

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

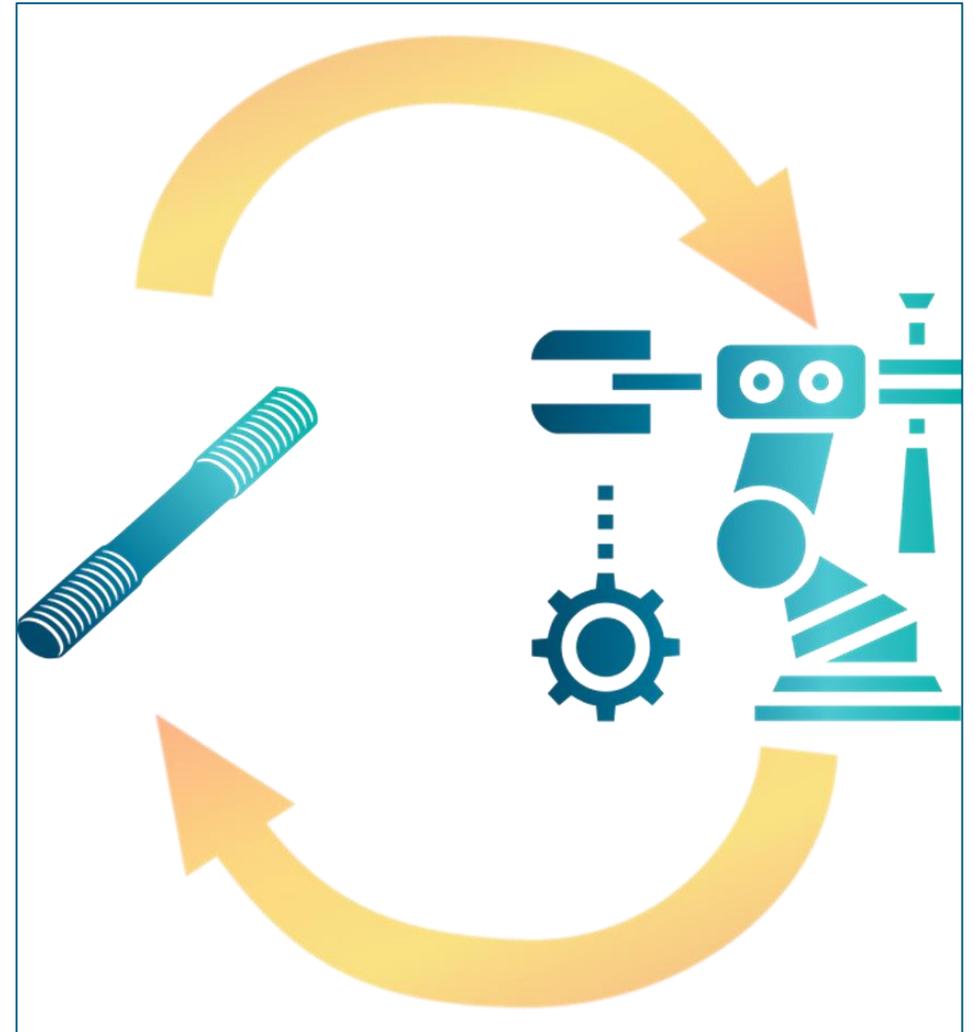
100 mm
Fraunhofer



Re-Machine

Vision

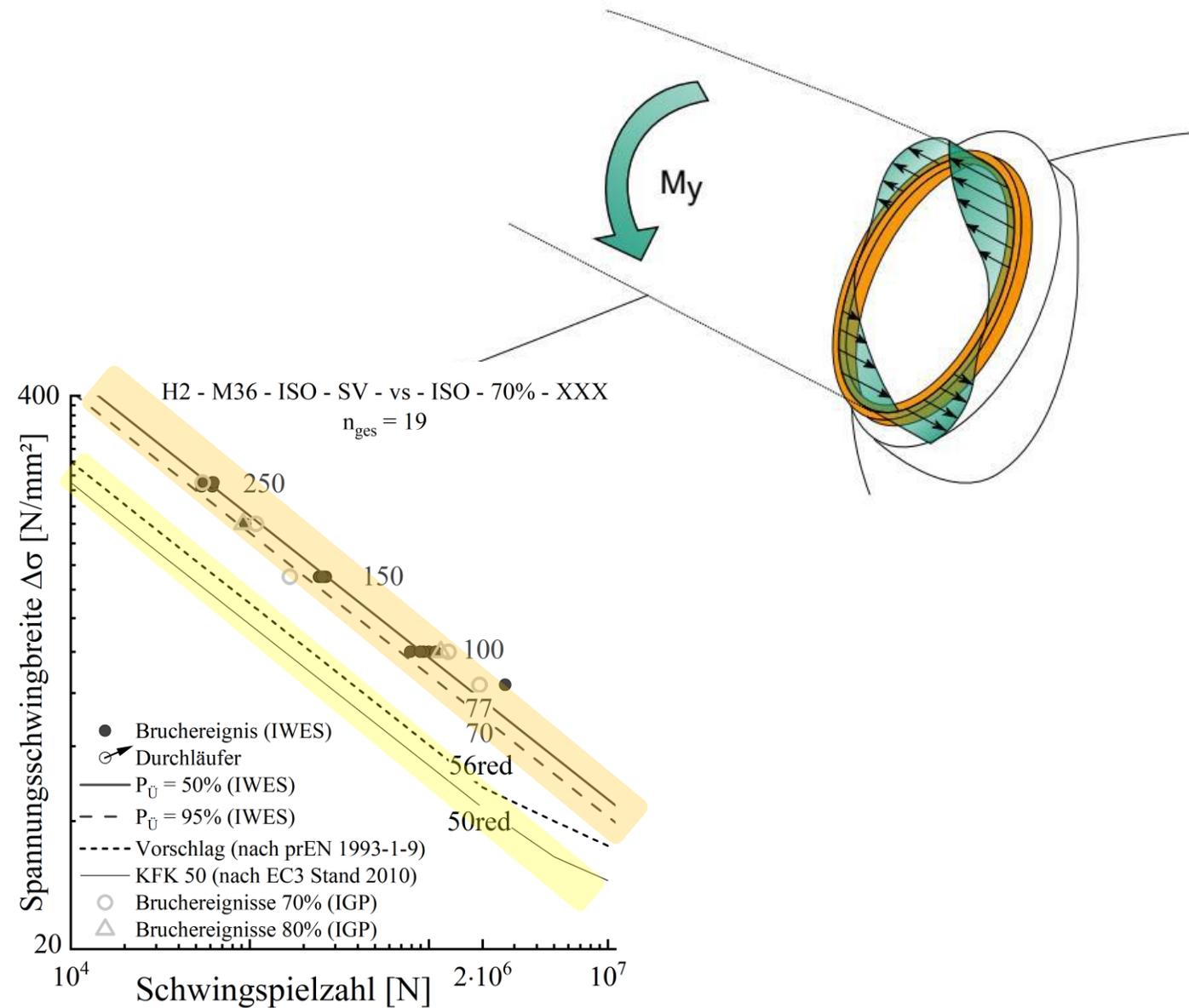
- Entwicklung eines Verfahrens, zur Evaluierung einer „gebrauchten Schraube“ zur Eignung für eine Wiederverwendung
- Kombination aus zerstörungsfreier Prüfung, physikalischem Wissen, Betriebsdaten und KI-Technologien zur Zustandsbewertung
- Transfer des Ansatzes auf weitere Maschinenelemente
- Auf den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



