

# Re-Machine

## Kreislaufwirtschaft für Maschinenelemente am Beispiel von Schraubenverbindungen in Windenergieanlagen

Circular Economy Kongress, Universität des Saarlandes, 30.09.2025



Dipl.-Ing. Thomas Schwender  
M.Sc. Andrea Mroß



Dr.-Ing. Maik Dörre



Dr.-Ing. Matthias Stammer





M27

M36

M48

M64

M72

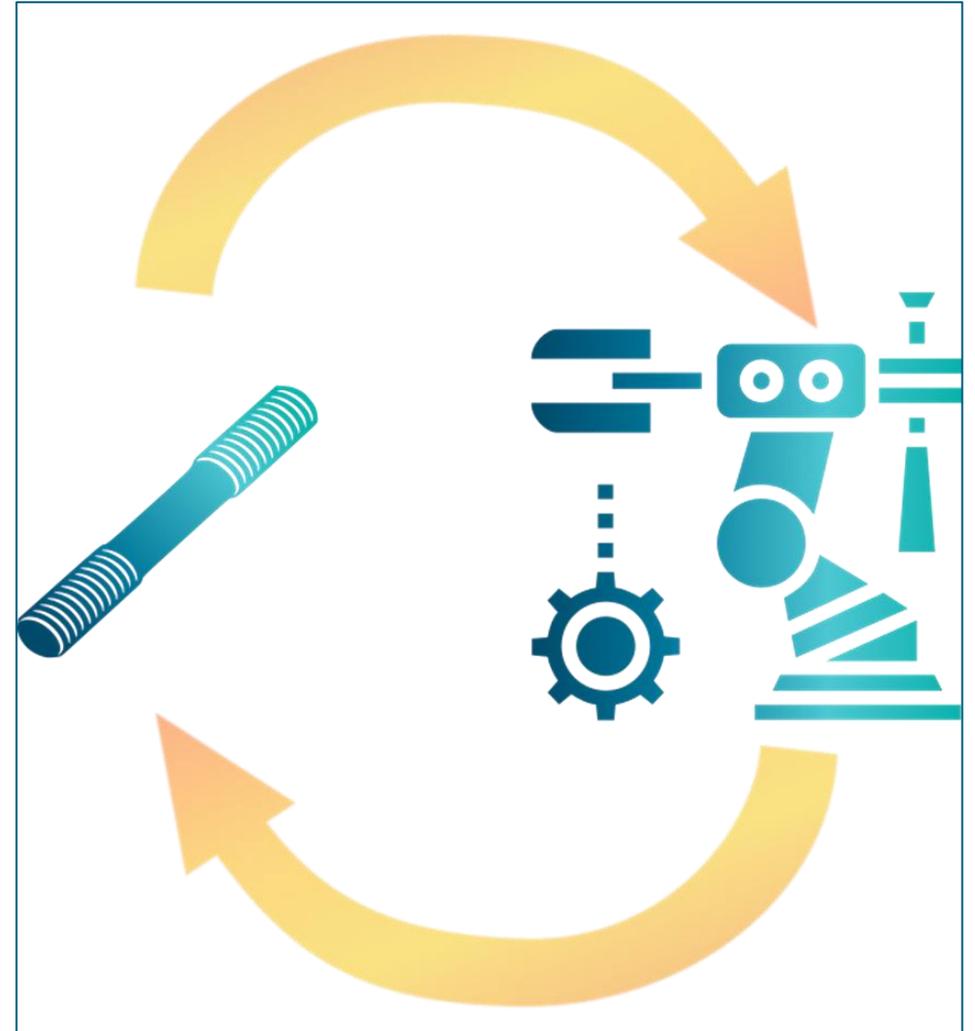
100 mm  
Fraunhofer



# Re-Machine

## Vision

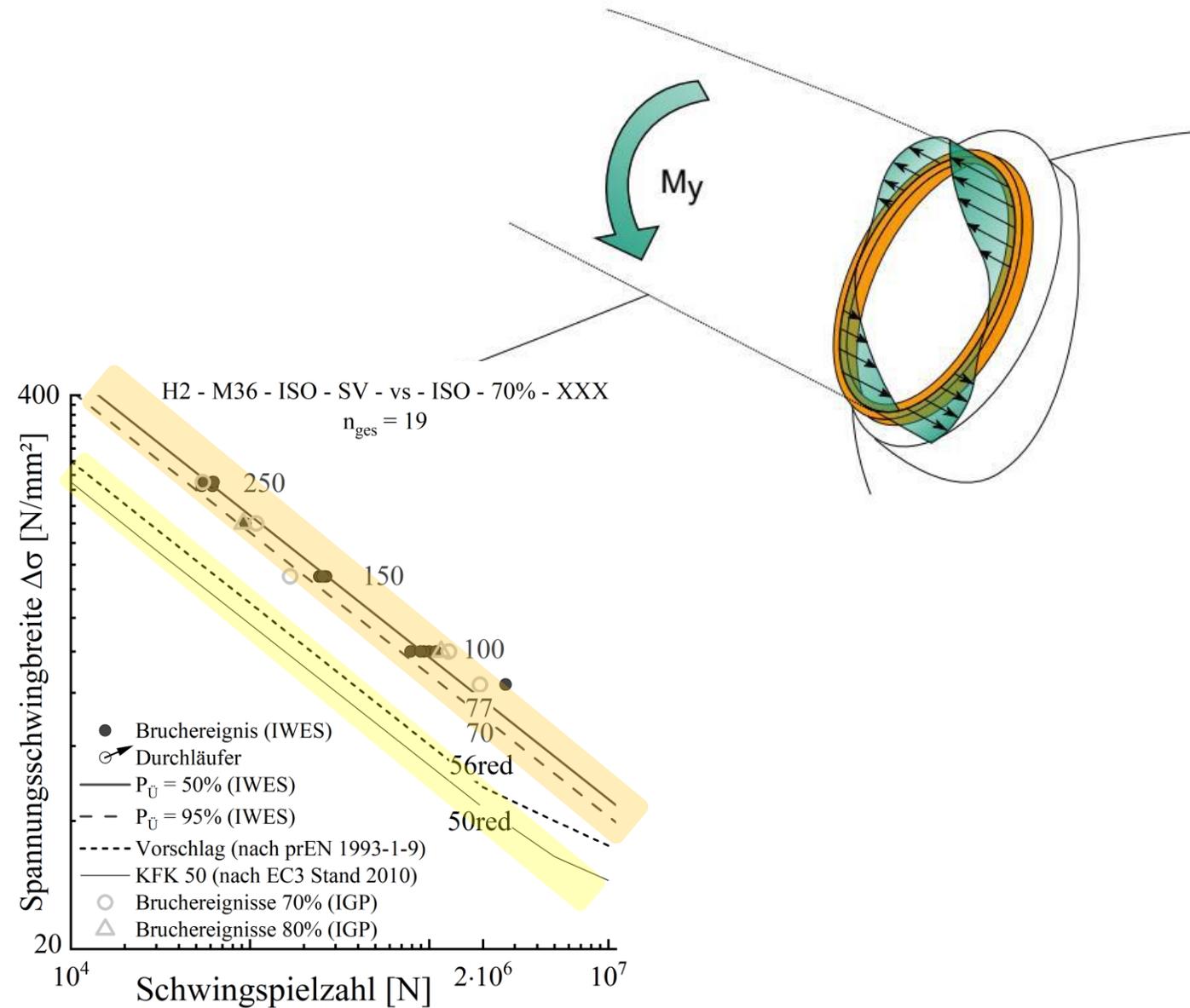
- Entwicklung eines Verfahrens, zur Evaluierung einer „gebrauchten Schraube“ zur Eignung für eine Wiederverwendung
- Kombination aus zerstörungsfreier Prüfung, physikalischem Wissen, Betriebsdaten und KI-Technologien zur Zustandsbewertung
- Transfer des Ansatzes auf weitere Maschinenelemente
- Auf den ersten Blick trivial im Detail komplex



