

# **Abschlussbericht**

Im Rahmen der Ausschreibung  
Zukunftsprogramm Wasserstoff BW (ZPH2)

Förderbaustein 5: Umsetzbarkeitsprüfung

## **Erzeugung von „Orangem Wasserstoff“ durch hydrothermale Vergasung von konditionierter Biomasse inkl. Phosphorrecycling und CO<sub>2</sub>-Abscheidung - HYDRA**

Hydrothermale Vergasung biologischer Abfallstoffe

von

Dipl.-Wirt.-Ing. Markus Gossenberger

HAGO Druck & Medien GmbH

Förderkennzeichen: **BWZPH222135**

Laufzeit: 01.01.2022 – 30.08.2022

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln  
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

20.09.2022



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

## Inhalt

1. Vorwort .....	3
2. Zielsetzung der Umsetzbarkeitsprüfung .....	5
3. Stand der Wissenschaft/Technik .....	5
4. Systemische Ziele.....	13
5. Vorgehensweise zur Lösungsfindung .....	14
6. Kurze Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten .....	15
7. Wesentliche Erkenntnisse bzw. Ergebnisse .....	16
8. Planmodellierung Gesamtsystem (Stoff-Flüsse, Schnittstellen) .....	25
9. Überprüfung der verwaltungs- und baurechtlichen Durchführbarkeit.....	26
10. Projektansatz aus der Umsetzbarkeitsprüfung (Ausblick/Verwertung) .....	29
11. Anhang Kosten-Leistungsrechnung (detailliert) .....	31

Die vorliegende Umsetzbarkeitsprüfung beschäftigt sich mit der Überprüfung eines systemischen Ansatzes zur Anwendung der hydrothermalen Vergasung in der Verwertung mikroplastikbelasteter Bioabfälle.

Die hydrothermale Vergasung ist ein sehr effizientes Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff, das ohne den Einsatz von Fremdenergie auskommt und in der Biomasse enthaltenes Mikroplastik auflöst und so den biologischen Kreisläufen entziehen kann. Durch Zellaufschluss der Biomasse mit Hochleistungs-Ultraschall und Phosphor- und Stickstoff-Fällung und -Abscheidung kann die Effizienz der hydrothermalen Vergasung gesteigert werden.

Die Erkenntnisse dieser Umsetzbarkeitsprüfung zeigen den Stand der Technik und modellieren in der Zukunftsvision „HYDRA-Projekt“ die Chancen dieser Technologie, zeigen Wege zur Wirtschaftlichkeit und damit zur möglichen Lösung von zwei Zukunftsaufgaben:

Die Energiewende und die Vermeidung von Kunststoffeinträgen in die Böden.

## 1. Vorwort



### 1.1 Wasserstoff als Treibstoff der Energiewende

#### **Die Energiewirtschaft der Welt steht vor fundamentalen Umbrüchen.**

Es ist allgemein wissenschaftlich akzeptiert, dass die Nutzung fossiler Energie und der damit verbundene CO<sub>2</sub>-Ausstoß maßgeblich für die zu beobachtende Klimaveränderung verantwortlich ist. Beim Pariser Klimaabkommen haben am 12. Dezember 2015 195 Staaten dieser Welt beschlossen, die Begrenzung der menschengemachten globalen Erwärmung auf deutlich unter 2°C gegenüber vorindustriellen Werten zu halten. Bei der UN-Klimakonferenz in Glasgow im November 2021 wurde dieses Ziel und die Beschlüsse von 2015 nochmals bestätigt. **Ein wichtiger Faktor hierfür ist die CO<sub>2</sub>-Neutralität allen menschlichen Handelns.** Um dieses Ziel zu erreichen, kann Wasserstoff ein geeigneter Energieträger darstellen. Leicht, vielseitig nutzbar, speicherbar, von hoher Energiedichte, absolut sauber und CO<sub>2</sub>-neutral in der Verbrennung. Es gibt viele Möglichkeiten und Technologien zur Bereitstellung von molekularem Wasserstoff (H<sub>2</sub>). Als Rohstoffe können Wasser (H<sub>2</sub>O), Erdgas, andere Kohlenwasserstoffe, Biomasse sowie andere wasserstoffhaltige Verbindungen eingesetzt werden. Als Energiequelle dient chemische Energie oder von außen zugeführte elektrische, thermische oder solare Energie.

Es gibt mit der **hydrothermalen Vergasung von Biomasse** ein weiteres, sehr effizientes Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff, das ohne den Einsatz von Fremdenergie auskommt und das sehr wahrscheinlich ein Baustein zur Lösung des in 1.2 beschriebenen Umweltproblems sein könnte.

## 1.2 Mikroplastik in Biomasse sind Wertstoffe am falschen Ort

### Plastik im Biomüll wird zu Mikroplastik auf den Äckern

Im September 2021 hat das damalige Bundeskabinett die sogenannte "kleine Novelle der Bioabfallverordnung" beschlossen. Am 11. Februar 2022 hat der Bundesrat der Novelle zugestimmt. Damit ist erstmals ein Grenzwert für den Kunststoffanteil in Bioabfällen eingeführt (0,5 Gewichts-% (allg. Bioabfall) bzw. 1,0 Gewichts-% (Sammlung private Biotonne)). Zur Begründung hieß es von der damaligen Bundesumweltministerin Svenja Schulze (SPD): *"Kunststoffe im Bioabfall sind eine Gefahr für die Natur und den Menschen. Noch viel zu oft landen Lebensmittelabfälle mit Kunststoffverpackungen in der Kompostierung oder Biogasanlagen."* Dort bauen sie sich nicht ab, sondern gelangen im Dünger auf Äcker und Gemüsebeete, wo sie als Mikro- und Nanoplastik Jahrzehnte bis Jahrhunderte überdauern.

Wie eine Studie der Universität Bayreuth zeigt, ist Komposterde oft mit Mikroplastik belastet, oft mehr als die (großzügige) zulässige Menge. Die Bayreuther Wissenschaftler hatten Kompost aus 14 verschiedenen Anlagen in Deutschland untersucht. Sie fanden bis zu 895 Plastikpartikel pro Kilogramm Trockenkompost, die Teilchen waren ein bis fünf Millimeter groß. Es handelte sich dabei vor allem um Polystyrol und Polyethylen – Materialien, aus denen Verpackungen für Lebensmittel hergestellt werden. Die Experten der Universität Bayreuth gehen davon aus, dass nicht nur pflanzliche oder tierische Abfälle in der Biotonne landen, sondern auch Plastik. Abfallbetriebe beklagen dieses Problem schon länger: Jedes Jahr gelangen so große Mengen sogenannter „Störstoffe“ in den Bioabfall.

Quelle: [Studie der Universität Bayreuth zur Mikroplastik-Belastung von Komposten aus Biogasanlagen](#)

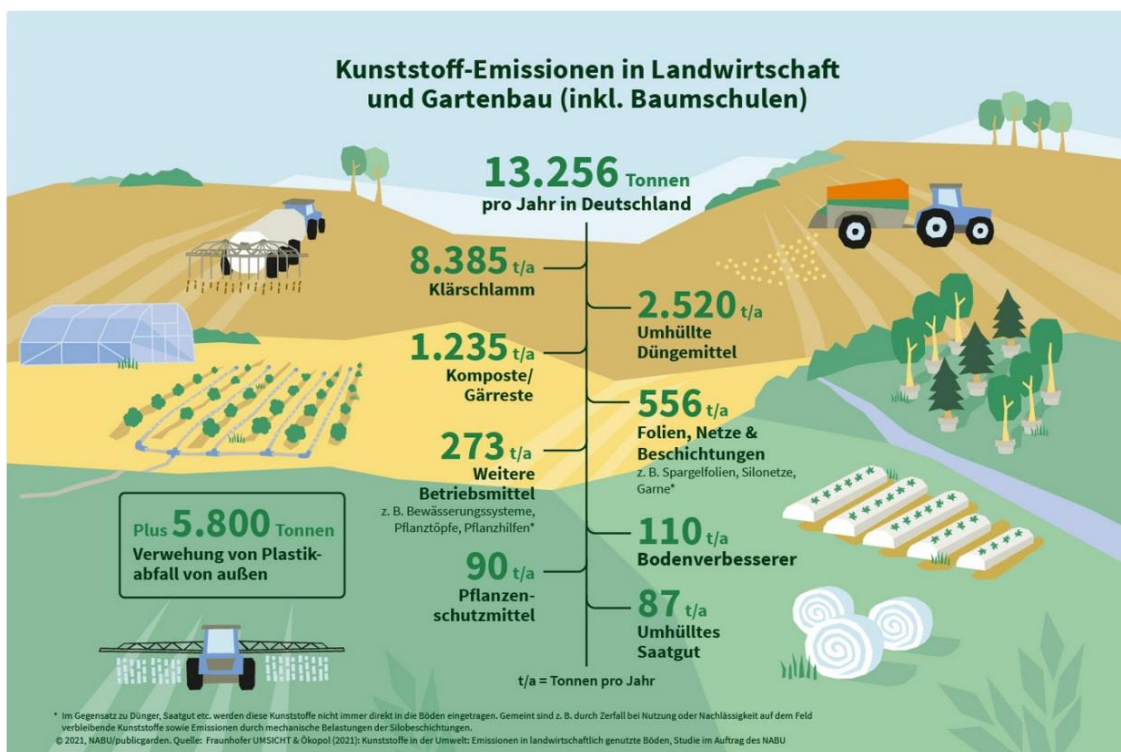


Abb. 1 [Kunststoff-Emissionen in Landwirtschaft und Gartenbau \(inkl. Baumschulen\)](#) Quelle: Nabu 2021

Auch Müllbeutel aus Bioplastik können nur die wenigsten Kompostanlagen in Deutschland verarbeiten. In den Anlagen werden solche Störstoffe mit hohem technischen Aufwand abgeschieden. Wie die Studie der Universität Bayreuth zeigt, bleibt trotzdem Plastik zurück. Welche Auswirkungen das Mikroplastik auf die Böden und die Pflanzenwelt hat, ist noch unklar.

## 2. Zielsetzung der Umsetzbarkeitsprüfung

Die von Januar bis August 2022 mittels Förderung im „Zukunftsprogramm Wasserstoff“ (ZPH2) durchgeführte Umsetzbarkeitsprüfung diente dazu, zu eruieren, ob das unter dem Arbeitstitel „HYDRA-Projekt“ zusammengefasste Konzept, das die Zusammenführung einer Reihe von Technologien zur Gewinnung von reinem Wasserstoff aus Biomasse vorsieht, technisch und wirtschaftlich realisierbar ist. Weiter wurde die Realisierbarkeit des systemischen Ansatzes des HYDRA-Projekts betrachtet.

Langfristiges Ziel des geplanten HYDRA-Projekts ist die Entwicklung und der Bau einer Pilotanlage zur

### **Gewinnung CO<sub>2</sub> neutral erzeugten Wasserstoffs und Entsorgung mikroplastik-belasteter Bioabfälle**

durch den Einsatz folgender Technologien:

- 1. Zellaufschluss von Biomasse durch Hochleistungs-Ultraschall**
- 2. Phosphor- und Stickstoff-Fällung und -Abscheidung**
- 3. Hydrothermale Vergasung von Biomasse**

Hierzu wurde im ersten Prozess-Schritt überprüft, wie der Stand der Technik der jeweiligen Technologie in Bezug auf die Einsatzfähigkeit einzuschätzen ist und welcher Forschungs- und Entwicklungsaufwand ggf. noch erforderlich ist.

## 3. Stand der Wissenschaft/Technik

### **3.1 Zellaufschluss von Biomasse durch Hochleistungs-Ultraschall**

Als „Zellaufschluss“ werden in der Biochemie Verfahren bezeichnet, bei denen Zellen zerstört werden, um an deren Inhalt zu gelangen. Dies kann durch einen verbesserten Aufschluss der Biomasse mittels einer mechanischen Zerkleinerung erfolgen. Sie wird als „Desintegration“ bezeichnet und umfasst die mechanische, thermische, chemische oder biologische Auflösung von Schlammflocken und Biomasse-Agglomeration. Bei höherem Energieeintrag kommt es außerdem zur Zerstörung der Zellhüllen und Freisetzung der intrazellulären Substanzen, welche den biologischen Abbau zusätzlich befördern (Eder, 2004).

