



Fuels of the Future

Alternative Flugtreibstoffe (SAF),
Klimawirkung und Bedeutung für Luftverkehr

Bernhard Dietrich

WiTechWi

Albert-Einstein-Schule Schwalbach

13. Mai 2026

Agenda

1 Über CENA Hessen

2 Klimaziele und Klimawirkung der Luftfahrt

3 Mitigation und die Rolle von SAF

4 Realisierung und Wirtschaftlichkeit



1 | Über CENA Hessen



Unser Auftrag

Zahlen, Daten, Fakten



Gegründet

1. Januar 2020



Träger

Hessen Trade & Invest GmbH (Wirtschaftsförderung des Landes Hessen)



Auftraggeber

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWVW)



Verankerung

Klimaplan Hessen 2030
Maßnahme VM-05 „Klimaschutz im hessischen Luftverkehr“

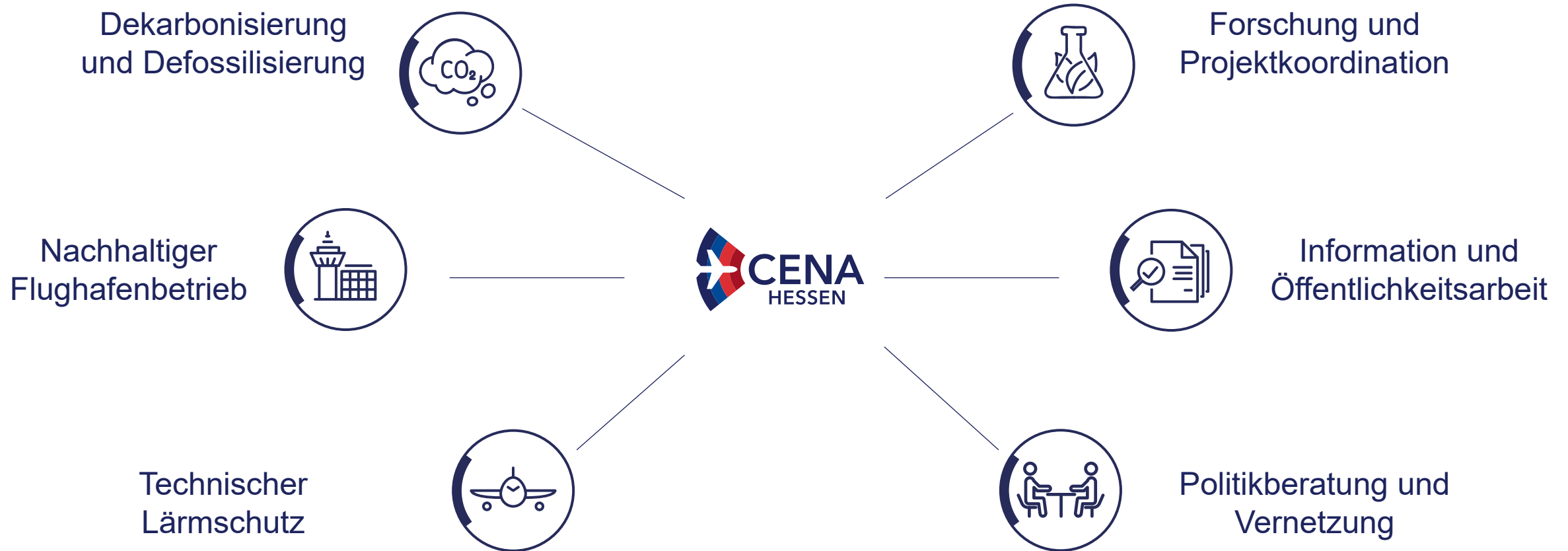


Ziel

Unser Ziel ist es, die Luftfahrtbranche dabei zu unterstützen, innovative und nachhaltige Technologien in die Praxis zu bringen, um den Luftfahrtstandort Hessen zukunftsfähig zu gestalten.

Impulsgeber für Innovationen im Luftverkehr

Forschungszentrum & Politikberatung



Aktuelle CENA-Forschung

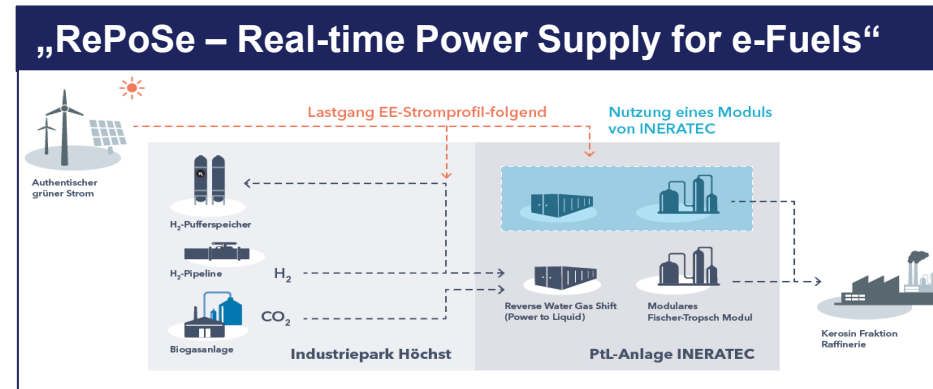
Flexible PtL-Produktion, Supply Chain, Weiterverarbeitung & SAF-Markthochlauf

Innovationsplattform „InnoFuels“



GESAMTLEISTUNG ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
 Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
 Koordniert durch: NOW
 Projektträger: VDI|VDE|IT, FNR
 Kofinanziert durch: HESSEN, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum
 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

„RePoSe – Real-time Power Supply for e-Fuels“



GESAMTLEISTUNG ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
 Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
 Koordniert durch: NOW
 Projektträger: VDI|VDE|IT, FNR
 Kofinanziert durch: HESSEN, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum
 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

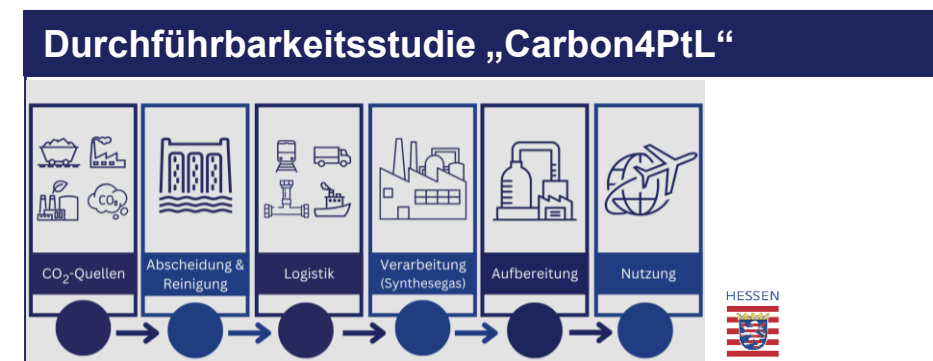
„Kopernikus - P2Fuels“

GEFÖRDERT VOM
KOPERNIKUS >>PROJEKTE
 Die Zukunft unserer Energie

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

HESSEN

Durchführbarkeitsstudie „Carbon4PtL“



GESAMTLEISTUNG ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
 Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
 Koordniert durch: NOW
 Projektträger: VDI|VDE|IT, FNR
 Kofinanziert durch: HESSEN, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum
 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

„CENA-SAF Outlook“



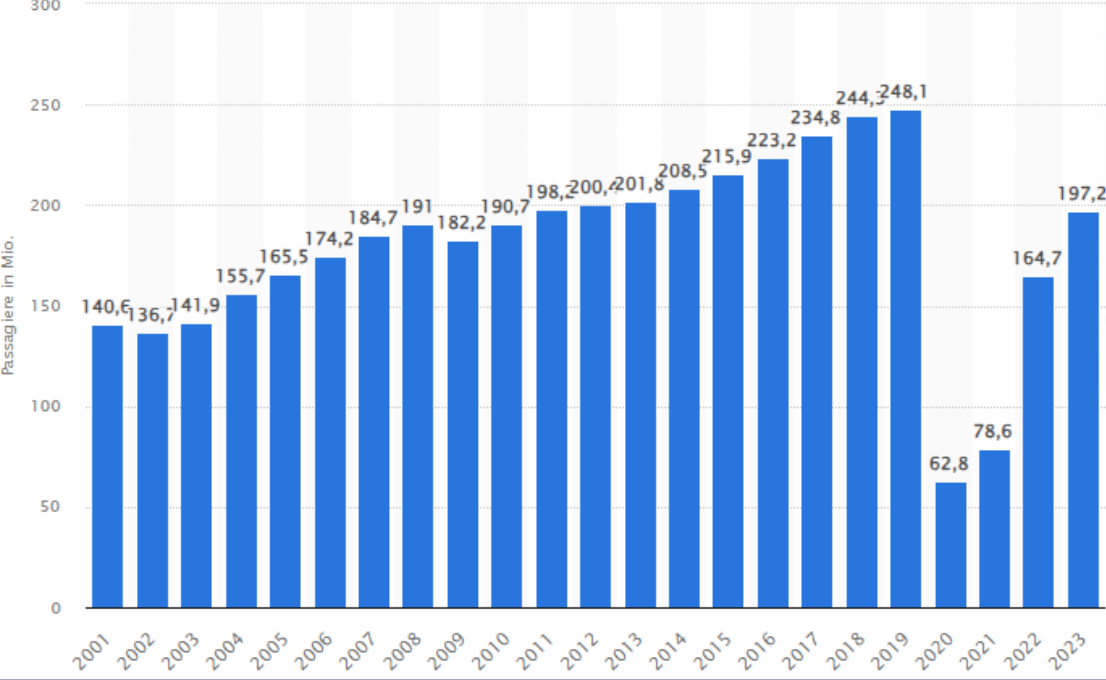
CENA SAF-Outlook 2025-2030
 Mengen, Methoden und Märkte für nachhaltige Flugtreibstoffe

HESSEN

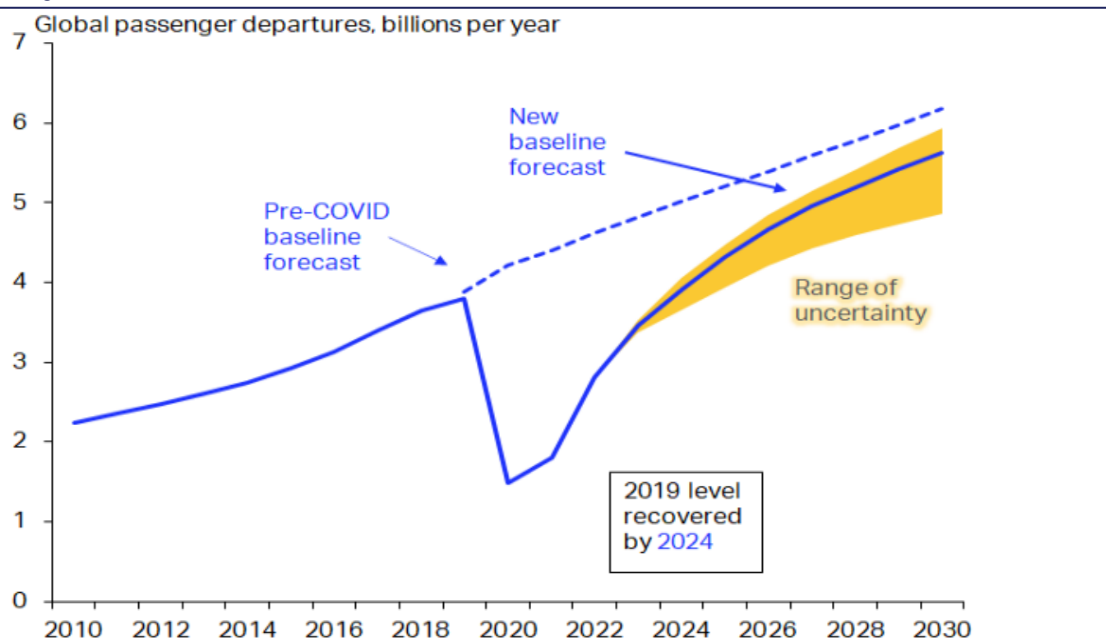
2

Klimaziele und Klimawirkung des Luftverkehrs





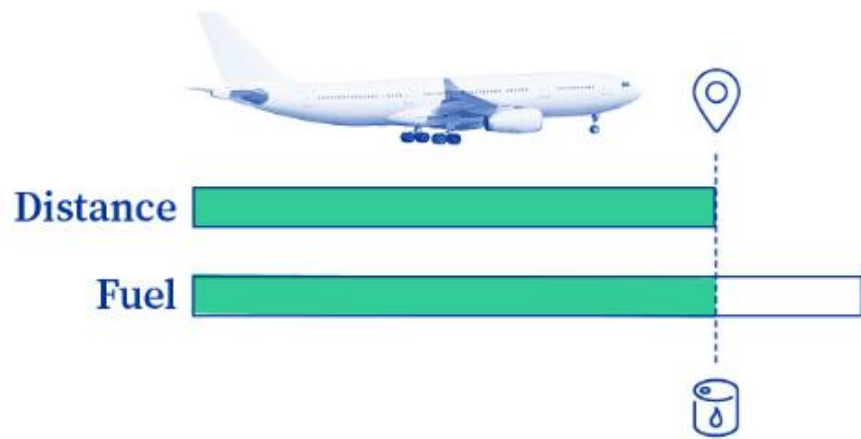
Quelle: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/77928/umfrage/passagiere-auf-deutschen-flughafen/#:~:text=Im%20Jahr%202023%20wurden%20auf,den%20Jahren%202021%20und%202022.>



