

Privates Labor, Schlangenbader Str.  
40, 65344 Eltville am Rhein.

Angemeldet von Gymnasium Eltville,  
Wiesweg 7, 65343 Eltville am Rhein

# **Jugend forscht:**

## **Thermische Pyrolyse von Kunststoffabfällen zur Wasserstoffgewinnung**

Doron Antal (Alter: 18), Jakob Hollingshaus (Alter: 18)

Erarbeitungsort:  
Privates Labor

Projektbetreuer:  
Michael Zeitz, Gymnasium Eltville

Thema des Projekts:  
Untersuchung der thermischen Pyrolyse verschiedener Kunststoffabfälle mit dem Ziel, den entstehenden Wasserstoffanteil zu analysieren und das Verfahren als potenziell CO<sub>2</sub>-arme Verwertungs- und Energietechnologie zu bewerten.

Fachgebiet:  
Chemie

Wettbewerbssparte:  
Jugend forscht

Email:

Doronantal@doron.info

Mobil:

017099064

65388 Schlangenbad, Hessen, Deutschland den 15.01.2026

## Projektüberblick

Plastikmüll und Klimakrise zählen zu den größten Herausforderungen unserer Zeit. In diesem Projekt untersuchen wir, ob sich Kunststoffabfälle mithilfe thermischer Pyrolyse in Wasserstoff umwandeln lassen – einen Energieträger, der bei der Nutzung kein CO<sub>2</sub> freisetzt. Ziel ist es, schwer recycelbare Kunststoffe als Ressource für klimafreundliche und erneuerbare Energie nutzbar zu machen.

Dazu wurde ein Pyrolysesystem im Labormaßstab aufgebaut. Untersucht wurden sortenreine Kunststoffe sowie realistische Kunststoffgemische aus Haushalts-, Umwelt- und Meeresplastik. Durch den Einsatz verschiedener Katalysatoren wurde analysiert, wie sich der Wasserstoffanteil im entstehenden Gas beeinflussen lässt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Erzeugung wasserstoffhaltiger Gase aus Kunststoffabfällen grundsätzlich möglich ist. Der eingesetzte Batch-Reaktor ist noch nicht energiepositiv, macht jedoch das Potenzial der Kunststoffpyrolyse als Baustein einer CO<sub>2</sub>-armen Kreislaufwirtschaft deutlich.

## Inhalt

1. Fachliche Kurzfassung.....	4
2. Motivation und Fragestellung.....	5
2.1 Ausgangslage und Motivation .....	5
2.2 Fragestellung und Ziel der Arbeit .....	5
2.3 Hypothesen und Annahmen.....	5
3. Hintergrund und Stand der Forschung – Fokus Wasserstoff .....	6
3.1 Begründung für den Fokus auf Wasserstoff .....	6
3.2 Abgrenzung zu bestehenden Forschungsarbeiten .....	6
3.3 Relevanz für unser Projekt.....	6
4. Vorgehensweise, Materialien und Methoden .....	7
4.1 Gesamtstrategie und Vorgehensplan .....	7
4.2 Entwicklung und Aufbau des Reaktors .....	7
4.2.1 Reaktor 1 – erster Batch-Reaktor .....	7
4.2.2 Weiterentwicklung von Heizung und Isolierung.....	7
4.2.3 Dichtheit, Kühlung und Materialprobleme.....	8
4.2.4 Reaktor 2 – nachgeschalteter Katalysatorreaktor .....	8
4.3 Materialien .....	8
4.3.1 Kunststoffe.....	8
4.3.2 Katalysatoren.....	9
4.4 Durchführung der Pyrolyseversuche .....	10
4.5 Mess- und Nachweismethoden.....	10
4.6 Schwierigkeiten, Anpassungen und Grenzen .....	12
4.7 Sicherheitsmaßnahmen und Risikomanagement.....	12
5. Ergebnisse.....	12
5.1 Übersicht über die durchgeführten Versuchsreihen .....	12
5.2 Versuchsreihe A/B: Pyrolyse ohne Katalysator – Einfluss von Kunststofftyp und Temperatur....	13
5.3 Versuchsreihe C: Pyrolyse mit Katalysator.....	14
5.3.1 Pyrolyse von Kunststoffgemischen (Abfall) – Mittelwerte.....	14
5.4 Vergleich der Versuchsreihen .....	15
5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	16
5.6 Energetische Abschätzung (Idealwert und Vergleich mit einem Realversuch) .....	16
5.6.1 Theoretischer Maximalfall (Idealbedingungen, Beispiel PE) .....	16
5.6.2 Vergleich mit einem Realversuch (PP, bestes Ergebnis 62 % H <sub>2</sub> ) .....	17

6. Ergebnisdiskussion.....	17
6.1 Zielsetzung und Einordnung der Ergebnisse .....	17
6.2 Was gut funktioniert hat .....	18
6.3 Probleme, Schwierigkeiten und Grenzen .....	18
6.4 Energetische Einordnung des Reaktorkonzepts .....	19
6.5 Erkenntnisse und neue Ideen aus den Experimenten .....	19
6.6 Fehleranalyse und Verbesserungsvorschläge .....	20
6.7 Bedeutung und mögliche Auswirkungen .....	20
7. Fazit und Ausblick .....	21
8. Quellen und Literaturverzeichnis .....	21

## 1. Fachliche Kurzfassung

Kunststoffabfälle stellen aufgrund ihrer zunehmenden Menge und ihrer oft eingeschränkten Recyclingfähigkeit ein wachsendes Umweltproblem dar. Gleichzeitig besteht ein steigender Bedarf an klimafreundlichen Energieträgern. Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit, ob sich Kunststoffabfälle durch thermische Pyrolyse zur Gewinnung von Wasserstoff nutzen lassen und inwiefern ein solcher Prozess energetisch sinnvoll sein kann. Im Rahmen des Projekts wurde ein Pyrolysesystem im Labormaßstab aufgebaut und schrittweise weiterentwickelt. Untersucht wurden sowohl sortenreine Kunststoffe als auch praxisnahe Kunststoffgemische aus Haushaltsabfällen, Umweltplastik und Meeresplastik. Die Pyrolyse erfolgte im Batch-Betrieb bei Temperaturen bis etwa 1000 °C. Zur Steigerung der Wasserstoffausbeute wurde ein zweistufiger Reaktor mit nachgeschaltetem Katalysatorreaktor eingesetzt. Verglichen wurden ein selbst hergestellter Raney-Nickel-Katalysator, ein kommerzieller Perlkatalysator sowie ein Eisenoxid/Aluminiumoxid-Katalysator. Die Ergebnisse zeigen, dass bei allen untersuchten Kunststoffen wasserstoffhaltige Pyrolysegase entstehen. Der Einsatz eines Katalysators führte zu einer deutlichen Erhöhung der Wasserstoffanteile, wobei Eisenoxid auf Aluminiumoxid die höchsten und stabilsten Werte lieferte. Auch bei gemischten Kunststoffabfällen konnten relevante Wasserstoffanteile nachgewiesen werden, wenn auch etwas geringer als bei Reinstoffen. Eine energetische Abschätzung ergab, dass der im Wasserstoff enthaltene Energiegehalt theoretisch ausreichen kann, um die Kunststoffprobe selbst auf Pyrolysetemperaturen zu erhitzen. Unter den realen Bedingungen des verwendeten Batch-Reaktors ist jedoch kein energiepositiver oder energieautarker Betrieb erreichbar, da die Aufheizung der gesamten Reaktormasse und hohe Wärmeverluste dominieren. Zusammenfassend zeigt die Arbeit, dass die Wasserstoffgewinnung aus Kunststoffabfällen mittels Pyrolyse chemisch gut möglich ist und ein grundsätzliches energetisches Potenzial besitzt. Für eine energetisch günstige Umsetzung wären jedoch weiterentwickelte Reaktorkonzepte, etwa kontinuierliche Durchlaufreaktoren mit effizienter Wärmerückgewinnung, erforderlich.

## 2. Motivation und Fragestellung

### 2.1 Ausgangslage und Motivation

Kunststoffabfälle und Energieversorgung zählen zu den drängendsten technischen und gesellschaftlichen Herausforderungen der Gegenwart. Einerseits steigen die Mengen an Kunststoffmüll kontinuierlich an, während ein großer Teil dieser Abfälle nur eingeschränkt oder gar nicht recycelbar ist. Dies betrifft insbesondere Kunststoffe, die mit Aluminium beschichtet sind, aus Verbundmaterialien bestehen oder aus komplexen Polymergemischen zusammengesetzt sind. Solche Materialien werden häufig energetisch verwertet, meist durch Müllverbrennung. Dabei entstehen zwangsläufig CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie weitere Schadstoffe wie Stickoxide, Feinstaub oder Rückstände in Form von Schlacke und Filteraschen. Gleichzeitig gehen potenziell nutzbare Rohstoffe und chemische Energie unwiederbringlich verloren, da die Kunststoffe vollständig oxidiert werden und nicht mehr stofflich oder chemisch weiterverwertet werden können. Andererseits wächst der Bedarf an klimafreundlichen Energieträgern. Wasserstoff gilt als vielversprechender Energieträger, seine Herstellung ist jedoch bislang oft energieintensiv oder auf fossile Rohstoffe angewiesen. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob sich beide Probleme – Kunststoffabfall und Energiebedarf – technisch sinnvoll miteinander verknüpfen lassen. Die Motivation für dieses Projekt entstand aus Gesprächen mit verschiedenen Personen aus unterschiedlichen Bereichen sowie aus einer Umfrage an unserer Schule. Dabei wurden Energieversorgung und Plastikmüll besonders häufig als zentrale Probleme genannt. Diese Rückmeldungen aus der schulischen Umfrage und den Gesprächen bildeten den Ausgangspunkt für die Projektidee, beide Themen in einem experimentellen Ansatz zusammenzuführen. Ziel war es dabei ausdrücklich, theoretische Annahmen und Versprechen rund um Pyrolyse nicht nur aus der Literatur zu übernehmen, sondern im kleinen Maßstab selbst zu überprüfen, was davon praktisch umsetzbar ist.

### 2.2 Fragestellung und Ziel der Arbeit

Aus dieser Ausgangslage ergibt sich die zentrale Fragestellung des Projekts:

*Ist es praktikabel, Kunststoffabfälle mittels thermischer Pyrolyse so zu verwerten, dass dabei Wasserstoff entsteht und der Prozess insgesamt energetisch sinnvoll ist?*

Ziel der Arbeit ist es, diese Fragestellung im Labormaßstab experimentell zu untersuchen. Dabei soll überprüft werden, ob durch Pyrolyse von schwer recycelbaren Kunststoffen relevante Mengen Wasserstoff erzeugt werden können und welche technischen, energetischen und sicherheitsrelevanten Rahmenbedingungen dafür notwendig sind. Ein weiterer Fokus liegt auf der Frage, ob Pyrolyse perspektivisch eine CO<sub>2</sub>-neutrale und schadstoffarme Alternative zur klassischen Müllverbrennung darstellen kann.

