

Thermochemischer Reaktor – Multifunktionale Versuchsanlage zur thermochemischen Umwandlung von Biomasse

Prof. Dr.-Ing. Thomas Metz
Fakultät Verfahrenstechnik

Dipl.-Ing. Fernando Reichert
Fakultät Verfahrenstechnik, Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik

Zusammenfassung:

In einem erneuerbaren und versorgungssicheren Energiesystem spielen regenerative Brennstoffe wie Biomasse und biogene Reststoffe eine wesentliche Rolle. Bei der Nutzung von holzartiger Biomasse steht dabei die thermische Nutzung im Vordergrund. Dies kann zum einen die Verbrennung zur Erzeugung von Wärme und gegebenenfalls elektrischem Strom bedeuten, zum anderen aber auch die thermische Vergasung zur Produktion von Synthesegas. Im vorliegenden Vorlaufforschungsprojekt wird eine multifunktionale Versuchsanlage zur thermochemischen Umwandlung von Biomasse errichtet, mit der beide Wege – Verbrennung und Vergasung – experimentell untersucht werden können. Dabei liegt der Fokus zunächst auf der Verbrennung. Primäres Ziel ist hier, Emissionen wie Feinstaub und Stickoxide für Scheitholz und auch schwierigere Einsatzstoffe wie zum Beispiel Stroh oder Landschaftspflegematerial und für kleinere Anlagengrößen durch innovative Lösungsansätze zu minimieren.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2022
Fakultät/Einrichtung	Fakultät Verfahrenstechnik
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Thomas Metz
Projektteam	Dipl.-Ing. Fernando Reichert Fakultät Verfahrenstechnik, Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik Adrian Marcos, Student Fakultät Verfahrenstechnik, Studiengang Energieprozessstechnik Master-Projektkurs Sommersemester 2022, Teilgruppe „Thermochemischer Reaktor“, vier Studierende
Kontaktinformationen Projektleitung	E-Mail: thomas.metz@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Abbildung 1 zeigt den Primärenergieverbrauch für Deutschland im Jahr 2021. Daraus geht hervor, dass unter den erneuerbaren Energieträgern Biomasse mit 8,6 % (entsprechend 1055 PJ/a) den mit Abstand größten Anteil bildet und etwa genauso viel wie Steinkohle oder Braunkohle zur Energiebereitstellung beiträgt. Die wesentlichen Prozesse beziehungsweise Formen der Bioenergie sind hierbei:

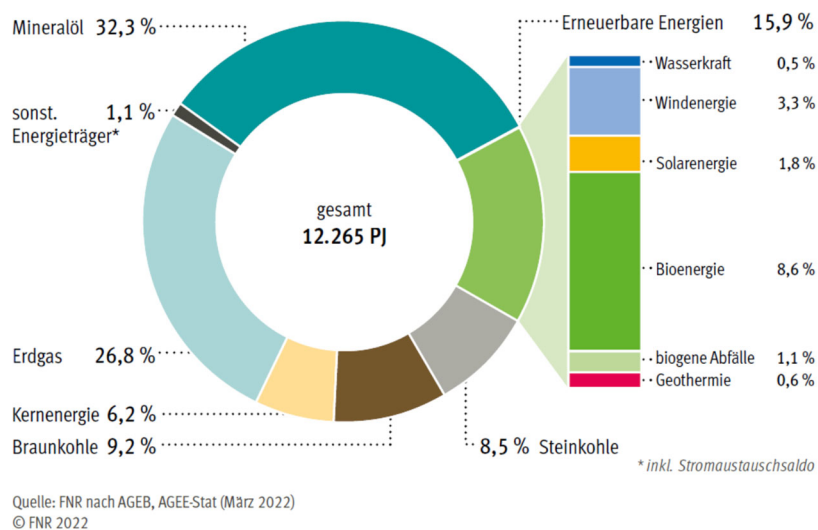


Abbildung 1: Primärenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2021.

