

Herzlich Willkommen!

RePoSe-Abschlussveranstaltung

Real-time Power Supply for e-fuels:
Erkenntnisse zur flexiblen Herstellung von
PtL-Kraftstoffen

Provadis I Industriepark Höchst

21. Mai 2026



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:



Projekträger:



1 Vom Pilot- zum Industriemaßstab: Erkenntnisse aus dem variablen Betrieb

Sven Vilbois, INERATEC

2 Flexibilitätsoptionen im PtL-Prozess: Modellierung und Praxis

Dr. Alexander Zschocke, CENA Hessen

3 Zuverlässigkeit und Lebensdauer von PtL-Anlagen unter variablen Lasten

Dr.-Ing. Steffen Schönborn, Johannes Käsgen, Thomas Pfeiffer, Fraunhofer LBF

4 PtL aus der Sicht der LCA am Beispiel des eKerosins

Prof. Dr. Ralf Ehret, Provadis Hochschule

5 Ausblick

Prof. Dr. Ralf Ehret, Provadis Hochschule

6 Führung durch die ERA-ONE-Anlage von INERATEC

Vom Pilot- zum Industriemaßstab: Erkenntnisse aus dem variablen Betrieb

Sven Vilbois, INERATEC



Vortrag 1 | INERATEC GmbH

Vortrag 2 | CENA Hessen

Vortrag 3 | Fraunhofer LBF

Vortrag 4 | Proxadis Hochschule

Ausblick

Führung durch die ERA-ONE-Anlage von INERATEC

DIIC
INERATEC
FUELING THE FUTURE

Agenda



1 EINFÜHRUNG

1. Motivation Lastflexibilität und Technologieeinsatz

2 ARBEITSPAKET 1

1. Umbau und Flexibilisierung der Anlage

3 ARBEITSPAKET 2

1. INERATEC Standorte
2. Durchschnittswerte
3. Einzelne Kampagnen

4 ARBEITSPAKET 9

1. Untersuchungen zur Vorspannkraft

5 AUSBLICK UND NÄCHSTE SCHRITTE

Agenda



1 EINFÜHRUNG

1. Motivation Lastflexibilität und Technologieeinsatz

2 ARBEITSPAKET 1

1. Umbau und Flexibilisierung der Anlage

3 ARBEITSPAKET 2

1. INERATEC Standorte
2. Durchschnittswerte
3. Einzelne Kampagnen

4 ARBEITSPAKET 9

1. Untersuchungen zur Vorspannkraft

5 AUSBLICK UND NÄCHSTE SCHRITTE

BETRIEB EINER PTL-SYNTHESEANLAGE

Motivation Lastflexibilität & Technologieansatz

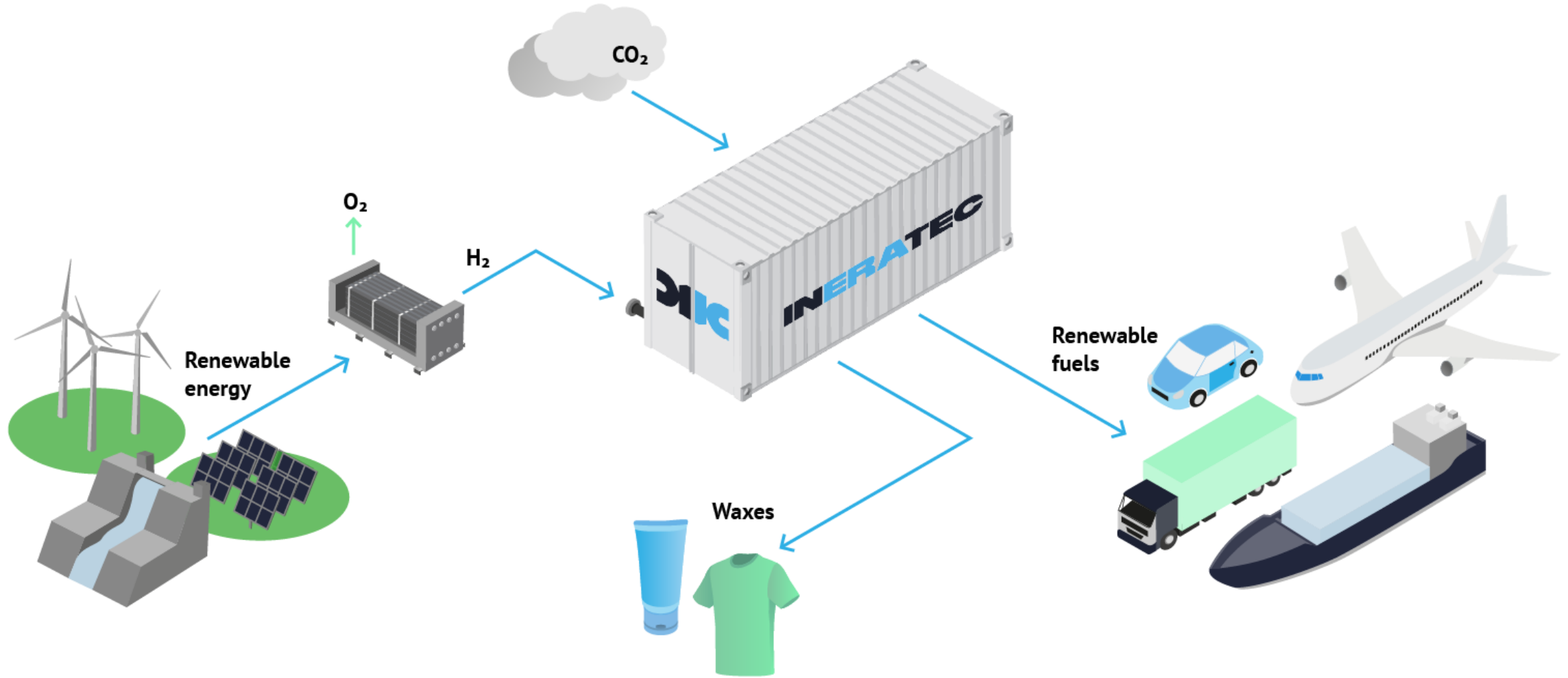
MOTIVATION LASTFLEXIBILITÄT

- > Lastflexibilität von PTL-Syntheseeanlagen auf schwankende Strom- und Wasserstoffverfügbarkeit
- > Ziel: Stabiler, effizienter und nachhaltiger Anlagenbetrieb unter dynamischen Bedingungen

TECHNOLOGIEANSATZ FÜR LASTFLEXIBLE PRODUKTION

- > Modularer Aufbau INERATECs PtL-Syntheseeanlagen
 - > Eine INERATEC PtL-Syntheseeanlage besteht aus mehreren Synthesemodulen
 - > Jeder Prozessstrang bildet die Reverse Water Gas Shift (RWGS) – und Fischer-Tropsch (FT) – Reaktion ab
- > Modularität ermöglicht
 - > Betrieb einzelner Synthesemodule
 - > Betrieb einzelner Betriebspunkte
- > Schnelles Rampen (An- und Abfahren) der einzelnen Betriebspunkte
- > Hoher Grad an Prozessautomatisierung
- **Große Bandbreite möglicher Betriebspunkte**

Oilfield of the future: Power-to-Liquid



INERATEC e-Fuel In production today

Name: ERA ONE

Location: Frankfurt Höchst, Germany.

Volume: Production of up to

2.500

tons per year.

Feedstock: CO₂ from a local biogas plant,
H₂ as a by-product from chlorine
production.

Status: Plant is operational.



Agenda



- 1 EINFÜHRUNG**
1. Motivation Lastflexibilität und Technologieeinsatz

- 2 ARBEITSPAKET 1**
1. Umbau und Flexibilisierung der Anlage

- 3 ARBEITSPAKET 2**
1. INERATEC Standorte
2. Durchschnittswerte
3. Einzelne Kampagnen

- 4 ARBEITSPAKET 9**
1. Untersuchungen zur Vorspannkraft

- 5 AUSBLICK UND NÄCHSTE SCHRITTE**

AP1: Umbau & Flexibilisierung der Anlage



Umbau der Syntheseanlage auf flexible Produktion

Bestehende technische Voraussetzungen ermöglichen bereits eine flexible Fahrweise für verschiedene Betriebspunkte. Nach Prüfung war ein grundlegender Anlagenumbau nicht erforderlich

Prozessparameter:

- Feineinstellungen und Anpassungen zur Verbesserung des dynamischen Betriebs
- Betriebsoptimierung der Reaktion auf unterschiedliche Lastzustände

Schrittkettenoptimierung:

- Überarbeitung der Ablaufsteuerung und Logik innerhalb der Anlage
 - Effiziente und flexible Automatisierungslogik

Betriebsablaufverbesserungen:

- Identifikation von Arbeitsschritten zur Parallelisierung
- Verkürzung von Reaktionszeiten und Stabilisierung des Anlagenbetriebs

Schulung/ Qualifikation:

- Trainings, Unterweisungen und Schulungen
- Nachhaltige Verankerung der flexiblen Fahrweise im Anlagenbetrieb

AP1: Umbau & Flexibilisierung der Anlage

Umbau der Syntheseanlage auf flexible Produktion

Ergebnis:

Flexible Produktion durch Prozess-,
Automatisierungs- und Betriebsoptimierung statt
kosten- und zeitintensivem Anlagenumbau

Agenda



- 1 EINFÜHRUNG**
1. Motivation Lastflexibilität und Technologieeinsatz

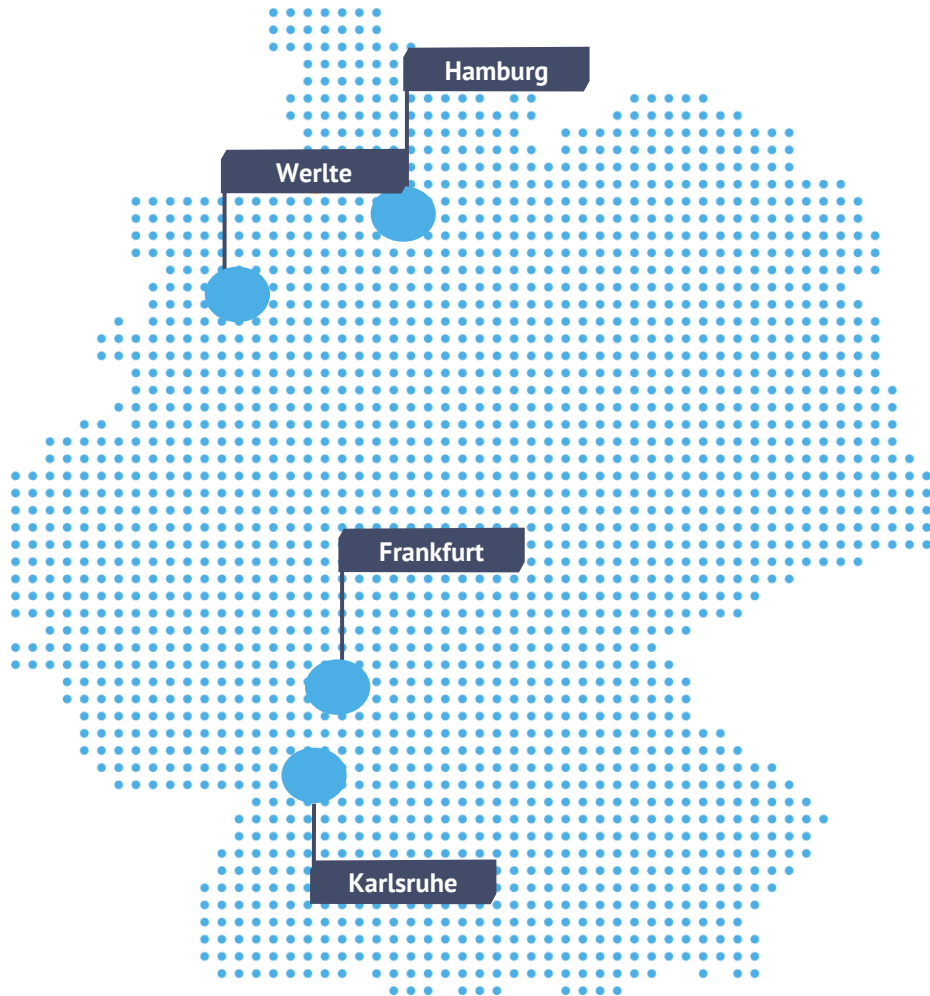
- 2 ARBEITSPAKET 1**
1. Umbau und Flexibilisierung der Anlage

- 3 ARBEITSPAKET 2**
1. INERATEC Standorte
2. Durchschnittswerte
3. Einzelne Kampagnen

- 4 ARBEITSPAKET 9**
1. Untersuchungen zur Vorspannkraft

- 5 AUSBLICK UND NÄCHSTE SCHRITTE**

INERATEC – Standorte zur Erprobung

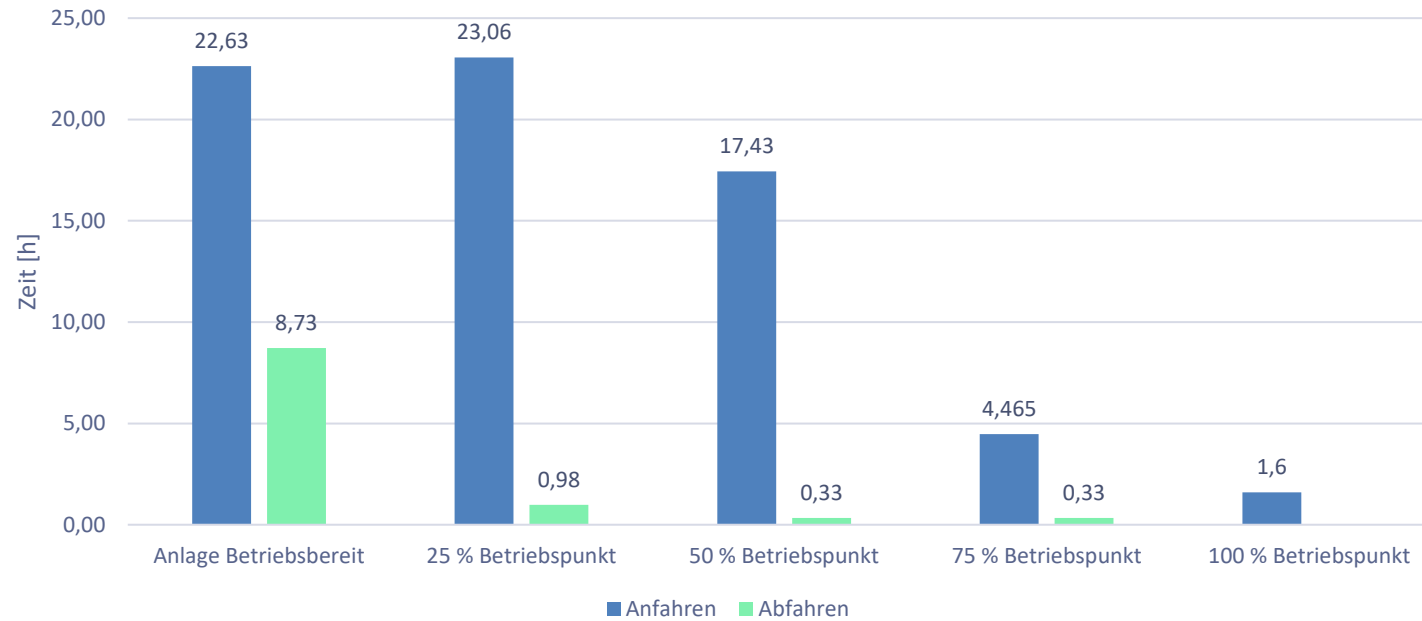


**Generierung u. Analyse
der Daten zur Ermittlung
der Lastflexibilität an
mehreren Standorten**

BETRIEB EINER PTL-SYNTHESEANLAGE UNTER VARIABLEN BEDINGUNGEN



Gegenüberstellung: Durchschnittliche Zeiten für An- und Abfahren der Anlagen



Durchschnittliche Zeitskalen bis Erreichung der Zielbetriebspunkte

| Anfahren | |
|-----------------------|-----------|
| Betriebspunkt [%] | Zeit in h |
| Anlage Betriebsbereit | 22:38 |
| 25 | 23:04 |
| 50 | 17:26 |
| 75 | 4:28 |
| 100 | 1:36 |

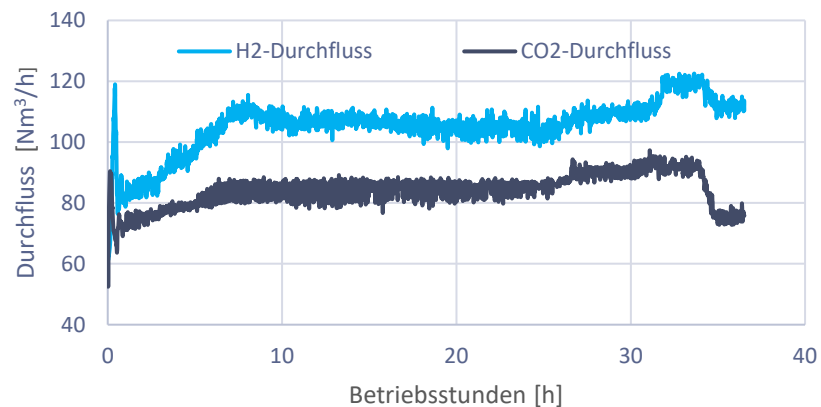
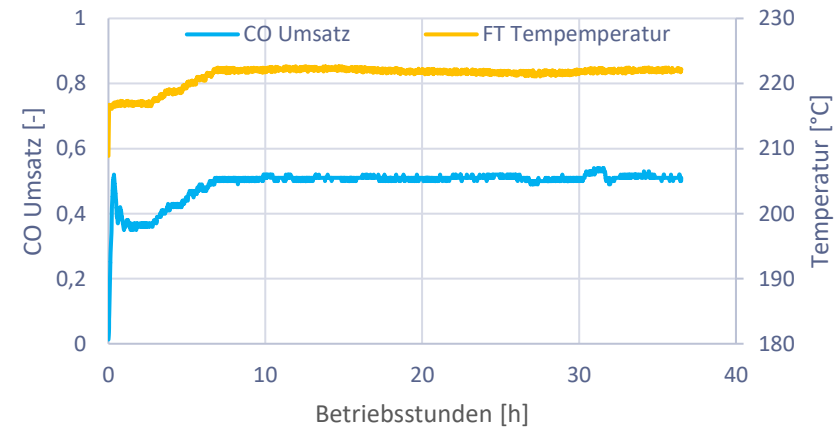
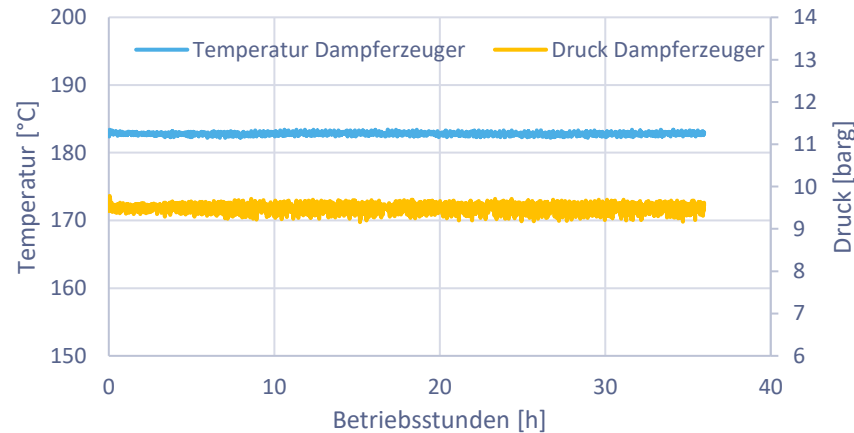
| Abfahren | |
|-------------------|-----------|
| Betriebspunkt [%] | Zeit in h |
| 100 | - |
| 75 | 0:20 |
| 50 | 0:20 |
| 25 | 0:59 |
| 0 | 8:44 |

INERATEC Versuchsergebnisse bestätigen prozesseitige Möglichkeit zum lastflexiblen Betrieb der Anlagen

BETRIEB EINER PTL-SYNTHESEANLAGE

Lastflexibilität in der Umsetzung – Frankfurt 22107-2

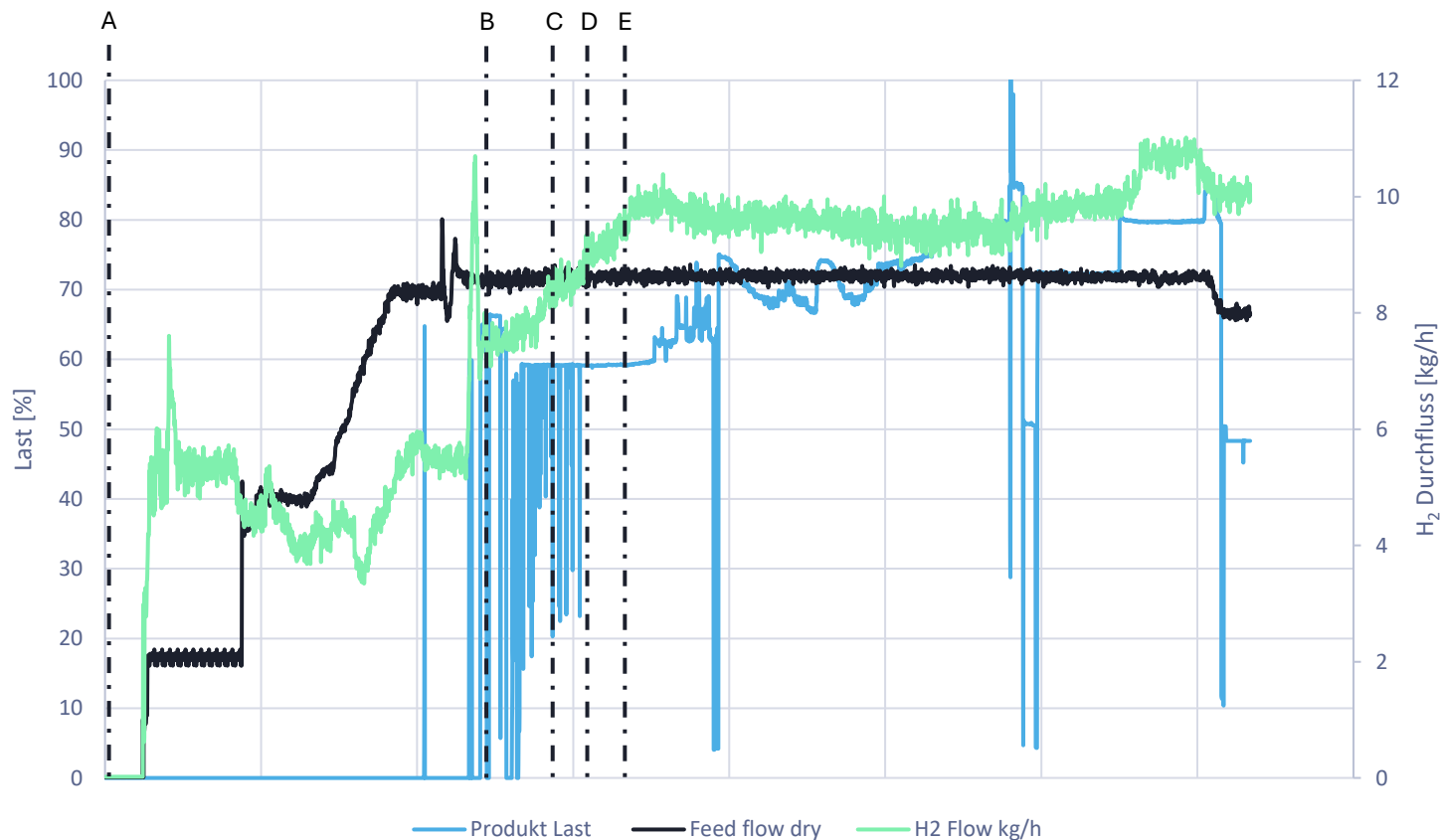
Regelung der Prozessparameter und deren Auswirkung auf die Konversion



- › **Dynamischer Betrieb serieller Reaktoren möglich:** IC ermöglicht eine flexible Steuerung von RWGS- und FT-Reaktoren auch unter wechselnden Betriebsbedingungen.
- › **Lastabsenkung in Niedriglastzeiten:** Ermöglicht z. B. über Nacht die Reduktion des Wasserstoffdurchsatzes zur Minimierung des Speicherbedarfs.
- › **Schnelle Anpassung der Konversion:** Optimierung der Reaktorausnutzung im Minutentakt verhindert übermäßigen H₂-Verbrauch und schützt die Katalysatoren vor Koksbildung.