Re-Use Potential

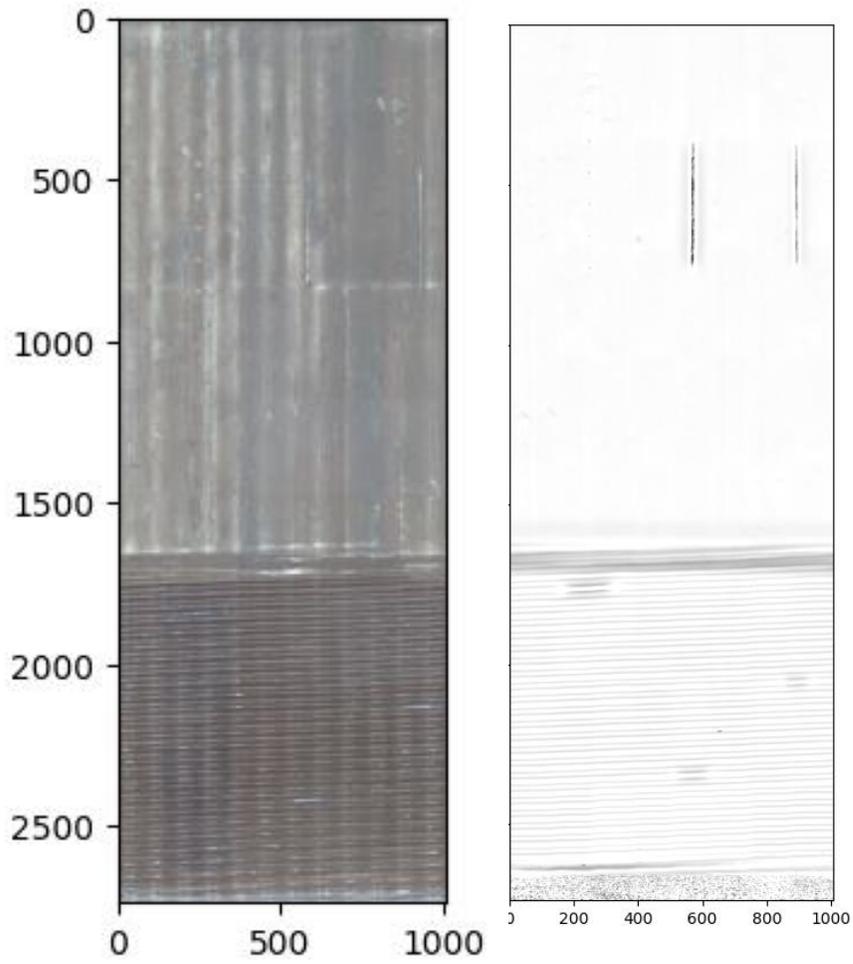
Annahmen

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



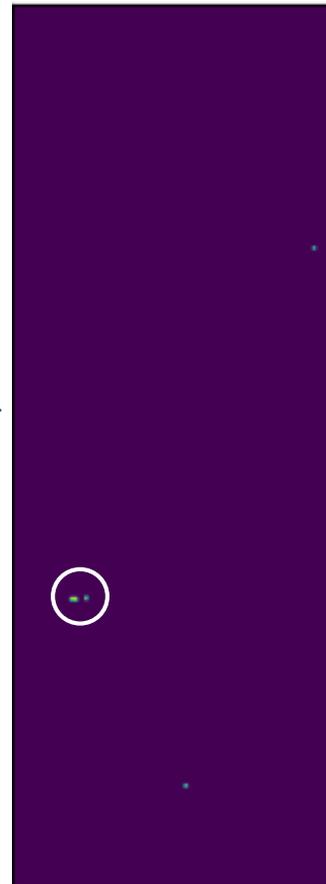
Re-Machine

Inspection Raw Data

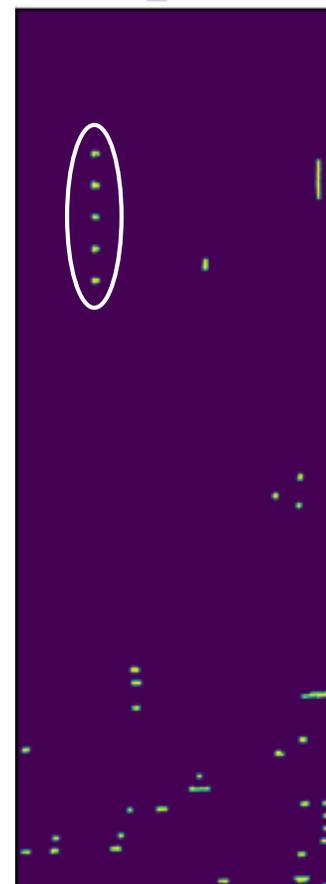


Optical Features:

Optik_Rust

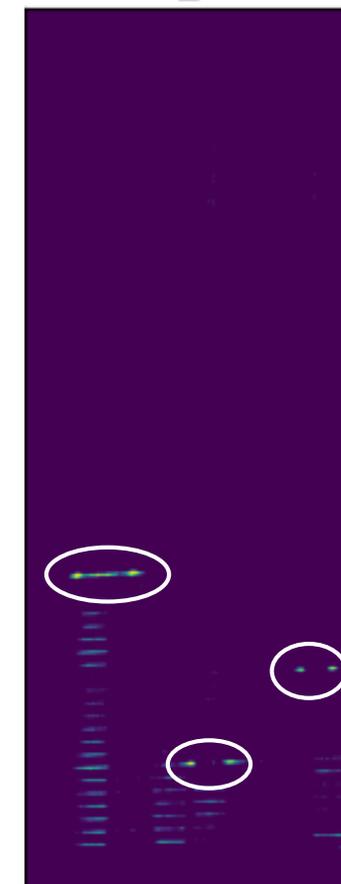


Optik_Surface

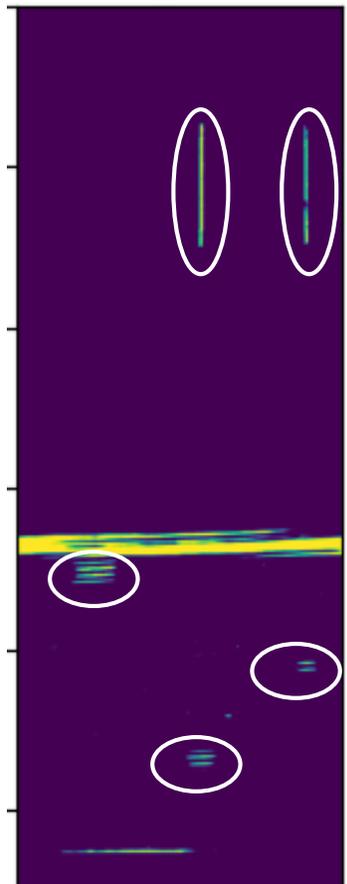


Thermo Features:

Thermo_Positive



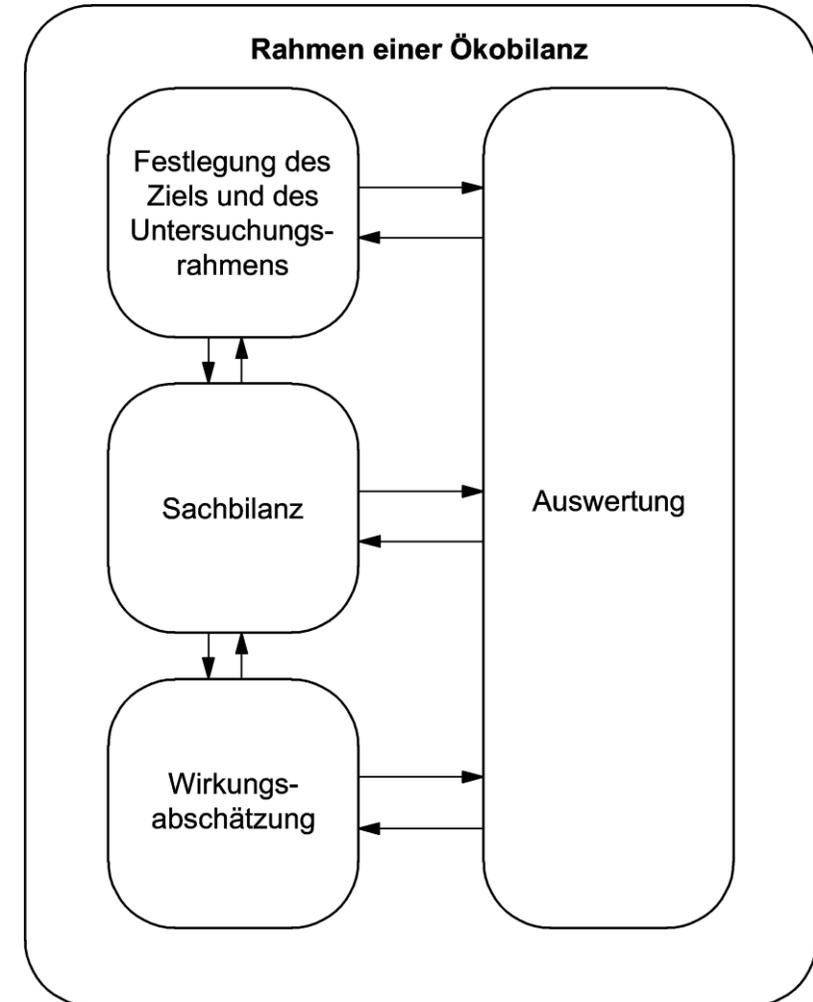
Thermo_Negative



Ökobilanzierung (LCA- Life Cycle Assessment)