# Re-Use Potential

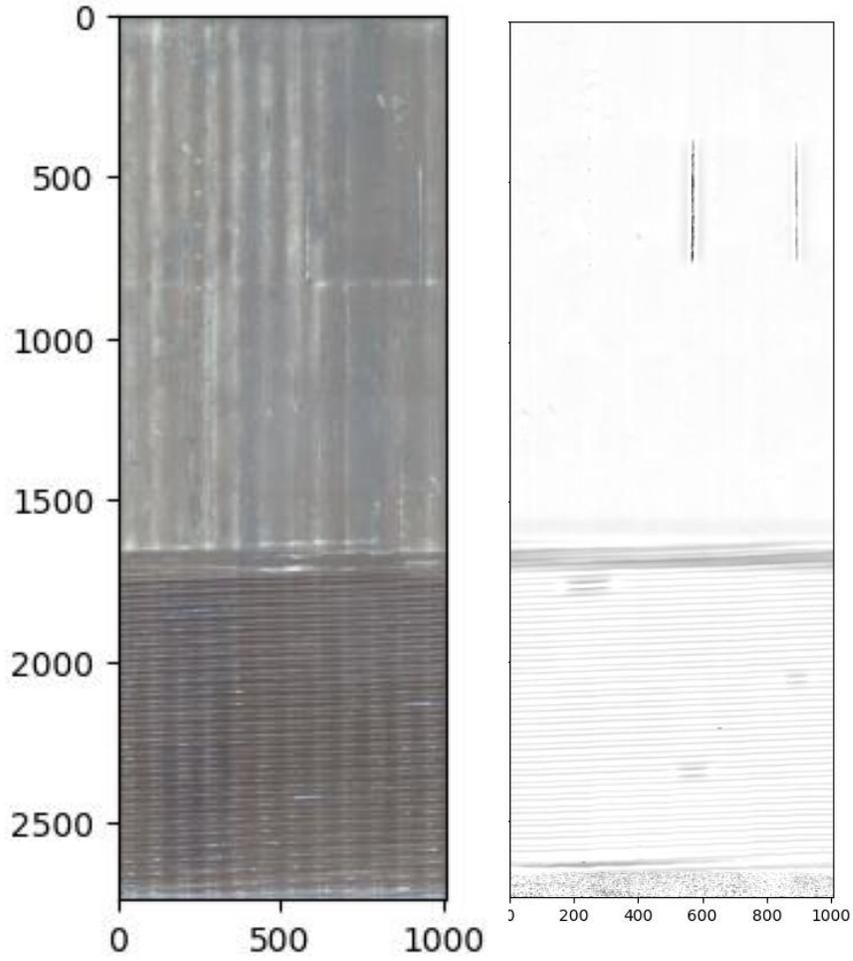
## Annahmen

- Konservative Belastungsszenarien -> Hohe Sicherheitsfaktoren
- Normative Anforderungen an Schrauben vs. Reale Festigkeitseigenschaften
- Lastverteilung in den Flanschverbindungen