BETRIEB VON RWGS- UND FT-ANLAGE UNTER VARIABLEN BEDINGUNGEN

Lastflexibilitätsanalyse anhand Betrieb (100%) einer 1MW PtL-Syntheseanlage



Zeiten zum Erreichen der Betriebszustände

- A. Start der Schrittketten
- B. 25 % Betriebspunkt (BP)
- C. 50 % BP
- D. 75 % BP
- E. 100 % BP

Dauer zwischen den Betriebszuständen

| Betriebszustandswechsel | Zeit in h |
|-------------------------|-----------|
| A bis B | 17:32 |
| B bis C | 2:44 |
| C bis D | 1:35 |
| D bis E | 1:36 |

Zeitverlauf zeigt den Betrieb einer 1MW PtL-Syntheseanlage im lastflexiblen Betrieb

Agenda



1

EINFÜHRUNG

1. Motivation Lastflexibilität und Technologieeinsatz

2

ARBEITSPAKET 1

1. Umbau und Flexibilisierung der Anlage

3

ARBEITSPAKET 2

1. INERATEC Standorte
2. Durchschnittswerte
3. Einzelne Kampagnen

4

ARBEITSPAKET 9

1. Untersuchungen zur Vorspannkraft

5

AUSBLICK UND NÄCHSTE SCHRITTE

BETRIEB EINER PTL-SYNTHESEANLAGE



Motivation Lastflexibilität & Technologieansatz

Untersuchungen der Vorspannkraft:

- Applikation eines Reaktors mit DMS-Messtechnik zur Erfassung der Vorspannkraft
- Durchführung von Messungen im realen Anlagenbetrieb unter dynamischer Fahrweise
- Durchführung eines Praxistests am Standort Frankfurt unter realen Betriebsbedingungen

Untersuchungsinhalte:

- Analyse der Vorspannkraft bei Lastwechseln und An-/Abfahrvorgängen
- Bewertung von Temperatur-, Druck- und Zyklusbelastungen
- Untersuchung kritischer mechanischer Komponenten unter variablen Betriebszuständen
- Identifikation möglicher Ermüdungs- und Lockerungseffekte (Lösemoment)

Zielsetzung:

- Bewertung der mechanischen Stabilität im flexiblen Betrieb
- Ableitung von Erkenntnissen für Zuverlässigkeit und zukünftige Wartungsstrategien

Kernaussage:

- Dynamische Fahrweisen beeinflussen die mechanische Belastung



Agenda



- 1 EINFÜHRUNG**
 - 1. Motivation Lastflexibilität und Technologieeinsatz

- 2 ARBEITSPAKET 1**
 - 1. Umbau und Flexibilisierung der Anlage

- 3 ARBEITSPAKET 2**
 - 1. INERATEC Standorte
 - 2. Durchschnittswerte
 - 3. Einzelne Kampagnen

- 4 ARBEITSPAKET 9**
 - 1. Untersuchungen zur Vorspannkraft

- 5 AUSBLICK UND NÄCHSTE SCHRITTE**

BETRIEB EINER PTL-SYNTHESEANLAGE

Lastflexibilität in der Umsetzung

ZUSAMMENFASSUNG:

- **INERATEC Versuchsergebnisse bestätigen prozesseitige Möglichkeit zum lastflexiblen Betrieb der Anlagen**
- **Proof of concept: Nachweis, dass dieser Ansatz in der Realität und im industriellen Maßstab funktioniert**
- **Über Realbetrieb der Anlagen konnten weitere Zeitoptimierungen erzielt werden**

BETRIEB EINER PTL-SYNTHESEANLAGE

Lastflexibilität in der Umsetzung

AUSBLICK ÜBER WEITERE SCHRITTE:

- > Weitere Optimierungspotentiale zur Lastflexibilität identifizieren und umsetzen
- > Umsetzung der lastflexiblen Auslegung beim Upscaling der Reaktorengrößen (RWGS- und FT-Reaktoren) sowie der weitere Anlagenbauteilen
- > Lastflexible Konzepte im Rahmen vom Anlagen-Upscaling implementieren und erproben

GET TO KNOW US

Get in
touch
now.



Sven Vilbois
Project Management
sven.vilbois@ineratec.de
T. +49 152 0428 1328

INERATEC GmbH

Siemensallee 84
76187 Karlsruhe
www.ineratec.de

Flexibilitätsoptionen im PtL-Prozess: Modellierung und Praxis

Dr. Alexander Zschocke, CENA Hessen



Vortrag 1 | INERATEC GmbH

Vortrag 2 | CENA Hessen

Vortrag 3 | Fraunhofer LBF

Vortrag 4 | Provadis Hochschule

Ausblick

Führung durch die ERA-ONE-Anlage von INERATEC

Flexibilitätsoptionen im PtL- Prozess: Modellierung und Praxis

Dr. Alexander Zschocke

Abschlussveranstaltung RePoSe | Frankfurt, 21. Mai 2026



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:



Projekträger:



1

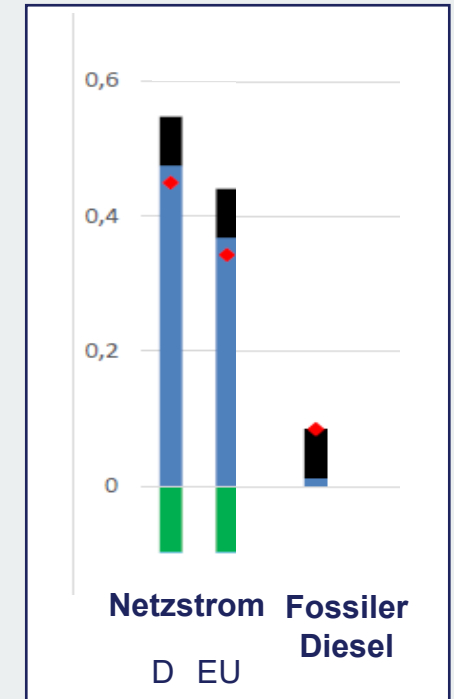
Das Projekt „RePoSe“ Real-time Power Supply for e-fuels



Hintergrund des Projekts

- E-SAF-Produktion mit deutschem Netzstrom würde höhere CO₂-Emissionen verursachen als fossiles Kerosin
- Daher erfordert der Delegierte Rechtsakt (EU) 2023/1184 für die RFNBO-Anerkennung die Wasserstoffproduktion mit erneuerbarem Strom. Dabei muss die eingesetzte Strommenge innerhalb eines definierten Zeitraums der erzeugten erneuerbaren Strommenge entsprechen.
Zulässiger Zeitraum:
 - Aktuell: 1 Monat
 - Ab 2030: 1 Stunde
- Folge: Lastflexibler Betrieb des Elektrolyseurs entsprechend der schwankenden Stromversorgung erforderlich.

Global Warming – kg CO₂-Äquivalent / MJ Kraftstoff*



*Quelle:

Manuel Andresh, Dr. Andreas Patyk, Dr. Martina Haase: Modell- und Datendokumentation zur Ökobilanz der Kraftstoffproduktion im Rahmen des Projektes reFuels, Karlsruhe 2021



Ausgangslage

Variable Wasserstoffherzeugung bedeutet für die RWGS-/FT-Anlage entweder:

- ausreichend große Wasserstoffspeicher, zur Abpufferung sämtlicher Schwankungen und kontinuierliche Versorgung der RWGS-/FT-Anlage, oder:
- einen flexiblen Betrieb der RWGS-/FT-Anlage



Konflikt

- Völlig flexibler Betrieb führt zu starken Produktionsschwankungen
- Völlige Pufferung erfordert sehr großen Wasserstoffspeicher
- Sinnvoller Kompromiss: Kleiner Wasserstoffspeicher + Abfahren der Anlage, wenn Speicher fast leer ist



Fragestellungen im Projekt

- Ist ein flexibles An- und Abfahren einer RWGS-/FT-Anlage bei strombedingter Wasserstoffknappheit überhaupt möglich, und wie lauten die Parameter?
- Ist ein solcher Betrieb wirtschaftlich sinnvoll?



2 Modellierung und Berechnungen



Ausgangsdaten:

- Zeitreihen über Stromerzeugung je einer großen Solarstrom- und Windstromanlage
- Anlagen mit Standort in Hessen oder angrenzenden Regionen
- Viertelstunden-Istwerte von 02/2023 bis 01/2026

Zusammenführung von Solar- und Windstrom:

- Kombination, um durch negative Korrelation Schwankungen zu minimieren
- Angenommenes Verhältnis der installierten Leistung Solar- zu Windstrom 60:40
- Vorhergehende Berechnungen ergaben dies als speicherminimierendes Verhältnis

Normierung der Stromproduktion:

- auf 26.304 MWh im Zeitraum 02/2023 bis 01/2026 - entspricht 1 MWh pro Stunde
- Korrespondiert mit Angaben von INERATEC zum Strombedarf für Versorgung eines RWGS-/FT-Moduls
- Normierte verfügbare Leistung Windstrom: 1,848 MW; Solarstrom: 2,772 MW; Gesamt: 4,620 MW

Modellierung der Elektrolyse

Annahme: Wasserstoffherzeugung entsprechend der viertelstündlichen Stromverfügbarkeit

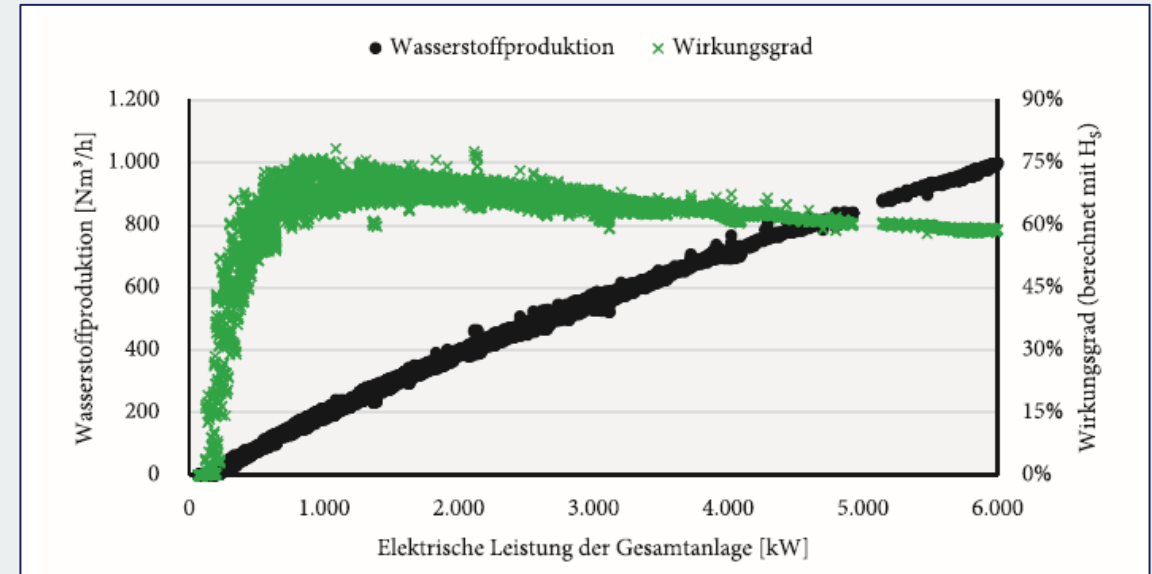
- Betrieb eines PEM-Elektrolyseurs
- Keine Batteriespeicherung des Stroms zur Glättung des Elektrolyseurbetriebs

Angenommene Wirkungsgrade:

- 67% bei Stromverfügbarkeit von 20-100% der Nennlast
- 55% bei Stromverfügbarkeit von 10-20% der Nennlast
- 0% (kein Betrieb des Elektrolyseurs) bei Stromverfügbarkeit von < 10% der Nennlast

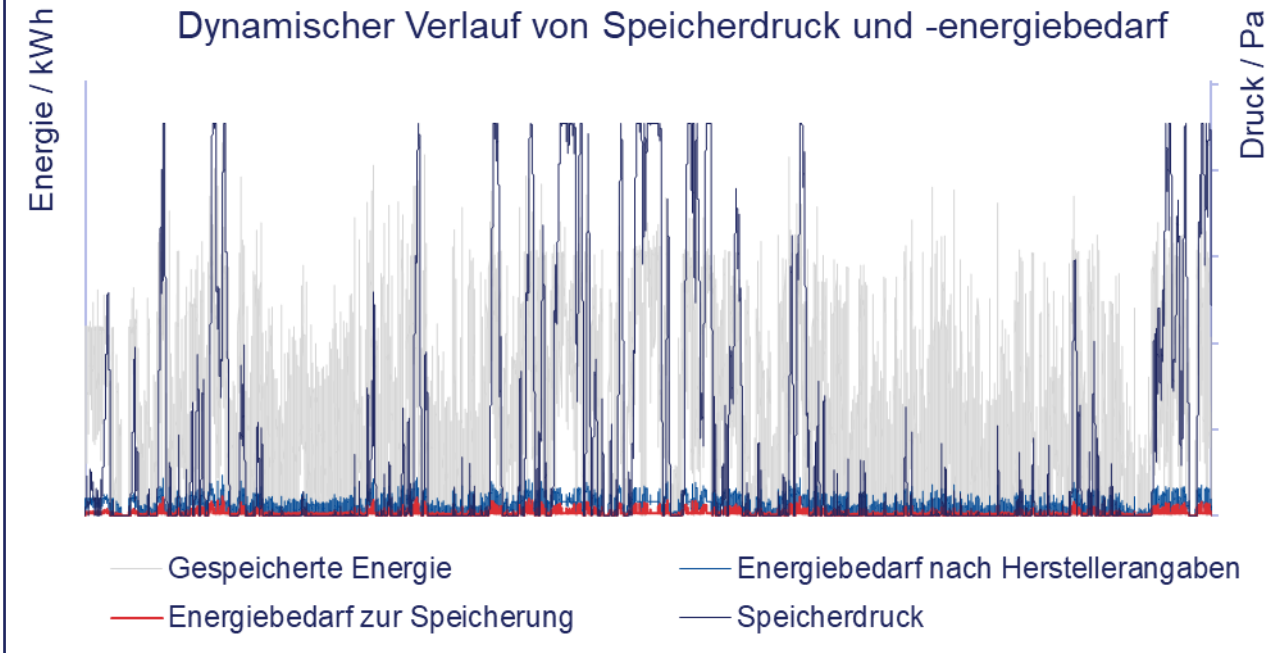
➔ Resultierender durchschnittlicher Wirkungsgrad
02/2023-01/2026: 62,34%

Empirische Betriebsdaten für einen Elektrolyseur*



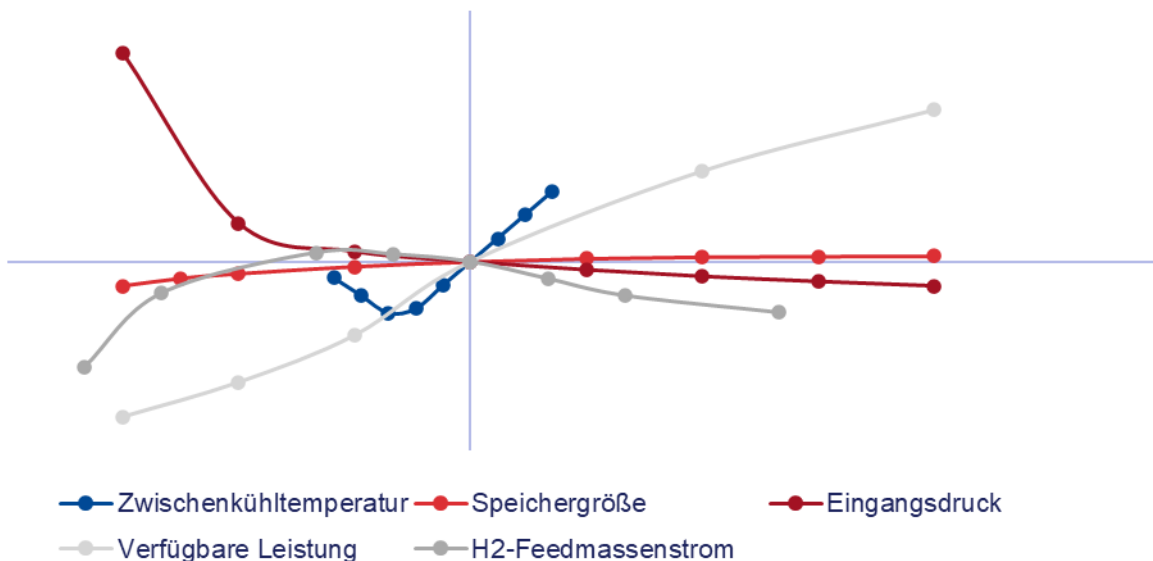
* Quelle: Martin Kopp: Strommarktseitige Optimierung des Betriebs einer PEM-Elektrolyseanlage; Kassel University Press 2018; DOI 10.19221/KUP9783737605892

Dynamischer Verlauf von Speicherdruck und -energiebedarf



Quelle: Berechnungen CENA Hessen

Sensitivitätsanalyse



Quelle: Berechnungen CENA Hessen

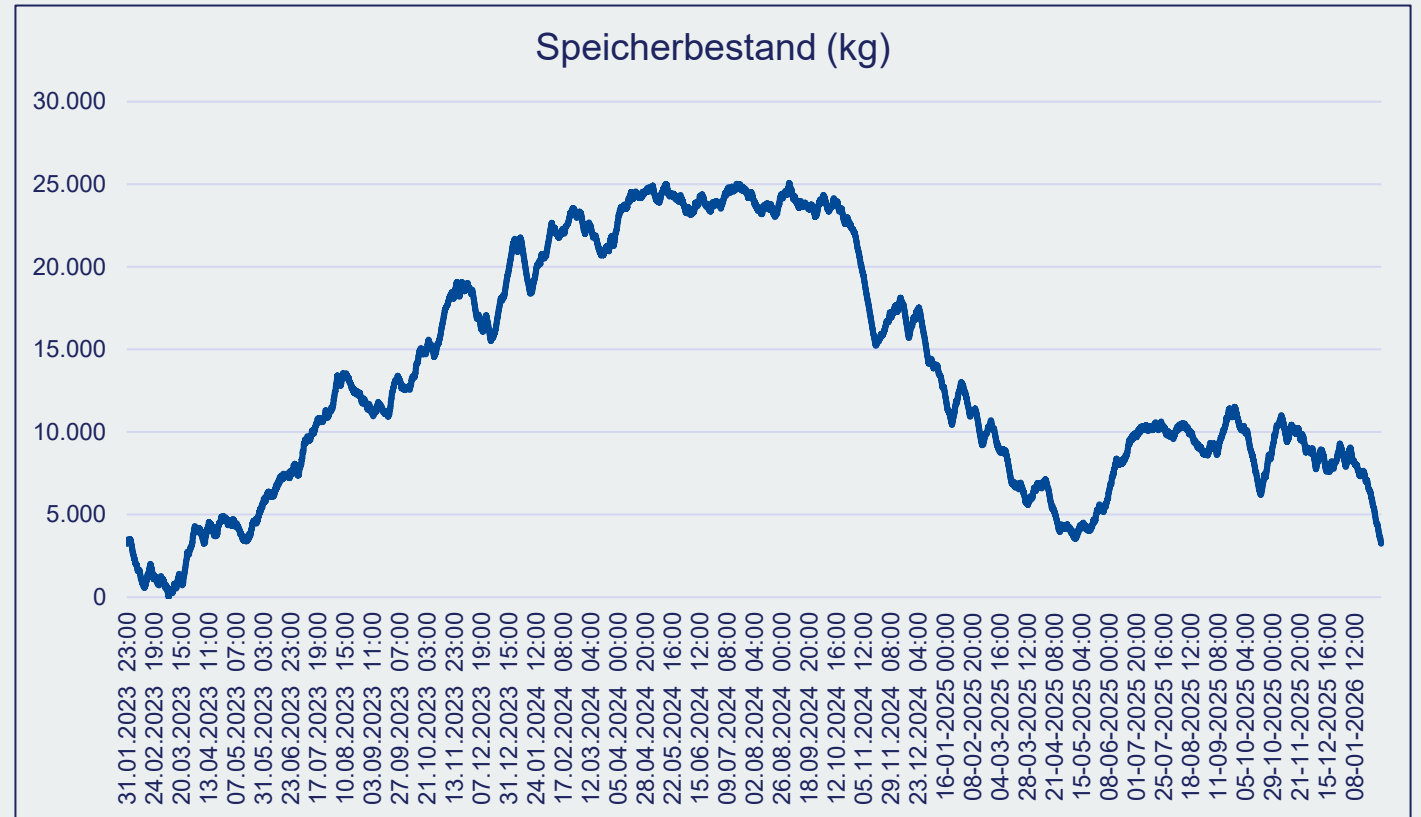
Modellierung der Wasserstoffspeicherung

Welcher energetische Mehraufwand entsteht durch die Speicherung?