Quelle: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/global-outlook-for-air-transport---december-2022---presentation/>

Luftfahrt auf Wachstumskurs

- Trotz diverser Krisen langfristig weiter starkes Wachstum des Luftverkehrs prognostiziert
- Lösungen zur Dekarbonisierung bzw. Defossilisierung dringend erforderlich



EU-Ziel: Klimaneutralität bis 2050 („Net-Zero“)

- Europäisches Klimagesetz: Emissionsreduzierung um **55 % bis 2030** gegenüber 1990
→ „**erster klimaneutraler Kontinent bis 2050**“
- **European Green Deal and Fit-for-55:**
 - Wachstum von CO₂-Emissionen entkoppeln
 - EU ETS: ab 2030 müssen alle Sektoren die THG-Emissionen **um 61 % senken gegenüber 2005**
→ Phase-Out kostenloser Zertifikate für Luftverkehr (bis Ende 2025)
→ aktuell Diskussion um Einbeziehung der Non-CO₂-Effekte (ab 2025 muss berichtet werden)

Ziel: Klimaneutralität bis 2050

Klimapolitische Vorgaben zur Dekarbonisierung des Luftverkehrs

European Green Deal and Fit-for-55: Wachstum von CO₂-Emissionen entkoppeln



EU ETS: Phase-Out kostenloser Zertifikate für den Luftverkehr (bis Ende 2025)



Aktuell Diskussion um Einbeziehung der Non-CO₂-Effekte (seit 2025 Berichtspflicht)



Initiative zum Einsatz von Elektro- und Wasserstoffliegern

ReFuelEU Aviation



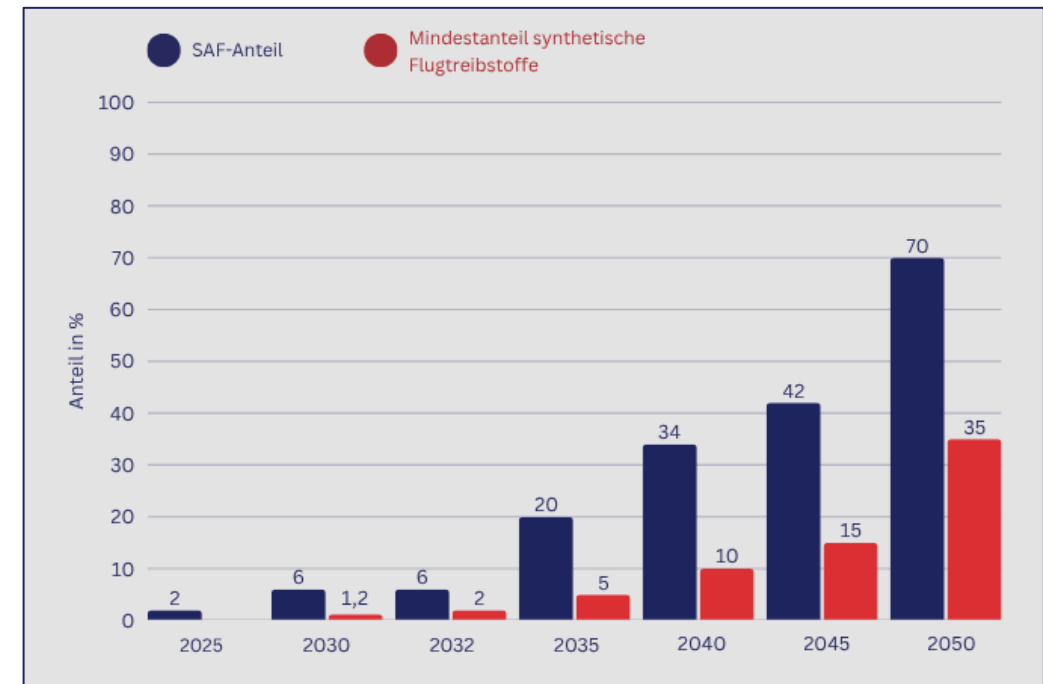
Beimischungsquote für Sustainable Aviation Fuels (SAF)



Unterquote für E-Fuels (1,2% in 2030; 35% in 2050)



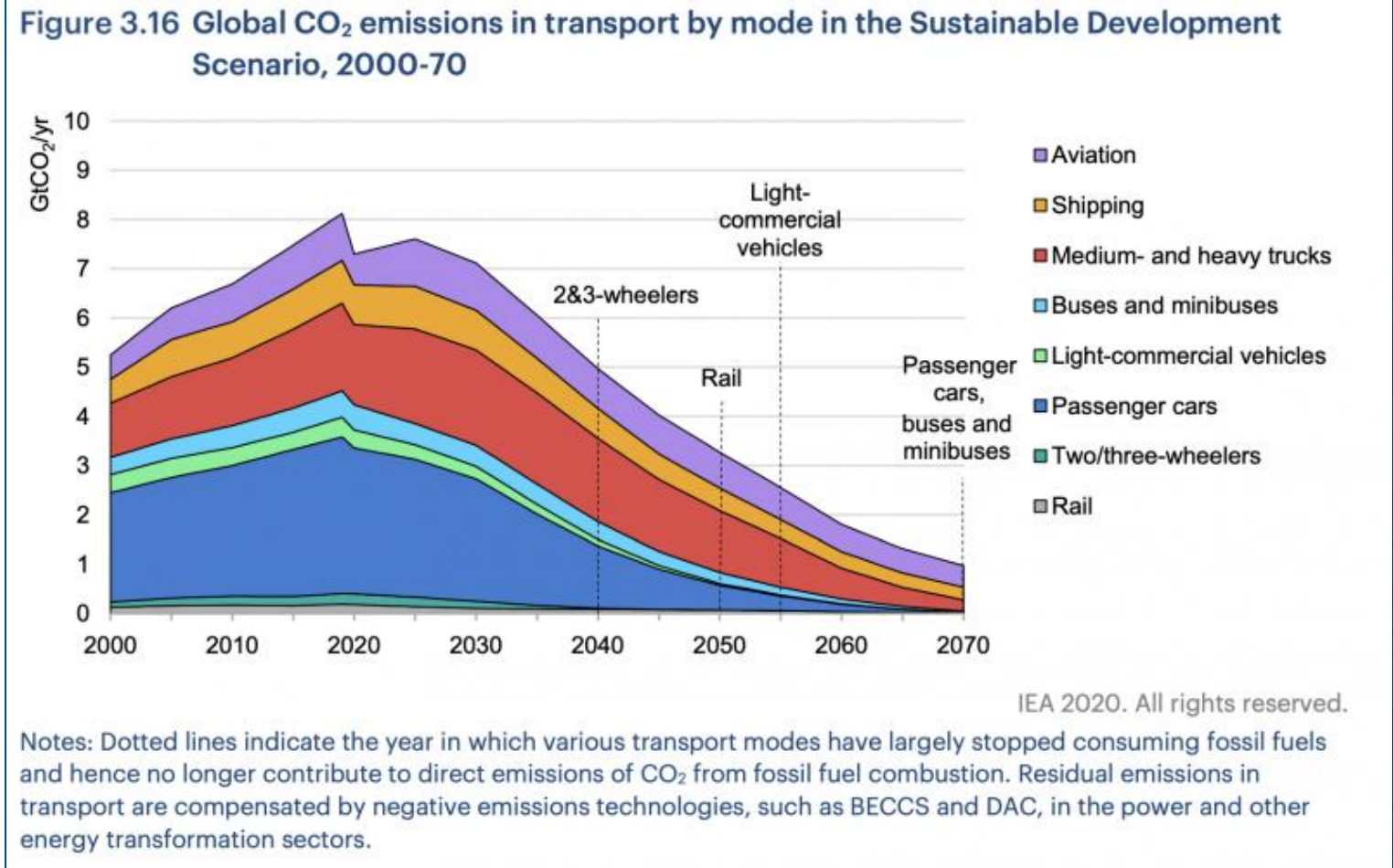
Pönalen bei Nichteinhaltung



Quelle: CENA-InfoHub

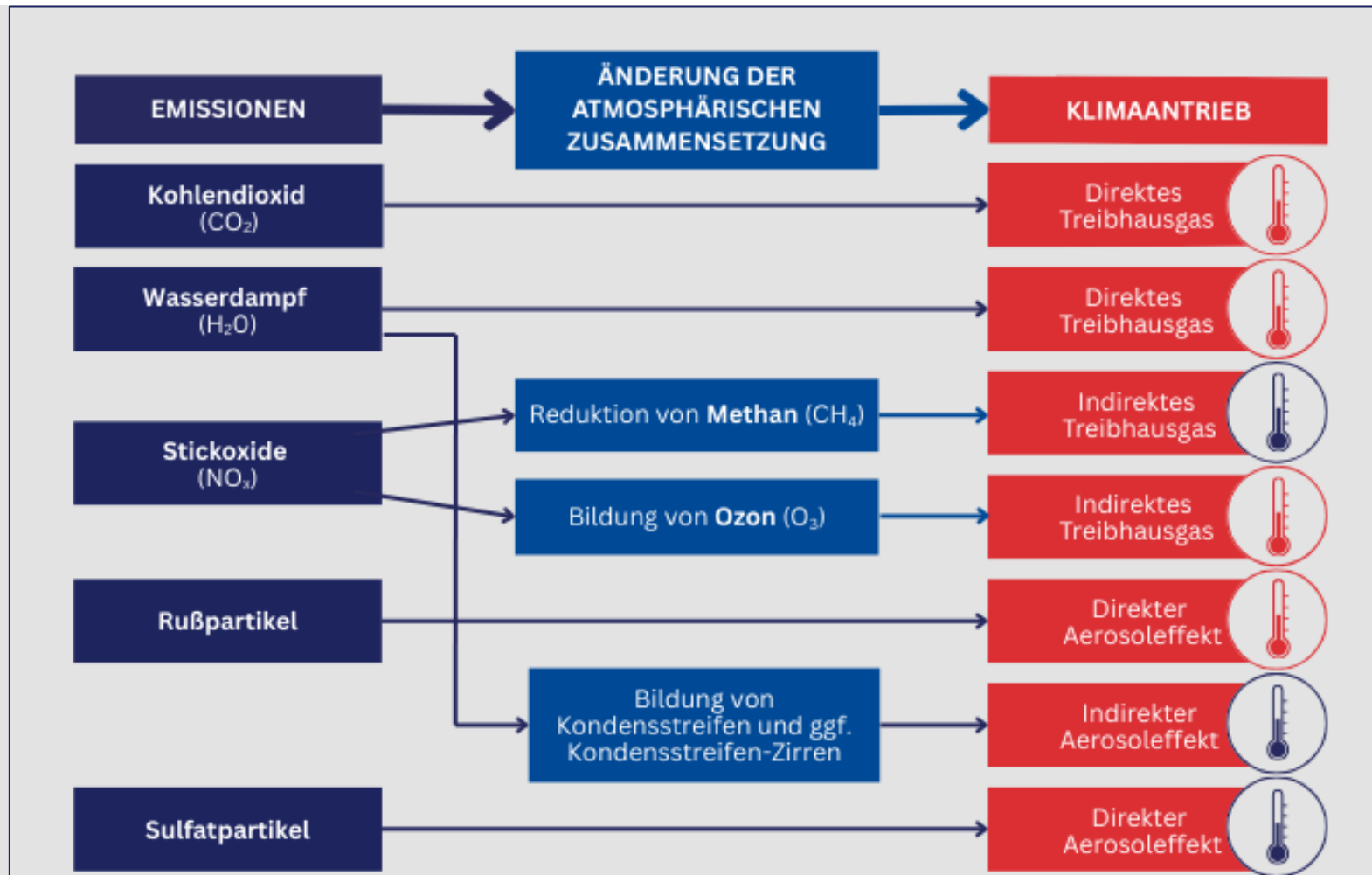
Klimawirkung der Luftfahrt: CO₂-Ausstoß

- Anteil der globalen Luftfahrt an der anthropogenen Klimaerwärmung: **3,5 %** (Lee et al., 2021)
- Zum **Vergleich**: so hoch wie Deutschlands historischer Beitrag zum Klimawandel (CarbonBrief, 2021)