### 2.3 Hypothesen und Annahmen

Im Rahmen des Projekts werden mehrere Annahmen überprüft:

Durch thermische Pyrolyse lassen sich auch schwer oder nicht recycelbare Kunststoffe in nutzbare gasförmige Produkte überführen. / Der Einsatz eines mehrstufig aufgebauten Reaktors sowie unterschiedlicher Katalysatoren beeinflusst die Zusammensetzung der entstehenden Gase und kann den Wasserstoffanteil erhöhen. / Unter geeigneten Bedingungen ist es grundsätzlich möglich, dass der Prozess energetisch vorteilhaft ist oder zumindest das Potenzial zur teilweisen energetischen Selbstversorgung besitzt, beispielsweise durch die Nutzung eines Teils des erzeugten Wasserstoffs zur Beheizung des Reaktors.

Diese Hypothesen bilden die Grundlage für die durchgeführten Experimente und die anschließende Auswertung der Ergebnisse.

### 3. Hintergrund und Stand der Forschung – Fokus Wasserstoff

Aktuelle Übersichtsarbeiten zeigen, dass die Pyrolyse von Kunststoffen in der Forschung häufig mit dem Ziel untersucht wird, flüssige Kraftstoffe oder kraftstoffähnliche Pyrolyseöle herzustellen. Das Review von Hasan et al. (*Energy Conversion and Management*) beschreibt, dass Polymere wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder Polystyrol (PS) aufgrund ihres hohen Kohlenstoff- und Wasserstoffanteils bei der Pyrolyse in Gemische aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen zerlegt werden können. Diese liegen oft in Siedebereichen, die Benzin-, Diesel- oder Kerosinfraktionen ähneln. Gleichzeitig wird in der Arbeit darauf hingewiesen, dass diese flüssigen Produkte auch Nachteile mit sich bringen. Bei ihrer Nutzung entstehen erneut CO<sub>2</sub>-Emissionen, da sie weiterhin kohlenstoffhaltige Energieträger sind. Außerdem enthalten Pyrolyseöle häufig aromatische Verbindungen, darunter auch Benzol, die aus gesundheitlicher und umweltbezogener Sicht problematisch sind und meist weiter aufbereitet werden müssen. Dadurch ist der ökologische Vorteil gegenüber Müllverbrennung oder fossilen Kraftstoffen begrenzt.

#### 3.1 Begründung für den Fokus auf Wasserstoff

Vor diesem Hintergrund verfolgt unser Projekt bewusst einen anderen Ansatz. Statt Kunststoffabfälle vor allem zu flüssigen Kraftstoffen umzuwandeln, konzentrieren wir uns auf die Gewinnung von Wasserstoff als gasförmigem Energieträger. Wasserstoff verbrennt CO<sub>2</sub>-frei und verursacht keine direkten Emissionen aromatischer Schadstoffe. Das Review von Niu et al. (*Chemical Society Reviews*) zeigt, dass Wasserstoff bei der Pyrolyse von Kunststoffen entweder direkt im Pyrolysegas entsteht oder durch zusätzliche katalytische Schritte erhöht werden kann. Dabei hängt die erreichbare Wasserstoffmenge stark vom verwendeten Polymer, der Temperatur, dem Reaktorkonzept und insbesondere vom eingesetzten Katalysator ab. Mehrstufige Reaktoren und katalytische Systeme werden in der Literatur als besonders aussichtsreich beschrieben.

#### 3.2 Abgrenzung zu bestehenden Forschungsarbeiten

Beide Übersichtsarbeiten stellen eine große Bandbreite an technisch aufwendigen Verfahren zur Steigerung der Wasserstoffausbeute vor. Dazu zählen mehrstufige Reaktorkonzepte, gekoppelte Reformierungsprozesse und speziell entwickelte Katalysatoren. Unter Laborbedingungen lassen sich damit teilweise hohe Wasserstoffausbeuten erzielen, allerdings sind diese Ansätze oft mit komplexer Technik, hohem Energieeinsatz und idealisierten Bedingungen verbunden. Viele der beschriebenen Studien arbeiten daher mit sortenreinen Kunststoffen wie PE, PP oder PET, um gut vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Reale Abfallströme bestehen jedoch meist aus gemischten, verunreinigten oder beschichteten Kunststoffen, die sich so nicht ohne Weiteres abbilden lassen. Unser Projekt setzt genau an dieser Stelle an. Wir wollen nicht die in der Literatur beschriebenen Hochleistungsverfahren nachbauen, sondern untersuchen, welches Potenzial zur Wasserstoffgewinnung sich mit vergleichsweise einfacher Technik, überschaubarem Energieeinsatz und praxisnahen Kunststoffabfällen erschließen lässt. Damit bewegen wir uns bewusst zwischen Grundlagenforschung und praktischer Anwendung und prüfen, wie gut sich theoretische Konzepte unter realistischeren Bedingungen umsetzen lassen.

#### 3.3 Relevanz für unser Projekt

Zusammenfassend zeigen die beiden Übersichtsarbeiten, dass die Pyrolyse von Kunststoffen ein aktuelles und relevantes Forschungsfeld ist, dessen Ergebnisse stark von der jeweiligen Prozessführung abhängen. Während die Herstellung flüssiger Kraftstoffe ökologische und gesundheitliche Grenzen aufweist, bietet die gezielte Wasserstoffgewinnung die Möglichkeit, Kunststoffabfälle als Ressource für einen CO<sub>2</sub>-armen Energieträger zu nutzen. Diese Einordnung bildet die theoretische Grundlage für unsere Experimente und begründet die bewusste Entscheidung, den Fokus unseres Projekts auf Wasserstoff statt auf Kraftstoffe zu legen.

## 4. Vorgehensweise, Materialien und Methoden

Dieses Kapitel beschreibt die experimentelle Vorgehensweise, den technischen Aufbau sowie die verwendeten Materialien und Sicherheitsmaßnahmen. Ziel ist es, das methodische Vorgehen nachvollziehbar darzustellen. Ergebnisse und deren Bewertung sind nicht Bestandteil dieses Kapitels und werden in Kapitel 5 behandelt.

### 4.1 Gesamtstrategie und Vorgehensplan

Ziel des Projekts war der Aufbau und die schrittweise Weiterentwicklung eines Pyrolysesystems im Labormaßstab zur Untersuchung der Wasserstoffherzeugung aus Kunststoffabfällen. Der Ansatz war bewusst praxisnah gewählt. Statt eines einmalig geplanten Aufbaus wurde iterativ gearbeitet: Konstruktion, Testlauf, Beobachtung von Problemen, technische Anpassung und erneuter Testlauf. Auf diese Weise konnte der Reaktor kontinuierlich verbessert und an reale Betriebsbedingungen angepasst werden.

### 4.2 Entwicklung und Aufbau des Reaktors

#### 4.2.1 Reaktor 1 – erster Batch-Reaktor

Der erste Batch-Reaktor bestand aus einem Hohlzylinder aus verzinktem Stahlrohr (Baumarkt-Rohrfittings). Um Zinkemissionen bei hohen Temperaturen zu vermeiden, wurden die Bauteile chemisch mit Salzsäure entzinkt. Der Reaktor war unten und oben mit aufschraubbaren Kappen versehen. Auf der oberen Kappe wurde ein dünneres Rohrstück (Nippel) aus gleichem Material angebracht und mit dem größeren Rohr verschweißt, sodass sich ein nach oben verjüngender Aufbau ergab, der als Gasauslass diente. Als einziges aktives Bauteil zur Gasfreisetzung wurde zunächst ein elektrisch betätigtes Magnetventil (bis 32 bar) eingesetzt. Weitere Messinstrumente wie Drucksensoren waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorhanden. Der Reaktor wurde in einer provisorischen Heizkammer aus Porenbetonsteinen (Ytong) betrieben. Diese war kastenförmig aufgebaut, oben zu öffnen und besaß eine Durchführung für den Reaktor. Die Heizkammer wurde mit Feuerzement fixiert und mit Metalllochband mechanisch stabilisiert. Als Heizelement kam eine einfache Heizspirale zum Einsatz, die direkt mit Netzspannung betrieben und über einen einfachen Temperaturregler (Ein/Aus-Regelung über Solid-State-Relais) gesteuert wurde. Erste Tests mit Lampenöl zeigten, dass trotz angezeigter Ofentemperaturen von 200–300 °C kaum Druck aufgebaut wurde. Daraus wurde geschlossen, dass die tatsächliche Reaktortemperatur deutlich unter der gemessenen Ofentemperatur lag. Bei etwa 250 °C kam es zudem zum Ausfall der Heizspirale.

#### 4.2.2 Weiterentwicklung von Heizung und Isolierung

Da unbehandelter Porenbeton bei hohen Temperaturen spröde wurde, wurde die Innenfläche der Heizkammer zunächst mit reflektierendem Feuerbeton beschichtet, um Wärmestrahlung zurück in den Ofenraum zu reflektieren. Dies verbesserte die Wärmehaltung, jedoch musste die Heizspirale weiterhin mit hohem Einschaltanteil arbeiten. Zusätzlich wurde Keramikwolle eingesetzt. Zunächst kam nicht biolösliche Keramikwolle zum Einsatz, wodurch der Energiebedarf deutlich reduziert werden konnte. Aufgrund möglicher Gesundheitsgefahren durch lungengängige Fasern wurde auf diese Art der Keramikwolle im weiteren Verlauf bewusst verzichtet. In einem späteren Aufbau wurde eine dickere, biolösliche Keramikwolle verwendet. Dadurch konnte die notwendige mittlere Heizleistung zum Halten von ca. 1000 °C erheblich reduziert werden. Bei einer Heizspirale mit 2500 W Nennleistung lag der erforderliche Einschaltanteil bei etwa 30 %, was einer mittleren Leistungsaufnahme von rund 750 W entspricht. Für eine Haltephase von 20 Minuten ergibt sich damit ein Energiebedarf von etwa 0,25 kWh. Im Vergleich dazu lag der Energiebedarf beim ursprünglichen Aufbau je nach Isolierungszustand bei etwa 0,5–0,8 kWh. Die Außentemperatur des Gehäuses lag nach ca. 20 Minuten Betrieb bei etwa 40–50 °C. Durch aktive Kühlung und Absaugung konnten diese Temperaturen weiter begrenzt werden.

#### 4.2.3 Dichtheit, Kühlung und Materialprobleme

Bei fortgeschrittenen Versuchen traten Undichtigkeiten an verschraubten Gewinden auf, was zu Gasaustritt und Flammenbildung führte. Das untere Gewinde wurde daraufhin verschweißt, während das obere Gewinde zunächst lösbar bleiben sollte. Verschiedene Hochtemperatur-Dichtmittel wurden getestet. Zum Einsatz kamen zunächst eine keramische Montage- und Dichtpaste aus dem Kfz-Bereich (Bremsen-/Keramikpaste), die die Temperaturen zwar kurzzeitig tolerierte, unter Druck jedoch wieder aus den Gewinden gepresst wurde. Anschließend wurde ein hochtemperaturbeständiger keramischer Schraubensicherungs- und Dichtklebstoff (Hot-Lock™) verwendet, der eine gute Dichtwirkung zeigte, das Gewinde jedoch dauerhaft fixierte und ein späteres Öffnen des Reaktors verhinderte. Nach mehreren Iterationen wurden die relevanten Bereiche verschweißt. Mangels Druckmessung kam es bei einem späteren Versuch zu einem strukturellen Versagen des Reaktorrohrs an einer Schweißnaht, wodurch der Reaktor beschädigt wurde. Der Aufbau wurde daraufhin grundlegend überarbeitet. Bei der nächsten Version wurde ein wassergekühlter Kühler eingesetzt. Während des Betriebs verfärbte sich das Kühlwasser rötlich, und es bildeten sich Rostpartikel. Daraus wurde geschlossen, dass der entzinkte Stahl im gekühlten Bereich korrodierte. Der Reaktor wurde erneut aufgebaut, wobei nur noch der stark erhitzte Bereich entzinkt wurde. Zusätzlich wurde der Kühlkreislauf mit destilliertem Wasser betrieben. Weitere Versuche zeigten starke thermische Spannungen im Übergangsbereich zwischen heißem Reaktor (800–1000 °C) und Wasserkühlung. Um diese zu reduzieren, wurde das Kühlmedium von Wasser auf vorgewärmtes Öl (ca. 150 °C) umgestellt. Dadurch konnten Materialschäden vermieden werden.