- Berechnung unter diversen Konstellationen
 - konstant vs. lastflexibel, mit/ohne Speicher
 - Herstellerdaten vs. polytrope Verdichtung
- Energiebedarf:
 - typischerweise 5-15 % des Energiegehalts des gespeicherten Wasserstoffs
 - 60% des Wasserstoffs wird unter den Wetterbedingungen 02/2023-01/2026 nicht eingespeichert, sondern geht direkt zur RWGS

Nicht limitierender Wasserstoffspeicher

- Erforderlicher Wasserstoffspeicher von 25,1 Tonnen für Zeitraum 02/2023-01/2026, um RWGS/FT-Anlage durchgehend zu betreiben
 - Für jährliche Produktion von 350 Tonnen FT-Zwischenprodukt
 - Bevorratungskapazität von 55 Tagen
- Stark beeinflusst von Extremsituationen, speziell von Häufungen der Dunkelflauten
- Bei anderen Wettersituationen als 02/2023-01/2026 möglicherweise noch größerer Speicher erforderlich



Quelle: Berechnungen CENA Hessen

Kleiner Speicher und flexibler Betrieb: Annahmen

Betrieb der Anlage auf Basis der von INERATEC ermittelten Parameter

- Dauer Abfahren von 100% auf 0% 10 Stunden 15 Minuten
- Dauer Anfahren von 0% auf 100% 46 Stunden 30 Minuten

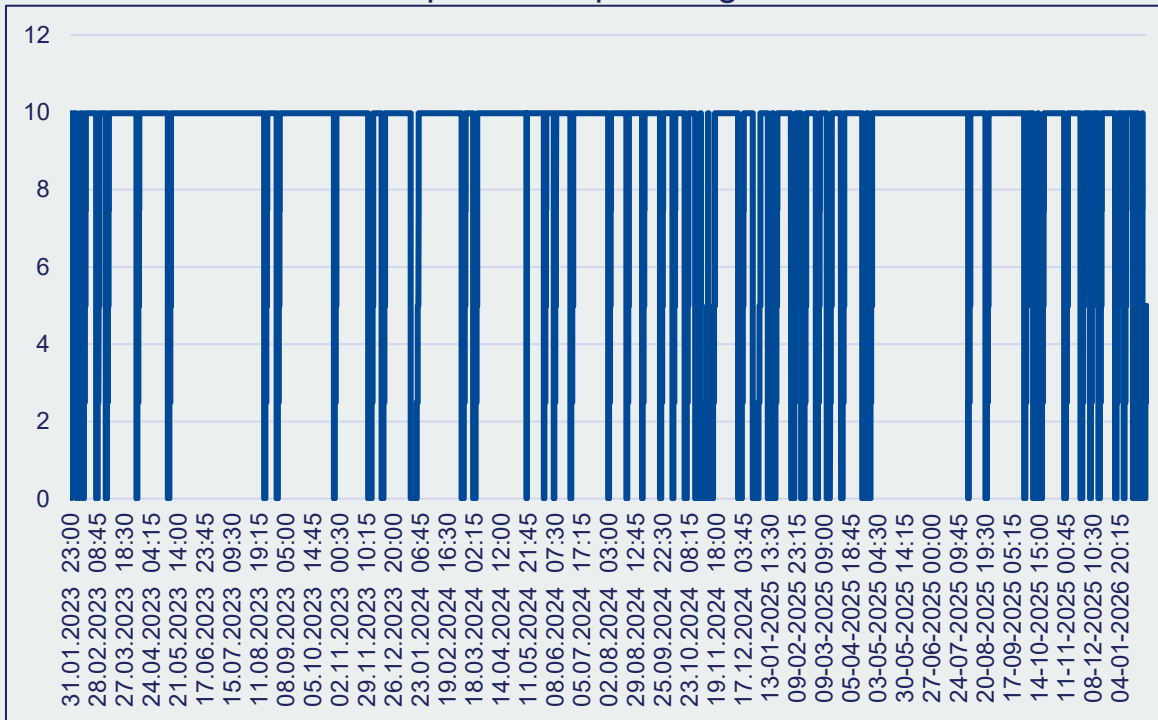
Annahmen:

- Betrieb der Anlage auf 100% bis zum Erreichen des für Abfahren erforderlichen Minimalbestands an Wasserstoff, dann Abfahren auf 0%
- Erneutes Anfahren bei Erreichen eines Wasserstoffbestands von 400 Kilogramm
- Wasserstoffverbrauch und Produktion von Zwischenprodukt je nach Betriebsstufe 25%, 50%, 75% und 100% des Normalverbrauchs
- Keine Unterbrechung von An- oder Abfahren

Kleiner Speicher und flexibler Betrieb: Ergebnisse

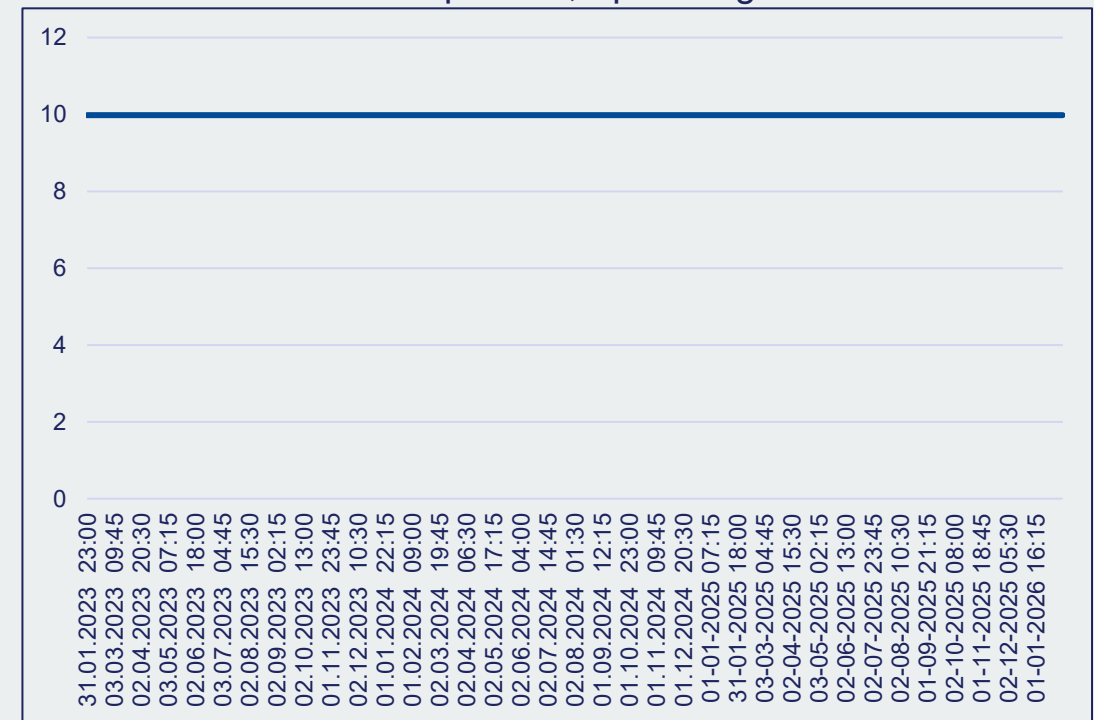
Häufigkeit der Lastwechsel abhängig von Speichergröße

Produktion FT-Zwischenprodukt, Speichergröße 1 Tonne



Quelle: Berechnungen CENA Hessen

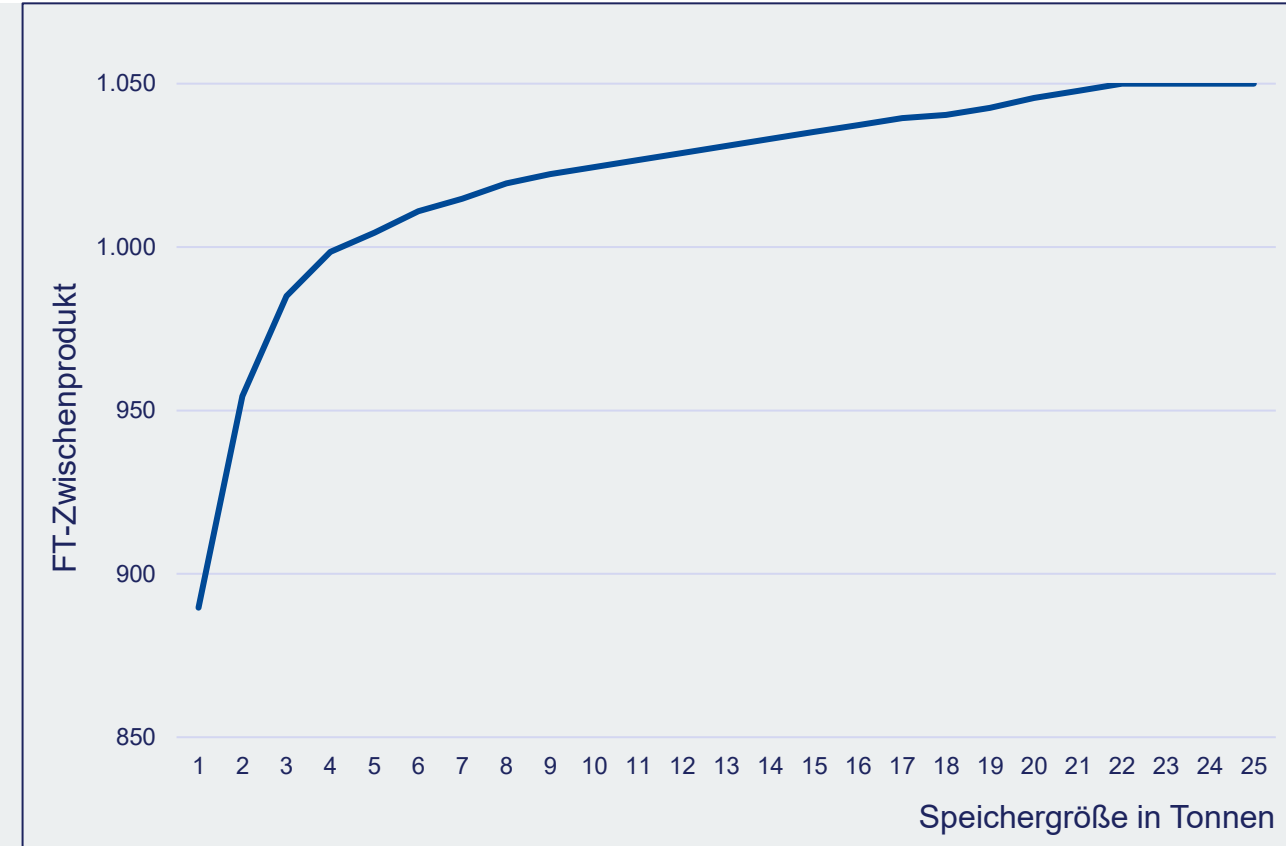
Produktion FT-Zwischenprodukt, Speichergröße 25 Tonnen



Quelle: Berechnungen CENA Hessen

Auswertung für unterschiedliche Speichergrößen

- Bei sehr kleinem Speicher (1-2 Tonnen): hoher Produktionsausfall
- Ab Speichergröße 4 Tonnen weniger als 5% Produktionsausfall
- Bei Speichergröße 4 Tonnen: insgesamt 14-18 Fälle von Abfahren (je nach Anfangsfüllstand)



Quelle: Berechnungen CENA Hessen

3 | Ergebnisse



Speicherbedarf bei Dauerbetrieb

- 25 Tonnen Speicherbedarf für Dauerbetrieb für ein Modul erforderlich
 - Möglicherweise noch größer bei höherer Anzahl von Dunkelflauten
 - Absolute Größe unproblematisch, aber für nur ein 350 Tonnen-Modul
 - Bei Hochrechnung auf Gesamtbedarf massive Größe
- Annahmen für Hochrechnung:
 - Jährlicher deutscher Kerosinbedarf: 10 Mio. Tonnen
 - Anteil E-SAF 2050: 35 %*
 - Kerosinanteil an FT-Zwischenprodukt: 77 %**
$$\frac{10.000.000 \text{ t} \cdot 0,35 \cdot 25 \text{ t}}{0,77 \cdot 350 \text{ t}} = 324.675 \text{ t H}_2$$
- Speicherbedarf bei Dauerbetrieb: 324.675 Tonnen Wasserstoff - entspricht 10,8 Terrawattstunden
- Vergleich: Geschätzter deutscher Wasserstoff-Speicherbedarf für 2050: 43-84 Terrawattstunden***

* Quote laut ReFuel EU Aviation

** Höchster von INERATEC demonstrierter Wert

*** Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Weißbuch Wasserstoffspeicher, April 2025, S. 10; Werte basierend auf Schätzungen des EWI

Speicherbedarf lässt sich stark reduzieren, wenn RWGS/FT-Anlage bei langen Perioden schwacher Stromverfügbarkeit heruntergefahren werden kann.

- Reduzierung des Speicherbedarfs um > 80% bei Verlust von < 5% der Produktion möglich
- Hochrechnung für Deutschland: Reduzierung von 10,8 auf 2,2 Terrawattstunden

Weitere Optimierungsmöglichkeiten

- **Nutzung schwacher Stromphasen**
 - Schwache Stromverfügbarkeit typischerweise im 4. und 1. Quartal
 - ➔ Produktionsausfälle reduzieren, indem Wartungsereignisse gezielt in diese Zeiträume gelegt werden
- **Schnellere Anfahrzeiten der RWGS/FT-Anlage**
 - In Einzelfällen durch INERATEC bereits deutlich kürzere Zeiten als 46:30 Stunden erreicht
 - In Berechnungen nicht berücksichtigt, aber grundsätzlich technisch möglich
- **Optimierung durch verbesserte Steuerung der Prognosen der Stromverfügbarkeit**

Prognose der Stromverfügbarkeit

- In Berechnungen treten teilweise mehrere Zyklen des An- und Abfahrens hintereinander auf
 - Mit Kenntnis der zukünftigen Wetterentwicklung potentiell besser steuerbar
 - Bei aktuellen Anfahen-Werten (~ 2 Tage) eher nicht relevant, dafür bei kürzeren Zeiten

➔ Betrachtung von Stromprognosen in RePoSe

- Konventionelle Prognosemodelle (z.B. lineare Regression, SARIMA) wenig prognosegenau
- KI-gestützte Modellierung (Machine Learning, Deep Learning) aufwändig, aber teilweise erstaunlich prognosegenau
- Trotzdem auch in diesem Falle hoher Einfluss von „White noise“-Störungen

| Model Type | Model Name | nMAE Solar (%) | nRMSE Solar (%) |
|---------------|-----------------------|----------------|-----------------|
| Univariate | SVM | 3.1684 | 6.3053 |
| Univariate | LSTM (192,100,128,64) | 2.1452 | 5.6318 |
| Univariate | GRU + Transformer | 2.5916 | 5.8320 |
| Multivariable | AVE_W (RF, SVM, MLP) | 2.1157 | 5.6842 |
| Multivariable | RandomForestRegressor | 2.0966 | 5.6542 |
| Multivariable | XGBoost (Exogenous) | 1.4818 | 4.2240 |

Quelle: Berechnungen CENA Hessen

| Model Type | Model Name | nMAE Wind (%) | nRMSE Wind (%) |
|---------------|---------------------------|---------------|----------------|
| Univariate | Deep Bidirectional GRU | 3.4130 | 5.6177 |
| Univariate | LSTM | 3.8365 | 5.9160 |
| Univariate | Bidirectional GRU | 3.5860 | 5.7166 |
| Multivariable | AVE_W (RF, LightGBM, MLP) | 3.4296 | 5.6264 |
| Multivariable | AVE_W (RF, XGBoost, MLP) | 3.5142 | 5.6124 |

Quelle: Berechnungen CENA Hessen

* **Normalized Mean Absolute Error (nMAE)**: Measures the average magnitude of prediction errors, treating all deviations equally.

** **Normalized Root Mean Squared Error (nRMSE)**: Measures the square root of the average squared errors, placing greater emphasis on larger deviations.

Problem: Delegierter Akt gilt auch für Folgeschritte

- Der bei der Herstellung von RFNBO eingesetzte Strom muss
 - erneuerbar sein und
 - die Nachhaltigkeitsanforderungen gemäß Delegierte Rechtsakte (EU) 2023/1184 (Zusätzlichkeit, zeitliche und räumliche Übereinstimmung) erfüllen.
- Dies gilt auch für Strom zur Weiterverarbeitung von RFNBOs. Damit unterliegen RWGS-Anlagen denselben Anforderungen wie Elektrolyseure.
- Ab 2030 muss daher eine stündliche Übereinstimmung zwischen erneuerbarer Stromerzeugung und Verbrauch der RWGS-Anlage gegeben sein.
- INERATEC zeigt jedoch, dass ein derart variabler Betrieb nicht möglich ist: Trotz flexibler Auslegung dauern Lastwechsel Stunden-Tage. Eine unterstündliche Flexibilität ist voraussichtlich auch 2035 nicht erreichbar.

- Es ist möglich, die durch den Delegierten Rechtsakt entstehenden Schwankungen bei der Wasserstoffversorgung zu vertretbaren Kosten durch flexiblen Betrieb zu kompensieren.
 - Einhaltung der stündlichen Übereinstimmung durch Elektrolyseur wurde hierbei unterstellt
 - Überprüfung war nicht Gegenstand des Projekts
- Für die RWGS-/Syntheseanlage ist eine Einhaltung der stündlichen Übereinstimmung zwischen Stromerzeugung und Stromverbrauch („Temporale Korrelation“) nicht möglich.
 - Kann je nach Auslegung der Regulierung dazu führen, dass ein größerer Teil des FT-Zwischenprodukts nicht als RFNBO anerkannt wird, obwohl der Strombedarf von RWGS-/Syntheseanlage nur wenige Prozent des Energiegehalts ausmacht.
 - Forderung nach temporaler Korrelation sollte auf Wasserstoffproduktion beschränkt werden und nicht auch für nachfolgende Schritte gelten.

Vielen Dank.

CENA Hessen

Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr
der Hessen Trade & Invest GmbH

www.cena-hessen.de
info@cena-hessen.de





Dr. Alexander Zschocke

Senior Manager Power-to-Liquid



+49 175 5843268



alexander.zschocke@cena-hessen.de

Zuverlässigkeit und Lebensdauer von PtL-Anlagen unter variablen Lasten

Dr.-Ing. Steffen Schönborn , Johannes Käsgen, Thomas Pfeiffer,
Fraunhofer LBF

Vortrag 1 | INERATEC GmbH

Vortrag 2 | CENA Hessen



Vortrag 3 | Fraunhofer LBF

Vortrag 4 | Proxadis Hochschule

Ausblick

Führung durch die ERA-ONE-Anlage von INERATEC

Zuverlässigkeit und Lebensdauer von PtL- Anlagen unter variablen Lasten– RePoSe Abschlussveranstaltung

—
Real-time Power Supply for e-fuels

Pfeiffer, Schönborn, Käsgen, Akuffo / 21.05.2026



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:



Projekträger:



Förderkennzeichen: 16RK14007D

Agenda

- LBF, kurze Einführung (Steffen Schönborn)
- Hochtemperaturversuche, Vorspannkraftmessung (Steffen Schönborn)
- AE Messungen, Möglichkeiten zur Anlagenüberwachung (Johannes Käsen)
- Prob FMEA (Thomas Pfeiffer)
- Vergleich Zuverlässigkeit, Nachhaltigkeit, Kosten (Thomas Pfeiffer)

Die Fraunhofer Gesellschaft

Zahlen und Fakten

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt angewandte Forschung von unmittelbarem Nutzen für private und öffentliche Unternehmen und von großem gesellschaftlichem Nutzen.

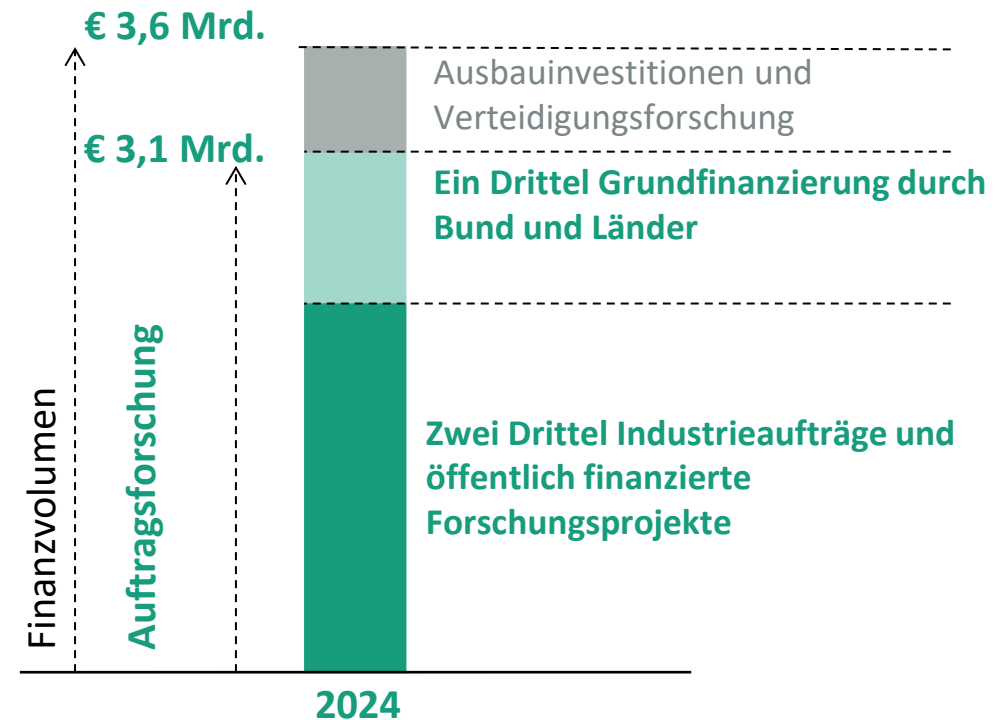


Ca. 32.000

Mitarbeiterinnen und
Mitarbeiter



75 Institute und
Forschungseinrichtungen



Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Ihr Partner für angewandte Forschung!