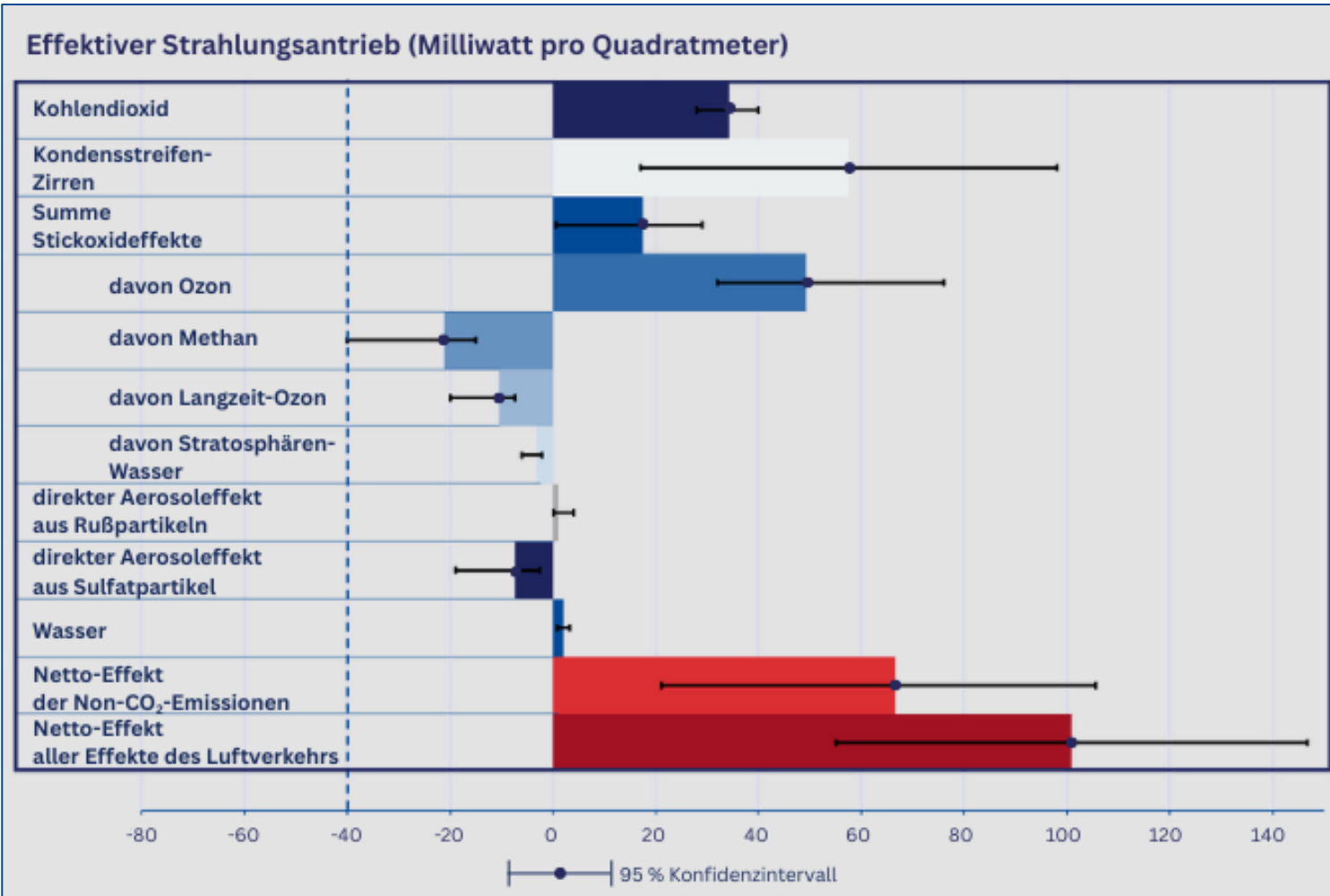


Quelle: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>

Wirkungsweise von Non-CO₂-Effekten



Quelle: CENA-InfoHub



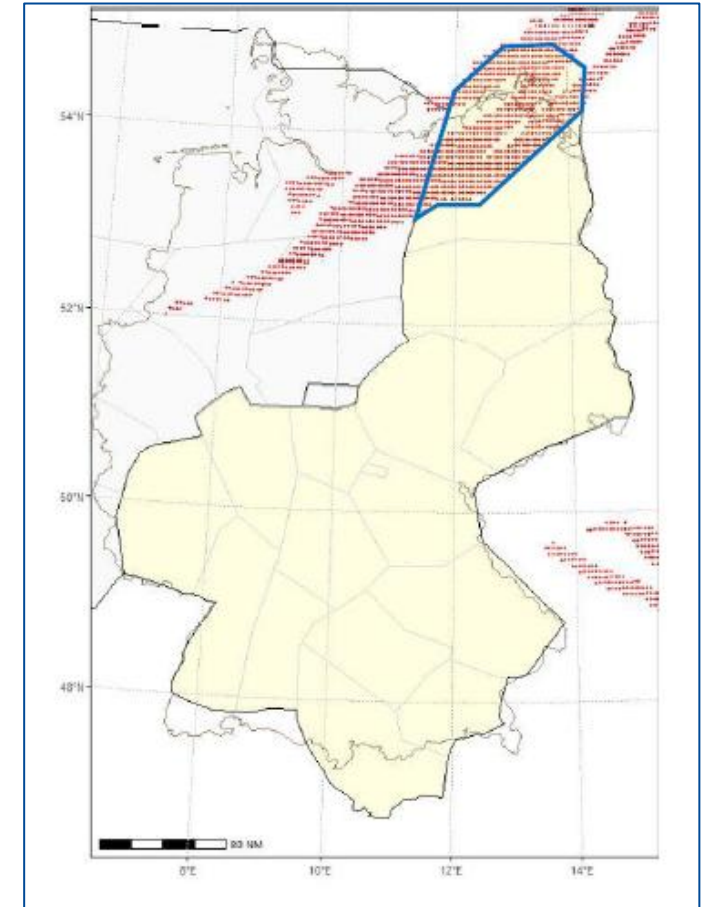
Zwei Drittel der Klimawirkung durch Non-CO₂-Effekte

- Klimaverträglicher Luftverkehr ist mehr als Dekarbonisierung
- Ab 2025 müssen Airlines ihre Non-CO₂-Effekte berichten

Quelle: CENA-InfoHub, in Anlehnung an Lee et al. (2021)

Strahlungsantrieb von Kondensstreifen

- Kondensstreifen: Entstehung in hohen Flughöhen durch Kondensation des emittierten Wasserdampfes an Rußpartikeln (Verweildauer: Sekunden bis Minuten)
- Klimarelevant: persistente Kondensstreifen und daraus entstehende Zirren (Eiswolken) → Verweildauer: mehrere Stunden
- Klimawirkung: Mehr „Wolken“ durch Kondensstreifen → mehr Absorption von langwelliger Strahlung → Erwärmung
- Eisübersättigten Regionen (ISSR) global sehr unterschiedlich verteilt (insb. Häufung über Nordatlantik)
- Zirren können kühlen oder wärmen (Gesamteffekt: wärmend)
 - reduzieren Abkühlung in den Nachstunden
 - reduzieren Erwärmung in den Morgenstunden

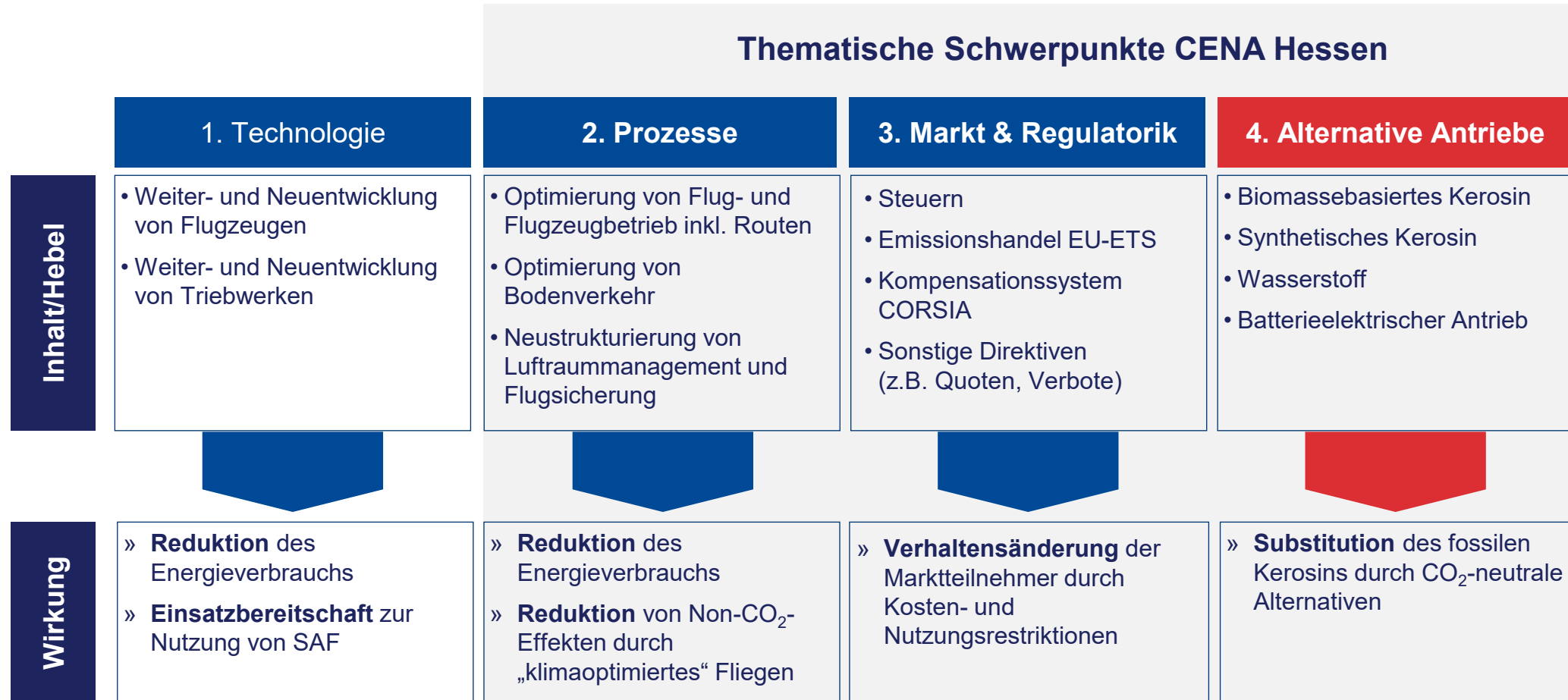


Quelle: Leemüller et al., 2022
Darstellung von ISSR im Luftraum Karlsruhe am 10. August 2022
um 05:00 (UTC) in Flight Level 330