Ansatz

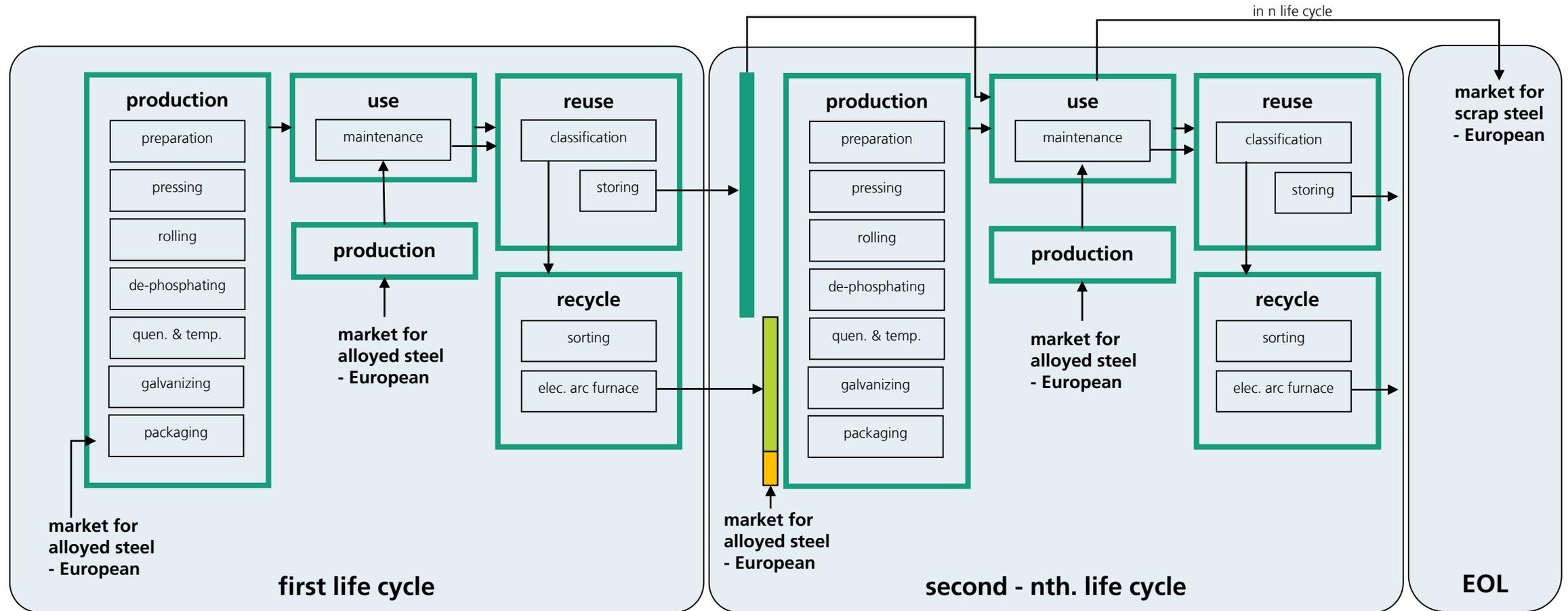
- Einfluss auf das GWP (Global Warming Potential)?
- Ab welcher Wiederverwendungsrate hat das Verfahren einen Vorteil zum bisherigen Materialkreislauf?
- Ökobilanz gemäß ISO 14044 (ISO14040, 2021, S. 17)
 - Berücksichtigte Midpoint- Kategorien
 - Global Warming Potential/ Climate Change (GWP)
 - Human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