»Unsere Forschung dient dazu immer komplexere Produkte zuverlässig, effizient und nachhaltig zu gestalten. Dafür greifen wir in die Phase der Entwicklung, Realisierung, Nutzung und Wiederverwendung ein. Ziel ist es in Partnerschaft mit unseren Kunden bestmögliche Lösungen für deren Anwendungen zu schaffen.«

(Prof. Tobias Melz – Institutsleiter Fraunhofer LBF)

Fraunhofer LBF

Zahlen und Fakten 2024

70 Mitarbeit in internationalen
Fachausschüssen und Gremien

332 Mitarbeitende

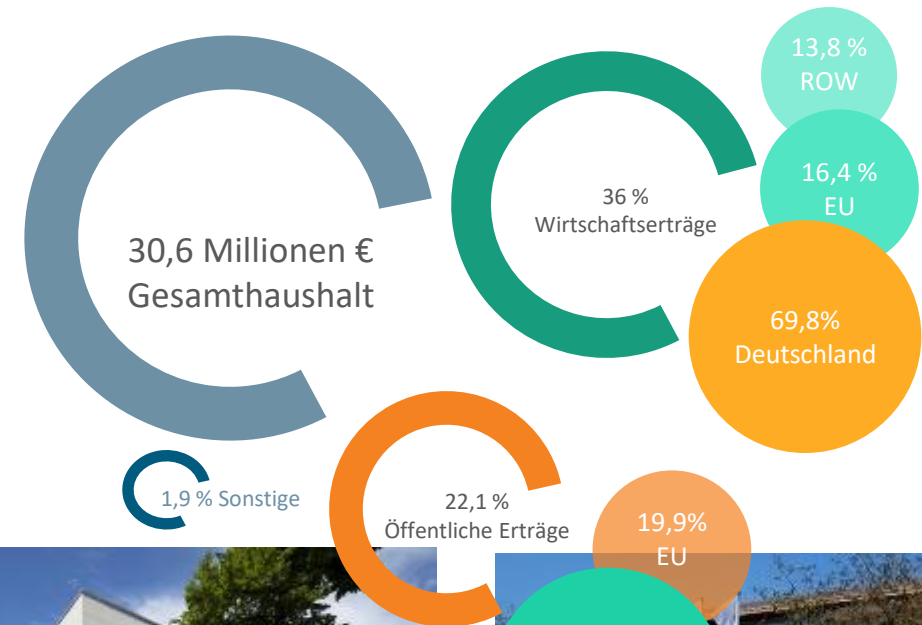
25 Vorlesungen

29 Mitarbeitende an
der TU Darmstadt

86 Wissenschaftliche
Veröffentlichungen

8 Neue Patente

29 Akademische Abschlüsse
(Promotionen, Masterarbeiten)



Zuverlässigkeitsabsicherung der PtL Anlage mit variabler Auslastung Fraunhofer LBF

Datenakquisition und Analyse der kritischen Komponenten aus Sicht des dynamischen Betriebs und Zuverlässigkeitsanalyse

In enger Abstimmung mit dem Projektpartner INERATEC wurden verschiedene kritische Komponenten und Messstellen zur Daten Akquisition erarbeitet

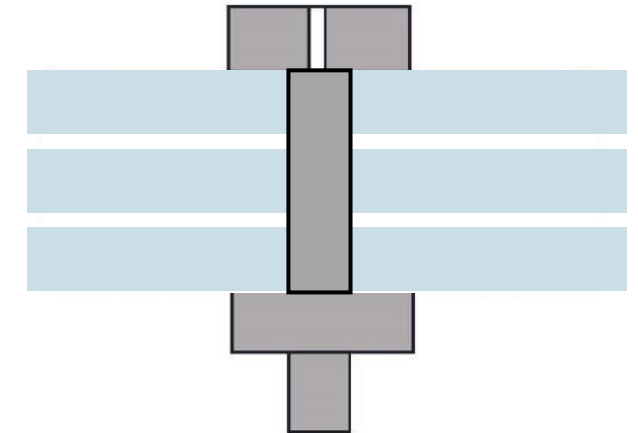
Abbildung aus Geheimhaltungsgründen entfernt

Untersuchungen bei überlagerter Temperaturbeanspruchung

Temperaturwechselfersuche an Spannelementen der Reaktoren

Verlust der Vorspannkraft und Lockerung der Schrauben aufgrund zyklischer Temperaturbeanspruchung durch lastvariablen Anlagenbetrieb

- Untersuchung der Fragestellung, warum sich die Spannelemente unter Temperaturbeanspruchung lockern könnten
- Mögliche Ursachen:
 - Zyklisches Kriechen (Verformung) der verwendeten Dichtungen → Einfluss auf Dicke
 - Plastische Verformung der Schraubelemente
 - Ungleiche Ausdehnung bei Temperaturbeanspruchung durch Paarung von Werkstoffen mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten
 - Einfluss der erhöhten Temperatur auf die Beanspruchbarkeit
- Start der Untersuchungen unter Berücksichtigung eines vereinfachten Demonstratoraufbaus aus einer Gewindestange + Blechpaket
- Beanspruchung dieser Verbindung durch Temperaturwechsel bis max. 1200°C
- Einsatz einer „Messhülse“ (Länge ca. 40 mm) zur Erfassung der Schraubenvorspannkraft im Lastpfad



Untersuchungen bei überlagerter Temperaturbeanspruchung

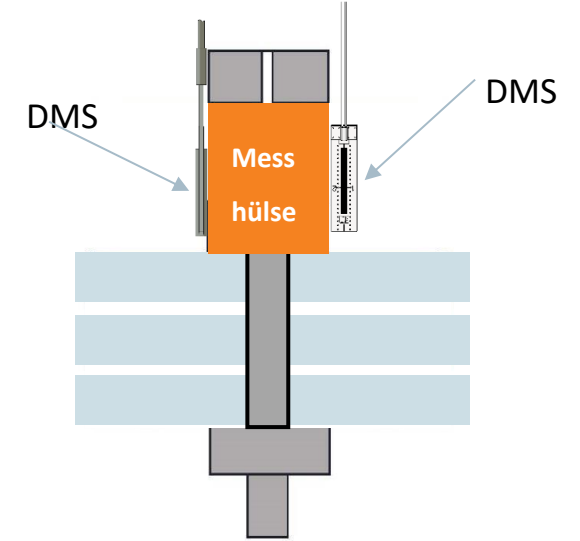
Vorspannkraftüberwachung – Konzept mit normalen DMS und Rekalibrierung

Bisherige Schwierigkeiten:

- Die Messung des Losbrechmomentes zum Rückschluss auf den Verlust der Vorspannkraft wird durch Festbacken der Komponenten beeinflusst.
- Spezial-DMS bis 950 °C sind teuer und schwierig anzuschweißen

Lösung: Nutzung von handelsüblichen DMS und Kalibrierung nach folgendem Schema

1. Applizierung von handelsüblichen DMS auf einer Messhülse
2. Kalibrierung der DMS auf Vorspannkraft in einer Zug-Druck-Prüfmaschine
3. Anziehen der Schraube und Messen der Vorspannkraft
4. Temperaturzyklus fahren → DMS geht dabei kaputt „Opfer-DMS“
5. Neuen DMS applizieren und anschließend das Lösen messen
6. Neuen DMS ebenfalls auf Vorspannkraft kalibrieren



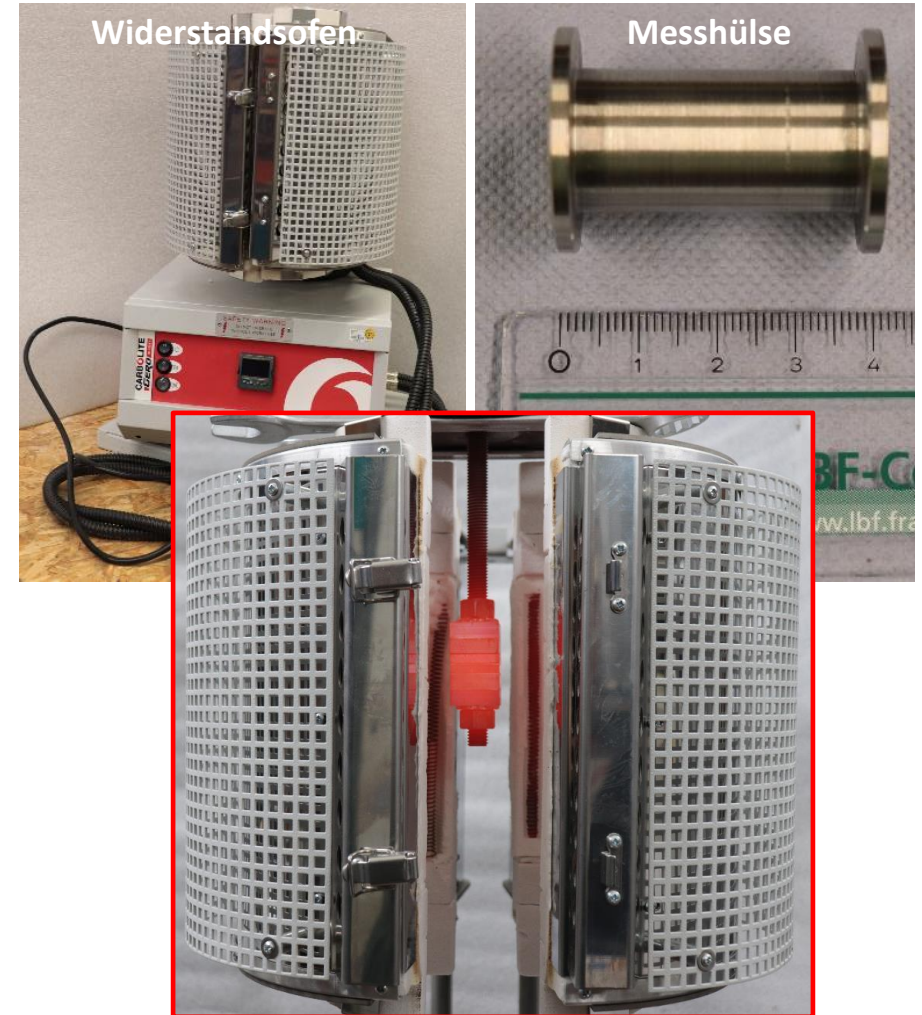
Untersuchungen bei überlagerter Temperaturbeanspruchung

Temperaturwechselversuche an Spannelementen der Reaktoren

- Auslegung der Messhülsen auf die geplante Messaufgabe (Länge, Kopfdurchmesser, Vorspannkraft bzw. Wanddicke)
- Fertigung dieser Messhülsen aus temperaturbeständigem Stahl
- Auswahl der geeigneten Infrastruktur
- Aufbau von Gewindestangen mit „Blechpaketen“ unterschiedlicher Längen sowie Montage mit unterschiedlichen Vorspannkraften (40 Nm bis 65 Nm)
- Definition der Temperaturbeanspruchung mit Fa. Inerotec
- Aufprägung von Temperaturrampen (850 °C → 500 °C)
→ Simulation lastflexibler Anlagenbetrieb

→ Ergebnis:

- Keine signifikante Längenänderung des Blechpaketes → damit kann ein möglicher negativer Einfluss der Dichtungen ausgeschlossen werden
- Dennoch: erheblicher Vorspannkraftverlust auf 0 kN
- → Ursache muss bei der Gewindestange (Werkstoff) liegen



Laststeigerungsversuche an Gewindestangen

Untersuchungen an Proben entnommen aus den Gewindestangen - Versuchsumgebung



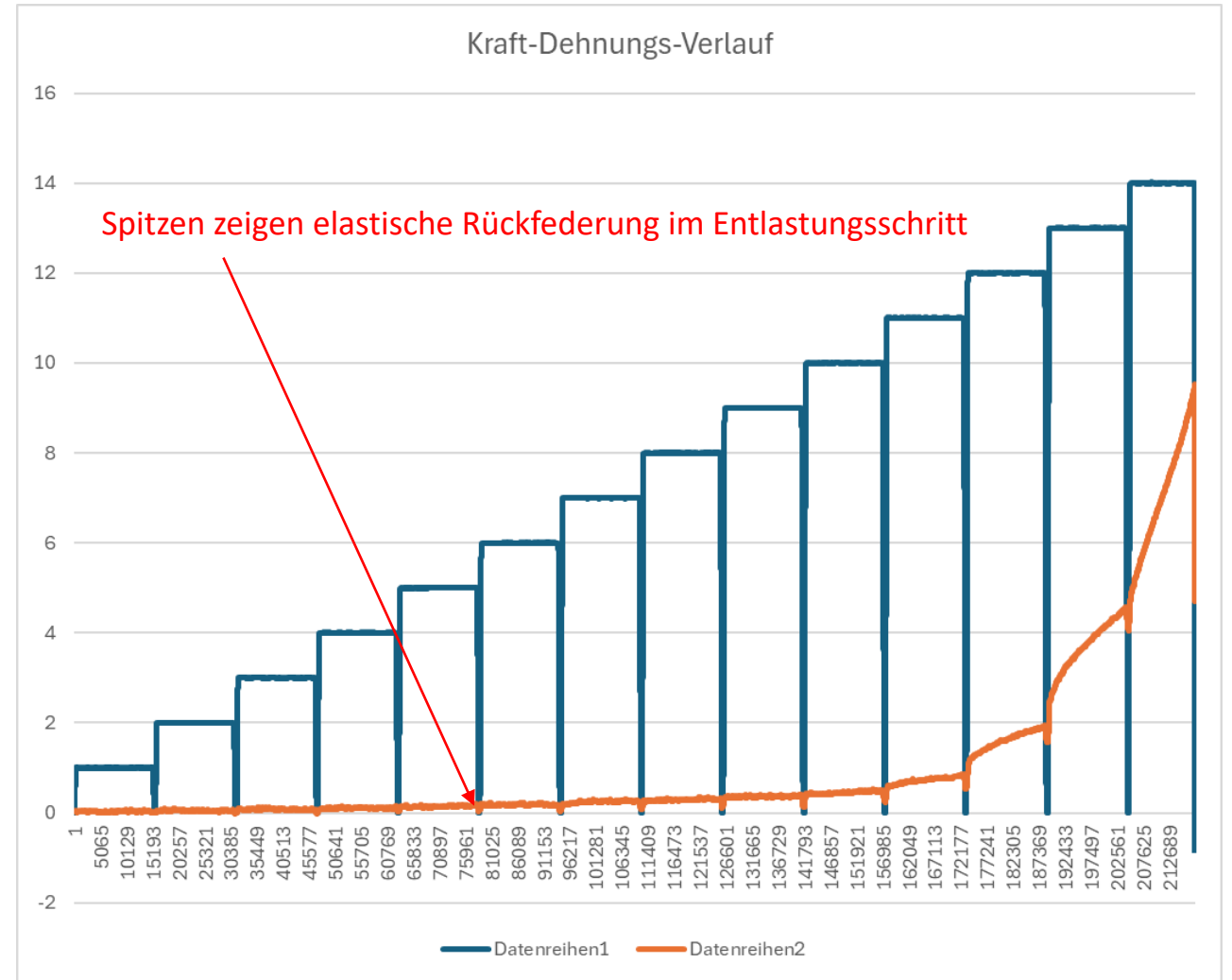
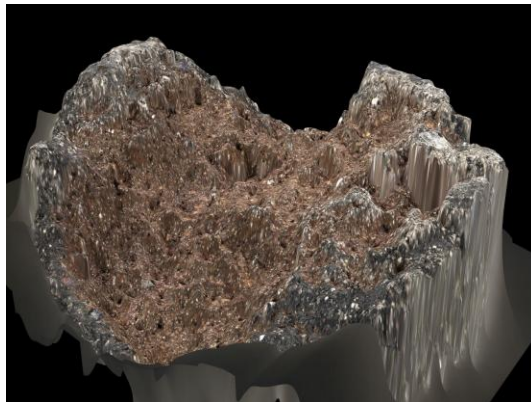
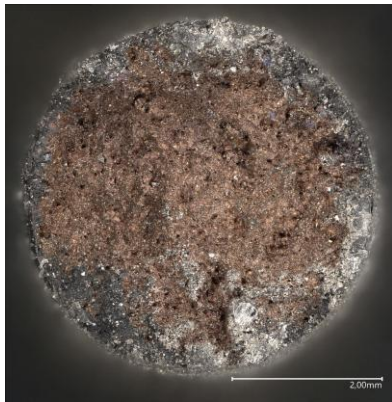
- Servohydraulische Prüfmaschine mit Nennlast von 63 kN
- Durchführung von kraftgeregelten Laststeigerungsversuchen mit Erfassung der lokalen Dehnung mittels Hochtemperaturextensometer
- Messbereich: $\pm 10\%$
- Laststeigerungsprozedur mit Haltezeiten unter Last für 300 Sekunden und nachfolgender Entlastung, um eine mögliche bleibende Verformung zu erfassen.
- Temperatur konstant: 650°C



Laststeigerungsversuche an Gewindestangen

Untersuchungen an Proben entnommen aus den Gewindestangen – Ergebnisse Variante B (gebraucht)

- **Probe B1**, Laststeigerung in 1 kN-Schritten
- Bis zu einer Oberlast von 6 kN tritt keine signifikante bleibende Verformung auf
- Nach Belastung mit 7 kN beträgt die plastische Verformung nur ca. 0,1 %
- Ab 8 kN steigt die Verformung auch im Haltezyklus stetig an
- Bei Oberlasten von >10 kN, fließt die Probe weg
- Versuchsabbruch aufgrund von Dehnungsüberschreitung bzw. Bruch der Probe



Laststeigerungsversuche an Gewindestangen

Zusammenfassung der Ergebnisse

- Die Untersuchungen zeigen, dass Proben der Variante A (neu) schon bei einer geringeren Lastamplitude von 4 kN eine bleibende plastische Verformung von ca. 0,1 % aufweisen.
- An Proben der Variante B (gebraucht) wird dagegen erst deutlich später bei Oberlasten von 8 kN eine vergleichbare bleibende Verformung von ca. 0,1 % beobachtet.
- Die Beanspruchbarkeit des „gebrauchten“ Werkstoffzustandes ist damit höher als für den „Neuzustand“

Abschätzung der zulässigen Vorspannkraft:

- Bei einem Probendurchmesser vom 5 mm ergibt sich bei 4 kN eine Nennspannung von ca. 204 N/mm^2 , welche im Versuch bei 650 °C ertragen werden konnte ohne dass thermisch induziertes Kriechen auftrat.
- Bei der M14 Gewindestange mit einem tragbaren Nennquerschnitt von ca. 73 mm^2 , entspricht dies einer Vorspannkraft von ca. 14843 N was einem Anzugsmoment von ca. 40 Nm entspricht.
- Diese Abschätzung gilt aber nur für eine glatte Werkstoffprobe.
- Die Gewindestange weist dagegen durch ihr Gewinde Spannungskonzentrationen auf, die zu höheren lokalen Beanspruchungen führen.

Experimentelle Analyse der Schraubenvorspannkraftverluste

Vergleich von Gewindestange und Gewindebolzen

- Nachdem bislang der Fokus der Untersuchungen auf Gewindestangen lag, gilt es zu klären, wie sich im Vergleich Gewindebolzen (glattes Rundmaterial lediglich mit Gewinde an den Enden) verhalten.
- Hierzu: Durchführung von Untersuchungen an Gewindebolzen analog zu denen der Gewindestangen mit Aufbringung einer Vorspannkraft von 40 Nm (ca. 19 kN).
- Auslagerung des Stacks für 22 Stunden bei 625°C und nachfolgende Ermittlung der Vorspannkraft.
- Ergebnis: Abfall der Vorspannkraft bei den Gewindebolzen mit einem Wert von ca. 1 kN deutlich geringer, als bei den Gewindestangen mit 12 kN
- Klärung: Analytische Berechnung ergibt, dass die Vorspannkraft von 19 kN zu einer lokalen Beanspruchung von ca. 430 MPa im Gewindegrund führt, welche allerdings die Dehngrenze $R_{p0,2}$ von 270 MPa überschreitet.
- Dies führt zu einer plastischen Verformung der Gewindestangen und damit zu einer Relaxation der aufgebrauchten Vorspannkraft.

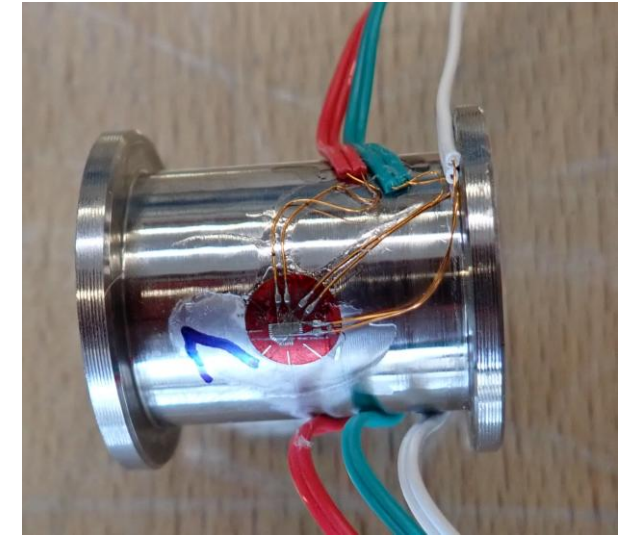


Experimentelle Analyse der Schraubenvorspannkraftverluste im Realbetrieb

Untersuchungen an einer PtL-Anlage von INERATEC

Übertragung der Laboruntersuchungen in die reale Anwendung

- Validierung der Untersuchungen an Gewindestangen und Gewindebolzen im realen Betrieb.
- Einsatz von Gewindebolzen (Gewinde nur an den Enden des Bolzens).
- Einsatz von Messhülsen zur Ermittlung der Vorspannkraft.
- Kalibrierung der Messhülsen zur Ermittlung der Last-Dehnungs-Funktion
- Einsatz von „Opfer-DMS“, daher Neuapplikation und Kalibrierung der Messhülsen nach der Messung im Realbetrieb der notwendig.
- Die Auswertung der Messergebnisse ergab einen deutlichen Vorspannkraftverlust der Gewindebolzen nach dem Test.
- Als mögliche Ursache wird aktuell die Temperaturbeanspruchung angesehen, welche sich mindernd auf die Einsatzlebensdauer auswirken könnte.
- Nachfolgende Analysen sollen diesen Einflussfaktor näher beleuchten.



| Hülse | Anzugskraft [kN] | Lösekraft [kN] |
|---------|------------------|----------------|
| Hülse 2 | 13,10 | 2,51 |
| Hülse 3 | 10,61 | 3,97 |
| Hülse 4 | 11,16 | 2,73 |
| Hülse 5 | 11,47 | 7,22 |

Analytische Abschätzung des zulässigen Anzugsmoments

Basierend auf vorliegenden Kennwerten und FEM-Simulationen

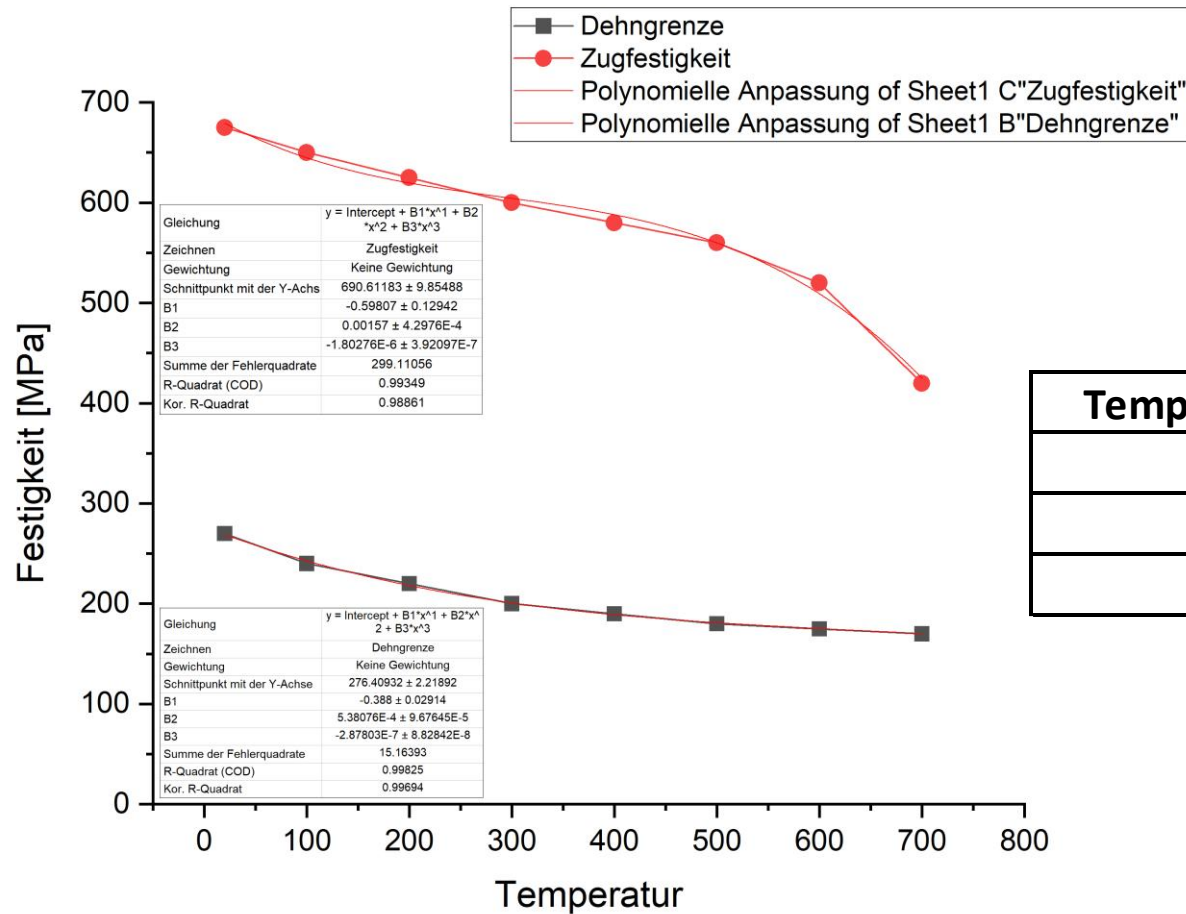
Fragestellung: Welches Anzugsmoment kann in Abhängigkeit der Temperatur realisiert werden?

- Einsatz von Gewindestangen und Gewindebolzen der Größe M14 x 2 Regelgewinde.
- Werkstoff: Alloy 602 CA (2.4633 - NiCr25FeAlY); Hochtemperaturwerkstoff mit einer hervorragenden Kriech- und Oxidationsbeständigkeit bis über 1.200 °C .
- Erhöhung der Einsatztemperatur auf 850°C.
- Abschätzung der Anzugsmomente unter Berücksichtigung von Literaturdaten (VDM Metals), da für diesen Temperaturbereich keine experimentellen Daten vorliegen.
- Abschätzung erfolgt ohne Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren! Diese würden das zulässige Anzugsmoment zusätzlich mindern.
- Außerdem kann mit diesem Ansatz nicht das Hochtemperaturkriechen berücksichtigt werden, welches dieser Werkstoff eigentlich nicht aufweisen dürfte, da er für Einsatztemperaturen bis 1200°C geeignet ist.
- Falls die lokale Werkstoffauslastung allerdings zu hoch ist, führt die Hochtemperaturbeanspruchung auch bei Temperaturen <1200°C zu einer Werkstoffschädigung.