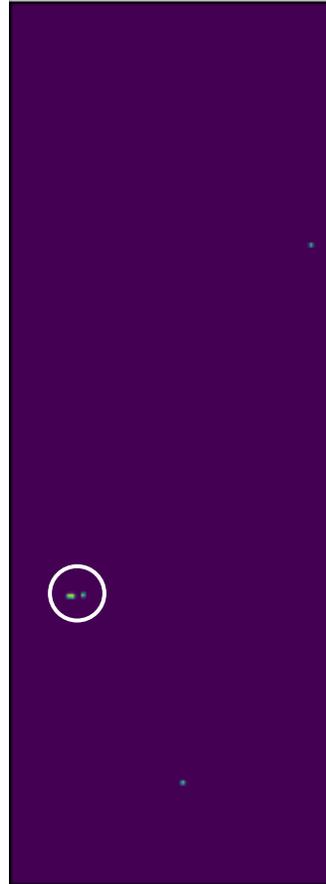
# Re-Machine

## Inspection Raw Data

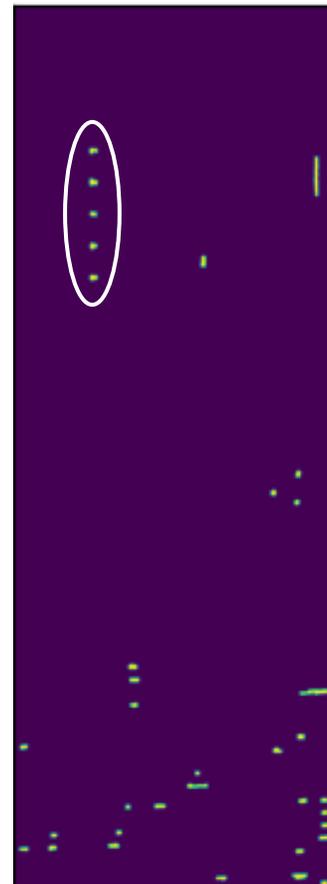


## Optical Features:

Optik\_Rust

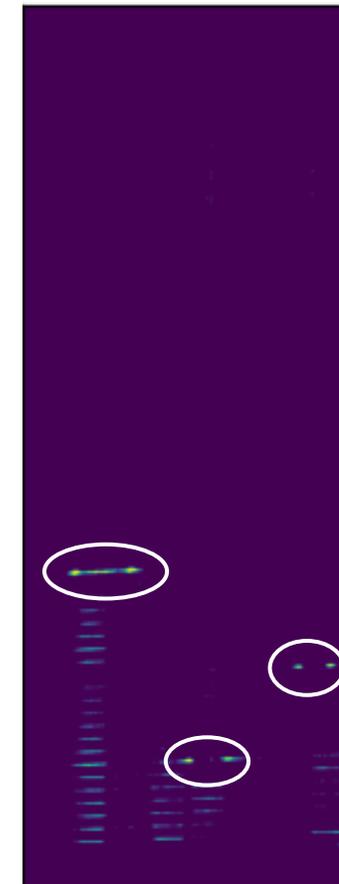


Optik\_Surface

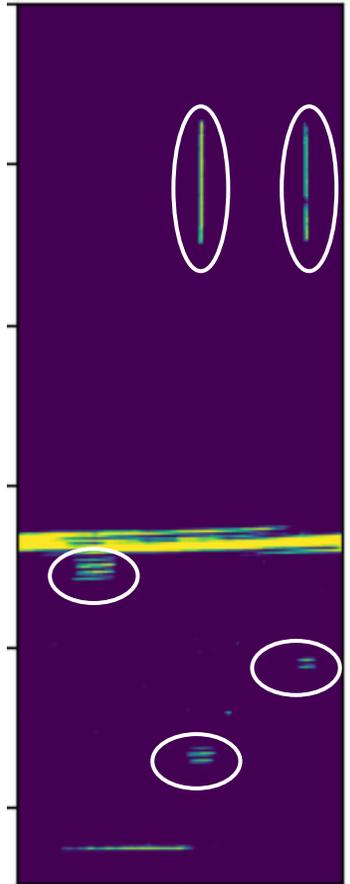


## Thermo Features:

Thermo\_Positive

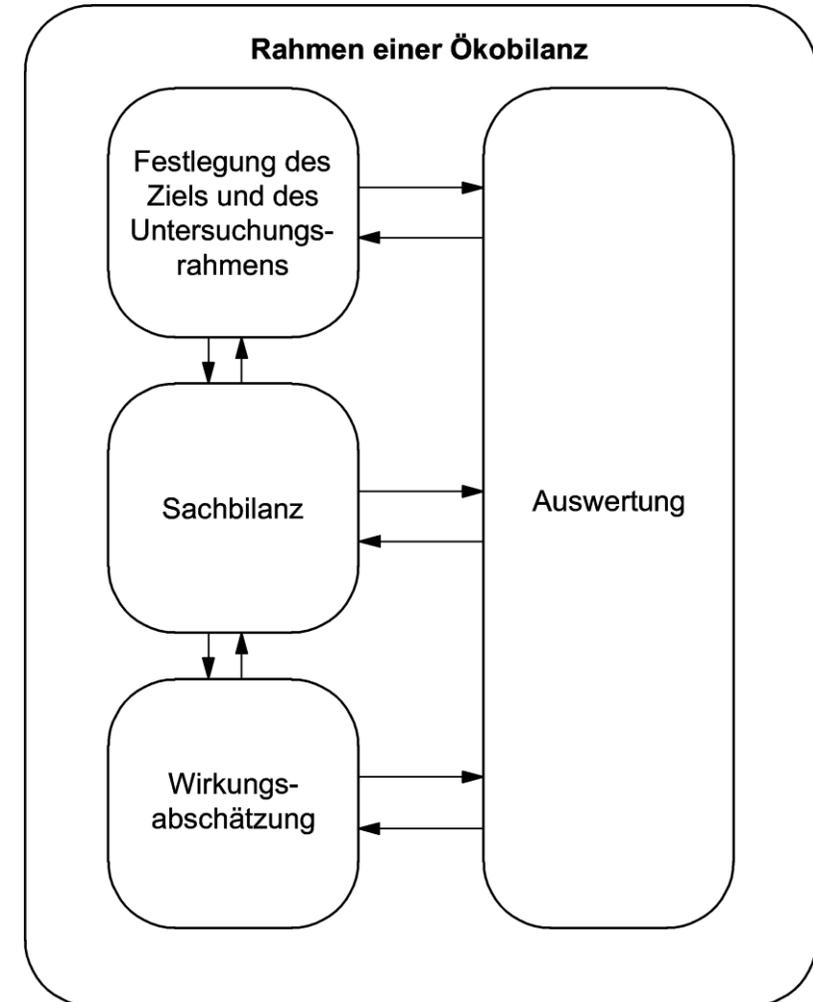


Thermo\_Negative



# Ökobilanzierung (LCA- Life Cycle Assessment) Ansatz

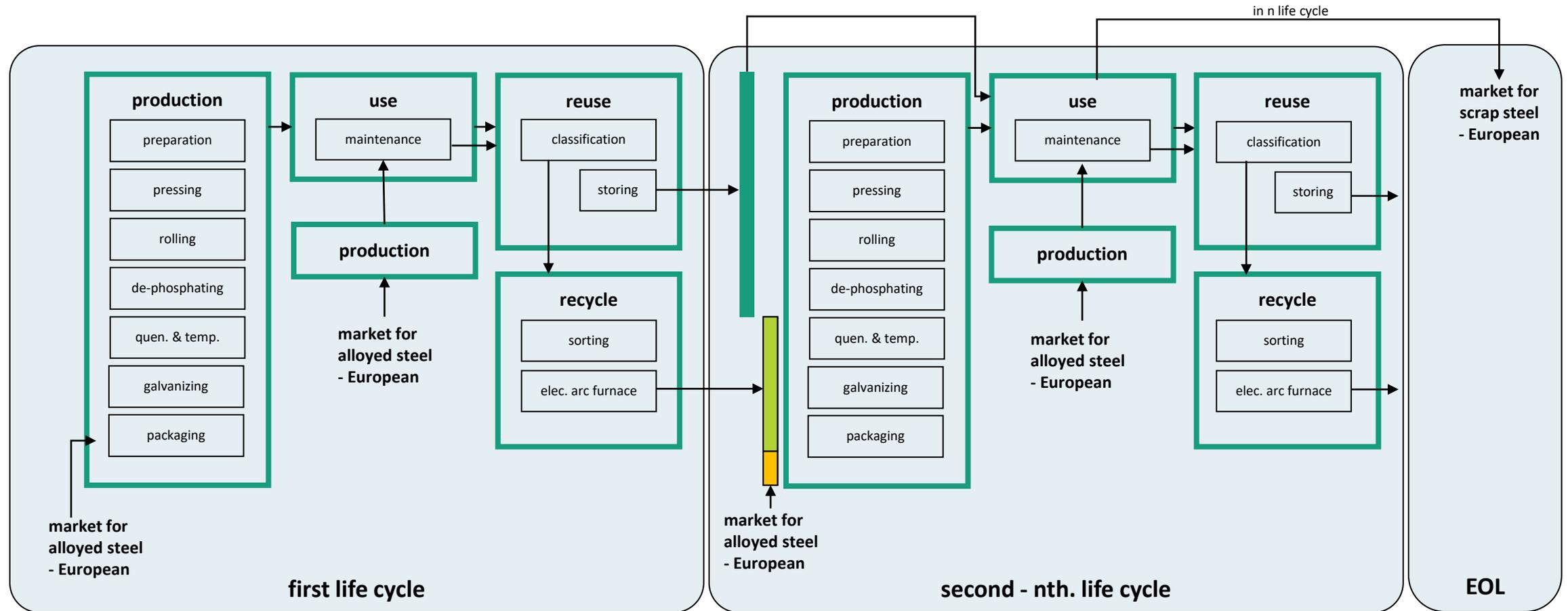
- Einfluss auf das GWP (Global Warming Potential)?
