

Verfahrenstechnik zur Gewinnung neuartiger abfallbasierter synthetischer Kraftstoffe



Prof. Dr. Anika Sievers

Prof. Dr.-Ing. Thomas Willner

Leitung der Forschungsgruppe Verfahrenstechnik

HAW Hamburg / Hamburg University of Applied Sciences

**HAW Hamburg, CC4E, Fakultät LS, Forschungsgruppe Verfahrenstechnik:
13.02.2023 Rheinland-Pfalz-Projekt**

CC4E *Competence Center für
Erneuerbare Energien &
EnergieEffizienz*

 **HAW
HAMBURG**

Energiewende benötigt neben großen Stromspeichern zur Stabilisierung des Netzes mit schwankenden erneuerbaren Anteilen auch **grüne Moleküle und stromunabhängige Verbraucher**, um den **Bedarf an knapper werdendem Grundlaststrom zu minimieren**. Hier kann der **Verkehrssektor** im Rahmen der **Sektorkopplung** einen wichtigen Beitrag leisten, wenn zum einen **Überschussstrom mit Power-to-Liquid (PtL)-Verfahren in Kraftstoffe** umgewandelt wird und zum anderen **abfallbasierte Moleküle** dabei helfen, den **Strombedarf zu minimieren** und gleichzeitig **geschlossene Kreisläufe** zu ermöglichen. Die in den **X-Energy-Projekten READi-PtL und KLIMAKRAFT** der HAW Hamburg in Kooperation mit Nexxoil und KBS untersuchte Technologie kann diesen Ansatz in besonders effizienter Weise umsetzen.

Lösungsansatz der Verfahrenstechnik für Energie- und Verkehrswende sowie geschlossene Kreisläufe

- **Energiewende benötigt**
 - **große chemische Stromspeicher** zur Stabilisierung des Netzes,
 - **grüne Moleküle** (abfallbasiert auch aus Deutschland und ansonsten importiert) auch zur **Deckung des Energieimportbedarfs (70 %)** zur Verwendung für
 - **stromunabhängige Verbraucher** (z. B. Verbrennungsmotoren, Öl- und Gasheizungen), um **Strom zu sparen** (Grundlaststrom wird knapp).
- **Verkehrssektor hilft im Rahmen der Sektorkopplung:**
 - **Überschussstrom in Kraftstoffe** umwandeln mit **Power-to-Liquid (PtL)- bzw. e-Fuel-Verfahren**
 - aus **CO₂ + H₂** in Ländern mit Überschuss an erneuerbarer Energie,
 - aus **Abfall + H₂** auch in Deutschland (hohe Effizienz = geringer Strombedarf und gleichzeitig geschlossene Kreisläufe), **z. B. HVO u.v.a.**

Forschungsgruppe Verfahrenstechnik

- Leitung: Prof. Dr. Anika Sievers, Prof. Dr.-Ing. Thomas Willner



- **Leitung: Prof. Dr. Anika Sievers, Prof. Dr.-Ing. Thomas Willner**
- **Mitarbeitende: 10-15**
wissensch. Mitarb., Doktoranden, stud. Hilfskräfte, stud. Bachelorarb. und Masterarb., Techniker
- **7 abgeschlossene Dissertationen**
2 laufende Dissertationen
- **Forschungsthemen:**
 - **Umwandlung von Abfallstoffen in alternative Kraftstoffe, Brennstoffe und Chemikalien**
 - **Aufbereitung von Bioölen und Schwerölen**
 - **Kraftstoffanalytik**

Alternative Kraftstoffe (ReFuels, grüne Moleküle) sind vielfältig

Technik-Diversität genauso wichtig wie Biodiversität:

Systemstabilität, Versorgungssicherheit, Rohstoffunabhängigkeit, Handlungsoptionen, Widerstandsfähigkeit gegenüber Krisen.

1. **1G-Biokraftstoffe (Biodiesel and Bioethanol) = Nebenprodukt der Protein- und Futtermittelherstellung: Keine extra Agrarflächen nötig.¹⁾ Deutschland sollte Proteinprod. sogar erhöhen (Soja-Import ca. 4 Mio. t/a)**
2. **2G-Biokraftstoffe aus Abfällen und Reststoffen von Land- und Forstwirtschaft, Holz- und Nahrungsmittelindustrie**
3. **Recycled carbon fuels (RCF) von nicht-biogenen Abfällen (z. B. Plastik)**
4. **E-Fuels, PtX-Fuels (rein elektrobasierend) aus Ländern mit Überschuss an erneuerbarer Energie**
5. **Hocheffiziente Kombinationen wie abfallbasierte E-Fuels (Beisp. HVO von Neste u.a., READi-Verfahren der HAW Hamburg/Nexoil)**

¹⁾ Buchspies, Kaltschmitt (2018) Applied Energy 211, (2018) pp 368-381

1G = 1st generation, 2G = 2nd generation, RE = renewable energy, PtX = Power to X

Alternative Kraftstoffe (ReFuels, grüne Moleküle)

Gruppe 5: Hocheffiziente abfallbasierte E-Fuels wie HVO: Projektbeispiel HAW

Projekte:



READi-PtL Projekt: 2017 - 2022

KLIMAKRAFT Projekt: 2022 - 2025

SPONSORED BY THE

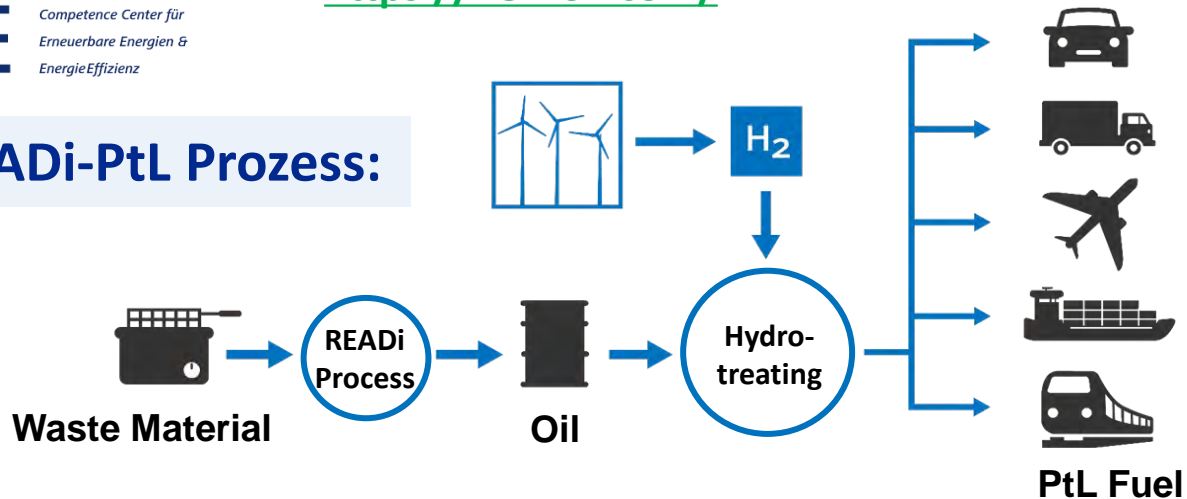


Federal Ministry of Education and Research

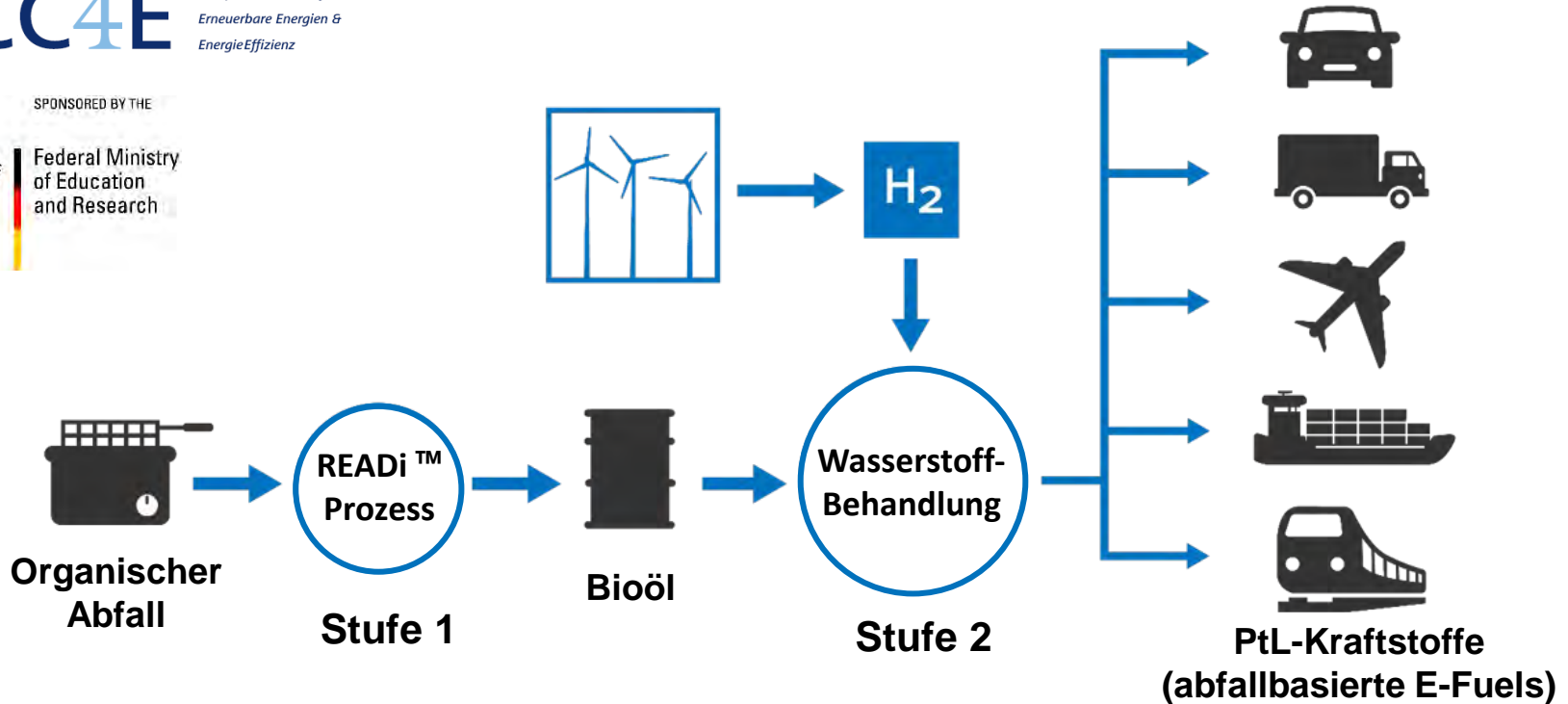
Partner:



Prozess: READi-PtL Prozess:

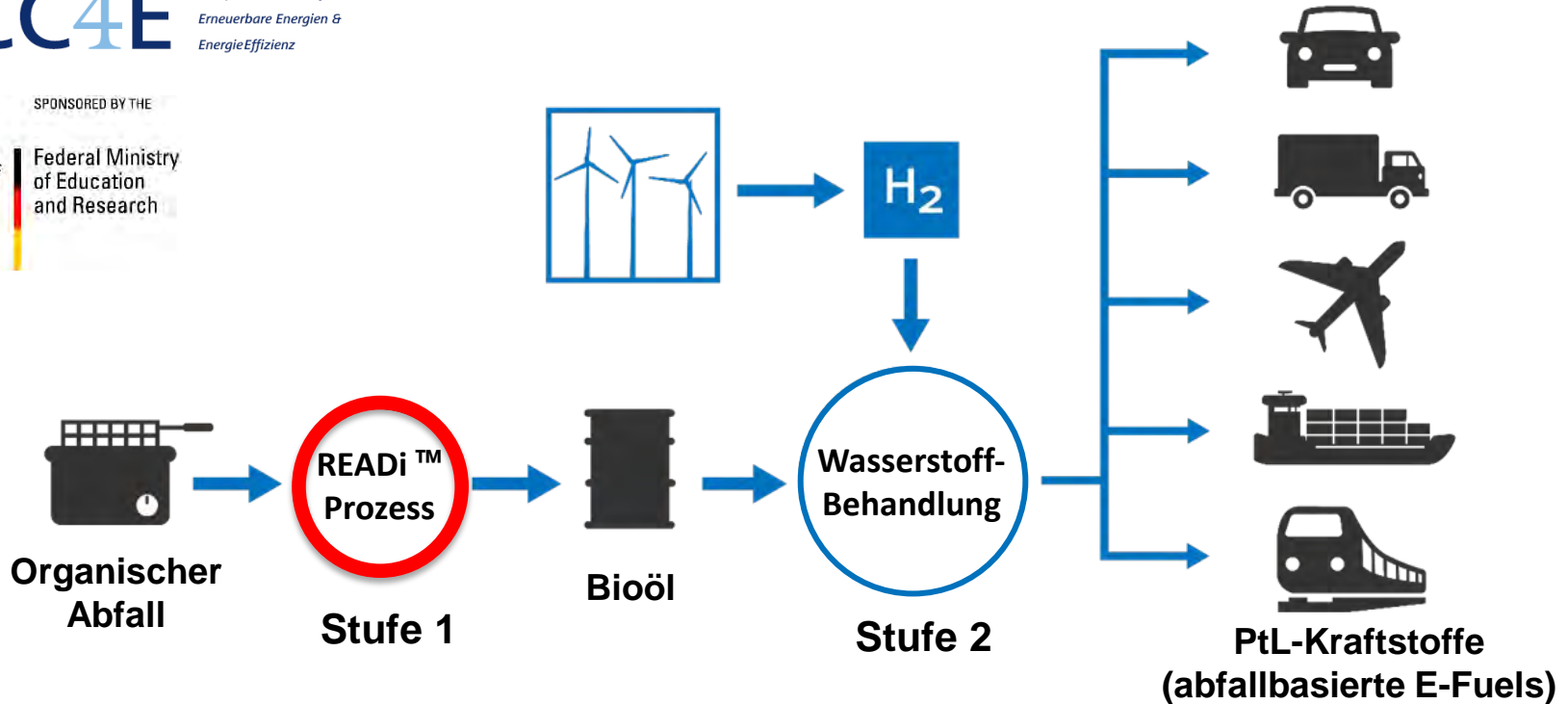


Synthetische Kraftstoffe aus Abfall und Wasserstoff: X-Energy-Projekt „READi-PtL“



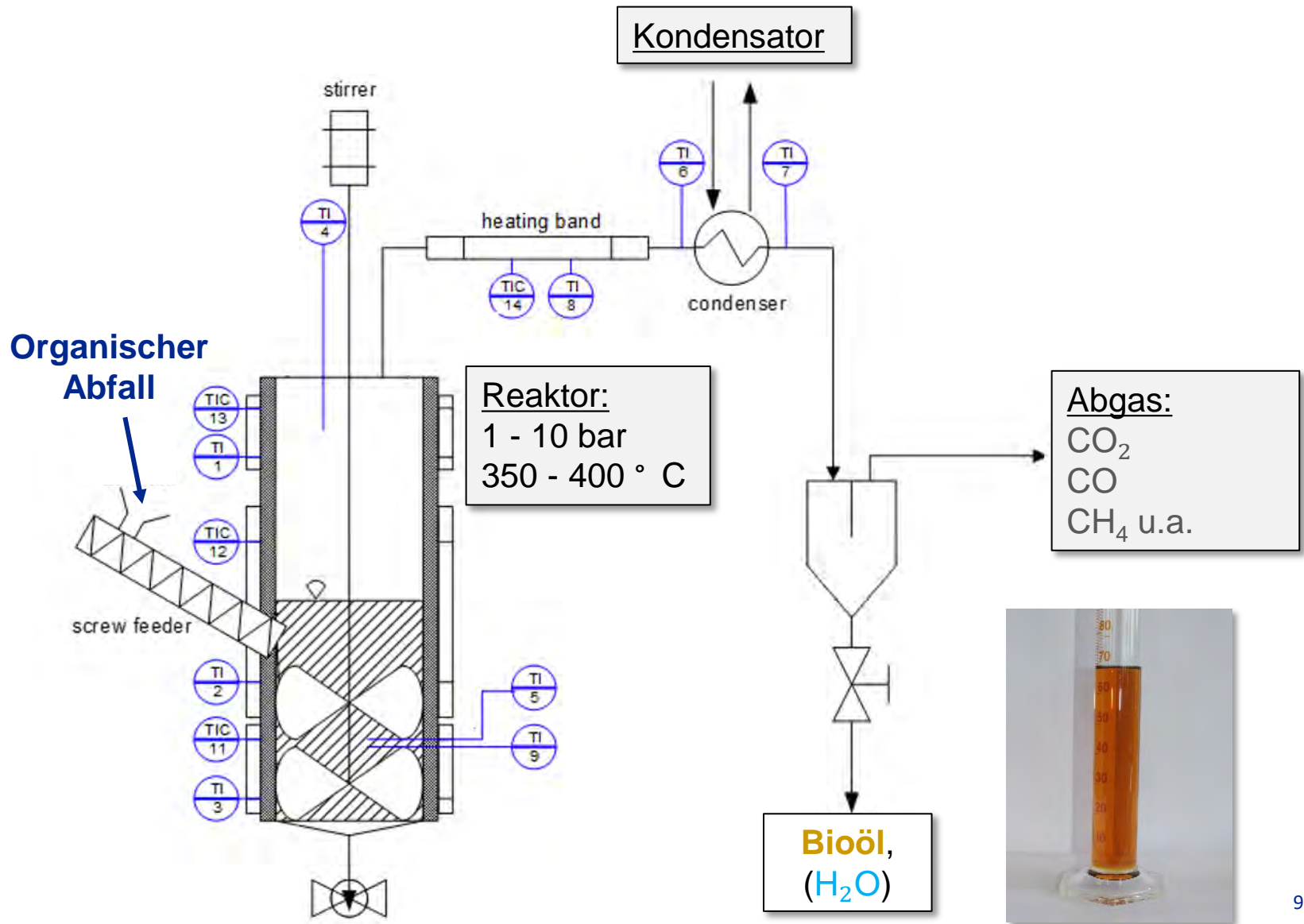
READi = Reactive Distillation, PtL = Power to Liquid

Stufe 1: READi™-Prozess



READi = Reactive Distillation, PtL = Power to Liquid

Stufe 1: READi™-Prozess



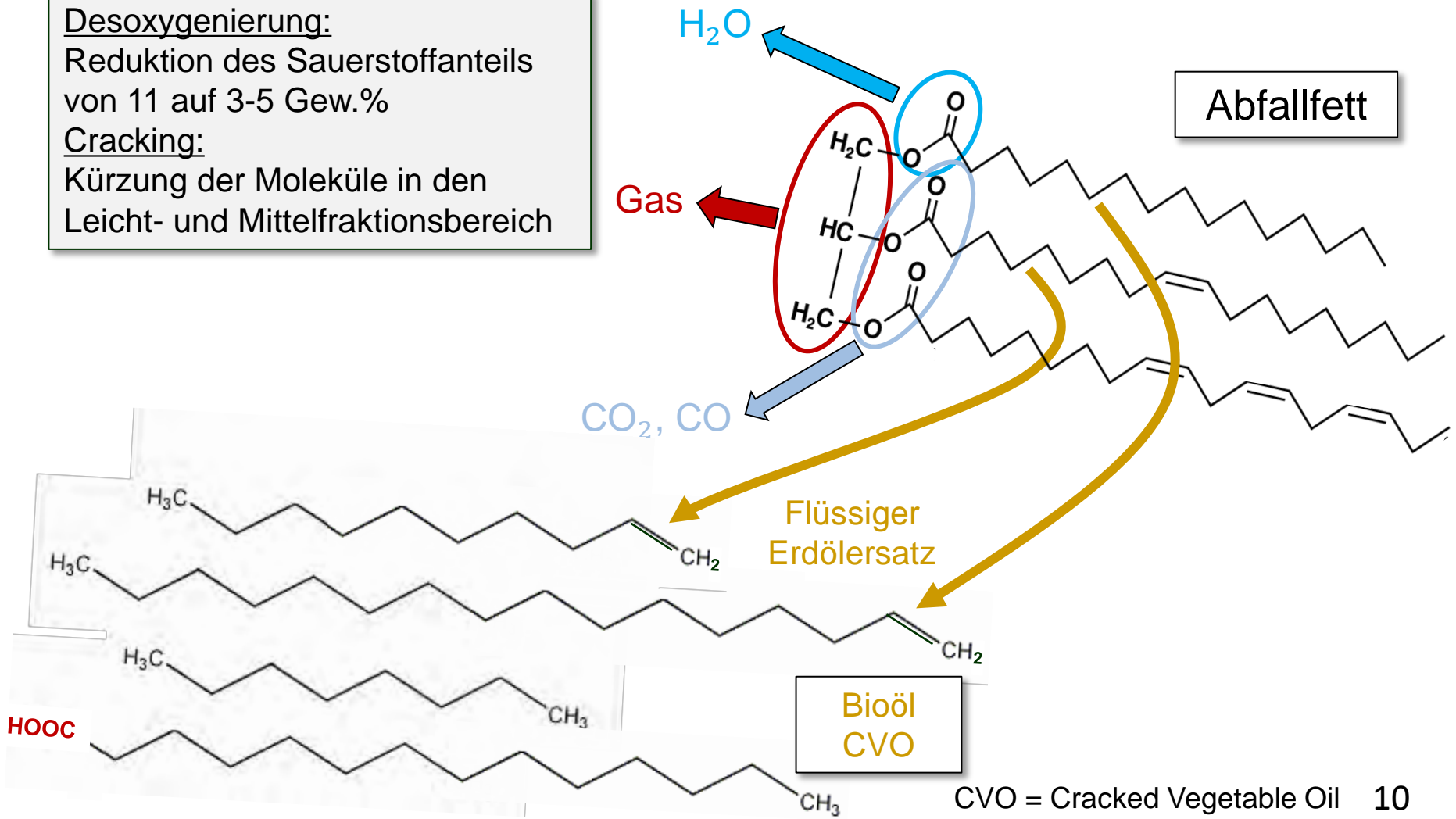
Stufe 1: READi™-Prozess

Desoxygenierung:

Reduktion des Sauerstoffanteils von 11 auf 3-5 Gew.%

Cracking:

Kürzung der Moleküle in den Leicht- und Mittelfraktionsbereich



Stufe 2: Wasserstoff-Behandlung (PtL-bzw. eFuel-Anteil)

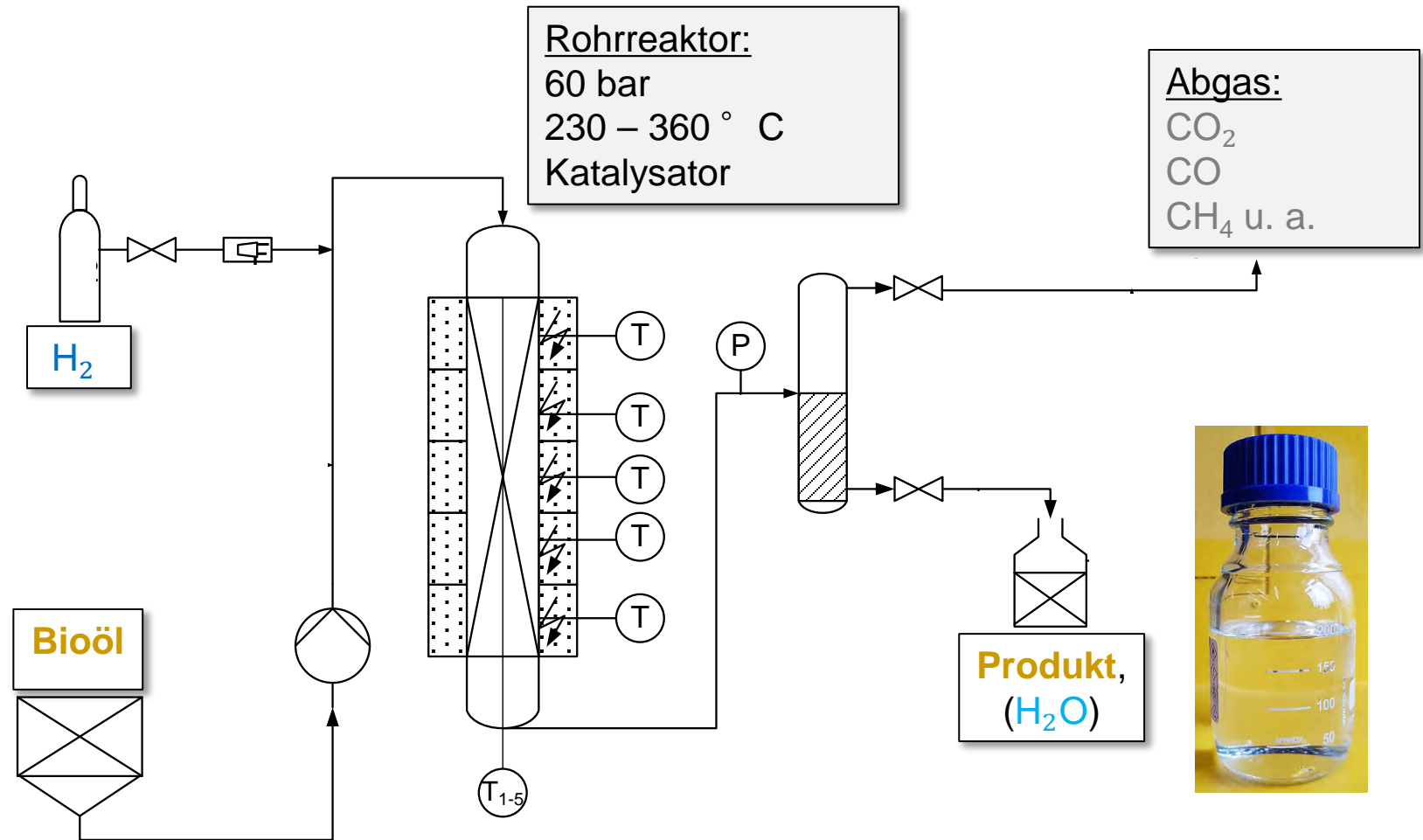


Wasserstoff-Behandlung



READi = Reactive Distillation, PtL = Power to Liquid

Stufe 2: Wasserstoff-Behandlung (PtL-bzw. eFuel-Anteil)

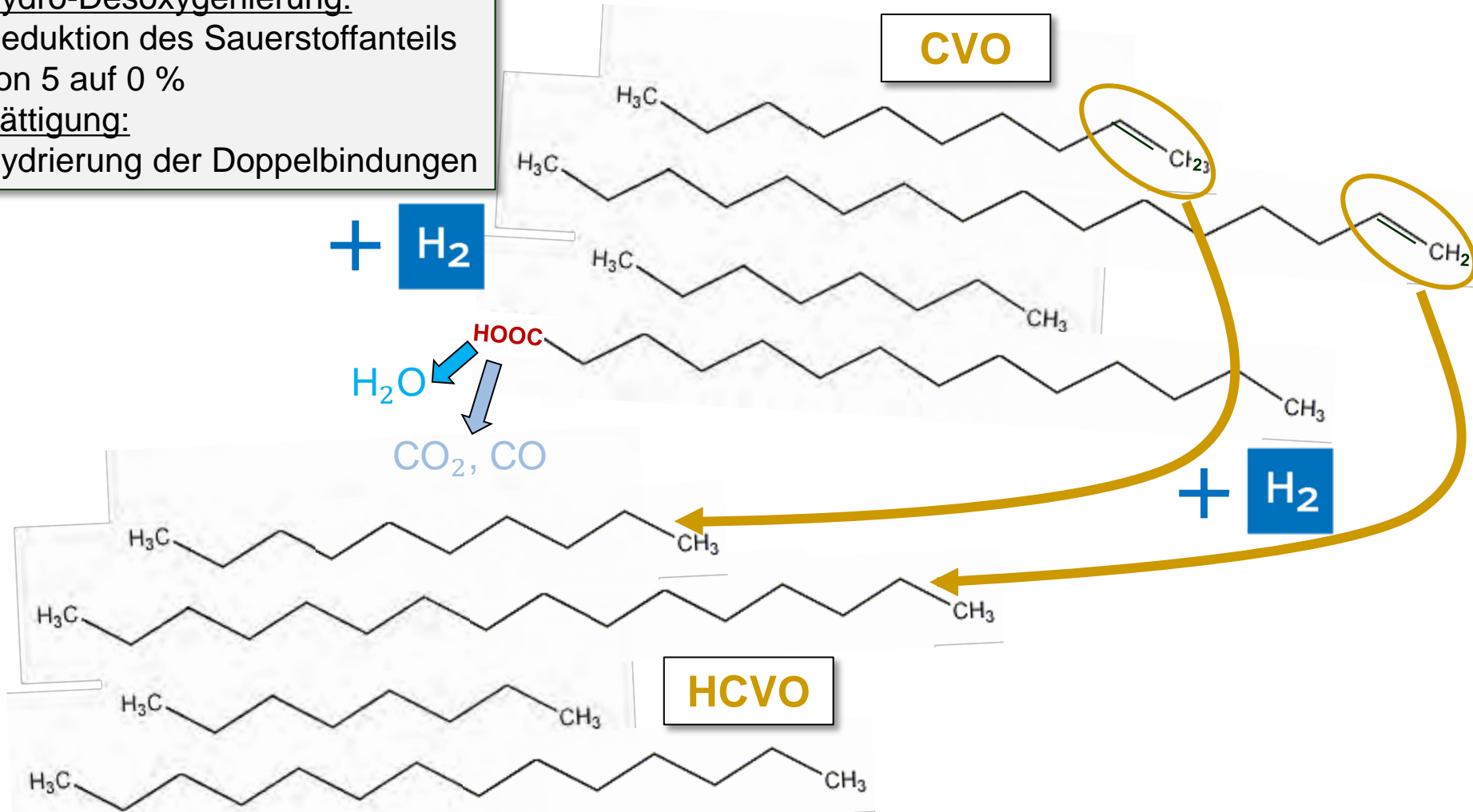


Source: Endisch & Kuchling 2013

12

Stufe 2: Wasserstoff-Behandlung (PtL-bzw. eFuel-Anteil)

Hydro-Desoxygenierung:
Reduktion des Sauerstoffanteils
von 5 auf 0 %
Sättigung:
Hydrierung der Doppelbindungen



CVO = Cracked Vegetable Oil; HCVO = Hydrotreated Cracked Vegetable Oil

13

READi-PtL-Prozess: Beispiel Fettabfall-Verarbeitung



Stufe 1

READi™
Prozess



Stufe 2

Wasserstoff-
Behandlung



Fettabfall

Energy	37 MJ/kg
Oxygen	11 wt.%
Viscosity (40 °C)	44 mm ² /s

Bioöl: CVO

Energy	42 MJ/kg
Oxygen	3-5 wt.%
Viscosity	3,8 mm ² /s

Produkt: HCVO

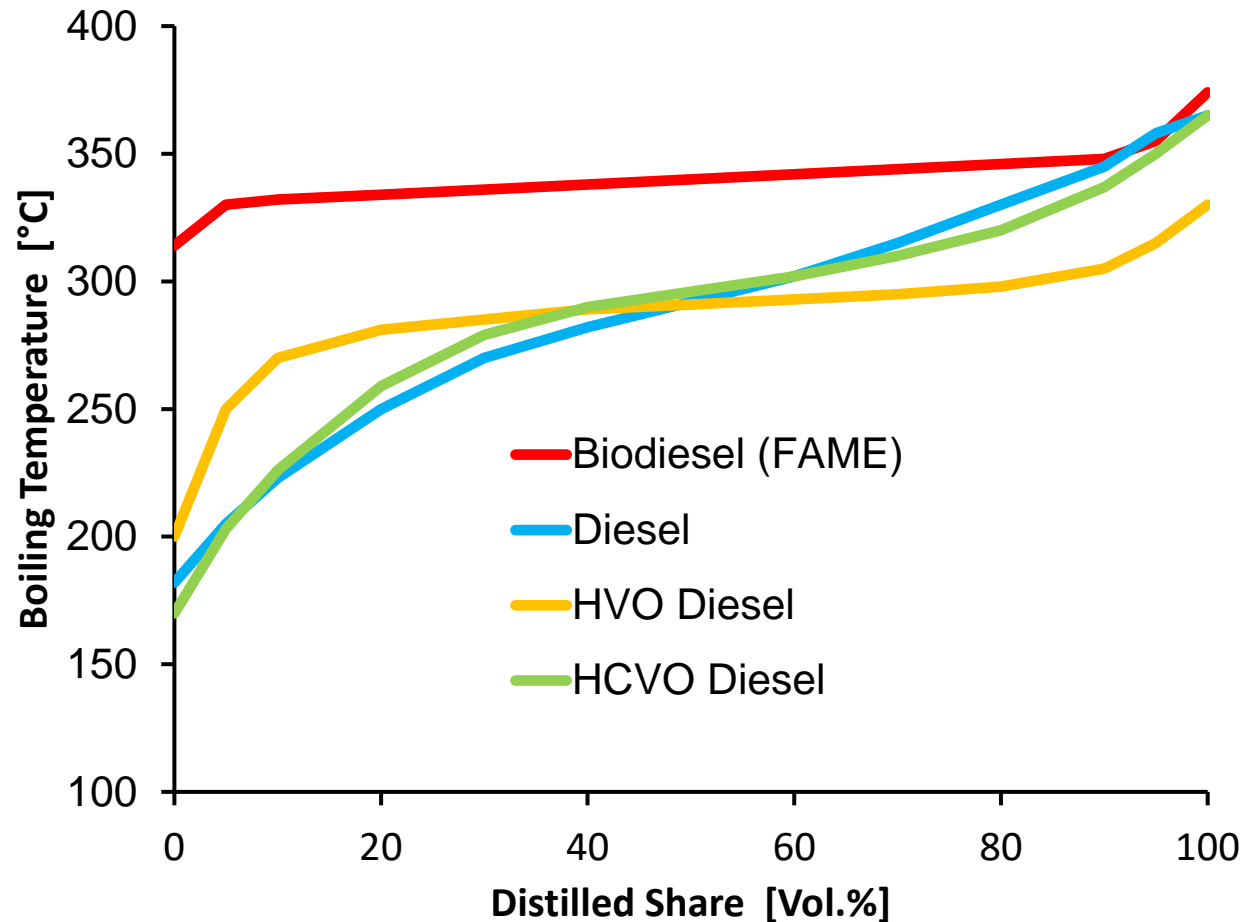
Energy	44 MJ/kg
Oxygen	0 wt.%
Viscosity	2,3 mm ² /s

CVO = Cracked Vegetable Oil, HCVO = Hydrotreated CVO

14

READi-PtL-Prozess: Beispiel Fettabfall-Verarbeitung

Siedekurven



CVO = Cracked Vegetable Oil, HCVO = Hydrotreated CVO, HVO = Conventional Hydrotreated Vegetable Oil

15

READi-PtL-Prozess: Beispiel Fettabfall-Verarbeitung

READi-PtL-Produkt HCVO-Diesel: Höhere Dichte → höhere Blendanteile

Vergleich von HCVO-Diesel und HVO-Diesel:

- HCVO-Diesel: Breitere Molekülgrößenverteilung (siehe Siedekurven)
- HCVO-Diesel: Höhere Dichte (15 °C): **800-814 kg/m³** HVO-Diesel ca. **780 kg/m³**
- HCVO-Diesel: Erhöhter Blendanteil in EN 590: **R66** HVO-Diesel: **R33**

R66 bzw. R33 = 66 bzw. 33 Vol.% erneuerbarer Anteil (renewable share) im Dieselkraftstoff

HCVO = Hydrotreated CVO, HVO = Conventional Hydrotreated Vegetable Oil

16

READi-PtL-Prozess: Beispiel Fettabfall-Verarbeitung

HCVO-Diesel: Saubere, rußarme Verbrennung



Diesel



HCVO-Diesel



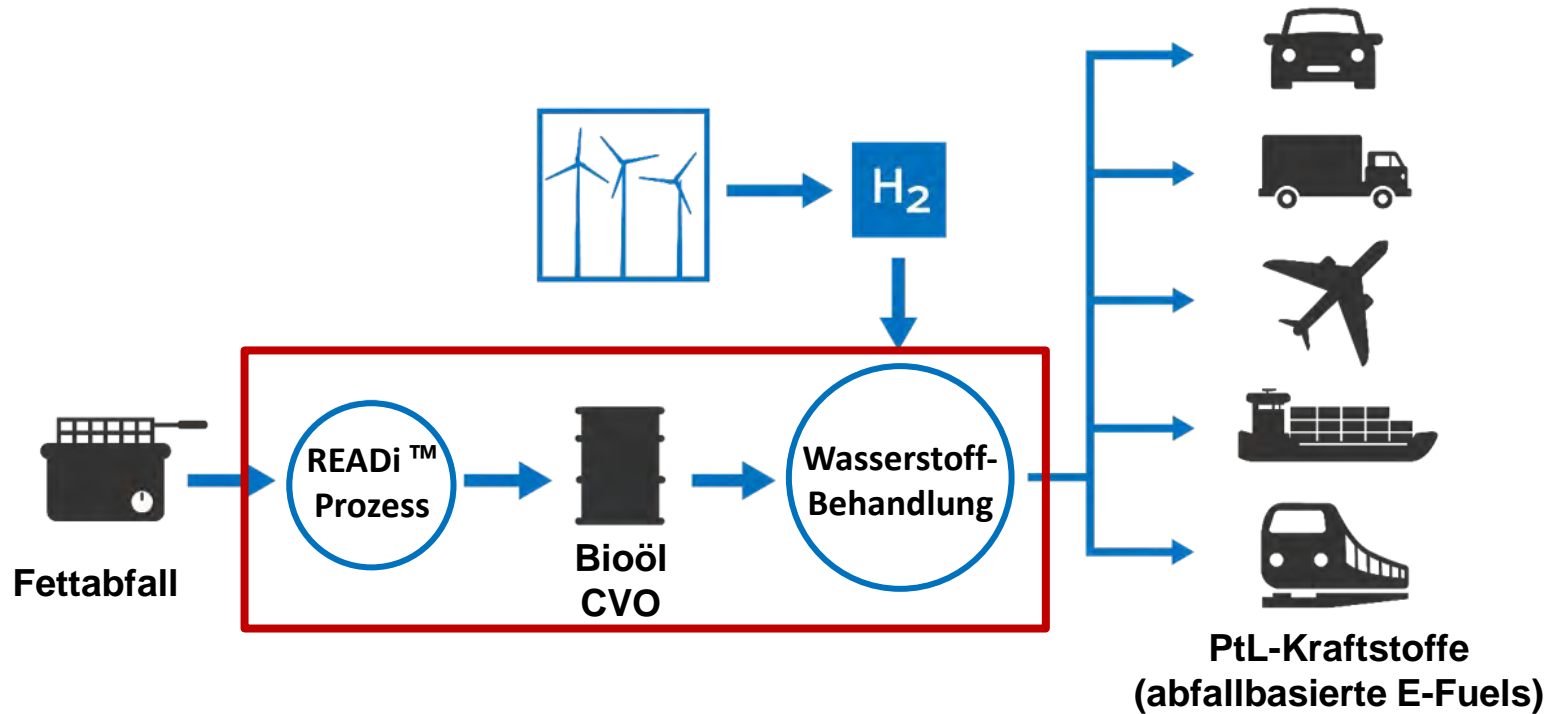
**Produkt:
HCVO-Diesel**

CVO = Cracked Vegetable Oil, HCVO = Hydrotreated CVO

17

READi-PtL-Prozess: Beispiel Fettabfall-Verarbeitung: Massenbilanz und Energieanteile

	Fettabfall	+	H ₂	→	HCVO	+	Kohle	+	Abgas	+	Wasser
Gew.%	100		1,3		75		4		13		9
Energie%	100		4		88		3		6		0



READi-PtL-Prozess: Beispiel Fettabfall-Verarbeitung:

Vorteile von HCVO (= HVO-READi-PtL) gegenüber konv. HVO am Markt:

- **Robustes Verfahren: Verunreinigte Rohstoffe**
- **H₂-Bedarf halbiert** (bezogen auf den Rohstoffeinsatz)¹
- **Nur 1 kWh Strombedarf pro Liter Kraftstoff** statt ca. 1,5 kWh/Liter¹
- **Blend-Anteile verdoppelt** innerhalb der Dieselnorm (DIN EN 590): R66 statt R33
- **Dezentral wirtschaftlich**

¹ Eigene Berechnungen auf Basis von Messungen der TU Freiberg und zu HVO-Daten aus Endisch et al. 2013

HVO = Hydrotreated Vegetable Oil, konv. HVO = 1-stufig katalytisches Verfahren am Markt

19

Effizienz abfallbasierter E-Fuels am Beispiel von HVO: Ø Reichweite bei 10 kWh Strom-Einsatz (Kompaktklasse):

BEV:

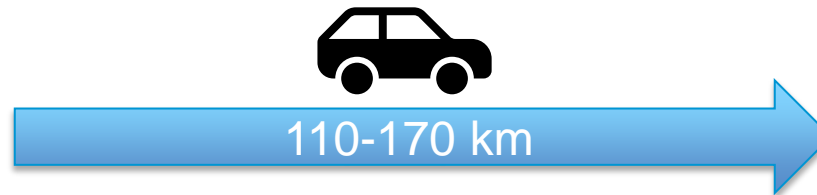
ca. 15-20 kWh/100 km



HVO konv.

ca. 1,5 kWh/Liter¹

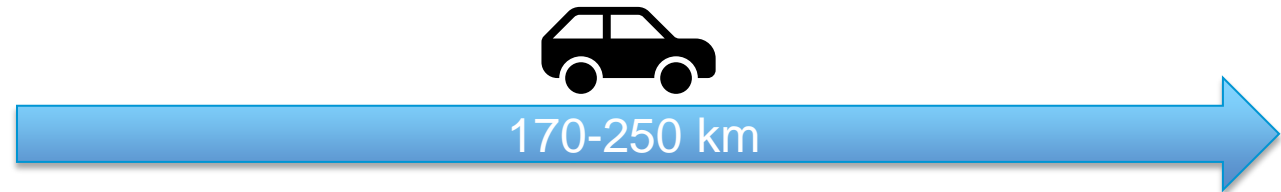
bei 4-6 Liter/100 km



HVO READi-PtL

ca. 1 kWh/Liter¹

bei 4-6 Liter/100 km



¹ Eigene Berechnungen auf Basis von Messungen der TU Freiberg und von HVO-Daten aus Endisch et al. 2013

Hinweis: Die hohe Effizienz bzw. der geringe Strombedarf **abfallbasierter E-Fuels** hier an 2 Beispielen von HVO beruht auch auf dem hohen Heizwert des Rohstoffes von etwa 37 MJ/kg. Im Falle von kohlenwasserstoffreichen Plastikabfällen kann die Effizienz sogar noch höher sein.

Angaben in kWh = Strombedarf, BEV = Battery Electric Vehicle; HVO = Hydrotreated Vegetable Oil, HVO konv. = konventionelles HVO am Markt, HVO READi-PtL = HVO aus READi-PtL-Verfahren

20

READi-PtL-Prozess: Fett- oder Plastikabfall-Verarbeitung:

Extrem hohe Effizienz, geringer Strombedarf

Fazit:

**Produktion abfallbasierter E-Fuels
im Rahmen der Sektorkopplung
sehr gut in Deutschland machbar**

**Dabei wird gegenüber der batterie-elektrischen Mobilität
erheblich Strom gespart**

HVO = Hydrotreated Vegetable Oil = 1-stufig katalytisches Verfahren am Markt

21

Kraftstoff-Potenzial (Beispiele)

- **Fettabfall EU ca. 2 – 4 Mio. t/a**
- **Fettabfall Welt ca. 20 – 40 Mio. t/a**
- **Jatrophaöl (Wüstenränder) ca. 200 Mio. t/a**
- **Plastikabfall Welt ca. 200 Mio. t/a + 6 Mrd. t (Ozean, Deponien)**
- **Müll Welt ca. 800 Mio. t/a**
- **Feste Biomasseabfälle/-reststoffe EU ca. 60 Mio. t/a**
- **etc.**

Quellen:

- **MVaK Erhebung 2021, S2Biom Report 2016, SGAB (EC subgroup on advanced biofuels) 2017**
- **Jean-Louis Kindler: From Waste to Hydrogen – Biomass and Waste to Hydrogen. 2020**
- **G. Gruber, B. Dalheimer: The potential of jatropha for rural electrification in hot semi-arid areas. 26th European Biomass Conf., Copenhagen, 14-17 May 2018**

22

Nächste Schritte

- 2022: Inbetriebnahme der Pilotanlage (100 t/a) an der HAW (READi-PtL-Projekt)
- 2023/24: Optimierung Pilotanlage (KLIMAKRAFT-Projekt) + Inbetriebnahme von Demoanlagen (1.000-3000 t/a) bei Kunden
- 2024/25: Erweiterung Pilotanlage auf Plastikabfall (KLIMAKRAFT-Projekt) + Erweiterung Demo auf 5.000 t/a + Entwicklung 10.000 t/a
- 2026: Entwicklung 50.000 t/a
- 2030: insges. > 1 Mio. t/a

Die Firma **Nexoil** will vom nächsten Jahr an CO₂-freien Diesel aus Altfett produzieren – und später auch aus Plastikmüll

VOXKER MESTER

HAMBURG 11 Ein Treibstoff, der nicht nur klimaneutral ist, sondern bei der Erzeugung sogar mehr CO₂ bindet, als er bei der Verbrennung freisetzt – das klingt gar nicht so überheblich. Doch die Hamburger Unternehmen Nexoil will genau diese Idee verwirklichen. Der Ausgangspunkt ist reichlich vorhanden und zudem erschwerter Müll. Schon im nächsten Jahr sollen die ersten zwei oder drei Anlagen bei Entsorgungsfirmen in Betrieb gehen und dort Abfälle in Diesel umwandeln. Entwickelt hat das Verfahren Thomas Willner, Professor für Verfahrenstechnik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW). „Die Idee hat ihre Wurzeln in der Ökologie der 1970er-Jahre“, sagt er. Willner beschäftigt sich im Rahmen seiner Promotion in den 1980er Jahren damit, bevor der damalige Ölpretschlag die entsprechenden Forschungsaktivitäten beendete.

Der Durchbruch ist uns 2019 gelungen, auch wenn uns die Fachwelt das erst nicht geglaubt hat.

Thomas Willner, Professor an der HAW

„Wir haben aber schon damals über Klimaschutz gesprochen und überlegt, wie man erneuerbare Energiequellen stärker nutzen kann“, sagt Willner. „Im Jahr 2000 kam das Thema wieder hoch – diesmal wegen der damals die Kreislaufwirtschaftsgeiz, das auch die Verwertung von Abfällen beinhaltet.“ Allerdings klappte der größte Teil des Mülls nicht recycelt werden. Daher lag es nahe, ihn in einen Energieträger zu verwandeln.

Zwei versuchten international etliche Teams, ein Verfahren zu entwickeln, das aus den Abfallstoffen eine Art Bioöl erzeugt. In der Regel musste man aber feststellen, dass sich immer noch Schädlinge in der Anlage ansammeln und der Prozess dadurch zum Erliegen kommt. „Der Durchbruch ist uns 2019 gelungen, auch wenn uns die Fachwelt das zunächst nicht geglaubt hat“, so Willner. „Es kommt nicht mehr zu einer Verkohlung des Reaktors, der Prozess läuft ganz kontinuierlich ab.“

Man müsse wohl „ein Stück weit verrückt sein, gegen die Expertenmeinung immer weiterzuarbeiten“, sagt der Wissenschaftler. „Aber wir sind auch unseren Investoren zu großem Dank verpflichtet, dass sie an den Erfolg geglaubt und uns vertraut haben.“ Bisher sind dies vier Privatpersonen, darunter der Nexoil-Mitgeschäftsführer Georg Schillingen. Dessen Investment ist



Professor Thomas Willner (l.) und Nexoil-Chef Thorsten Dunker mit einem Reaktor, der aus Abfällen CO₂-freien Diesel herstellt. Zunächst werden Altfette in Kraftstoff umgewandelt.

ROD MICHAEL BALME

Hamburger verwandeln Abfall in Treibstoff

Unternehmen aber über eine Crowdfunder-Runde sowie von sogenannten Business Angels weiteres Kapital ein. Gewissensbisse im Laborumfeld hat raussoniert die Methode am HAW ganz nach den Wünschen von Willner. „Die Pilotanlage verrätigt sehr, achtmalige“ Mantra“, sagt er. „Wir nutzen Messwert, was schon ziemlich klug ist.“ Das von ihm entwickelte Verfahren entspreche „einem aufwendigen Voreingangs“ und sei außerdem relativ energieintensiv.

„Wir benötigen für das Endprodukt im Vergleich zu anderen Verfahren weniger als die Hälfte der grünen Wasserstoffs aus erneuerbaren Energien, der in Zukunft heiß begehrter sein wird.“ Zwar werden die ersten kommerziellen Anlagen noch Altfette nutzen, wie sie unter anderem in großen Schiffschleifentrieben anfallen. In der nächsten Phase wollen wir aber auch mit Kunststoffabfällen arbeiten“, sagt Willner. „Sie belasten die Meere sehr stark, das muss unbedingt gesoppt werden.“ Der Plastikmüll müsste nicht einmal weit transportiert werden: „Unsere Anlagen wären klein genug, um sie auf Schiffen installieren zu können. Darüber denken wir tatsächlich nach.“

Eine Anlage, die pro Jahr 1000 Tonnen Müll verarbeitet, auf einen mittelmäßigen Millionenbetrag kostet, wird derzeit entwickelt. Sie soll in mehrere Standardkontainer eingebaut werden und damit transportierbar



Auch Plastikmüll soll später zu Treibstoff werden.

sein. Man denkt aber auch schon an Kapazitäten von 10.000 Jahrestonnen, eine solche Installation wäre dann jedoch erst in 2030.

„Wir sprechen derzeit mit sehr vielen Entsorgungsfirmen“, sagt Nexoil-Geschäftsführer Thorsten Dunker. Die Publikumsfirma, gewissermaßen eine Ausgründung aus der HAW, wird die Vermarktung übernehmen und führt außerdem die Patente, von denen einige bereits erteilt worden sind. „Für die Fertigung der Anlagen vorhanden wir mit einem Unternehmen aus der Metropolregion“, so Dunker. Zwar kann man mit dem Verfahren im Prinzip alle möglichen Kohlenstoffstoffe produzieren. Nexoil hat sich nach den Wünschen des Geschäftsführers aber festgelegt: „In der ersten Phase wird Diesel erzeugt, denn der Bedarf dafür wird auch mittelfristig noch hoch bleiben.“ Später könnten Grundstoffe für die chemische Industrie hinzu kommen.

Es entstehen nur kleine Mengen an Abwasser

Außer dem „Bioöl“, das dann zum gewöhnlichen Endprodukt weiterverarbeitet wird, entstehen nach Angaben von Willner bei dem Prozess nur kleine Mengen an Abwasser, das für eine Biogasanlage genutzt werden könnte, sowie ein Fettsäure, der als Dünger vermarktet sei. „Der gewonnene Treibstoff hat 88 Prozent des Energiegehalts, den das Ausgangsmaterial aufweist“, sagt Willner. Damit schlage man mit dem künstlichen Kraftstoff im Hinblick auf die Energieeffizienz leichter dem herkömmlichen Antriebe. „Auf Basis eines Verbrauchs von fünf Liter Diesel auf 100 Kilometern könnten wir auf fünf Kilowattstunden für die 100 Kilometer Fabrikreste, ein Elektroauto benötigt aber bis fünfmal mehr Energie.“

Laut Nexoil liegen von interessierten Entsorgungsfirmen bisher Absichtserklärungen mit einem Umsatzpotenzial von 80 Millionen Euro vor, der europäische Markt für Anlagen dieser Art werde aber auf ein Volumen von etwa 30 Milliarden Euro geschätzt. In diesem Markt beabsichtigen zu konkurrieren, sind die Firma deutlich zwischen anderen Akteuren hat Nexoil eine fünf Beschlüßigte, James Kowarsch sein. Bis 15 Personen aus Willners Forschungsgruppe. Dunker plant zudem, sich den Hochlauf im Jahr 2023 sollen es die bis 50 Mitarbeiter sein.“

Feierliche Einweihung der READi-Pilotanlage (2 t/Woche = 100 t/Jahr) mit Politik und Presse am 02. Febr. 2023



©Katharina Jeorgakopulos: Ansprachen vor der READi-Pilotanlage im Technikum der HAW Hamburg

24

Feierliche Einweihung der READi-Pilotanlage (2 t/Woche = 100 t/Jahr) mit Politik und Presse am 02. Febr. 2023



©Katharina Jeorgakopulos: Links: Katharina Fegebank (Wissenschaftssenatorin und 2. Bürgermeisterin Hamburg),
Rechts: Oliver Grundmann (MdB und Mitglied im Umweltausschuss des Bundestages)

25

Feierliche Einweihung der READi-Pilotanlage (2 t/Woche = 100 t/Jahr) mit Politik und Presse am 02. Febr. 2023



©Louis Fraser: Von links nach rechts: Prof. Dr. Anika Sievers, Prof. Dr. Werner Beba, Katharina Fegebank, Oliver Grundmann, Prof. Dr.-Ing. Thomas Willner, Thorsten Dunker, Prof. Dr. Martin Holle

26

Motivation für Rheinland-Pfalz-Projekt

- Erweiterung der Ressourcen auf dem Weg zum Industriestandard
- Positive Effekte eines zielgerichteten "ingeniösen Wettbewerbs"
- Einfließen zahlreicher Detailverbesserungen in die 2. Pilotanlage
- Partizipation der TH Bingen am Innovationspotential Hydrierprozess
- Generierung eines u.U. großen Wertschöpfungspotentials in Rheinland-Pfalz (F&E/Technologie als Wirtschaftsmotor)
- Große Motivation seitens des HAW-Entwicklungsteams und Nexxoil, das READi-Verfahren zum Bestandteil eines beispielgebenden Projekts zur Energiesicherheit werden zu lassen

Möglichkeit einer Teilförderung durch BioBall-Programm

Förderung durch die BMBF-Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“

Geschäftsstelle in Frankfurt: **provadis**
Hochschule



DECHEMA
Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.

- **Förderung in der Metropolregion Frankfurt am Main. Rheinland-Pfalz gehört dazu.**
- **Förderzeitraum bis Ende 2025**
- **Zweistufiges Antragsverfahren:**
 1. **Einseitige Projektskizze zur Bewertung der Idee und des Konsortiums**
 2. **Antrag mit zehnsseitiger Projektbeschreibung**
- **Förderung eher von personellem Aufwand, weniger von Investitionen:**

Investitionsförderung: Üblicherweise nur die Abschreibung über den Förderzeitraum

Förderregion BioBall

Südhessen, Unterfranken (Bayern), Rheinland-Pfalz

Neue Technologien zur Nutzung von biogenen Stoff- und Abfallströmen

- **5,7 Mio. Einwohner**
- **900 000 Tonnen Bioabfälle, davon 200 000 Tonnen Lebensmittelabfälle**
- **146 000 Tonnen Klärschlamm (Trockenmasse)**
- **125 000 Tonnen Biogas (CH₄/CO₂) aus Vergärung**
- **90 000 Tonnen Lignin aus Papierherstellung**