DIN EN ISO 14040, Februar.2021

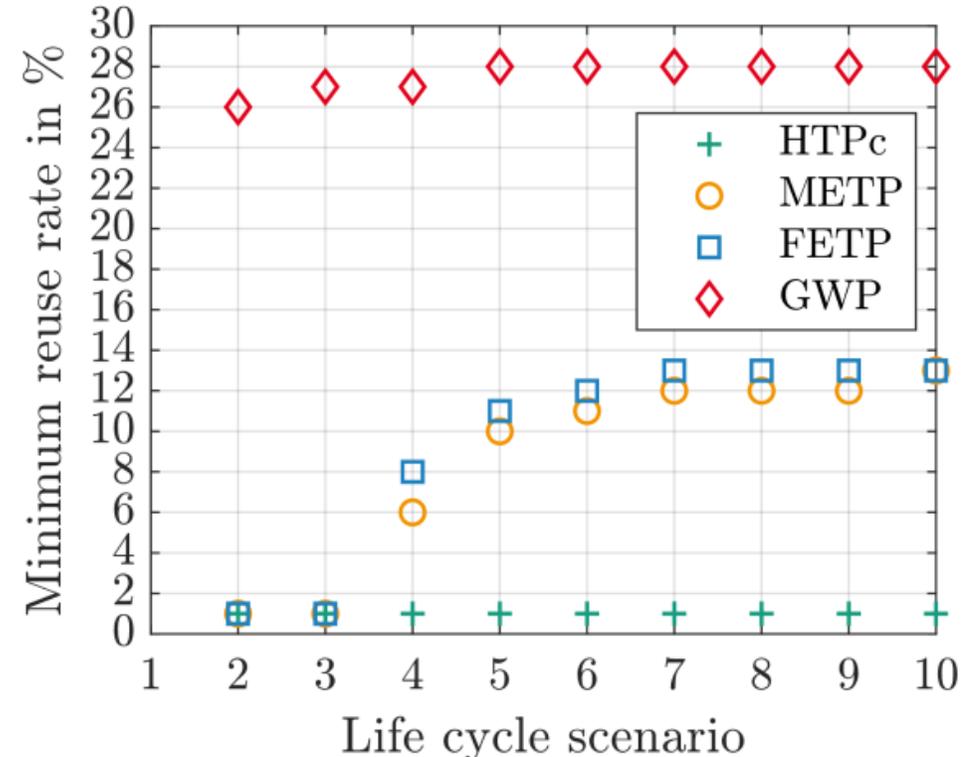
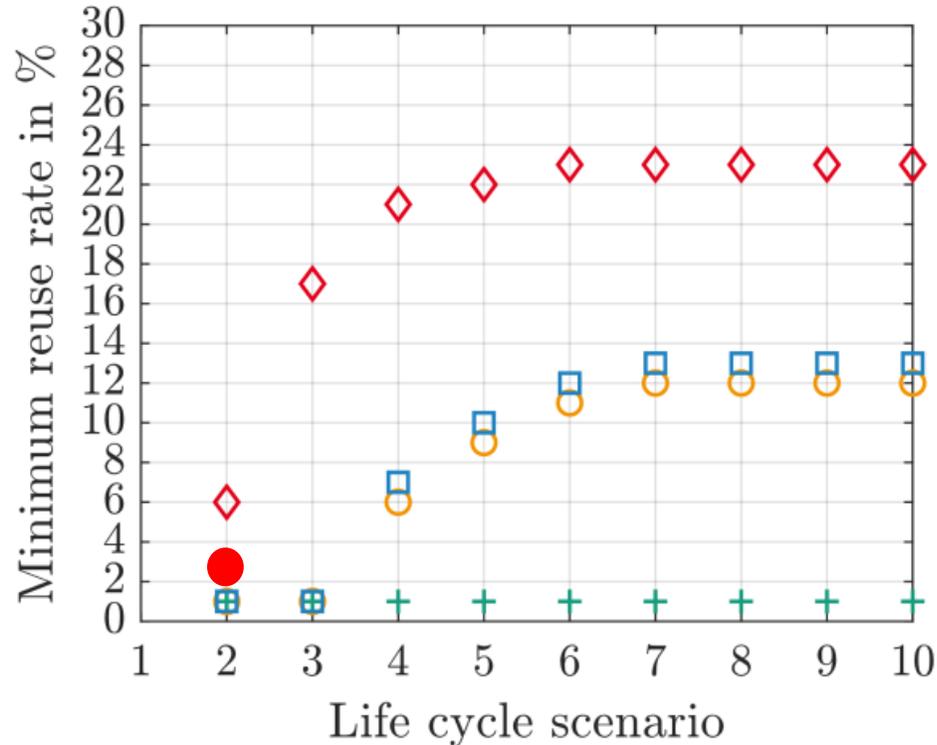
Ökobilanzierung

Flowchart of bolt re-use model



Ökobilanzierung

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



Szenario: EAF (Lichtbogenofen) verwendet aktuellen deutschen Strommix 2024

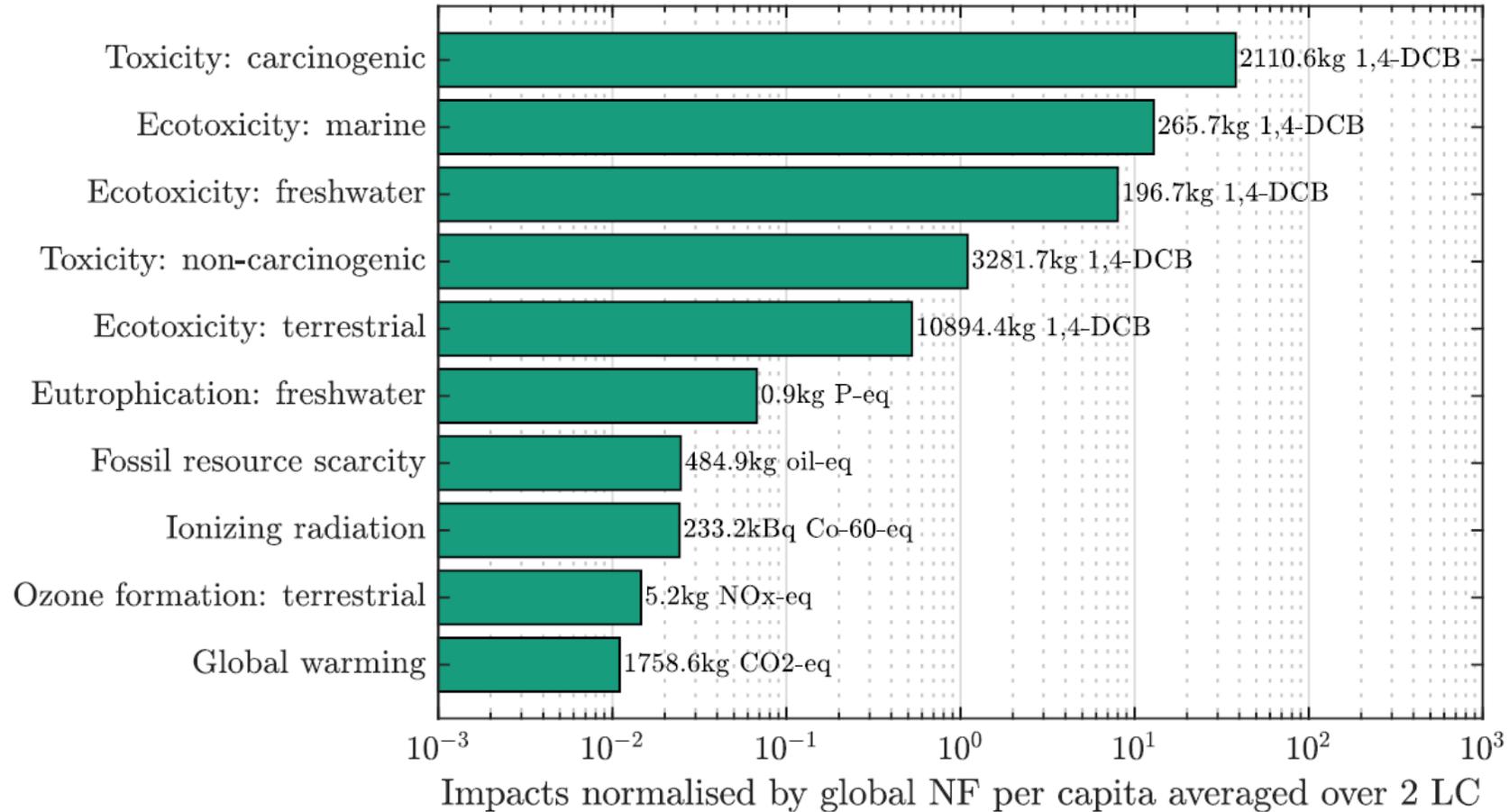
- Minimum GWP reuse rate 2LC: **6%**
- Minimum GWP reuse rate 5LC: **22%**