- Ab welcher Wiederverwendungsrate hat das Verfahren einen Vorteil zum bisherigen Materialkreislauf?
- Ökobilanz gemäß ISO 14044 (ISO14040, 2021, S. 17)
- Berücksichtigte Midpoint- Kategorien
  - Global Warming Potential/ Climate Change (GWP)
  - Human Carcinogenic Ecotoxicity (HTPc)
  - Marine Ecotoxicity (MEPT)
  - Freshwater Ecotoxicity (FEPT)



DIN EN ISO 14040, Februar.2021

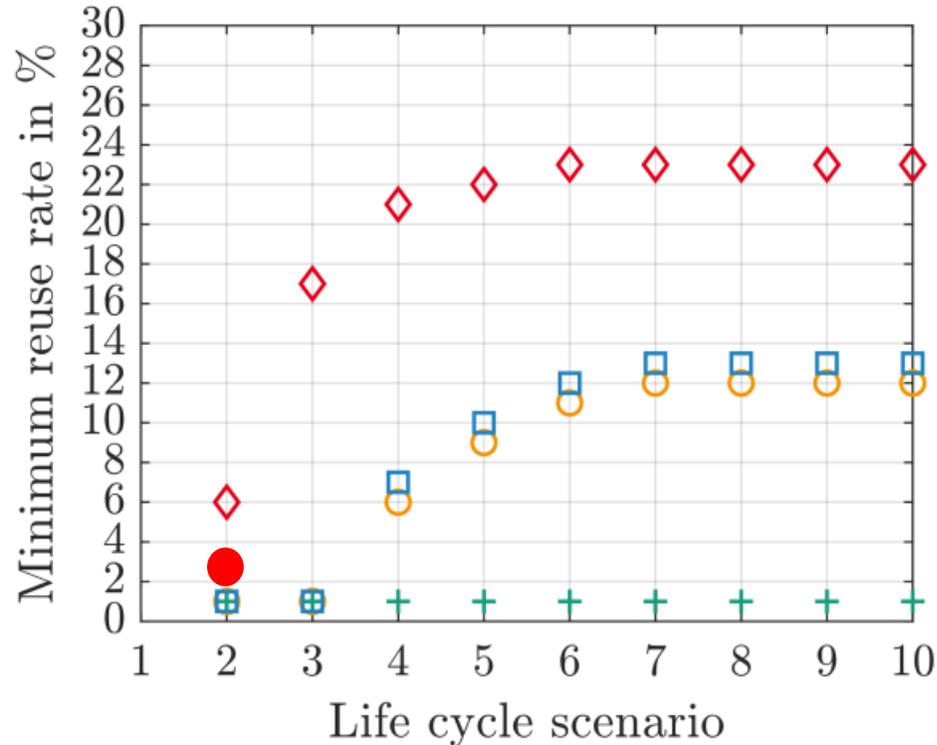
# Ökobilanzierung

## Flowchart of bolt re-use model



# Ökobilanzierung

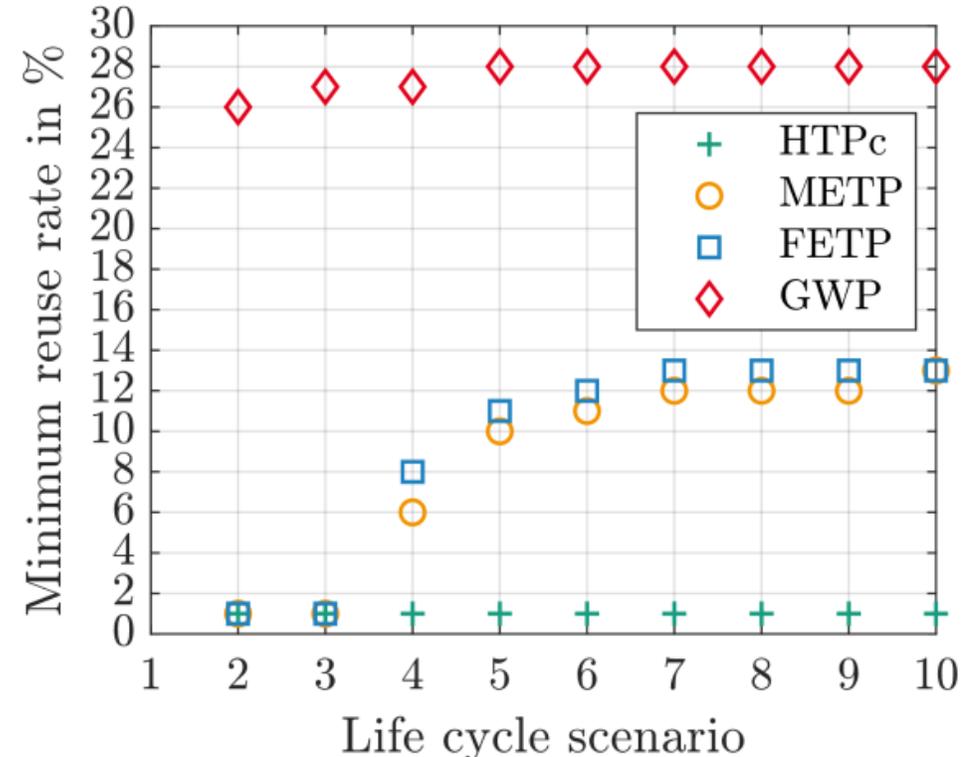
## Break-even Ergebnisse für Recycling- und Re-use-Szenario