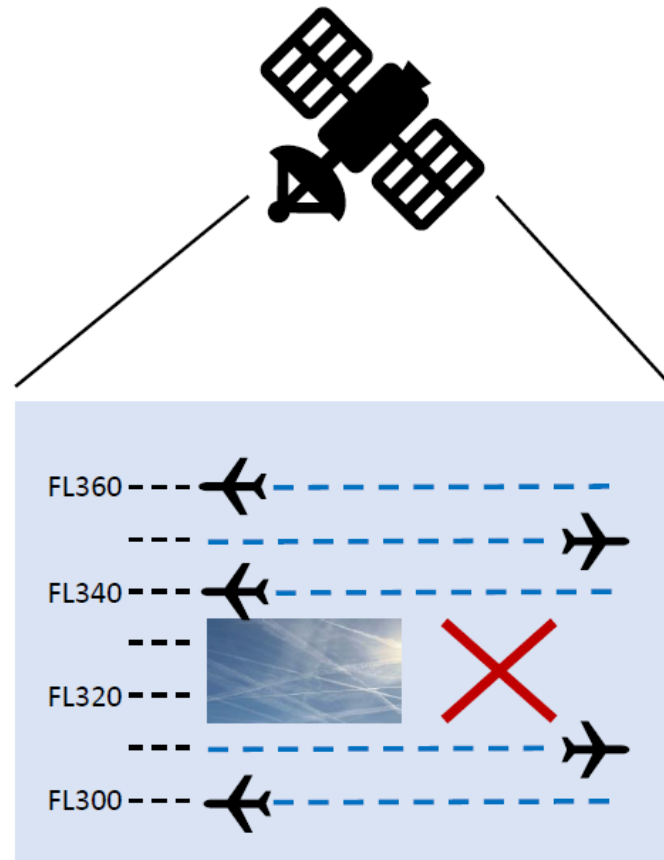
3 | Mitigation und die Rolle von SAF



Vier Hebel für klimafreundlicheres Fliegen

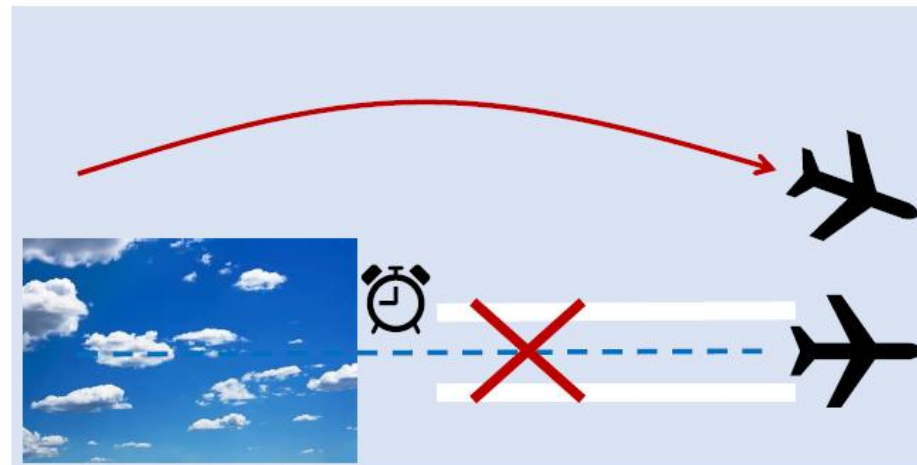


Umfliegen von eisübersättigten Regionen



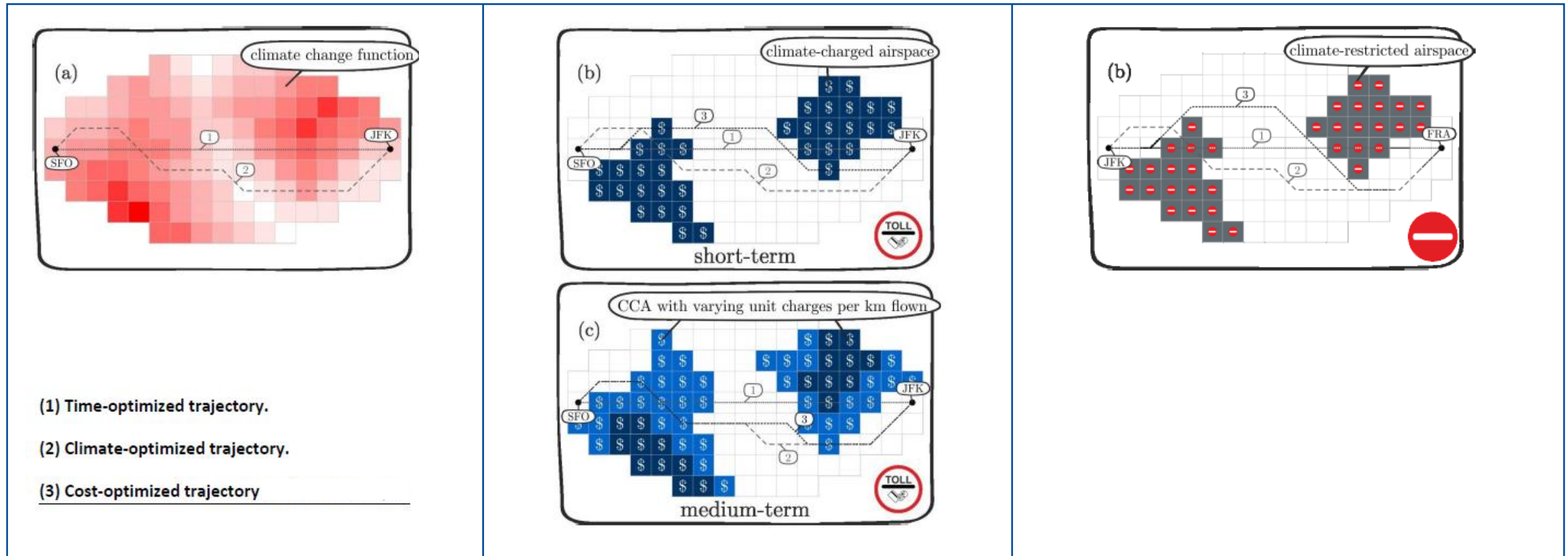
Quelle: Leemüller et al., 2022

- Umfliegen von ISSR durch Routenänderung (horizontal) oder Höhenänderung (vertikal)
- Projekt D-KULT: 100 Testflüge zum Umfliegen von ISSR (DLR, DFS, u. a.)
- Trade-Off: geringfügig höherer Kerosinverbrauch



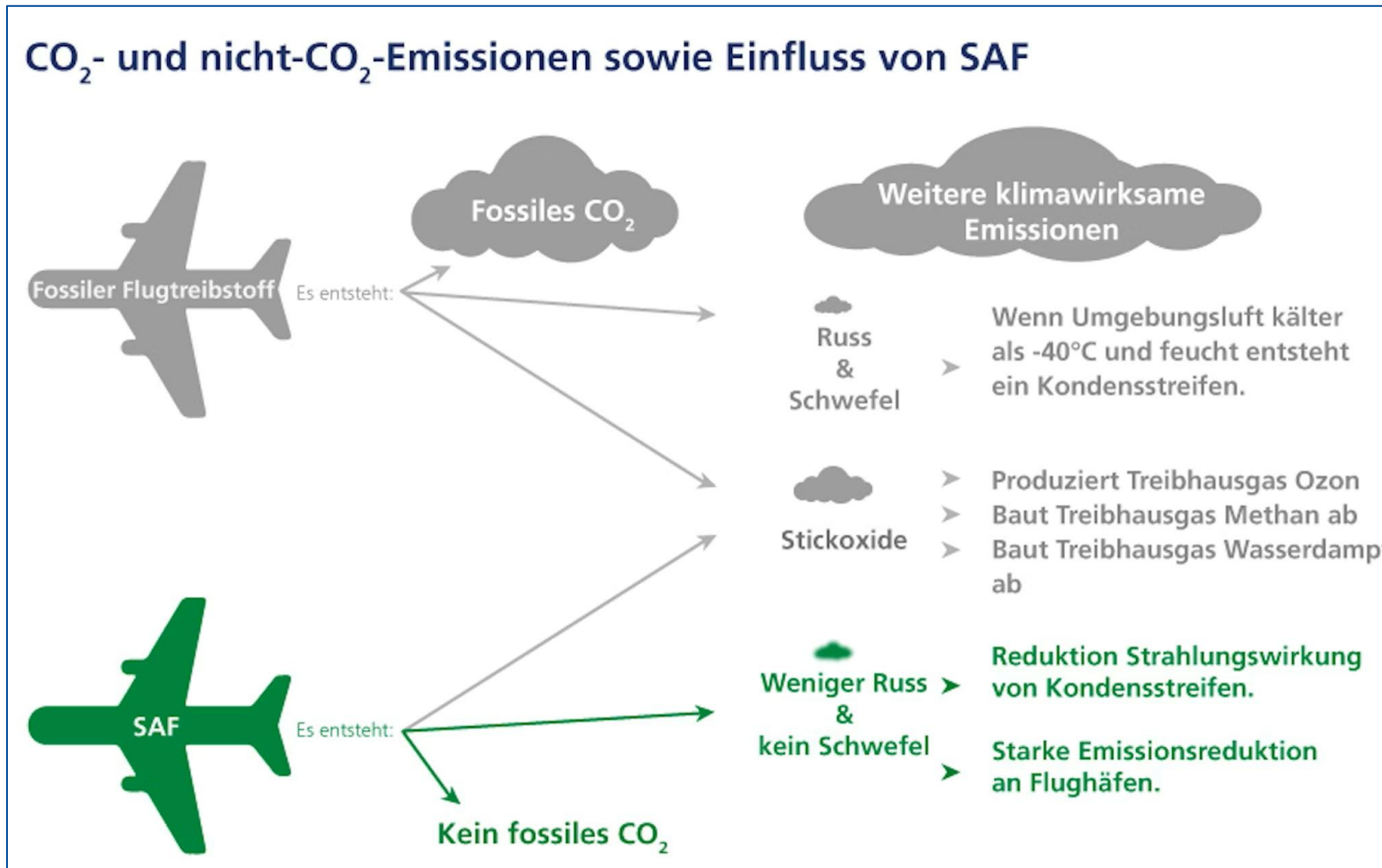
Incentivierung von klimaoptimierter Routenführung

Vorhersage (links) und Incentivierungs-Modelle durch Gebühren (mitte) oder Flugverbotszonen (rechts)



Quelle: Niklaß et al., 2016

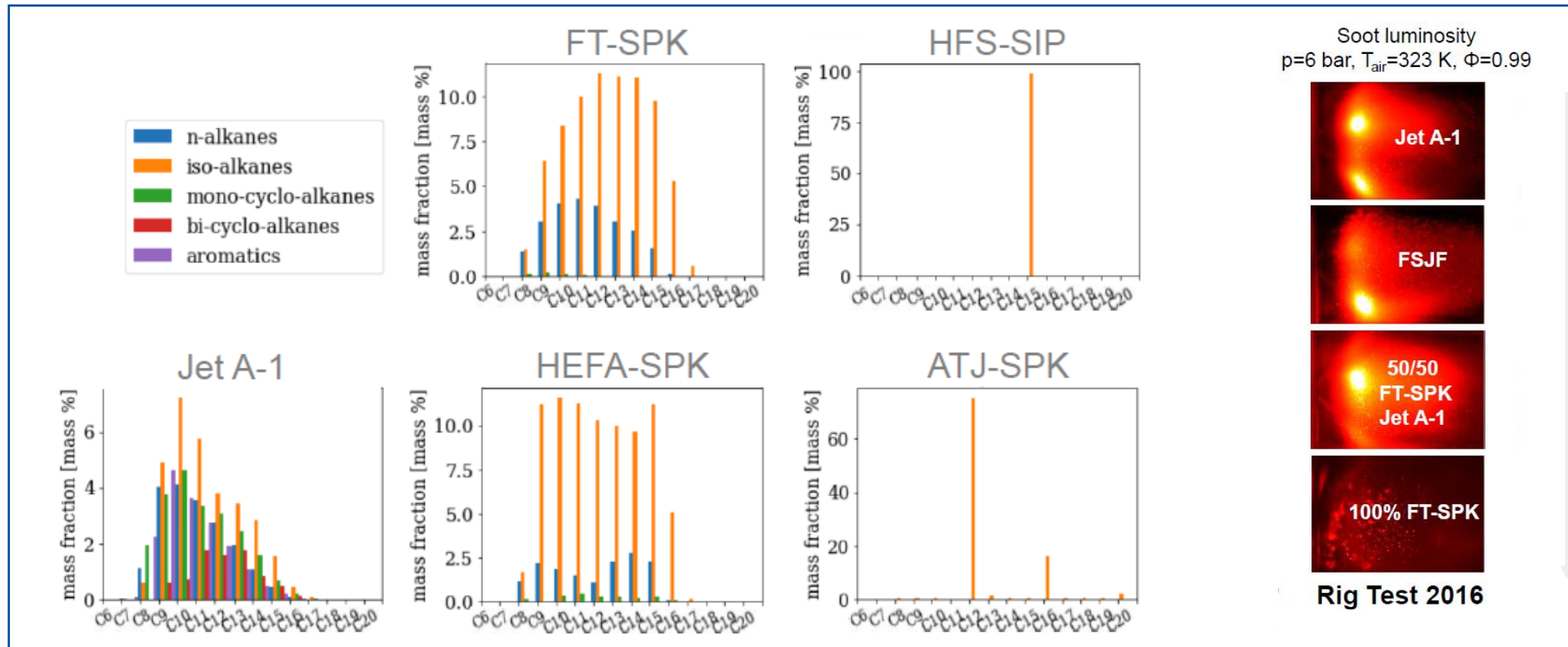
Verwendung von SAF reduziert Non-CO₂-Effekte



Quelle: Schweizer Eidgenossenschaft - Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL

Partikelreduktion durch SAF und Kerosindesign

Kerosinzusammensetzung und Verbrennungsverhalten verschiedener SAF-Arten gegenüber konventionellem Kerosin (Jet A-1)