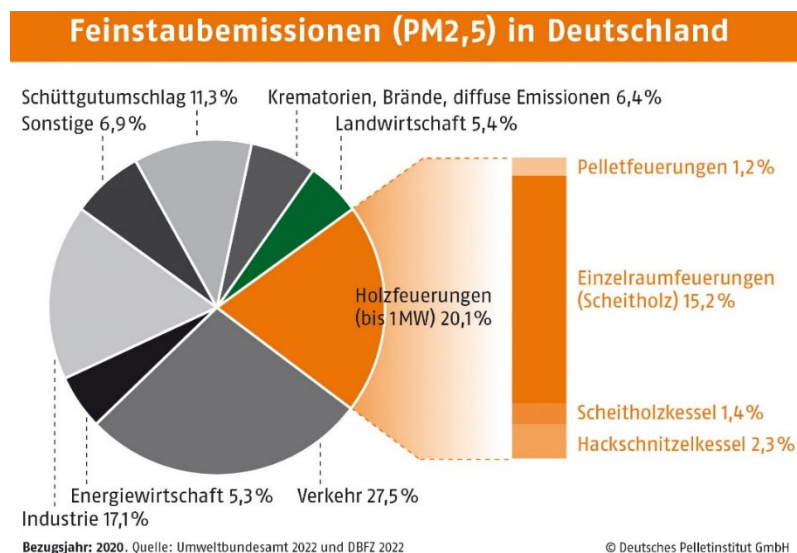
Bild: Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e. V.

- Biogasanlagen zur Erzeugung von Strom, Wärme und Biomethan
- Biodiesel und Bioethanol für den Kraftstoffsektor
- Biomassefeuerungen:
 - Biomasseheizwerke und Heizkraftwerke für Fernwärme und Strom
 - Biomassekessel für Raumwärme, Zentralheizung und Nahwärmenetze
 - Einzelraumfeuerstätten wie Kaminöfen, Kachelöfen, etc.
- Biomassevergasung zur Erzeugung von Strom und Wärme (Holzgas-Blockheizkraftwerk)

Mit dem vorliegenden Vorlaufforschungsprojekt wird der Bereich Biomassefeuerungen adressiert. Die dabei erzielten Ergebnisse können künftig aber auch für Themen der Biomassevergasung verwendet werden.

Wie bei allen Feuerungsanlagen gilt auch für Biomassefeuerungen, dass die gesetzlich vorgeschriebenen zulässigen Emissionsgrenzwerte bei großen Anlagen relativ niedrig und bei kleineren Anlagen höher liegen. Hintergrund hierfür ist, dass der technische Aufwand für Verbrennungsoptimierung und Gasreinigung im Allgemeinen erst bei größeren Anlagen wirtschaftlich darstellbar ist und kleinere Anlagen nur mit vergleichsweise einfacher Technik wirtschaftlich betrieben werden können. Deutlich wird dies an Einzelraumfeuerstätten wie Kaminöfen, die heute immer noch zum Großteil ohne elektronische Verbrennungsregelung und ohne Abgasreinigung betrieben werden dürfen.

Abbildung 2 zeigt Feinstaubemissionen für Partikel kleiner $2,5\ \mu\text{m}$ (PM_{2,5}) für Deutschland im Jahr 2020. Die Holzfeuerungen tragen mit 20,1 % durchaus erheblich zu den Gesamt-Feinstaubemissionen bei. Hierbei wird der größte Anteil durch Scheitholz-Einzelraumfeuerungen verursacht. Neben der Frage der Nachhaltigkeit von Biomasse führte vor allem dieser Aspekt in den letzten Jahren dazu, dass öffentlich über ein Verbot solcher Feuerungen diskutiert wurde. Die Realität der aktuellen Energiekrise zeigt dagegen ein ganz anderes Bild: Die Nachfrage nach Holzöfen und -kesseln sowie nach Brennholz ist geradezu explodiert. Dies macht deutlich, dass Biomasse in einem erneuerbaren Energiesystem neben der CO₂-Neutralität vor allem auch für die Versorgungssicherheit wichtig ist. Zugleich bedeutet dies aber auch, dass Schadstoffemissionen insbesondere im kleinen Leistungsbereich gegenüber dem heutigen Stand noch deutlich weiter als bisher reduziert werden müssen. Spezieller Fokus liegt hierbei auf dem Einsatz von Scheitholz und handbeschickten Feuerungen. Die Herausforderung ist dabei, dass dies mit kostengünstiger Technik erzielt werden muss, damit trotz niedrigster Emissionen ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist.