#### 4.2.4 Reaktor 2 – nachgeschalteter Katalysatorreaktor

Da viele Katalysatoren die hohen Temperaturen des Primärreaktors nicht vertrugen, wurde ein zweiter, nachgeschalteter Reaktor aufgebaut. Nach dem Magnetventil wurde ein Druckminderer installiert, um den Reaktordruck zu reduzieren. Das Gas wurde anschließend auf etwa 30 °C abgekühlt und in den zweiten Reaktor geleitet. Dieser bestand aus einem Edelstahlrohr, das auch mit Feuerzement beschichtet war. Um das Rohr wurde eine Heizspirale angebracht und der gesamte Aufbau mit Keramikwolle isoliert. Der direkte Einsatz des Edelstahlrohrs als Reaktionsraum erwies sich jedoch als problematisch, da an den erforderlichen Anschlüssen keine dauerhaft gasdichte Abdichtung realisiert werden konnte. Aus diesem Grund wurde für die Aufnahme der Katalysatoren ein Glasrohr mit Normschliff verwendet, das in das Edelstahlrohr eingelegt wurde. Der Zwischenraum zwischen Glas- und Edelstahlrohr wurde mit Sand gefüllt, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erreichen und gleichzeitig Dichtheitsprobleme zu vermeiden. In das Glasrohr wurden Keramikwolle und die jeweiligen Katalysatoren eingebracht.

### 4.3 Materialien

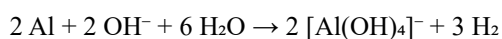
#### 4.3.1 Kunststoffe

Im ersten Schritt wurden gezielt sortenreine Kunststoffe untersucht, um grundlegende Vergleichbarkeit zwischen den Versuchen zu gewährleisten. Als Polyethylen (PE) wurde eine Labor-Aufbewahrungsflasche verwendet, die laut Kennzeichnung aus reinem PE bestand. Diese wurde mechanisch zerkleinert, abgewogen und anschließend direkt in den Reaktor eingebracht. Für Polypropylen (PP) wurde ein Joghurtbecher verwendet, dessen Material anhand der Materialkennzeichnung identifiziert wurde. Auch dieser wurde zerkleinert, abgewogen und ohne weitere Vorbehandlung eingesetzt. Polystyrol (PS) wurde in Form von Styropor untersucht. Um das Volumen zu reduzieren und eine gleichmäßigere Dosierung zu ermöglichen, wurde das Styropor zunächst in Aceton gelöst und anschließend getrocknet. Das zurückbleibende Polystyrol wurde danach zerkleinert und im Reaktor eingesetzt. Als weiteres Referenzmaterial wurde Polyethylenterephthalat (PET) verwendet. Hierfür wurde eine PET-

Getränkeflasche zerkleinert und direkt eingesetzt. In dieser ersten Versuchsphase wurden bewusst keine Kunststoffmischungen verwendet. In einem zweiten Schritt wurden praxisnahe Kunststoffgemische untersucht. Diese bestanden aus einer Mischung verschiedener Kunststoffabfälle aus der Plastiktonne, aus im Wald aufgefundenen Kunststoffresten sowie aus Meeresplastik. Die Proben enthielten bewusst auch typische Fremdstoffe wie Aluminiumanteile aus Verbundverpackungen (z. B. Joghurtdeckel), Farbstoffe, Beschichtungen und organische Verunreinigungen, um realistische Abfallströme möglichst realitätsnah abzubilden. Zusätzlich wurden Kunststoffreste aus der Umwelt (z. B. beim Sammeln im Wald gefundene Kunststoffteile) untersucht. Um das Risiko der Freisetzung halogenhaltiger, potenziell giftiger Zersetzungsprodukte zu minimieren, wurden diese Proben vorab mittels Beilsteinprobe auf Halogene geprüft. Nur Proben mit negativem Testergebnis wurden in die Versuchsreihen aufgenommen und anschließend als Teil einer gemischten Kunststoffprobe eingesetzt.

#### 4.3.2 Katalysatoren

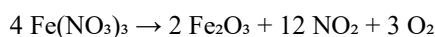
Als erster Katalysator wurde Raney-Nickel eingesetzt, der im Rahmen des Projekts selbst hergestellt wurde. Ausgangsstoffe waren Nickelpulver und Aluminium. Diese wurden in einem molaren Verhältnis von etwa 2:1 (Nickel : Aluminium) eingesetzt. Ein geringer Anteil Mangan wurde zusätzlich zugesetzt. Mangan wirkt in Nickellegierungen als Gefügestörer. Aufgrund unterschiedlicher Atomradien und Kristallstrukturen entstehen Gitterverzerrungen und innere Spannungen im Metallgefüge. Dies erhöht die Sprödigkeit der Legierung und erleichtert die spätere mechanische Zerkleinerung, wodurch eine größere spezifische Oberfläche für die Aktivierung erreicht wird. Die Metalle wurden gemeinsam in einem Tiegelofen aufgeschmolzen. Um eine spröde, gut weiterverarbeitbare Legierung zu erhalten, wurde die Metallschmelze anschließend rasch in kaltes Wasser gegossen, wodurch sich kleine, unregelmäßige Partikel bildeten. Die erstarrte Legierung wurde anschließend mechanisch weiter zerkleinert und in einer Kugelmühle gemahlen. Aufgrund der hohen Sprödigkeit der Legierung war eine weitere Zerkleinerung gut möglich. Die Aktivierung zum Raney-Nickel erfolgte durch Auslaugen des Aluminiums. Dazu wurde das gemahlene Material in einer etwa 5-molaren Natronlauge bei ca. 70 °C für ungefähr 30 Minuten behandelt. Die selektive Auflösung des Aluminiums in Natronlauge erfolgt gemäß:



Dabei wird Aluminium oxidiert, während Wasser reduziert wird. Das Nickel bleibt als hochporöse Metallstruktur zurück. Der resultierende Katalysator wurde anschließend mehrfach mit Wasser ausgewaschen, um Reste der Natronlauge zu entfernen, und bis zum Einsatz unter Wasser gelagert, um Oxidation zu vermeiden. Nickel würde an Luft teilweise zu Nickel(II)-oxid oxidieren:

$2 \text{ Ni} + \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ NiO}$  . Für die Versuche wurde der Raney-Nickel ausschließlich im nachgeschalteten Reaktor (Reaktor 2) eingesetzt. Zunächst wurde Keramikwolle als Stütze eingebracht, gefolgt von einer keramischen Gewebeunterlage, wie sie auch in Brenn- oder Töpferöfen verwendet wird. Diese diente dazu, den Katalysator mechanisch zu fixieren und ein Durchrieseln zu verhindern. Darauf wurde der Raney-Nickel aufgebracht, anschließend erneut mit keramischem Gewebe abgedeckt. Vor dem Katalysator wurde zusätzlich eine dünne Schicht Aktivkohle eingesetzt, um grobe Partikel aus dem Gasstrom zurückzuhalten. Vor Beginn eines Versuchs wurde der Reaktor mit Argon auf einen Druck von etwa 4–5 bar beaufschlagt. Anschließend wurde das System kurzzeitig gespült, indem das Ventil geöffnet wurde, sodass der zweite Reaktor vollständig mit Argon geflutet und Sauerstoff verdrängt wurde. Danach wurde der Röhrenofen aufgeheizt. Zunächst erfolgte eine Trocknungsphase des Katalysators bei etwa 150–200 °C unter kontinuierlichem, geringem Argonstrom. Nach Abschluss dieser Phase wurde das Ventil geschlossen und der eigentliche Versuchsdurchlauf gestartet. Als weiterer Katalysator wurde ein kommerzieller Perlkatalysator eingesetzt, wie er auch zum Cracken von Kohlenwasserstoffen in technischen

Anwendungen verwendet wird. Dieser Katalysator erforderte keine chemische Vorbehandlung. Er wurde direkt in den zweiten Reaktor eingebracht. Der Aufbau entsprach dabei grundsätzlich demjenigen des Raney-Nickel-Katalysators. Zunächst wurde Keramikwolle zur mechanischen Fixierung eingebracht, darauf der Perlkatalysator positioniert und anschließend erneut mit Keramikwolle abgedeckt. Zusätzlich wurde keramisches Fasergewebe eingesetzt, um ein Verrutschen oder Durchrieseln der Katalysatorperlen zu verhindern. Vor dem Katalysator wurde eine Schicht Aktivkohle platziert, um feste Partikel aus dem Gasstrom zurückzuhalten. Abschließend wurde der Katalysatorraum mit weiterem keramischem Fasergewebe abgeschlossen und der Reaktor verschlossen. Da der Perlkatalysator bereits in aktivierter Form vorlag, war vor dem eigentlichen Versuch keine separate Trocknungs- oder Aktivierungsphase erforderlich. Als weiterer Katalysator wurde Eisenoxid auf Aluminiumoxid eingesetzt, angelehnt an in der Literatur beschriebene Systeme. Als Trägermaterial dienten Aluminiumoxid-Pellets, wie sie auch als Trocknungsmittel oder in Wasserfiltersystemen verwendet werden. Diese Pellets wurden zunächst ohne Beschichtung im Ofen vorgeheizt, um flüchtige, herstellungsbedingte Bestandteile zu entfernen. Dabei wurde beobachtet, dass unbehandelte Pellets beim Erhitzen Wasserdampf freisetzen, was auf eingelagerte Feuchtigkeit oder organische Rückstände zurückzuführen ist. Durch diese Vorbehandlung sollten spätere Störeinflüsse auf die Gaszusammensetzung minimiert werden. Anschließend wurden die vorgetrockneten Aluminiumoxid-Pellets mit einer Eisen(III)-nitrat-Lösung benetzt. Die imprägnierten Pellets wurden danach in einem Ofen unter Sauerstoffatmosphäre auf etwa 500–600 °C erhitzt. Die thermische Zersetzung des Eisen(III)-nitrats kann vereinfacht beschrieben werden als:



Dabei entsteht Eisen(III)-oxid auf der Oberfläche des Aluminiumoxids.