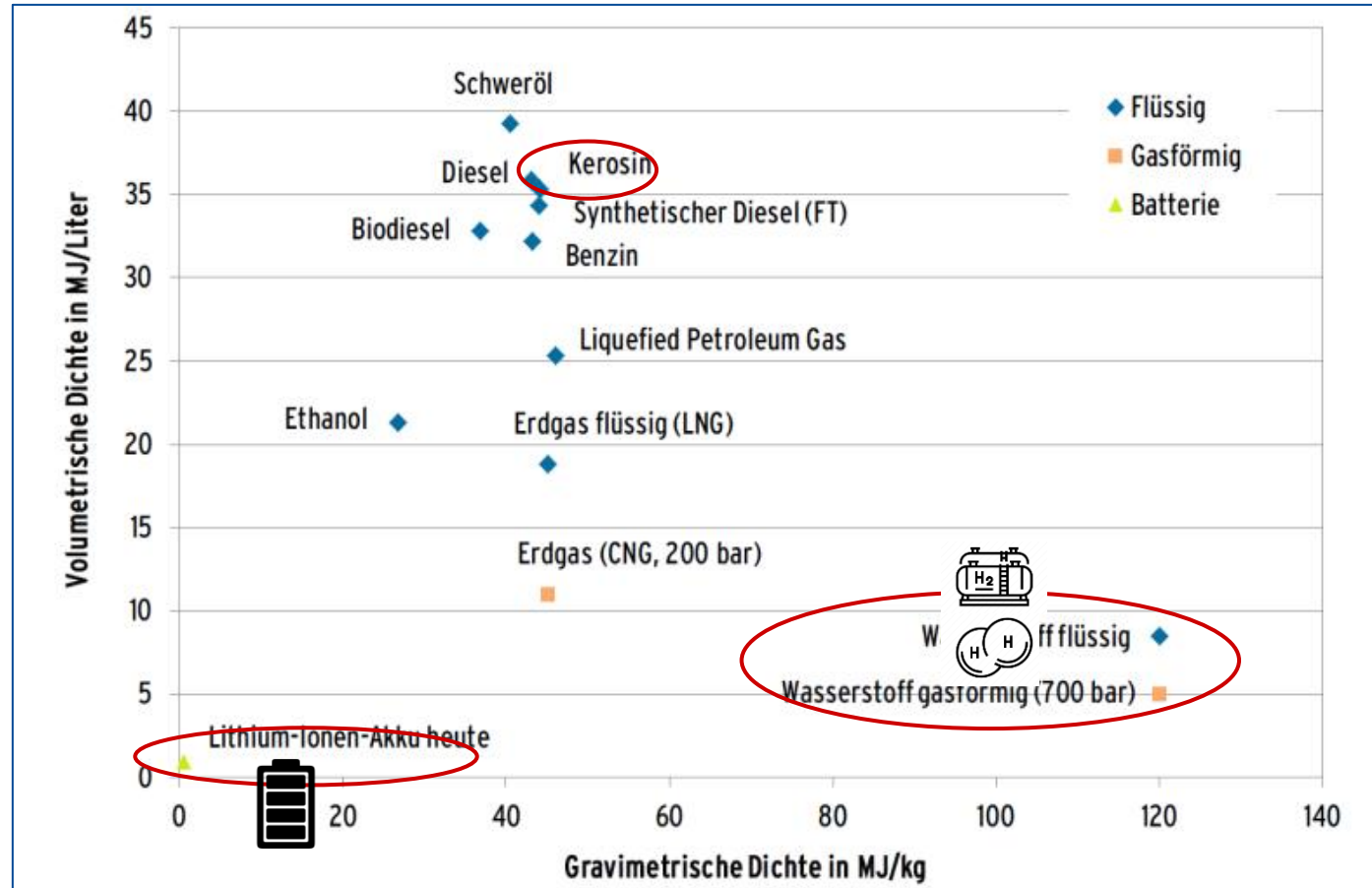


Quelle: Gierens et al. 2024

Quelle: Mosbach, DLR, 2016

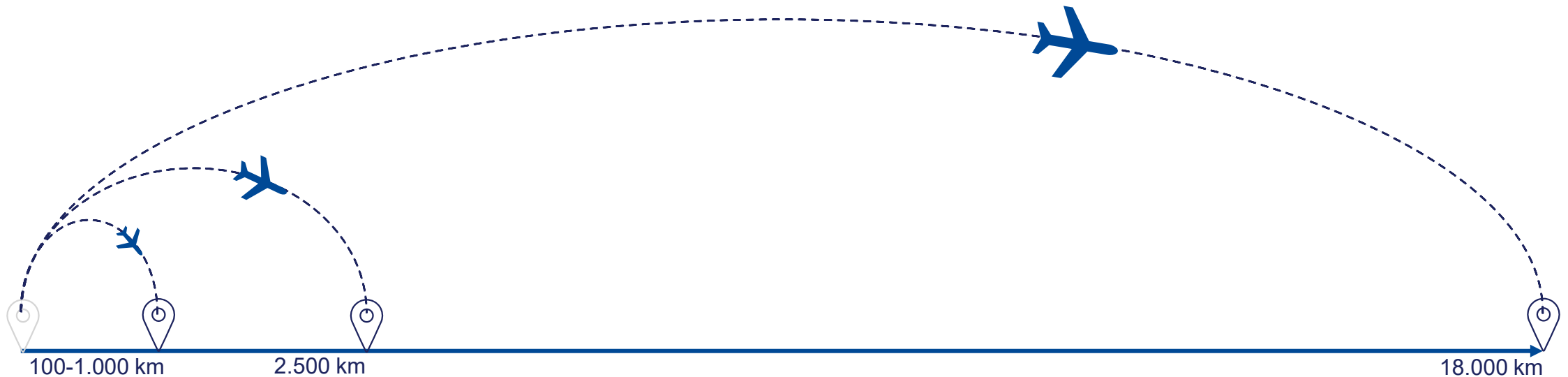
Je weniger Aromaten, desto weniger Rußleuchten

Alternative Antriebe - Eine Frage der Energiedichte ...



Quelle: Umweltbundesamt (2015): Postfossile Energieversorgungsoptionen

... und eine Frage der Reichweite und der Nutzlast



Lithium-Ionen-Batterie

- **Reichweite:** Kurzstrecke
- **Typ:** z.B. Dornier 328
- **Zulassung:** nein
- **Besonderheit:** An Regionalflughäfen erwartet
- **Klima:** Emissionsfrei

Wasserstoff

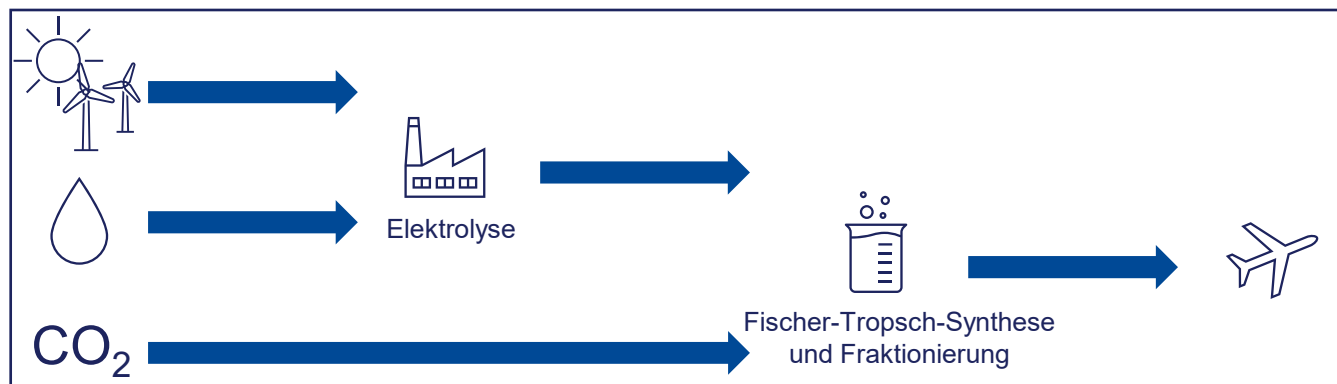
- **Reichweite:** Kurz- bis Mittelstrecke
- **Typ:** z.B. A320
- **Zulassung:** nein
- **Besonderheit:** Neues Flugzeugdesign erforderlich (u.a. 4-9 x größere Tanks als für Kerosin benötigt)
- **Klima:** CO₂-frei

Sustainable Aviation Fuels (SAF)

- **Reichweite:** Langstrecke
- **Typ:** alle, z.B. A350, A380
- **Zulassung:** ja (50% Beimischung)
- **Besonderheit:** Drop-In-Fuels wie fossiles Kerosin nutzbar
- **Klima:** bis zu 80% CO₂-Reduktion

Sustainable Aviation Fuels (SAF): Biofuels und E-Fuels

E-Fuels

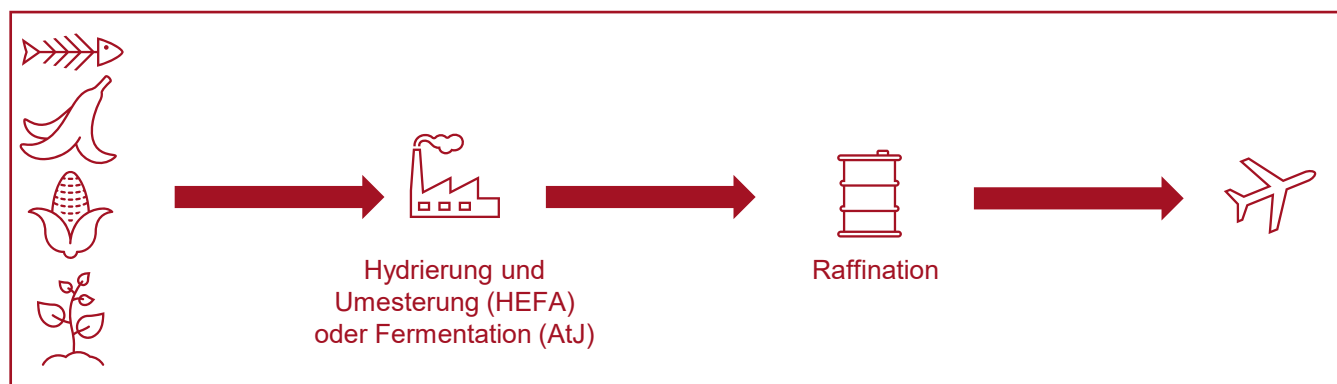


- 80-100% CO₂-Reduktion möglich
- Vermeidung von Non-CO₂-Effekten und Verbesserung der Luftqualität am Boden
- Theoretisch nahezu unbegrenzt skalierbar



- Technologie noch nicht erprobt
- Sehr hohe Produktionskosten
- Geringe Verfügbarkeit
- Restriktionen durch Regulatorik und Standortbedingungen für Ausgangsstoffe

Biofuels



- Technologie etabliert (HEFA)
- Produktion schnell skalierbar
- Deutlich günstiger als E-Fuels



- Biomasse nicht unbegrenzt skalierbar
- Tank-oder-Teller-Debatte
- Weniger CO₂-Einsparung als bei E-Fuels

Was sind erneuerbare Kraftstoffe aus Biomasse?

Prozess	Rohstoffe	Reifegrad Technologie	Zulassung	Beimischung
HEFA Hydroprocessed Esters and Fatty Acids	Natürliche Fetten und pflanzliche Öle, UCO, Bioabfälle	9	✓	50%
FT Fischer-Tropsch inkl. Gasifikation Biomasse	Energiepflanzen, landwirtschaftl. Reststoffe, holzige Biomasse, Festabfall	9	✓	50%
CHJ Catalytic Hydrothermolys Jet Fuel	Abfall- und Energieöle, Bioabfälle (fettähnlicher Stoff)	6	✓	50%
SIP Synthesized Isoparaffins	Zuckerrohr, Zuckerrübe	5 - 8	✓	10%
AtJ Alcohol-to-Jet	Zuckerrohr, Zuckerrübe, Sägemehl, lignocellulose-haltige Abfälle	7 - 8	✓	50%