*Abbildung 2: Feinstaubemissionen (PM_{2,5}).
Bild: Deutsches Pellet-Institut (DEPI)*

Da aktuell Biomasse in Deutschland bereits in großem Umfang genutzt wird, ist ein nachhaltiger Ausbau der Biomassemassennutzung vor allem nur noch im Bereich bisher nicht genutzter Potenziale biogener Reststoffe möglich. Hierzu zeigt Abbildung 3 mobilisierbare Potenziale biogener Rest- und Abfallstoffe. Demnach ist neben dem Bereich Gülle/Mist vor allem auf den Gebieten Stroh, Waldrestholz, Siedlungsabfälle und Landschaftspflege noch Ausbaupotenzial vorhanden. Insgesamt ließe sich damit die Bioenergienutzung in Deutschland immerhin noch etwa um 45 % gegenüber der heutigen Nutzung ausbauen. Das bedeutet, dass künftig vermehrt minderwertige Biomassefraktionen zum Einsatz kommen werden, die im Vergleich zu sauberem Stammholz in der Regel einen deutlich erhöhten Gehalt an Stickstoff, Schwefel, Chlor, Schwermetallen und anderen Begleitstoffen aufweisen. Hinsichtlich Emissionen ist dies äußerst relevant. Auch aus diesem Grund ist es zielführend, in innovative Ansätze für kostengünstige Verbrennungs- und Abgasreinigungstechnologien – vor allem für mittlere und kleine Biomasseanlagen zu investieren.

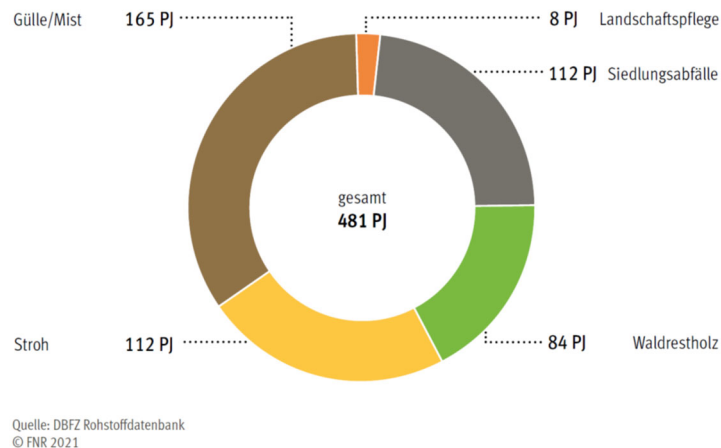


Abbildung 3: Mobilisierbare Potenziale biogener Rest- und Abfallstoffe.
Bild: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Übergeordnetes Ziel der Aktivitäten ist es, die thermische Umwandlung ligninhaltiger (holzartiger) Biomassen so weit zu optimieren, dass die entstehenden Emissionen beziehungsweise Schadstoffkomponenten im Produktgas wesentlich geringer sind, als dies bei aktuell am Markt existierenden Verfahren der Fall ist. Hierdurch reduziert sich der Aufwand für nachgeschaltete Gasreinigungsschritte, sodass auch für kleinere Anlagen geringe Emissionen bei einem wirtschaftlichen Betrieb ermöglicht werden. Konkret werden folgende Punkte adressiert:

- Reduzierung der Feinstaubemissionen bei der Verbrennung von Holz (insbesondere Scheitholz) und biogenen Reststoffen (Stroh, Landschaftspflegematerial)
- Untersuchung, Entwicklung und Optimierung von Holzvergasungsprozessen für den Einsatz in Holzgasmotor-BHKW und zur Synthesegasproduktion.

Da die Thematik insgesamt sehr komplex ist, sind experimentelle Untersuchungen ein wichtiger Faktor. Hierfür wird im Rahmen des Vorlaufforschungsprojektes eine multifunktionale Versuchsanlage zur thermochemischen Umwandlung von Biomasse errichtet. Hiermit sollen Verbrennungsversuche durchgeführt werden können. Mittelfristig soll die Versuchsanlage auch für Vergasungsversuche einsetzbar sein. Zudem wird die Anlage sehr modular und flexibel konzipiert, sodass einzelne Teilkomponenten für spezifische Fragestellungen einfach ausgetauscht werden können. Damit wird die Anlage einen langfristigen Nutzen für diesen Forschungsbereich haben. Spezifische Fragestellungen zur Verbrennung sind unter anderem:

- Wie lässt sich Scheitholz in Kaminöfen energiesparend mit Heißluft zünden?
- Wie kann die Brennstoffzufuhr in Kaminöfen vergleichmäßigt werden?
- Wie kann insgesamt die Zünd- und Ausbrandphase bei Scheitholz optimiert werden?
- Inwieweit lassen sich etablierte Verfahren zur Verbrennungsregelung und Emissionsminderung (Lambda-Regelung, automatische Brennstoffzufuhr, gestufte Verbrennung, Rauchgas-Rezirkulation, Minimierung von Wärmeverlusten, etc.) auf Kaminöfen übertragen?
- Wie weit kann die primäre Entstehung von Schadgasemissionen durch innovative Verbrennungsverfahren minimiert werden?
- Unter welchen Bedingungen ist es möglich, bei gestufter Verbrennung (Schwelzone, Ausbrandzone) die Schwelgase mit Luft vorgemischt in der Ausbrandzone zu verbrennen?
- Inwieweit lässt sich die Verbrennung in porösen Strukturen (Porenbrennern) in der Ausbrandzone realisieren?
- Wie weit kann die Temperatur in der Schwelzone herabgesenkt und stabil geregelt werden, um die Bildung von Aerosolen (Vorläufersubstanzen von Feinstaub) weitestgehend zu unterbinden?
- Ist es möglich, Partikel und Aerosole zwischen Schwelzone und Ausbrandzone abzuscheiden, damit das Rauchgas nach der Ausbrandzone nahezu partikelfrei ist?
- Wie lässt sich die Stromerzeugung mittels Thermoelektrik optimal mit der Verbrennung fester Biomasse realisieren?

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Um Festbrennstoffe emissionsarm zu verbrennen, ist die gestufte Verbrennung von wesentlicher Bedeutung. Das heißt, die Zonen der Brennstoffentgasung (Schwel-, Pyrolyse- oder Entgasungszone) und die Zonen des Ausbrandes (Verbrennung der Schwel- oder Pyrolysegase aus der Schwelzone) werden räumlich getrennt. Dieses Prinzip ist Stand der Technik. Der Hintergrund hierfür ist, dass sich Brenngase wesentlich besser und sauberer als feste oder flüssige Brennstoffe umsetzen lassen. Insbesondere für Biomasse ist das Prinzip der gestuften Verbrennung aufgrund des hohen Anteils an Flüchtigen sehr gut geeignet. Beispielsweise besteht Holz aus ca. 80 % Flüchtigen, sodass also die Verbrennung im Wesentlichen in der Gasphase stattfindet und lediglich 20 % der Masse als Holzkohle verbrannt werden müssen.

In der Praxis ist allerdings die räumliche Trennung bei der gestuften Verbrennung häufig nur schwach ausgebildet, sodass das Potenzial der gestuften Verbrennung hinsichtlich Emissionsminderung nur ansatzweise gehoben wird. Grund hierfür sind in der Regel einfacherer Aufbau und Regelung sowie die Robustheit des Verbrennungsprozesses gegenüber Schwankungen zum Beispiel bezüglich des Brennstoffheizwertes. Lässt man jedoch einen höheren Aufwand an Verbrennungsregelung zu und realisiert eine scharfe Trennung von Entgasungs- und Ausbrandzone, so können Emissionen vergleichsweise einfach und sehr deutlich reduziert werden. Dies ist der Ansatz im vorliegenden Forschungsprojekt. Die Entgasungszone wird hier als Gegenstromvergaser ausgeführt und die Ausbrandzone gleichsam als separater Gasbrenner.

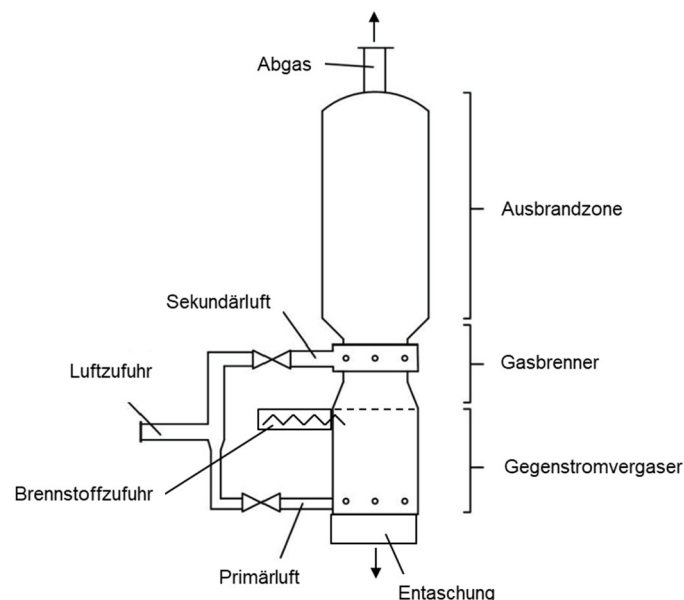


Abbildung 4: Prinzipschema des thermochemischen Reaktors, eigene Darstellung auf Basis [Pellert]