Analytische Abschätzung des zulässigen Anzugsmoments

Basierend auf vorliegenden Kennwerten und FEM-Simulationen

Extrapolation der Festigkeitskurven:



- Daten zur Berechnung: von VDM Metals für den Werkstoff Alloy 602 CA; Werkstoffdatenblatt Nr. 4137, Revision 04, März 2022
- Verwendetes E-Modul von 137 GPa (für Temperatur von 900°C)
- Digitalisierung und Regression der angegebenen Einzelwerte (nur bis 700°C) zur Extrapolation für höhere Temperaturen

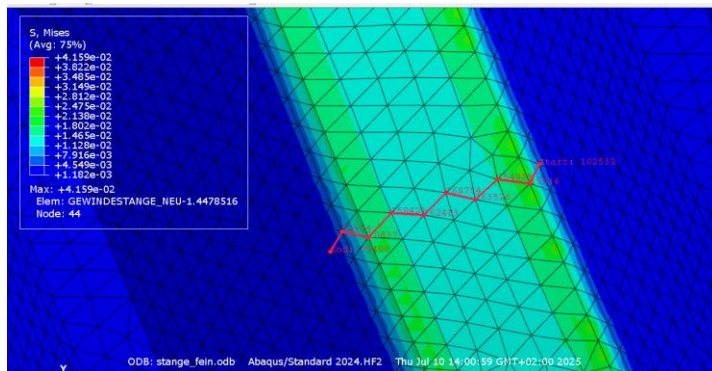
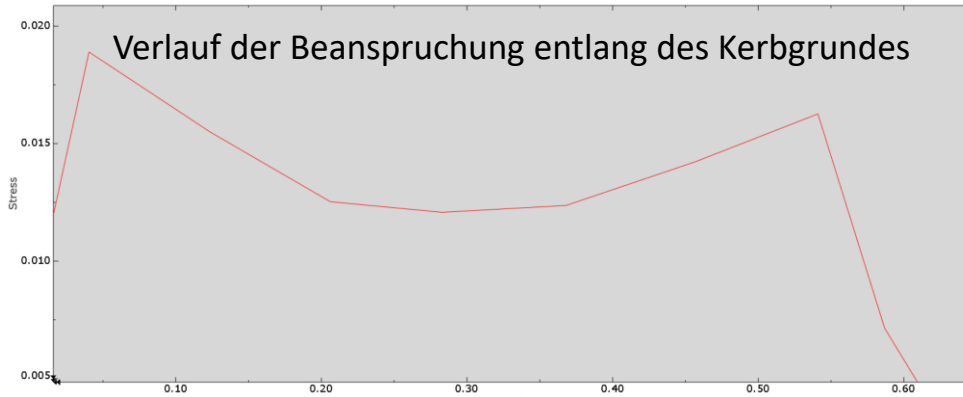
| Temperatur [°C] | Dehngrenze [MPa] | Zugfestigkeit [MPa] |
|-----------------|------------------|---------------------|
| 800 | 163,0 | 293,9 |
| 850 | 158,6 | 209,5 |
| 900 | 153,2 | 109,8 |

Analytische Abschätzung des zulässigen Anzugsmoments

Basierend auf vorliegenden Kennwerten und FEM-Simulationen

Durchführung einer FEM-Simulation zur Abschätzung der lokalen Beanspruchung im versagenskritischen Kerbgrund der Gewindegeometrie – Gewinde M14 x 2 nach DIN 976:

- Simulation mit einer Einheitslast von 1 N; linear elastische Skalierung der Beanspruchung; E-Modul von 137 GPa



| | Äußere Kraft [N] | 1 | | | |
|------------|------------------|---|-----|-------------|-------|
| Koordinate | Spannung [MPa] | | | | |
| 0 | 0,00743471 | | | | |
| 0,0404358 | 0,0188985 | | --> | 0,02 | MPa/N |
| 0,12355 | 0,0154976 | | | | |
| 0,206192 | 0,012527 | | | | |
| 0,282928 | 0,0120769 | | | | |
| 0,367996 | 0,0123665 | | | | |
| 0,457169 | 0,0142352 | | | | |
| 0,54097 | 0,0162656 | | | | |
| 0,586777 | 0,00714809 | | | | |
| 0,627197 | 0,00302757 | | | | |

Analytische Abschätzung des zulässigen Anzugsmoments

Basierend auf vorliegenden Kennwerten und FEM-Simulationen

- Dehngrenze $R_{p0,2} = 158,6$ MPa (für 850°C) darf nicht überschritten werden

- Mit einer geschätzten lokalen Beanspruchung von

0,02 MPa / N

ergibt sich eine maximale äußere Belastung von

7930 N

dies entspricht für die verwendete M14 x 2

Gewindeverschraubung einem Anzugsmoment von

20,76 Nm

| | | |
|----------------------|-------|-----------------|
| Rp0,2 | 158,6 | MPa |
| sigma_lokal | 0,02 | MPa / N |
| äußere Last, maximal | 7930 | N |
| Reibwert μ | 0,3 | |
| tragende Fläche | 72,76 | mm ² |
| Anzugsmoment | 20,76 | Nm |

| | | | |
|-------------------|-------|-------|--------------|
| Vorspannkraft [N] | 24830 | 15279 | 7930 |
| Anzugsmoment [Nm] | 65 | 40 | 20,76 |

- Um die lokale Dehngrenze $R_{p0,2}$ beim Einsatz unter 850°C nicht zu überschreiten, dürfte die Komponente nur mit einem maximalen Anzugsmoment von 20 Nm je Verschraubung montiert werden!
- Dieser theoretische Wert wurde ohne Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren abgeschätzt.
- Weiterhin werden mit diesem theoretischen Ansatz auch keine lokalen Stützwirkungseffekte durch die lokale Geometrie Berücksichtigung.
- **Der berechnete Wert ist nicht umsetzbar – zu gering! D.h. lokale Temperatur verringern, Schrauben vergrößern!!**

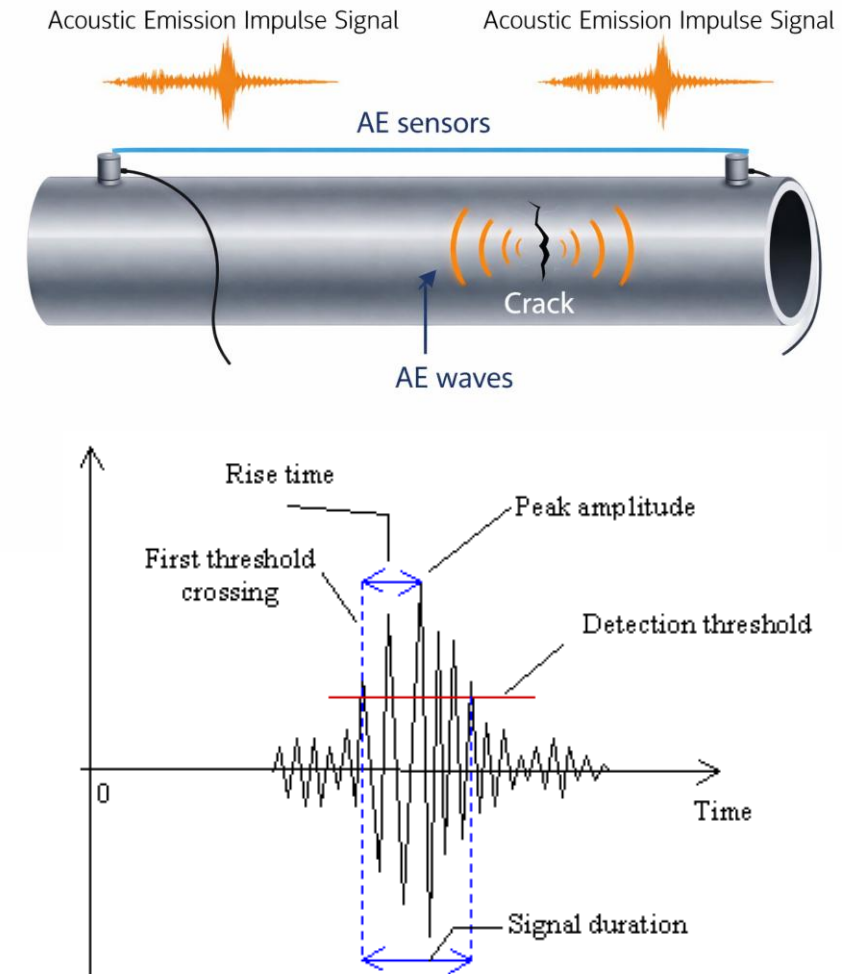
Detektion Zwei-Phasen Strömung

Acoustic Emission (AE) Messungen

Acoustic Emission Messmethode

Die Acoustic-Emission-Messmethode erfasst Körperschallwellen, die bei Risswachstum, Korrosion, Undichtigkeiten oder stoßartigen Einwirkungen wie Kavitation entstehen. Aus Ankunftszeit, Amplitude und Häufigkeit dieser Signale lassen sich Ort, Intensität und Verlauf von Schädigungsprozessen im Material bestimmen.

- Frequenzbereich: oberhalb des hörbaren Bereichs (ca. 10 - 500 kHz)
- Hohe Abtastraten bis 5 MHz
- Piezoelektrische Sensoren entweder Laborsensorik oder kostengünstige Piezo Patch Sensoren für dauerhafte Installation.



Detektion Zwei-Phasen Strömung

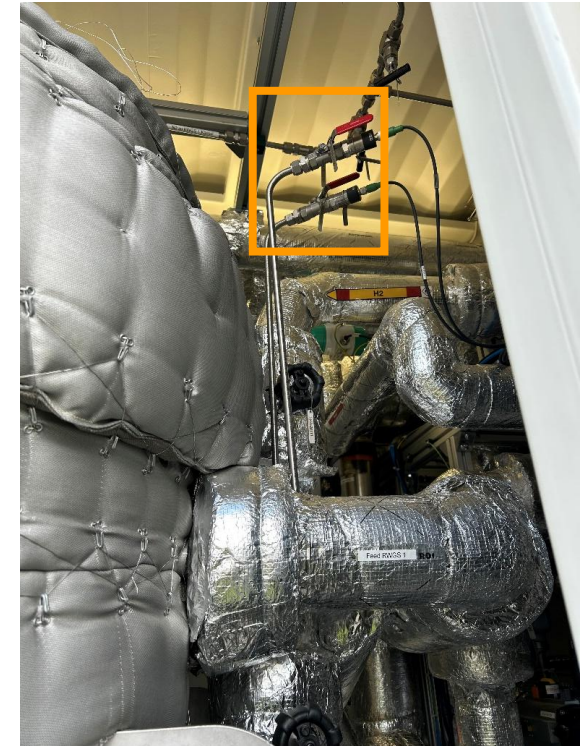
Acoustic Emission (AE) Messungen

Mögliche AE-Messungen an den Reaktoren zur Untersuchung von:

- Verschleiß und Undichtigkeiten von Ventilen und Dichtungen
 - Schädigungen an den Heizelementen z.B. Rissbildung
 - Vorliegen eines 2-Phasen-Gemisches (Gas mit Wassertropfen)
-
- Temperatur RWGS 200 – 350°C, Temperatur FT max. 260°C
 - Zur Wärmeentkopplung können die Sensoren über „Wellenleiter“ (z.B. Gewindestangen an Rohrschellen) angebracht werden, um die Signale zu leiten und die Sensoren in einem kühleren Bereich zu applizieren.
 - Auch eine Anbringung an kühleren Zuleitungen ist möglich.

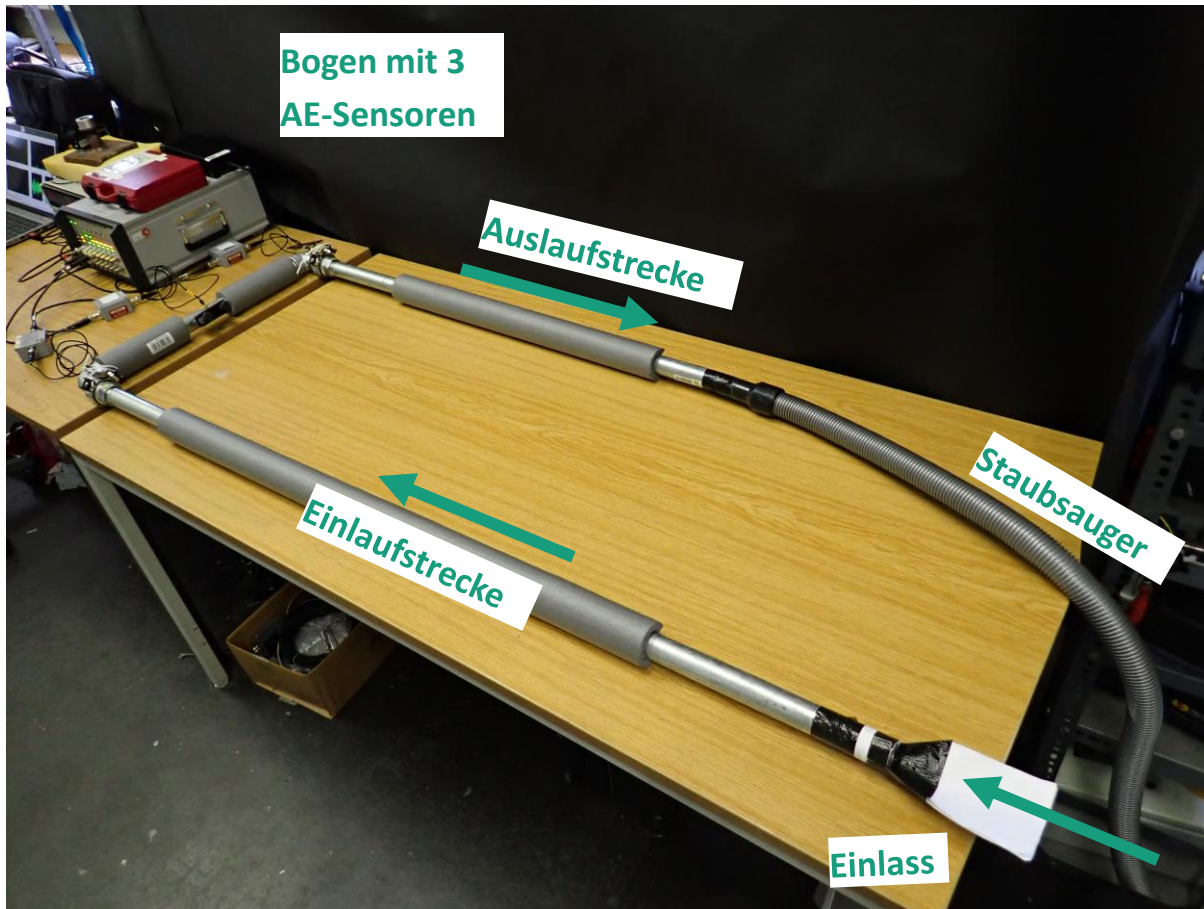


Quelle: Vallen Systeme GmbH



Versuchsaufbau am Fraunhofer LBF

Teststrecke mit 3 AE-Sensoren



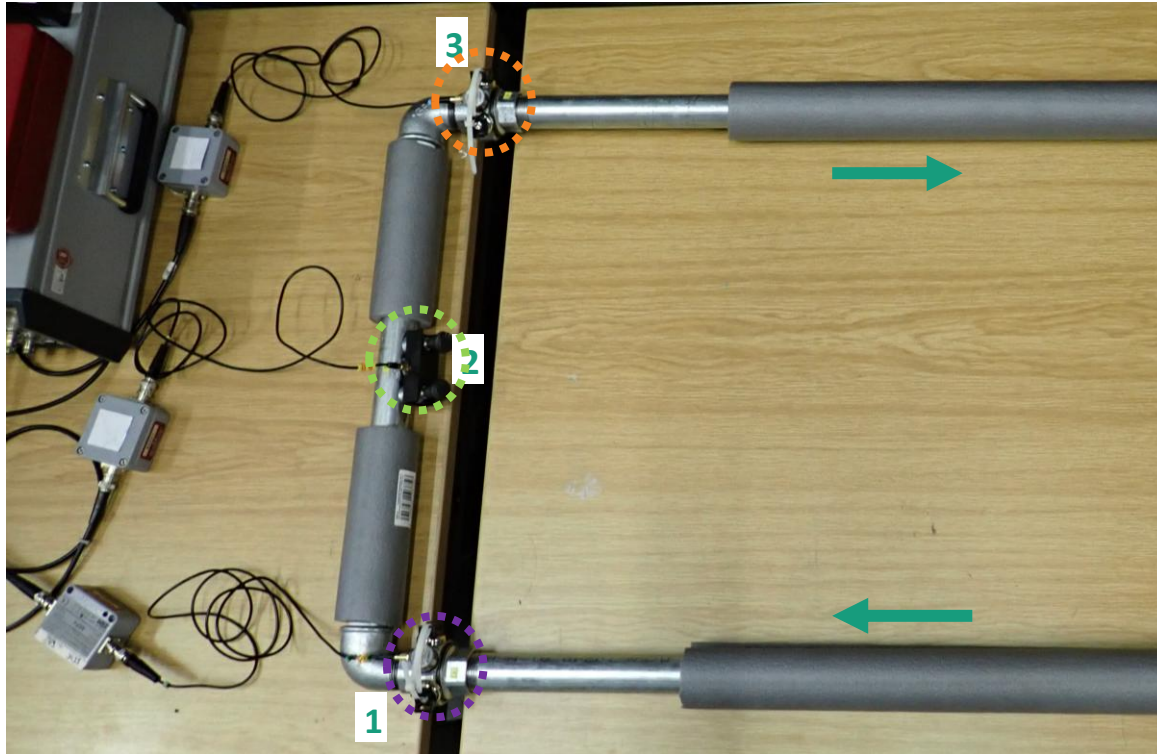
Aufbau:

- 1" Stahlrohr mit 2x 90° Bögen
- Luftstrom durch Staubsauger
- Offener Einlass mit Trichter ermöglicht es Feststoffe und Flüssigkeiten durch das Rohr zu saugen
- Acoustic Emission System mit 3 Sensoren



Versuchsaufbau am Fraunhofer LBF

Teststrecke mit 3 AE-Sensoren



Zwei-Phasen Medien

Bilder Anregung Sand und Wasser

Prise Sand

- Rheinsand gewaschen, eher fein, für den Sandkasten
- Fingerkuppe zeigt zugeführte Sandmenge



Sprühstoß aus Blumenspritze

- Medium Wasser
- Spritze erzeugt feinen Sprühnebel

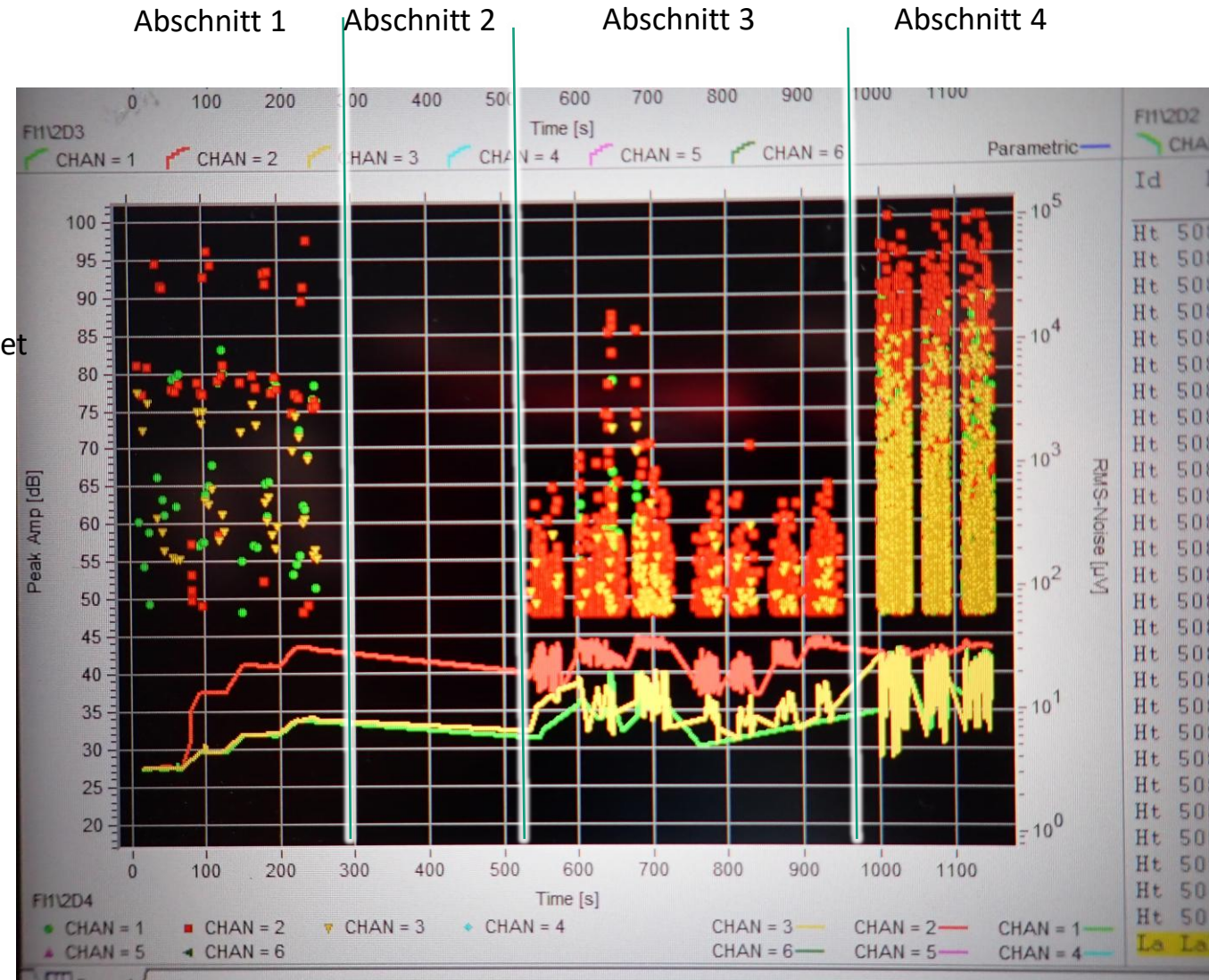


Versuchsaufbau

Versuchsablauf/Protokoll

Protokoll:

- **Abschnitt 1: Kalibrierung mit Leadbreak Test**
 - Staubsauger zuerst Aus, dann Staubsauger in 3 Stufen zugeschaltet
- **Abschnitt 2: Nur Staubsauger**
 - Staubsauger auf den 3 Stufen. Bei Stufe 2 und 3 gibt es Hintergrundrauschen > 40 dB
- **Abschnitt 3: Wasser Sprühnebel**
 - Abstand ca. 50cm zum Einlass
 - mehrfach Wasser Sprühnebel auf den 3 Staubsaugerstufen
- **Abschnitt 4: Sand einstreuen**
 - Sand rieseln lassen, auf 3 Staubsaugerstufen