**Szenario:**

EAF (Lichtbogenofen) verwendet  
aktuellen deutschen Strommix  
2024

- Minimum GWP reuse rate 2LC: **6%**
- Minimum GWP reuse rate 5LC: **22%**



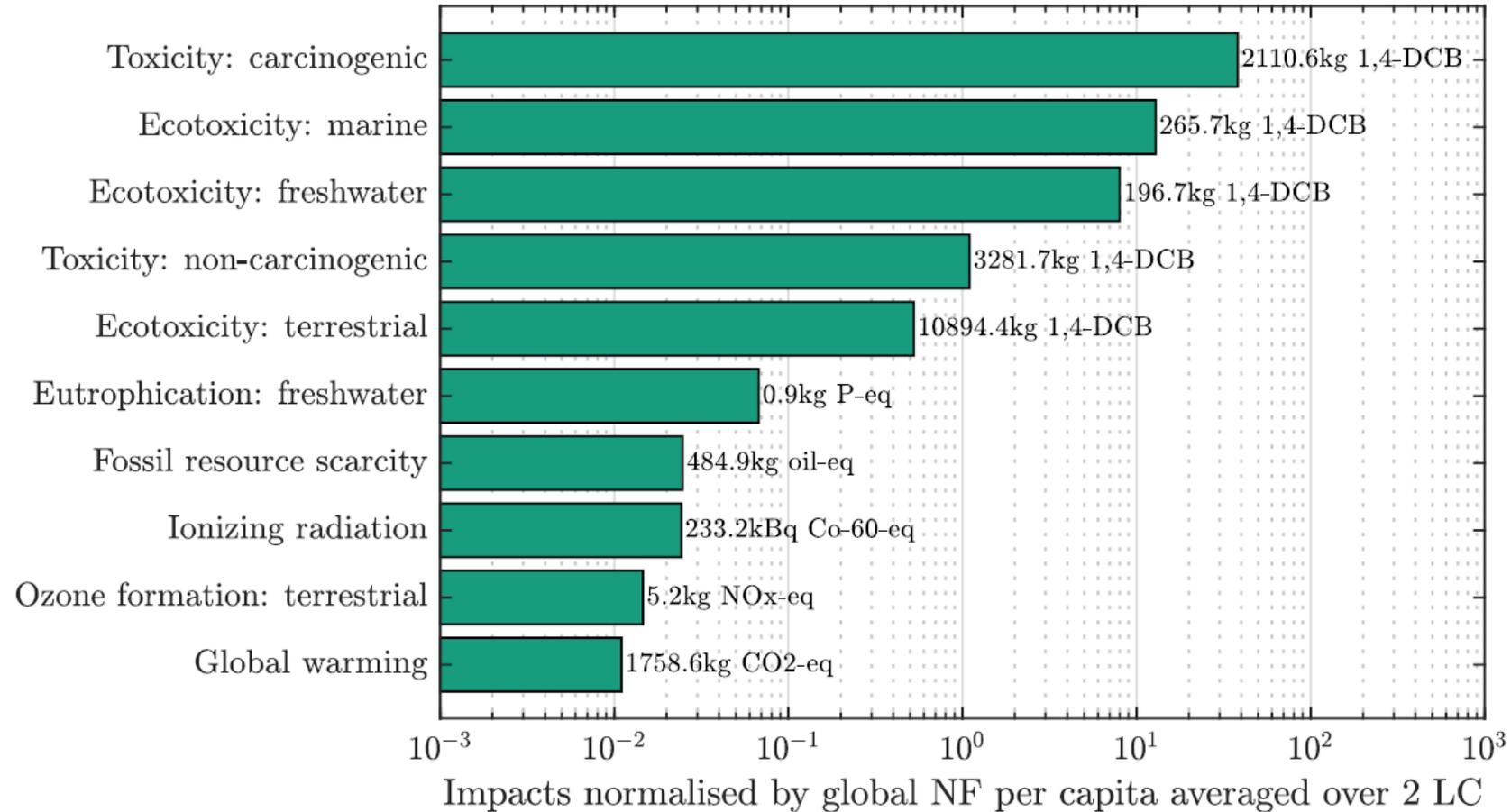
**Szenario:**

EAF (Lichtbogenofen) verwendet  
100% erneuerbare Energien

- Minimum GWP reuse rate 2LC: **26%**
- Minimum GWP reuse rate 5LC: **28%**

# Ökobilanzierung

## Die zehn höchsten Beiträge zur Umwelt



Normalisierung der Auswirkungen auf einen Menschen über ein Jahr

# Ökobilanzierung

## Zusammenfassung

---

- CO<sub>2</sub>-Äquivalent beträgt für ein Lebenszyklus-Szenario das 4,4-fache der Masse der Schraube
- CO<sub>2</sub>-Äquivalent für ein Szenario mit zwei Lebenszyklen und geschlossenem Kreislauf beträgt 2,6-mal die Masse der Schraube
- CO<sub>2</sub>-Äquivalent für ein Zwei-Lebenszyklus-Szenario mit 50 % wiederverwendeten Schrauben und geschlossenem Recyclingkreislauf beträgt 2,3 Mal der Masse der Schraube
- Min. Reuse rate in einem Szenario mit zwei Lebenszyklen beträgt 6 %, (nach Reduktion des Energiebedarf bei der Prüfung ~ 2 %)
- GWP für ein Szenario mit zwei Lebenszyklen und geschlossenem Kreislauf, das die Fahrwege um 100 km reduziert: -5 % des gesamten CO<sub>2</sub>-eq
- Normalisierter HTPc ist 7.400 Mal höher als GWP: Gefahr der Problemverlagerung

# Markt & Geschäftsmodelle

- Markt existiert noch nicht
- Keine Erfahrung
- Hohes Maß an Unsicherheit

# Markt & Geschäftsmodelle

## Ausgangssituation

### Chancen

- **Profit**
- **Regulierung (z.B. CBAM)**
- **Energiepreise**
- **Rohstoffpreise**
- **Reduktion von Lieferzeiten**

### Risiken

- **Keine Erfahrung zum Bruchverhalten**
- **Keine Standards die Re-Use beschreiben**
- **Akzeptanz**
- **Logistischer Aufwand und Abhängigkeiten**
- **Komplexität der Technologie**