Abbildung 4 zeigt das Prinzipschema des thermochemischen Reaktors. Der Brennstoff wird am oberen Ende des Gegenstromvergasers zugeführt. Der Brennstoff wandert im Gegenstromvergaser langsam nach unten. Im Gegenstrom steigen die Schwelgase, die im unteren Bereich des Gegenstromvergasers durch Teilverbrennung mit Primärluft gebildet wurden, nach oben. Im Gasbrenner werden die Schwelgase mit Sekundärluft verbrannt und in der Ausbrandzone erfolgt ein vollständiger Ausbrand. Im Gegensatz zu üblichen Verbrennungssystemen mit gestufter Verbrennung ist die Temperatur zwischen Gegenstromvergaser und Gasbrenner äußerst niedrig, da sich die Schwelgase am frisch zugeführten Brennstoff zunächst abkühlen. Dies hat den Vorteil, dass Aschepartikel und Aerosole im Gegenstromvergaser zum Großteil zurückgehalten werden und im Gasbrenner eine sehr saubere Verbrennung stattfinden kann.

Abbildung 5 zeigt die konstruktive Ausführung der Versuchsanlage. Die Anlage ist für eine Feuerungswärmeleistung von 15 kW ausgelegt. Die Gerüstabmessungen betragen $L \times H \times B = 2 \times 2 \times 0,8$ [m]. Die Anlage wird bei atmosphärischem Druck betrieben. Alle heißen Zonen sind im Apparateinneren thermisch isoliert.