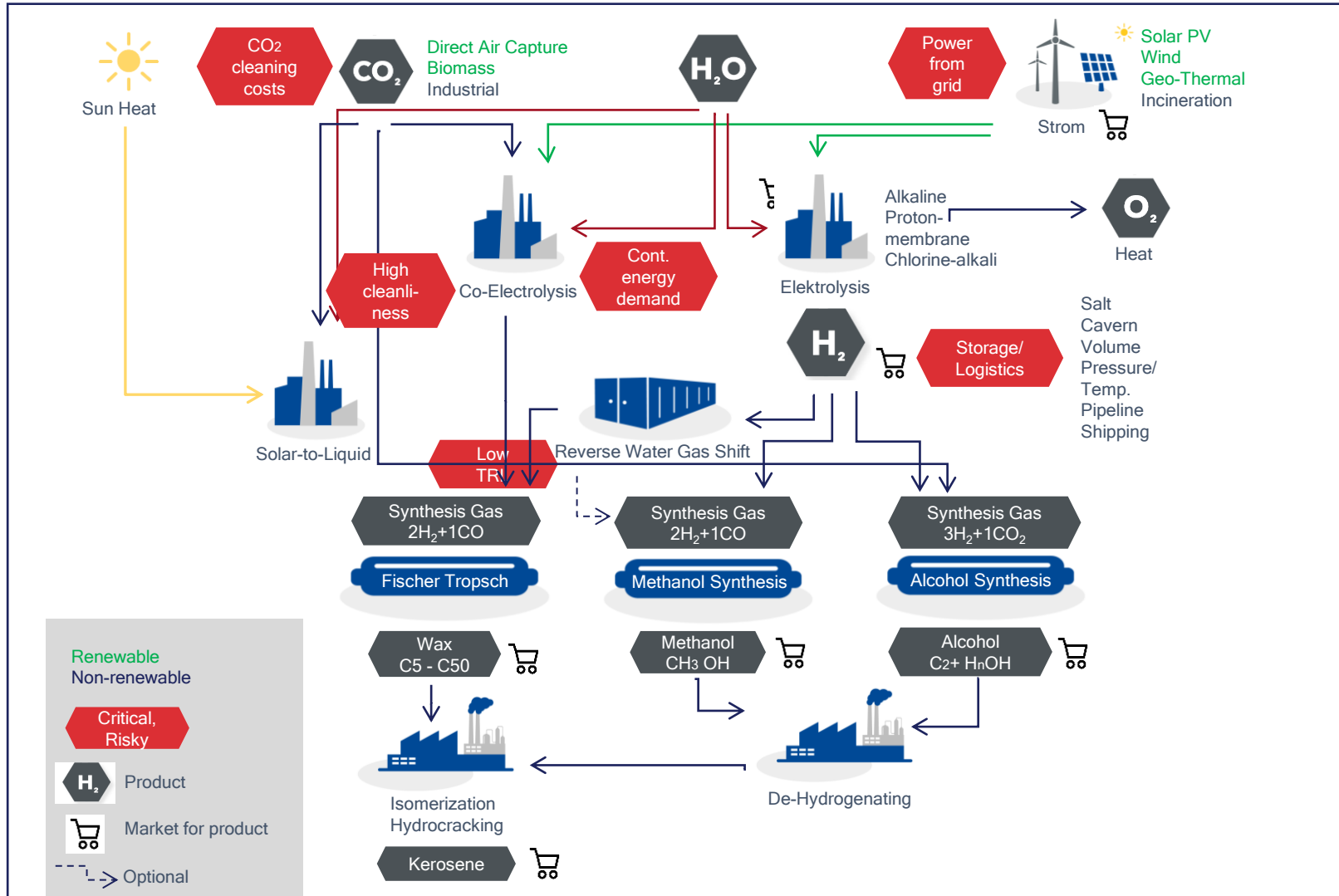
Quelle: In Anlehnung an Umweltbundesamt (2022): Power-to-Liquids: A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation

Was sind E-Fuels?

Prozess	Rohstoffe	Reifegrad Technologie	Zulassung	Beimischung
FT Fischer-Tropsch	Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid	6	✓	50%
MtJ Methanol-to-Jet	Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid	3		-
AtJ Alcohol-to-Jet	Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid	3	(✓)	-

Quelle: in Anlehnung an Umweltbundesamt (2022): Power-to-Liquids: A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation

E-SAF fehlt technologische Reife und ist komplex






Quelle: CENA Hessen


- Kritische Punkte:**
- Integration Gesamtsystem
 - Reverse Water Gas Shift
 - Reinheitsgrade und Katalysatoren
 - Industrielle Produktions-Dimension
 - Lebensdauer der Komponenten
 - Supply Chain

Projekt RePoSe

Real-time Power Supply for e-Fuels

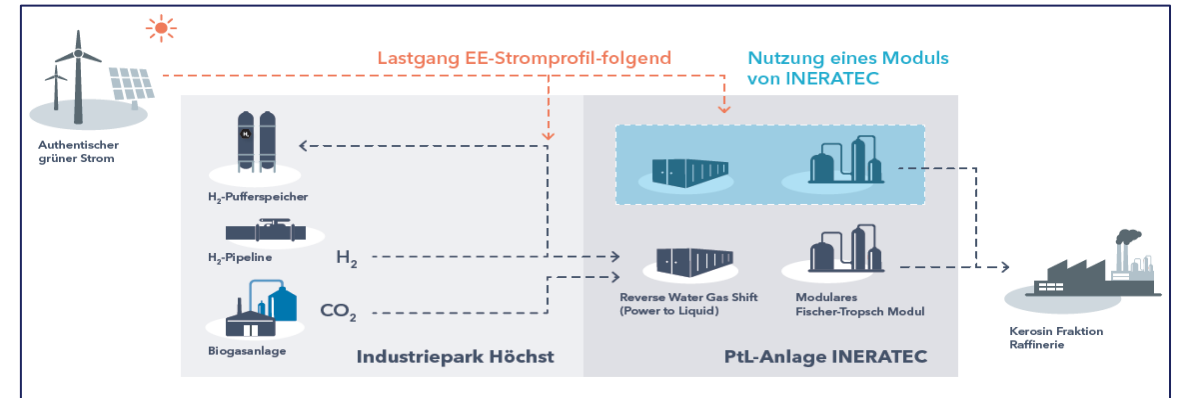
  Erstmalige industrielle Erforschung der Herstellung von PtL-Kerosin auf Basis fluktuierender Stromversorgung durch Erneuerbare Energien

 • Fragestellung: Wie wirkt sich die schwankende Verfügbarkeit von EE-Strom auf die Produktion von PtL-Kerosin aus?

 • Ziel: Optimum zwischen Speicher- und Lastfahrweise einer modularen Fischer-Tropsch-Anlage

 • Förderprojekt des Bundesministeriums für Verkehr mit Kofinanzierung durch HMWVW

 • Laufzeit: 2022–2026



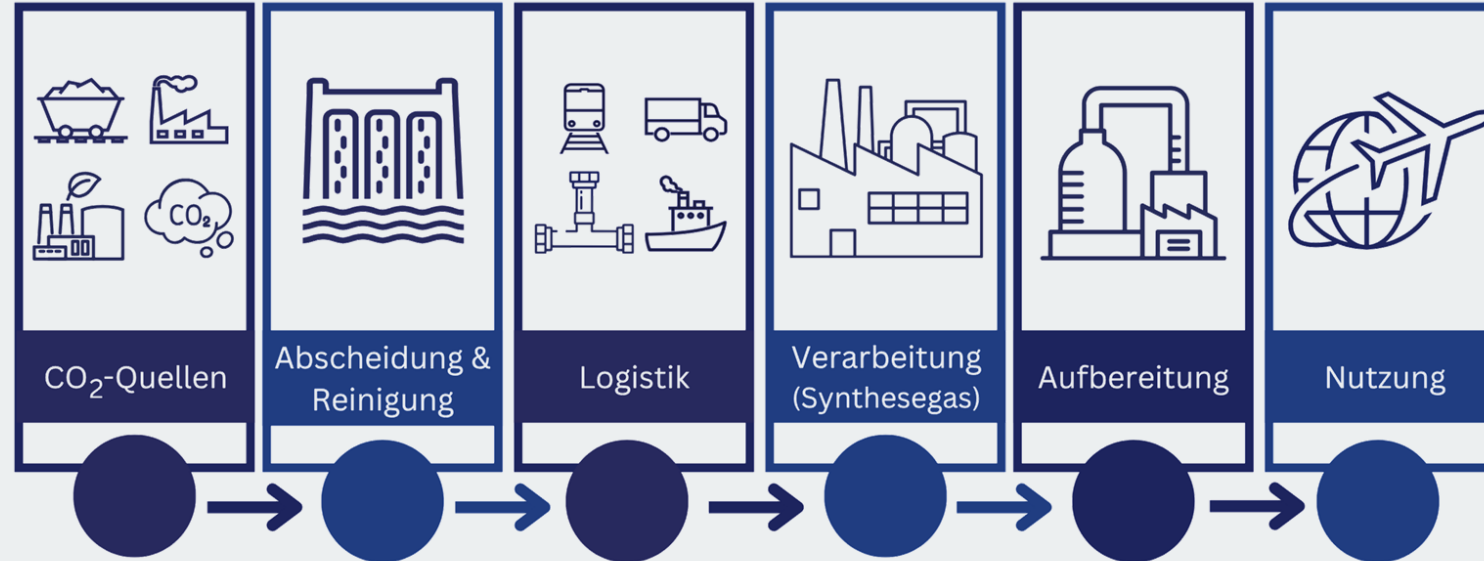
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Projekt Carbon4PtL

Bereitstellung von CO₂ für die Herstellung von E-SAF

Schema der CO₂-Supply-Chain-Betrachtung



Projekt P2Fuels

Forschungsprojekt zur Weiterverarbeitung von synthetischem Rohöl zu normkonformen E-Kerosin



Partnerprojekt im Rahmen des Kopernikus-Programms des Forschungsministeriums

- Bau einer Mikroraffinerie zur Aufarbeitung des von INERATEC erzeugten FT-Crude zu spezifikationskonformem Kerosin (INERATEC)
- Entwicklung von Lösungen für regulatorische Hindernisse bei Co-Raffinierung und bei Einsatz einer dedizierten Raffinerie (CENA Hessen)
- Entwicklung von Lösungen zum Qualitätsmonitoring des Kerosins bei Mikrokanalverfahren (DLR)
- Tests modifizierter Triebwerksbrennkammern für NOx-armes Verbrennen von niedrigaromatischem Kerosin (GE)
- Untersuchung der Möglichkeit des Einsatzes von Markersubstanzen zum Nämlichkeitsnachweis bei Kerosin (Aveera)



Projektkoordination durch CENA



Förderprojekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung mit Kofinanzierung durch HMWVW