# Markt & Geschäftsmodelle

## Modell/ Player

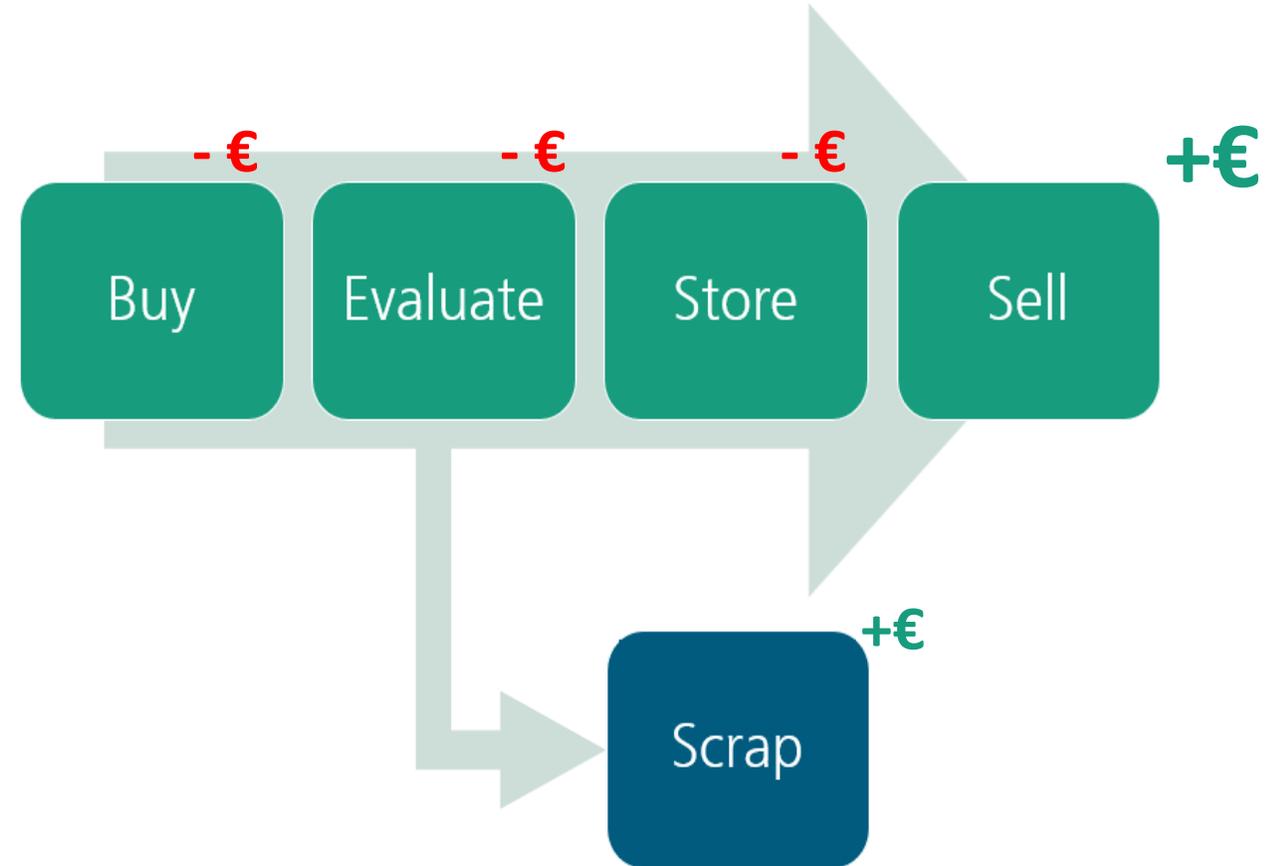
### Unternehmen für Verbindungselemente

#### Aktuelles Modell

- Kauft und verkauft Schrauben
- Kleines Lagervolumen für „kleine“ Schrauben, „große“ Verbindungen müssen beim Hersteller in Auftrag gegeben werden

#### Erweiterung des Business

- Kauft demontierte Schrauben, prüft sie auf Wiederverwendbarkeit und Verkauft sie wieder an Betreiber oder Lagert sie ein