Desintegration kann sehr effizient durch Beschallung einer Biomasse-Suspension mit Hochleistungs-Ultraschall erreicht werden. Ultraschall ist Schall mit Frequenzen jenseits des Hörschalls, also von 20 kHz bis in den Megahertzbereich. In wässrigen Medien bewirken Ultraschallwellen eine periodische Kompression (Druck) und Dehnung

(Zug, Unterdruck) des beschallten Mediums. Ultraschall hoher Intensität führt in der Phase des Unterdrucks zum Aufreißen der Wasserphase, was zur Bildung von mikroskopisch kleinen Hohlräumen in der Flüssigkeit führt. Diese Bläschen füllen sich mit Wasserdampf oder Gas. Sie wachsen in Zugphasen und schrumpfen in Druckphasen, bis sie implodieren. Dieses Ereignis wird als „Kavitation“ bezeichnet, ein Vorgang unter extremen (adiabatischen) Bedingungen. Im Mikromaßstab entstehen dabei Drücke von 500 bar und eine Temperatur von 5.000 °C. Im Frequenzbereich von 20 bis 100 kHz werden besonders große Kavitationsblasen erzeugt, die beim Zerfall extreme mechanische Scherkräfte hervorrufen. Diese durch Ultraschall erzeugten Kräfte sind in der Lage jede noch so robuste Oberfläche zu zerstören, so auch Zellwände.

Das Substrat ist damit leichter verfügbar und kann in folgenden Prozessen besser verwertet werden. Dadurch entsteht z.B. in der anaeroben Vergärung ein größerer Biogasertrag bei gleicher Einsatzmenge. Durch den Zellaufschluss verändert sich auch die Rheologie der Biomasse, sie wird dünnflüssiger, ist leichter pumpbar und es kommt seltener zu Verklumpung und Verstopfungen.

Durch Hochleistungs-Ultraschalltechnik ist es möglich, einen Aufschluss der Biomasse mit positiver Energiebilanz zu erreichen, d.h. der Mehrertrag übersteigt den Energieeinsatz feed- und verfahrensabhängig um die Faktoren 1 zu 3 bis 1 zu 17. Im Bereich der Abwasserwirtschaft wurde der positive Einfluss der Klärschlammdeintegration mit Steigerung der Biogasausbeute um bis zu 25 % nachgewiesen (Faust, 1994).

Der Hochleistungs-Ultraschall-Zellaufschluss wird seit Jahren in Biogasanlagen und der Klärschlamm-Bearbeitung eingesetzt und kann als ausgereift bezeichnet werden. Systeme dieser Art kann man kaufen. Die ULTRAWAVES - Wasser- und Umwelt-technologien GmbH (unterstützender Partner des geplanten HYDRA-Projekts) bietet Systeme unterschiedlicher Leistungskategorien an.

Quelle: [Ultrawaves – Aufschluss von Biomasse durch Hochleistungultraschall](#)

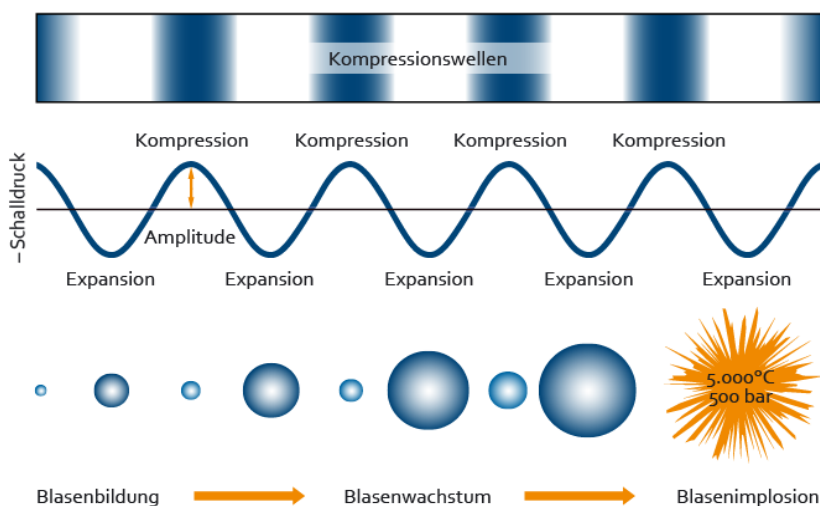


Abb. 2 Schematische Darstellung von akustisch erzeugter Kavitation

Auf die im HYDRA-Projekt vorgesehene hydrothermale Vergasung wirkt sich der Zellaufschluss effizienzsteigernd aus. Im Rahmen dieser Umsetzbarkeitsprüfung

wurde in einer Versuchsreihe am IKFT am KIT mit dem Laborreaktor „LENA“ nachgewiesen, dass Biomasse, die zuvor einem Hochleistungsultraschall-Zellaufschluss unterzogen wurde im Vergasungsversuch eine um über 30 % höhere Energieausbeute erbrachte (siehe Kapitel 7.2.2 Seite 17).

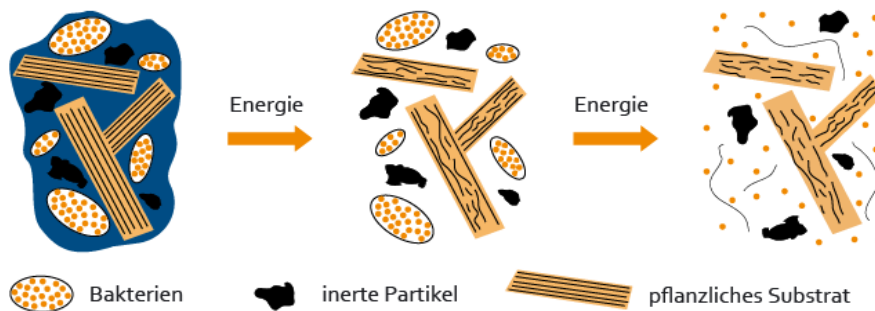


Abb. 3. Zellaufschluss von Biomasse

### 3.2 Phosphor- und Stickstoff-Fällung und -Abscheidung

Das Element Phosphor ist als Baustein der DNS und Bestandteil von ATP Voraussetzung für jegliches Leben auf der Erde und nicht durch andere Elemente substituierbar. Die kontinentalen Vorkommen reichen nur noch für wenige Jahrzehnte; Schätzungen aus den 2000er Jahren variieren zwischen 50 und 130 Jahren. Der Gesetzgeber hat dieses Thema aufgegriffen und so schreibt z.B. die Klärschlammverordnung vom 27.09.2017 die Rückgewinnung von Phosphor für Kläranlagenbetreiber ab 2029 (ab 100.000 EW) zwingend vor. Die Trockenmasse von terrestrischen Pflanzen enthält 0,15 bis 0,50 Gewichts-% Phosphor. Ein weiterer wichtiger Baustein des Lebens ist Stickstoff, dessen Anteil in der Trockensubstanz von Biomasse bei 2–6 % liegt. Beide Elemente, Phosphor und Stickstoff wirken sich auf die Prozessstabilität der hydrothermalen Vergasung negativ aus.

Poll Umwelt- und Verfahrenstechnik GmbH (unterstützender Partner des geplanten HYDRA-Projekts) entwickelt ein Verfahren Phosphor- und Stickstoff-Verbindungen durch die Beifügung von Magnesiumoxid (MgO) auszufällen. Hierzu wird Biomasse, die nach der Desintegration einen Trockenmasse Anteil von ca. 10 % aufweist durch das Einpressen von CO<sub>2</sub> angesäuert. Danach erfolgt eine Fest-Flüssig-Separation (Druckfiltration). Bei entsprechender pH-Wert-Einstellung wird zusätzlich zum Phosphor auch Stickstoff in die Flüssigphase eingebunden. Anschließend erfolgt die chemische Fällung z.B. unter Zugabe von Magnesiumoxid als Magnesiumammoniumphosphat (MgNH<sub>4</sub>PO<sub>4</sub> \* 6 H<sub>2</sub>O). Das Fällungsprodukt wird nachfolgend aus der wässrigen Phase durch Filtrierung abgeschieden und kann für die Düngermittelherstellung eingesetzt werden.

Das Verfahren, befindet sich im Augenblick in der Entwicklung. 06-2022 ergab sich, dass Ablauf und Technologie nochmals angepasst werden müssen. Es kann derzeit

noch nicht als einsetzbar bezeichnet werden. Die voraussichtliche Verfügbarkeit gibt Poll Umwelt- und Verfahrenstechnik GmbH mit 06-2023 an.

Der Ansatz der Poll Umwelt- und Verfahrenstechnik GmbH hat im Vergleich zu anderen Verfahren den Vorteil, dass für den Verfahrensschritt Ansäuerung in der hydrothermalen Vergasung entstehendes CO<sub>2</sub> eingesetzt werden kann, das nach der Druckentspannung wieder vollständig aus der Biomasse entweicht und dass außer Magnesiumoxid (MgO), das bei der Ausfällung vollständig abgeschieden wird, voraussichtlich keine weiteren Katalysatoren eingesetzt werden müssen, die den nachfolgenden Prozess der hydrothermalen Vergasung negativ beeinflussen können.

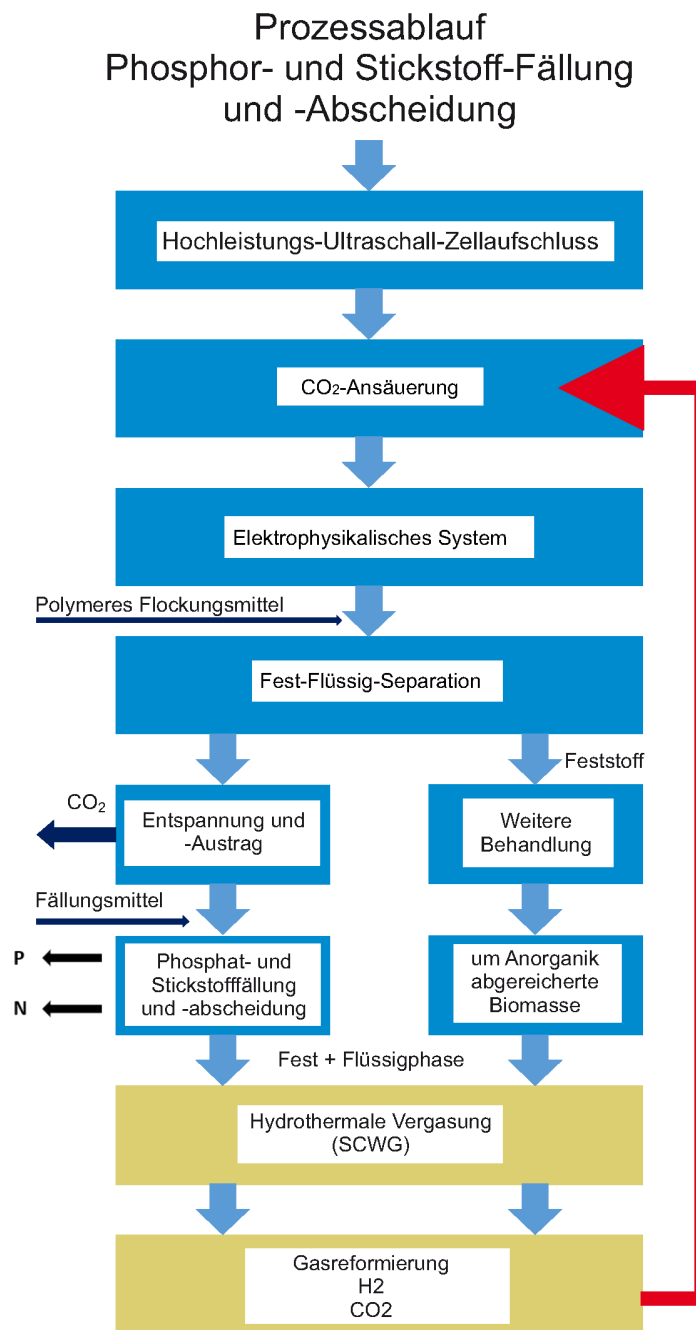


Abb. 4. Prozess-Schema der Phosphor- und Stickstoff-Fällung und -Abscheidung



### 3.3 Hydrothermale Vergasung (Supercritical Water Gasification – SCWG)

Bei hydrothermalen Konversionsprozessen kann Biomasse ohne vorherige Trocknung umgewandelt werden, wobei flüssiges Wasser bei hohen Temperaturen und erhöhtem Druck als Reaktionsmedium eingesetzt wird.