Das so hergestellte Eisenoxid/Aluminiumoxid-Katalysator wurde ohne weitere Aktivierung direkt im zweiten Reaktor eingesetzt. Der mechanische Aufbau entsprach dabei dem der anderen Katalysatoren, mit keramischer Fixierung und vorgeschalteter Aktivkohleschicht. Auf den Einsatz von Edelmetallkatalysatoren (z. B. Platin-, Palladium- oder Rhodium-basierte Systeme) wurde im Rahmen dieses Projekts bewusst verzichtet. Obwohl solche Katalysatoren in der Literatur häufig eine sehr hohe katalytische Aktivität zeigen, standen sie aufgrund ihres hohen Kostenfaktors und der begrenzten Projektmittel nicht zur Verfügung. Stattdessen lag der Fokus auf kostengünstigen, gut verfügbaren und selbst herstellbaren Katalysatorsystemen, die für eine potenzielle Anwendung mit realen Kunststoffabfällen praktikabler erscheinen.

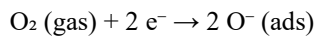
#### 4.4 Durchführung der Pyrolyseversuche

Die Versuche wurden im Batch-Betrieb durchgeführt. Nach dem Einbringen der Probe und ggf. des Katalysators wurde der Reaktor verschlossen, auf Dichtheit geprüft und anschließend aufgeheizt. Nach einer definierten Haltezeit wurde der Reaktor kontrolliert abgekühlt. Parameter wie Kunststofftyp, Katalysator und Temperaturbereich wurden systematisch variiert.

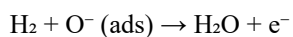
#### 4.5 Mess- und Nachweismethoden

Zur Abschätzung der erzeugten Gasmenge wurde das Innenvolumen des Reaktors bestimmt, indem dieser vollständig mit Wasser befüllt und das Volumen gemessen wurde. Zusätzlich wurde zur abschließenden Abschätzung der Wasserstoffkonzentration ein System aus drei MQ-8-Halbleitersensoren eingesetzt. Die drei Sensoren wurden parallel über einen Arduino angesteuert und zeitgleich ausgelesen. Da einzelne MQ-8-Sensoren vergleichsweise unpräzise und driftenfällig sind, wurde zur Erhöhung der Messstabilität der arithmetische Mittelwert aus allen drei Sensorsignalen gebildet. Der angegebene Wasserstoffwert ergibt sich somit aus der Summe der drei Einzelmesswerte, dividiert durch drei, und stellt einen gemittelten Näherungswert dar. Die

MQ-8-Sensoren sind laut Datenblatt für einen Messbereich von etwa 100 bis 1000 ppm Wasserstoff ausgelegt und eignen sich daher nicht für die direkte Messung hochkonzentrierter Wasserstoff-Gasströme. Um die Sensoren dennoch einsetzen zu können, wurde das Pyrolysegas vor der Messung gezielt mit Luft verdünnt. Das Funktionsprinzip der eingesetzten MQ-8-Sensoren basiert auf einem halbleitenden Metalloxid, typischerweise Zinn(IV)-oxid (SnO<sub>2</sub>). Bei erhöhter Betriebstemperatur adsorbiert Sauerstoff aus der Umgebungsluft an der Oberfläche des Sensors und wird dort unter Elektronenaufnahme chemisch gebunden:



Durch diese Elektronenaufnahme entsteht im Halbleiter eine sogenannte Elektronenverarmungszone, wodurch der elektrische Widerstand des Sensors ansteigt. Gelangt nun ein reduzierendes Gas wie Wasserstoff an die Sensoroberfläche, reagiert es mit dem adsorbierten Sauerstoff:



Dabei werden Elektronen wieder in das Leitungsband des Halbleiters zurückgeführt. Die Elektronenkonzentration steigt, der elektrische Widerstand sinkt messbar. Die Widerstandsänderung ist proportional zur Konzentration des reduzierenden Gases im Messbereich.

Da auch andere reduzierende Gase wie Kohlenmonoxid oder niedere Kohlenwasserstoffe vergleichbare Reaktionen eingehen können, besitzen MQ-8-Sensoren eine gewisse Querempfindlichkeit. Der gemessene Wasserstoffwert stellt daher einen Näherungswert dar und kann durch das Vorhandensein weiterer reduzierender Gasbestandteile beeinflusst werden.

Als Trägermedium diente Umgebungsluft, die über einen Luftkompressor zugeführt wurde. Die Gasströme wurden über zwei hintereinandergeschaltete Durchflussmesser erfasst: ein Durchflussmesser im Milliliter- bis Liter-pro-Minute-Bereich für das Pyrolysegas sowie ein zweiter Durchflussmesser im Bereich von etwa 1,6 bis 16 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> für die zugeführte Luft. Durch die gezielte Einstellung beider Volumenströme konnte ein definierter Verdünnungsfaktor realisiert werden. Der Verdünnungsfaktor ergibt sich näherungsweise aus dem Verhältnis des Luftvolumenstroms zum Pyrolysegasstrom. Die gemessene Wasserstoffkonzentration stellt daher keine absolute Konzentration des Rohgases dar, sondern einen verdünnten Messwert, aus dem die ursprüngliche Konzentration über den bekannten Verdünnungsfaktor näherungsweise zurückgerechnet werden kann. Die Kalibrierung der drei MQ-8-Sensoren erfolgte mit reinem Wasserstoff unter definierten Bedingungen. Dadurch wurde sichergestellt, dass alle Sensoren vergleichbare Ausgangssignale liefern und systematische Abweichungen zwischen den einzelnen Sensoren minimiert werden konnten.

Die Dichtheit des Reaktors wurde über Druckhalteversuche überprüft. Bei einem Anfangsdruck von etwa 12 bar zeigte sich über eine Stunde lediglich ein Druckabfall von ca. 0,2 bar. Die Ursache dieses geringen Verlustes konnte nicht eindeutig bestimmt werden. Eine Gaschromatographie war geplant und ein entsprechendes Gerät wurde beschafft. Der Gaschromatograph stammte aus einer Laborauflösung in Weimar und es handelte sich um ein Gerät des Typs HP 5890 Series II, ausgestattet mit zwei Wärmeleitfähigkeitsdetektoren (TCD). Dem Gerät lag jedoch ausschließlich eine Kapillarsäule bei, die für den Nachweis größerer Moleküle ausgelegt war. Diese Säule lieferte für die im Projekt untersuchten Gase, insbesondere Wasserstoff, keine vergleichbaren oder aussagekräftigen Ergebnisse. Eine geeignete Säule für die Trennung und quantitative Bestimmung kleiner Gasmoleküle stand nicht zur Verfügung. Im Rahmen einer Informationsveranstaltung zur Erstellung der schriftlichen Arbeit wurde nach geeigneten Ansprechpersonen gefragt, um Unterstützung bei der Beschaffung oder Ausleihe einer geeigneten Gassäule zu erhalten. Hintergrund war, dass eine Neuanschaffung einer passenden Kapillarsäule aufgrund der hohen Kosten nicht über den vorgesehenen Jugend-forscht-Sponsor-Pool abgerechnet werden sollte. In diesem

Zusammenhang wurde eine Kontakt-E-Mail-Adresse genannt, an die eine entsprechende Anfrage gerichtet wurde. Über diese E-Mail wurde nach der Möglichkeit gefragt, eine geeignete Säule auszuleihen oder Zugang zu einer passenden gaschromatographischen Messung zu erhalten. Auf diese Anfrage erfolgte jedoch keine Rückmeldung. Weitere konkrete Unterstützungsmöglichkeiten ergaben sich daraus nicht, sodass der Gaschromatograf im Rahmen dieses Projekts nicht für belastbare quantitative Messungen eingesetzt werden konnte.

#### 4.6 Schwierigkeiten, Anpassungen und Grenzen

Im Projektverlauf traten zahlreiche technische Herausforderungen auf, darunter Undichtigkeiten, Materialversagen, unzureichende Isolierung und begrenzte Messmöglichkeiten. Diese Probleme führten zu wiederholten Anpassungen des Aufbaus. Nicht alle ursprünglich geplanten Messungen konnten umgesetzt werden, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt wird.

#### 4.7 Sicherheitsmaßnahmen und Risikomanagement

Alle Versuche wurden im privaten Labor durchgeführt. Zu Beginn erfolgte der Betrieb ausschließlich im Abzug. Zur Erhöhung der Sicherheit wurden mechanische Schutzmaßnahmen umgesetzt. Das Gehäuse des finalen Reaktoraufbaus bestand aus Aluminiumprofilen und Stahlblech. An der Front wurde zusätzlich eine Polycarbonatscheibe integriert, die im Fall eines strukturellen Versagens oder einer Explosion des Reaktors als Splitterschutz dient. Die Absaugung wurde vor jedem Versuch überprüft. Der elektrische Aufbau besitzt eine klare Trennung zwischen Leistungs- und Steuerkreis. Der Leistungskreis ist über FI/RCD und Leitungsschutzschalter abgesichert. Ein Hauptschütz schaltet die Heizleistung zentral frei. Der Steuerkreis arbeitet mit 12 V. Der Not-Aus-Schalter deaktiviert den Schütz. Alle metallischen Bauteile sind geerdet. Heiße Oberflächen sind konstruktiv abgeschirmt. Vor jedem Versuch wurden Lecktests durchgeführt. Ein Schutztrenntransformator wurde geprüft, konnte jedoch aus Leistungs- und Kostengründen nicht eingesetzt werden. Die Sicherheitsmaßnahmen wurden nach jeder größeren Änderung am Aufbau überprüft und angepasst.

### 5. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Experimente dargestellt. Der Fokus liegt auf beobachtbaren Effekten, Messwerten und vergleichbaren Unterschieden zwischen den Versuchsreihen. Eine Bewertung oder Einordnung der Ergebnisse erfolgt erst im nachfolgenden Kapitel 6 (Ergebnisdiskussion).

#### 5.1 Übersicht über die durchgeführten Versuchsreihen

Die Experimente wurden in mehreren systematischen Versuchsreihen durchgeführt. Dabei wurden sowohl unterschiedliche Kunststoffarten als auch verschiedene Katalysatorsysteme untersucht. Zusätzlich wurden Versuche ohne Katalysator durchgeführt, um Referenzwerte zu erhalten. Die wichtigsten Versuchsparameter waren Kunststofftyp, Reaktortemperatur, Einsatz eines Katalysators sowie der Aufbau (einstufiger bzw. zweistufiger Reaktor).