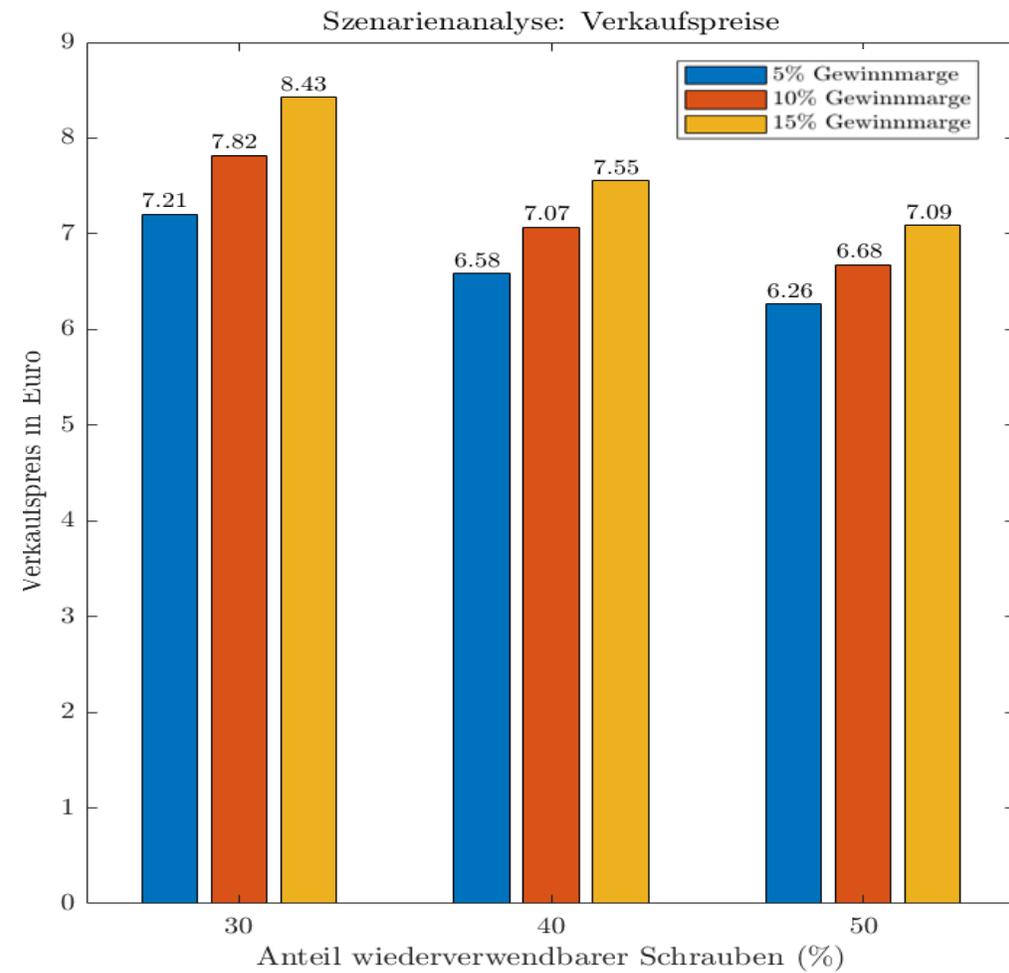
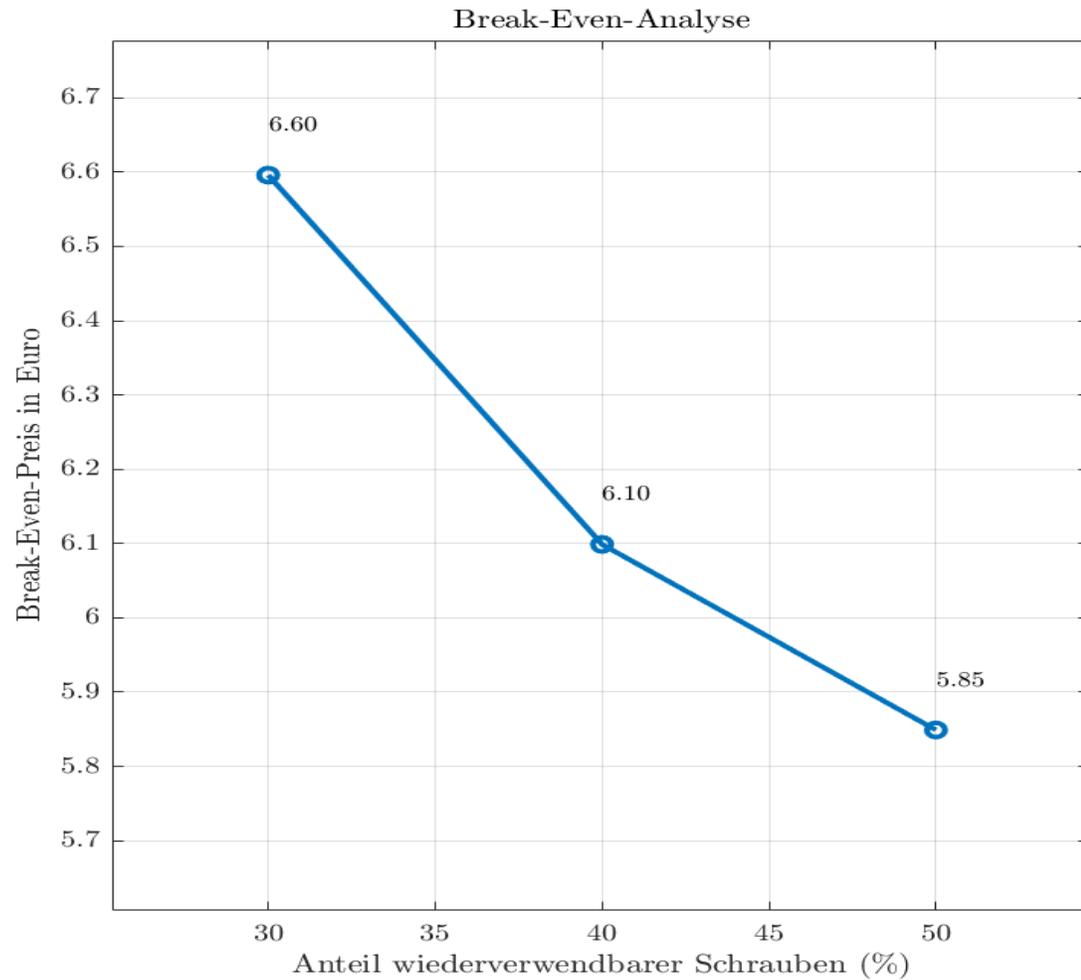
## Markt & Geschäftsmodelle

- Kalkulation für deutsche Windparks
- Standortwahl Hamburg und Hannover

| Description  | Value            | Unit             |
|--|------------------|------------------|
| Bolt sizes   | M36 and bigger   | -                |
| Average bolt weight  | 4                | kg               |
| Average bolts per wind turbine                               | 3000             | pieces           |
| Reuse rate   | 30, 40, 50       | %                |
| Bolts per pallet<br>(transport from wind park to storehouse) | 250              | pieces           |
| Pallets per cargo truck                                      | 12               | pieces           |
| Average trucking costs                                       | 1.50             | €/km             |
| Bolts per pallet (in storehouse, sorted)                     | 80               | pieces           |
| Storehouse locations   | Hamburg, Hanover | -                |
| Rent Hamburg   | 7.07             | €/m <sup>2</sup> |
| Rent Hanover   | 6.03             | €/m <sup>2</sup> |
| Average distance wind parks – Hamburg                        | 299              | km               |
| Average distance wind parks – Hanover                        | 198              | km               |
| Storehouse capacity  | 500,000          | bolts            |
| Storehouse area  | 3157             | m <sup>2</sup>   |
| Storehouse handling cost per pallet                          | 5.00             | €/activity       |
| License cost per evaluation                                  | 0.10             | €                |
| Steel scrap price  | 600              | €/ton            |
| Monthly sales  | 10,000           | bolts            |

# Markt & Geschäftsmodelle

## Szenarien Analyse Lager in Hamburg



# Markt & Geschäftsmodelle

## Ergebnisse

- Stückkosten (Re-Use)

| Location | Re-usable bolts |        |        |
|----------|-----------------|--------|--------|
|          | 30%             | 40%    | 50%    |
| Hamburg  | 7.12 €          | 6.58 € | 6.14 € |
| Hanover  | 6.29 €          | 5.81 € | 5.41 € |

- Preise für neuwertige Schrauben(Hamburg Large Bearing Laboratory)

| Year | Dimensions | Units | Price per unit |
|------|------------|-------|----------------|
| 2020 | M42 * 450  | 320   | 4,34 €         |
| 2020 | M42*491    | 120   | 23,24 €        |
| 2020 | M42 *661   | 65    | 31,54 €        |
| 2021 | M36 * 660  | 220   | 114,08 €       |
| 2023 | M42*420    | 90    | 17,39 €        |
| 2023 | M36*780    | 75    | 23,89 €        |