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

- CO₂-Äquivalent beträgt für ein Lebenszyklus-Szenario das 4,4-fache der Masse der Schraube
- CO₂-Äquivalent für ein Szenario mit zwei Lebenszyklen und geschlossenem Kreislauf beträgt 2,6-mal die Masse der Schraube
- CO₂-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 CO₂-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)
- Steigende Energiepreise
- Steigende 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

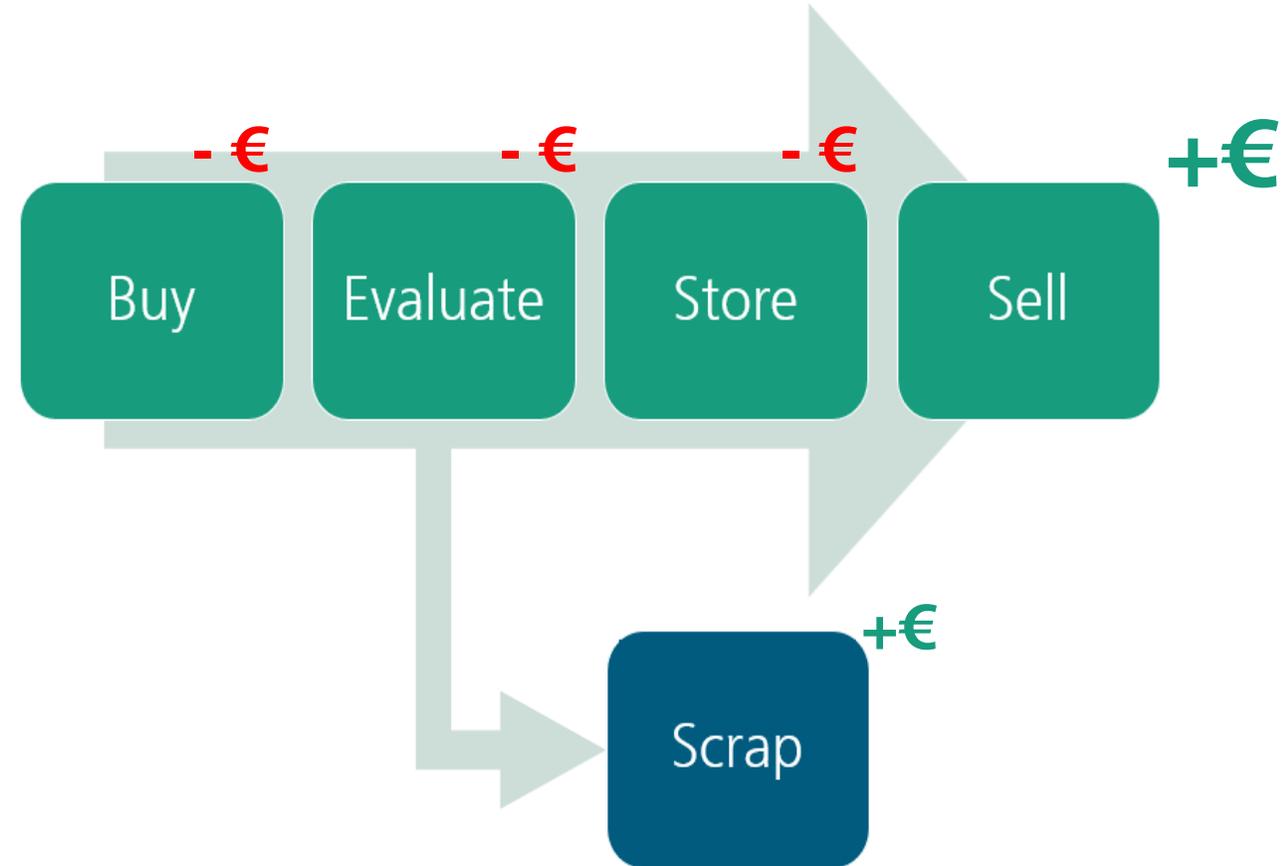
Unternehmen für Verbindungselemente

Aktuelles Modell

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

Erweiterung des Business Cases

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



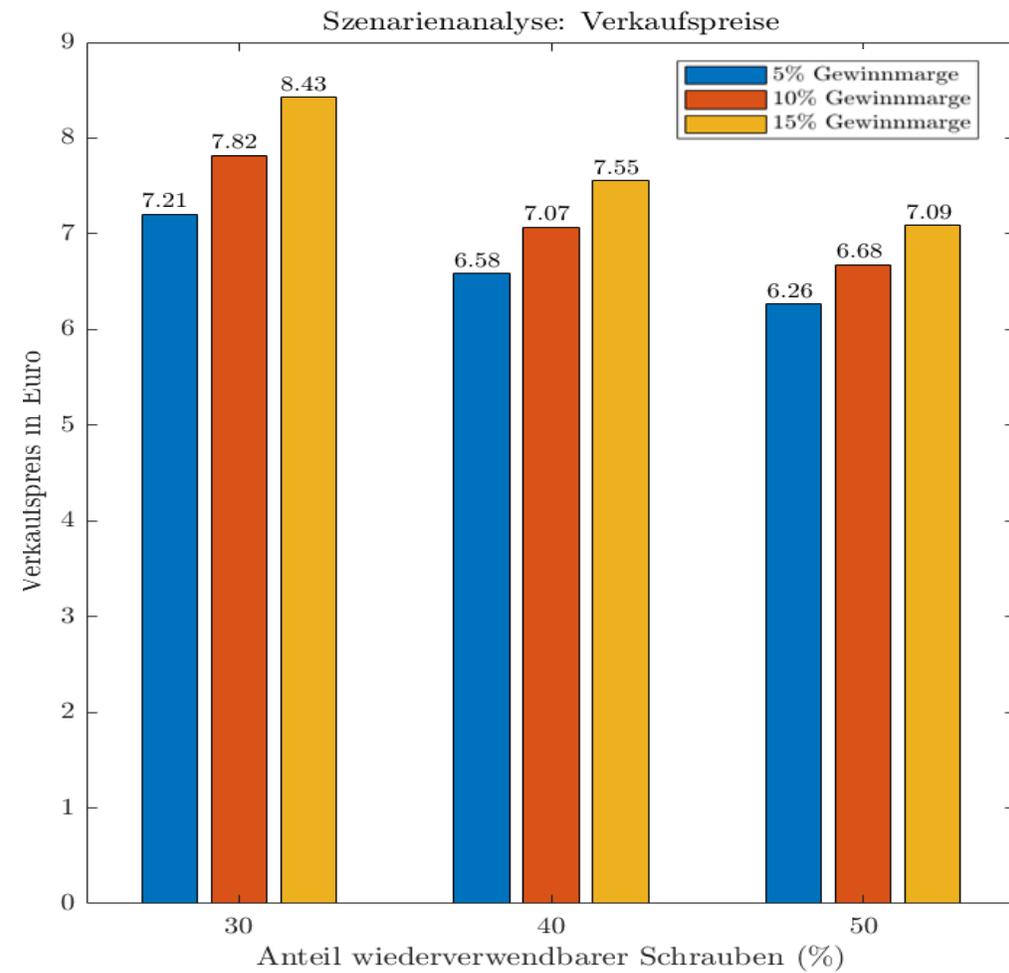
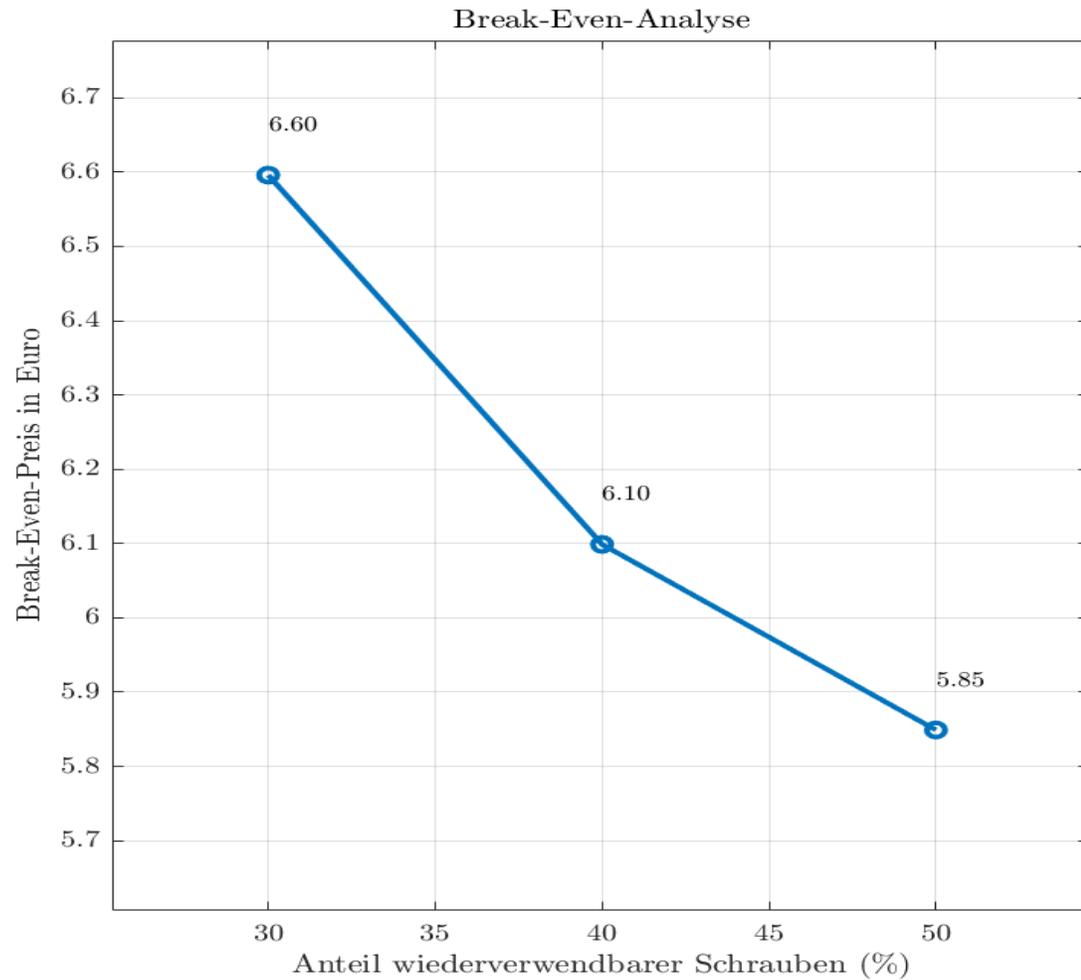
Markt & Geschäftsmodelle

- 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 (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 ²
Rent Hanover	6.03	€/m ²
Average distance wind parks – Hamburg	299	km
Average distance wind parks – Hanover	198	km
Storehouse capacity	500,000	bolts
Storehouse area	3157	m ²
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

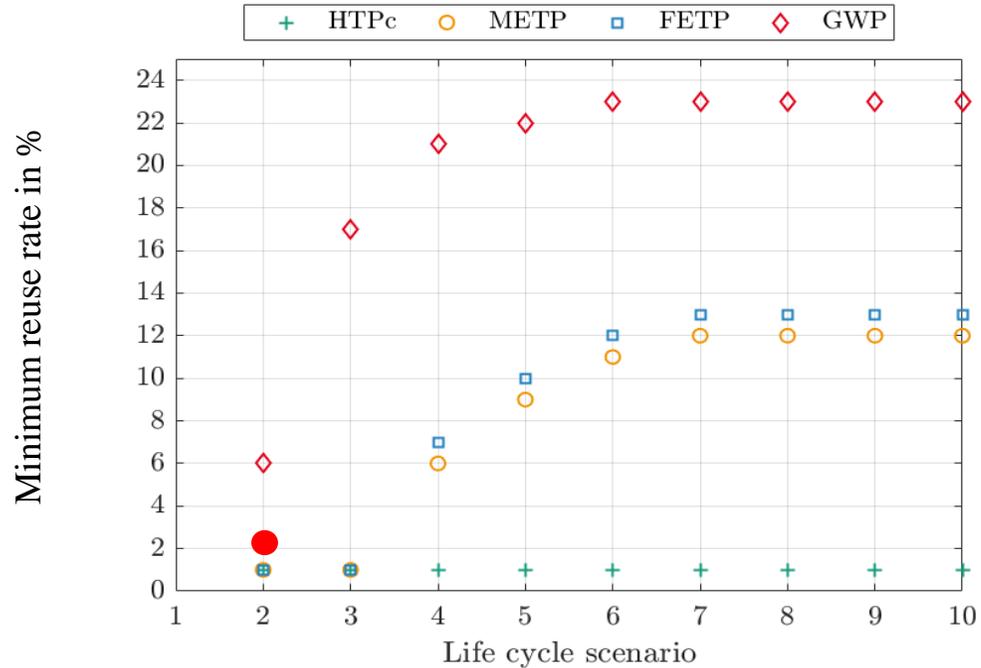
- für **Reparaturzenarien** ist der Handel mit gebrauchten Schrauben ein **vielversprechendes Geschäftsmodell**
- bereits **moderate Wiederverwendungsraten** bieten **deutliche Vorteile**
- Durchschnittspreis für **neue Schrauben**, insbesondere bei **kurzfristigen Wartungsaufträgen**, liegt etwa **15,25 € 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:
 - 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

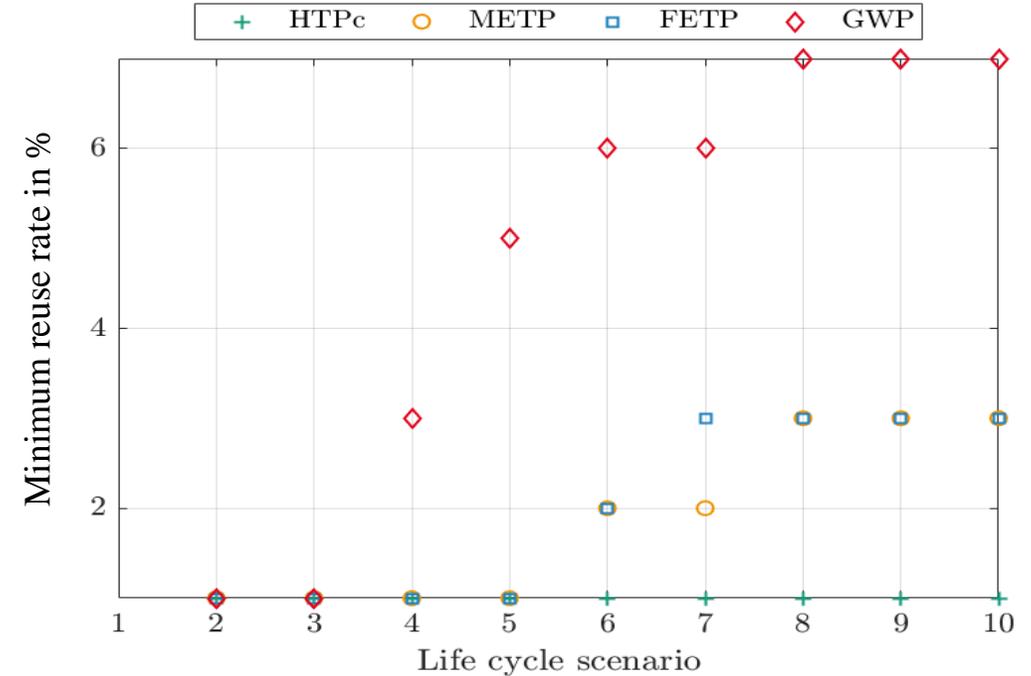


Szenario:

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%**