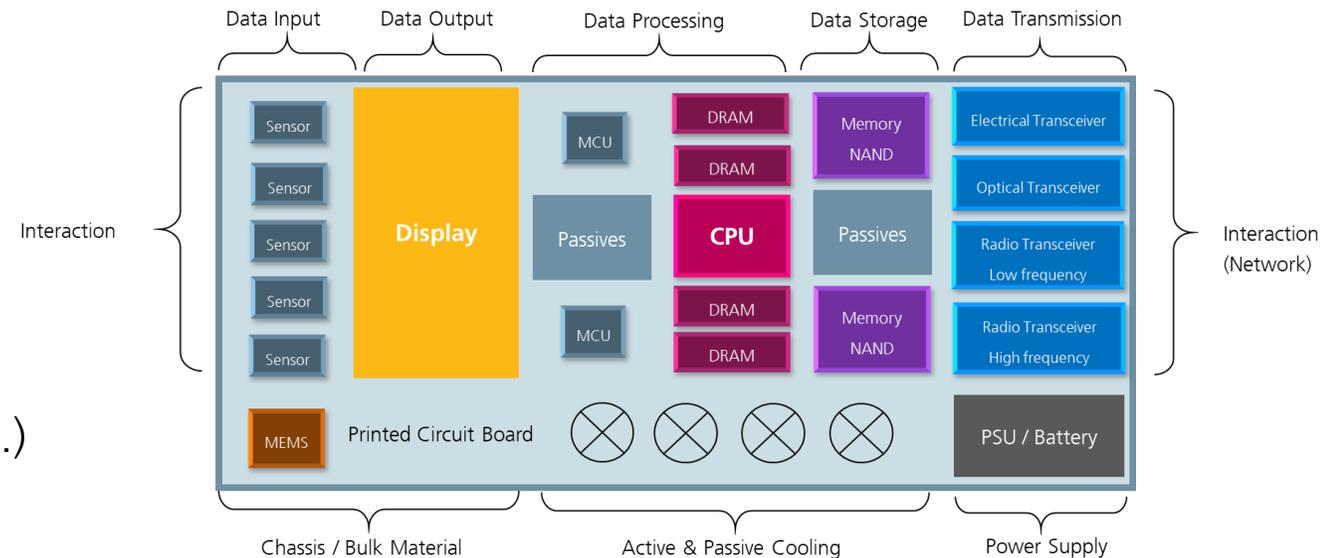
	Strommix	Strom aus Biogas	Strom aus fester Biomasse	Strom aus Kohlegas	Strom aus Geothermie	Strom aus Steinkohle	Strom aus Steinkohle	Strom aus Schweröl	Strom aus Wasserkraft	Strom aus Braunkohle	Strom aus Erdgas	Strom aus Atomkraft	Strom aus Photovoltaik	Strom aus Müllverbrennung	Strom aus Windkraft
ADP elements [kg Sb eq.]	1,00	427%	-47%	-96%	-97%	-96%	-69%	-78%	-95%	-78%	-75%	236%	0%	82%	
ADP fossil [MJ]	1,00	-83%	-92%	95%	-99%	86%	87%	-100%	92%	51%	-98%	-93%	-83%	-98%	
AP [kg SO2 eq.]	1,00	439%	176%	-4%	615%	50%	29%	-99%	35%	-70%	-96%	-78%	-11%	-96%	
EP [kg Phosphate eq.]	1,00	503%	172%	23%	-45%	45%	1%	-99%	22%	-63%	-94%	-89%	6%	-98%	
FAETP inf. [kg DCB eq.]	1,00	545%	155%	-61%	-95%	-36%	389%	-99%	-45%	-81%	105%	-79%	-69%	-90%	
GWP 100 years [kg CO2 eq.]	1,00	-61%	-92%	105%	-85%	82%	51%	-99%	114%	-10%	-99%	-93%	49%	-98%	
GWP 100 years, excl biogenic carbon [kg CO2 eq.]	1,00	-61%	-93%	105%	-85%	82%	51%	-99%	114%	-10%	-99%	-93%	49%	-98%	
HTP inf. [kg DCB eq.]	1,00	19%	319%	-69%	-91%	17%	19%	-55%	37%	-57%	-54%	-42%	-42%	-10%	
MAETP inf. [kg DCB eq.]	1,00	-90%	1559%	-95%	-99%	-7%	-77%	-100%	106%	-95%	-91%	-62%	-14%	-97%	
ODP [kg R11 eq.]	1,00	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-99%	-100%	-98%	-100%	-100%	1215%	-100%	-100%	
POCP [kg Ethene eq.]	1,00	223%	234%	50%	-98%	88%	113%	-99%	36%	-39%	-95%	-73%	-20%	-99%	
TETP [kg DCB eq.]	1,00	-23%	315%	-89%	-93%	-6%	39%	-97%	51%	14%	-98%	-64%	-38%	-2%	

Ökodesign von IKT

Ökobilanzierung und Ökodesign bilden eine Einheit

5K-Methode als Leitfaden:

- **Kapazität:** Leistungsmerkmale des Produktes und der Anwendung
- **Konditionen:** Nutzungsmuster und Umfeldbedingungen im Einsatz
- **Konfiguration:** Auswahl, Dimensionierung und Modularität etc. der funktionalen Baugruppen (funktionales + technisches Design)
- **Komponenten:** Spezifikation der Bauelemente (funktionaler Integrationsgrad, technische Güte, etc.)
- **Kontrolle:** Power Management, Zustandsüberwachung, Programmierung, etc.



Vom linearen Produktlebensweg ...

... zur umfassend gedachten Kreislaufwirtschaft (circular design)

Gesetzliche Verankerung:

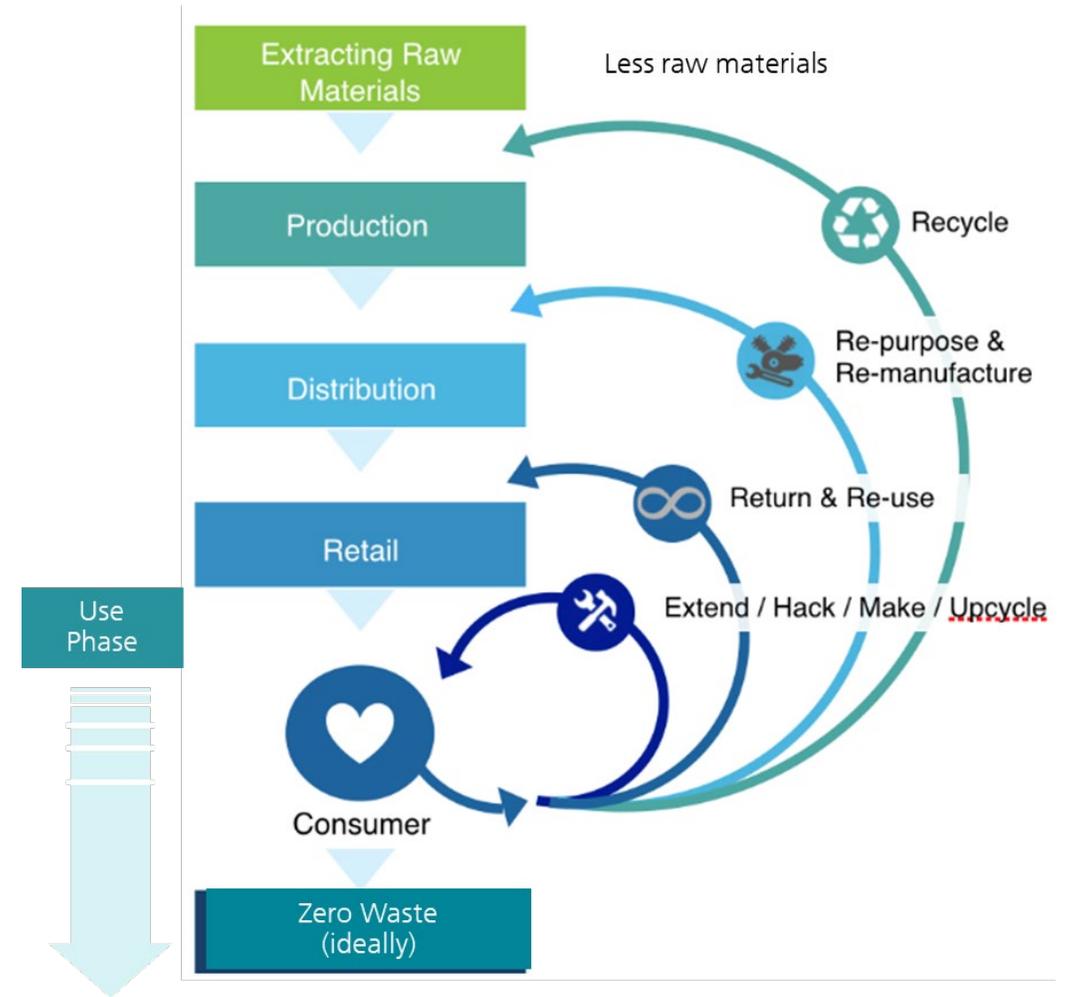
- Eco-Design for Sustainable Products Regulation (ESPR)

Globale Zielstellungen (zusätzlich zu Energie, etc.):

- Langlebigkeit (robust, reparaturfähig, upgrade)
- Lebensdauerverlängerung (Refurbishment, Reuse)
- Recycling (ohne Abfälle)
- Einsatz von Rezyklaten

Management von Zielkonflikten

- Multikriterielle Bewertung in frühen R&D Phasen



Ecodesign for Sustainable Products Regulation

Proposal for a Regulation establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC

Extended set of ecodesign requirements (Article 5):

- (a) durability (EN 45552);
- (b) reliability;
- (c) reusability (EN 45556);
- (d) upgradability;
- (e) reparability (EN 45554);
- (f) possibility of maintenance and refurbishment;
- (g) presence and declaration of substances of concern (EN 45558);
- (h) energy use or energy efficiency;
- (i) resource use or resource efficiency (EN 45559);
- (j) recycled material content (EN 45557);
- (k) possibility of remanufacturing (EN 45553);
- (l) possibility of recycling and recovery of materials (EN 45555);
- (m) environmental impacts, including carbon and environmental footprint;
- (n) expected generation of waste materials

Aktuelle Themen:

- Schnelle überschlägige Umweltwirkungsabschätzungen (in Frühphasen eines Projektes)
- Präzise multi-kriterielle Ökobilanzen (vielfältige Wirkungskategorien)
- Integration von Ökobilanzen in Technologieentwicklung und Produkt- bzw. Systemdesign
- Ökobilanzierung und Ökodesign für mehrere Produktlebenszyklen (Circular Economy)
- Harmonisierte Regeln für Produktgruppen (Product Category Rules, Test-Standards, KPIs, etc.)
- Integrierte Messtechnik, Umwelt-Performance Tracking, etc.



Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!