Angebotspreise einer aktuellen (06.2025) Anfrage:

140 Stück Garnitur M36 \* 280 ~ 27 €/Stück (LZ 13 Wochen)

140 Stück Garnitur M36 \* 280 ~ 65 €/Stück (LZ 10 Wochen)

140 Stück Garnitur M36 \* 280 ~ 79 € /Stück (LZ 6 Wochen)

# Markt & Geschäftsmodelle

## Zusammenfassung

---

- für **Reparaturszenarien** ist der Handel mit gebrauchten Schrauben ein **vielversprechendes Geschäftsmodell**
- bereits **moderate Wiederverwendungsraten** bieten **deutliche Vorteile**
- Durchschnittspreis für **neue Schrauben**, insbesondere bei **kurzfristigen Wartungsaufträgen**, liegt etwa **15,25 € pro Stück**. Selbst bei konservativen Szenarien, wie einer **Wiederverwendungsrate von 30 %** und einer **Gewinnmarge von 15 %**, ist der Verkaufspreis mit etwa **7,54 € pro Stück rund 50 % günstiger** als der Preis neuer Schrauben
- **Vorteile** durch:
  - durch Skaleneffekte/ Lieferzeiten
  - Flexibilität in der Preisgestaltung
  - Unterschiede zu den Kosten neuer Schrauben

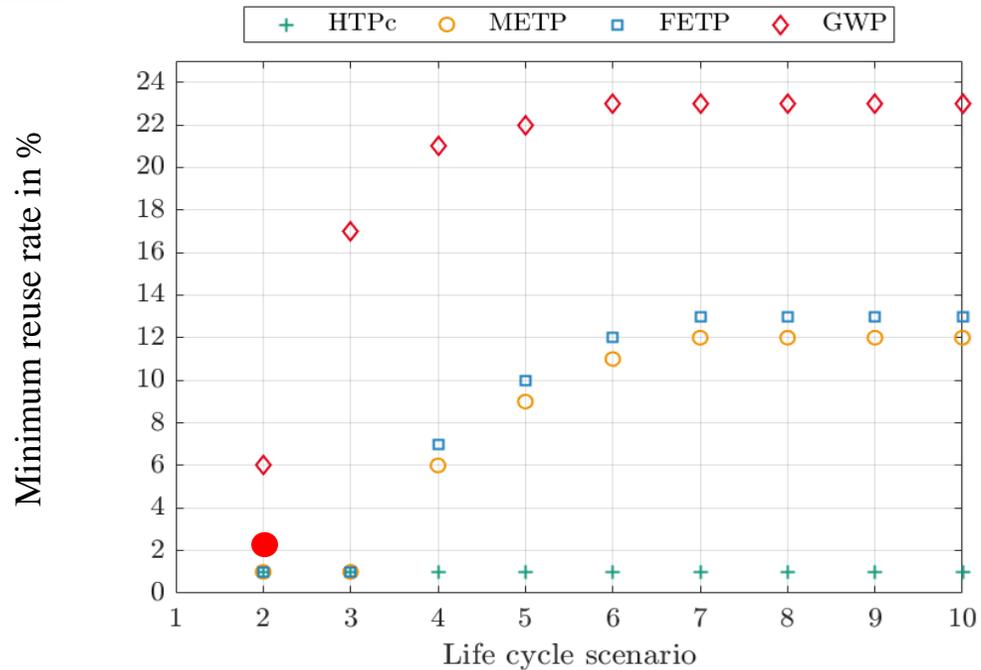
Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit

---



# Ökobilanzierung

## Break-even Ergebnisse für Recycling- und Reuse-Szenario

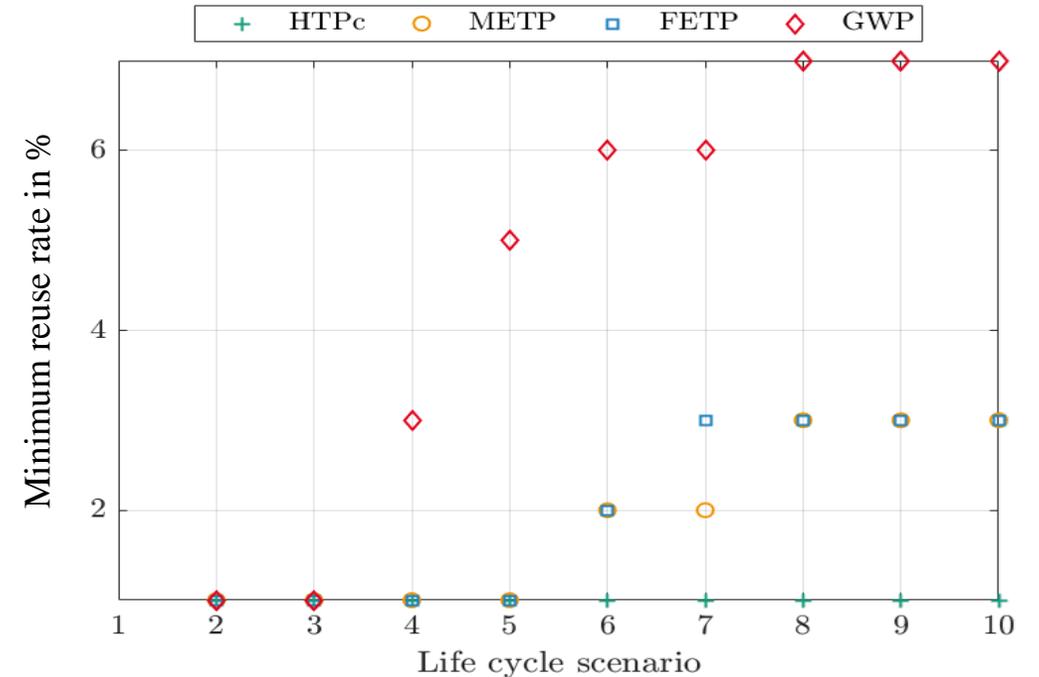


### Szenario:

EAF (Lichtbogenofen) verwendet  
aktuellen deutschen Strommix  
2024

### Stand Anfang 2024

- Minimum GWP reuse rate 2LC: **6%**
- Minimum GWP reuse rate 5LC: **22%**



### Szenario:

EAF (Lichtbogenofen) verwendet  
aktuellen deutschen Strommix  
2024

### Anpassung Energieverbrauch

- Minimum GWP reuse rate 2LC: **2%**
- Minimum GWP reuse rate 5LC: **5%**