## 5.2 Versuchsreihe A/B: Pyrolyse ohne Katalysator – Einfluss von Kunststofftyp und Temperatur

Tabelle 5.1: Pyrolyse ohne Katalysator – Enddruck im Reaktor in Abhängigkeit von Kunststofftyp und Temperatur

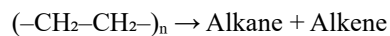
Kunststoff	600 °C – Enddruck (bar)	600 °C – Kondensate	800 °C – Enddruck (bar)	800 °C – Kondensate	900 °C – Enddruck (bar)	900 °C – Kondensate
PE	7,1	ölige Rückstände, starker Geruch	11,8	weniger Öl, aromatisch	21,1	kaum Öl, mehr Ruß
PP	6,1	ähnlich PE	16–17	leichte ölige Rückstände	22,6	verbackener Bodensatz
PS	9,4	stark aromatisch, ölig	10,0	weniger Ablagerungen	11,6	harter Rückstand
PET	4,5	alkoholischer Geruch, viele Rückstände	11,6	ölig, viele Rückstände	>30	Notablass, flockiger Ruß
Gemisch	6,2	keine Geruchsprüfung (Sicherheitsgründe)	—	—	28,9	grauliche Rückstände

Tabelle 5.2: Aus dem Enddruck berechnetes Gasvolumen bei 1 bar ( $V = p \cdot V_{\text{Reaktor}}, V_{\text{Reaktor}} = 0,7 \text{ L}$ )

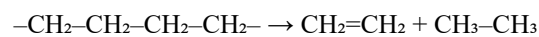
Kunststoff	600 °C – V(1 bar) [L]	800 °C – V(1 bar) [L]	900 °C – V(1 bar) [L]
PE	4,97	8,26	14,77
PP	4,27	11,2–11,9	15,82
PS	6,58	7,00	8,12
PET	3,15	8,12	>21,0
Gemisch	4,34	—	20,23

Bei PE traten bei 600 °C ausgeprägte ölige Kondensate und ein starker, unangenehmer Geruch auf. Mit steigender Temperatur nahm die Menge der flüssigen Rückstände deutlich ab. Gleichzeitig verringerte sich der Geruch, während der Anteil fester Kohlenstoffrückstände zunahm. Die thermische Zersetzung von Polyethylen erfolgt zunächst über radikalische Kettenbrüche entlang der C–C-Bindungen.

Vereinfachtes Modell:



Beispielhaft:



Bei niedrigeren Temperaturen dominieren größere, noch relativ langkettige Fragmente, die bei Raumtemperatur flüssig sind. Dies erklärt die beobachteten öligen Kondensate. Bei 900 °C waren kaum noch ölige oder wachsartige Rückstände vorhanden, stattdessen dominierten feste, stark

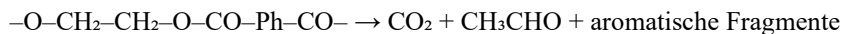
verbackene Ablagerungen. Polypropylen (PP) zeigte ein sehr ähnliches Verhalten wie Polyethylen. Bei niedrigen Temperaturen bildeten sich ebenfalls viele ölige Kondensate mit starkem Geruch. Die Reaktorwände waren deutlich mit Ruß bedeckt. Mit zunehmender Temperatur nahm der Ölanteil ab, während die festen Rückstände deutlich stärker verbacken und härter wurden, insbesondere bei 900 °C.

Polypropylen zersetzt sich vermutlich ebenfalls radikalisch, wobei durch die Methylseitenkette bevorzugt tertiäre Radikale entstehen. Dadurch bilden sich vermehrt verzweigte Alkene und Alkane.

Modellreaktion:  $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-)_n \rightarrow$  verzweigte Alkene + Alkane

Bei Polystyrol (PS) war bei 600 °C ein stark aromatischer Geruch wahrnehmbar, was auf den hohen Anteil aromatischer Zersetzungsprodukte zurückzuführen ist. Polystyrol depolymerisiert teilweise zurück zu Styrol:

$(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{Ph})-)_n \rightarrow n \text{ C}_6\text{H}_5-\text{CH}=\text{CH}_2$  Das erklärt auch den stark aromatischen Geruch. Mit steigender Temperatur verringerte sich der Geruch, während die Rückstände zunehmend fester und kompakter wurden. Bei 900 °C blieb überwiegend ein harter, kohlenstoffreicher Rückstand zurück. Bei der Pyrolyse von Polyethylenterephthalat (PET) trat bei 600 °C ein alkoholartiger, stechender Geruch auf, der auf höhermolekulare, vermutlich oxygenierte Spaltprodukte (z. B. Aldehyde) zurückgeführt werden kann. Modellhaft:



Bei 800 °C zeigten sich weiterhin ölige, schleimartige Rückstände. Erst bei 900 °C wandelten sich diese in überwiegend flockige, nicht mehr flüssige Rückstände um. Bei den Kunststoffgemischen wurde bewusst auf eine Geruchsprobe verzichtet, da trotz vorheriger Halogenprüfung die Bildung toxischer Verbindungen nicht sicher ausgeschlossen werden konnte. Die festen Rückstände unterschieden sich optisch deutlich von den Reinstoffen und waren häufig heller graulich gefärbt, was auf Anteile aluminiumhaltiger Verbundmaterialien hindeutet. Die Gasentwicklung blieb jedoch grundsätzlich erhalten. Die Abschätzung der Gasmenge (Batch-Betrieb) gestaltete sich schwierig, da keine kontinuierliche Durchflussmessung möglich war, wurde das Gas vollständig im Reaktor gesammelt und nach Abschluss der Pyrolyse entspannt. Bei einem Reaktorvolumen von ca. 0,7 L und einem

Enddruck von etwa 30 bar ergibt sich unter Annahme idealen Gasverhaltens eine freigesetzte Gasmenge von ca. 21 L bei Normaldruck (1 bar).

### 5.3 Versuchsreihe C: Pyrolyse mit Katalysator

#### 5.3.1 Pyrolyse von Kunststoffgemischen (Abfall) – Mittelwerte

Zusätzlich zu den Versuchen mit sortenreinen Kunststoffen wurden praxisnahe Kunststoffgemische untersucht.

Tabelle 5.3: Durchschnittliche Wasserstoffanteile bei der Pyrolyse von Kunststoffgemischen (Mittelwert aus drei Gemischen)

Katalysator	600 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	800 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	900 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	Beobachtungen
ohne Katalysator	<5	12	15	Pyrolysegas verbrennt rußend
Raney-Nickel	<5	<5	10	weniger Ruß, Katalysator dunkelt nach, Massezunahme ~20 %
Perlkatalysator	29	36	41	rußfreie Flamme, temperaturabhängig
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23	37	44	saubere Flamme über alle Temperaturbereiche

waren insgesamt ähnlich. Auffällig war jedoch, dass das Gemisch aus haushaltsüblichem Kunststoffabfall

Tabelle 5.4: Einfluss verschiedener Katalysatoren auf Polyethylen (PE)

Katalysator	600 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	800 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	900 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	Beobachtungen
ohne Katalysator	<5	<5	7	Pyrolysegas verbrennt rußend
Raney-Nickel	<5	<5	<5	weniger Ruß, Katalysator dunkelt nach, Massezunahme ~40 %
Perlkatalysator	43	40	33	wenig Ruß, zu Beginn zunehmende Aktivität
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55	57	61	kaum Ruß, nahezu unsichtbare Flamme

insgesamt weniger Verbundmaterialien und metallische Fremdstoffe. Die festen Rückstände aller Gemischversuche waren auffallend hell gefärbt. Im Gegensatz zu den Reinstoffen dominierten keine tiefschwarzen, kohlenstoffreichen Ablagerungen. Die helle Färbung wird auf die enthaltenen anorganischen Bestandteile zurückgeführt, insbesondere auf Aluminium aus Verbundverpackungen sowie weitere mineralische

Tabelle 5.5: Einfluss verschiedener Katalysatoren auf Polypropylen (PP)

Katalysator	600 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	800 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	900 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	Beobachtungen
ohne Katalysator	<5	<5	<5	vergleichbar mit PE
Raney-Nickel	0 (kein Widerstand)	<5	<5	keine messbare Aktivität
Perlkatalysator	36	38	32	rußfreie Flamme, temperaturabhängig
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	54	58	62	vergleichbar mit PE, stabile Flamme

traten ohne Katalysator bei 600 °C ausgeprägte ölige Rückstände und ein starker Geruch auf. Mit steigender Temperatur nahm die Menge der flüssigen Kondensate deutlich ab. Gleichzeitig erhöhte sich der Anteil fester,

Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zusammen. Die angegebenen Wasserstoffanteile stellen arithmetische Mittelwerte aus drei unterschiedlichen Kunststoffgemischen dar. Untersucht wurden: Kunststoffabfälle aus der Plastiktonne (haushaltsüblicher Kunststoffmüll), im Wald aufgefundene Kunststoffresten, an Stränden gesammeltes Meeresplastik. Die Messwerte jedes Gemischs wurden jeweils aus drei parallel betriebenen MQ-8-Sensoren gemittelt. Anschließend wurden die Ergebnisse der drei Gemische erneut gemittelt, um einen repräsentativen Näherungswert für realistische Kunststoffabfälle zu erhalten. Die Ergebnisse der drei Gemische

tendenziell geringere Wasserstoffanteile aufwies als die beiden anderen Proben. Dies lässt sich plausibel auf den höheren Anteil an Fremdstoffen zurückführen. Im Kunststoff aus der Plastiktonne befanden sich neben unterschiedlichen Polymerarten auch Aluminiumreste, beispielsweise aus Joghurtdeckeln, sowie organische Verunreinigungen. Diese Bestandteile beeinflussen die Pyrolyse negativ und reduzieren vermutlich den effektiv verfügbaren Wasserstoffanteil. Die Gemische aus Wald- und Meereskunststoffen zeigten sehr ähnliche Wasserstoffwerte. Diese Kunststoffe waren zwar ebenfalls gealtert, enthielten jedoch

insgesamt weniger Verbundmaterialien und metallische Fremdstoffe. Die festen Rückstände aller Gemischversuche waren auffallend hell gefärbt. Im Gegensatz zu den Reinstoffen dominierten keine tiefschwarzen, kohlenstoffreichen Ablagerungen. Die helle Färbung wird auf die enthaltenen anorganischen Bestandteile zurückgeführt, insbesondere auf Aluminium aus Verbundverpackungen sowie weitere mineralische und organische Ablagerungen. Beim Einsatz von Eisenoxid auf Aluminiumoxid verstärkte sich dieser Effekt zusätzlich, da der Katalysator selbst helle Oxidphasen enthält und den Rückstand optisch weiter aufhellt. Ohne Katalysator war das erzeugte Gas bei 600 °C kaum entzündlich. Erst ab etwa 800 °C ließ sich eine instabile, stark rußende Flamme beobachten. Im Vergleich dazu führten die katalytischen Versuche zu deutlich besserer Brennbarkeit und sichtbar saubereren Flammen. Bei der Pyrolyse von Polyethylen

Tabelle 5.6: Einfluss verschiedener Katalysatoren auf Polystyrol (PS)

Katalysator	600 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	800 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	900 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	Beobachtungen
ohne Katalysator	0	<5	<5	bei 600 °C Ventil durch Öle zugesetzt, Schlauch wird porös
Raney-Nickel	<5	<5	<5	vergleichbar mit ohne Katalysator, lange Rußfäden bei Verbrennung
Perlkatalysator	<5	15	28	bei 600 °C starke Dunkelfärbung, später sauberere Flamme als Raney
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5–10	23	39	saubere Flamme über alle Temperaturbereiche

Temperaturen nahezu rußfrei.