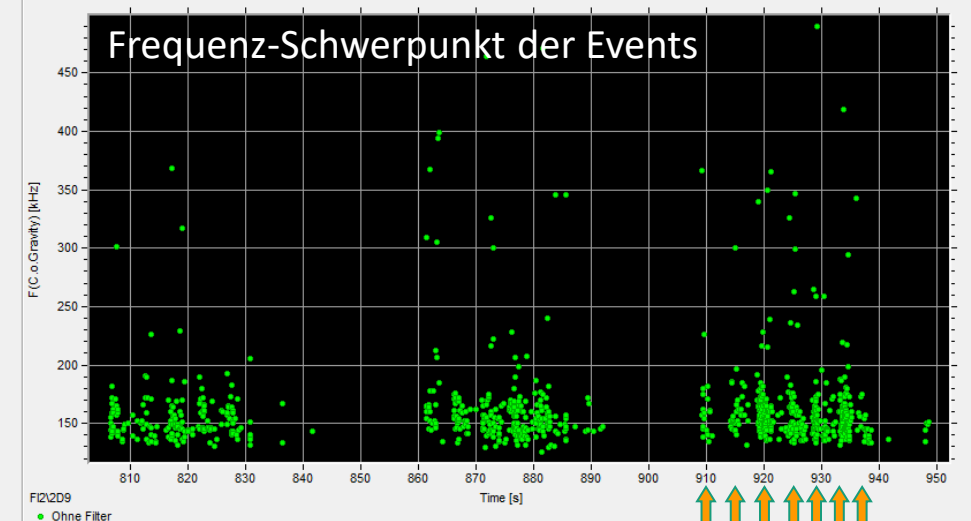
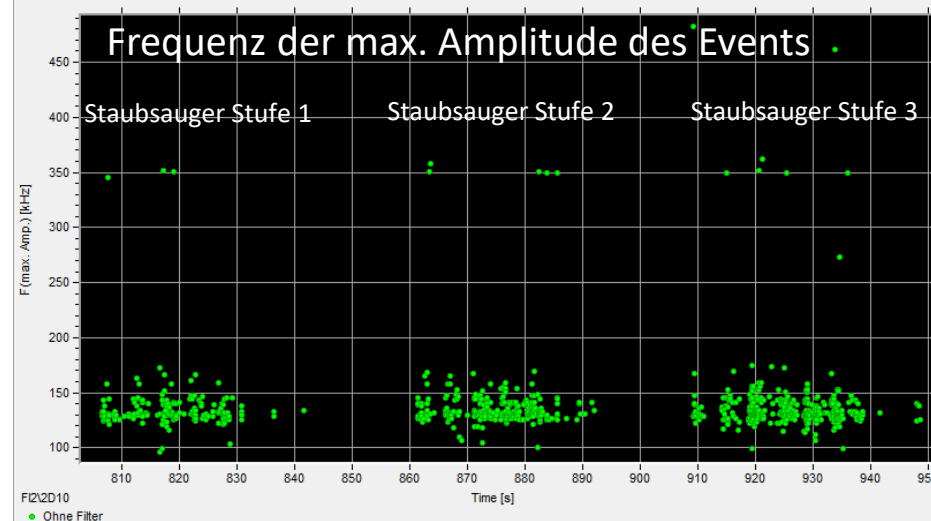
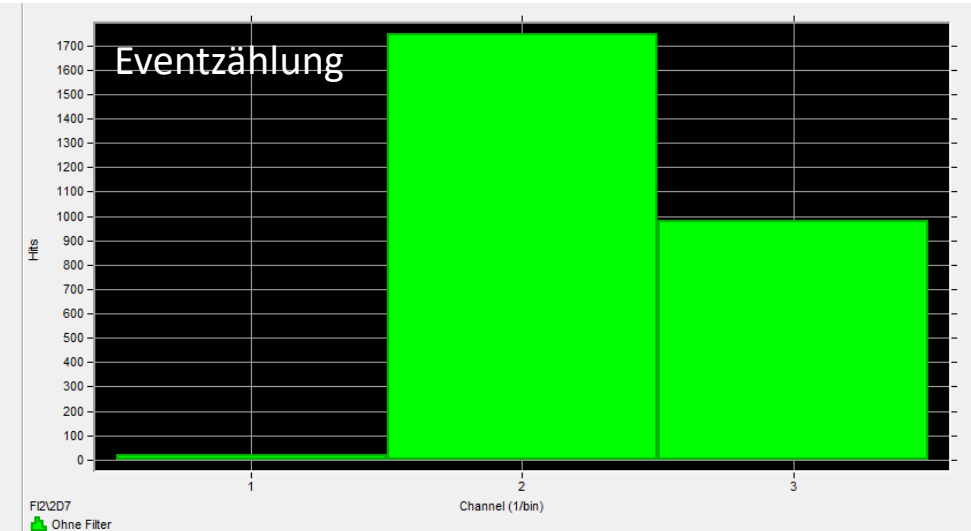
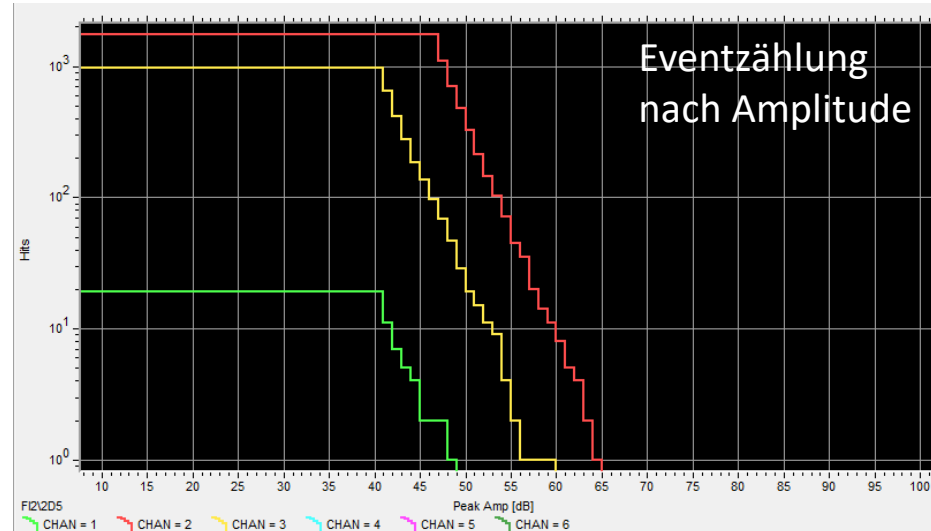


Auswertung - Wassernebel

Wassernebel

Beobachtung:

- Die meisten Hits treten an Sensor 2 auf mit ~1700 Events. Sensor 3 zeigt noch ca. 1000 Events. Sensor 1 nur etwa 20.
- Die maximalen Amplituden liegen zwischen 50 und 65 dB. Sensor 2 zeigt die höchsten Amplituden.
- Die Staubsaugerstufe hat nur geringen Einfluss.
- Einzelne Sprühstöße der Wasserspritze sind im Zeitbereich zu erkennen.
- Die Frequenz der Schallwellen liegt zwischen 120 und 200Hz. Nur wenige liegen darüber.

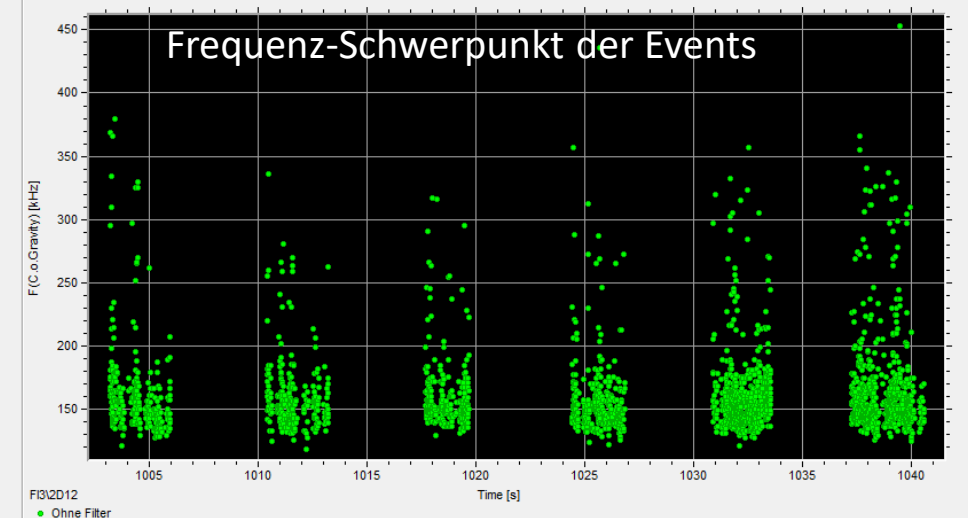
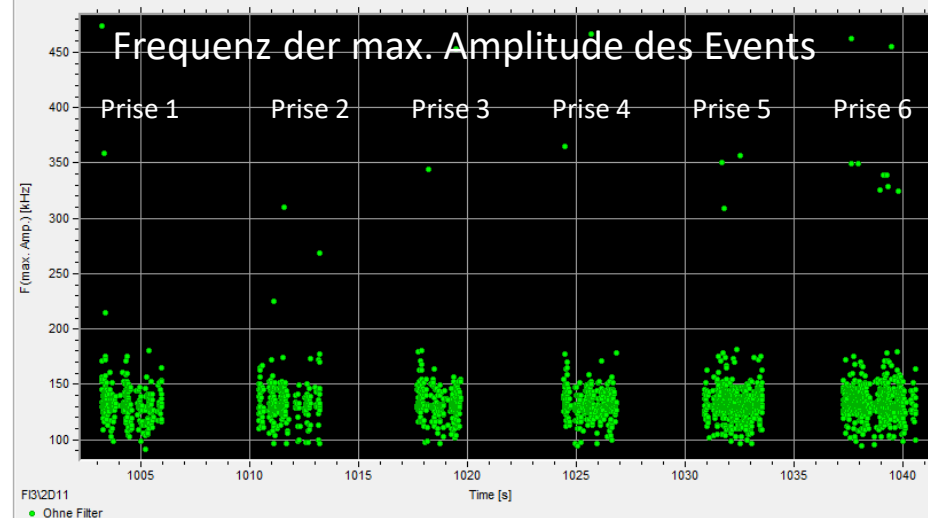
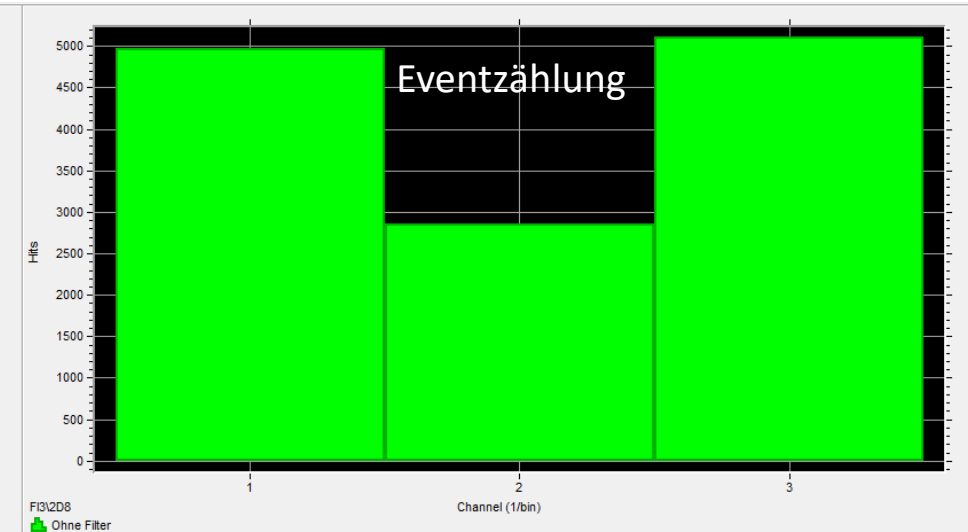
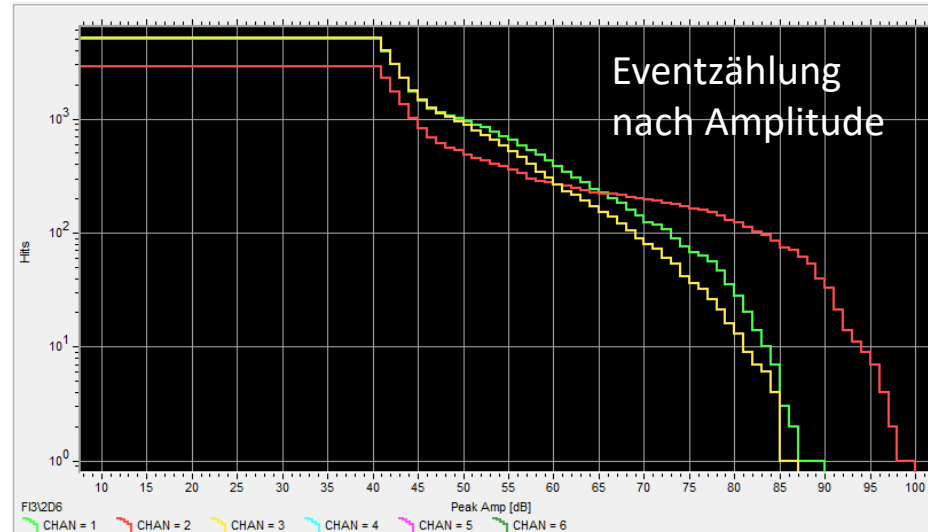


↑↑↑↑↑
Einzelne Sprühstöße

Auswertung - Sand Feiner Sand

Beobachtung:

- Die meisten Hits treten an Sensor 1 und 2 auf mit ~5000 Events. Sensor 2 zeigt noch ca. 2500 Events.
- Die maximalen Amplituden liegen zwischen 85 und 100 dB. Sensor 2 zeigt die höchsten Amplituden.
- In den linearen Maßstab umgerechnet sind die Amplituden bei Sand etwa 50x höher als bei Wasser.



Auswertung - Fazit

Zusammenfassung

- Feiner **Wassernebel wird mit den AE-Sensoren zuverlässig detektiert**. Die Signale liegen deutlich über dem Rauschpegel.
- Alle Impact-Events am Rohr (Sand wie Wasser) erzeugen ähnliche Frequenzen. Damit lassen sich diese Signale ggf. vom Rauschen und anderen Events in der Anlage unterscheiden.
- Das Verfahren eignet sich damit Prinzipiell auch für die Erfassung von Zwei-Phasen Strömungen im Reaktor.
- Ob das Verfahren auch in der Anlage bei mehr Hintergrundgeräuschen noch funktioniert muss der Praxistest zeigen.

Zuverlässigkeitsanalyse

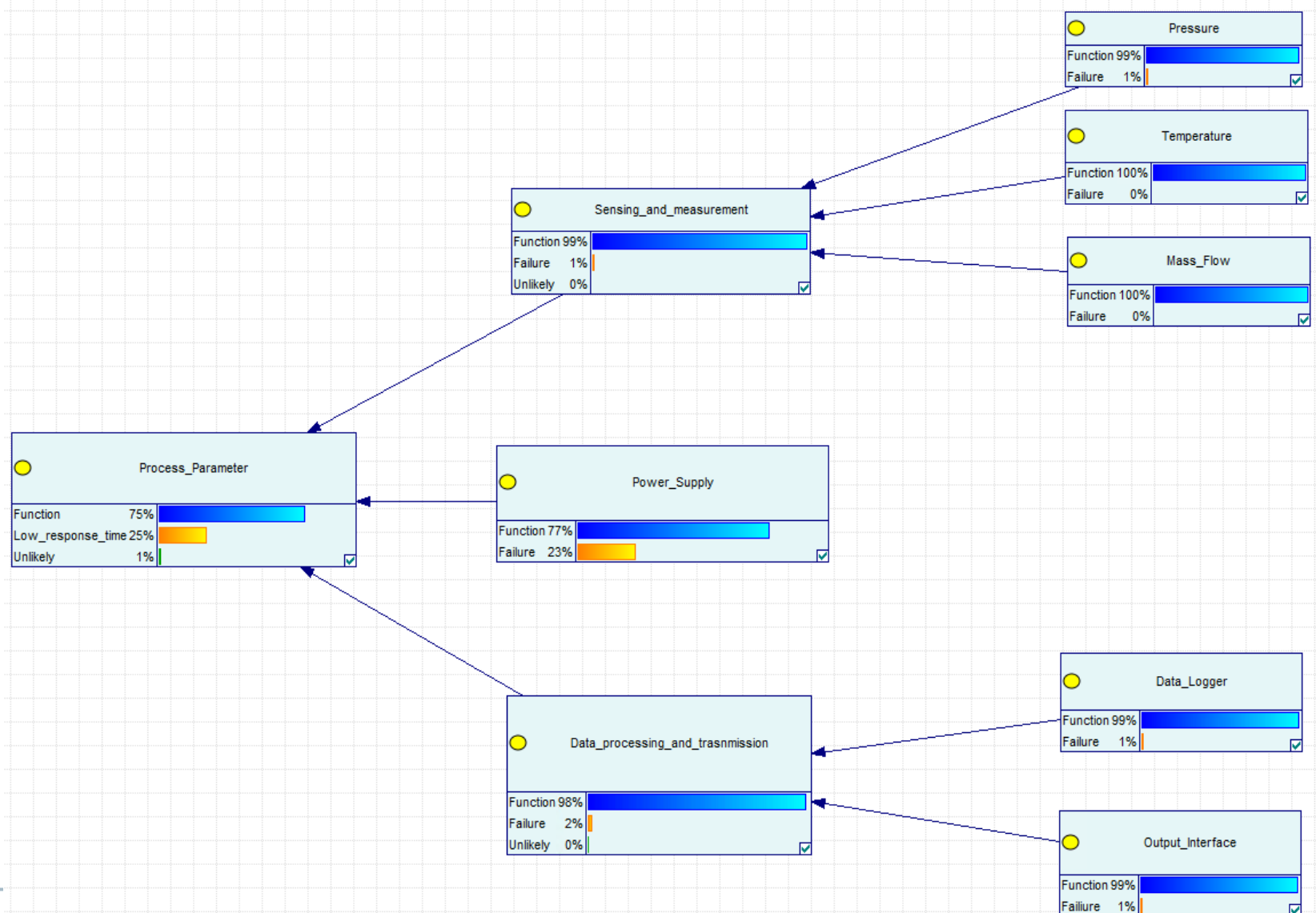
Probabilistische FMEA

Aufbau einer probabilistischen Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse (probFMEA)

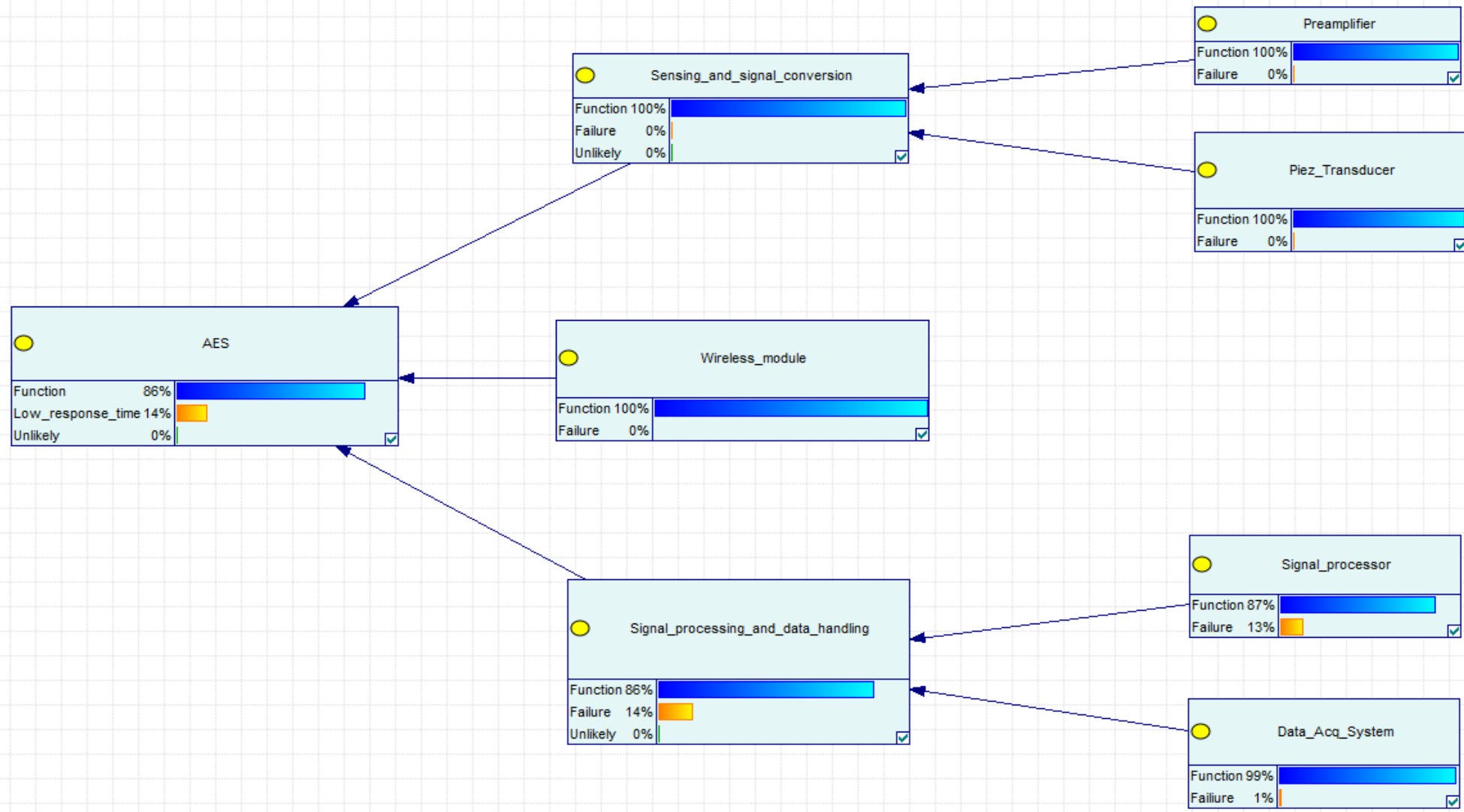
Die drei Hauptkomponenten Anlage, Fischer-Tropsch Reaktor (FT) und Reverse Water Gas Shift Reaktor (RWGS) sind Grundlage der probFMEA. Dargestellt werden die Fehler auf Komponentenebene mit deren Ausfallwahrscheinlichkeit. Im Weiteren werden die Auswirkungen auf die Subsysteme bis zur Gesamtanlage weiterpropagiert.