Laufzeit: 2024–2026

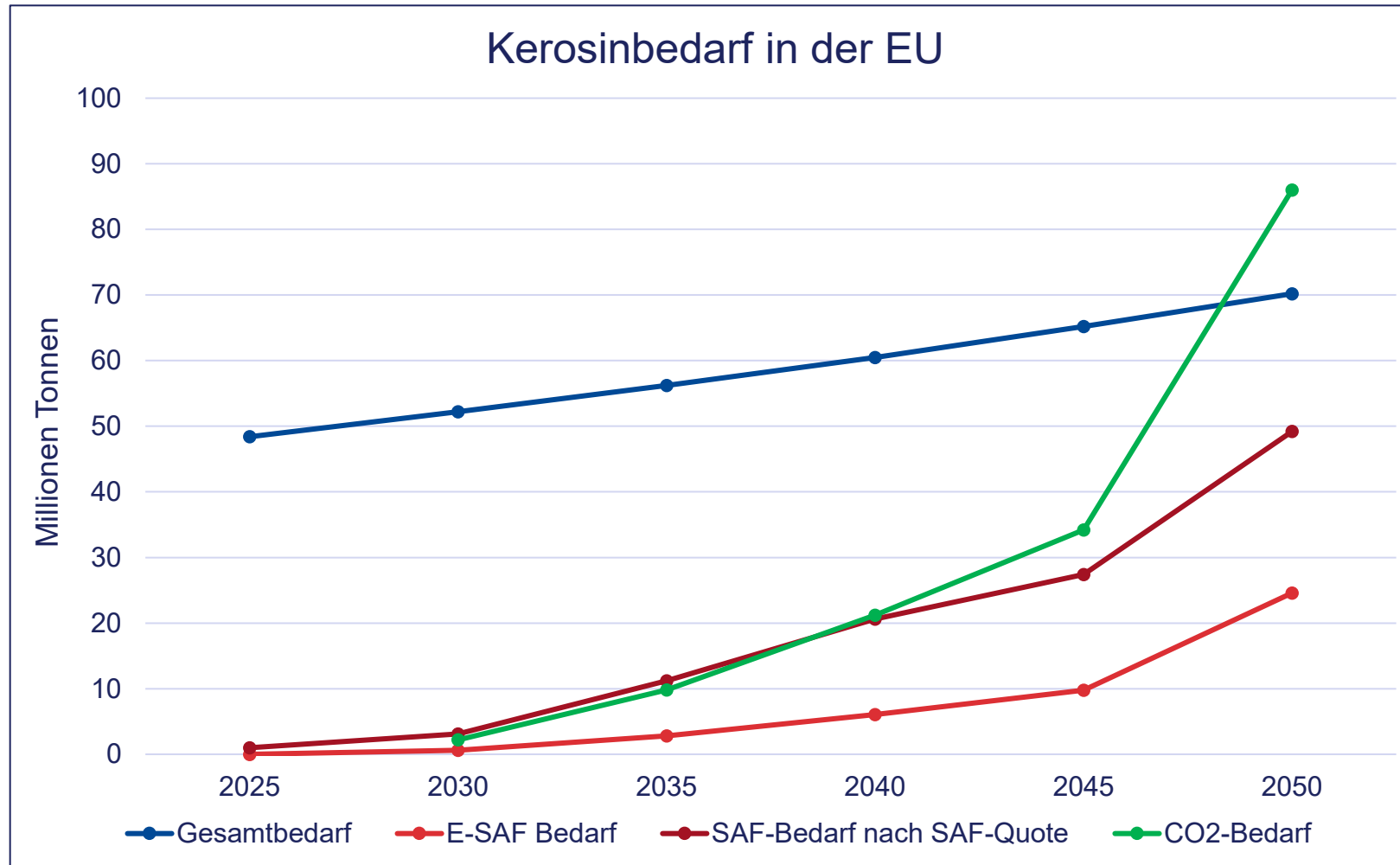
GEFÖRDERT VOM



4 Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit



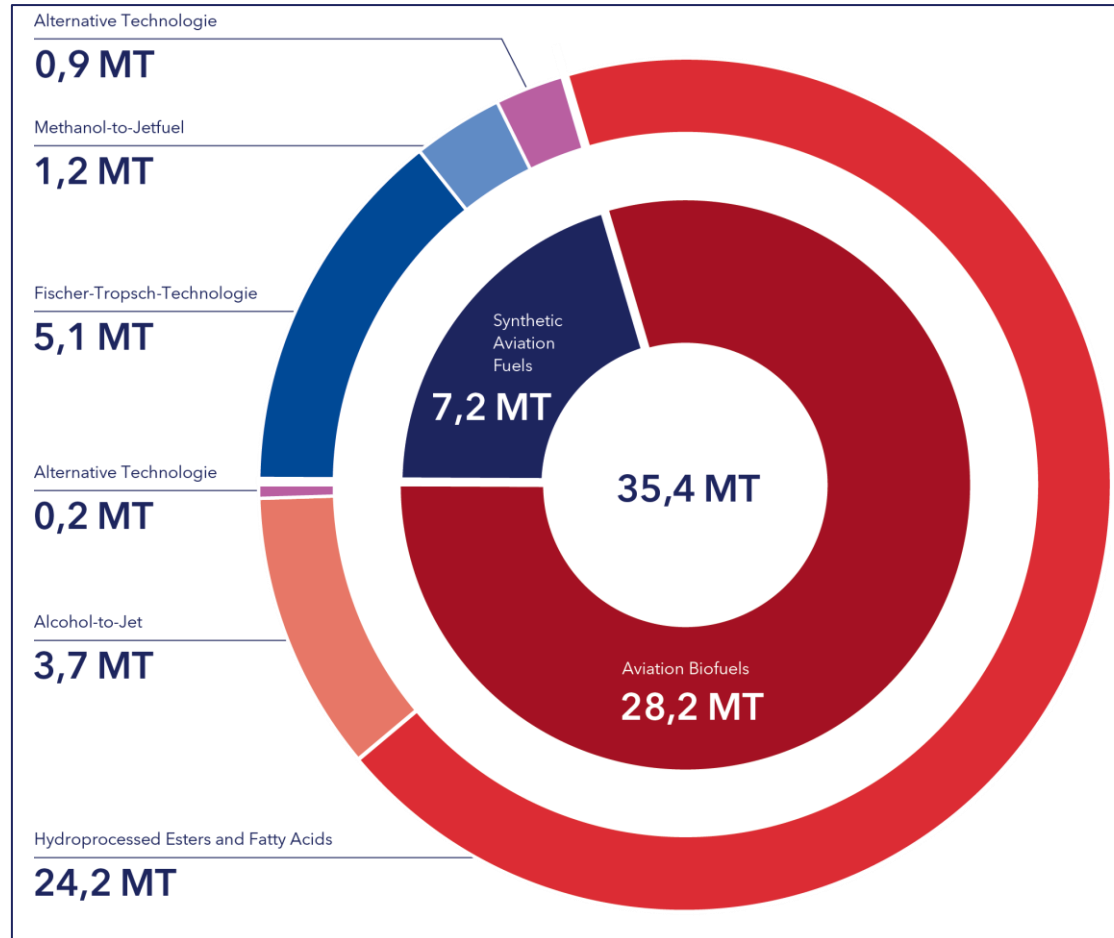
Stark steigender Bedarf an E-SAF und CO₂ bis 2050



Quelle: ESTAT; Complete energy balances; jährliche Wachstumsrate des Flugsektors wird mit 1,5 % angenommen entsprechend des mittleren Szenarios der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organization, ICAO)

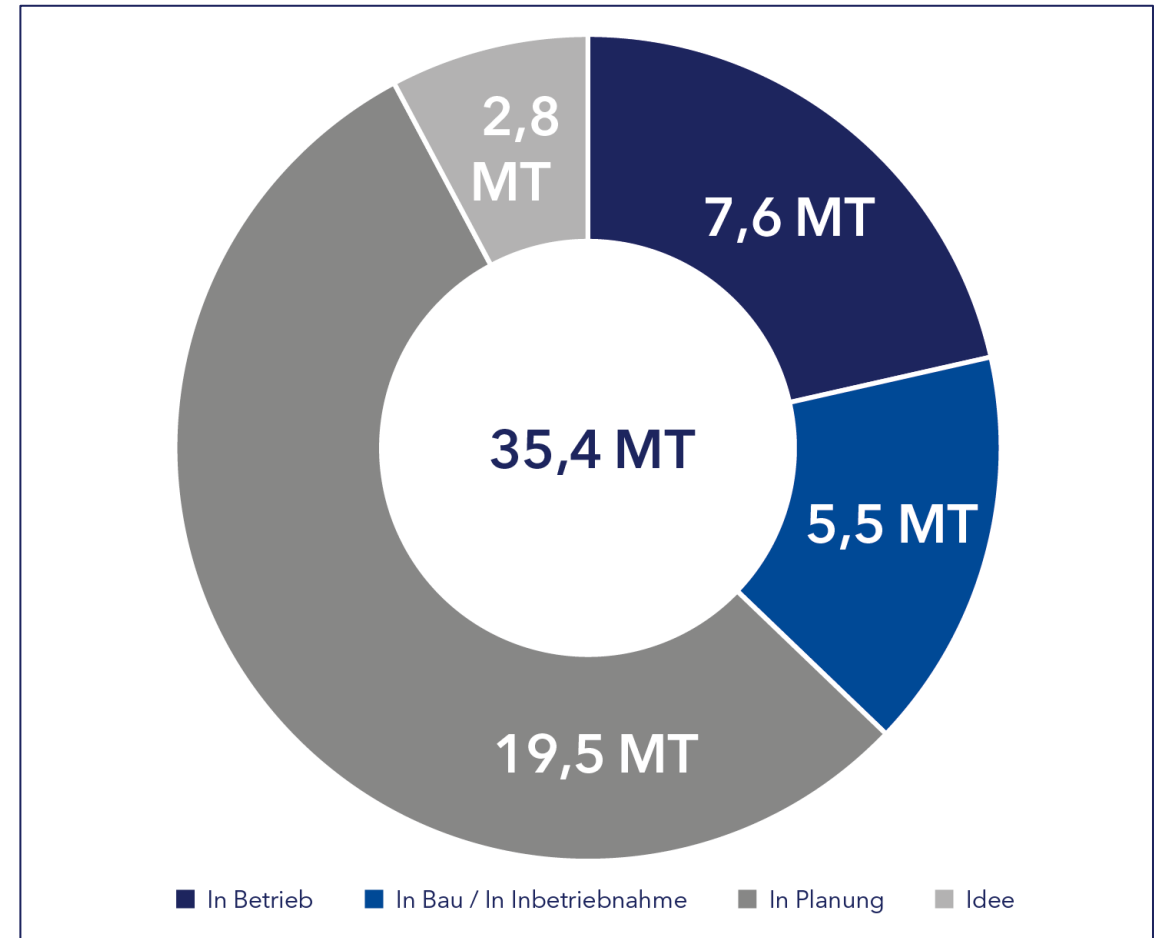
CENA SAF-Outlook 2025 zeigt: 35 Mio. Tonnen in 2030

Angekündigte Produktionsmenge nach Technologie 2030



Quelle: CENA SAF-Outlook 2025

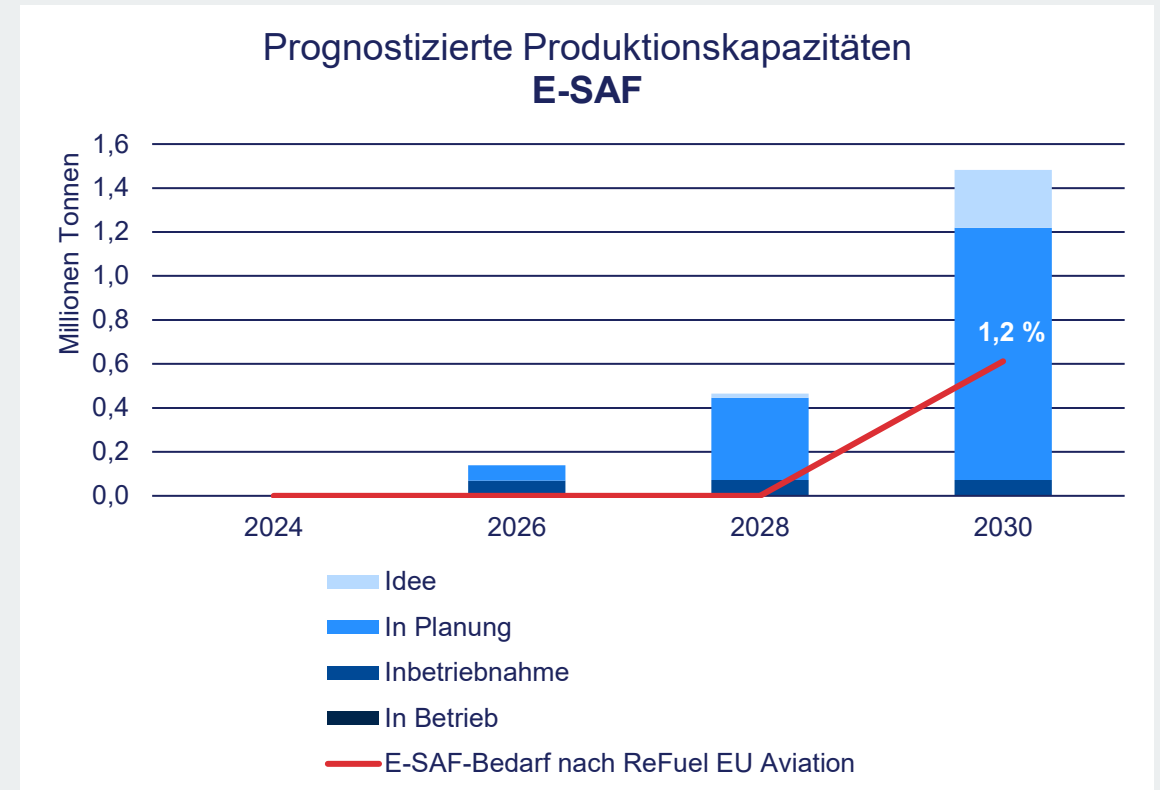
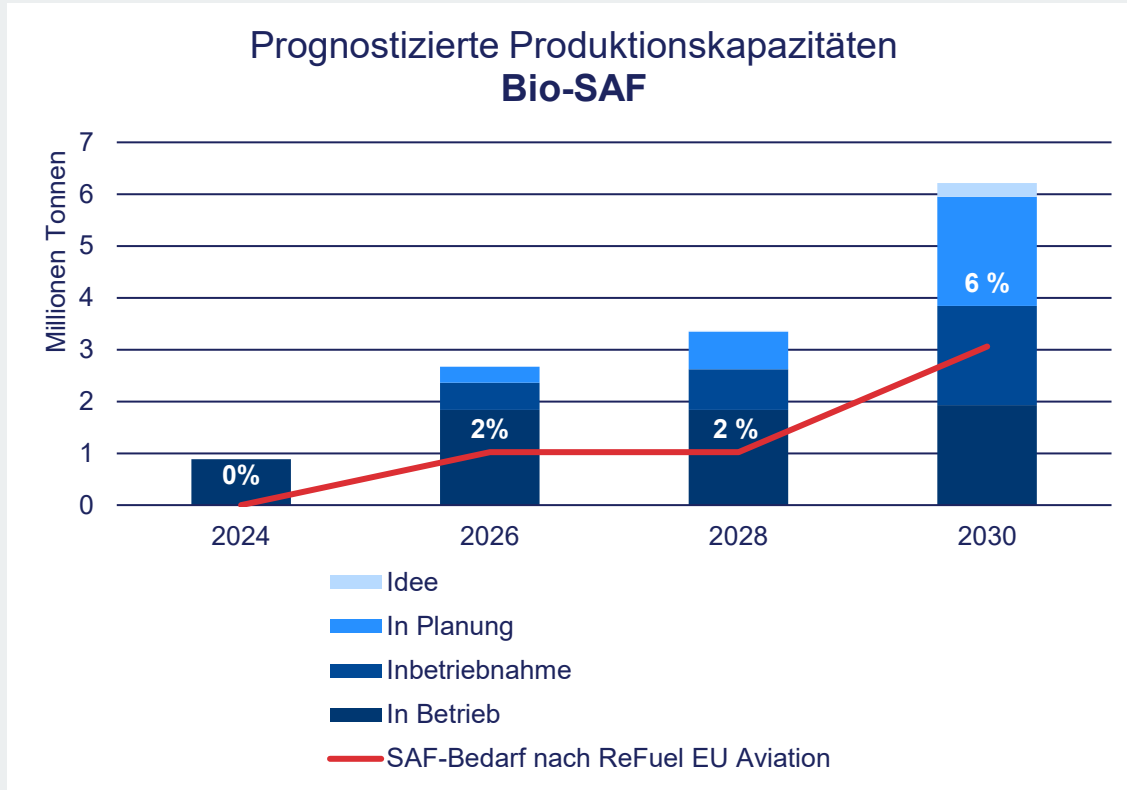
Angekündigte Produktionsmenge nach Projektstatus 2030