Polypropylen zeigte ohne Katalysator

Tabelle 5.7: Einfluss verschiedener Katalysatoren auf Polyethylenterephthalat (PET)

Katalysator	600 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	800 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	900 °C – H <sub>2</sub> -Anteil [%]	Beobachtungen
ohne Katalysator	<5	<5	<5	Gas nicht entzündlich bei 600 °C, erst ab ca. 900 °C rußende Flamme
Raney-Nickel	<5	<5	10	Nickel wird schwarz und verklumpt, Flammenbild wie ohne Katalysator
Perlkatalysator	<5	15	23	ähnliches Flammenbild wie ohne Katalysator, jedoch weniger Ruß
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13	31	44	bei 900 °C Flamme kaum sichtbar, kein Ruß

600 °C kam es zu öl- und teerartigen Ablagerungen, die zu einer Verstopfung des Magnetventils führten. Elastomere Bauteile mussten nach den Versuchen ersetzt werden. Mit Raney-Nickel konnte keine relevante Wasserstoffbildung erreicht werden. Die Flamme zeigte lange Rußfäden und ähnelte dem unkatalysierten Betrieb. Der Perlkatalysator und der Eisenoxid-/Aluminiumoxid-Katalysator führten zu einer deutlichen Erhöhung des Wasserstoffanteils. Die Flamme war stabiler und deutlich sauberer, insbesondere beim Eisenoxid-/Aluminiumoxid-Katalysator. Bei PET zeigte sich ohne Katalysator ein stark sprunghafter Druckanstieg im Reaktor. Das erzeugte Gas war über alle Temperaturen hinweg nur schlecht entzündlich und verbrannte stark rußend. Beim Einsatz von Raney-Nickel trat eine messbare Wasserstoffbildung erst bei 900 °C auf. Der Katalysator war bereits nach kurzer Laufzeit stark mit Kohlenstoff bedeckt. Der Perlkatalysator führte zu höheren Wasserstoffanteilen, während beim Eisenoxid-/Aluminiumoxid-Katalysator bei 900 °C eine nahezu rußfreie, kaum sichtbare Flamme beobachtet wurde. Mit steigender Temperatur nahm der Wasserstoffanteil deutlich zu.

#### 5.4 Vergleich der Versuchsreihen

Im Vergleich der durchgeführten Versuchsreihen zeigte sich ein konsistenter Einfluss sowohl der Reaktortemperatur als auch des eingesetzten Katalysators auf die Zusammensetzung des Pyrolysegases. Ohne Katalysator war das erzeugte Gas über alle untersuchten Kunststoffe hinweg nur eingeschränkt entzündlich und wies geringe Wasserstoffanteile auf. Erst bei höheren Pyrolysetemperaturen ( $\geq 800$  °C) konnte eine stabile Entzündung beobachtet werden, wobei die Verbrennung häufig mit starker Rußbildung einherging.

stark verbackener Kohlenstoffrückstände. Bei 900 °C waren kaum noch ölige oder wachsartige Rückstände vorhanden. Beim Einsatz von Raney-Nickel wurde keine nennenswerte Erhöhung des Wasserstoffanteils beobachtet. Der Katalysator verfärbte sich stark, verklumpte und zeigte eine deutliche Massezunahme. Zusätzlich wurde im kühleren Bereich der Apparatur kondensiertes Wasser beobachtet. Der Perlkatalysator sowie der Eisenoxid-/Aluminiumoxid-Katalysator führten zu einer deutlichen Erhöhung des Wasserstoffanteils. Mit zunehmender Temperatur nahm die Rußbildung weiter ab. Besonders beim Eisenoxid-/Aluminiumoxid-Katalysator war die Flamme bei hohen

ein dem Polyethylen sehr ähnliches Verhalten. Bei 600 °C bildeten sich zahlreiche ölige Rückstände mit starkem Geruch, während das Pyrolysegas kaum entzündlich war. Erst ab etwa 800 °C ließ sich das Gas entzünden. Beim Einsatz von Raney-Nickel konnte bei 600 °C keine messbare Wasserstoffaktivität festgestellt werden. Auch bei höheren Temperaturen blieb der Wasserstoffanteil sehr gering. Der Perlkatalysator und der Eisenoxid-/Aluminiumoxid-Katalysator führten zu deutlich höheren Wasserstoffanteilen. Die Flamme war stabil und mit steigender Temperatur zunehmend rußfrei. Insgesamt lagen die Wasserstoffanteile etwas unter denen von Polyethylen, zeigten jedoch denselben Trend. Bei der Pyrolyse von Polystyrol trat ohne Katalysator über alle Temperaturbereiche hinweg ein stark aromatischer Geruch auf. Bereits bei

Der Einsatz eines nachgeschalteten Katalysatorreaktors führte bei allen untersuchten Kunststoffen zu einer deutlichen Erhöhung der gemessenen Wasserstoffanteile. Dabei zeigten sich reproduzierbare Unterschiede zwischen den Katalysatoren. Raney-Nickel wies insgesamt eine geringe Langzeitstabilität auf und zeigte bei mehreren Kunststoffen eine starke Verklumpung sowie eine deutliche Massezunahme. Die Wasserstoffanteile blieben hierbei niedrig oder nahmen im Verlauf der Versuche wieder ab. Der Perlkatalysator führte bei allen Kunststoffen zu einer messbaren Steigerung des Wasserstoffanteils, wobei die Gasqualität mit steigender Temperatur zunahm und die Rußbildung abnahm. Die höchsten und stabilsten Wasserstoffanteile wurden durchgehend mit dem Eisenoxid-/Aluminiumoxid-Katalysator erreicht. Insbesondere bei hohen Temperaturen zeigte sich hier eine sehr saubere, nahezu rußfreie Verbrennung. Über alle Versuchsreihen hinweg nahm mit steigender Pyrolysetemperatur der Anteil flüssiger Kondensate ab, während feste, kohlenstoffreiche Rückstände zunahmen. Die Unterschiede zwischen den Kunststoffarten blieben dabei erkennbar, folgten jedoch denselben grundlegenden Trends.

### 5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass die Pyrolyse von Kunststoffen grundsätzlich zur Erzeugung wasserstoffhaltiger Gase geeignet ist. Die Gasbildung setzt erst ab erhöhten Temperaturen ein und ist stark temperaturabhängig. Ohne den Einsatz eines Katalysators ist der Wasserstoffanteil gering und die Brennbarkeit des Gases eingeschränkt. Durch den Einsatz eines zweistufigen Reaktoraufbaus mit nachgeschaltetem Katalysator konnte die Wasserstoffausbeute deutlich gesteigert werden. Die Art des Katalysators beeinflusst sowohl die Höhe des Wasserstoffanteils als auch die Qualität des Pyrolysegases maßgeblich. Während Raney-Nickel nur eingeschränkt geeignet war, zeigten der Perlkatalysator und insbesondere der Eisenoxid-/Aluminiumoxid-Katalysator stabile und hohe Wasserstoffanteile. Die gewonnenen Ergebnisse bilden eine belastbare experimentelle Grundlage für die anschließende Ergebnisdiskussion.

### 5.6 Energetische Abschätzung (Idealwert und Vergleich mit einem Realversuch)

Diese Abschätzung dient dazu, die in Kapitel 2 formulierte Annahme („unter geeigneten Bedingungen potenziell teilweise energetische Selbstversorgung“) mit Zahlen zu unterlegen. Es handelt sich bewusst um eine Näherung, da in diesem Projekt keine vollständige Stoffbilanz und keine direkte Messung der tatsächlich in der Heizung umgesetzten Energie aus Wasserstoff durchgeführt wurde.

#### 5.6.1 Theoretischer Maximalfall (Idealbedingungen, Beispiel PE)

Als idealisiertes Referenzmodell wird Polyethylen als Wiederholungseinheit ( $-\text{CH}_2-$ ) betrachtet. Unter der Extremannahme, dass PE ohne Sauerstoff vollständig in festen Kohlenstoff und Wasserstoff gespalten wird und der gesamte Wasserstoff anschließend vollständig energetisch genutzt wird, gilt:  $-\text{CH}_2- \rightarrow \text{C}(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g})$ .

Pro 14 g Polymerbaustein ( $\text{CH}_2$ ) entstehen dabei idealisiert 1 mol  $\text{H}_2$  (2 g). Der energetische Heizwert (unterer Heizwert, LHV) von Wasserstoff beträgt ca. 241,8 kJ/mol. Damit ergibt sich als theoretischer Maximalwert pro Gramm PE:  $E_{\text{max}}(\text{PE}) = (1 \text{ mol} / 14 \text{ g}) \cdot 241,8 \text{ kJ/mol} \approx 17,3 \text{ kJ/g}$

Zum Vergleich: Um 1 g Kunststoff von etwa 25 °C auf 1000 °C zu erwärmen, liegt die benötigte sensible Wärme in der Größenordnung von  $Q \approx c \cdot \Delta T$ . Mit einer typischen Wärmekapazität von ca.  $c \approx 2,3 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  ( $= 0,0023 \text{ kJ}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ) und  $\Delta T \approx 975 \text{ K}$  ergibt sich:  $Q(1 \text{ g}) \approx 0,0023 \cdot 975 \approx 2,24 \text{ kJ/g}$

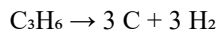
Unter diesen Idealbedingungen wäre die im Wasserstoff enthaltene Energie damit um etwa den Faktor 7–8 größer als die Energie, die allein zum Aufheizen der Kunststoffmasse auf 1000 °C benötigt wird. Das heißt: Rein energetisch könnte ein Teil des erzeugten Wasserstoffs theoretisch ausreichen, um die Probe selbst auf hohe Temperaturen zu bringen. Wichtig: Dieser Idealwert ignoriert vollständig (1) Wärmeverluste an die Umgebung,

(2) die Aufheizung der Reaktormasse, (3) Wärmeverluste durch Abgas, (4) endotherme Anteile der Zersetzung und (5) unvollständige Umsetzung zu H<sub>2</sub>.

### 5.6.2 Vergleich mit einem Realversuch (PP, bestes Ergebnis 62 % H<sub>2</sub>)

Für den Vergleich wird der beste gemessene Wasserstoffanteil aus den Experimenten verwendet: Polypropylen bei 900 °C mit Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (H<sub>2</sub>-Anteil 62 %). Zusätzlich liegt für PP bei 900 °C ohne Katalysator ein Enddruck von 22,6 bar bei einem Reaktorvolumen von 0,7 L vor. Daraus wurde ein Gesamtgasvolumen bei 1 bar von ca. 15,82 L berechnet (Tabelle 5.2). Für eine überschlägige Energiebilanz wird dieses Gesamtvolumen als Größenordnung für die freigesetzte Gasmenge herangezogen.