Abbildung aus Geheimhaltungsgründen entfernt

Detektion der zwei-Phasen-Strömung über Prozessparameter

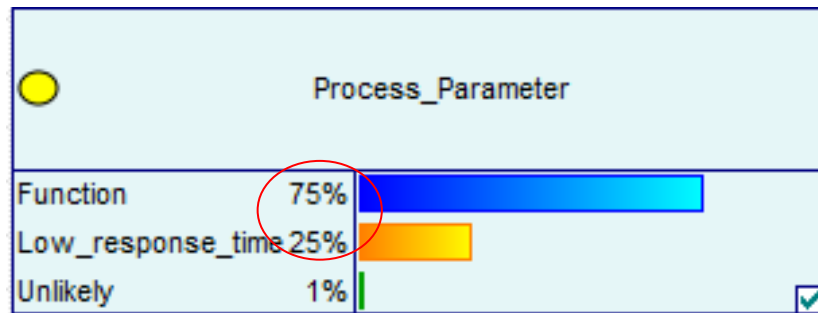
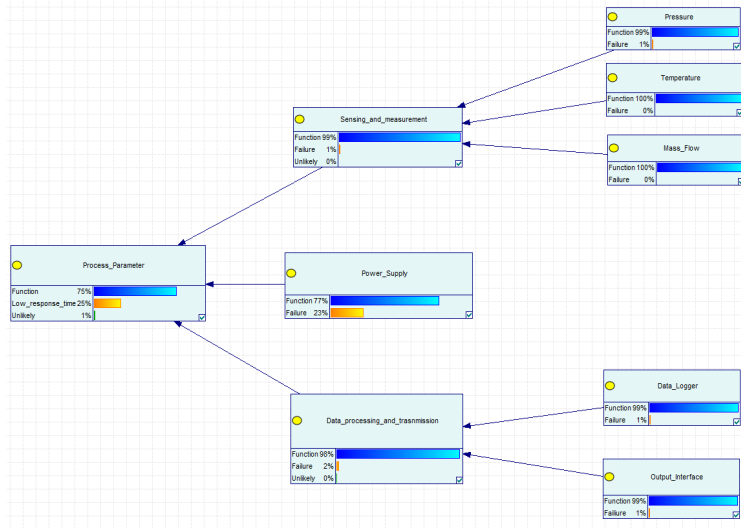


Detektion der zwei-Phasen-Strömung Acoustic Emission

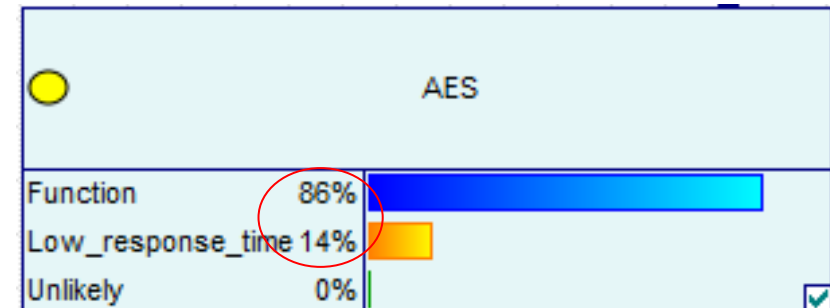
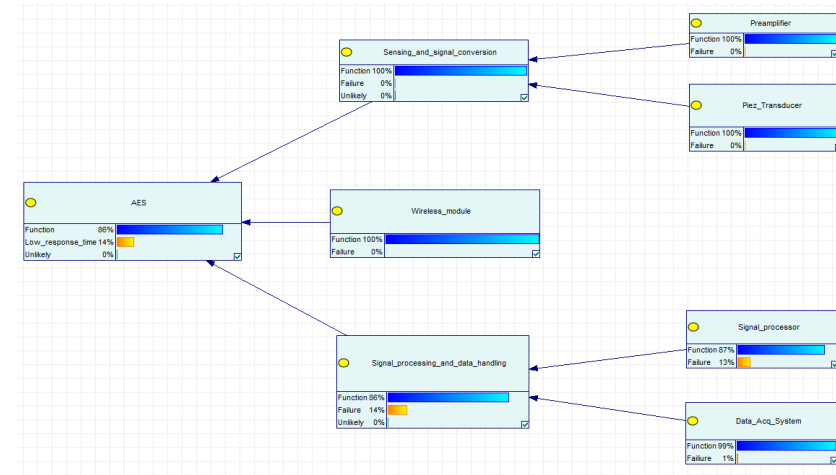


Detektion der zwei-Phasen-Strömung durch Acoustic Emission

Prozess Parameter

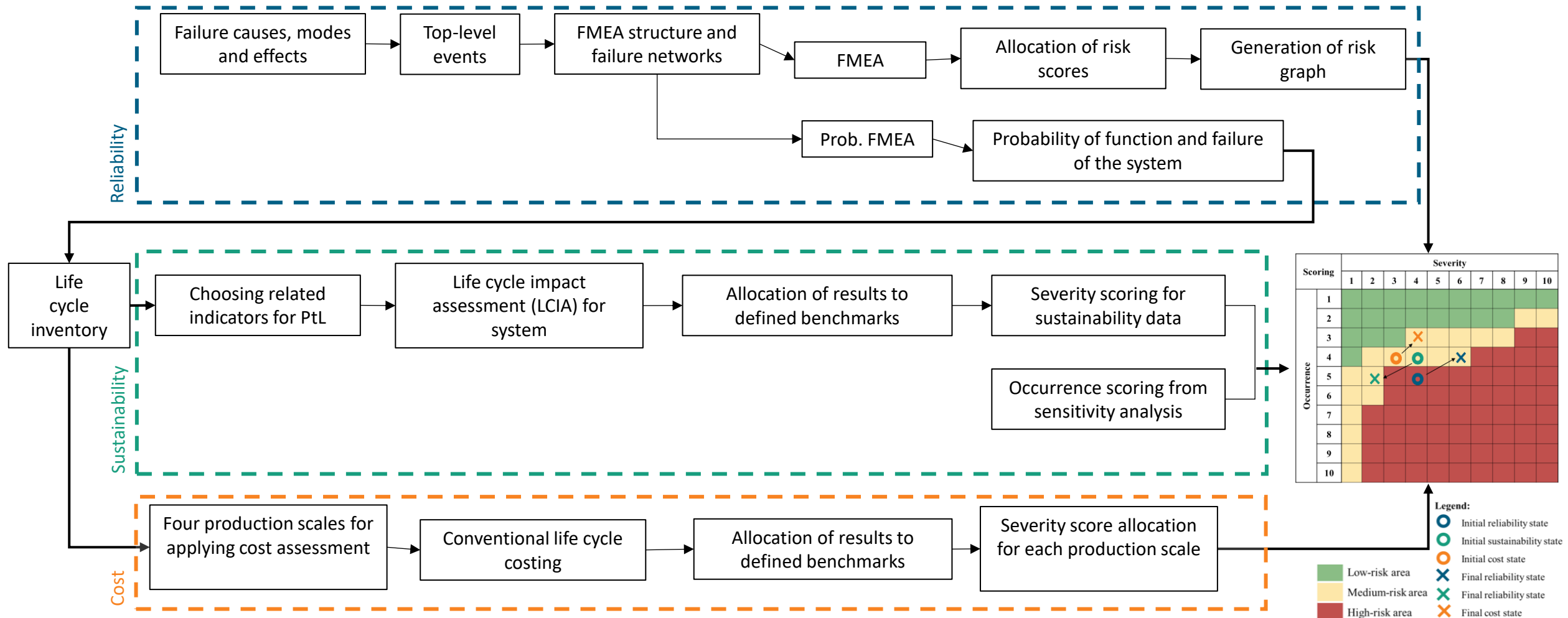


Acoustic Emission Sensor (AES)



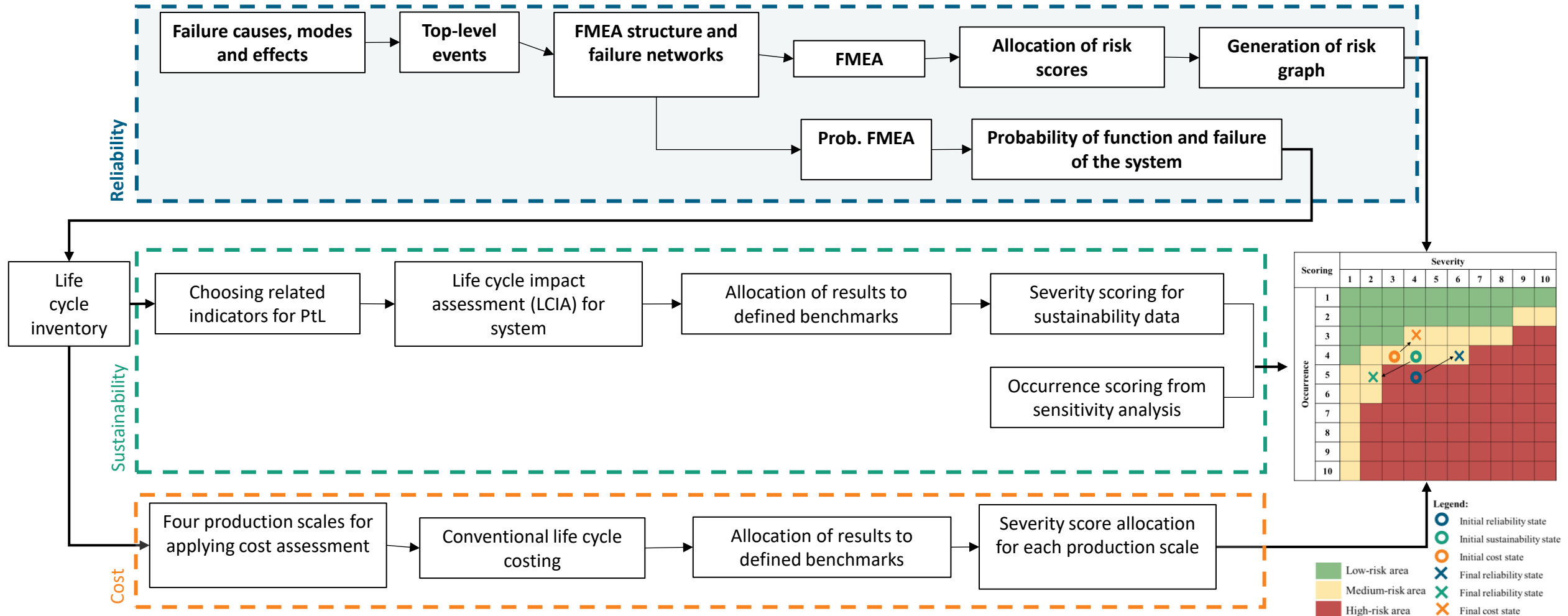
Kombinierte Darstellung in einem Risikograph

Vorgehensweise



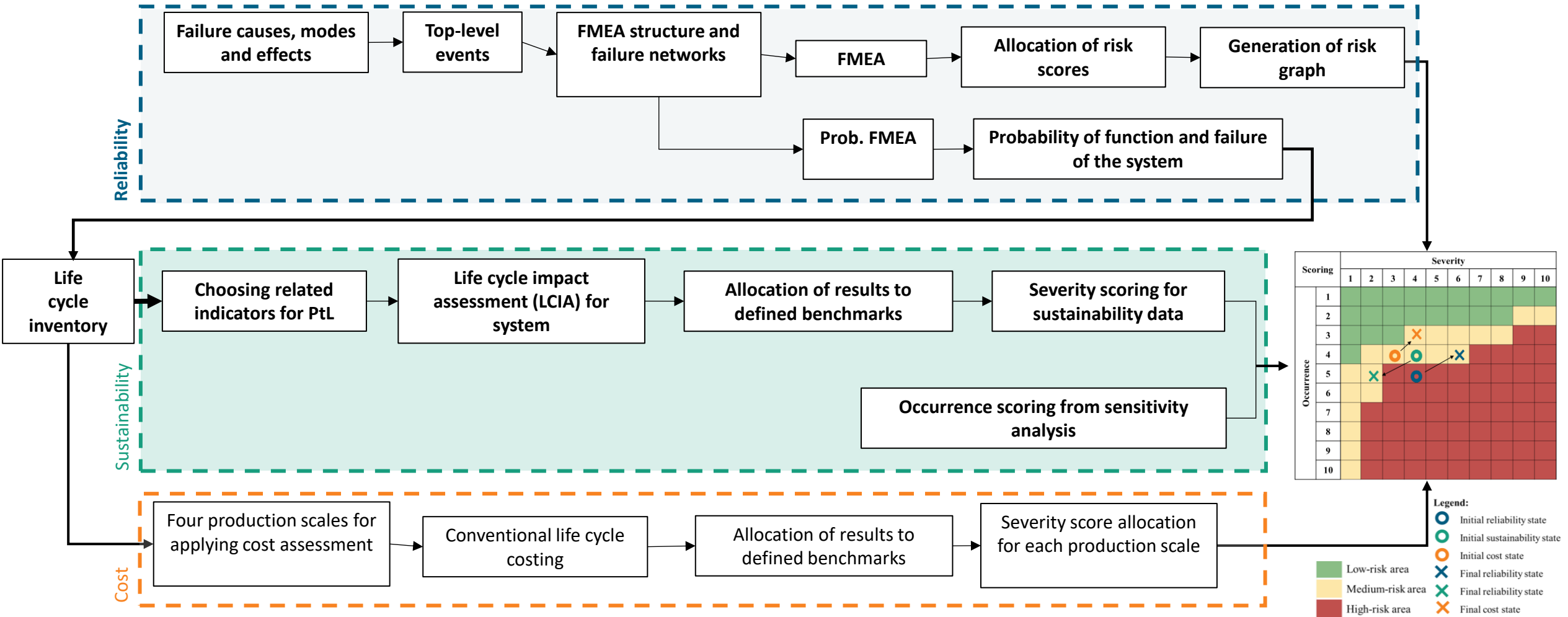
Kombinierte Darstellung in einem Risikograph

Zuverlässigkeit



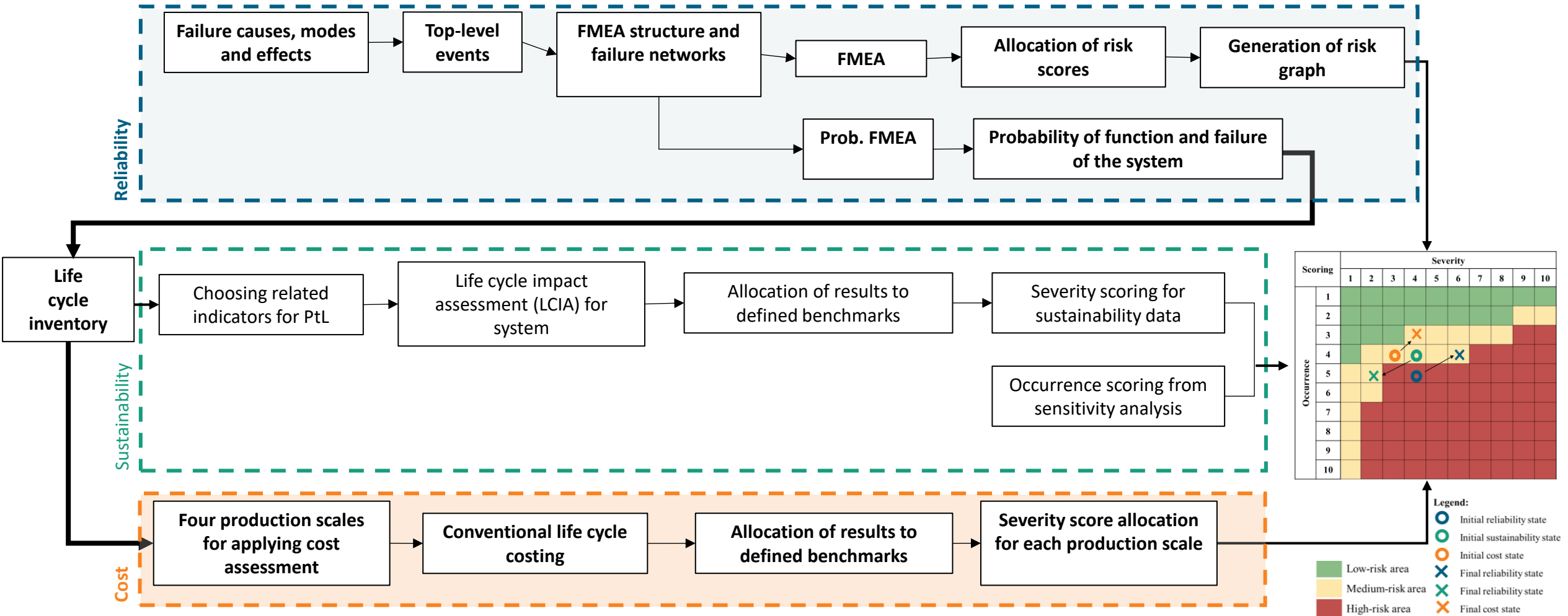
Kombinierte Darstellung in einem Risikograph

Nachhaltigkeit

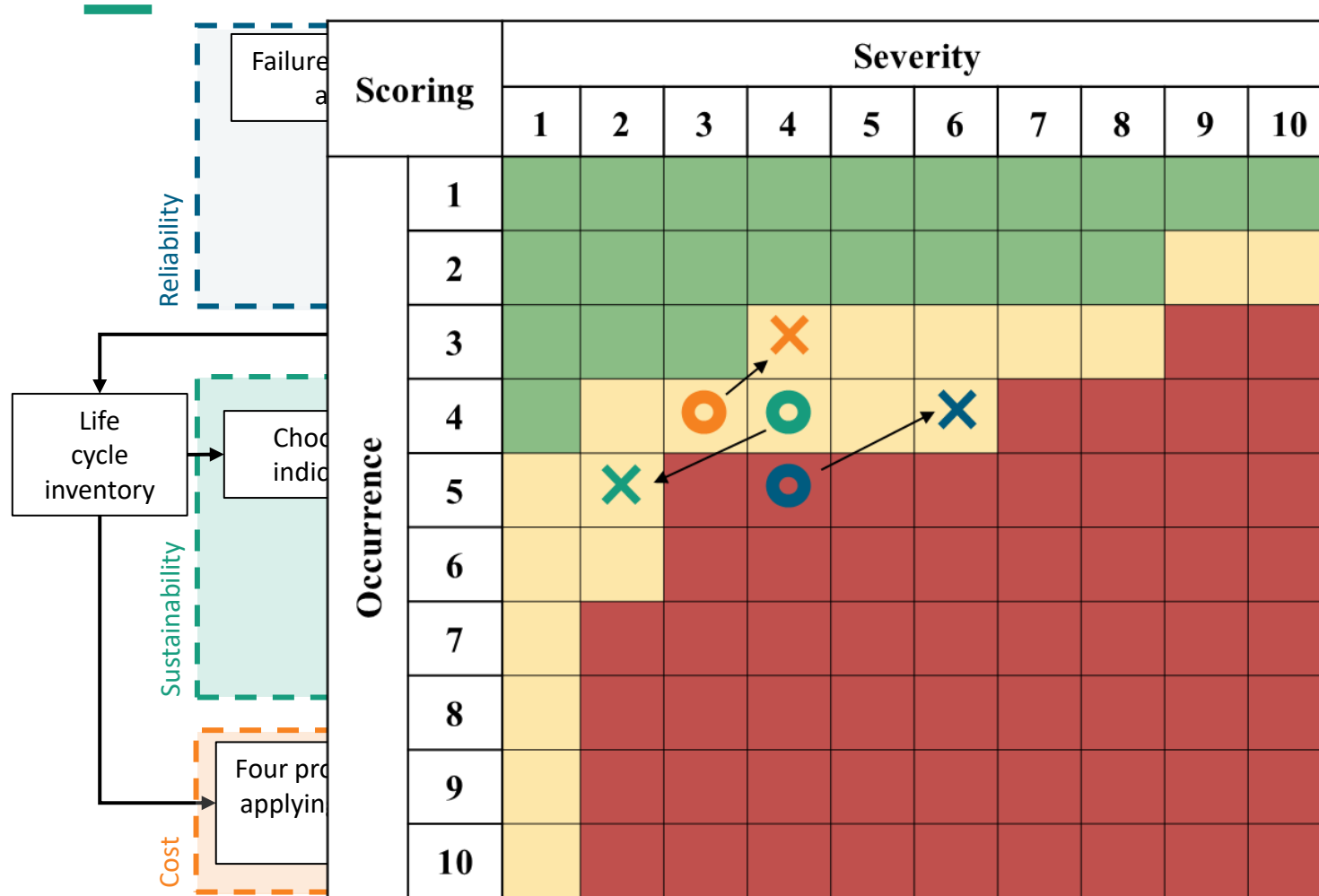


Kombinierte Darstellung in einem Risikograph

Kosten

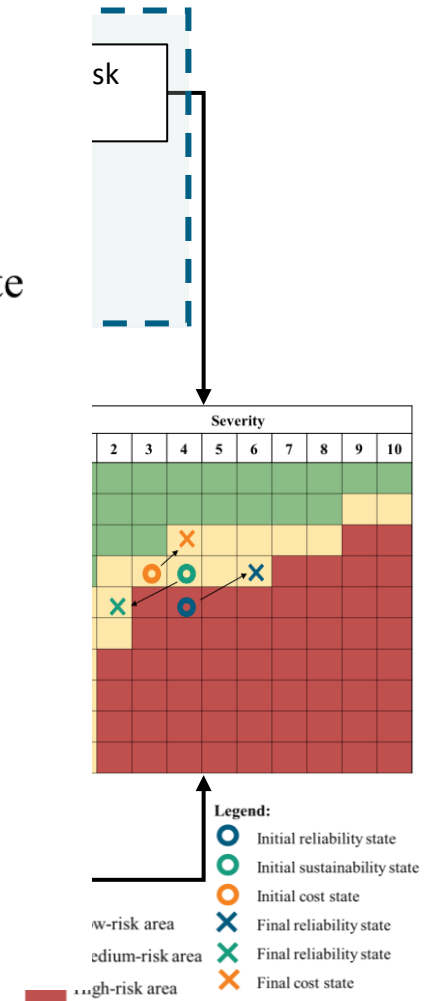


Kombinierte Darstellung in einem Risikograph



Legend:

- Initial reliability state
- Initial sustainability state
- Initial cost state
- Final reliability state
- Final reliability state
- Final cost state
- Low-risk area
- Medium-risk area
- High-risk area



Kontakt

Thomas Pfeiffer
System Reliability
Tel. +49 6151 705-392

thomas.pfeiffer@lbf.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
Bartningstr. 47
64289 Darmstadt
www.fraunhofer.de



Fraunhofer
ILBF

47

E.ON
ILBF

Lunch & Networking Break.