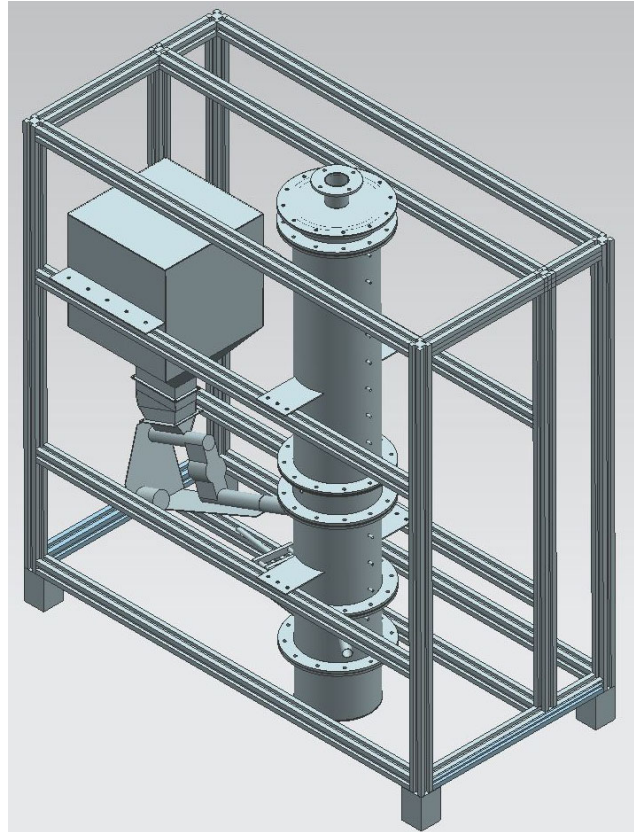


Abbildung 5: Konstruktive Ausführung der Versuchsanlage. Bild: Adrian Marcos

Abbildung 6 zeigt das Verfahrensfließbild der Versuchsanlage. Der Brennstoff – hier zunächst in Form von Pellets – wird über einen Vorlagebehälter B01, eine Zellenradschleuse Z01 und Förderschnecke F01 zudosiert. Der Maximalfüllstand der Brennstoffschüttung im Gegenstromvergaser wird über den Füllstandsensor LIRC1 erfasst und zur Steuerung der Brennstoffzufuhr verwendet. Die aus der Labor-Druckluftversorgung entnommene Verbrennungsluft wird zunächst in Verbrennungsluft und Pneumatikluft aufgeteilt. Die Pneumatikluft wird über Druckminderer D3, Handventil V14 und die Pneumatik-Magnetventile V12 und V13 angesteuert und für den Antrieb der Ascheaustragsschieber D01 und D02 verwendet, die ein Schleusensystem bilden. Die Verbrennungsluft wird nach Druckminderer D1 und Handventil V1 in einen Primär- und einen Sekundärluftstrom aufgeteilt. Der Sekundärluftstrom wird über den Massenstromregler MFC2 beziehungsweise die Handventile V10 und V5 dem Gasbrenner zugeführt. Die Zündung des Gasbrenners erfolgt elektrisch über ein Heizelement G01. Dieses besitzt eine Luftspülung, die über D5, V18, V17 und FI208 dosiert wird. Die Primärluftmenge wird in gleicher Weise über MFC1 beziehungsweise V11 und V4 eingestellt. Die Primärluft kann mit reinem Stickstoff gemischt werden, der über D2, V15, MFC2 beziehungsweise V3 und V2 eingestellt wird. Damit kann der Sauerstoffanteil im Gegenstromvergaser variiert werden, um die Temperatur im Gegenstromvergaser gezielt kontrollieren zu können. Das Luft-Stickstoff-Gemisch wird im elektrischen Heizer H01 für den Zündvorgang erhitzt und dem Gegenstromvergaser zugeführt. Stickstoff wird zudem für verschiedene Spülzwecke verwendet und über D4, V19 sowie V6, FI203, V7, FI204, V8, FI205, V9, FI206, V16, FI207 eingestellt. Die Anlage ist mit den Differenzdruckaufnehmern PID300, PID301, PID302 und PID303 sowie den Temperaturmessstellen TR101 bis TR117 ausgestattet, um detaillierte Informationen über die Vorgänge in der Anlage zu erhalten.

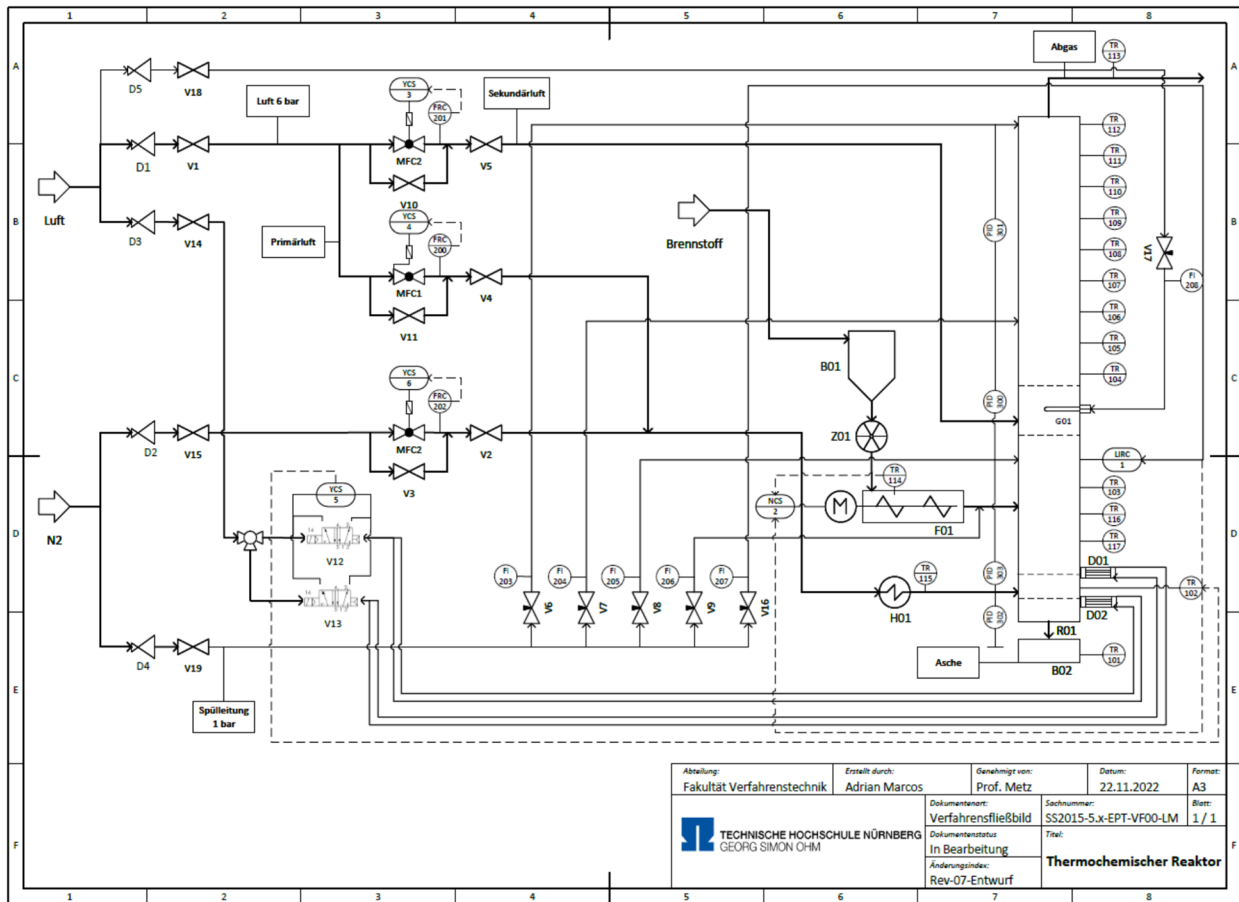


Abbildung 6: Verfahrensfließbild der Versuchsanlage. Bild: Adrian Marcos

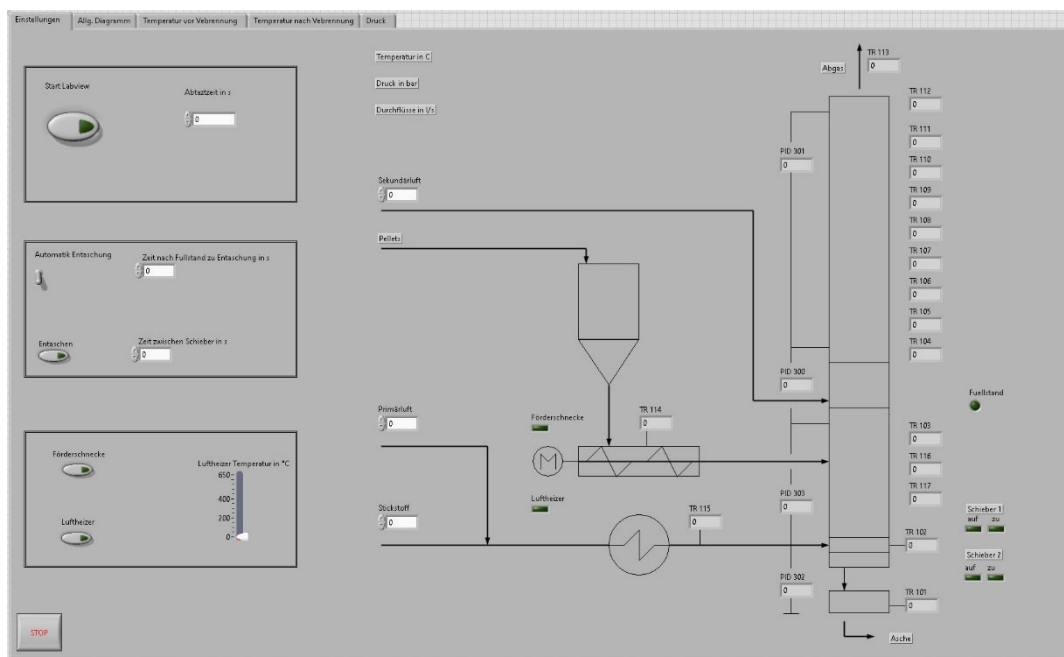


Abbildung 7: Bedienoberfläche der Anlagensteuerung. Bild: Adrian Marcos

Für Untersuchungen mit Scheitholz wird lediglich die Brennstoffzufuhr entsprechend modifiziert. Mittelfristig ist vorgesehen, die Anlage auch um eine Dampf- und Sauerstoffzuführung zur Synthesegas- beziehungsweise Wasserstofferzeugung zu erweitern.

Die Messdatenerfassung und Anlagensteuerung wird über die Software LabView und Signalwandler (I/O-Module) von National Instruments realisiert. Abbildung 7 zeigt die PC-Bedienoberfläche für die Versuchsanlage.

Abbildung 8 zeigt die in der Fakultätswerkstatt gefertigten Hauptapparate der Versuchsanlage sowie die im Aufbau befindliche Versuchsanlage.

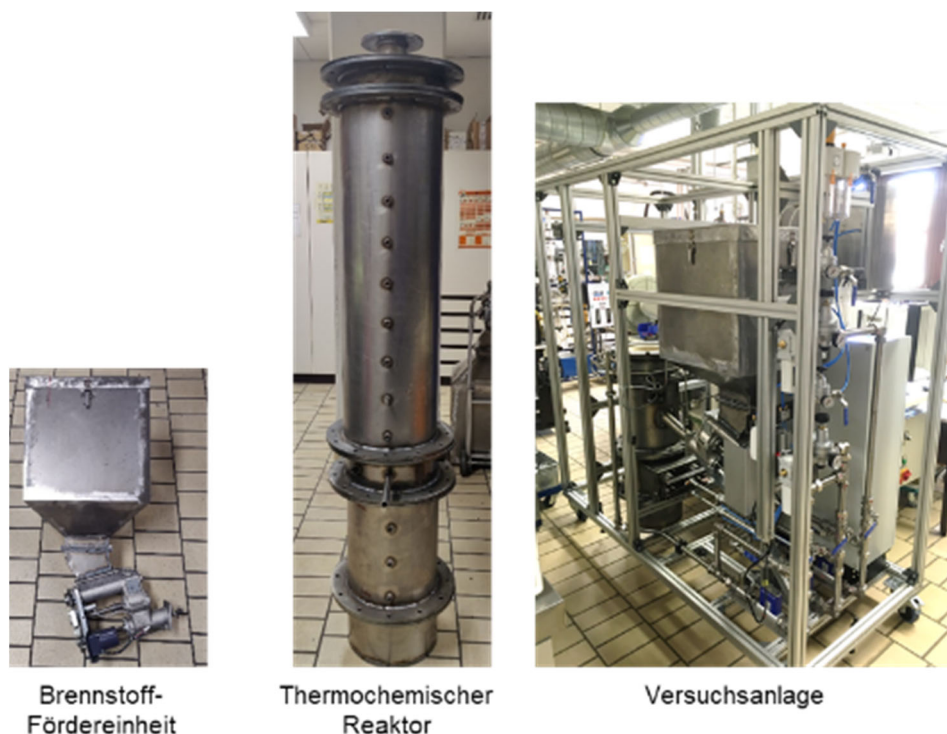


Abbildung 8: Gefertigte Hauptapparate und ausgewählte Komponenten der Versuchsanlage.
Bilder: Adrian Marcos

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Das Projekt entstand aufbauend auf zwei Bachelor-Arbeiten [Pellert], [Nägele]. Innerhalb des Projektkurses wurden Fachinhalte im Rahmen eines Master-Projektkurses unter Anleitung des wissenschaftlichen Mitarbeiters Fernando Reichert erarbeitet und im Projektbericht dokumentiert [Projektkurs]. Des Weiteren unterstützte Adrian Marcos (wissenschaftliche Hilfskraft) beim Aufbau der Versuchsanlage. Die Teilebeschaffung und Fertigung erfolgte federführend durch Labor-Werkmeister Kay Bordiehn und Werkstattmeister Erwin Felsner.

Aufgrund der außerordentlich schwierigen Liefersituation für unterschiedlichste Materialien und Komponenten im Jahr 2022 konnte die Anlagen nicht – wie ursprünglich geplant – im Rahmen des Projektes vollständig aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Dies wird somit Gegenstand von Folgeprojekten sein. Basierend hierauf ist geplant, öffentlich geförderte Projekte zusammen mit Industriepartnern zur Biomasseverbrennung und -vergasung zu akquirieren. Hierdurch soll dieser Forschungsschwerpunkt ausgebaut werden. Veröffentlichungen in einschlägigen Fachzeitschriften beziehungsweise Schriftreihen sowie im Rahmen von Promotionen sind vorgesehen.

6. Literatur

- [FNR] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2022, https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/Mediathek/broschuere_basisdaten_bioenergie_2022_06_web.pdf, aufgerufen am 28.11.2022
- [DEPI]: Webseite: <https://depi.de/p/Holzpellets-eine-saubere-Sache-2WagW3FMzWW8CgN2D5XVp5>
Diagramm-Link: <https://depi.de/ada-assets/86b884e6-d050-4b8b-a97b-6d20607cf20c>, aufgerufen am 9.1.2023
- [Nägele] D. Nägele: Vorplanung einer multifunktionalen Versuchsanlage zur thermochemischen Umwandlung von Biomasse, Bachelorarbeit an der Fakultät Verfahrenstechnik, TH Nürnberg, 2019
- [Pellert] N. Pellert: Detailplanung einer multifunktionalen Versuchsanlage zur thermochemischen Umwandlung von Biomasse, Bachelorarbeit an der Fakultät Verfahrenstechnik, TH Nürnberg, 2020
- [Projektkurs] D. Häusler, D. Breitschaft, Sh. Periasamy, Th. Vu Huynh: Konzeptionierung eines Versuchsstandes für eine Holzpellet-Verbrennungsanlage