Die Vergasung unter den Bedingungen des überkritischen Wassers ist daher ein vielversprechendes Verfahren zur effizienten Umsetzung von Biomasse mit hohem Wassergehalt. Bei der hydrothermalen Vergasung werden die speziellen Eigenschaften von überkritischem Wasser ( $T > 374 \text{ °C}$ ,  $p > 221 \text{ bar}$ ) genutzt um aus Abfall-Biomasse ein energiereiches Gasmisch zu erzeugen. Mit Erreichen des überkritischen Zustands von Wasser ist eine starke Abnahme der Viskosität, Dichte und der Dielektrizitätskonstante zu beobachten. Überkritisches Wasser besitzt daher das Verhalten eines unpolaren Lösungsmittels. Die Vergasung mit überkritischem Wasser sowie andere Arten der Vergasung wurden für Biomasse eingehend untersucht. Diese Studien ermöglichten es, die Grundlagen für das Verständnis der SCWG von Kunststoffen zu schaffen. Hauptbestandteile des SCWG-Produktgases sind  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  und  $\text{CO}_2$ .

[Hydrothermale Vergasung am IKFT Institut für Katalyseforschung und -technologie des KIT](#)

[Gasification of Biomass in Supercritical Water, Challenges for the Process Design](#)

[A Critical Review of SCWG in the Context of Available Gasification Technologies for Plastic Waste](#)

[Comparison and synergistic effect analysis on supercritical water gasification of waste thermoplastic plastics based on orthogonal experiments](#)

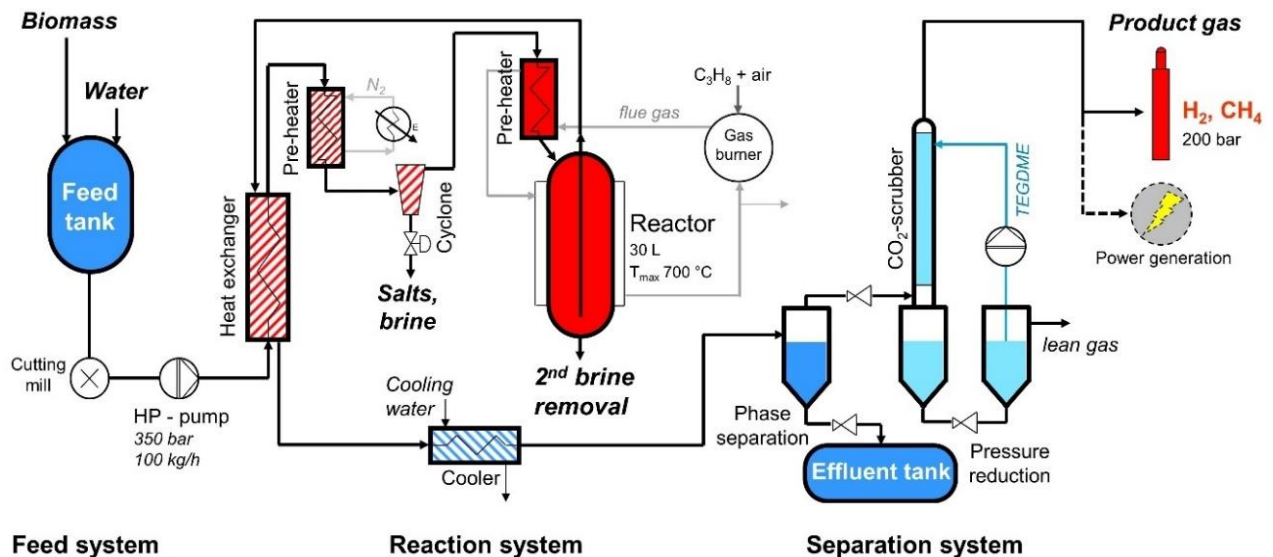


Abb. 5 Vereinfachtes Verfahrensschema der SCWG-Pilotanlage „VERENA“ am KIT (IKFT)

#### 3.3.1 Vor- und Nachteile der SCWG

Die Vergasung mit überkritischem Wasser hat zahlreiche Vorteile gegenüber herkömmlicher Vergasung von Biomasse:

- Hydrothermale Vergasung von Biomasse ist ab einer Konzentration von **2 Gewichts-% organisch gebundenem Kohlenstoff energetisch autark**.
- Überkritisches Wasser ist ein aktiver Reaktant, der zu einer **hohen Wasserstoffausbeute** führt.

- Bei der SCWG **entfällt der Schritt der Trocknung des Ausgangsmaterials**. Dies führt zu einer höheren Energieeffizienz und damit zu erheblichen wirtschaftlichen Einsparungen.
- Der **hohe Austrittsdruck der Produktgase** minimiert den Aufwand der Nachkomprimierung.
- Die **Reaktionstemperatur ist viel niedriger** als bei herkömmlichen Vergasungs- und Pyrolyseverfahren wodurch die Bildung von Teer und Koks verhindert wird.
- **Die Produktgase sind sehr sauber** und erlauben die direkte Vermarktung.
- Die SCWG **löst Mikroplastik-Anteile in der Biomasse auf\***

\* Bis zu 1 % Gewichts%-Anteil an der Pilotanlage „Verena“ am IFKT bewiesen. Ob es in der hydrothermalen Vergasung zur energetischen Verwertung von Kunststoffen kommt, wird in der Wissenschaft diskutiert, bedarf aber noch einer empirischen Überprüfung.

Gleichzeitig hat diese Technik aber auch Nachteile:

- Dazu gehören vor allem **die hohen Investitionskosten**, da z.B. das Reaktor-gefäß aus hochfestem, korrosions- und abrasionsbeständigem Material hergestellt werden muss (Legierung 617 Nickel-Chrom-Kobalt-Molybdän).
- Weiter hat die SCWG eine **geringe Flexibilität bei unterschiedlicher Feed-Zusammensetzung**. Da die Zusammensetzung von Biomasse aus Haus- und Gewerbesammlungen sehr diversifiziert sein kann, ist dies eine Herausforderung an die Feed-Vorbereitung/Homogenisierung.

### 3.3.2 Hydrothermale Vergasung von Kunststoff

Eine interessante Anwendung ist die Verwertung von Mikroplastik in der Biomasse. Wie beschrieben, wirkt Wasser unter überkritischen Bedingungen als unpolares Lösungsmittel, das die Probleme der schlechten Wärmeübertragung und der hohen Viskosität von Kunststoffen durch Auflösen der Kunststofffragmente lösen kann. Darüber hinaus wirkt Wasser auch als Wasserstoffspender, der das Cracken und die Vergasung von Kunststoffen unterstützt. Aus diesen Gründen kann diese Technologie für die Vergasung verschiedener Arten von Kunststoffen eingesetzt werden, z. B. für vernetztes Polyethylen, Kunststoffe mit Flammschutzmitteln oder Verunreinigungen.

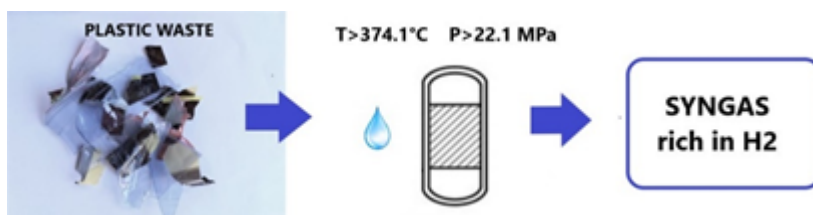


Abbildung 6. Grafisches Schema der überkritischen Wasservergasung (SCWG) von Kunststoffabfällen.

Derzeit gibt es nur wenige Studien über die Merkmale der Vergasung von Kunststoffen mit überkritischem Wasser und darüber wie Kunststoffe mit überkritischem Wasser reagieren. Eine sehr aktive Forschungsgruppe zu dieser Technologie ist die von **Bai Bin an der Xi'an Jiaotong University (China)**. Sie veröffentlichten 2018 die erste Arbeit über SCWG. In dieser Arbeit untersuchten sie die SCWG von hochschlagfestem Polystyrol (HIPS) bei einer Reaktionstemperatur im Bereich von 500-800 °C, einer Reaktionszeit von 1-60 min, einer Einsatzkonzentration von 2-10 Gew.-% und einem Reaktionsdruck von 22-25 MPa. Die Erhöhung einiger Parameter wie Temperatur und Reaktionszeit und die Verringerung anderer wie die Konzentration des Einsatzmaterials erhöhen die Vergasungseffizienz des Kunststoffs. Die in der Studie ermittelten optimalen Bedingungen sind: Eine Temperatur von 800 °C, eine Reaktionszeit von 60 Minuten, ein Reaktionsdruck von 23 MPa und eine Einsatzstoffkonzentration von 3 Gewichtsprozent. Unter diesen Bedingungen erreicht die Kohlenstoff-Umwandlungsrate des Kunststoffs 94,48 Gewichtsprozent. Diese Gruppe hat zwischen 2018 und 2020 fünf Artikel zu diesem Thema veröffentlicht.

Quelle: [Hydrogen/Methane Production from Supercritical Water Gasification of Lignite Coal with Plastic Waste Blends](#)

Ebenso veröffentlichte eine Forschergruppe an der Universität Florenz (**Benedetta Ciuffi, David Chiaramonti, Andrea Maria Rizzo, Marco Frediani, Luca Rosi**) im September 2020 den Aufsatz: *A Critical Review of SCWG in the Context of Available Gasification Technologies for Plastic Waste*. Auch diese Arbeit spricht der SCWG ein großes Potential zu. Hier ein Auszug:

*End-of-Life-Verpackungen sind heutzutage aufgrund ihrer kurzen Nutzungsdauer, der geringen biologischen Abbaubarkeit und des großen Volumens das sie einnehmen, eines der größten Umweltprobleme. In diesem Zusammenhang ist die Vergasung eine der vielversprechendsten chemischen Recyclingtechniken. SCWG hat zahlreiche Vorteile, darunter die Verhinderung der Teer- und Koksbildung und kann zur Entfernung von Mikroplastik aus der Meeresumwelt eingesetzt werden. Bei der Co-Vergasung von Kunststoffen mit Kohle oder Biomasse werden Synergieeffekte zwischen den Rohstoffen beobachtet, die die Leistung des Prozesses verbessern und es ermöglichen, höhere Gaserträge und ein Synthesegas mit einem hohen Energiegehalt zu erhalten.*

Quelle: [A Critical Review of SCWG in the Context of Available Gasification Technologies for Plastic Waste](#)

### 3.3.3 Hydrothermale im Vergleich zu anaeroben Vergärung

Die hydrothermale Vergasung schließt inerte (biologisch nicht abbaubare) Bestandteile der Biomasse auf und nutzt die Energie der gesamten Organik der Biomasse. Bei Laboruntersuchungen mit stark verdünnter pflanzlicher Biomasse bei 650 °C wurden Kohlenstoff-Umsätze bis über 95 % erreicht.

Quelle: Boukis, Gralla, 2004

### **Energieertrag Biogastechnik**

Biomasse-Einsatz: Biertreber 1.000 kg/h mit 9% TS (90% GV)

Ertrag = 25,3 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/h = 17,07 kg/h Heizwert Methan 13,9 kWh/kg = 251,2 kWh/h\*

### **Energieertrag Hydrothermale Vergasung**

Biomasse-Einsatz: Biertreber 1.000 kg/h mit 9% TS (90% GV)

Ertrag = 108,9 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/h, = 12,2 kg/h Heizwert H<sub>2</sub> 33,3 kWh/kg = 406,2 kWh/h\*

\* abzüglich Eigenenergiebedarf (bei der für das HYDRA-Projekt vorgesehenen Anlagengröße noch nicht exakt abschätzbar, da eine Anlage dieser Größenordnung noch nie gebaut wurde. Voraussichtlich 100 bis 120 kW im Vergleich zu ca. 10 kW in der anaeroben Vergärung).

Durch den geringeren Platzbedarf und die kurze Verweildauer des Feeds (5 min. im Vergleich von bis zu 150 Tagen) bietet die SCWG noch weitere Vorteile im Vergleich zur anaeroben Vergärung. Weiter scheidet die SCWG direkt Wasserstoff in hoher Reinheit aus. Allerdings gibt es auch Nachteile, wie die höheren Investitionskosten und die geringere Flexibilität bei unterschiedlicher Feed-Zusammensetzung.

Als Vorteil für die anaerobe Vergärung kann angesehen werden, dass der Prozess beim Einsatz mikroplastikfreier Biomasse kompostierbare Gärreste erzeugt aus denen hochwertige Bodenverbesserer gewonnen werden können.

## **3.4 Zusammenfassung der im Rahmen der Studie eruierten Vorteile der SCWG**

Die hydrothermale Vergasung von Biomasse:

- erzeugt als Produktgase H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> in hoher Reinheit, die nach der Gastrennung in die Vermarktung geleitet werden können.
- hat einen hohen Austrittsdruck der Produktgase und dadurch keinen bzw. wenig Energieaufwand für die Nachkomprimierung.
- ist energetisch autark und braucht keine Fremdenergie.  
Hydrothermale Vergasung von Biomasse ist ab einer Konzentration von 2 Gewichts-% organisch gebundenem Kohlenstoff energetisch autark. D.h. für die H<sub>2</sub>-Erzeugung wird keine bereits nutzbare Energie, wie z.B. (grüner) Strom eingesetzt.
- verwertet regionale Abfall-Biomasse und verwandelt sie in saubere Energie.  
Das System eignet für kleinere dezentrale Anlagen, die regional Biomasse aus Haus- und Gewerbesammlungen (Biotonne) verwerten können. Das deutschlandweite Volumen (4,59 Mio t, 2019) stellt ausreichend Feed für 300 Anlagen.
- hat eine über 20 % höhere Energieausbeute als die anaerobe Vergärung.  
Die hydrothermale Vergasung schließt auch inerte (biologisch nicht abbaubare) Bestandteile der Biomasse auf und nutzt die Energie der gesamten Organik der Biomasse. Die Prozesskette ist gasdicht und daher ohne Verluste wie z.B. Biogasanlagen.
- kann Mikroplastik in der Biomasse auflösen\*, und so Biomasse mit Kunststoffbelastung, für die es bislang keinen wirtschaftlichen Verwertungsweg gibt, unschädlich machen.  
\* in weiterer Forschung ist zu untersuchen, ob die Kunststoffanteile energetisch verwertet werden können.
- hat eine bessere Raum-Zeit Ausbeute als anaerobe Vergärung.  
Geringer Platzbedarf des Systems, kurze Prozessdauer (< 5 min. im Vergleich von bis zu 150 Tagen in Biogasanlagen).

Somit kann die hydrothermale Vergasung für die Lösung von zwei wichtigen Aufgabenstellungen der Zukunft eingesetzt werden:

- 1. Gewinnung von CO<sub>2</sub>-neutral erzeugtem Wasserstoff und**
- 2. Entsorgung mikroplastik-belasteter Bioabfälle\***



#### 4. Systemische Ziele

Das geplante HYDRA-Projekt verbindet verschiedene Nutzen und Ertragsmöglichkeiten um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen um der SCWG zum Durchbruch zu verhelfen.

1. **Wasserstoffgewinnung direkt aus Biomasse.**
2. **Recycling von Phosphor- und Stickstoff-Anteilen** aus der Biomasse.
3. **Lokale/Regionale Bioabfallentsorgung** (Verwertung von kunststoffbelasteten Bioabfällen, Sammelradius max. 20 km. Haus- und Gewerbeabfälle – Biotonne).
4. **Betrieb eines Nahwärmenetzes** bzw. Nutzung der Abwärme zur Heizung des angeschlossenen Bürogebäudes und umliegender Gebäude.
5. **Kompaktheit:** Kein Flächenverbrauch, da die Anlage im Untergeschoss eines multifunktional nutzbaren Gebäudes integriert wird. Überirdisch befinden sich Be- und Entladeeinheit und Produktgasspeicher (siehe Zeichnung Seite 25, der SCWG-Reaktor muss aufgrund seiner verfahrensbedingten Bauform (Höhe 800 cm) über mehrere Etagen geführt werden). Die darüber liegenden Etagen werden als Gewerbe- und Büroräume genutzt.
6. **Vermarktung der Produktgase H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>** (H<sub>2</sub> wird direkt vor Ort vertrieben, CO<sub>2</sub> wird in geringen Teilen der Phosphor-Rückgewinnung zugeführt. Restanteile werden als Grundstoff für die chemische Industrie vermarktet).
7. **Gefährdungs- und Logistikminimierung** durch unmittelbare Vermarktung des Produktgases Wasserstoff an der dem geplanten Standort angrenzenden Tankstelle (Angebot als gasförmiger Wasserstoff (GH<sub>2</sub>) 350 bar).

## 5. Vorgehensweise zur Lösungsfindung

Zur Lösungsfindung diente der nachfolgende Arbeitsplan. Die Abarbeitung der einzelnen Schritte erfolgte in Zusammenarbeit und Abstimmung mit den Partnern, durch Literaturrecherche, durch Datenerhebung an der Versuchsanlage Wittmund (Biogas Wittmund GmbH & Co.), am IKFT des KIT (Versuchsreihe am Laborreaktor LENA) und am Eigenbetrieb Umwelttechnik der Gemeinschaftskläranlage Baden-Baden – Sinzheim (mechanische Stoffbehandlung/Aufbereitung) sowie Recherche bei verschiedenen potentiellen Partnern (Technologie und Ökonomie).

1. Analyse physikalischer und chemischer Zusammenhänge des Gesamtsystems.
2. Datenerhebung Feed-Vorbehandlung/Volumenströme an Versuchsanlage Wittmund (Biogas Wittmund GmbH & Co. + FB Chemietechnik/Umwelttechnik Hochschule Emden/Leer) Prozessanalyse der Zell-Desintegration durch Hochleistungsultraschall in Verbindung mit Phosphor-/Stickstoff-Fällung.
3. Datenerhebung an der SCWG Forschungsanlage des IKFT am KIT.
4. Planmodellierung Gesamtsystem (Raumvolumen, Stoff-Flüsse, Schnittstellen).
5. Überprüfung der physikalisch/chemischen Durchführbarkeit des erarbeiteten Konzeptes in Abstimmung mit Partnern. Versuchsreihe am IKFT.
6. Analyse potentieller Bioabfallquellen – Verfügbarkeitsprüfung.
7. Planmodellierung mechanische Stoffbehandlung/Aufbereitung.  
Datenerhebung an Eigenbetrieb Umwelttechnik der Gemeinschaftskläranlage Baden-Baden – Sinzheim
8. Planmodellierung Speicherung der Nutzgase. Eruierung Absatzwege.
9. Stoffstrom-Analyse Gesamtsystem.
10. Überprüfung der verwaltungs- und baurechtlichen Durchführbarkeit.
11. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Pilot-Anlage + Folgesysteme).
12. Schlussbetrachtung/Chancenbeurteilung/Ziele

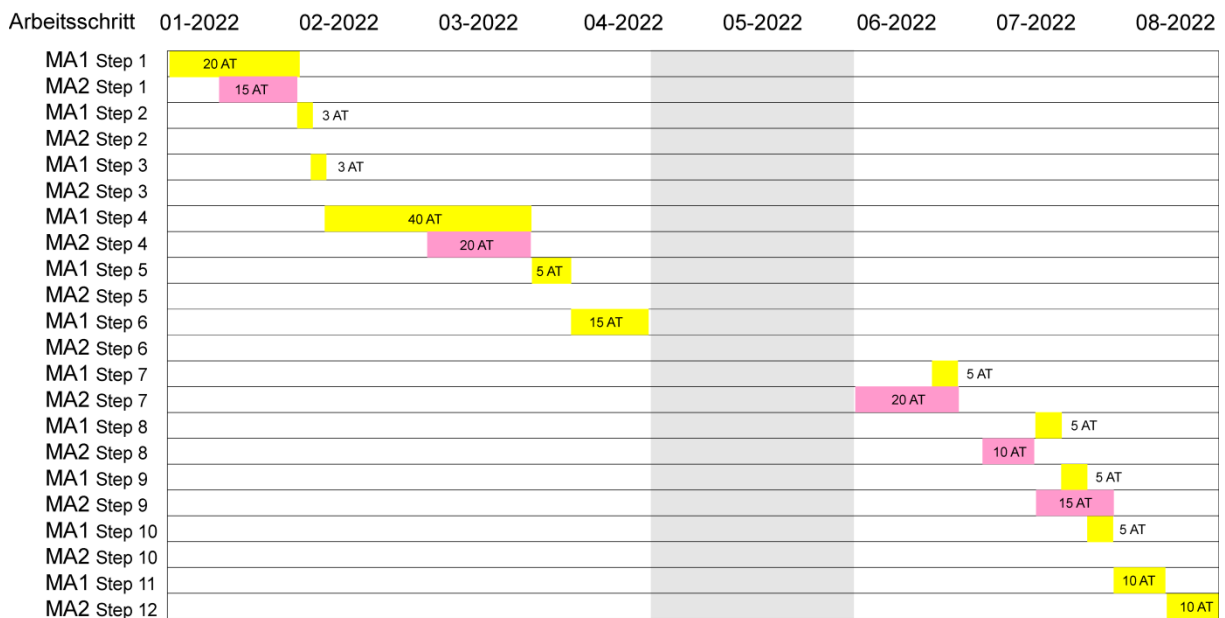
Das geplante HYDRA-Projekt hat das Ziel, der Technologie der hydrothermalen Vergasung (SCWG) zum Durchbruch zu verhelfen. An der Pilot-Anlage VERENA und dem Labor-Reaktor LENA am IKFT wird die Technologie seit Jahren erforscht um damit verfahrenstechnische Fragestellungen der Wasserstofferzeugung aus nasser Biomasse, wie Druckeinspeisung, Auslegung von Wärmeübertragern. CO<sub>2</sub>-Abtrennung etc. untersuchen zu können [BOU2002a, BOU2006]. In den bisherigen Experimenten wurden neben Methanol und Ethanol, ein Pyrolyse-Öl, Holzessig, Biertreber, Grünschnitt sowie Maissilage mit einem Trockenmasseanteil bis zu 15 % eingesetzt. Aufgrund der umfangreichen Forschung kann die SCWG als anwendungsreif bezeichnet werden. Bisher war die Anwendung jedoch nicht wirtschaftlich. Mit der

Modellierung des HYDRA-Projekts und dieser Umsetzbarkeitsprüfung soll in einer Modellrechnung bewiesen werden, dass die SCWG, eingebettet in ein System verschiedener ineinandergreifender Technologien eine wirtschaftliche Anwendung finden kann. Ziel dieser Umsetzbarkeitsprüfung war nicht die detaillierte Überprüfung der einzelnen Technologien, sondern die Modellierung des Gesamtsystems und die Erueirung der gegenseitigen positiven Auswirkungen.

## 6. Kurze Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten

Zeitraum der Förderung dieser Umsetzbarkeitsprüfung war vom 01.02.2022 bis zum 30.08.2022. Die Arbeit begann mit der Strukturierung der Aufgaben und der Recherche und Kontaktaufnahme mit potentiellen Informationsquellen. Literaturrecherche zu wissenschaftlichen Arbeiten über den Einsatz von SCWG in der Vergasung von Kunststoffen. Wesentliche Elemente der Umsetzbarkeitsprüfung waren Besuche verschiedener Anlagen zur Datenerhebung. Die daraus erfolgte Modellierung der einzelnen Komponenten des Gesamtsystems basiert auf Analysen im Einsatz befindlicher Anwendungen.

### Umsetzbarkeitsprüfung/Arbeitsplan HYDRA-Projekt 01-2022 – 08-2022



(AT = Planarbeitstag) MA1 Gesamt: 126 AT • MA2 Gesamt: 80 AT

#### 22. – 23.02.2022

Datenerhebung Feed-Vorbehandlung/Volumenströme an Versuchsanlage Wittmund (Biogas Wittmund GmbH & Co. + FB Chemietechnik/Umwelttechnik Hochschule Em-den/Leer). Prozessanalyse Zell-Desintegration durch Hochleistungsultraschall in Verbindung Phosphor- und Stickstoff-Fällung und -Abscheidung.

24.02.2022

Datenerhebung und Versuchsmodellierung an der SCWG Forschungsanlage des IKFT am KIT. Besprechung Laborversuche hydrothermale Vergasung von drei unterschiedlich vorbehandelter Feeds (Dr. Nikolaos Boukis (IKFT)).

20. – 22.07.2022

Datenerhebung an Eigenbetrieb Umwelttechnik der Gemeinschaftskläranlage Baden-Baden (Beispiel für die Bearbeitung von Bioabfällen aus Haussammlung). Daraus abgeleitet: Planmodellierung mechanische Stoffbehandlung/Aufbereitung.

## 7. Wesentliche Erkenntnisse bzw. Ergebnisse

### 7.1 Hydrothermale Vergasung – eine Zukunftstechnologie der Energiewende?

7.1.1 Die SCWG ist ab einer Konzentration von 2 Gew.% organisch gebundenem Kohlenstoff energetisch autark. D.h. für die H<sub>2</sub>-Erzeugung muss keine bereits nutzbare Energie, wie z.B. (grüner) Strom eingesetzt werden (BOU2004).

7.1.2 Die hydrothermale Vergasung (SCWG) ist ein effizientes Verfahren zur direkten Herstellung von Wasserstoff aus Abfall-Biomasse mit einem ca. 17-25 % höheren Wirkungsgrad als anaerobe Vergärung.

7.1.3 Die SCWG löst in der Biomasse enthaltene Mikroplastik-Anteile auf und kann so die Belastung der Umwelt mit diesen Schadstoffen reduzieren. Dadurch eignet sich das Verfahren vor allem für mit Kunststoff belastete Biomasse.

7.1.4 Es wird an verschiedenen wissenschaftlichen Einrichtungen diskutiert, ob durch SCWG eine energetische Verwertung von Mikroplastik möglich ist. Der experimentelle Nachweis muss in Laborversuchen erbracht werden.

7.1.5 Die Produktgase der SCWG sind sehr sauber und direkt vermarktbar.

7.1.6 Die SCWG ist besonders für die Anwendung in kleinen und mittleren Systemen geeignet und ermöglicht dadurch den Aufbau einer regionalen Entsorgungsstruktur mit kurzen Transportwegen. Ein System der Kapazität 2000 kg/h benötigt einen Raumbedarf < 1800 m<sup>3</sup> und kann im Untergeschoss eines Gebäudes untergebracht werden. Geringer Bodenverbrauch, geringe Wahrnehmung.

7.1.7 Athanasios Vadarlis, Doktorand am IKFT arbeitet seit 01-2022 an einem Verfahren zur Reformierung der Produktgase der hydrothermalen Vergasung. Ziel ist, den H<sub>2</sub>-Ertrag gemäß der Beispieltabelle zu steigern.



	Produkt [kg/h], nach SCWG	Produkt [kg/h], nach Reforming	Produkt in [m <sup>3</sup> /h]
H <sub>2</sub>	<b>3,5</b>	<b>12,2</b>	137,1
CH <sub>4</sub>	11,5	0,0	0,1
CO <sub>2</sub>	101,7	151,8	77,3
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6,5	0,0	0,0

Abb. 7 Steigerung des Wasserstoff-Ertrags durch Gasreformierung  
Beispielrechnung. Basis: Ethanol-Feed 1000 kg/h, 9 Gewichts-% - Promotionsarbeit voraussichtlicher Abschluss 2023

## 7.2 Effizienzsteigerung der SCWG durch Feed-Vorbehandlung

7.2.1 Im Februar/März 2022 wurde am IKFT am KIT eine Vergasungsreihe mit drei Feeds durchgeführt. Grundmaterial war Biomasse der Biogas Wittmund GmbH (TM 3,9 %, 50 % Rindergülle, 50 % Bioabfälle nach mechanischer Abscheidung grober Partikel und Fasern (Feed für anaerobe Vergärung)

1. Biomasse unbehandelt (Referenz)
2. Biomasse nach Hochleistungs-Ultraschallbehandlung (3 kWh/m<sup>3</sup>)
3. Biomasse nach Hochleistungs-Ultraschallbehandlung und nach Phosphor- und Stickstoff-Fällung und -Abscheidung (Poll-Methode)

Ziel war zu eruieren, ob und in welchem Maß die Feed-Vorbehandlung (Zellaufschluss, Phosphor- und Stickstoff-Fällung und -Abscheidung) Stabilität und Effizienz des Prozesses beeinflussen.

Die Versuchsreihe führte zu folgenden Ergebnissen:

7.2.2 Durch Zellaufschluss durch Hochleistungs-Ultraschall kann der Energieertrag der SCWG gesteigert werden. **Der Vergasungsversuch mit dem Laborreaktor „LENA“ am IKFT ergab eine Ertragssteigerung > 30 %** (KIT 35047880).

7.2.3 Durch Phosphor- und Stickstoff-Fällung und -Abscheidung kann die Prozessstabilität der SCWG gesteigert werden (Annahme IKFT). Das von einem der Partner entwickelte Verfahren erwies sich allerdings noch als instabil. Weiterer Entwicklungsaufwand erforderlich. Vergasungsversuch 3 war nicht erfolgreich. Wiederholung erst nach Ausreifung des Verfahrens möglich.

## 7.3 Aufkommen geeigneter Bioabfälle in Deutschland

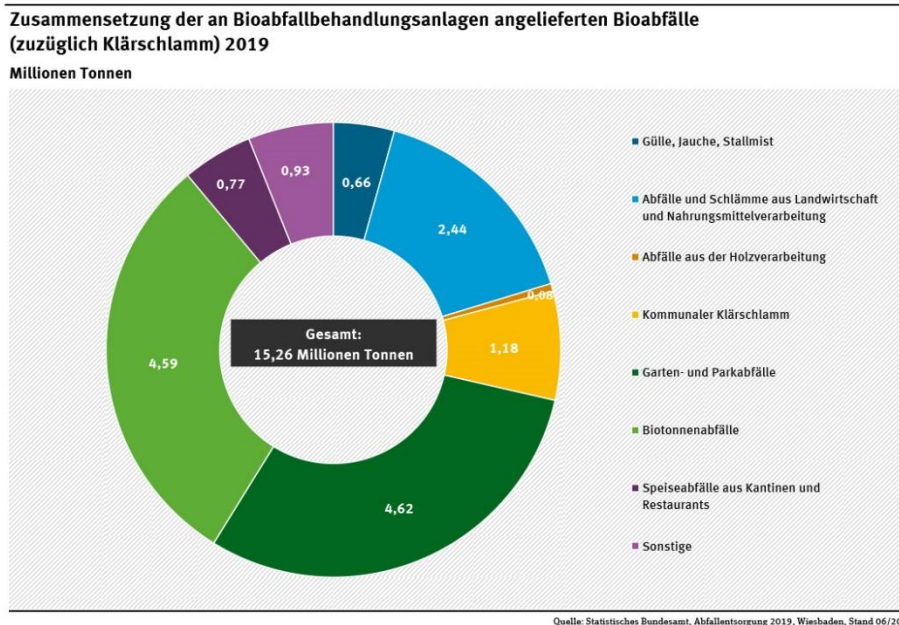


Abb. 8 [Zusammensetzung der an Bioabfallbehandlungsanlagen angelieferten Bioabfälle \(zuzgl. Klärschlamm\) 2019](#)

7.3.1 Im Jahr 2019 wurden in Deutschland etwa 15,3 Mio. t an getrennt gesammelten biologisch abbaubaren Abfällen verwertet (Statistisches Bundesamt 2021). Das entspricht 186 Kilogramm pro Einwohner und Jahr. Gegenüber 2018 ist die Menge leicht gestiegen. Zugenommen (> 16 % seit 2012) haben vor allem die Abfälle aus der Biotonne (4,59 Mio. t) und die Speiseabfälle aus Kantinen und Großküchen (0,77 Mio. t).

Die getrennte Erfassung von Bioabfällen ist eine wesentliche Voraussetzung für die Wiederverwertung von organischen Substanzen und Nährstoffen. Nur aus sauber getrennten und fremdstoffarmen Bioabfällen lassen sich hochwertige Komposte herstellen, die für eine landwirtschaftliche oder gärtnerische Nutzung geeignet sind. Vor allem bei Bioabfällen aus Haushalten und Gewerbe sind jedoch häufig Störstoffbelastungen zu beobachten, die die Verarbeitung zu hochwertigen Komposten und „Bodenverbesserern“ erschweren und es unmöglich machen, die vom Gesetzgeber in der Novelle der Bioabfallverordnung vom September 2021 vorgesehenen Grenzwerte von 0,5 % (Sonderregel für Bioabfällen aus Haushalten, 1,0 %) einzuhalten. Für diese Bioabfälle ist die anaerobe Vergärung und anschließende Kompostierung nicht geeignet.

Quelle: [Umwelt-Bundesamt: Gute Qualität von Bioabfällen ist Voraussetzung für eine hochwertige Verwertung](#)

7.3.2 Da im Prozess der hydrothermalen Vergasung die in der Biomasse enthaltene Mikroplastik-Anteile aufgelöst werden, sind sie dem biologischen Kreislauf entzogen. Nicht für die Kompostierung geeignete Biomasse kann so durch SCWG einer hochwertigen Verwertung zugeführt werden. Das jährliche Aufkommen in Deutschland in Höhe von 4,59 Mio. t ergibt Feed für 300 Systeme mit je 2000 kg/h Kapazität (Plankapazität des HYDRA-Projekts).

### **7.3.3 Verfügbarkeit geeigneter Bioabfälle**

Bioabfälle aus Privathaushalten unterliegen der kommunalen Erfassung und werden nach kommunalem Gebührensystem entsorgt (Biotonne). Im Landkreis Karlsruhe z.B. obliegt diese Aufgabe dem „Abfallwirtschaftsbetrieb“. Er erfüllt als Eigenbetrieb des Landkreises Karlsruhe dessen gesetzliche Aufgaben als Träger der öffentlichen Abfallentsorgung. In diesem Rahmen schafft der Abfallwirtschaftsbetrieb die Voraussetzungen für eine geordnete Abfallbeseitigung sowie Verwertung und hält die dafür erforderlichen Verwertungswege vor. Im Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Karlsruhe sowie den angeschlossenen Verwertungsbetrieben ist das Problem der Mikroplastik-Belastung von Biomasse bekannt. Die Stoffströme der kommunalen Entsorger von Bioabfällen unterliegen meist langfristiger Abnahmeverträge mit Biogasanlagen und Kompostierbetrieben.

Im Rahmen dieser Umsetzungsprüfung erfolgte eine Datenerhebung bei der IBEKO Service GmbH. Die IBEKO Service GmbH ist ein unabhängiges Beratungsunternehmen im Bereich "Entsorgungskostenoptimierung" für gewerblichen Bioabfall. Ziel ist die langfristige, kontinuierliche Optimierung und Kostenreduzierung bei gewerblichen Verursachern von Bioabfällen wie z.B. Supermarktketten und Baumärkten.

Im Rahmen dieser Umsetzungsprüfung erfolgt am 13. Juli 2022 eine Datenerhebung bei der IBEKO Service GmbH der Niederlassung Mönchengladbach, Thomas Bölling. IBEKO kategorisiert nach fünf Abfallarten:

#### Baumarktabfälle

1. Pflanzen, Blumen, Bäume. Biomasse zu 95 % sauber (Fehleintrag: Etiketten, Drähte) werden in 7 bis 10 m<sup>3</sup>-Container entsorgt.  
Entsorgungskosten ca. 30,- Euro/1000 kg (da sehr geringe Störstoffbelastung)

#### Supermarktabfälle

2. leichtverpackte Bioabfälle (z.B. Gemüse im Folienbeutel, Kartoffeln im Netz)
3. unverpackte Lebensmittelabfälle (Früchte (Schüttgut)) werden in 240 ltr. Tauschgebinden entsorgt. Entsorgungskosten (bei hoher Reinheit ca. 40,- Euro/1000 kg, bei starker Störstoffbelastung bis zu 160,- Euro/1000 kg)
4. Fleisch und tierische Eiweiße (ohne Verpackung (von Frischetheke) bzw. in Folienverpackung – Sonderbehandlung erforderlich)
5. geschlossen verpackte Lebensmittel (z.B. Joghurt im Becher, Milch im Tetrapak) werden in die Restmüll-Sammlung entsorgt.

Die Entsorgungskosten werden je nach Verschmutzungsgrad mit dem die Kosten für die Abfallbehandlung korrelieren berechnet und schwanken zwischen 30,- (saubere bis schwach belastete) und 160,- (hoch belastete Abfälle) €/t.\*)

\*) der Kosten-/Leistungsrechnung für das HYDRA-Projekt liegen Entsorgungserlöse in Höhe von 30,- €/t. zugrunde

Als Regulator für die Entsorgungswege gewerblichen Bioabfalls sieht IBEKO Service GmbH alleine die Entsorgungskosten. Da die hydrothermale Vergasung kunststoffbelastete Biomasse verarbeiten kann, ist hier ein Wettbewerbsvorteil gegenüber den Biogasanlagen zu sehen, die Entsorgungswege der privatwirtschaftlichen Abfallverursacher kurzfristig auf die hydrothermale Vergasung umzuleiten.

### 7.4. Stoffstromanalyse Gesamtsystem

Das geplante HYDRA-System (gemäß Plankapazität 2000 kg/h Feed) hat zwei Input-Stoffströme

1. Abfall-Biomasse (Tageskapazität 48.000 kg)
2. Wasser (2 – 10 m<sup>3</sup>, schwankend: nach TM-Anteil Biomasse)

und fünf Output-Stoffströme

- |                                   |                               |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1. Grob-Störstoffe                | 4. Produktgas CO <sub>2</sub> |
| 2. Sand, Mineralien               | 5. Produktgas H <sub>2</sub>  |
| 3. Abwasser (kläranlagengeeignet) |                               |

#### 7.4.1 Input-Stoffströme

1. Bioabfälle (Anlieferung mit Abfallsammelfahrzeugen)  
3 – 4 Fahrzeuge/Tag (Gesamtmenge 21 – 28 t)
2. Zuwasser (max. Bedarf 1 m<sup>3</sup>/h)

#### 7.4.2 Output-Stoffströme

##### 7.4.2.1 Störstoffe/Abwasser

1. Grob-Störstoffe (u.a. Eisen- und NE-Metalle, Keramik, Batterien) Sammlung in Container. Abfuhr als Restmüll bzw. Wertstoff, je nach Zusammensetzung. Abtransport per Lkw. Zu erwartende Menge: nach Schätzungen und jahreszeitlichen Schwankungen enthält Bioabfall aus Haussammlungen ca. 1-5 % solcher Fehlwürfe, d.h. 480 bis 2400 kg/d. Abtransport 1 bis 3 x wöchentlich.
2. Sand, Mineralien Ausbringung aus Zyklonsandfang bzw. Absetzbecken. Sammlung in Container. Abfuhr je nach Belastung als Bauschutt oder Sondermüll (kann erst im Betrieb nach Prüfung der Inhaltsstoffe/Verunreinigungen bzw. nach Effizienzbeurteilung Abscheidesysteme geschätzt werden).
3. Abwasser (kläranlagengeeignet) ca. 1680 l/h = 40.128 l/d = 13.242.240 l/a  
Ableitung über Kanalsystem. Klärung mit Abwasserverband erforderlich.  
Abwasserkosten lt. Gebührenordnung 2022-07 1,65 €/m<sup>3</sup>

### 7.4.2.2 Produktgase

4. CO<sub>2</sub>, ca. 304 kg/h = 7296 kg/d = 2.407.680 kg/a.
5. H<sub>2</sub>, ca. 15,7 kg/h = 377 kg/Tag (netto) = 124.410 kg/a.

## 7.5. Speicherung und Absatzwege der Produktgase

### 7.5.1 Wasserstoff

Die Tageskapazität der Produktgase, der in der Umsetzungsprüfung betrachteten Anlage (Kapazität: 2000 kg/h) liegt bei:

H<sub>2</sub>: brutto **586 kg/Tag** (- Eigenenergiebedarf\* ≈ **377 kg/Tag** □ 12.560 kWh)

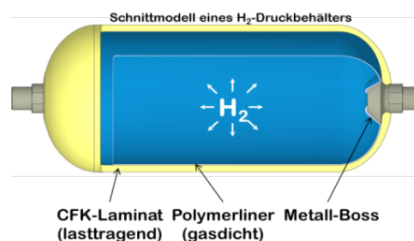
CO<sub>2</sub>: **7300 kg/Tag**

\*Eigenenergiebedarf: 234 kWh geschätzt auf Basis der Werte des Pilotreaktors VERENA am IKFT (Kapazität 100 kg/h)

H<sub>2</sub>-Abscheidung (Ausgangsdruck nach Gastrennung ca. 68 bar, Nachkomprimierung auf 350 bar (Vertankungsdruck Nutzfahrzeuge)) von Drucktank direkte Überleitung an vermarktende Tankstelle vorgesehen. Kapazität 15,70 kg/h ≈ 377 kg/d ≈ 12.441 kg/a. Erforderliche Speicherkapazität H<sub>2</sub> = Gesamtkapazität 1600 kg ≈ 4 Tagesleistungen

Wasserstoff H<sub>2</sub> kann auf verschiedene Arten gespeichert werden:

- Gasförmig unter Hochdruck in Drucktanks oder unterirdischen Kavernen
- Flüssig bei -253 °C in isolierten Kryotanks
- Adsorbiert in geeigneten festen Trägermedien (Metallhydridspeicher)
- Adsorbiert in geeigneten flüssigen Trägermedien, z.B. N-Ethylcarbazol (Liquid Organic Hydrogen Carrier)



Wasserstoff ist ein sehr flüchtiges Gas, daher sind an die Speicherung besondere Herausforderungen gestellt. Bei Druckgasspeichern kann es zu Diffusion kommen, was die Speicherdauer beeinträchtigt. Das HYDRA-Projekt plant, den Wasserstoff nur kurzzeitig zu speichern und an der direkt angeschlossenen Tankstelle zur Vertankung zu bringen. So empfiehlt sich die Speicherung in Drucktanks bei 350 bar (Vertankungsdruck Nutzfahrzeuge).

Abb. 9 Schnittmodell eines H<sub>2</sub> Druckbehälters.

Quelle: [Fraunhofer IMWS Hochdrucktanks für Speicherung und Transport von Grünem Wasserstoff](#)

Besonderer Aspekt des HYDRA-Projekts ist der Versuch durch Lokalität/Regionalität den Transportaufwand für Input (Biomasse-Feed) und Output (Abwasser, Abfälle, Produktgase) zu minimieren. Daher sieht es vor, die Wasserstoff-Vermarktung direkt an der Anlage bzw. in Nachbarschaft zu realisieren. Im vorgesehenen

Projekt ist dies das auf dem Nachbargrundstück liegende Tankcenter Kappler“ (76307 Karlsbad, Flurstück-Nr. 5782). Eine Kooperationserklärung liegt vor.



Abb. 10 Flurstück 5782 (Tankcenter) und 5783 (HYDRA-Projekt)



Abb. 11 Tankcenter Kappler, Karlsbad

### 7.5.2 Kohlendioxid

Kohlendioxid ist sehr gut gasförmig in Drucktanks zu speichern. So wird CO<sub>2</sub> je nach Abnehmer, Bedarf und Einsatz in unterschiedlichsten Gebindeformen und Größen angeboten. CO<sub>2</sub>-Abscheidung (Ausgangsdruck nach Gastrennung ca. 70 bar, keine Nachkomprimierung erforderlich). Menge ca. 304 kg/h  $\approx$  7300 kg/d (aufzufangen in drei transportablen CO<sub>2</sub>-Tanks (Trailertanks) á 12 m<sup>3</sup>, auf Lastwagen montierbar. Max. Füllgewicht: ca. 10.638 kg, Gesamtkapazität 31.800 kg  $\approx$  4,3 Tagesleistungen).

Im Rahmen Planmodellierung wurde mit einem Anbieter von Industrie-CO<sub>2</sub> die Logistik besprochen. Für die geplante Pilotanlage des HYDRA-Projekts bieten Gase-Hersteller (Air Liquide, Linde) geeignete Logistiksysteme.



Abb. 12 Trailertank auf Sattelaufleger (Quelle: [ASCO CO2-Technologie](#))



Abb. 13 Trailertanks aufgerichtet

Kohlendioxid ist ein Gas das in vielen industriellen Prozessen Einsatz findet. So besteht ein Markt für hochreines Kohlendioxid wie es bei der hydrothermalen Vergasung entsteht. Anbieter wie Linde Gase oder Air Liquide kaufen CO<sub>2</sub> an und vertreiben es als Industriegas.

## BWZPH222135 HYDRA

Im Rahmen der Umsetzungsprüfung erfolgte eine Datenerhebung bei der Air Liquide Deutschland GmbH. Bei einem Angebot von Kohlendioxid hoher Reinheit (99 %) liegt zurzeit (Stand 07-2022) der EK-Preis bei 1,50 €/kg.

Durch den Ausgangsdruck der CO<sub>2</sub>-Abscheidung am System von ca. 70 bar ist eine direkte Befüllung von Trailertanks ohne Komprimierung und damit ohne Energieaufwand und Kosten möglich. Der Verkauf von CO<sub>2</sub> steuert im aktuellen Marktumfeld einen Großteil der Erträge des HYDRA-Systems bei.

### 7.6. Wirtschaftlichkeit des geplanten HYDRA-Projekts

Im Rahmen einer Verwirklichung des Hydra-Projektes ist eine Pilot-Anlage mit einer Kapazität von 2000 kg Biomasse pro Stunde geplant. Nach Anwendung des Gas-Reformierungs-Verfahrens ergeben sich zwei Produktgasströme:

#### Tageskapazität\*

H<sub>2</sub>: ≈ 377 kg (netto) ≙ 12.560 kWh

CO<sub>2</sub>: ≈ 7300 kg\*\*

#### Jahreskapazität\*

H<sub>2</sub>: ≈ 124.344 kg (netto) ≙ 4.140.700 kWh

CO<sub>2</sub>: ≈ 2.409.000 kg\*\*

\* inkl. Eigenenergiebedarf für Zellaufschluss, Phosphor- und Stickstoff-Fällung + SCWG (Erzeugung durch Brennstoffzelle), ohne Energiebedarf für Biomasse-Vorbehandlung (nicht exakt abschätzbar – voraussichtlich zw. 30 und 80 kWh/t Feed)

\*\* CO<sub>2</sub> das der Atmosphäre entzogen ist und einer Verwertung/Bindung zugeführt werden kann.

#### 7.6.1 Plan-Kosten-/Leistungsrechnung (Kurzfassung)

(per anno – Ertrags-/Kostenrechnung – Stand 2022-08-24)

##### Einnahmen/Ausgaben

<b>Wasserstoff H<sub>2</sub> (Plan-VK 4,00 €/kg)</b>	497.376,00 €
Kohlenstoffdioxid CO <sub>2</sub> (Plan-VK 1,50 €/kg (Air Liquide 07-2022))	3.606.768,00 €
Entsorgungsvergütung (Plan-Vergütung 30 €/t Bioabfall)	475.200,00 €
Phosphor (Ammoniummagnesiumphosphat) (Plan-VK 0,8 €/kg)	26.542,08 €
<b>Einnahmen Gesamt</b>	<b>+4.605.886,08 €</b>
Abwasserentsorgung	- 022.000,00 €
Kaliumhydrogencarbonat (Katalysator hydrothermale Vergasung)	- 270.000,00 €
Wartung/Instandhaltung	- 470.000,00 €
AfA auf Gebäude (Basis 50 Jahre)*	- 47.022,00 €
AfA auf Anlageinvestitionen (gesamt 19.000.000,00 €)*	-1.056.333,33 €
Personal (8 Vollzeitstellen á 80.000 €/a)	- 640.000,00 €
Sonstige Kosten (Verwaltung allg.)	- 200.000,00 €
<b>Ausgaben Gesamt</b>	<b>-2.705.355,33 €</b>
<b>Saldo</b>	<b><u>+1.900.530,75 €</u></b>

\* gemäß AfA-Tabelle "Energie- und Wasserversorgung" Quelle: BMFI AZ: IV A 8-S 1551-9/95, 45-S 1551-20

Entspricht einer Gesamt-Verzinsung der Investitionssumme in Höhe von ca. 21,4 Mio. Euro von ca. 8,88 %.

Siehe hierzu detaillierte Kosten- und Leistungsrechnung (nichtöffentliche Ausgabe Anhang Seite 31).

Der Verkauf von Kohlenstoffdioxid ist ein wesentlicher Träger der Wirtschaftlichkeit des Systems und deckt in der Planrechnung vom 24.08.2022 knapp 80 % der Gesamteinnahmen. Durch Direktvermarktung des Wasserstoffes (Seite 21-22) und den damit verbundenen höheren erzielbaren VK-Preisen und die mögliche Steigerung der Einnahmen durch die Annahme und Bearbeitung von hochbelasteten Bioabfällen (Seite 19) kann diese Abhängigkeit voraussichtlich reduziert werden.

**Aufgrund der Kosten- und Leistungsrechnung kann das HYDRA-Projekt als wirtschaftlich darstellbar betrachtet werden. Weiter kann angenommen werden, dass die Bau- und Herstellkosten von Folgesystemen durch erweiterbare Forschungs- und Anwendungserkenntnisse, sowie Serieneffekte in der Herstellung wirtschaftlicher darstellbar werden.**



### **7.7 Das HYDRA-Projekt als möglicher Baustein der Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg (ZPH2)**

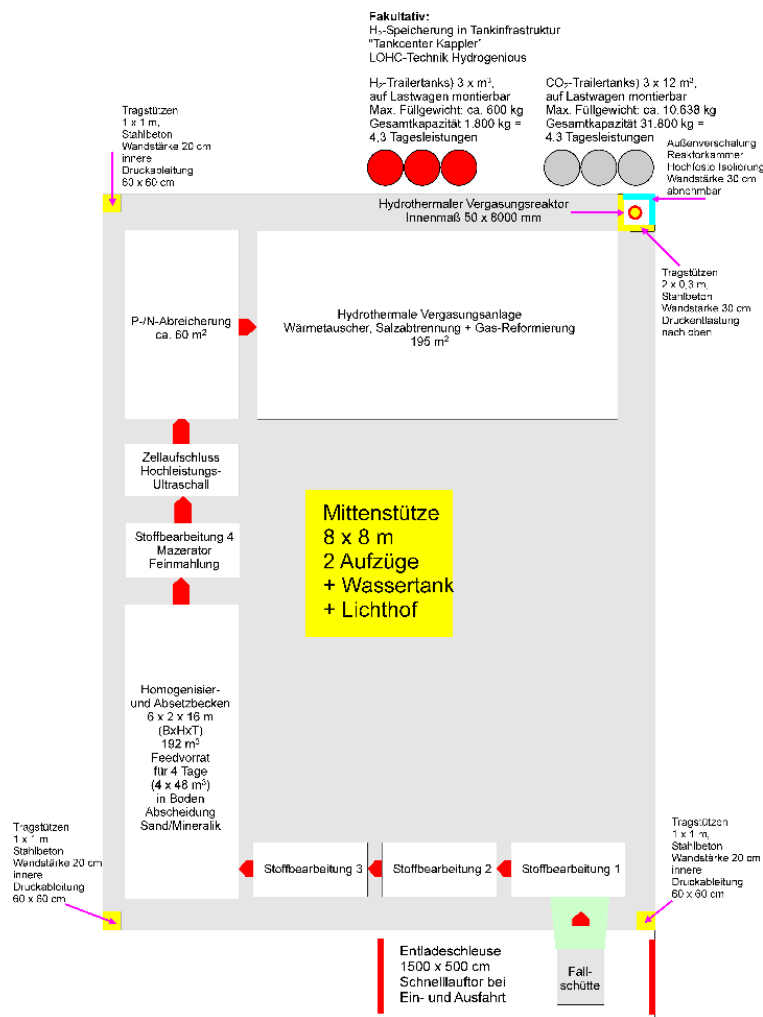
Das HYDRA-Projekt kann den Zielen und Forderungen der „**Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg (ZPH2)**“ dienen, da es

- direkt aus Abfall-Biomasse Wasserstoff erzeugen kann.
- der Reduzierung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen dient.
- in der Lage ist kunststoffbelastete Biomasse wirtschaftlich zu verwerten.
- die Rolle Baden-Württembergs als Wissenschaftsstandort stärken kann.
- den Umbau der Industrie in nachhaltige und zukunftsweisende Technologien vorantreiben kann.
- völlig neue Geschäftsmodelle ermöglicht (Kommunale Bioabfallentsorgung).



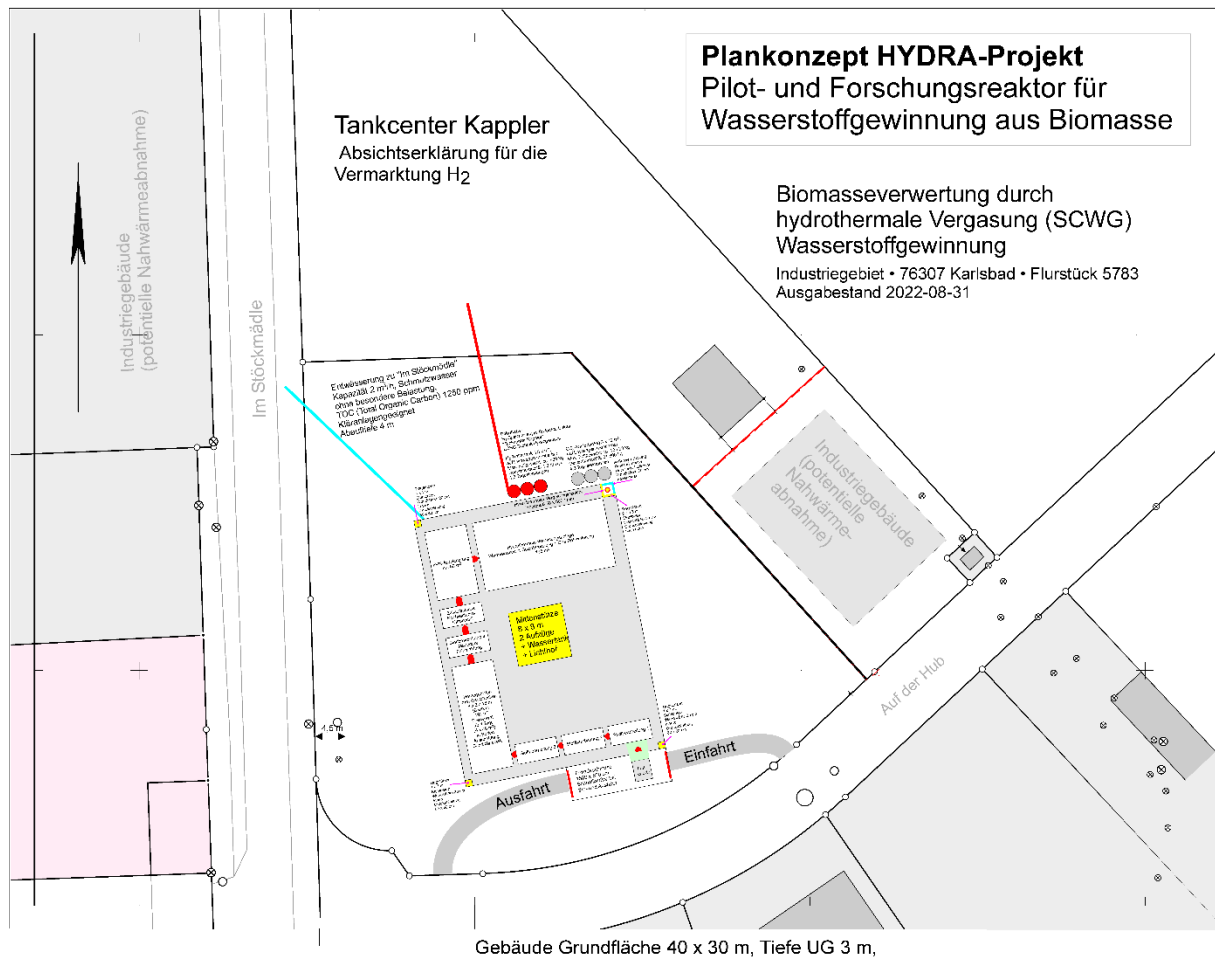
- zukunftssichere Arbeitsplätze in Forschung, Entwicklung, Anlagenbau und Betrieb schaffen kann.
- allein in Deutschland Potential für 300 Anlagen bietet und dadurch
- über Jahre Milliarden-Investitionen in zukunfts- und exportfähige Technologie ermöglicht.
- das Land unabhängiger machen kann von ausländischen Energie-Lieferanten.
- eine Reihe von Zielen und Maßnahmen erfüllt, die dem Bundesland Baden-Württemberg helfen können in der Zukunft eine wichtige und tragende Rolle in der Reduzierung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu spielen und weiterhin Hochtechnologie-Standort zu bleiben.

## 8. Planmodellierung Gesamtsystem (Stoff-Flüsse, Schnittstellen)



Das in der nachfolgenden Zeichnung geplante Gebäude soll als Pilot- und Forschungsanlage ausgerichtet werden. D.h. im Untergeschoss befindet sich, weitestgehend unter der Bodenlinie die gesamte Prozesskette. Die Schnittstellen (Entladerampe für Biomasse, Beladerampe Rest-abfälle und die Produktgasspeicher) sind überirdisch. In EG und OG 1 sollen Forschungslabore und Büroräume untergebracht werden.

Ziel der Pilotanlage ist, die Technologie in ihren einzelnen Komponenten und in der Kombination bis zur Reife fortzuentwickeln um diese Systeme bundes- und später europaweit für die Behandlung kunststoffbelasteter Biomasse einzusetzen.