Aus 62 % H<sub>2</sub> folgt ein H<sub>2</sub>-Volumen von:  $V(\text{H}_2) \approx 0,62 \cdot 15,82 \text{ L} \approx 9,81 \text{ L}$ . Das entspricht näherungsweise  $n(\text{H}_2) \approx 9,81 \text{ L} / 22,4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \approx 0,44 \text{ mol}$ . Der energetische Gehalt (LHV) beträgt damit:  $E(\text{H}_2) \approx 0,44 \text{ mol} \cdot 241,8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \approx 106 \text{ kJ}$ . Diese ca. 106 kJ wären im Idealfall verfügbar, wenn der Wasserstoff vollständig genutzt würde. Zur Einordnung dieses Wertes ist es sinnvoll, den theoretisch maximal möglichen Wasserstofftrag aus Polypropylen zu bestimmen. Die Wiederholungseinheit von PP besitzt die Summenformel C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> und eine molare Masse von 42 g·mol<sup>-1</sup>. Im idealisierten Extremfall wird angenommen, dass der gesamte gebundene Wasserstoff vollständig als molekulares H<sub>2</sub> freigesetzt wird. Modellhaft lässt sich dies darstellen als:



Damit entstehen aus 1 mol PP-Einheit (42 g) maximal 3 mol H<sub>2</sub>. Die maximal mögliche Stoffmenge an Wasserstoff pro Gramm Polypropylen beträgt somit:

$n(\text{H}_2)_{\text{max}} = 3 \text{ mol} / 42 \text{ g} \approx 0,0714 \text{ mol} \cdot \text{g}^{-1}$ . Der maximal theoretisch verfügbare Energieinhalt pro Gramm PP ergibt sich damit zu:  $E_{\text{max}} \approx 0,0714 \text{ mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 241,8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \approx 17,3 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Polypropylen besitzt damit – bezogen auf vollständig freisetzbaren Wasserstoff – denselben theoretischen Grenzwert wie Polyethylen, da beide ein H/C-Verhältnis von 2 aufweisen. Zum Vergleich: Die zum Aufheizen der Kunststoffprobe erforderliche Energie lässt sich näherungsweise als 2,24 kJ pro Gramm Probe abschätzen. Damit entspricht die im Experiment berechnete Wasserstoffenergie von ca. 106 kJ grob der Energie, um etwa  $m_{\text{max}} \approx 106 \text{ kJ} / 2,24 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1} \approx 47 \text{ g}$  Kunststoff allein von Raumtemperatur auf 1000 °C zu erwärmen. Vergleicht man diesen Wert mit dem theoretischen Grenzfall, wird deutlich, dass im Experiment nur ein Teil des im Polymer gebundenen Wasserstoffs tatsächlich als molekulares H<sub>2</sub> freigesetzt wurde. Ein erheblicher Anteil verbleibt in Form von Methan, höheren Kohlenwasserstoffen oder aromatischen Verbindungen im Produktgas oder wird in Nebenreaktionen verbraucht. Die experimentellen 0,44 mol H<sub>2</sub> stellen daher eine reale, aber deutlich unterhalb der theoretischen Obergrenze liegende Ausbeute dar. Das Ergebnis zeigt: Selbst bei realistischen (nicht idealen) Messwerten kann der im Wasserstoff enthaltene Energieinhalt prinzipiell ausreichen, um die Kunststoffmasse zu erhitzen. Für eine tatsächliche energetische Selbstversorgung des Gesamtsystems reicht diese Abschätzung jedoch nicht aus, weil die Aufheizung des Reaktors, Wärmeverluste (Isolierung, Abgas, Strahlung) und die reale Umsetzbarkeit der Wasserstoffnutzung im Aufbau dominieren. In Kapitel 6 wird diese Abschätzung genutzt, um einzuordnen, ob und unter welchen technischen Bedingungen eine teilweise energetische Rückkopplung (z. B. Beheizung über einen Teil des erzeugten Gases) realistisch ist.

## 6. Ergebnisdiskussion

### 6.1 Zielsetzung und Einordnung der Ergebnisse

Ziel der Experimente war es, im Labormaßstab zu untersuchen, ob sich Kunststoffabfälle durch thermische Pyrolyse in wasserstoffhaltige Gase überführen lassen und welche Einflussfaktoren dabei entscheidend sind. Der Fokus lag dabei auf dem Vergleich verschiedener Kunststoffarten, Temperaturen und Katalysatorsysteme unter

praxisnahen Bedingungen. Die erzielten Ergebnisse erlauben vor allem vergleichende Aussagen. Es konnten reproduzierbare Trends in Bezug auf Temperatur, Kunststofftyp und Katalysatorwirkung beobachtet werden. Insbesondere zeigte sich, dass der Einsatz eines nachgeschalteten Katalysatorreaktors einen deutlichen Einfluss auf die Wasserstoffbildung und die Gasqualität hat. Eine vollständige quantitative Stoff- oder Energiebilanz war im Rahmen des Projekts nicht möglich. Die gemessenen Wasserstoffanteile stellen Näherungswerte dar und dienen primär dem relativen Vergleich zwischen den Versuchsbedingungen. Dennoch bilden die Ergebnisse eine belastbare Grundlage für die nachfolgende Diskussion der Stärken, Grenzen und des energetischen Potenzials des verwendeten Reaktorkonzepts.

### 6.2 Was gut funktioniert hat

Mehrere zentrale Aspekte des Projekts haben zuverlässig und nachvollziehbar funktioniert. Besonders positiv ist die grundsätzliche Funktionalität des überarbeiteten Reaktoraufbaus zu bewerten. Trotz einzelner notwendiger Reparaturen und Bauteilwechsel konnte der Reaktor über einen längeren Zeitraum stabil betrieben werden. Der kontinuierliche Wechsel zwischen hohen Betriebstemperaturen und Abkühlphasen wurde vom System insgesamt gut verkraftet, was für die grundsätzliche Eignung des Aufbaus für Pyrolyseexperimente spricht. Die experimentellen Ergebnisse waren in weiten Teilen reproduzierbar. Sowohl Gasvolumen als auch Druck- und Messwerte zeigten bei Wiederholungsversuchen vergleichbare Größenordnungen, was auf eine ausreichende Prozessstabilität und eine funktionierende Proben- und Messmethodik hinweist. Auch die eingesetzte Verdünnung der Pyrolysegase über Durchflussmesser erwies sich als praktikabel und ermöglichte konsistente Messungen unter vergleichbaren Bedingungen. Besonders deutlich traten Unterschiede in der Wirksamkeit der eingesetzten Katalysatoren hervor. Der sogenannte Perlkatalysator zeigte im Durchschnitt eine mittelmäßige, aber insgesamt positive Wirkung auf die Wasserstoffausbeute. Vermutlich liegt das daran, dass er mit mehreren verschiedenen Metallen beschichtet ist, die sich in ihrer Wirkung ergänzen. Dadurch konnte dieser Katalysator im Vergleich zu Raney-Nickel länger aktiv bleiben und insgesamt mehr Wasserstoff erzeugen. Sehr gute Ergebnisse wurden mit Eisenoxid auf Aluminiumoxid erzielt. Dieser Katalysator führte zu einer deutlichen Erhöhung der Wasserstoffausbeute und zu einer sichtbar saubereren Gasverbrennung. Auch die festen Rückstände auf dem Katalysator bedeckten ihn nicht vollständig, sondern lagerten sich in feinen Fasern und Pulver darauf an was auf eine weitergehende Zersetzung schwerer Kohlenwasserstoffe hindeutet. Dieses Verhalten erklärt, warum mit diesem Katalysator besonders viel Wasserstoff gebildet wurde. Auch die Wahl alternativer Dichtungsmaterialien erwies sich als entscheidender Fortschritt. Während Teflon unter den gegebenen Bedingungen nicht zuverlässig dicht hielt, zeigte die Kombination aus Neo-Fermit und Dichtungshanf eine deutlich bessere Beständigkeit. Selbst unter dauerhaftem Einfluss heißer Kohlenwasserstoffe blieb das System dicht, was die Betriebssicherheit des Reaktors spürbar erhöhte.

### 6.3 Probleme, Schwierigkeiten und Grenzen

Trotz der insgesamt erfolgreichen Durchführung traten mehrere Probleme und Einschränkungen auf. Besonders auffällig war die geringe Eignung des eingesetzten Raney-Nickel-Katalysators. Dieser neigte in nahezu allen Versuchen zu starker Zusetzung, wodurch der Gasdurchfluss eingeschränkt wurde. Gleichzeitig konnte keine Steigerung der Wasserstoffausbeute beobachtet werden. Außerdem kann Ni Hydrierung katalysieren und kann vermutlich so  $H_2$  im Pyrolysegas in andere Produkte überführen (z. B.  $CH_4$ -Bildung), zusätzlich kann es zu Deaktivierung durch Verkoken kommen. Diese Effekte erklären, warum Raney-Nickel in unserem Versuchsaufbau nicht gut funktionierte und frühzeitig deaktiviert wurde. Weitere Schwierigkeiten ergaben sich aus der Materialbelastung des Reaktors. Einzelne Stahlbauteile sowie das Barometer mussten aufgrund von Korrosion

oder Materialermüdung durch wiederholte Temperaturwechsel ersetzt werden. Dies verdeutlicht die hohen Anforderungen an die Materialwahl bei thermischen Prozessen. Grenzen zeigten sich zudem bei der analytischen Auswertung. Aufgrund der verfügbaren Messtechnik war es möglich, den Wasserstoffanteil zuverlässig zu erfassen und zwischen verschiedenen Versuchsbedingungen zu vergleichen. Eine vollständige quantitative Analyse der gesamten Gaszusammensetzung war jedoch nicht realisierbar. Insbesondere konnten die Konzentrationen weiterer relevanter Gaskomponenten wie Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Sauerstoff sowie unterschiedlicher Kohlenwasserstoffe nicht separat und exakt bestimmt werden. Die Ergebnisse erlauben daher vor allem belastbare relative Aussagen zur Veränderung der Wasserstoffausbeute in Abhängigkeit von Kunststofftyp und Katalysator, stellen jedoch keine vollständige Stoffbilanz des Pyrolysegases dar. Diese methodische Begrenzung schränkt die Aussagekraft nicht grundsätzlich ein, muss jedoch bei der Interpretation der Resultate berücksichtigt werden.

#### 6.4 Energetische Einordnung des Reaktorkonzepts

Die in Kapitel 5 durchgeführte energetische Abschätzung zeigt, dass unter idealisierten Annahmen der im Wasserstoff enthaltene Energieinhalt grundsätzlich ausreichen kann, um die Kunststoffprobe selbst auf Pyrolysetemperaturen zu erhitzen. Diese Aussage gilt jedoch ausdrücklich nur für stark vereinfachte Modellannahmen und darf nicht mit der realen energetischen Bilanz des verwendeten Reaktors gleichgesetzt werden. Der im Projekt eingesetzte Reaktor arbeitet im Batch-Betrieb. In diesem Betriebsmodus muss bei jedem Versuch nicht nur die Kunststoffprobe, sondern die gesamte Reaktormasse erneut auf Temperaturen bis zu etwa 1000 °C aufgeheizt werden. Dazu zählen insbesondere das Stahlrohr, die Sandfüllung zur Temperaturhomogenisierung, keramische Isolationsmaterialien sowie weitere metallische Bauteile. Nach Abschluss eines Versuchs kühlt das System vollständig ab, bevor eine neue Probe eingesetzt werden kann. Die dafür notwendige Heizenergie geht bei jedem Zyklus weitgehend verloren und kann nicht sinnvoll zurückgewonnen werden. Hinzu kommen erhebliche Wärmeverluste durch Wärmestrahlung, Konvektion und Abgasverluste. Trotz verbesserter Isolierung zeigte sich, dass ein signifikanter Teil der zugeführten elektrischen Energie nicht im Reaktionsprozess selbst, sondern in der Erwärmung der Umgebung und der Reaktorstruktur umgesetzt wird. Unter diesen Bedingungen reicht die im real erzeugten Wasserstoff enthaltene Energie nicht aus, um den gesamten Prozess energieautark oder energiepositiv zu betreiben. Für eine potenziell energetisch günstigere Prozessführung wäre ein grundlegend anderes Reaktorkonzept erforderlich. Ein kontinuierlich betriebener Durchlaufreaktor könnte ermöglichen, dass nur die Kunststoffprobe und das Pyrolysegas kontinuierlich erhitzt werden, während die Reaktormasse dauerhaft auf Betriebstemperatur bleibt. In Kombination mit einer effizienten Wärmerückgewinnung, beispielsweise durch Nutzung der Abwärme oder durch gekoppelte Energiesysteme, ließe sich der spezifische Energiebedarf deutlich reduzieren. Darüber hinaus wären alternative Heizkonzepte denkbar, etwa eine gezielte elektrische Beheizung einzelner Zonen, induktive oder mikrowellenbasierte Heizverfahren oder die Kopplung mit externen Energiesystemen. Solche Ansätze lagen jedoch außerhalb des Rahmens dieses Projekts. Für den hier verwendeten Batch-Reaktor kann festgehalten werden, dass er sich zwar gut für experimentelle Untersuchungen eignet, jedoch nicht für einen energetisch positiven Dauerbetrieb ausgelegt ist.

#### 6.5 Erkenntnisse und neue Ideen aus den Experimenten

Die Versuchsreihe hat einige klare Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung des Projekts ergeben. Besonders offensichtlich ist das Potenzial eines veränderten Reaktorkonzepts. Ein Durchlaufreaktor, bei dem die Pyrolysegase kontinuierlich durch eine heiße Zone mit Katalysator strömen, könnte nicht nur die Prozessstabilität verbessern, sondern wäre auch ein möglicher Schritt in Richtung einer energiepositiven Umsetzung – zum Beispiel

durch die Kopplung mit einer Wasserstoffnutzung in einer Brennstoffzelle. Auch alternative Heizmethoden wie der Einsatz von Mikrowellen erscheinen vielversprechend. In der Fachliteratur wird beschrieben, dass Mikrowellenheizung selektiv energieabsorbierende Materialien und Katalysatoren stark erhitzen kann, wodurch lokal sehr hohe Temperaturen entstehen (Hotspots), ohne das gesamte Reaktorvolumen gleichmäßig aufzuheizen. Dies könnte den energetischen Wirkungsgrad deutlich verbessern. Durch gezielte Mikrowellenheizung könnten sogenannte Hotspots erzeugt werden, die lokal sehr hohe Temperaturen erzeugen und damit effizientere Spaltreaktionen ermöglichen – möglicherweise mit geringerem Energieeinsatz als bei konventioneller Heiztechnik. Im Bereich der Katalysatoren zeigte sich, dass Eisenoxid auf Aluminiumoxid besonders gut funktionierte. Daraus ergibt sich die Idee, auch andere Metalloxide auf Aluminiumoxid-Trägermaterial zu testen – etwa Cobalt-, Mangan- oder Kupferverbindungen – um herauszufinden, ob sich die Wasserstoffausbeute weiter steigern oder die Stabilität der Reaktionen verbessern lässt. Ein weiterer wichtiger Punkt betrifft die Messtechnik: Aktuell konnte nur der Wasserstoffanteil näherungsweise bestimmt werden. Eine vollständige Analyse aller Bestandteile im Produktgas – also auch Methan, Kohlenmonoxid, CO<sub>2</sub> und weitere Kohlenwasserstoffe – wäre möglich, wenn der vorhandene Gaschromatograph einsatzbereit wäre. Diese Verbesserung der Messtechnik hätte direkten Einfluss auf die Aussagekraft der Experimente und würde präzisere Vergleiche zwischen Katalysatoren und Reaktionsbedingungen ermöglichen.

#### 6.6 Fehleranalyse und Verbesserungsvorschläge

Ein zentrales Problem zu Beginn des Projekts war der erste Reaktoraufbau, der sich als ungeeignet erwiesen hat. Die Konstruktion war nicht dicht, die Temperaturverteilung war ungleichmäßig, und es kam zu häufigen Leckagen, insbesondere an den Verschraubungen und bei den Teflondichtungen. Diese Mängel führten zu stark schwankenden Ergebnissen und teilweise unbrauchbaren Versuchsverläufen. Erst durch die Überarbeitung des Reaktors – mit robusteren Stahlkomponenten, dem Ersatz des defekten Barometers und der Umstellung auf Neo-Fermit mit Dichtungshanf – konnten reproduzierbare und kontrollierte Bedingungen geschaffen werden. Ein weiterer kritischer Punkt war die eingeschränkte Möglichkeit zur direkten Messung der Gaszusammensetzung. Zwar konnte der Wasserstoffanteil mit unserer vorhandenen Technik näherungsweise bestimmt werden, doch eine exakte Analyse auch der übrigen Gaskomponenten – wie Methan, Kohlenmonoxid oder CO<sub>2</sub> – war nicht möglich. Genauere Auswertungen wären mit dem vorhandenen, aber derzeit nicht funktionstüchtigen Gaschromatographen realisierbar. Dessen Inbetriebnahme sollte daher für künftige Versuche Priorität haben. Zusätzlich traten typische thermische Belastungsprobleme auf: Materialien wie Schrauben und Sensoren litten unter der häufigen Hitzewechselbelastung. Eine Verbesserung der Temperaturführung und ein konstanteres Heizprofil könnten hier Abhilfe schaffen.

#### 6.7 Bedeutung und mögliche Auswirkungen

Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass die Herstellung von Wasserstoff aus Kunststoffabfällen grundsätzlich möglich ist – selbst mit begrenzter Ausstattung. Sollte sich der Prozess mit einem kontinuierlichen Durchlaufreaktor, besserer Heiztechnik (z. B. Mikrowellen) und optimierter Katalyse auf einen größeren Maßstab übertragen lassen, könnten daraus konkrete technologische Anwendungen entstehen. Vor allem für gemischte Kunststoffabfälle, die sich nicht leicht recyceln lassen, eröffnet das Verfahren eine neue Perspektive. Statt Verbrennung oder Deponierung könnten solche Abfälle zur Gewinnung eines hochwertigen Energieträgers genutzt werden. In Verbindung mit energieeffizienter Prozessführung wäre das Verfahren nicht nur technisch, sondern auch ökologisch und wirtschaftlich relevant. Langfristig hätte es das Potenzial, die klassische Müllverwertung grundlegend zu verändern. Besonders in Kombination mit dezentralen Energiesystemen (z. B. Wasserstoff-

Brennstoffzellen) könnte eine solche Technologie zur lokalen Energieversorgung aus Abfallstoffen beitragen – ein möglicher Baustein für die Kreislaufwirtschaft der Zukunft.

## **7. Fazit und Ausblick**

Zu Beginn des Projekts wurden drei zentrale Annahmen formuliert (siehe 2.):

Diese Hypothesen konnten im Rahmen der Experimente nur teilweise bestätigt werden. Der Umbau des Reaktors und der gezielte Einsatz verschiedener Katalysatoren – insbesondere Eisenoxid auf Aluminiumoxid – führten zu einer messbar erhöhten Wasserstoffausbeute. Auch das Verhalten von gemischten Kunststoffabfällen unter Pyrolysebedingungen konnte untersucht und nachvollzogen werden. Die erste und zweite Hypothese konnten experimentell bestätigt werden. Die dritte Hypothese die Möglichkeit einer energetisch vorteilhaften oder teilautarken Prozessführung konnte unter den im Projekt realisierten Bedingungen hingegen nicht erfüllt werden. Trotz technischer Einschränkungen bei der Gasanalytik liefern die Ergebnisse dennoch eine solide Grundlage für die Weiterentwicklung des Konzepts. Besonders deutlich wurde das Potenzial eines energieeffizienteren Verfahrens, das sich mit geeigneter Technik (z. B. Mikrowellenheizung, Durchlaufreaktor) zu einem nutzbaren Verfahren ausbauen ließe. Langfristig zeigt das Projekt, dass die Wasserstoffgewinnung aus Kunststoffabfällen chemisch machbar ist und ein reales energetisches Potenzial besitzt. Unter den im Projekt verwendeten Rahmenbedingungen, insbesondere durch den Batch-Betrieb und die hohen Wärmeverluste des Reaktors, ist jedoch kein energiepositiver oder energieautarker Betrieb erreichbar. Die ökologische und technologische Relevanz des Ansatzes ergibt sich daher vor allem aus dem Perspektivwechsel. Nicht als sofort einsetzbares Energiesystem, sondern als Grundlage für weiterentwickelte, effizientere Reaktorkonzepte. Die Kombination aus Abfallverwertung und Energiegewinnung stellt einen vielversprechenden Ansatz für die Zukunft dar. Insbesondere in Zeiten wachsender Ressourcenknappheit und steigender Anforderungen an nachhaltige Energiesysteme.

## **8. Quellen und Literaturverzeichnis**

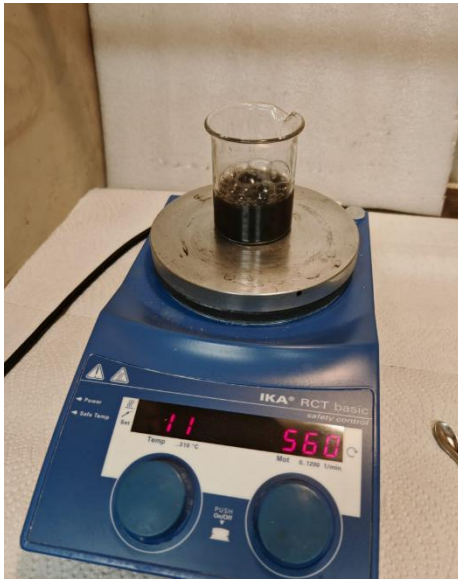
Hassan et al., Pyrolysis of plastic waste for sustainable energy Recovery: Technological advancements and environmental impacts, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119511>, 06.01.2026

Niu et al., Chem. Soc. Rev., 2025,54, 4948, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2025/cs/d4cs00604f>, 06.01.2026

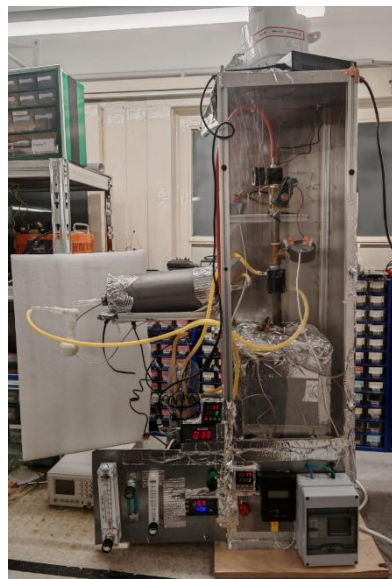
Wikipedia „Raney Nickel“, [https://en.wikipedia.org/wiki/Raney\\_nickel](https://en.wikipedia.org/wiki/Raney_nickel), 07.01.2026

## Anhang

2 Herstellung des Raney Nickel



1 Gesamter Aufbau



3 Reaktor 1 mit allen Anbauten



4 Erster Prototyp des Reaktors, geplatzt und mit der ersten Heizkammer verschmolzen.