Quelle: CENA SAF-Outlook 2025

EU-Quote durch Biofuels erreichbar, E-SAF fraglich

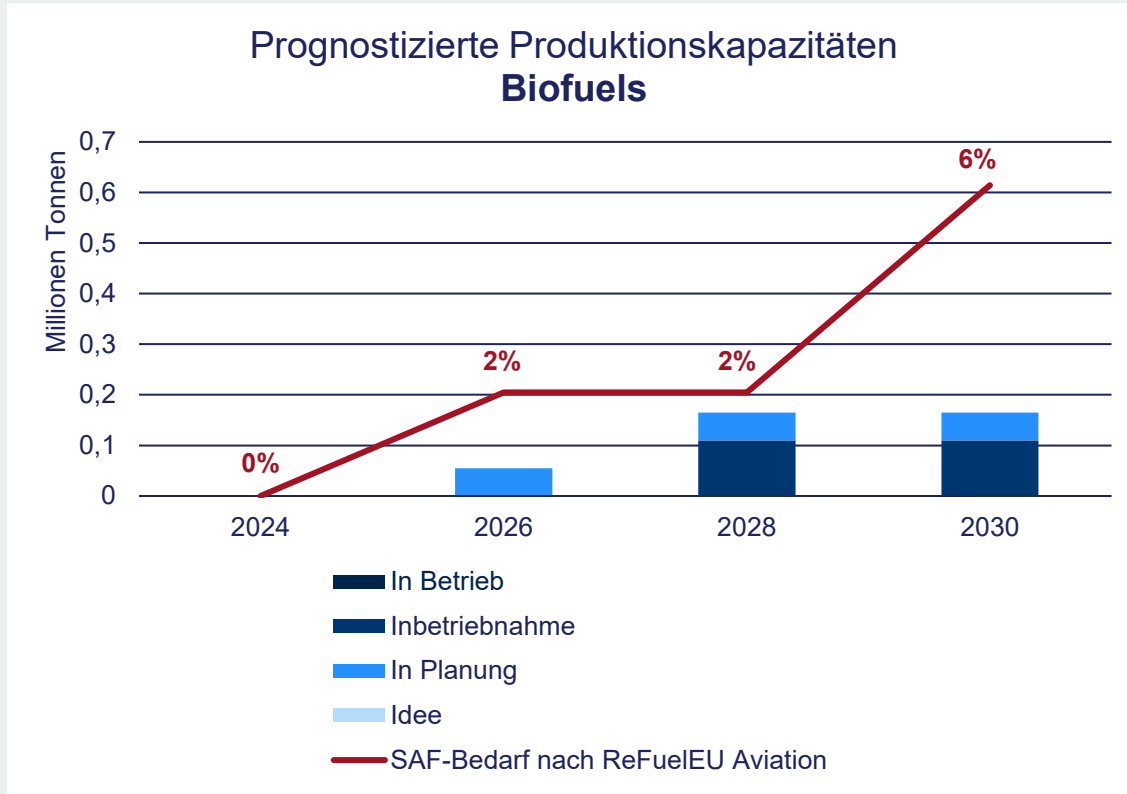
ReFuelEU Aviation SAF-Quoten im Verhältnis zu den EU-Produktionskapazitäten



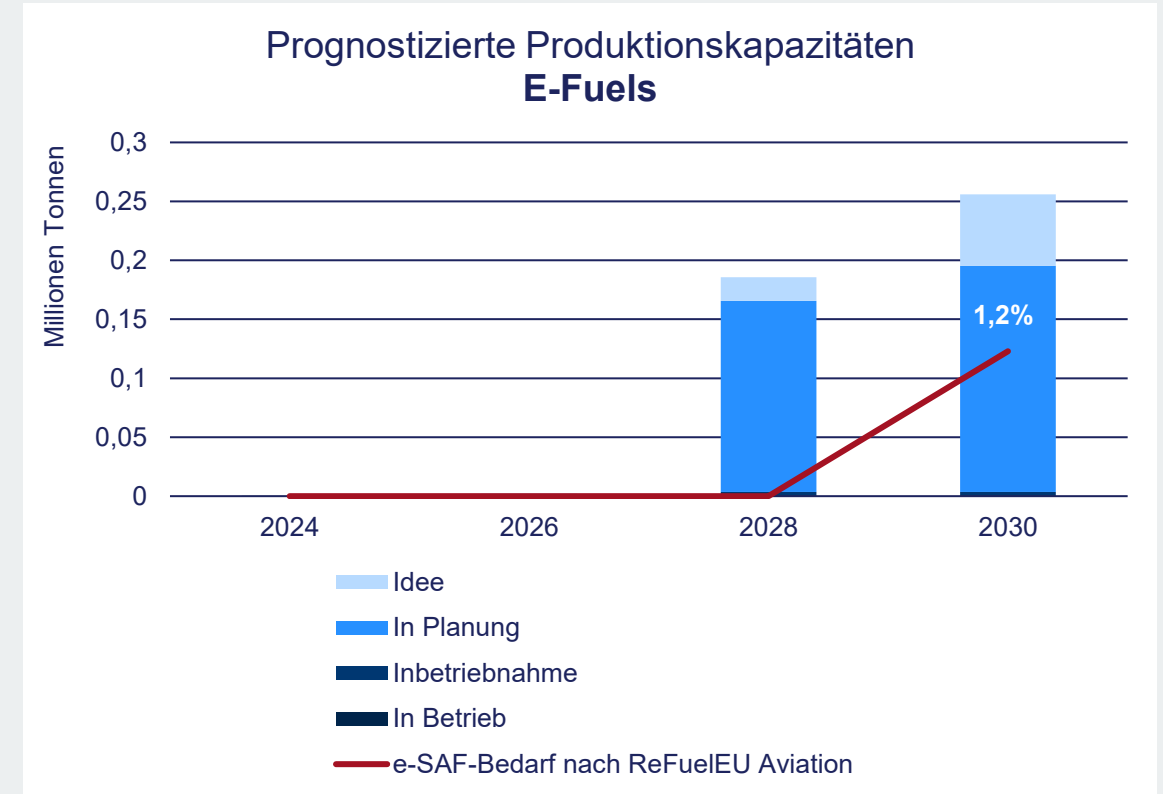
* Bedarf aus europäischer SAF- und Subquote ausgehend von einem jährlichen Flugtreibstoffbedarf von 51 Mio. t

Eigenproduktion vs. Eigenbedarf in Deutschland

ReFuelEU Aviation SAF- und E-SAF-Quote im Verhältnis zu den deutschen Produktionskapazitäten



Quelle: CENA Hessen

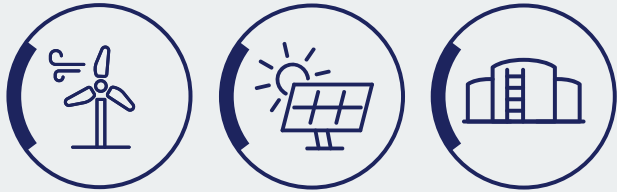


Quelle: CENA Hessen

* Bedarf aus europäischer SAF- und Subquote ausgehend von einem jährlichen Flugtreibstoffbedarf von 10,2 Mio. t

SAF-Produktion ist ein riskantes Unterfangen

Risiken für Investoren



Integration einer komplexen Supply Chain
(EE-CO₂-Synthese-Raffinerie)



Fehlender Zugang zu Kapital
(Banken)



Heterogene, dynamische Regulatorik
(global, innereuropäisch, Revisionsklauseln)



Teilweise noch fehlende Reife für Industrie-Produktion für E-Fuels
(Piloten, Demoanlagen, Teilanlagen)

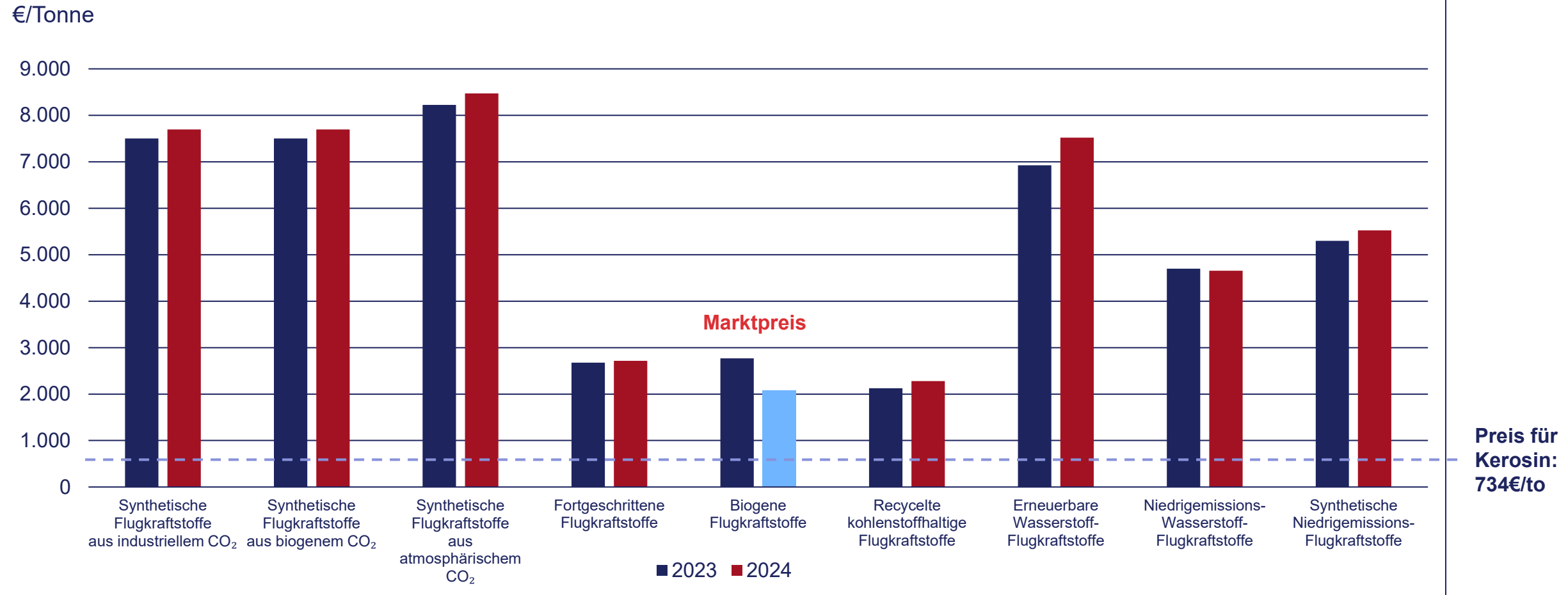


Unsicherer, langfristiger Umsatz
(freiwilliger Markt, kurze Vertragslaufzeiten)

SAF ist nicht gleich SAF – aber immer teuer

SAF-Kosten und Preis unterschiedlicher Herstellwege 2023 und 2024

Geschätzte durchschnittliche Produktionskosten nach Kategorien



Quelle: EASA 2025 Briefing Note – 2024 Aviation Fuels Reference Prices for ReFuelEU Aviation

10 Hebel zur Risikominimierung



Anstrengungen, SAF zum Take-Off zu bringen

Eine Auswahl an Initiativen zur Einführung von SAF

- **Early Movers Coalition in EU** (Deutschland, Österreich, Frankreich, Finnland, Luxemburg, Niederlande, Spanien, Portugal)
- **Industriepolitische Aktivitäten in den USA und einzelnen Staaten** (IRA und Tax Credits, SAF Grand Challenge, Kalifornien, Oregon, ...)
- **SAF-Mandatierung und Revenue Assurance Mechanism in UK**
- **Zentrale staatliche Organisation in Singapur** zu Beschaffung und Inverkehrbringung von SAF



Quelle: AdobeStock

Vielen Dank.

CENA Hessen

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

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