In der aktuellen Anlagenplanung des HYDRA-Projekts ist die Annahme von Biomasse aus Haus- und Gewerbesammlungen mit mittlerer bis schwerer Kunststoffbelastung vorgesehen. Biomasse, die aufgrund des Mikroplastik-Belastung von > 1 % nicht mehr wirtschaftlich für den Einsatz in der anaeroben Vergärung und anschließenden Kompostierung geeignet ist. Gemäß „Genehmigungs- und Anzeigeverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz“ (Ausgabe Februar 2020) ist die Genehmigungsfähigkeit einer Anlage nach den folgenden Gesichtspunkten zu beurteilen:

## 9. Überprüfung der verwaltungs- und baurechtlichen Durchführbarkeit

In der aktuellen Anlagenplanung des HYDRA-Projekts ist die Annahme von Biomasse aus Haussammlungen mit mittlerer bis schwerer Kunststoffbelastung vorgesehen. Biomasse, die aufgrund des Mikroplastik-Belastung von > 1 % nicht mehr wirtschaftlich für den Einsatz in der anaeroben Vergärung und anschließenden Kompostierung ge-

eignet ist. Gemäß „Genehmigungs- und Anzeigeverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz“ (Ausgabe Februar 2020) ist die Genehmigungsfähigkeit einer Anlage nach folgenden Gesichtspunkten zu beurteilen:

*„Immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig sind Anlagen, die in besonderem Maße geeignet sind, schädliche Umwelteinwirkungen hervorzurufen oder in anderer Weise die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft zu gefährden, erheblich zu benachteiligen oder erheblich zu belästigen sowie ortsfeste Abfallentsorgungsanlagen zur Lagerung oder Behandlung von Abfällen (§ 4 Abs. 1 Satz 1 BImSchG). In besonderer Weise umweltrelevant sind dabei Anlagen, die der Industrieemissions-Richtlinie (2010/75/EU) unterliegen.“*

Von den im HYDRA-Projekt geplanten Komponenten/Technologien können folgende nach dem *BImSchG* relevanten Belastungen/Gefährdungspotentiale ausgehen:

1. **Geruchsemissionen** beim Entladen und der Vorbehandlung von Biomasse aus Haushalts- und Gewerbesammlungen. Der Geruchsbelästigung ist daher besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Be- und Entladeeinheiten liegen innerhalb einer gekapselten geruchsdichten Schleuse mit Abluftfilterung.
2. **Schallemissionen** der mechanischen Komponenten innerhalb der Prozesskette. Die Anlage wird auf einem als Industriegebiet ausgewiesenen Grundstück errichtet. Alle Aggregate werden in einem Stahlbetonbecken mit Schallschutz untergebracht, so dass die Schallwahrnehmung außerhalb des Gebäudes unterhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte liegt. Für ein Industriegebiet ergibt sich ein Immissionsrichtwert von 70 dB. In einem Gewerbegebiet liegt der Immissionswert tagsüber bei 65 dB und nachts bei 50 dB.
3. **Gefährdung durch Havarie** druckführender Leitungen und des hydrothermalen Vergasungsreaktors (Systemdruck bis 300 bar). Alle Systemkomponenten werden den Anforderungen entsprechend dimensioniert und vom TÜV abgenommen. Die Betriebssicherheit wird jährlich überprüft. Für Druckableitungen werden bauliche Maßnahmen ergriffen. Da der gesamte Prozess gefahrstofffrei abläuft ist von einer Gefährdung von Mensch und Umwelt nicht auszugehen.
4. **Abwasserrechtliche Gefährdung** (Prozesswasser) Die bei der hydrothermalen Vergasung entstehenden Abwässer sind lt. IKFT (Dr. Boukis) „kläranlagentauglich“. Die Einleitung ist somit nicht genehmigungspflichtig. Eine Auswertung von Abwässern aus der hydrothermalen Vergasung von kunststoffbelasteter Biomasse auf die Abwasserzusammensetzung auswirkt muss in einer gesonderten Forschungsreihe überprüft werden. Das Umweltbundesamt (UBA) hat mit Datum vom 19. Mai 2022 im Bundesanzeiger (BAnz) 21 weitere Allgemeinverfügungen zur Einstufung von Stoffen bzw. Stoffgruppen hinsichtlich der Wassergefährdung gemäß § 6 Abs. 4 Satz 1 der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) bekannt gemacht (BAnz AT

01.08.2022 B6 bis B10, BAnz AT 02.08.2022 B5 bis B9, BAnz AT 03.08.2022 B6 bis B9, BAnz AT 04.08.2022 B8 bis B11 sowie BAnz AT 05.08.2022 B5 bis B7). Eine Prüfung nach dieser Verordnung muss noch erfolgen.

5. **Gefährdungspotentiale durch die zu lagernden Produktgase CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>.**  
H<sub>2</sub>: Die Immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht für die Lagerung von Wasserstoff nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz gilt erst ab einer Lagerkapazität von drei Tonnen oder mehr. Wobei die Durchführung im vereinfachten Genehmigungsverfahren erfolgen kann.  
CO<sub>2</sub>: Für CO<sub>2</sub> gibt es keine besonderen Anforderungen für die Lagerung, da das Gas nicht brennbar, nicht geruchsbelastend und nicht umweltgefährlich ist. Die Lagerung erfolgt wie in Kapitel 8 beschrieben in vier transportable CO<sub>2</sub>-Tanks mit einer Gesamtkapazität von 31.800 kg
6. **Verkehrswege/Verkehrsbelastung.** Die Anlage erzeugt nach bestehender Kapazitätsplanung (2000 kg/h) folgende Verkehrsströme:
  - 6.1 Zulieferverkehr (48.000 kg Biomasse) 6 bis 7 Anlieferfahren/Tag
  - 6.2 Abholerverkehr CO<sub>2</sub>: Bei einer CO<sub>2</sub>-Produktion von 7286 kg/d und einer Speicherkapazität der transportablen CO<sub>2</sub>-Tanks von ca. 10.638 kg ist von 0,7 Fahrten/Tag auszugehen.
  - 6.3 Abholerverkehr Siebfang. In der Vorbehandlung abgeschiedener, nicht vergasungsfähiger Materialien. Bei einer (geschätzten) durchschnittlichen Belastung der Biomasse aus Haushalts- und Gewerbesammlung nicht vergasungsfähiger Materialien (z.B. Metalle von 1 %) ist von einer Tagesmenge von 480 kg auszugehen. D.h. 1 x wöchentlicher Abtransport.
  - 6.4 Mitarbeiter: Die Anlage benötigt voraussichtlich zwei bis drei Personen/Schicht für ihren Betrieb (Überwachung, Störfallabwendung/Beseitigung), d.h. es kommt zu 18 An-/Abfahrten von Pkw/Tag

Für alle Anlagenteile gilt, dass PRO-AKTIV bereits während der Planung mit den jeweiligen Genehmigungsbehörden Kontakt aufzunehmen ist um einen Vorbescheid über einzelne Genehmigungsvoraussetzungen oder den Standort der Anlage zu beantragen, sobald die Auswirkungen der Anlage beurteilt werden können. Soweit mit dem Vorbescheid einzelne Genehmigungsvoraussetzungen abschließend beurteilt wurden, ist die Genehmigungsbehörde im späteren Genehmigungsverfahren daran gebunden (gestuftes Verfahren). Der Vorbescheid gestattet weder die Errichtung noch den Betrieb der Anlage. Dies ist erst mit der abschließenden Genehmigung möglich.

## **9.1 Voranfragen bei Genehmigungsbehörden**

Im Rahmen der Umsetzbarkeitsprüfung wurde mit den bis heute bekannten Fakten ein Konzept der Behandlungstufen der Anlage entwickelt und den für ein System dieser

Art relevanten Genehmigungsbehörden vorgestellt. Da es sich um ein Immissions-schutzrechtlich genehmigungspflichtiges Vorhaben nach § 4 BImSchG handelt, waren dies im Einzelnen:

1. Bürgermeisteramt der Gemeinde Karlsbad
2. Landratsamt Karlsruhe Referat V Umwelt und Technik
3. Regierungspräsidium Karlsruhe Referat 54/4 Schwerpunkt KIT in Abstimmung mit Referat 54/4 Industrie Schwerpunkt Arbeitsschutz (Anlage nach IE-Verordnung)

Beschrieben wurden die in der Anlage durchzuführenden Prozesse (Annahme Bioabfall, Behandlung mit Hochleistungsultraschall, Phosphor- und Stickstoff-Fällung und -Abscheidung und hydrothermale Vergasung).

Alle Behörden haben der ihnen bekanntgemachten Technologie und den damit verbundenen baulichen Maßnahmen die Genehmigungsfähigkeit zugesprochen.

## 10. Projektansatz aus der Umsetzbarkeitsprüfung (Ausblick/Verwertung)

Aus den oben beschriebenen Annahmen und den Anforderungen an eine nachhaltige und umweltfreundliche Verwertung von mit Mikroplastik belasteter Biomasse ergibt sich die Fragestellung ob und wie weit die SCWG in der Lage ist, die Kohlenwasserstoffanteile von Kunststoffen energetisch zu verwerten und wie sich Zusätze wie z.B. Farbstoffe und Weichmacher auf die Produktgase und Abwässer auswirken. Hierzu empfehlen wir eine mehrstufige Vergasungsreihe unter definierten Bedingungen durchzuführen, deren Ergebnisse Antworten auf diese wichtigen Fragen geben sollen.

Daher sehen wir vor, einen Förderantrag für die im Nachfolgenden beschriebene Versuchsreihe zu stellen, die mehrere Vergasungsversuche im Laborreaktor „LENA“ am IKFT des KIT vorsieht:

1. Biomasse ultraschall-behandelt, P-Recycling OHNE Belastung mit Mikroplastik
2. Biomasse ultraschall-behandelt, P-Recycling mit def. Mikroplastik-Belastung (z.B. 0,5 Gewichts-% TM) gesetzlicher Grenzwert seit 22.09.2021
3. Biomasse ultraschall-behandelt, P-Recycling mit def. Mikroplastik-Belastung (z.B. 2,0 Gewichts-% TM)
4. Biomasse ultraschall-behandelt, P-Recycling mit def. Mikroplastik-Belastung (z.B. 10,0 Gewichts-% TM)

Das Mikroplastik soll in definierter Zusammensetzung (anteilig den verwendeten Kunststoff-Materialien in Produktverpackungen) der sauberen Biomasse beigemischt

werden. Untersucht werden soll die Stabilität und Effizienz des Gesamtprozesses und der Vergasung, die Produktgaszusammensetzung und die Zusammensetzung der Abfallströme (mit besonderem Augenmerk auf die Zusammensetzung des Abwasserstroms).

**Fragestellung und Forschungsziel:**

Ist die hydrothermale Vergasung in der Lage die Kohlenwasserstoffe in verschiedenen Kunststoffen aufzuschließen und zu verwerten? Die Ergebnisse dieser Studie wären der Beweis der Annahmen von Bai Bin an der Xi'an Jiaotong University (China) und der Forschergruppe an der Universität Florenz um Benedetta Ciuffi (siehe Kapitel 3.3.2, Seite 10 ff).

**Budgetierung:**

Nach interner Planung und Kalkulation ca. 300.000,- €

**10.1 Mittelfristige Ziele**

Sollte sich die Annahme der energetischen Verwertung von Mikroplastik in Biomasse im Rahmen der oben beschriebenen Versuchsreihe bestätigen, wäre zusätzlich zur wirtschaftlichen Tragfähigkeit des HYDRA-Konzeptes bewiesen, dass das System auch ein wichtiger Bestandteil der Abfall- und Kreislaufwirtschaft darstellen kann, da es anfallende Abfälle möglichst hochwertig verwerten kann.

Quelle: [Umweltbundesamt Abfall- und Kreislaufwirtschaft](#)

Der Bau einer Demonstrationsanlage als Referenz wäre eine wertvolle Wegmarke. Wichtig sind zudem ein technologieoffener, klarer Rechtsrahmen und nicht zuletzt unternehmerische Investitionen in hydrothermale Vergasungsanlagen.