Vortrag: PtL aus der Sicht der LCA am Beispiel des eKerosins

Prof. Dr. Ralf Ehret, Provadis Hochschule

Vortrag 1 | INERATEC GmbH

Vortrag 2 | CENA Hessen

Vortrag 3 | Fraunhofer LBF



Vortrag 4 | Provadis Hochschule

Ausblick

Führung durch die ERA-ONE-Anlage von INERATEC

Real-time Power Supply for e-fuels: Erkenntnisse zur flexiblen Herstellung von PtL-Kraftstoffen

Frankfurt, 21.05.2026

Prof. Dr.-Ing. Ralf Ehret

Gefördert vom



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

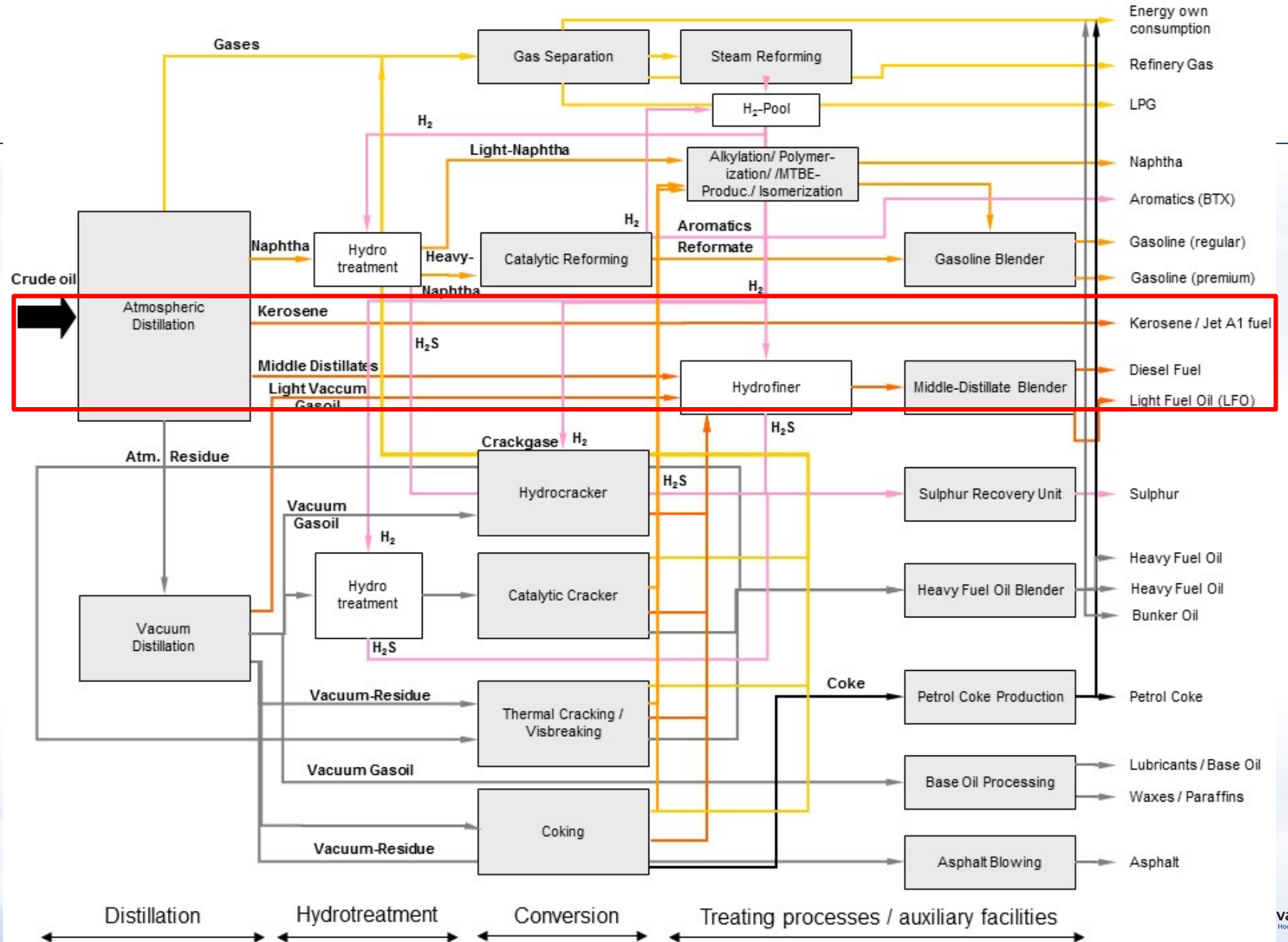
AP 8 Erstellung LCA des Prozesses und Validierung

Aufgaben der Provadis Hochschule

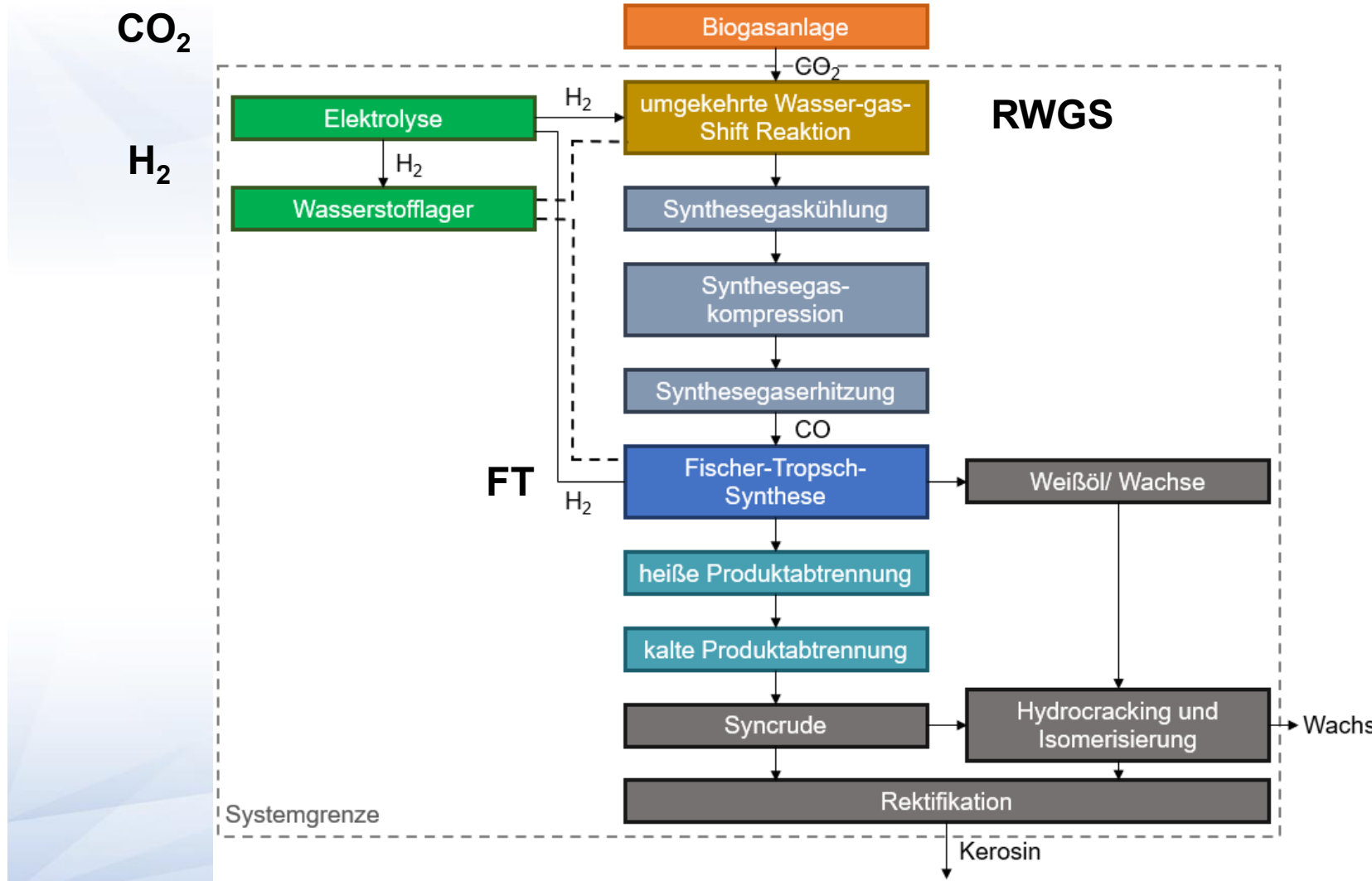
- Erstellung einer LCA gemäß ISO 14040/44 und Identifikation der Hauptverursacher mit Fokus auf Kerosin
- Erfassung der relevanten Umweltwirkungen
- Definition eines Vergleichssystems und einer funktionalen Einheit
- Ableitungen aus den LCA-Ergebnissen

Vergleichssystem

- Kerosin aus Erdöl als Vergleichssystem
- funktionale Einheit: 1 t Kerosin
- Cradle-to-Grave-Ansatz



REPOSE - LCA-Übertragung für e-Kerosin



- ohne in- und output-Ströme, Rückführungen, etc..
- Cradle-to-Grave-Betrachtung
- fE: 1 t e-Kerosin

Annahmen

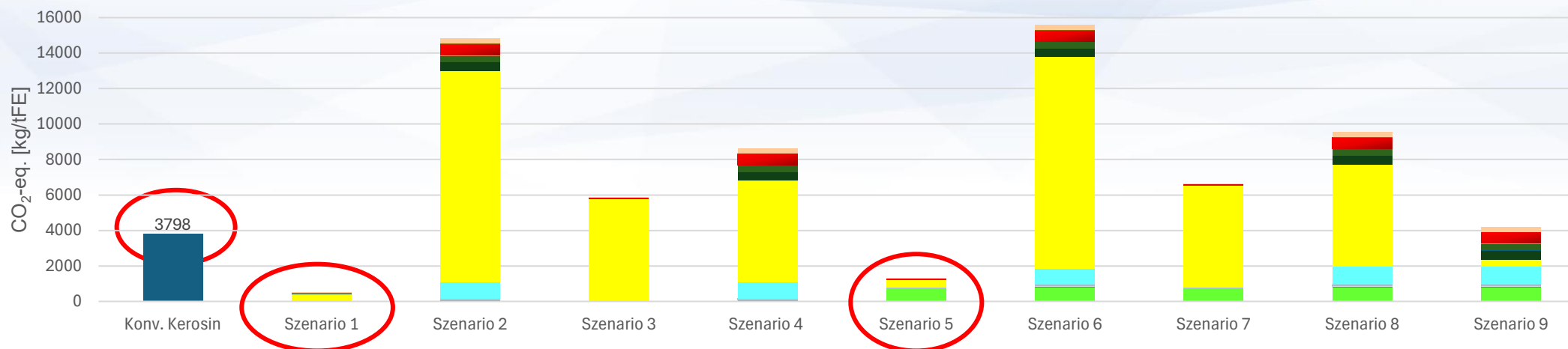
- Vergleichssystem: 1 t konv. Kerosin
- Datenbasis in- und outputs: Projektpartner
- CO₂ → ohne Umweltbelastung und biobasiert
- H₂O der RWGS und FT → keine Umweltlasten
- keine Abfallmengen → keine Berücksichtigung im Prozess
- Simulation der/des Rektifikation/Hydrocrackings: ASPEN® / thermodynamische Daten
- ausreichende Verfügbarkeit von grünem Strom
- Allokation Wachs und Kerosin: 30/70 % w/w

untersuchte Szenarien für 1 t Kersosin

| Szenarien | Kohlenstoffdioxid | Wasserstoff | Strom |
|-----------|--------------------|-------------------------------------|--------------|
| 1 | ohne Lastenschrift | grün (Elektrol.) | Windkraft |
| 2 | ohne Lastenschrift | grün (Elektrolyse dt. Strommix.) | dt. Strommix |
| 3 | ohne Lastenschrift | grau (SR) | Windkraft |
| 4 | ohne Lastenschrift | grau (SR) | dt. Strommix |
| 5 | biobasiert | grün (Elektrol.) | Windkraft |
| 6 | biobasiert | grün (Elektrolyse dt. Strommix.) | dt. Strommix |
| 7 | biobasiert | grau (SR) | Windkraft |
| 8 | biobasiert | grau (SR) | dt. Strommix |
| 9 | biobasiert | grün (Elektrol.) | dt. Strommix |

Auswertung Treibhausgaspotential – Cradle-to-Grave für 1 t Kerosin

Global Warming Potential (GWP 100) Cradle-to-Grave

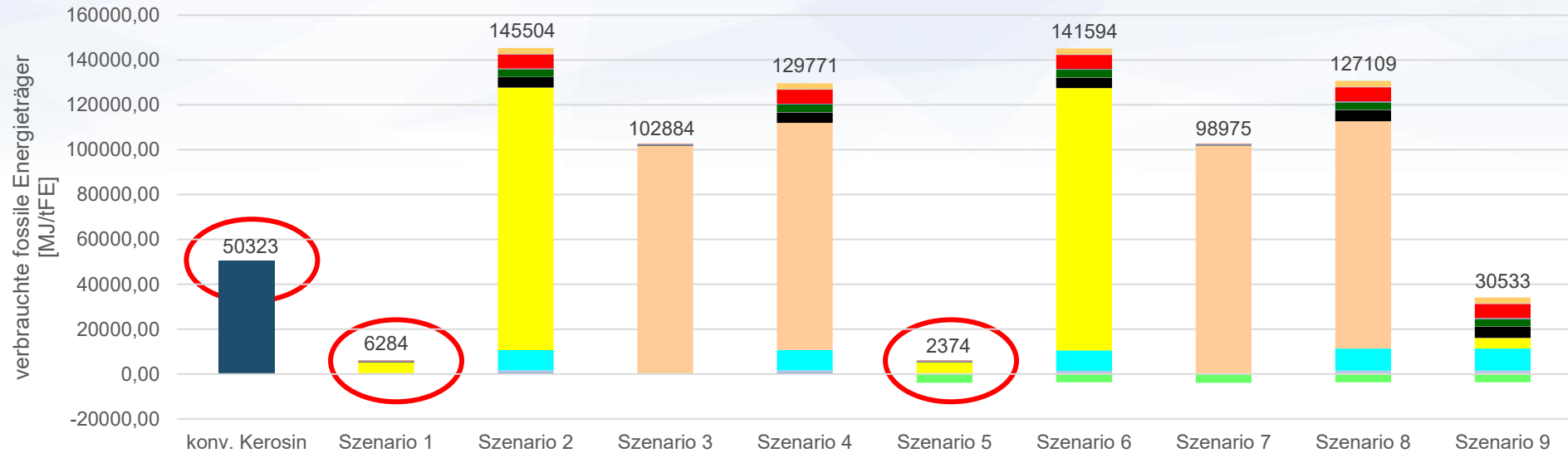


- CO₂
- Cold product separation
- Distillation
- Electricity RWGS
- Hydrogen produktion
- Fischer Tropsch
- H₂ Compression
- H₂ Feed
- Hot product separation
- Hydrocracking
- Steam RWGS
- Syngas compression
- Syngas cooling
- Syngas preheating

| | Szenario 1 | Szenario 2 | Szenario 3 | Szenario 4 | Szenario 5 | Szenario 6 | Szenario 7 | Szenario 8 | Szenario 9 |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|--------------------|---------------------------|
| Strom | Windkraft | deutscher Strommix | Windkraft | deutscher Strommix | Windkraft | deutscher Strommix | Windkraft | deutscher Strommix | deutscher Strommix |
| Wasserstoff | Elektrolyse mit Windkraft | Elektrolyse, dt. Strommix | Steamreforming | Steamreforming | Elektrolyse mit Windkraft | Elektrolyse, dt. Strommix | Steamreforming | Steamreforming | Elektrolyse mit Windkraft |
| CO ₂ | ohne Lastenschrift | ohne Lastenschrift | ohne Lastenschrift | ohne Lastenschrift | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage |

Auswertung abiotischer Ressourcenverbrauch – Cradle-to-Gate für 1 t Kerosin

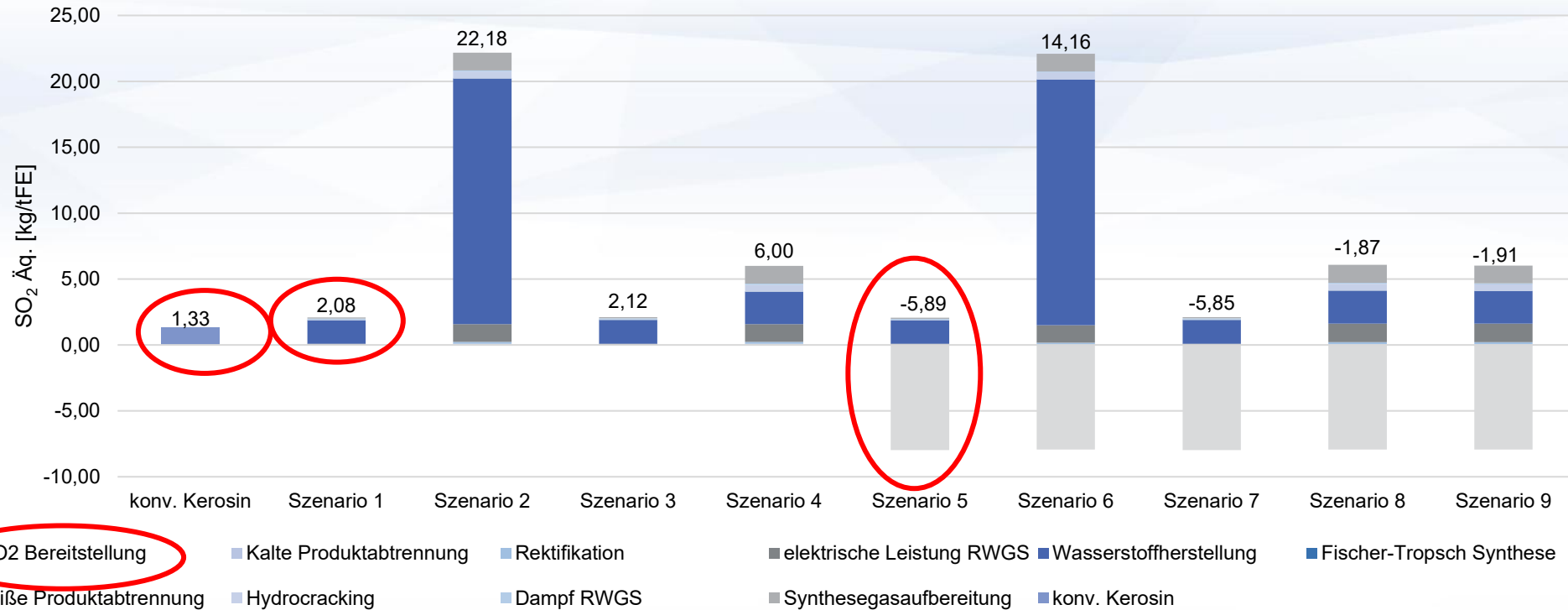
Abiotic Depletion Potential (ADP) Cradle-to-Gate für 1 t Kerosin



- CO2
- Cold product separation
- Distillation
- Electricity RWGS
- Hydrogen production
- Fischer Tropsch
- H2 Compression
- H2 Feed
- Hot product separation
- Hydrocracking
- Steam RWGS
- Syngas compression
- Syngas cooling
- Syngas preheating

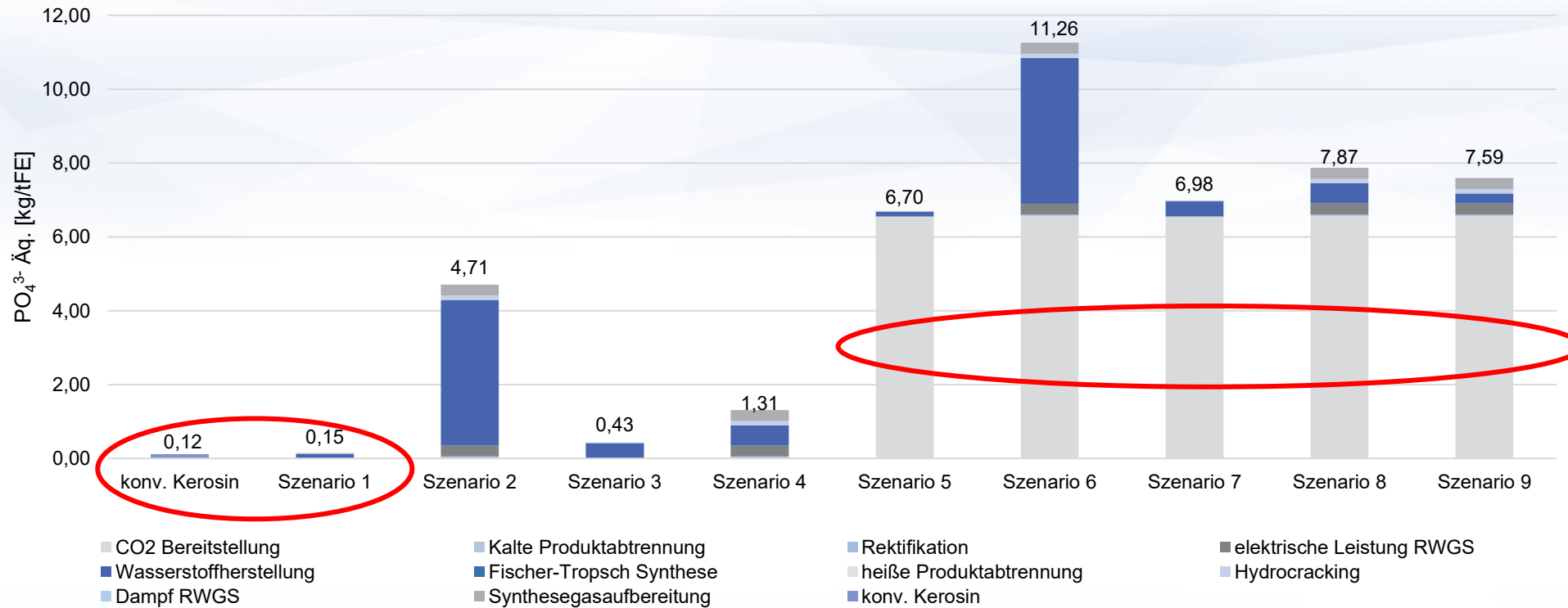
| | Szenario 1 | Szenario 2 | Szenario 3 | Szenario 4 | Szenario 5 | Szenario 6 | Szenario 7 | Szenario 8 | Szenario 9 |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|--------------------|---------------------------|
| Strom | Windkraft | deutscher Strommix | Windkraft | deutscher Strommix | Windkraft | deutscher Strommix | Windkraft | deutscher Strommix | deutscher Strommix |
| Wasserstoff | Elektrolyse mit Windkraft | Elektrolyse, dt. Strommix | Steamreforming | Steamreforming | Elektrolyse mit Windkraft | Elektrolyse, dt. Strommix | Steamreforming | Steamreforming | Elektrolyse mit Windkraft |
| CO ₂ | ohne Lastenschrift | ohne Lastenschrift | ohne Lastenschrift | ohne Lastenschrift | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage |

Auswertung Versauerungspotential – Cradle-to-Gate für 1 t Kerosin



| | Szenario 1 | Szenario 2 | Szenario 3 | Szenario 4 | Szenario 5 | Szenario 6 | Szenario 7 | Szenario 8 | Szenario 9 |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|--------------------|---------------------------|
| Strom | Windkraft | deutscher Strommix | Windkraft | deutscher Strommix | Windkraft | deutscher Strommix | Windkraft | deutscher Strommix | deutscher Strommix |
| Wasserstoff | Elektrolyse mit Windkraft | Elektrolyse, dt. Strommix | Steamreforming | Steamreforming | Elektrolyse mit Windkraft | Elektrolyse, dt. Strommix | Steamreforming | Steamreforming | Elektrolyse mit Windkraft |
| CO ₂ | ohne Lastenschrift | ohne Lastenschrift | ohne Lastenschrift | ohne Lastenschrift | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage |

Auswertung Eutrophierungspotential – Cradle-to-Gate für 1 t Kerosin



| | Szenario 1 | Szenario 2 | Szenario 3 | Szenario 4 | Szenario 5 | Szenario 6 | Szenario 7 | Szenario 8 | Szenario 9 |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|--------------------|---------------------------|
| Strom | Windkraft | deutscher Strommix | Windkraft | deutscher Strommix | Windkraft | deutscher Strommix | Windkraft | deutscher Strommix | deutscher Strommix |
| Wasserstoff | Elektrolyse mit Windkraft | Elektrolyse, dt. Strommix | Steamreforming | Steamreforming | Elektrolyse mit Windkraft | Elektrolyse, dt. Strommix | Steamreforming | Steamreforming | Elektrolyse mit Windkraft |
| CO ₂ | ohne Lastenschrift | ohne Lastenschrift | ohne Lastenschrift | ohne Lastenschrift | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage | aus Biogasanlage |

- essenziell: große Mengen grüner Elektrizität
- Treiber: Bereitstellung des H₂ → grüner Wasserstoff
- P2F sind keine CO₂-Senken → Reduktion
- Biogas-CO₂-Lasten nicht vernachlässigbar → Alternative: DAC
- hoher Ressourcenverbrauch konv. P2F
- AP-Senken bei biogenem CO₂ (insg. gering)
- EP-Erhöhung bei biogenem CO₂ (insg. gering)



Ausblick

Prof. Dr. Ralf Ehret, Provadis Hochschule

Vortrag 1 | INERATEC GmbH

Vortrag 2 | CENA Hessen

Vortrag 3 | Fraunhofer LBF

Vortrag 4 | Provadis Hochschule



Ausblick

Führung durch die ERA-ONE-Anlage von INERATEC

Ausblick

Interesse an der Abschlusspublikation des Projektes „RePoSe“?

Jetzt anmelden für Updates.



SCAN ME

Ausblick

Präsentationen im Anschluss auf:



www.cena-hessen.de



Vielen Dank.



[linkedin.com/company/cena-hessen](https://www.linkedin.com/company/cena-hessen)

www.cena-hessen.de
info@cena-hessen.de

CENA Hessen

Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr
der Hessen Trade & Invest GmbH



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:



Projekträger:

