

Pyrolysetechnologien in Europa

Technologieübersicht mittelschneller Pyrolyse für dezentrale Anwendungen, für kleine und mittlere Unternehmen und für die Kreislaufwirtschaft

F. Klauser, M. Schwarz,
M. Schwabl, E. Wopienka,
M. Fuhrmann, C. Dissauer

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

14/2024

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA

Projektbegleitung: Mag. Hannes Bauer

Autorinnen und Autoren: DI Dr. Franziska Klauser, DI Dr. Markus Schwarz, DI Manuel Schwabl, DI Dr. Elisabeth Wopienka, DI DI Marilene Fuhrmann, DI Dr. Christa Dissauer (BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH)

Wien, 2024.

Pyrolysetechnologien in Europa

Technologieübersicht mittelschneller Pyrolyse für dezentrale Anwendungen,
für kleine und mittlere Unternehmen und für die Kreislaufwirtschaft

DI Dr. Franziska Klauser, DI Dr. Markus Schwarz, DI Manuel Schwabl,
DI Dr. Elisabeth Wopienka, DI DI Marilene Fuhrmann, DI Dr. Christa Dissauer
BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH

Wien, Mai 2024

Im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhalt

1 Kurzfassung	6
2 Abstract	8
3 Projektinhalt	10
3.1 Ausgangslage.....	10
3.1.1 Kurzübersicht Pyrolysetechnologie	10
3.1.2 Einsatz von Karbonisierungs- und Torrefizierungstechnologien weltweit.....	11
3.1.3 Bedeutung der Pyrolyse in der Kreislaufwirtschaft.....	15
3.1.4 Zielsetzung.....	16
3.2 Methodik.....	16
3.2.1 Datenerhebung und Auswertung.....	16
3.2.2 Referenzrohstoff und Vergleichbarkeit.....	17
3.2.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse	18
4 Ergebnisse	26
4.1 Unternehmensüberblick	26
4.2 Technologieüberblick.....	28
4.2.1 Rohstoffe	31
4.2.2 Produkte	32
4.2.3 Kapazität.....	34
4.2.4 Ökonomische Daten	36
4.2.5 Markt und Referenzen	38
4.2.6 Peripherie und Integration ins Gesamtsystem.....	41
4.2.7 Verfahren	42
4.2.8 Betriebsparameter	47
4.3 Prozessbewertung und Wirtschaftlichkeitsanalyse	49
4.3.1 Massenbilanz und Kohlenstoffbilanz	49
4.3.2 Energiebilanz	50
4.3.3 Wirtschaftlichkeitsberechnungen für Pyrolyse und Vergleich mit Verbrennungstechnologien	53
4.3.4 Sensitivitätsanalyse	56
4.4 Steckbrief Pyrolysetechnologien in Europa	60
4.5 Folien Pyrolysetechnologien in Europa.....	62
5 Schlussfolgerungen	77
6 Ausblick und Empfehlungen	79
7 Verzeichnisse	82
7.1 Abbildungsverzeichnis.....	82
7.2 Tabellenverzeichnis.....	83
7.3 Literaturverzeichnis.....	84
Appendix – Anlagen Factsheets	87

1 Kurzfassung

Pyrolyse ist ein althergebrachtes Verfahren, das bereits vor Jahrtausenden zur Herstellung von Kohle praktiziert wurde. Bestrebungen nach Unabhängigkeit von fossilen Ressourcen und klimaneutralen sowie kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfungsketten, führen aktuell zu deutlich steigendem Interesse an dieser Technologie. Durch vielseitige verfahrenstechnische Ausgestaltungsmöglichkeiten stellt die Pyrolyse eine potenzielle Schlüsseltechnologie für verschiedene zum Teil hoch spezifische Anwendungen für stoffliche und energetische Prozessketten dar. Diese Vielfalt an Möglichkeiten resultiert jedoch gleichzeitig in einer hohen Komplexität, die es erschwert einen Überblick über angebotene Anlagen zu bekommen.

Ziel dieser Studie ist es, Informationen vielfältiger Systeme in eine vergleichbare Form zu bringen und dadurch eine Übersicht für Interessierte zu ermöglichen. Der Aufwand der Informationsbeschaffung als initialer Schritt für Umsetzungen soll dadurch reduziert werden. Hierdurch soll zur Realisierung regionaler Pyrolyseprojekte als Bestandteil kreislaufwirtschaftlicher Stoffnutzungskonzepte beigetragen werden.

Dieser Bericht gibt einen Überblick über Anlagen für mittelschnelle Pyrolyse von europäischen Herstellern im vorindustriellen Maßstab. Diese wurden anhand einer umfassenden Technologierecherche und Interviews ermittelt. Als Ergebnis wurden Informationen über 19 Technologien von 15 Herstellern gesammelt. Diese umfassen acht Themenblöcke:

- Rohstoffe
- Produkte
- Kapazität
- Ökonomische Daten
- Peripherie und Integration ins Gesamtsystem
- Markt und Referenzen
- Verfahren
- Betriebsparameter

In vielen Überblicksdarstellungen werden die Daten der einzelnen Technologien veranschaulicht und gegenübergestellt. Zudem werden Hintergrundinformationen zu den Verfahren gegeben, wodurch Anlageninteressierten ein Einblick ermöglicht werden soll. Anhand der erhobenen Daten wurden ökonomische Kennzahlen abgeleitet. Zudem wird eine grundlegende Prozessbewertung durchgeführt, die einerseits Massen-, Kohlenstoff und Energiebilanzen umfasst. Durch den Vergleich mit Stand-der-Technik Verbrennungstechnologien und den Einsatz verschiedener Rohstoffe werden einige Aspekte zur Wirtschaftlichkeit näher beleuchtet.

Die Technologieübersicht zeigt, dass der Schwerpunkt für Pyrolyseanlagen im kleinen Maßstab in Zentraleuropa liegt, und sich die meisten Hersteller in einer frühen Unternehmensphase befinden. Trotz meist noch geringer Absatzzahlen wird auf das rege Kundeninteresse in Europa bis weltweit verwiesen.

Die Auswertungen bestätigen, dass es eine große Vielfalt an technologischen Lösungen und zugrunde liegenden Zielsetzungen gibt. Schwerpunkt liegt hierbei auf kontinuierlichen Anlagen, wobei Schneckreaktoren am häufigsten zum Einsatz kommen. Batch-Reaktoren spielen hingegen eine untergeordnete Rolle. Sie können jedoch gerade für kleinste Kapazitäten eine interessante Option darstellen, was sich in hohen Verkaufszahlen einer Batch-Anlage widerspiegelt. Die Palette der möglichen Einsatzstoffe ist sehr vielfältig. Besonders viel Erfahrung gibt es mit Biomassebasierten Schüttgütern, Biogas-Gärrest und Klärschlamm. Neben Biokohle werden Pyrolysegas, Pyrolyseöl und Holzessig als Hauptprodukte genannt.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen haben gezeigt, dass zum momentanen Zeitpunkt sehr günstige Bedingungen erforderlich sind, um einen sicheren Gewinn erzielen zu können. Schwankungen der Marktpreise für Rohstoffe und Produkte, sowie des Absatzes können sich sowohl positiv als auch negativ auf den Gewinn auswirken. Aufgrund einer niedrigen ermittelten Gewinnspanne, ist das Risiko für Verluste bisher jedoch noch hoch zu bewerten.

Insgesamt kann von einer guten Ausgangslage für die weitere Entwicklung von Pyrolyse im kleinen Maßstab ausgegangen werden. Obwohl die Wirtschaftlichkeit bisher noch grenzwertig ist, könnten zukünftige Entwicklungen den rentablen Betrieb einer Pyrolyseanlage sichern. Neben der Senkung der Investitionskosten die sich im Zuge der Etablierung ergeben werden, können sich politische Rahmenbedingungen für umweltfreundliche Prozesskette sowie die zusätzliche Vermarktung von CO₂-Zertifikaten positiv auf das Betriebsergebnis auswirken. Zudem hat die Erhebung die regen Entwicklungstätigkeiten in diesem Bereich mit einer Vielfalt an technologischen Konzepten gezeigt. Aufgrund der recht jungen Entwicklungen wird von einem weiteren Entwicklungs- und Optimierungspotenzial, das zu höherer Effizienz und Wirtschaftlichkeit führt, ausgegangen.

2 Abstract

Pyrolysis is a traditional process that was used to produce coal thousands of years ago. Efforts to achieve independence from fossil resources and climate-neutral and circular value chains are currently leading to a significant increase in interest in this technology. Thanks to its wide range of process engineering design options, pyrolysis is a potential key technology for various applications for material and energy process chains, some of which are highly specific. However, this diversity of possibilities also results in a high level of complexity, which makes it difficult to obtain an overview of the plants on offer.

The aim of this study is to bring information from a wide range of systems into a comparable form and thus provide an overview for interested parties. This is intended to reduce the effort involved in obtaining information as an initial step towards implementation. Additionally, the study contributes to the realization of regional pyrolysis projects as a component of circular economy, material utilization concepts.

This report provides an overview of medium-fast pyrolysis plants from European manufacturers on a pre-industrial scale. These were identified through extensive technology research and interviews. As a result, information on 19 technologies from 15 manufacturers was collected. These cover eight thematic blocks:

- Raw materials
- Products
- Capacity
- Economic data
- Peripherals and integration into the overall system
- Market and references
- Processes
- Operating parameters

The data of the individual technologies are illustrated and compared in many overviews. Background information on the processes is also provided to give those interested in the system an insight. Economic key figures were derived from the data collected. In addition, a basic process evaluation is carried out, which includes mass, carbon and energy balances. The comparison with state-of-the-art combustion technologies and the use of different raw materials sheds light on some aspects of economic efficiency.

The technology overview shows that the focus for small-scale pyrolysis systems is in Central Europe and that most manufacturers are in the early stages of their business. Despite mostly still low sales figures, reference is made to the lively customer interest in Europe and worldwide.

The evaluations confirm that there is a wide variety of technological solutions and underlying objectives. The focus here is on continuous systems, with screw reactors being used most frequently. Batch reactors, on the other hand, play a subordinate role. However, they can be an interesting option for the smallest capacities in particular, which is reflected in the high sales figures for batch plants. The range of possible feedstocks is very diverse. There is particularly extensive experience with biomass-based bulk materials, biogas digestate and sewage sludge. In addition to biochar, heat and electricity, as well as pyrolysis gas, pyrolysis oil and wood vinegar are mentioned as main products.

The profitability calculations have shown that favourable conditions are currently required in order to achieve a secure profit. Fluctuations in market prices for raw materials and products, as well as sales, can have both a positive and negative effect on profits. However, due to the low profit margin calculated, the risk of losses is still high.

Overall, a good starting position can be assumed for the further development of pyrolysis on a small scale. Although the economic viability is still limited, future developments will ensure the profitable operation of a pyrolysis plant. In addition to the reduction in investment costs that will arise in the course of the market maturity, political framework conditions for environmentally friendly process chains and the additional marketing of CO₂ certificates could have a positive effect on the operating result. The survey also revealed the lively development activities in this area with a variety of technological concepts. Due to the relatively recent developments, it is assumed that there is further potential for development and optimization that will lead to greater efficiency and profitability.

3 Projektinhalt

3.1 Ausgangslage

3.1.1 Kurzübersicht Pyrolysetechnologie

Pyrolyse beschreibt die thermochemische Umwandlung von Biomasse oder Kunststoffe unter Sauerstoff Abschluss und erhöhter Temperatur. Dieser Prozess führt zu einer Umwandlung der Rohstoffe in gasförmige, flüssige und feste Produkte. Da kein Sauerstoff zugeführt wird, findet keine Verbrennung statt. Die Zusammensetzung der Produkte variiert dabei mit den Prozessparametern wie Temperatur, Verweilzeit und dem Ausgangsmaterial. So können Gase wie Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasserstoff, Methan und niedrige Kohlenwasserstoffe, flüssige Produkte, wie Pyrolyseöl oder Holzessig, und feste Produkte wie Pyrolysekoks oder Biokohle in unterschiedlichem Verhältnis und Qualität hergestellt werden. Pyrolyse wurde bereits vor Jahrtausenden mit traditionellen Praktiken zur Herstellung von Holzkohle praktiziert. Die Vielseitigkeit der Einsatzmöglichkeiten in verschiedenen Prozessen und Flexibilität der Einsatzmaterialien hat dazu geführt, dass seit etwa 35 Jahren effiziente und zielgerichtete Verfahren entwickelt werden (Baumbach, et al., 2016).

Je nach Zielsetzung kann man verschiedene Varianten der Pyrolyse unterscheiden wobei keine exakten Abgrenzungen existieren. So findet man in der Literatur unterschiedliche Angaben der charakteristischen Bereiche, die in Tabelle 1 zusammengefasst sind. Grundsätzlich gilt, dass die Verweilzeit der Feststoffe bei der langsamen Pyrolyse wesentlich länger (Minuten bis Tage) als bei der schnellen Pyrolyse (Sekunden) ist. Die Maximaltemperaturen überschneiden sich bei den Varianten, können bei der schnellen Pyrolyse aber wesentlich höher liegen (bis 1000 °C). Ähnlich verhält sich die Aufheizrate, die bei der schnellen Pyrolyse bei bis zu 1000 C pro Minute und somit wesentlich höher als bei der langsamen und mittelschnellen Pyrolyse liegt. Die Variation der Prozessparameter bedingt, dass bei der schnellen Pyrolyse der Großteil in Pyrolyseöl umgewandelt wird, und bei der langsamen Pyrolyse ein sehr ausgeglichenes Verhältnis der Produkte gegeben ist. Die mittelschnelle Pyrolyse stellt hingegen jene Variante dar, die eine gute Lösung zwischen Produktvielfalt, Prozesskontrolle und Effizienz darstellt (Kazawadi, Ntalikwa, & Kombe, 2021).

Tabelle 1: Überblick der Prozessparameter der Langsamen, Mittelschnellen und Schnellen Pyrolyse (Quicker, Kruse, Weber, & Blöhse, 2016), (Baumbach, et al., 2016), (Bridgewater, 2012), (Al-Rumaihi, Shahbaz, Mckay, Mackey, & Al-Ansari, 2022), (Kazawadi, Ntalikwa, & Kombe, 2021)

	Langsame Pyrolyse	Mittelschnelle Pyrolyse	Schnelle Pyrolyse
Verweilzeit der Feststoffe	10 min – bis Tage	10 min	2 s
Maximaltemperatur	400 - 600 °C	400-650 °C	450-1000 °C
Aufheizrate	1-120 °C/min	60-600 °C/min	bis zu 1000 °C/min
Verhältnis der Produkte (fest/flüssig/gasförmig)	35/30/35	25/50/25	12/75/13

3.1.2 Einsatz von Karbonisierungs- und Torrefizierungstechnologien weltweit

Für einen weltweiten Technologie- und Marktüberblick wurde das IBTC – International Biomass Torrefaction and Carbonisation Council angefragt, Ihren Blickwinkel und Einschätzungen darzulegen. Das IBTC fördert nachhaltig produzierte torrefizierte oder karbonisierte Biomasse auf globaler Ebene, um fossile Kohle in allen Industrien und Anwendungen effizient zu ersetzen oder um atmosphärischen Kohlenstoff dauerhaft im Boden zu binden.



International Biomass
Torrefaction and
Carbonisation Council

IBTC-COUNCIL.ORG

Torrefizierung und Karbonisierung – Aktuelle globale Entwicklungen

Tom Sieverts, Vice President IBTC

Der Markt für karbonisierte Biomasse hat sich in den letzten 24 Monaten sehr gut entwickelt. Verarbeitungstechnologien haben Technologiereifegrad L9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes) erreicht und werden in industriellem Maßstab implementiert. Die Nachfrage nach den Produkten übersteigt das momentane Angebot mehrfach. Politisch beeinflusste Märkte haben Mechanismen und damit Kaufkraft entwickelt, die eine großvolumige Produktion ermöglichen.

Lange haben die Entwicklungen auf sich warten lassen, aber die brisanten Themen wie Klimawandel oder Gasmangel in Europa durch den Angriffskrieg von Russland, sind Beschleuniger für neue Technologien und Produkte.

Europa

Das ETS (Emission Trading System) ist ein etabliertes Instrument in Europa, um Dekarbonisierung flächendeckend voranzutreiben. Karbonisierte Biomasse hat eine relevante Bedeutung dabei, die hocheffizienten „Ultra Supercritical Kohlekraftwerke“¹ neuer Generation nicht zu "Stranded Assets" werden zu lassen und ihre netzstabilisierende Aufgabe möglichst CO₂ neutral zu erfüllen. Aber auch in der Schwerindustrie, wie der Stahl- und Zementproduktion, gewinnen Ersatzprodukte für fossile Energieträger massiv an Bedeutung.

Neben diversen Pilot- und Versuchsanlagen gibt es erste industrielle Anlagen, weitere Großanlagen sind im Bau bzw. in Planung. Ein signifikanter Kapazitätzuwachs in den nächsten Jahren ist somit sicher.

Amerika

Hier gibt es eine bedeutende Entwicklung im Bereich "Biochar", also recht stark karbonisierter Materialien, die im Wesentlichen zur Verbesserung landwirtschaftlicher Böden und ähnlichem eingesetzt werden.

Auch in den USA gibt es auf nationaler, wie auch individuell staatlicher Ebene massiven Zugang zu Förderungen für die Produktion und auch für die Anwendung, die als Entwicklungsbeschleuniger gelten.

Neben einer Vielzahl von Kleinanlagen, befinden sich auch in den USA sehr große Projekte in Planung, oder sogar schon in den ersten Stufen ihrer Umsetzung. Die Produktionskapazität in den USA alleine liegt wohl schon knapp im 7-stelligen Bereich.

Nach wie vor sind die USA und Kanada die größten Lieferanten für Holzpellets und stellen gleichzeitig die Region dar, die als größter Exporteur von Biomasse überhaupt, und im Speziellen Richtung Europa und Japan gilt. Die größten Pellets Produzenten evaluieren gerade, ihr Geschäftsmodell zu erweitern und die Wertschöpfung durch Integration thermischer Behandlungen zu erhöhen.

¹ „Ultra Super Critical“ sind Dampfparameter, die den Punkt ist übersteigen, an welchem die Temperatur und Druck so hoch sind, dass Wasser am Siedepunkt nicht länger als Dampf entweicht, sondern den Aggregatzustand „flüssig“ beibehält. Dadurch weisen diese Kohlekraftwerke eine 50 Prozent höhere Effizienz sowie niedrigere CO₂-Emissionen auf als herkömmliche Kohlekraftwerke.

Asien-Pazifik (APAC)

Asien holt in punkto Produktionskapazitäten im Vergleich zu Amerika stark auf und ist dabei zu überholen. Hervorzuheben sind neben China vor allem Vietnam, Thailand und Indonesien, als stark wachsende Märkte. Netzwerke und Prüfprotokolle zum Nachweis der Nachhaltigkeit sind bereits in hohem Masse implementiert und werden zumindest bei Ware, die für den Export nach Europa oder Japan bestimmt ist, angewendet. Karbonisierung ist auch hier ein Thema wachsender Bedeutung. Erste Großanlagen sind bereits kommissioniert und somit in Produktion. Weitere Anlagen sind in Planung bzw. im Bau. Einen wesentlichen Unterschied sehen wir in vorhandener Infrastruktur. Da die Infrastruktur für die Verwendung von Holzpellets noch nicht flächendeckend installiert ist, weist karbonisierte Biomasse erhebliche Kostenvorteile auf, da auf die vorhandene Kohleinfrastruktur zurückgegriffen werden kann.

Insgesamt kann der Asiatische Markt als sehr dynamisch bezeichnet werden und es ist mit großen Wachstumsraten in den kommenden Jahren zu rechnen. Verbrauchszentren sind und bleiben wohl auch vorerst Japan und Südkorea. In Indonesien, einem Land das neben Singapur die zweite CO₂-Börse in Südostasien etabliert hat, gilt zum Beispiel die Vorgabe, dass in den Kohlekraftwerken in den nächsten Jahren 10% Biomasse zugeführt werden muss.

Indien ist als Markt separat zu betrachten in dieser Region. Rechtliche Rahmenbedingungen fordern von Kraftwerken eine Mitverbrennung von 10% Biomasse, woraus eine erhebliche Nachfrage, vor allem nach karbonisierter Biomasse entstanden ist. Um die angestrebten 10% zu erreichen sind im Schnitt 7.000 Tonnen pro Stunde notwendig. Viele indische Unternehmen versuchen daher Partnerschaften mit etablierten Technologielieferanten einzugehen.

Japan ist aktuell der größte Konsument im Bereich Co-Firing (Mitverbrennung) von Biomasse in Kohlekraftwerken, sowie in kleineren Blockheizkraftwerken, und gibt ambitionierte Wachstumsraten für die kommenden Jahre aus, im Speziellen für den Bedarf an karbonisierter Biomasse.

Somit ist Asien die Region, die sich in den kommenden Jahren am dynamischsten entwickeln wird, da hier ungenutzter Rohstoff und Verbraucher in unmittelbarer Nähe voneinander zu finden sind, sowohl geographisch als auch logistisch. Die Potentiale liegen hier sowohl im Bereich von holzartiger Biomasse aber vor allem auch von landwirtschaftlichen Abfall- und Reststoffen.

Australien und Neuseeland sind ebenfalls Märkte, die durch entsprechende Regierungsprogramme als schnell wachsende Märkte mit großem Potential zu bewerten sind. Beide besitzen ein hohes Rohstoffpotential und eine Vielzahl an Projekten befindet sich auch hier in Entwicklung.

Afrika

In Afrika gibt es bereits vereinzelt Projekte im Bereich stark karbonisierter Biomasse, allerdings sind aktuell nur wenige Großprojekte in Planung oder Umsetzung. Im Süden des Kontinents be-

stehen Projekte zur Bereitstellung von karbonisierten Brennstoffen für Kohlekraftwerke. Im Zentrum des Kontinents und im Osten gibt es eine Vielzahl an Initiativen, die sich auf den Ersatz von traditioneller Holzkohle als Energieträger zum Kochen, durch nachhaltig erzeugte Biokohle fokussieren.

Fazit

Der Markt für karbonisierte Biomasse weist aktuell eine hohe Dynamik auf und wächst rasant. Man könnte behaupten schneller als der Aufbau von relevanten Produktionskapazitäten stattfinden kann. Die wesentlichen Treiber sind sich verändernde politische Rahmenbedingungen, getrieben durch Klimawandel und Dekarbonisierung der Großindustrie.

Aktuell werden weltweit jährlich ca. 7 Milliarden Tonnen an fossiler Kohle gefördert und verbrannt. Diese Nachfrage komplett mit karbonisierter Biomasse zu ersetzen ist weder kurz- noch mittelfristig realistisch. Relevante Anteile davon zu ersetzen, ist jedoch eine Aufgabe der nächsten Dekaden, dessen Erfüllung einen entscheidenden Beitrag zur Dekarbonisierung, und vor allem zur Defossilisierung der globalen Industrie beitragen wird.

Als ein Teil der Lösung wird karbonisierte Biomasse, zusammen mit anderen Technologien wie Wasserstoff, Windkraftanlagen und Photovoltaik, einen wichtigen Beitrag zu einer kohlenstoffärmeren und somit grüneren Zukunft leisten.

3.1.3 Bedeutung der Pyrolyse in der Kreislaufwirtschaft

Kreislaufwirtschaft ist ein Alternativkonzept zur heute weit etablierten linearen Wirtschaft. Sie zielt auf die Wiederverwendung von Produkten bzw. Rohstoffen ab und zeichnet sich dadurch aus, dass kaum Abfälle produziert werden und Rohstoffe innerhalb eines geschlossenen Kreislaufes wiedergenutzt werden. Die Europäische Kommission hat sich das Ziel gesetzt, das System der Kreislaufwirtschaft in der EU zu etablieren. Der Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft ist ein wichtiger Baustein in Green Deal – Europas Agenda für nachhaltiges Wachstum – und hat zum Ziel den Umweltschutz zu erhöhen, Rohstoffabhängigkeit zu vermindern und mehr Arbeitsplätze und geringere Verbraucherkosten zu erreichen. In Österreich wird mit der Initiative Reset2020 aufgezeigt, welche Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz beitragen (BMK, 2023). Besonderes Augenmerk liegt dabei auf regionalen und kommunalen Konzepten (Lutter, Giljum, & Randles, 2016), wofür vor allem Technologien im vorindustriellen Maßstab, also mit kleinerer Kapazität für dezentrale Anwendungen benötigt werden.

Pyrolyseverfahren stellen eine interessante Möglichkeit dar, biogene Reststoffe in hochwertige Produkte für sehr spezifische Anwendungen, aber auch in Energie und Energieträger umzuwandeln. Die hohe Variationsmöglichkeit der Prozessparameter schafft ein weites Spektrum an möglichen Produktergebnissen. Pyrolyse stellt somit einen vielseitigen Baustein für kreislaufwirtschaftliche Stoffnutzungskonzepte dar.

Die mittelschnelle Pyrolyse verbindet viele dieser Ansprüche, die zu einer regionalen Kreislaufwirtschaft beitragen (Kazawadi, Ntalikwa, & Kombe, 2021):

- Der Prozess ist robuster als die schnelle Pyrolyse und kann auch in kleinen und mittleren Skalen wirtschaftlich betrieben werden.
- Sie eignet sich für vielfältige, teilweise schwierige Reststoffsortimente (z. B. Klärschlamm).
- Eingesetzte Reststoffe benötigen einen geringen Aufwand an Vorbehandlungen.
- Die Produkte (Kohle, Gas, Öl) weisen im Vergleich zur schnellen Pyrolyse besonders hohe Produktqualitäten auf.
- Die Koproduktion von mehreren Endprodukten (Kohle, Öl, Gas) in einem ausgewogenen Verhältnis ist möglich.
- Der zeitliche Aufwand ist geringer als bei der langsamen Pyrolyse, während vergleichsweise hohe Produktqualitäten erreicht werden.
- Die Kohlenstoffprodukte können auch als Kohlenstoff-Ressource für Industrie sein (z.B. Stahlherstellung, Kunststoffe...)

Aus diesen Gründen stellt vor allem die mittelschnelle Pyrolyse eine interessante Technologie für regionale Konzepte zur Verwertung unterschiedlicher Reststoffsortimente und gleichzeitiger Produktion von hochwertigen, marktfähigen Produkten dar.

3.1.4 Zielsetzung

Aufgrund der Vielfalt an Möglichkeiten, die die Pyrolyse ermöglicht und des aktuell sehr dynamischen Verhaltens der Branche, ist es wichtig einen Überblick über verfügbare Technologien am Markt zu bekommen.

Die vorliegende Studie bietet einen Überblick über verfügbare Technologien vor allem für potenzielle Betreiber von kleineren Anlagen und zeigt wirtschaftliche Aspekte auf. Dadurch soll die Hürde einer umfassenden Informationsbeschaffung verringert und zur Verwirklichung regionaler Konzepte im Sinne einer erfolgreichen Kreislaufwirtschaft beitragen werden.

Dieser Bericht umfasst drei Schwerpunkte. Im ersten Teil wird ein Unternehmensüberblick über Anbieter von mittelschneller Pyrolyse in Europa geboten. Im zweiten Teil werden ein Überblick der angebotenen Technologien und eine Charakterisierung anhand wichtiger Parameter gegeben. Im dritten Teil wird die Wirtschaftlichkeit verschiedener Technologie-Kombinationen näher erläutert und mit dem Stand-der-Technik in der Verbrennungstechnologie verglichen.

3.2 Methodik

3.2.1 Datenerhebung und Auswertung

Abbildung 1: Herangehensweise für den Unternehmensüberblick



1. Die **Unternehmensrecherche** wurde anhand fach einschlägiger Datenbanken, Verbandswebseiten, Publikationen und Projektrecherchen durchgeführt.
 - Webseite vom *European Biochar Industry Consortium* (European Biochar Industry Consortium, 2023)
 - Webseite vom *Fachverband Pflanzkohle* (Fachverband Pflanzkohle, s.a.)
 - Webseite von *The Biochar Journal* (Schmidt, 2014)
 - Bioenergy Lists - Webseite (Frogner, 2015)
 - IBI Company Database (International Biochar Initiative, 2013)
 - Weitere Recherche über Projektkontakte von BEST
2. Entsprechend der Zielsetzung der Studie erfolgte eine **Eingrenzung** basierend auf 3 Kriterien:
 - Hersteller für mittelschnelle Pyrolysetechnologien

- Maximale Rohstoff-Kapazität von 500 kg/h bei Einsatz von Hackgut bzw. entsprechend 2 MW Rohstoffwärmeeinsatz bei anderen Einsatzmaterialien
 - Unternehmenssitz in Europa
3. Eingegrenzte Unternehmen wurden mittels E-Mail kontaktiert. Dabei wurden Sie über die Rahmenbedingungen, den Inhalt und das Ziel der Studie informiert und um ein Interview gebeten. Hierfür wurde ein detaillierter Gesprächsleitfaden erstellt, der insbesondere folgende Themenblöcke enthielt:
- Rohstoffe
 - Produkte
 - Kapazität
 - Ökonomische Daten
 - Peripherie und Integration ins Gesamtsystem
 - Markt und Referenzen
 - Verfahren
 - Betriebsparameter

Die Ergebnisse aus den Interviews wurden direkt in einzelnen Technologiefactsheets zusammengefasst und im Anhang beigelegt. Diese Daten kommen direkt vom Hersteller und wurden nicht unabhängig geprüft.

4. Zur **Auswertung** wurden geographische, technologische und marktspezifische Daten der diversen Pyrolysetechnologien und -hersteller miteinander verglichen.

3.2.2 Referenzrohstoff und Vergleichbarkeit

Sowohl Rohstoffe als auch Produkte der erhobenen Anlagen unterscheiden sich in Art und in ihren Eigenschaften. Um eine Vergleichbarkeit der Anlagenkapazität zu ermöglichen wurden für alle Anlagen vergleichbare Rohstoff-Kapazitäten (kg/h), die sich aus der Rohstoff-Leistung (kW) ableiten, ermittelt. Als Referenzrohstoff wird Hackgut mit 20% Wassergehalt und einem Heizwert von 4kWh/kg angenommen. Dies entspricht einem Rohstoff, der bei Pyrolyseanlagen als auch bei Verbrennungsanlagen einsetzbar ist. Anhand dieses Referenzrohstoffs wird insbesondere die Anlagenkapazität auf vergleichbare Werte umgerechnet.

1. Ausgangswert stellen die Kapazitäten, welche bei den Interviews genannt wurden.
 - Bei Batch-Anlagen resultiert die Tageskapazität auf der Anzahl der möglichen Batches pro Tag, welche auf eine tägliche Betriebsdauer bezogen wurde.
 - Bei kontinuierlichen-Anlagen hingegen wurde die Rohstoffkapazität für unterschiedliche Rohstoffe herangezogen.
2. In einem nächsten Schritt werden die unterschiedlichen Rohstoffe in Energiemassenströme in kW umgerechnet, indem sie mit dem jeweiligen Heizwert multipliziert wurden.

Rohstoff	Heizwert
Holzartige Biomasse	5,14 kWh/kg
Reifen	9 kWh/kg
mitteldichte Faserplatten	4,3 kWh/kg (laut Anlagenhersteller)
Getrockneter Gärrest	4 kWh/kg (Dengel, Groß, & Außendorf, 2016)
Reject-Material	10 kWh/kg (laut Anlagenhersteller)

- Der Energiemassenstrom wurde dann anhand eines einheitlichen Referenzrohstoffes wieder in eine vergleichbare Rohstoff-Kapazität umgerechnet. Die Umrechnung bezieht sich auf Hackgut mit 20% Wassergehalt und einem resultierenden Heizwert von 4 kWh/kg.

3.2.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Alle Auswertungen werden für eine **theoretische Pyrolyseanlage** berechnet. Dabei handelt es sich um eine kontinuierliche und Biomasse-basierte Anlage mit Biokohle als Hauptprodukt. Die Rohstoff-Kapazität beträgt 250 kg/h bezogen auf den Referenzrohstoff Hackgut mit 20% Wassergehalt und einem Heizwert von 4 kWh/kg. Die theoretische Anlage stellt einen typischen Fall der erhobenen Anlagen dar, weshalb Durchschnittswerte z. B. der erhobenen ökonomischen Daten, für die Auswertungen herangezogen werden.

Im ersten Schritt wurde der Prozess mittels Massen-, Kohlenstoff- und Energiebilanzen näher analysiert. Diese Bilanzen bieten auch die Grundlage für die weiteren Wirtschaftlichkeitsberechnungen.

Für die **Wirtschaftlichkeitsberechnungen** werden zwei Technologie Ausführungen für die theoretische Pyrolyseanlage herangezogen, welche unterschiedliche Energie-Integrationskonzepten entspricht. In Variante 1 (*Pyrolyse Wärme*), wird eine Pyrolyseanlage mit Wärmenutzung angenommen, während Variante 2 (*Pyrolyse KWK*) über Kraft-Wärme-Kopplung eine zusätzliche Stromproduktion berücksichtigt. Diese theoretischen Anlagen werden mit Verbrennungstechnologien mit gleicher Kapazität verglichen – wobei ebenfalls zwischen rein Wärme-geführter Technologie (*Verbrennung Wärme*) und einer KWK Technologie (*Verbrennung KWK*) unterschieden wird.

Zur Sensitivitätsanalyse werden Rohstoffparameter variiert (Wassergehalt, Schüttdichte, Rohstoffpreis), sowie der Einfluss der Energieintegration und unterschiedliche Biokohle-Absetzmöglichkeiten (kein Verkauf, CO₂-Zertifikate, ...) untersucht.

3.2.3.1 Massen- und Energiebilanzierung

Folgende Annahmen wurden für die Massen- und Kohlenstoffbilanz getroffen:

- Als **Rohstoff** wurde der Referenzrohstoff Hackgut gewählt. Der Aschegehalt wurde entsprechend Referenz mit 1,5% bezogen auf die Trockenmasse angenommen. Der Kohlstoffgehalt wurde entsprechend Referenz mit 48% bezogen auf Trockenmasse festgelegt (Lewandowski & Wilhelm, 2016). Die Werte wurden für den gegebenen Wassergehalt umgerechnet.
- Die Ausbeute der **Biokohle** liegt bei 25% bezogen auf Einsatzmaterial atro und wurde anhand von Literaturwerten festgelegt (Weber & Quicker, 2018). Für die Biokohle wurde entsprechend der Richtlinien des European Biochar Certificate ein Kohlenstoffgehalt von 80% angenommen (Ithaka Institute, 2023).
- **Prozessablauf:** Für die Bilanzierung wird angenommen, dass die Biomasse für den Pyrolyseprozess auf 15% vorgetrocknet wird und danach pyrolysiert wird. Das Pyrolysegas wird danach verbrannt und die Energie gemäß den Technologie-Varianten als Wärme und Strom ausgekoppelt.

3.2.3.2 Energiebilanzen für Pyrolyse und Verbrennungstechnologien

Für vier Technologievarianten wurden Energiebilanzen berechnet:

- **Pyrolyse Wärme:** Pyrolyse mit Kohleproduktion und Pyrolysegasnutzung für Wärmeenergie
- **Pyrolyse KWK:** Pyrolyse mit Kohleproduktion und Pyrolysegasnutzung für Strom und Wärmeenergie
- **Verbrennung Wärme:** Verbrennung in einem Heizwerk (Wärmeerzeugung)
- **Verbrennung KWK:** Verbrennung einem Blockheizkraftwerk (Strom und Wärmeerzeugung)

Die Annahmen aus Kapitel 3.2.3.1 werden für die Energiebilanzen übernommen. Zusätzliche Annahmen werden in den folgenden Punkten beschrieben:

- Der **Wärmebedarf für die Trocknung** wurde mit 1 kWh/kg Wasser angenommen.
- Basierend auf Literaturwerten wurde für die Berechnungen ein **Biokohle-Heizwert** von 7,5 kWh/kg angenommen (Weber & Quicker, 2018; Teichmann, 2014).
- Für die wärmegeführten Varianten (kein Strom, nur Wärmeerzeugung) wurde ein **thermischer Wirkungsgrad** von 95% angenommen.
- Für die Wärme- und Stromgeführten Varianten (Strom- und Wärmeerzeugung) wurden ein **elektrischer Wirkungsgrad** von 20% und ein **thermischer Wirkungsgrad** von 70% angenommen.

- Bei allen thermischen Wirkungsgraden sind Verluste durch das Energieverteilsystem noch nicht berücksichtigt.

3.2.3.3 Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Annahmen aus den Kapiteln 3.2.3.1 und 3.2.3.2 werden für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen übernommen. Weitere Annahmen werden in den folgenden Beschreibungen zu den Kosten- und Erlösberechnungen in den folgenden Absätzen näher erläutert.

Die **Investitionskosten** beziehen sich für alle Technologie-Varianten auf Anlagen mit 250 kg/h Rohstoff-Kapazität (bezogen auf Referenzrohstoff). Die Investitionskosten für Pyrolyse wurden entsprechend des Durchschnittswerts der ermittelten Kaufpreise der Pyrolyseanlagen angenommen. Für die Variante Pyrolyse KWK wurden zusätzlich 4.000 €/kW Stromkapazität dazugerechnet. Die Stromkapazität wird aus dem der Energieanteil im Pyrolysegas bzw. Holzgas aus der Energiebilanz und dem elektrischen Wirkungsgrad ermittelt. Für die weiteren Verbrennungstechnologien mit und ohne KWK wurden Investitionskosten aus dem Wood-Value-Tool übernommen (Tabelle 2), das im Rahmen des BioEcon Projekts von BEST GmbH entwickelt wurde (BEST GmbH, 2023). Dabei handelt es sich um ein Excel-basiertes Tool zur techno-ökonomischen Bewertung, für das definierte Parameter, wie Einsatzstoffe oder Anlagenkapazitäten, verändert werden können. Zudem wurden im Rahmen der Entwicklung des Tools Anlagendaten für verschiedene Technologien erhoben, die ebenfalls für die Berechnungen herangezogen werden. (Fuhrmann, Dißauer, & Strasser, 2023) (Fuhrmann, Dissauer, Strasser, & Schmid, 2020) (Dißauer, Strasser, Enigl, & Matschegg, 2020).

Tabelle 2: Investitionskosten für Anlagen mit einer Rohstoff-Kapazität von 250 kg/h bezogen auf Referenzrohstoff für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen

	Pyrolyse	Verbrennung Wärme	Verbrennung KWK
Investitionskosten; €	1.400.000 € zuz. 4.000 €/kW _{el} bei Verstromung	720.000	900.000 (inkl. Verstromung)
Laufzeit in Jahre	20	25	20
Quelle	Erhebungsdaten, Kosten Verstromung ORC: (Groß & Manns, 2018)	Wood-Value-Tool	Wood-Value-Tool

Die jährlichen Kapitalkosten ergeben sich aus der angenommenen Laufzeit von 20, bzw. beim Heizwerk von 25 Jahren (Wood-Value-Tool) und den ermittelten Annuitäten für einen Zinssatz von 3,5%.

Die weiteren Kosten- und die Erlöspositionen orientieren sich an den jährlichen **Betriebsstunden**. Für die Szenarien 1, 2 und 4 wurden 7.750 h/Jahr angenommen, während für Heizwerke (Verbrennung Wärme) nur 4.500 h/Jahr angenommen werden, da sich der Betrieb am saisonalen Wärmebedarf orientiert.

Die **Rohstoffkosten** wurden anhand vom Rohstoff-Bedarf, dem Kaufpreis und dem Trocknungsaufwand des benötigten Einsatzmaterials berechnet. Der Trocknungsaufwand für die Vortrocknung wurde für einen maximalen Wassergehalt von 15% ermittelt, um eine Lagerfähigkeit zu ermöglichen. Die Rohstoffe werden mit diesem Restwassergehalt eingesetzt. Transport- und Lagerkosten werden nicht berücksichtigt.

- Wärmebedarf für die Vortrocknung: 1 kWh/kg Wasser
- Wärmepreis: 5 Ct/kWh

Die **Personalkosten** für Pyrolyse wurden anhand der erhobenen Daten ermittelt und auf das Anlageninvestment bezogen. Hierfür wurde der durchschnittliche Personalaufwand für kontinuierliche Anlagen bezogen auf den Rohstoffeinsatz (h/t; siehe Kapitel 3.2.2) ermittelt. Anhand des jährlichen Rohstoffeinsatzes und des angenommenen Stundentarifs von 30 €/h wurden die jährlichen Personalkosten berechnet. Um eine Anlagenüberwachung über Fernüberwachung gewährleisten zu können wurde ein zusätzlicher Aufschlag von 50% zu den ermittelten Personalkosten angenommen. Dieser Aufschlag beinhaltet den zusätzlichen Überwachungsdienst, die zusätzlich zu den operativen „Routine“-tätigkeiten außerhalb der üblichen Anwesenheitszeiten stattfindet. Diese Summe der Personalkosten werden als Prozentsatz vom angenommenen Investitionspreis angegeben.

Für die Verbrennungstechnologien mit und ohne KWK wurden Personalkosten aus dem Wood-Value-Tool übernommen.

Tabelle 3: Jährliche Personalkosten für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen

	Pyrolyse Wärme	Pyrolyse KWK	Verbrennung Wärme	Verbrennung KWK
Jährliche Personalkosten; % vom Anschaffungspreis	3,8% (bei 0,6 h/t Rohstoffeinsatz)	3,8% (bei 0,6 h/t Rohstoffeinsatz)	1,5%	1,5%
Quelle	Erhebungsdaten + Annahmen	Erhebungsdaten + Annahmen	Wood-Value-Tool	Wood-Value-Tool

Die **Sonstige Betriebskosten** teilen sich in Stromkosten, Kosten für Service und Wartung und Sonstige Betriebsmittel auf und werden als Prozentsatz von der jährlichen Investition angegeben. Kosten für Versicherung werden nicht berücksichtigt. Für Pyrolyse wurde dieser Prozentsatz anhand der Erhebungsdaten ermittelt:

- Für die Stromkosten wurde der Strombedarf für autotherm beheizte Anlagen aus der Erhebung herangezogen (0,04 kWh/kg) und anhand des jährlichen Rohstoffeinsatzes und eines angenommenen Strompreises von 12,5 Ct/kWh auf jährliche Stromkosten umgerechnet. Bezogen auf den Anschaffungspreis betragen die jährlichen Stromkosten 0,8%.
- Kosten für Service und Wartung wurden anhand der erhobenen Daten (wenig Daten verfügbar) und unter Beachtung der Werte des Wood-Value-Tools mit 2% angenommen.
- Kosten für Sonstige Betriebsmittel konnten aus der Erhebung nicht ermittelt werden und werden auf 1% geschätzt, was anhand der Daten im Wood-Value-Tool plausibel erscheint.

Tabelle 4: Jährliche Sonstige Betriebskosten für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen

	Pyrolyse Wärme	Pyrolyse KWK	Verbrennung Wärme	Verbrennung KWK
Jährliche sonstige Betriebskosten; % vom Anschaffungspreis	3,8% (Stromkosten + Kosten für Service und Wartung + Sonstige Betriebsmittel)	3,8% (Stromkosten + Kosten für Service und Wartung + Sonstige Betriebsmittel)	4,0%	4,5%
Quelle	Erhebungsdaten + Annahmen	Erhebungsdaten + Annahmen	Wood-Value-Tool	Wood-Value-Tool

Zur Berechnung der **Erlöse vom Kohleverkauf** wurde eine Kohleausbeute 25% angenommen, und die jährliche Produktionsmenge über den jährlichen Rohstoffeinsatz berechnet. Für diese Berechnung wurde ein Kohlepreis von 700 €/t festgelegt, was einen realistischen Wert bei stofflicher Nutzung darstellt. Dieser Preis entspricht den Annahmen aus dem Wood-Value-Tool und wurde zusätzlich auf Plausibilität überprüft (BMLFUW, 2017).

Zur Berechnung der **Erlöse vom Stromverkauf** wurde die Strommenge pro Jahr ermittelt. Hierfür wurde sowohl für Pyrolysegas wie auch für Holzgas die Energieanteile entsprechend der Energiebilanzen (Kapitel 0) eingesetzt und ein elektrischer Wirkungsgrad von 20% angenommen. Die jährliche Strommenge wurde mit dem aktuellen Marktpreis für Strom von 12,5 Cent/kWh (e-control, 2023) multipliziert.

Äquivalent dazu wurden die **Erlöse aus Wärmeverkauf** ermittelt. Hierfür wurde ein thermischer Wirkungsgrad von 95% bei ausschließlicher Wärmenutzung, bzw. 70% bei Kraft-Wärme-Kopplung angenommen. Für die Pyrolyse Varianten und die Verbrennung KWK Variante wird davon ausgegangen, dass 50% der Wärme verkauft werden können, während für Heizwerke (Verbrennung Wärme) die gesamte Wärme abgesetzt werden kann, da sich die Betriebsstunden am Wärmebedarf orientieren. Investitionskosten und Verluste für das Wärmebereitstellungssystem wurden nicht berücksichtigt. Für den Wärmeverkauf wurde ein Wärmepreis von 5 Ct/kWh angenommen. Dieser Wert liegt über dem Preis von Hackgut als Energieträger (3,85 Ct/kWh) (Österreichischer Biomasse-Verband, 2023). Die weitere Recherche von Wärmepreisen, die die Bereitstellungskosten inkludieren, ergab deutlich höhere Preise von 8-20 Ct/kWh. Da die Kosten für das Wärmenetz und die Wärmeverteilung in diesen Berechnungen nicht berücksichtigt wurden, wurde ein niedrigerer Wärmepreis angesetzt.

Das **Gesamtergebnis** aus der Wirtschaftlichkeitsberechnung ergibt sich aus der Summe der Erlöse abzüglich der Summe der Kosten.

3.2.3.4 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse betrachtet die Variation der Wirtschaftlichkeit einer theoretischen Pyrolyseanlage (jeweils für Wärme-Auskopplung und für mit KWK Technologie) in drei Dimensionen:

- 1) Die Erlöse aus Energieintegration und damit absetzbare Wärmemenge ändern sich
- 2) Kostenstruktur und Kapazität ändern sich durch Änderungen in Einsatzrohstoff-Qualität und Preis
- 3) Zusätzliche Erlöse über CO2 Zertifikate

Änderungen der Energieintegration

Im Basisfall wurde eine Energieintegration von 50% ausgegangen. Das bedeutet, dass 50% der entstehenden Wärmemenge auch nutzbar und damit verkaufbar sind. Dabei wird insbesondere berücksichtigt, dass ein Kohlenstoffprodukt das Hauptprodukt der Pyrolysetechnologie ist und deshalb auch betrieben wird, wenn die Wärme nicht direkt abgenommen werden kann. Falls die Pyrolyseanlage aber direkt in einem Bioraffinerie-Konzept integriert ist, können durchaus auch größere Wärmemengen verwertet werden. Aus diesem Grund werden 2 Grenzfälle in der Sensitivitätsanalyse betrachtet:

- 1) 0% Wärmeabnahme – für den Fall, dass nur Kohlenstoffprodukte vermarktet werden können. Für Pyrolyse-Anlagen mit KWK Technologie wird hier angenommen, dass die Verstromung dennoch stattfindet und die Wärme-Energie-Menge weggekühlt wird.
- 2) 100% Wärmeabnahme – für den Fall einer vollständigen Energie-Integration.

Änderung der Rohstoff-Qualitäten

Ausgehend von dem in Kapitel 3.2.2 dargestellten Referenzrohstoff Hackgut, werden für die Sensitivitätsanalyse unterschiedliche Varianten analysiert:

- 1) **Rohstoffkosten** sinken auf 100€/t. Ausgehend davon, dass sich die aktuelle Lage bei Brennstoffen wie Hackgut und Pellets für die Wärmeversorgung, wieder etwas entspannt, ist dieses Szenario durchaus realistisch.
- 2) **Wassergehalt** des Rohstoffs steigt auf 35%. Waldfrisches Hackgut besitzt durchaus bis zu 50% Wassergehalt und der Einsatzstoff bei Nahwärmenetzen ist zumeist W30 Hackgut, welches zwischen 30 und 40% Wassergehalt entspricht. Die Auswirkung eines höheren Wassergehaltes beim Rohstoff, ist insbesondere ein höherer Aufwand bei der Trocknung.
- 3) **Unterschiedliche Vergleichsrohstoffe**. Anhand von drei Rohstoffen wurde die Wirtschaftlichkeit für unterschiedliche Rohstoff-Eigenschaften und -Qualitäten (Vergleich Tabelle 5) berechnet.
 - **Dinkelspelzen** als Reststoff der Lebensmittelindustrie. Dinkelspelzen zeichnen sich durch eine besonders niedrige Schüttdichte aus.
 - **Straßenbegleitschnitt** als Abfallstoff. Hierbei handelt es sich im Speziellen um Baum- und Strauchschnitt, der am Straßenrand anfällt. Dieser Rohstoff zeichnet sich durch einen hohen Wassergehalt und anorganische Verunreinigungen aus.

Tabelle 5: Beschreibung der Einsatzmaterialien der Referenzbrennstoffe

	Beschreibung	Preis	Quelle
Referenzrohstoff - Hackgut	mittlere Qualität, mit Rinde, 20% Wassergehalt, 5,1 kWh/kg _{atro} (FNR, 2014)	110 €/t atro	(LK Österreich, 2023)
Hackgut 100€/t	20% Wassergehalt	100€/t atro	
Hackgut WG35	35% Wassergehalt	110€/t atro	
Dinkelspelzen	nicht entstaubt 10% Wassergehalt, 4 kWh/kg _{atro} (FNR, 2014), Dichte: 115 g/L (Mollet Füllstandtechnik GmbH, 2023)	70 €/t (10% WG)	Auskunft vom Betreiber einer Entspelungsanlage, Sept. 2023
Straßenbegleit-schnitt	50% Wassergehalt, 5,5 kWh/kg _{atro}	40 €/t (50% WG); Kosten für Ernte und Transport	(Dißauer, et al., 2023)

4 Ergebnisse

4.1 Unternehmensüberblick

Über 400 Kontakte wurden für den Unternehmensüberblick recherchiert. Diese Sammlung ging jedoch weit über den Projektfokus hinaus, was sich bei der ersten Sichtung der Unternehmenskontakte herausstellte (siehe Abbildung 2). Nach der Durchsicht der Webseiten und der Überprüfung der dort angegebenen Daten auf die Kriterien (mittelschnelle Pyrolysetechnologien, Maximaler Input von 500 kg/h, europäische Unternehmen) wurde die Anzahl auf 56 Unternehmen eingegrenzt und kontaktiert, wovon 22 Unternehmen auf die Kontaktaufnahme reagiert haben und zu Interviews eingeladen wurden. Bei der genauen Überprüfung der Kriterien in den Interviews musste jedoch festgestellt werden, dass die Technologien einiger Unternehmen nicht dem genauen Studienfokus entsprechen. Insgesamt konnten 15 Unternehmen für die Studie gewonnen werden (Tabelle 6), die mit jeweils ein bis zwei Technologien in der Studie vertreten sind.

Abbildung 2: Anzahl der Unternehmenskontakte von der Kontaktrecherche bis zu den Studienteilnehmern.

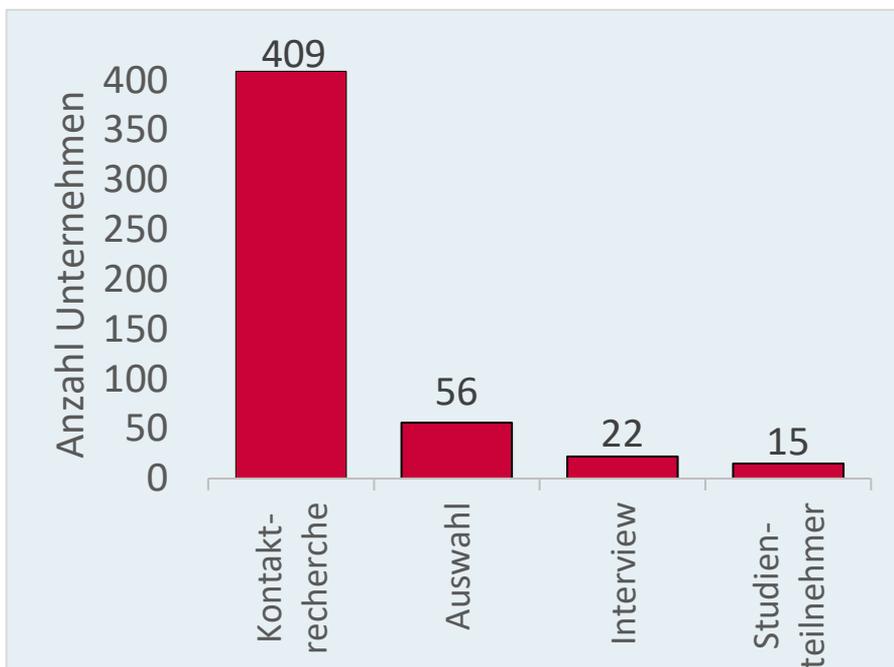


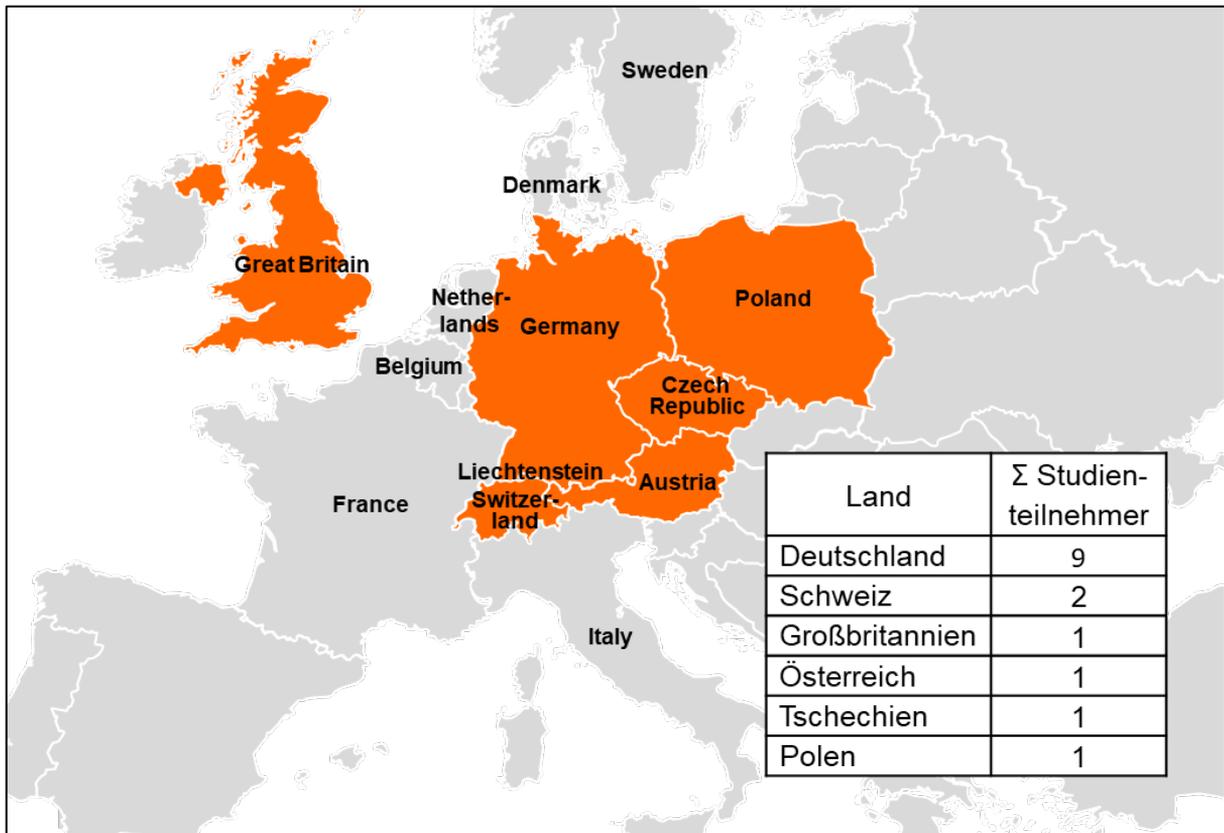
Tabelle 6: Teilnehmende Unternehmen der Studie und Webseite

Teilnehmende Unternehmen	Webseite
3R Systems GmbH	https://www.3r-systems.de/
Akkodis Germany Tech Experts GmbH	https://www.akkodis.com/
Biomacon GmbH	https://www.biomacon.com/
BIOUHEL.CZ s.r.o	https://www.microchar.eu/ https://biouhel.cz/
Carbo-FORCE GmbH	https://www.carbo-force.de/
Carbon Technik Schuster GmbH	https://ct-schuster.de/
CarbonZero Sagl	http://carbonzero.ch/
Metal Expert Sp. z o.o.	https://metalexpert.pl/
Next Generation Elements GmbH	https://nge.at/
PYREG GmbH	https://pyreg.com/
PyroCore Ltd. And PyroCore S.A.	https://pyrocore.com/
Pyronet GmbH	https://www.pyronet.ch/
Pyrum Innovations AG	http://www.pyrum.net
REW Regenerative Energie Wirtschaftssysteme GmbH	https://www.regenis.de
SPSC GmbH	https://www.sp-sc.de

Wie in der Europakarte gezeigt wird, liegt der Fokus der Technologieanbieter für mittelschnelle Pyrolyse für den kleinen Maßstab in Mitteleuropa. Speziell Deutschland sticht mit neun teilnehmenden Unternehmen heraus (siehe Abbildung 3). Dieser Trend hatte sich bereits bei den ausgewählten Unternehmen für die Kontaktaufnahme gezeigt. Aus der Schweiz nehmen zwei Unternehmen teil, gefolgt von Österreich, Großbritannien, Polen und Tschechien mit jeweils einem Unternehmen.

Unter Berücksichtigung der Landesgrößen kann man zusammenfassen, dass der deutschsprachige Raum (Deutschland, Schweiz, Österreich) insgesamt eine hohe Herstellerdichte aufweist. Der genaue Grund ist nicht bekannt. Es wird jedoch angenommen, dass die traditionelle Nutzung von Holz und das bereits bestehende Fachwissen zu Verbrennungstechnologien in dieser Region eine gute Voraussetzung für die Entwicklung von Pyrolysetechnologien bieten.

Abbildung 3: Geografische Herkunft der Studienteilnehmer



Insgesamt drei Unternehmen sind jeweils mit zwei Technologietypen, die restlichen elf mit jeweils einer Technologie in der Studie vertreten.

4.2 Technologieüberblick

Für insgesamt 19 Technologien wurde eine Datenerhebung durchgeführt und in den Factsheets im Anhang zur Verfügung gestellt. In Tabelle 7 werden Hersteller, Anlagenbezeichnung und die Alleinstellungsmerkmale und Besonderheiten (laut Herstellerangabe) angeführt. Die Reihung entspricht der Anlagengröße, die in Kapitel 4.2.3 näher erläutert wird. Im weiteren Bericht werden die Anlagen immer mittels Buchstabenkürzel, wie in Tabelle 7 ersichtlich, genannt.

Tabelle 7: Herstellerfirma und Bezeichnungen der Technologien und Alleinstellungsmerkmale und Besonderheiten laut Herstellerangabe.

Firma	Technologie	Verfahren	Alleinstellungsmerkmale und Besonderheiten (lt. Hersteller)
Pyronet GmbH	PyroFarm P60	Diskontinuierlich	kleine Heizanlage für 2 Wohnhäuser zur dezentralen Holznutzung und Pflanzenkohleproduktion
SPSC GmbH	Mobile Retorten VARIO L+	Diskontinuierlich	Autonomer Prozess ohne externe Energiequellen
Pyrum Innovations AG	Pyrum Thermolyse TA-1.3	Kontinuierlich	Komplett elektrisch beheizt, permanent technisch dicht da keine beweglichen Teile, sehr präzises Temperaturprofil, geringer Delta-T Wert, Wartung möglich in vollem Betrieb, hauptsächlich für Testbetrieb
SPSC GmbH	Vollautomat VARIO XS 250 KW	Kontinuierlich	Keine bewegten Teile im Reaktor, Flexibilität in Bezug auf Biomassestückelung, Autonomer Prozess ohne externe Energiequellen
Metal Expert Sp. z.o.o.	El Prio 3.0	Kontinuierlich	Möglichkeit zur Müllentsorgung
Biomacon GmbH	Pyrolysekessel Farm und Industry Edition	Kontinuierlich	Pyrolysebereich ist in Brennkammer integriert, daher keine gasgeführten Bauteile/Leitungen; Alle Wartungsbauteile von außen zugänglich
REW Regenerative Energie Wirtschaftssysteme GmbH	Regenis MAX / Regenis MAX GT	Kontinuierlich	Über 20 Jahre Forschung und Entwicklung im Bereich Pyrolyse; großes Spektrum an Inputmaterialien bei Kombination von Pyrolyse Regenis MAX mit hauseigener, vorgeschalteter Trocknereinheit Regenis GT
PYREG GmbH	PX 500 - PX 1500 für Biomasse oder Klärschlamm	Kontinuierlich	Patentierter Technologie mit effizienter Wärmerückführung; Langlebigkeit der einzelnen Komponenten (Speziallegierungen im Reaktor oder keramische Hochtemperatur-Prozessgasfilter)

Firma	Technologie	Verfahren	Alleinstellungsmerkmale und Besonderheiten (lt. Hersteller)
Next Generation Elements GmbH	T:CRACKER® _DH5000	Kontinuierlich	Patentiertes System zur Trocknung und direkter Rauchgasnutzung aus der Pyrolyse (PyroDry) --> optional koppelbar; Pyrolyse energieautark; Gute Eignung für Materialien mit hohem Wassergehalt
Carbo-FORCE GmbH	Carbo Force 250	Kontinuierlich	Carbo-CAP-TEC-Verfahren, keine Kondensationprodukte, sehr wartungsarmer Reaktor
BIOUHEL.CZ s.r.o.	Karbotech	Kontinuierlich	Produktionsmöglichkeit von Micro-CHAR, Lizenzerwerb statt Ankauf
Akkodis Germany Tech Experts GmbH	MINI	Kontinuierlich	optional elektrisch beheizter emissionsfreier Prozess, hohe Vielseitigkeit bzgl. Materialien
PyroCore Ltd. und PyroCore S.A.	Phoenix	Kontinuierlich	Anlagen entsprechen der EU-Richtlinie für Mittelgroße Feuerungsanlagen (MCPD), keine weitere Abgasreinigung erforderlich
Next Generation Elements GmbH	T:CRACKER® 1000	Kontinuierlich	Zonenweis einstellbarer, elektrisch beheizter Schneckenreaktor, Nutzung des Pyrolysegases für weiterführende Anwendungen (hochkalorisches Gas, Öl); Zusätzlich wird eine Laborversuchsanlage angeboten ("Synlab", Batch, Produktionskapazität von 2,5 kg Kohle)
Carbon Technik Schuster GmbH	CTS40	Kontinuierlich	-
3R Systems GmbH	3R-8000	Kontinuierlich	Robust, wirtschaftlich, wartungsarm, einfach in Montage und Betrieb
Akkodis Germany Tech Experts GmbH	MIDI	Kontinuierlich	elektrisch beheizter emissionsfreier Prozess, hohe Vielseitigkeit bzgl. Materialien
CarbonZero Sagl	Precision Batch Kiln	Semikontinuierlich	Kombination von Holzessig und Kohleproduktion ermöglicht ein höchst profitables Geschäftsmodell

Firma	Technologie	Verfahren	Alleinstellungsmerkmale und Besonderheiten (lt. Hersteller)
CarbonZero Sagl	Horizontal Bed Kiln Reactor	Kontinuierlich	Kombination von Holzessig und Kohleproduktion ermöglicht ein höchst profitables Geschäftsmodell

In den folgenden Kapiteln werden einige Aspekte zu den genannten Themenblöcken erläutert.

4.2.1 Rohstoffe

Schwerpunkt der eingesetzten Rohstoffe liegt dabei auf holzartigen Rohstoffen, wie Hackgut und anderen Biomassen, wie diverse Schalen oder Strauchschnitt. Sehr viel Erfahrung gibt es mit Klärschlamm und getrocknetem Biogas-Gärrest. Bei einigen Anlagen liegt der Fokus hingegen eher auf kunststoffhaltige Abfallströme und speziellen Sortimenten, wie Reifen oder Mitteldichte Faserplatte, was aus den Factsheets herausgelesen werden kann (C, E, N). Der Übergang von Biomassebasierten Anlagen zu den Anlagen mit dem Schwerpunkt auf Kunststoffsortimente ist jedoch fließend und wird in folgendem Absatz und im Raster in Abbildung 4 näher erläutert.

In einer zusätzlichen Abfrage wurden die möglichen Rohstoffe für die erhobenen Anlagen abgefragt. Die Rohstoffe wurden im Anschluss in entsprechend ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften in acht Gruppen eingeteilt. Diese Gruppen und die zugeordneten Rohstoffe sind:

- **Biomasse kleinkörnig:** Hackgut, Holzpellets, Gaspellets, Mandelschalen, Walnusschalen, Dinkelspelzen, Olivenkerne, Bambusschnitzel, Kakaoschalen, Palmkernschalen, Sonnenblumenschalen, Haselnusschalen, Kaffeehütchen, Rindenmulch
- **Biomasse stückig:** Scheitholz, Holzbriketts
- **Biomasse fasrig:** Stroh, Miscanthus, Hanf, Heu
- **Biomasse inhomogen:** Strauchschnitt, Holzschnitt, Grünschnitt, Siebreste, Siebüberlauf
- **Mistsortimente:** Pferdemit, Hühnermist
- **Gärrest Biogasanlage**
- **Abfälle aus der Lebensmittelindustrie:** Fischabfälle, Lebensmittelabfälle, Pizza, Eierschalen, Malzreste
- **Klärschlamm**
- **Kunststoffe:** PET, Glasfaser, Carbonfaser, PVC, PUR, PE, PP, PUR
- **Spezielle Abfälle:** Reifen, Mitteldichte Faserplatte (MDF), Schläuche

Der folgende Raster (Abbildung 4) bietet einen Überblick, welche Rohstoffe für die Anlagen nach Einschätzung der Hersteller geeignet sind, wobei eine grüne Markierung bedeutet, dass das gesamte Spektrum der Rohstoffe der jeweiligen Gruppe eingesetzt werden kann und die gelbe Markierung bedeutet, dass ein Teil der Rohstoffe geeignet ist.

Abbildung 4: Mögliche Rohstoffe der erhobenen Technologien laut Herstellereinschätzung gruppiert nach physikalisch-chemischen Eigenschaften. (grün: alle der im Text genannten Einsatzstoffe können eingesetzt werden; gelb: ein Teil der genannten Einsatzstoffe können eingesetzt werden)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	N	O	P	Q	R	S
Biomasse kleinkörnig	grün	gelb		gelb	grün	gelb	gelb	grün	gelb	gelb		grün	gelb	gelb	grün	grün	gelb	gelb
Biomasse stückig		grün		grün				grün							grün		grün	
Biomasse fasrig					grün			grün				grün		grün	grün	grün		
Biomasse inhomogen		gelb		gelb	grün	gelb	gelb	grün	gelb	grün		grün	gelb	gelb	grün	grün	gelb	
Mistsortimente					grün		grün	grün	grün	gelb		grün	grün		grün	grün		
Gärrest		grün		grün	grün		grün											
Abfälle LM-Industrie					grün		gelb	gelb	grün			gelb	grün		grün	gelb		
Klärschlamm					grün		grün	grün	grün		grün	grün	grün		grün	grün		
Kunststoffe			gelb		grün			gelb				grün			gelb	grün		
Abfallsortimente					grün			grün	grün			grün	grün		grün	grün		
Spezielle Abfälle			gelb		gelb	gelb						gelb				gelb		

4.2.2 Produkte

Bei den meisten der erhobenen Anlagen ist Biokohle als **Hauptprodukt** definiert, wobei die zusätzliche Wärmenutzung bei den meisten Systemen vorgesehen oder möglich ist. Bei zwei Anlagen liegt der Fokus auf der Holzessigproduktion (R, S). Bei zwei weiteren Anlagen wird in erster Linie auf die Gasproduktion gesetzt, wobei es sich einmal um hochkalorisches Gas für industrielle Prozesse (N) und einmal um klassisches Pyrolysegas (E) handelt, dass nach dem Hauptzweck der Entsorgung von Reststoffen für weitere Prozesse genutzt werden kann. Eine Anlage hat Öl und *refused Carbon Black* als Hauptprodukte definiert (D), was auf die Optimierung des Prozesses auf das Einsatzmaterials (Reifen, Kunststoffe) zurückzuführen ist. Bei vier Anlagen haben sich die Anbieter bezüglich Hauptprodukt nicht festgelegt (C, G, K, R) da die Anlage je nach gewünschtem Hauptprodukt oder dem verfügbaren Einsatzmaterial ausgelegt und optimiert wird. Im Raster in Abbildung 5 wird ein Überblick über die möglichen Hauptprodukte entsprechend Herstellerangabe gezeigt inklusive.

Auch die **Ausbeute des Hauptproduktes** bezogen auf den Referenzrohstoff wurde abgefragt (siehe Factsheets). Ein direkter Vergleich der Ausbeuten ist jedoch schwierig, da die Referenzrohstoffe und Zielprodukte variieren und teilweise sehr weite Bereiche angegeben wurden. Für jene Biomasse-basierte Anlagen, für die entsprechende Daten verfügbar sind (A, B, D, F, G, H, I, J, M, O, P, S), wurde für Biokohle ein Durchschnittswert der angegebenen Ausbeuten von 28% (bezogen auf trockenen Rohstoff) ermittelt. Das liegt im Bereich der Literaturwerte von etwa 20- 35%, die für Holzpyrolyse bei Temperaturen zwischen 400 und 800 °C ermittelt wurden. (Weber & Quicker, 2018)

In diesem Themenblock wurde auch erfasst, ob eine **Leistungsmodulation**, also die Variation des Rohstoffmassenstroms, z. B. zur Reduktion für den Nachtbetrieb, möglich ist. Bei elektrisch beheizten Anlagen ist eine Variation zwischen 0-100% theoretisch technisch möglich, was auf die Entkopplung von Wärmebereitstellung und Pyrolyseprozess zurückzuführen ist. Auch bei den Anlagen, die mittels Pyrolysegasverbrennung beheizt werden, kann eine Leistungsmodulation bis auf zwischen 70-100% der Nennleistung möglich. Die Hersteller haben jedoch auf die wirtschaftlichen Einbußen verwiesen und raten daher von Leistungsreduktionen grundsätzlich ab.

4.2.3 Kapazität

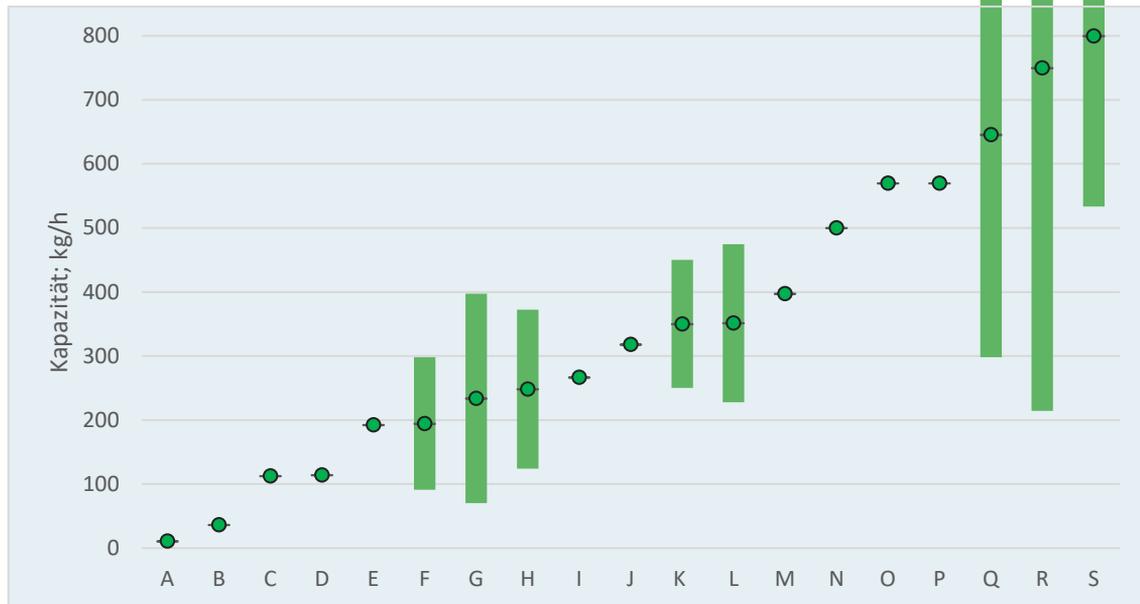
Für die Darstellung und Vergleich der Anlagenkapazitäten wurde der Referenzrechnung gemäß Kapitel 3.2.2 angewendet. In den Factsheets im Anhang sind die Herstellerangaben, gemäß deren verwendeten Rohstoffen dargestellt. Anhand der durchschnittlich erhobenen Ausbeuten von 25% (bezogen auf Trockenmasse) kann die Rohstoff-Kapazität in eine Produkt-Kapazität (bezogen auf Biokohle aus holzartiger Biomasse) umgelegt werden (Tabelle 8).

Tabelle 8: Zusammenhang zwischen Rohstoff-Kapazität, Produkt-Kapazität und Rohstoff-Leistung bei Biomassebasierten Pyrolyseanlagen bezogen auf den Referenzrohstoff.

Rohstoff-Kapazität	Produkt-Kapazität	Rohstoff-Leistung
100 kg/h bzw. 2,4 t/Tag	20 kg/h bzw. 0,48 t/Tag	0,4 MW bzw. 400 kW
Bezogen auf Referenzrohstoff (Heizwert: 4 kWh/kg, Wassergehalt 20% (FNR, 2014))	bei einer Ausbeute von 25% bezogen auf die Rohstoffatrate = 20% bezogen auf Rohstoff mit 20% WG)	Rest: Pyrolysegas

Die Umrechnungsfaktoren können für grobe Abschätzungen herangezogen werden. Für Technologien, die laut Erhebung in verschiedenen Größenordnungen angeboten werden, wird der Bereich von der kleinsten bis zur größten Kapazität angegeben. Bei Technologien, deren Input aufgrund unterschiedlicher Materialeigenschaften variiert, wurde der Mittelwert der erhobene Input-Kapazität angegeben.

Abbildung 7: Überblick der Rohstoff-Kapazitäten in kg/h



Entsprechend dieser Umrechnungen liegt die Rohstoff-Kapazität der kleinsten Anlage (A) bei 11 kg/h (das entspricht zwei Batches pro Tag mit jeweils 130 kg Rohstoffeinsatz) gefolgt vom zweiten erhobenen Batch-System (B) mit etwa 36 kg/h Rohstoff-Einsatz (das entspricht einer Batch pro Tag mit etwa 900 kg Rohstoffeinsatz, wobei die genaue Rohstoffmenge stark vom gewählten Einsatzmaterial abhängt, wie im Factsheet beschrieben ist). Die kleinste kontinuierliche Anlage hat einen Rohstoff-Kapazität von 113 kg/h. Die größeren Anlagen bis zu einem Input von fast 600 kg/h sind kontinuierliche bzw. semikontinuierliche Systeme. Die Kapazitäten der größten Anlagen ergeben sich aus der gewählten Kapazitätsgrenze dieser Studie von 500 kg/h (bzw. 2 MW). Die Anwendung der exakten Heizwerte der Referenzmaterialien für die Berechnung der Rohstoff-Leistung resultieren in Rohstoff-Kapazitäten über der definierten Obergrenze von 2 MW, werden jedoch trotzdem in der Studie dargestellt. Tabelle 9 zeigt eine Übersicht der Hauptprodukte in Abhängigkeit der Rohstoff-Kapazitäten der Anlagen

Tabelle 9: Übersichtsraster der möglichen Hauptprodukte der Anlagen entsprechend der Rohstoff-Kapazität (bezogen auf Referenzrohstoff) bzw. Input Leistung. (Bezeichnung und Hersteller der Technologien A-S befinden sich in Tabelle 7)

	0-100 kg/h	100-200 kg/h	200-300 kg/h	300-400 kg/h	400-500 kg/h	500-600 kg/h
Kohle	A, B, F, G	C, D, F, G, H	F, G, H, K, L, R	G, H, I, J, K, L, M, Q, R	K, L, Q, R	O, P, Q, R, S
Pyrolyse-Öl	G	C, D, G	G, L	G, L, Q	L, Q	O, Q
Holzessig		D	L, R	L, Q, R	L, Q, R	Q, R, S
Gas	G	D, E, G	G, L	G, L, Q	L, N, Q	Q
Wärme	A, B, F, G	D, F, G	F, G, L	G, I, J, L, Q	L, Q	O, Q
Strom		D	L	L, Q	L, Q	O, Q

4.2.4 Ökonomische Daten

Neben dem Investmentkosten wurden auch Betriebskosten für jede Anlage abgefragt. Speziell in diesem Themenblock ist die Information sehr lückenhaft.

Bei den meisten Anlagen wurde der **Anschaffungspreis** bekannt gegeben. Aus den verfügbaren Angaben (Anlagen A, B, C, D, F, G, H, L, M, O, Q, S) wurden der Mittelwert, der Median, der Minimum- und Maximumwert der Preise bezogen auf die Rohstoff-Kapazität ermittelt. Dabei zeigt sich, dass der mittlere Investitionspreis bei 5800 €/((kg/h) bezogen auf den Referenzrohstoff liegt. Der Median liegt mit 6600 €/((kg/h) etwas höher (Abbildung 8). Allerdings zeigen der Minimum- und Maximumwert eine große Schwankungsbreite. Der mit Abstand niedrigste Wert mit 930 €/((kg/h) wurde für eine Batchanlage (B) ermittelt, während die zweite Batchanlage (A) im Mittelfeld liegt. Der Mittelwert der Biomasse-basierten Anlagen (A, B, D, F, G, H, L, M, O, Q, S) fällt mit 5500 €/((kg/h) geringfügig niedriger aus als der Mittelwert aller betrachteten Anlagen. Bei einer Gegenüberstellung von Anschaffungspreis bezogen und Rohstoff-Kapazität (€/((kg/h)) und Rohstoffkapazität (kg/h) kein Trend ersichtlich. So gibt es kostengünstige Anlagen sehr wohl für kleine Rohstoffkapazitäten (z.B. Anlage B) als auch für hohe Rohstoff-Kapazitäten (z.B. Anlage O mit ~4.000€/((kg/h) und S mit ~3.500€/((kg/h)).

Abbildung 8: links Relativer Anschaffungspreis bezogen auf Rohstoff-Kapazität (bezogen auf Referenzrohstoff), rechts Personalaufwand pro t Einsatzrohstoff.

n=12

Anlage B fällt nicht nur durch den niedrigen Preis, sondern auch durch die höchsten Verkaufszahlen auf (siehe Kapitel 0). Sie stellt eine robuste, nicht automatisierte und einfach zu bedienende Anlage dar, die speziell in der Landwirtschaft, Gärtnerei und bei Tierhaltern Anwendung findet und aufgrund geringer Investitionskosten leicht in einen Kleinbetrieb integriert werden kann.

Bei den **Betriebskosten (OpEx)** konnten der Personalaufwand und der durchschnittliche Strombedarf von den meisten Anlagen erhoben werden, während Daten zu Betriebsmitteln (außer Strom), Service und Wartung für viele Technologien nur stichwortartig erfasst werden konnten.

n=10

Beim **Personalaufwand** wurde bei der Erhebung zwischen operativem Arbeitsaufwand und Bedarf bzw. Modus der dauernden Anlagenüberwachung unterschieden. Hierfür wurde der tägliche Arbeitsaufwand bezogen auf Rohstoff-Einsatz ermittelt und in Abbildung 8 dargestellt. Die höchsten Werte sind dabei für die Batchanlagen (A, B) mit durchschnittlich 2,5 h/t Materialinput (bzw. 12,5 h/t Biokohleproduktion; bezogen auf den Referenzrohstoff, siehe Tabelle 8) zu verzeichnen. Für kontinuierliche Anlagen wurde ein durchschnittlicher Arbeitsaufwand von 0,6 h/t Rohstoff (bzw. 2,8 h/t Biokohle) ermittelt. Der Mittelwert über alle Anlagen liegt bei 0,9 h/t Rohstoffeinsatz (bzw. bei 4,4 h/t Biokohle).

Noch nicht berücksichtigt ist in dieser Auswertung der Bedarf bzw. Modus der dauernden Anlagenüberwachung. Hier wurde zwischen „nicht erforderlich“, „Fernüberwachung“ und „vor Ort“ unterschieden und in den Factsheets angegeben, wie in Abbildung 9 überblicksmäßig dargestellt wird. Je nach Gesamtsituation des Unternehmens sind die Kosten dafür jedoch sehr unterschiedlich (z. B. aufgrund von Betriebsgröße, der Möglichkeit zur Nutzung von zentralen Serviceleitstellen, parallellaufende Prozesse) und müssen je nach Situation gesondert bewertet werden.

Abbildung 9: Bedarf und Modus der Anlagenüberwachung

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	N	O	P	Q	R	S
nicht erforderlich																		
Fernüberwachung																		
vor Ort																		

Abbildung 10: Übersicht über Strombedarf von autothermen (interne Zirkulation des Energieinhalts des Pyrolysegases) und allothermen (Zufuhr von externer Energie durch Strom) Pyrolyseanlagen

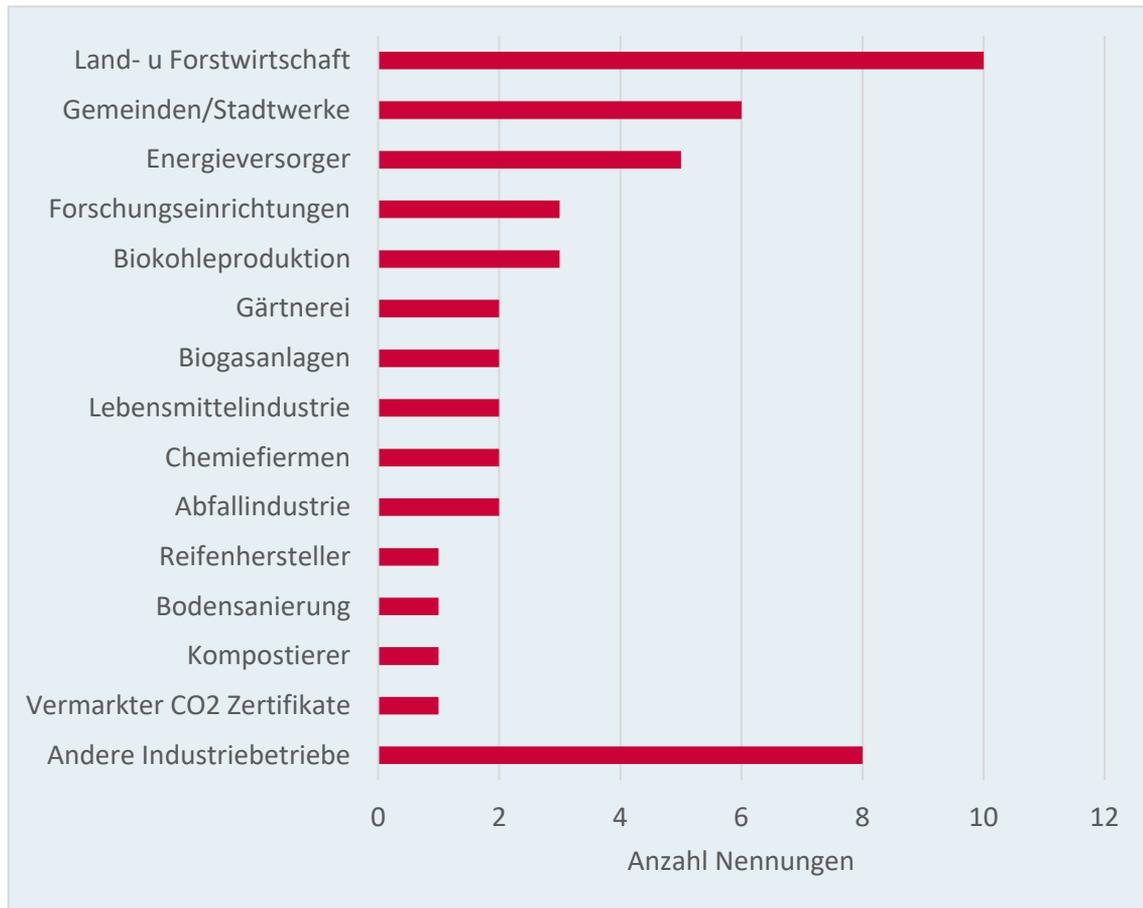
Aufwände für **Service und Wartung** wurden stichwortartig erfasst. Bei 6 Anlagen kann der Aufwand in % von den Anschaffungskosten berechnet werden. Die Werte liegen bei kontinuierlichen Anlagen zwischen 1-2,5% (H, I, N, O). Für Batch-Anlage B wurde angegeben, dass keine Kosten für Wartung anfallen, für Batch-Anlage A wurden knapp 1% vom Investitionspreis ermittelt.

Für den Bedarf an **sonstigen Betriebsmitteln** konnte aufgrund der Datenlage keine Auswertung vorgenommen werden. Stichwortartige Beschreibung ist allerdings den jeweiligen Factsheets zu entnehmen.

4.2.5 Markt und Referenzen

Die Branche und die Region des Zielmarkts wurden erhoben. Bei den **Branchen** wurde am öftesten die Land- und Forstwirtschaft (10 Mal), gefolgt von Gemeinden und kommunalen Betriebe (6 Mal), Energieversorger (5 Mal), Forschungseinrichtungen und Biokohleproduzenten (jeweils 3 Mal), Gärtnereibetriebe, chemische Industrie, Abfallindustrie, Lebensmittelindustrie und Biogasanlagen (jeweils 2 Mal), Reifenhersteller, Vermarkter von CO₂-Zertifikaten, Kompostierer und Bodensanierung (jeweils 1 Mal), sowie 8 Mal sonstige Industrie genannt. Die Angaben der Hersteller sind im Raster in Abbildung 12 überblicksmäßig dargestellt.

Abbildung 11: Branchenübersicht, für welche Pyrolyseanlagen hergestellt werden.



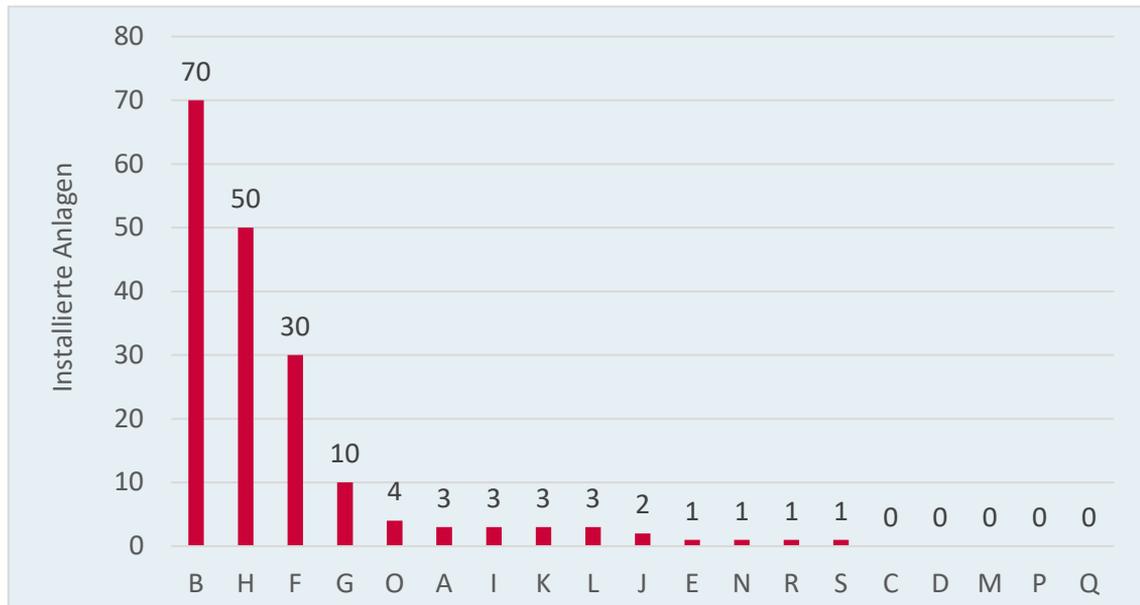
Als **Zielregion** wurde am häufigsten Europa genannt (9 Mal), wobei 4 Mal zusätzlich Nordamerika und 2 Mal zusätzlich Asien angeführt wurde. 8 Hersteller haben den weltweiten Markt als Zielmarkt definiert. 2 Hersteller konzentrieren sich mit ihren Anlagen auf den deutschsprachigen Raum (DACH-Raum).

Die Anzahl bisher **verkaufter Anlagen** werden in Abbildung 13 gezeigt. Es zeigt sich, dass es bereits einige etablierte Unternehmen gibt (speziell B, H, F). Der Großteil der Unternehmen hat jedoch erst eine geringe Anzahl verkauft oder noch gar keine Projekte verwirklicht. Das zeigt, dass sie gerade beim Markteintritt sind bzw. kurz vor dem Markteintritt stehen. Viele der teilnehmenden Hersteller wiesen auf ihren kurzen Bestand, rege Kundenanfragen und auf gerade laufende, aber noch nicht fertig gestellte Projekt hin. Es zeigt sich, dass sich der Markt gerade in einer jungen Phase mit vielen neuen Unternehmen befindet. Einige der Hersteller haben auch einen Link zu einem Unternehmen mit einer Referenzanlage zur Verfügung gestellt, die in den Factsheets angeführt sind.

Abbildung 12: Zielmarkt laut Herstellerangaben

	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Land- und Forstwirtschaft	■	■		■		■	■	■	■	■		■			■	■	
Gemeinden/Stadtwerke		■		■		■	■		■	■						■	
Energieversorger				■	■			■						■	■	■	
Biokohleproduzenten									■				■	■		■	
Forschungseinrichtungen		■		■							■						
Abfallindustrie					■										■	■	
Chemieindustrie			■										■			■	
Lebensmittel-industrie									■						■		
Biogasanlagen												■					■
Gärtnerei		■		■													
Vermarkter CO ₂ -Zertifikate								■									
Kompostierer															■		
Bodensanierung																■	■
Reifenhersteller			■													■	
Sonstige Industriebetriebe			■			■	■	■		■	■				■	■	■

Abbildung 13: Anzahl realisierter Projekte der erhobenen Technologien.



4.2.6 Peripherie und Integration ins Gesamtsystem

Für jede Anlage wurden Informationen zum Gesamtsystem, nämlich die verfahrenstechnische Umsetzung der Rohstoffzuführung und des Kohleaustrags, die Art der Pyrolysegasnutzung, die Möglichkeit zur Integration in den Wärmeverbund, der Platzbedarf und die Möglichkeit zur Mobilität stichwortartig beschrieben. Sie dienen als erste Orientierungshilfe für eine mögliche Projektrealisierung. Einige Aspekte dazu werden in den folgenden Absätzen erläutert.

Bei den Beschreibungen der **Rohstoffzuführung** und des **Kohleaustrags** werden die technischen Lösungen zur Materialförderung, Dosierung, Maßnahmen für den Luftabschluss, Kohlekühlung und Zwischenlagerung beschrieben und stichwortartig erfasst. Bei den Batch-Anlagen ist der verfahrenstechnische Aufwand geringer, da Arbeiten zum überwiegenden Anteil manuell erledigt werden.

Bei den meisten Anlagen wird für die **Pyrolysegasnutzung** die vollständige Verbrennung des Pyrolysegases für energetische Zwecke angegeben. Einige Hersteller zeigen die Option für die Gasaufbereitung bzw. einer Kondensationseinheit auf (E, G, N, R, S). Für manche Anlagen (L, M, Q) wurden keine Angaben zur Art der Pyrolysegasnutzung gemacht, sondern es wurde auf die projektspezifische Ausführung verwiesen.

Bei Anlage F („Pyrolysekessel“) ist die **Integration in den Wärmeverbund** standardmäßig vorgesehen und in der Anlagenausführung bereits integriert. Bei den weiteren Anlagen ist die energetische Nutzung des Pyrolysegases grundsätzlich möglich, wobei keine standardisierten Konzepte

hierfür vorgesehen sind, sondern auf projektspezifische Lösungen verwiesen wird. Diese sind jedoch im Preis nicht integriert. Für Anlagen A, B, F, G, H, I, J, K und M sind Anhaltspunkte wie erforderliche Größe des Pufferspeichers (für die Batch-Anlagen A und B), Vorlauftemperatur, Grundlasttauglichkeit, oder auch Informationen für eine mögliche Stromerzeugung stichwortartig angeführt.

In den Beschreibungen liegt der Fokus auf der Pyrolyseanlage selbst. Weitere **Peripherieoptionen** werden bei einigen Anlagen angegeben, die bei entsprechendem Preisaufschlag angeboten werden (z. B. G: Trocknung, H: Klärschlammaufbereitung, K: „Diverse Peripherie und Aufbereitungstechnik“). Auf die weitere Peripherietechnikoptionen wurde im Zuge der Studie jedoch nicht weiter eingegangen.

4.2.7 Verfahren

Neben Verfahren, Reaktortyp und Pyrolysegasführung (Tabelle 10) wurden Art und Richtung der Wärmeübertragung, sowie die Wärmequelle (Tabelle 11) erhoben. Ein Überblick der Angaben für die Systeme A-S wird in den angegebenen Tabellen gezeigt und in den folgenden Absätzen näher erläutert.

Tabelle 10: Verfahren, Reaktortyp und Pyrolysegasführung von Anlagen A-S

Anlage	Verfahren	Reaktortyp	Pyrolysegasführung
A	Diskontinuierlich	Doppelretorte	Gasabzug nach oben
B	Diskontinuierlich	Retorte	Gasabzug nach oben
C	Kontinuierlich	Fließbettreaktor	Gleichstrom
D	Kontinuierlich	Fließbettreaktor (Multiretorte)	Gasabzug seitlich
E	Kontinuierlich	Fließbettreaktor (Vertikaler Rührreaktor)	Gleichstrom
F	Kontinuierlich	Schneckenreaktor	Gegenstrom
G	Kontinuierlich	Doppelschneckenreaktor	Gegenstrom
H	Kontinuierlich	Schneckenreaktor	Gegenstrom
I	Kontinuierlich	Schneckenreaktor	Gegenstrom
J	Kontinuierlich	Bewegtbettreaktor	Kreuzstrom
K	Kontinuierlich	Schneckenreaktor	Gegenstrom

Anlage	Verfahren	Reaktortyp	Pyrolysegasführung
L	Kontinuierlich	Drehrohrreaktor	Gleich- oder Gegenstrom vom Edukt
M	Kontinuierlich	Schneckenreaktor	Gleich- oder Gegenstrom
N	Kontinuierlich	Schneckenreaktor	Gleichstrom
O	Kontinuierlich	Fließbettreaktor	Gegenstrom
P	Kontinuierlich	Drehrohrreaktor	Gleichstrom
Q	Kontinuierlich	Drehrohrreaktor	Gleich- oder Gegenstrom vom Edukt
R	Semikontinuierlich	Multiretorte	Gasabzug nach unten
S	Kontinuierlich	Bandreaktor	Kreuzstrom

Tabelle 11: Art, Wärmequelle und Richtung der Wärmeübertragung

Anlage	Art der Wärmeübertragung	Richtung der Wärmeübertragung:	Wärmequelle
A	Direkt über Glutbett	Kreuzstrom	Verbrennung der Pyrolysegase (internes Glutbett)
B	Indirekt über Doppelmantel	Kreuzstrom	Verbrennung der Pyrolysegase
C	Indirekt, über Heizplatten, Heizplatten werden in Taschen in der Reaktorwand geschoben	Kreuzstrom	Elektrisch
D	Indirekt über Doppelmantel	Kreuzstrom	Verbrennung der Pyrolysegase mit FLOX-Verfahren
E	Indirekt über Reaktorwand	Kreuzstrom	Elektrisch
F	Indirekt über Konvertermantel	Gegenstrom	Verbrennung der Pyrolysegase
G	Indirekt über Doppelmantel	Gegenstrom	Verbrennung der Pyrolysegase
H	Indirekt über Doppelmantel	Gegenstrom	Verbrennung der Pyrolysegase
I	Indirekt über Doppelmantel	Gegenstrom	Verbrennung der Pyrolysegase

Anlage	Art der Wärmeübertragung	Richtung der Wärmeübertragung:	Wärmequelle
J	Direkte Erhitzung mit Abgas aus Pyrolysegasverbrennung (Carbo-CAP-TEC-Verfahren)	Gegenstrom	Verbrennung der Pyrolysegase; Carbo-CAP-TEC-Verfahren (Patentiertes Verfahren): Energie wird im Reaktor erzeugt (Partielle Oxidation, Luft wird einge-düst)
K	Indirekt über Doppelmantel	Gegenstrom	Verbrennung der Pyrolysegase
L	Indirekt über Reaktorwand im Doppelmantel (Heizmuffel)	Gleich- oder Gegenstrom	Verbrennung der Pyrolysegase oder Elektroheizung (optional)
M	Indirekt über Doppelmantel	Gleich- oder Gegenstrom	Verbrennung der Pyrolysegase
N	Indirekt über Reaktorwand	Kreuzstrom	Elektrisch
O	Indirekt über Reaktorwand	Kreuzstrom	Elektrisch
P	Indirekt über Doppelmantel	nicht definiert	Verbrennung der Pyrolysegase
Q	Indirekt über Reaktorwand im Doppelmantel (Heizmuffel)	Kreuzstrom	Elektrisch
R	Indirekt über Doppelmantel	Kreuzstrom	Verbrennung der Pyrolysegase
S	Direkt mit Abgas aus Pyrolysegasverbrennung	Kreuzstrom	Verbrennung der Pyrolysegase

Der Großteil der erhobenen Anlagen wird im kontinuierlichen **Verfahren** betrieben. Sieben der 16 kontinuierlichen **Reaktortypen** sind Schneckenreaktoren (F, G, H, I, K, M, N), gefolgt von vier vertikalen Fließbettreaktoren (C, D, E, O) und drei Drehrohrreaktoren (I, P, Q). Zudem wurden Daten von einem Bandreaktor (S) und einem Bewegtbettreaktor (J) erhoben. Die restlichen drei Anlagen sind Batch-Retorten, die diskontinuierlich (A, B) oder semikontinuierlich (Q) betrieben werden (Abbildung 14). Einige Vor- und Nachteile von Batch-Retorten, Schnecken-, Drehrohr-, Fließbett- und Bandreaktoren werden in Tabelle 12 angeführt. Der Bewegtbettreaktor (J) stellt ein individuelles System dar, das nicht einem klassischen Reaktortyp zugeordnet werden kann. Aufgrund der Beschreibungen (siehe Factsheet) wird angenommen, dass es am ehesten mit einem Drehrohrreaktor verglichen werden kann.

Abbildung 14: Verfahren und Grundprinzipien der Technologien im Überblick

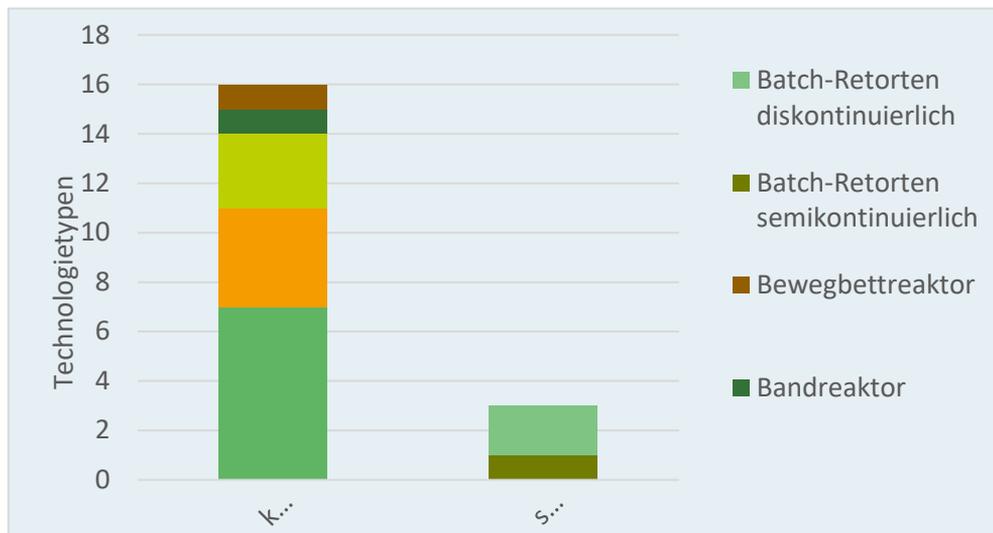


Tabelle 12: Vor- und Nachteile von Batch-Retorten, Schneckenreaktoren, Drehrohrreaktoren, Fließbetteaktoren und Bandreaktoren (Quellen: (Moser, et al., 2023), (Ertl, 2018))

Batch-Retorten	Schneckenreaktor	Drehrohrreaktor	Fließbetteaktor	Bandreaktor
<ul style="list-style-type: none"> + Einfaches und robustes System + Auch Stückgüter (Hackgut, Briquettes) einsetzbar + Modulares System, dass beliebig erweitert werden kann + Hohe Kohlequalität mit geringen PAH-Konzentrationen - Keine komplette Automatisierung möglich, daher höhere Personalkosten - Risiko ungleicher Temperaturverteilung im Reaktor - Lange Abkühlphasen 	<ul style="list-style-type: none"> + Geringe bis keine Verweilzeitverteilung + Kann in jeder Neigung betrieben werden - Bewegte Teile in heißer Zone (höheres Risiko für Abnutzung) - hohe Rohstoffanforderungen (Wassergehalt, Partikelgröße, Feinanteil,...) 	<ul style="list-style-type: none"> + Robustes System + Guter Gas-Feststoff Kontakt + Sehr große Kapazitäten verfügbar + Batch oder kontinuierliche Systeme möglich - Große Verweilzeitverteilung 	<ul style="list-style-type: none"> + simpler mechanischer Aufbau + Keine bewegten Teile (außer bei Rührreaktor) - Feinanteil kann Problem darstellen 	<ul style="list-style-type: none"> + Vielfältige Materialien einsetzbar + Temperatur zonenweise einstellbar
Kontinuierliche Systeme				
		+ Voll automatisierbar daher weniger Personalaufwand		

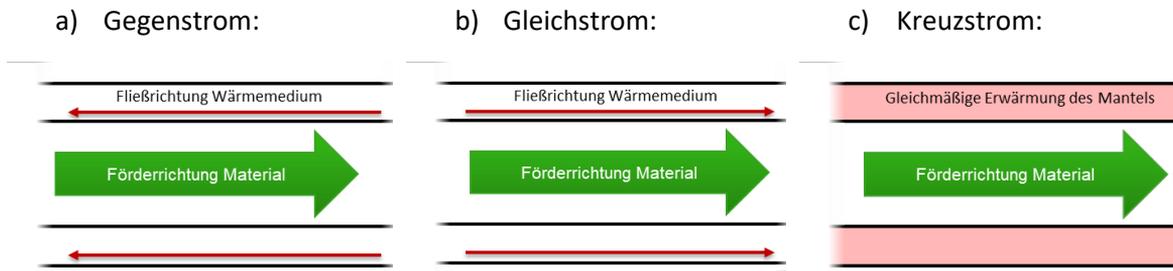
Bei der **Pyrolysegasführung** wurde für Batch-Retorten und für Anlage D (Fließbettreaktor) die Position des Gasabzugs angegeben, wobei zwischen oben, seitlich und unten unterschieden wurde. Bei kontinuierlichen Systemen wurde zwischen Gleichstrom, Gegenstrom und Kreuzstrom unterschieden, was sich auf die die Führungsrichtung des Pyrolysegases zur Fließrichtung des Biomassematerials bezieht.

- Bei der Pyrolysegasführung im **Gleichstrom** ist von einer höheren Kohleausbeute und geringeren PAK-Konzentrationen im Pyrolysegas auszugehen. Aus dieser Gasführung resultiert das Risiko von Kondensatbildung an der Kohle, welches auch PAKs enthält.
- Bei der Pyrolysegasführung im **Gegenstrom** wird das Material schneller aufgeheizt und es resultiert eine höhere Verweilzeit, wodurch ein geringeres Temperaturmaximum erforderlich ist. Zudem ist von geringeren PAK-Konzentrationen bei der Biokohle auszugehen, da im Gegensatz zur Gleichstromführung keine Kondensation an der Kohle stattfindet
- Bei der Pyrolysegasführung im **Kreuzstrom** besteht der wesentliche Vorteil darin, dass Gase entlang des Prozesses zonenweise abgezogen werden können, und dadurch unterschiedliche Gasqualitäten gewonnen werden können.

Im üblichen Fall erfolgt die **Art der Erhitzung** des Materials indirekt über den Doppelmantel oder über die Außenwand des Pyrolysereaktors (Tabelle 11). Bei der Batchanlage A erfolgt die Erhitzung über ein internes Glutbett über die Top-lit-updraft-Methode, bei der der Rohstoff von oben entzündet wird. Bei der kontinuierlichen Anlage A wird die Erhitzung über eine Teiloxidation über das patentierte Carbo-CAP-TEC-Verfahren erreicht. In beiden Fällen findet daher eine Teilverbrennung, jedoch mit dem Hauptziel von Biokohleproduktion, statt.

Für die meisten Anlagen erfolgt die **Richtung der Wärmeübertragung** im Gegenstrom. Dabei wird das Wärmemedium, also das Abgas, im Doppelmantel entgegen der Fließrichtung der Biomasse vorschubs geführt (siehe Schema in Abbildung 15). Die Erhitzung ist daher bei der Kohleseite am stärksten. Es ergibt sich eine höhere Effizienz und eine größere Temperaturspreizung als bei der Erhitzung im Gleichstrom. Die Wärmeübertragung im Gleichstrom spielt daher eine untergeordnete Rolle. Für allotherme, also elektrisch beheizte, Anlagen erfolgt die Erhitzung im Kreuzstrom. Bei dieser Art der Wärmeübertragung, ist kein Temperaturgradient bezogen auf die Fließrichtung vorgegeben. Dadurch ergibt sich bei kontinuierlichen Prozessen ein relativ homogenes Temperaturprofil über die gesamte Reaktorlänge. Bei diesem Verfahren besteht bei einem zusätzlichen verfahrenstechnischen Aufwand die Möglichkeit, Temperaturbereiche zu definieren und eine gestufte Erhitzung entlang des Pyrolyseprozesses einzustellen. Die Wärmeübertragung im Kreuzstrom gilt auch für Batch-Retorten. Bei drei Anlagen ist die Richtung der Wärmeübertragung nicht genau definiert (L, M, P).

Abbildung 15: Schematische Darstellung der Wärmeübertragungsrichtung



Für den Großteil der Anlagen stellt die Verbrennung der Pyrolysegase die **Wärmequelle** für die Erhitzung der Biomasse dar (autotherm). Fünf der vorgestellten Anlagen werden elektrisch beheizt (allotherm; C, E, N, O, Q). Der Vorteil von elektrisch beheizten Anlagen ist, dass die Temperatureinstellung grundsätzlich unabhängig vom Pyrolyseprozess gestaltet werden kann. Allerdings ist von höheren Kosten für die Erhitzung auszugehen, da der Kauf oder die Erzeugung von Strom in der Regel teurer sind als für Wärme.

4.2.8 Betriebsparameter

Ausschlaggebende Faktoren für die Produktezusammensetzungen und -qualitäten der Pyrolyse sind neben der Rohstoffart die Prozessparameter Temperatur, Verweilzeit und Aufheizrate. Die Temperatur wird als der am meisten ausschlaggebende Parameter angesehen, da der thermische Abbau der Hauptbestandteile der Biomasse (Lignin, Zellulose und Hemizellulose) von der Höhe der Temperatur stark beeinflusst wird (Rasaq, Golonka, Scholz, & Bialowiec, 2021). Weber und Quicker (2018) beschreiben 30 verschiedene Biokohleeigenschaften, die von der Temperatur abhängig sind. Hier wird auch erläutert, dass eine längere Verweilzeit einen ähnlichen Effekt wie eine höhere Temperatur hat (Weber & Quicker, 2018). Die Aufheizrate hat ebenfalls einen starken Einfluss und wirkt sich besonders auf die Aufteilung zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Produkten aus. Sie ist auch ein wichtiges Kriterium zur Klassifizierung der Pyrolyse (schnell, mittelschnell, langsam) (Jouhara, et al., 2018)

In dieser Erhebung wurden folgende Betriebsparameter erhoben:

- der Zieltemperaturbereich, also der mögliche Bereich der Maximaltemperatur,
- die Anlagenverweilzeit, also die Dauer von Rohstoffeintritt bis Kohleaustritt aus dem Reaktor, und
- der Druck, als verfahrenstechnische Zusatzinformation.

Die **Aufheizrate** wurde nicht erhoben, da sie einerseits schwierig zu ermitteln und daher im Normalfall nicht gemessen wird. Zudem kann sie je nach Verfahren auch nur als theoretischer Durchschnittswert berechnet werden, da die Aufheizraten von vielen Materialeigenschaften abhängig sind.

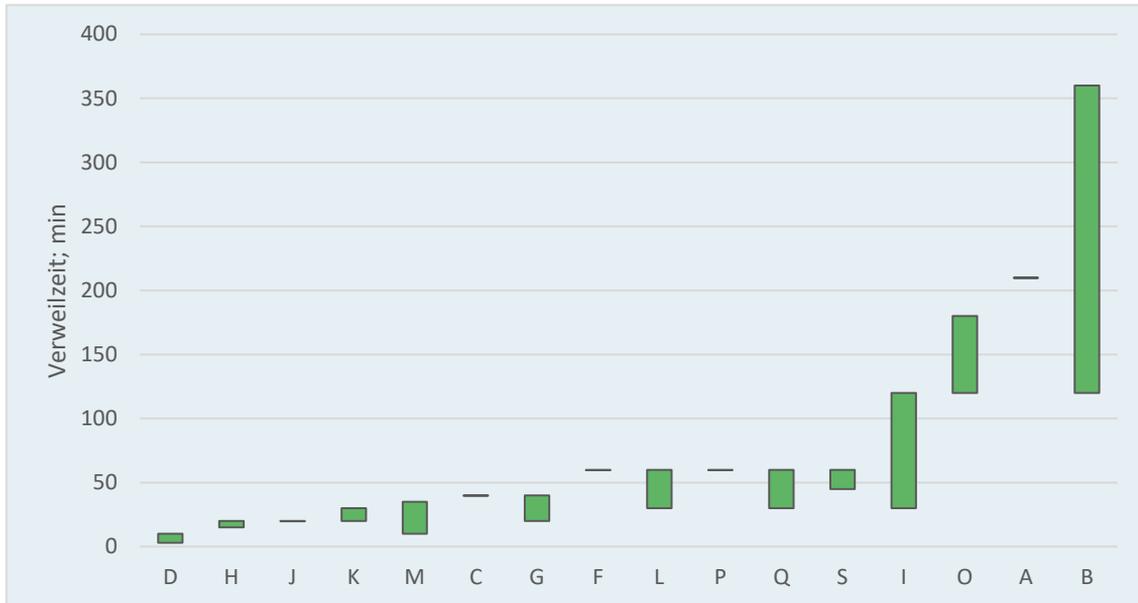
Der **Zieltemperaturbereich** der meisten erhobenen Anlagen liegt zwischen von 400 und 900°C (Abbildung 16). Bei einigen wenigen reicht der Temperaturbereich über diese Spanne hinaus, wodurch die technischen Möglichkeiten der jeweiligen Anlagen gezeigt werden. Die Angabe von Bereichen zeigt zudem, dass die Temperaturen entsprechend des Einsatzmaterials und der Produktansprüche angepasst werden können.

Abbildung 16: Zieltemperaturbereich der Anlagen; Für Anlage E wurde eine Mindesttemperatur, für die Anlagen R, O und Q eine Maximaltemperatur angegeben.



Die **Verweilzeiten** werden in Abbildung 17 dargestellt. Hierbei handelt es sich um die Anlagenverweilzeit, also die durchschnittliche Dauer der Feststoffe im Reaktor. Für die meisten Anlagen liegen die Verweilzeiten zwischen 20 und 60 Minuten. Vor allem bei den Batch-Anlagen liegt die Verweilzeit prozessbedingt im oberen Bereich von bis zu sechs Stunden. Während dieser Zeit findet sowohl die Erhitzung, wie auch die Verweilzeit bei Maximaltemperatur statt. Zusätzlich findet bei Batch-Anlagen ein Teil der Abkühlung in der Anlagenverweilzeit statt. Die Anlagenverweilzeit dient daher als verfahrenstechnische Information und stellt nur einen Anhaltspunkt für die Einschätzung der Verweilzeit bei Maximaltemperatur dar, welche ausschlaggebend für die Produktqualität ist.

Abbildung 17: Verweilzeiten der Anlagen A-S; *Für die Angabe von „ein paar Minuten“ wurde ein Wert von 10 min angenommen; Keine Grenzen für die Anlagen N und R definiert („individuell regelbar“), daher werden sie nicht im Diagramm angezeigt; Die Verweilzeiten der Batch-Anlagen A und B, entsprechen der Dauer eines Batch-Prozesses.



Bezüglich des Prozessdruckes, werden nahezu alle Prozesse bei Umgebungsdruck betrieben. Je nach Anlagenauslegung, werden manche in leichtem Über- und oder Unterdruck betrieben, um Gaseintritt und oder Gasaustritt zu verhindern.

4.3 Prozessbewertung und Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Pyrolyse kann als alternativer Verwertungsprozess zur Verbrennung beschrieben werden. Wesentlicher Unterschied ist die Möglichkeit der Erzeugung von wertvollen Produkten (Biokohle, Pyrolysegas, Kondensate wie Pyrolyseöl oder Holzessig). Dieser Unterschied wirkt sich einerseits auf das Emissionsverhalten und die daraus resultierende Umweltwirkung, und andererseits auf die Wirtschaftlichkeit aus. Diese Aspekte werden anhand folgender Bilanzierungen und Berechnungen im Vergleich zum Verbrennungsprozess näher erläutert. Für die Interpretationen der Ergebnisse der folgenden Berechnungen müssen die Annahmen, die in Kapitel 3.2.3 beschrieben werden, beachtet werden.

4.3.1 Massenbilanz und Kohlenstoffbilanz

Die Bilanzen für Pyrolyse werden in Tabelle 13 dargestellt. (Die Ergebnisse müssen unter Beachtung der Annahmen interpretiert werden.) 22% der Masse des Ausgangsrohstoffs liegen nach der Pyrolyse chemisch gebunden als Feststoff vor. 72% liegen in Form von feuchtem Pyrolysegas vor,

das im nächsten Schritt verbrannt wird. Im feuchten Pyrolysegas ist auch der Wasserdampf, resultierend aus dem Restwassergehalt des Rohstoffs enthalten. Demgegenüber steht die Verbrennung (nicht in der Tabelle dargestellt) bei der die gesamte Masse, abgesehen von der Asche (etwa 1,5% (Baumbach, et al., 2016)), in Abgas umgewandelt wird.

Aus der Kohlenstoffbilanz geht hervor, dass 40% des Kohlenstoffs in chemisch gebundener Form als Biokohle vorliegt, während bei der Verbrennung 100% in Form von Abgas in die Atmosphäre abgegeben werden.

Tabelle 13: Massenbilanz und Kohlenstoffbilanz der Pyrolyse ⁽¹⁾ zuzüglich Verbrennungsluft; WG...Wassergehalt)

	Massenbilanz		Kohlenstoffbilanz	
	Masse; kg	Massenanteil; %	Kohlenstoff; kg	Kohlenstoffanteil; %
Hackgut 20% WG	1,00	100%	0,40	100%
Trocknung auf 15% WG				
Hackgut 15% WG	0,94	94%	0,40	100%
Wasser	0,06	6%	-	-
Pyrolyse				
Biokohle	0,20	20%	0,16	40%
feuchtes Pyrolysegas	0,74	74%	0,24	60%
Verbrennung Pyrolysegas				
feuchtes Abgas	0,74 ¹⁾	74% ¹⁾	0,24	60%

4.3.2 Energiebilanz

Wie im Kapitel 3.2.3 näher beschrieben, werden 2 Technologievarianten für die Pyrolyse analysiert und mit 2 Verbrennungstechnologievarianten verglichen. Die Ergebnisse der Energiebilanzen werden in Tabelle 14 für Pyrolyse, Tabelle 15 für Verbrennung und Abbildung 18 angezeigt.

Tabelle 14: Energiebilanzen für Pyrolyse mit Kohle- und Wärmeerzeugung und mit Kohle-, Wärme- und Stromerzeugung. (WG...Wassergehalt; *höhere Energiewerte aufgrund von Trocknung)

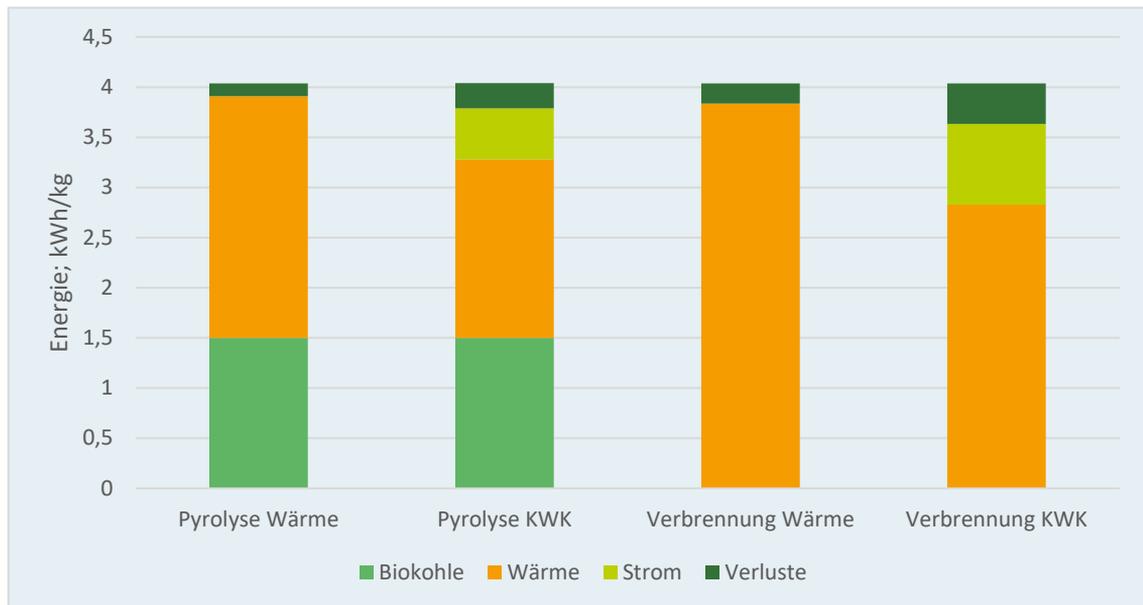
	Masse; kg	Pyrolyse Wärme		Pyrolyse KWK	
		Energie; kWh	Energieanteil; %	Energie; kWh	Energieanteil; %
Hackgut 20% WG	1,00	4	100%	4	100%
Trocknung auf 15% WG					
Hackgut 15% WG	0,94	4,04*	101%*	4,04*	101%*
Pyrolyse					
Biokohle	0,20	1,50	38%	1,50	38%
feuchtes Pyrolysegas	0,74	2,54	63%	2,54	63%
Pyrolysegasnutzung					
Strom		-	-	0,51	13%
Wärme		2,41	60%	1,78	44%
Verluste		0,13	3%	0,25	6%

Der Vergleich der Energieanteile der vier Technologievarianten (Abbildung 18) zeigt den hohen Energieanteil, der bei der Pyrolyse in Form von Kohle gespeichert wird, von knapp 40%. Der Rest teilt sich im gleichen Verhältnis wie bei den Verbrennungstechnologien in Wärme und Strom auf. Betrachtet man den Gesamtprozess, wirken sich die Verluste, die bei der Energieerzeugung entstehen, weniger aus, als bei der Verbrennung. Bezogen auf den Gesamtprozess wird die Brennstoffenergie daher effizienter genutzt. Die Verluste bezogen auf nutzbare Energie in Form von Strom oder Wärme sind jedoch gleich.

Tabelle 15: Energiebilanzen für ein Heizwerk und ein BHKW (WG...Wassergehalt; *höhere Energie-
werte aufgrund von Trocknung)

	Masse; kg	Verbrennung Wärme		Verbrennung KWK	
		Energie; kWh	Energieanteil; %	Energie; kWh	Energieanteil; %
Hackgut 20% WG	1,00	4,00	100%	4,00	100%
Trocknung auf 15% WG					
Hackgut 15% WG	0,94	4,04*	101%*	4,04*	101%*
Verbrennung/Verstromung					
Strom		-	-	0,81	20%
Wärme		3,84	96%	2,83	71%
Verluste		0,20	5%	0,40	10%

Abbildung 18: Energieanteile der Produkte für mittelschnelle Pyrolyse mit Wärmeerzeugung und mit Strom- und Wärmeerzeugung und für ein Biomasseheizwerk und ein Biomasseheizkraftwerk.



4.3.3 Wirtschaftlichkeitsberechnungen für Pyrolyse und Vergleich mit Verbrennungstechnologien

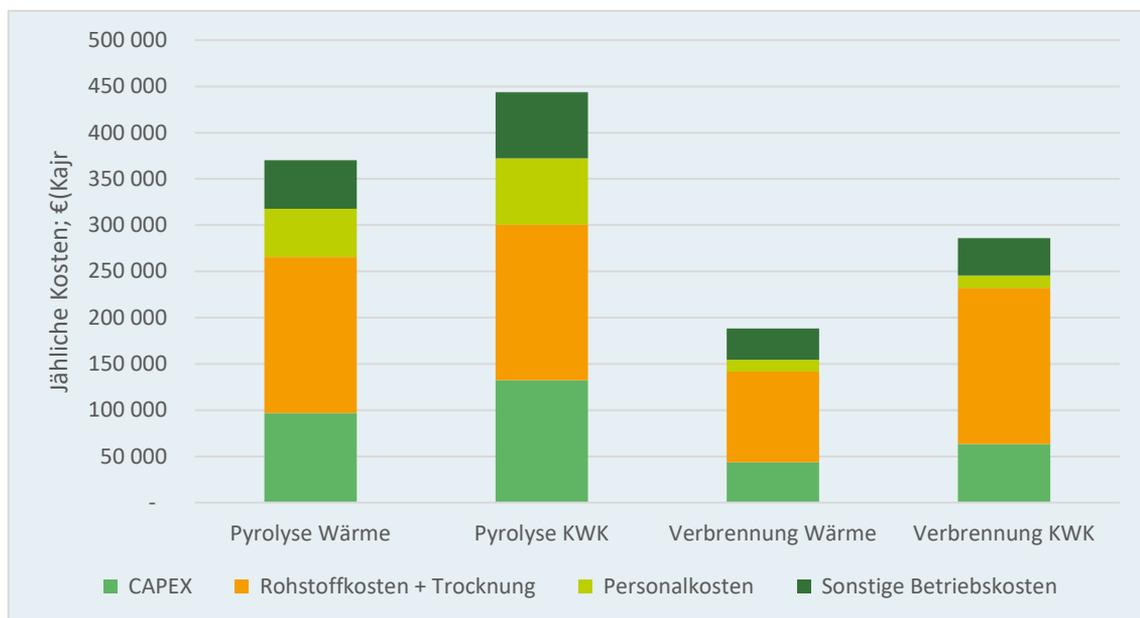
Alle Annahmen für die Szenarien 1-4 werden im Kapitel 3.2.3.3 beschrieben und müssen für die Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Die Ergebnisse werden in Tabelle 16, gezeigt und über den folgenden Abbildungen (Abbildung 19, Abbildung 20 und Abbildung 21) näher erläutert.

Tabelle 16: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen

	Pyrolyse Wärme	Pyrolyse KWK	Verbrennung Wärme	Verbrennung KWK
KOSTEN				
Abschreibungskosten Infrastruktur - CAPEX; €/Jahr	96.842	132.304	43.685	63.325
Rohstoffkosten (inkl. Trocknung); €/Jahr	168.600	168.600	97.897	168.600
Personalkosten; €/Jahr	52.302	71.454	12.750	13.500
Sonstige Betriebskos- ten; €/Jahr	52.302	71.454	34.000	40.500
ERLÖSE				
Erlöse Kohle; €/Jahr	260.817	260.817		
Erlöse Strom; €/Jahr	-	122.063		193.750
Erlöse Wärme; €/Jahr	115.959	85.444	213.750	135.625
GEWINN/VERLUST				
Gewinn; €/Jahr	6.731	24.512	32.568	43.450

Die Höhe und Zusammensetzung der jährlichen **Kosten** der Technologie-Varianten werden in Abbildung 19 dargestellt. Bei den 2 Varianten für Pyrolyse, zeigt sich, dass höhere Kosten für Pyrolyse KWK anfallen, was vor allem auf die höheren Kapitalkosten für die Verstromung zurückzuführen ist. Die deutlich niedrigsten Kapitalkosten fallen für die rein wärmegeführte Verbrennungstechnologie an, was darauf zurückzuführen ist, dass Investitionen für Pyrolyse- und Verstromungstechnologien (ORC) im Vergleich zu Verbrennungstechnologien sehr hoch ausfallen. Auffallend ist, dass die Rohstoffkosten bei Heizwerken (Verbrennung Wärme) sehr niedrig sind, was aus der verhältnismäßig geringeren jährlichen Laufzeit (kein Betrieb im Sommer) resultiert, während für Pyrolyse- und KWK-Anlagen ein durchgehender Betrieb angenommen wird. Personalkosten schlagen sich bei der Pyrolyse stärker auf die Gesamtkosten nieder, was auf den höheren Arbeitsaufwand aufgrund vom Kohlehandling zurückzuführen ist. Die höchsten jährlichen Kosten fallen demnach bei Pyrolyse KWK mit knapp 450.000 €/Jahr an, die niedrigsten bei Heizwerken mit 190.000 €/Jahr. Generell zeigt sich allerdings, dass für Pyrolyseanlagen das Verhältnis von operativen Kosten zu Kapitalkosten geringer ist (Faktor 2,8 für Pyrolyse Wärme und Faktor 2,3 für Pyrolyse KWK) als für Verbrennungsanlagen (beide Verbrennungstechnologievarianten zeigen einen Faktor 3,3-3,5). Demnach wirken sich Veränderungen in den Operativen Kosten (wie z.B. Preisänderungen bei Rohstoffen oder Indexanpassungen bei Personalkosten) verhältnismäßig geringer auf die Gesamtkosten aus.

Abbildung 19: jährliche Kosten für Technologievarianten



Die jährlichen **Erlöse** sind in Abbildung 20 dargestellt. Die höchsten Erlöse können für die zwei Pyrolyse-Technologievarianten mit 380.000 und 470.000 €/Jahr erzielt werden. Wichtigster Anteil in deren Erlösstruktur sind die Erlöse aus dem Verkauf von Biokohle von jeweils 260.000 €/Jahr. Durch den Verkauf von Energie können die Erlöse für Pyrolyse Wärme um 45%, und für Pyrolyse

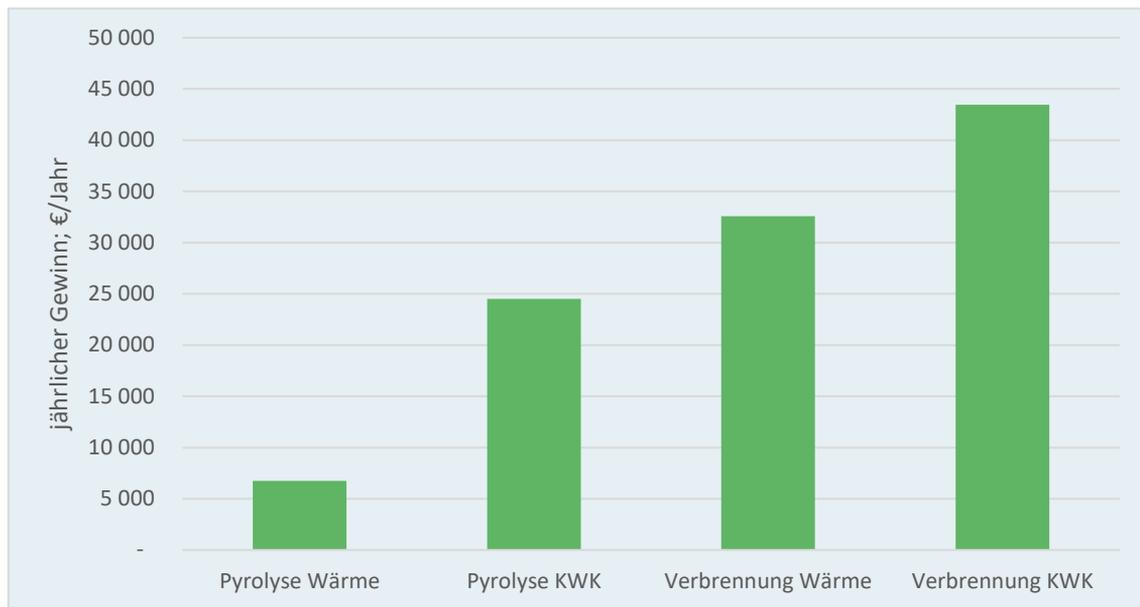
KWK um 80% erhöht werden. Der Energieverkauf stellt daher eine nicht zu unterschätzende Rolle für die Wirtschaftlichkeit von Pyrolyse dar. Der höhere Anteil an Energieerzeugung bei den Verbrennungsvarianten können die fehlenden Erlöse von Kohle nicht kompensieren, weshalb die Erlössummen deutlich geringer ausfallen.

Abbildung 20: jährliche Erlöse für Technologievarianten



Wie in Abbildung 21 ersichtlich kann für alle Technologievarianten unter den definierten Annahmen ein **Gewinn** erzielt werden. Bei den Pyrolyseanlagen kann durch zusätzliche Verstromung ein deutlich höherer Gewinn erzielt werden. Ähnlich wie bei den Verbrennungstechnologien führen die zusätzlichen Einnahmen über den Stromverkauf trotz höherer Investitionskosten für z.B. ein ORC-Modul zu höherem Gewinn. Die Gewinne der Pyrolyseanlagen (Pyrolyse Wärme: 6.700 €/Jahr und Pyrolyse KWK: 24.500 €/Jahr) liegen jedoch trotz höherer Erlöse deutlich unter den Gewinnen der Verbrennungstechnologien (Verbrennung Wärme: 32.500 €/Jahr und Verbrennung KWK: 43.500 €/Jahr). Für die Verbrennungstechnologien können daher höhere Umsatzrentabilitäten (Gewinn pro Erlös), von 15% (Verbrennung Wärme) und 13% (Verbrennung KWK) erzielt werden, als für die Pyrolyseanlagen mit 2% (Pyrolyse Wärme) und 5% (Pyrolyse KWK). Das wird vor allem auf die wesentlich höheren Investitionskosten und die höheren Personal- und Betriebskosten zurückgeführt.

Abbildung 21: Gewinn für Technologievarianten



4.3.4 Sensitivitätsanalyse

Aufgrund der niedrigen bzw. moderaten Gewinne für Pyrolyseanlagen können Schwankungen der Preise und Absatzmengen der Produkte vor allem für die Technologievariante Pyrolyse Wärme unmittelbar und schnell zu einem stark veränderten Betriebsergebnis führen. Wie bereits in Abbildung 20 gezeigt wird, spielt der zusätzliche Energieverkauf eine erhebliche Rolle in der Erlösstruktur und ist essenziell um einen Gewinn erzielen zu können. Besonders der Wärmeverkauf setzt günstige Umgebungsbedingungen voraus, um einen hohen Absatz gewährleisten zu können. Ein ganzjähriger, konstanter Wärmebedarf ist selten gegeben. In Abbildung 22 wird der **Einfluss des Wärmeverkaufs** auf den Gewinn der Pyrolyseanlagen gezeigt. Ist kein Wärmeabsatz möglich verursacht die Pyrolyseanlage insgesamt einen jährlichen Verlust von fast 110.000€/Jahr. Kann hingegen unter günstigen Bedingungen die gesamte Wärme abgesetzt werden, kann der Gewinn auf 120.000 €/Jahr, also um etwa das 20-fache im Vergleich zu 50% Wärmeabsatz, gesteigert werden. Das entspricht einer Umsatzrentabilität von 25%.

Ähnlichen Einfluss hat der Wärmeabsatz, wenn mit der Pyrolyse auch Strom und Wärme erzeugt wird. Allerdings ist der Effekt durch den zusätzlichen Erlös durch Stromverkauf und die geringere Menge an verfügbarer Wärmeenergie etwas abgepuffert. Dennoch kann der Gewinn 100% abgesetzter Wärme auf 110.000 €/Jahr, anstatt von 24.500 €/Jahr bei 50% Wärmeabsatz, gesteigert werden. Vergleicht man in diesem Zusammenhang die zwei Pyrolyse Technologievarianten, dass die Verstromung höhere Gewinne bei niedrigeren Wärmeabsatz sichert und das Risiko schwankenden Wärmebedarfs mildert. Kann jedoch von einer 100%igen Wärmenutzung ausgegangen wer-

den, kann durch die verhältnismäßig geringeren Investitionskosten für die Pyrolyse mit Wärmeauskopplung zu höheren Gewinnen führen – womit sich der ausschließliche Wärmeverkauf wirtschaftlicher darstellt als die KWK Technologievariante.

Abbildung 22: Einfluss von Wärmeverkauf auf die Wirtschaftlichkeit der Pyrolyse



Analog zur Sensitivität der Energie-Integration, zeigt die Wirtschaftlichkeitsanalyse, dass **Kostenschwankungen der Rohstoffe** sich ebenfalls stark auf das Betriebsergebnis auswirken können. Im Folgenden werden diese Auswirkungen anhand von unterschiedlichen Vergleichsrohstoffen (siehe Kapitel 3.2.3.3) sowie anhand von Veränderungen des Rohstoffpreises und des Wassergehaltes untersucht.

Der derzeitige Hackgutpreis, der eingesetzt wurde, von 110 €/t_{atro} ist sehr hoch im Vergleich zu den letzten Jahren. Geht man von einem reduzierten Hackgutpreis von 100 €/t_{atro} aus, erhöht sich der Gewinn bereits um etwa das Dreifache. Demgegenüber steht ein eher niedriger Wassergehalt von 20%, der in den Berechnungen angenommen wurde. Wäre der Wassergehalt bei 35% (und die Kosten bei 110 €/t_{atro}) würde aufgrund des erhöhten Trocknungsbedarfs die Erlöse aus der Energieintegration deutlich geringer werden und somit mitunter ein negatives Betriebsergebnis erzielt werden.

Ein ausschlaggebender Unterschied in der Kostenstruktur für die betrachteten, unterschiedlichen Rohstoffe sind die Rohstoffkosten. Trotz niedrigeren Anschaffungskosten für Straßenbegleitschnitt, die rein aus den Ernte- und Bringungskosten resultieren, sind im Vergleich zum Referenzrohstoff erhöhte Kosten für die Trocknung zu berücksichtigen. Im Verhältnis dazu sind die Rohstoffkosten für Dinkelspelzen, nochmal geringer, da hier keine zusätzliche Trocknung notwendig

ist. Aufgrund der geringen Schüttdichte, bzw. dem hohen spezifischem Volumen, wird aber angenommen, dass die Anlagenkapazität deutlich eingeschränkt sein wird, da das Volumen der Förderinfrastruktur den Durchsatz der Anlage begrenzt. Deshalb kann angenommen werden, dass mit einer Anlage mit nominal 250 kg/h Kapazität nur 125 kg/h Dinkelspelzen verarbeitet werden können, was die Erlöse aus Wärme, Strom und Biokohle-Verkauf schmälert.

Abbildung 23: Einfluss von Rohstoffkosten und Rohstoffwassergehalt auf die Wirtschaftlichkeit der Pyrolyse

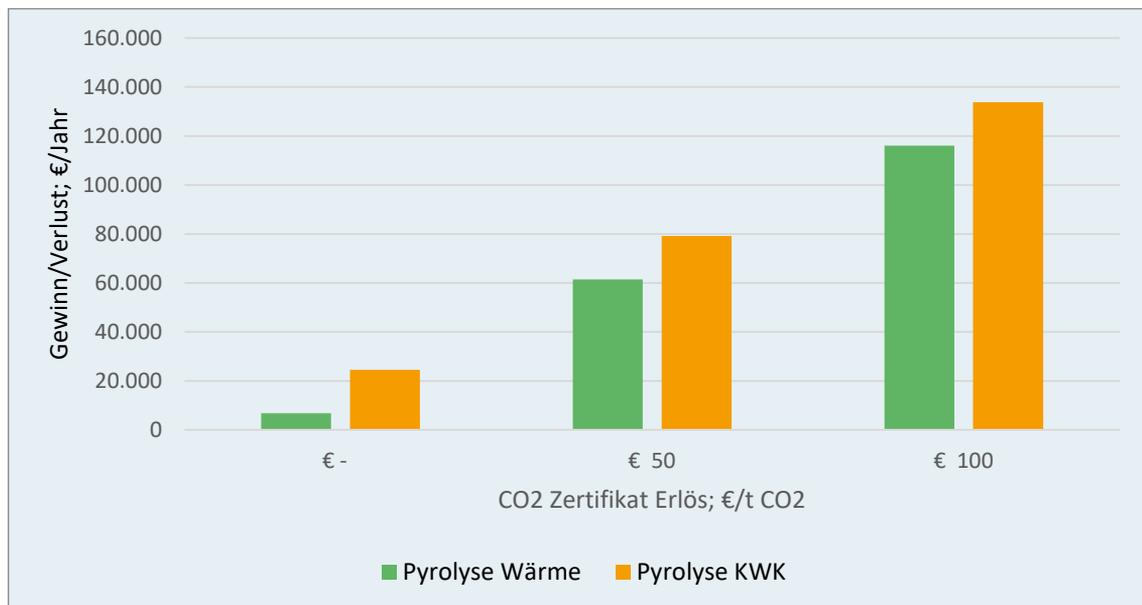


Die geringsten Erlöse werden aktuell für Straßenbegleitschnitt als Rohstoff erzielt. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Kohle nicht abgesetzt werden kann, da sie nach Abfallwirtschaftsgesetz als Abfall eingestuft wird und entsprechend der definierten Annahmen nicht abgesetzt werden kann. Eine Nutzung wäre jedoch bei entsprechenden Zulassungen (z. B. in der Stahl-, Beton- oder Asphaltindustrie) denkbar, wodurch ein Markt für die Biokohle entstehen und zusätzliche Erlöse realisiert werden könnten.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse hinsichtlich Rohstoffeigenschaften zeigen, dass sie sich deutlich auf das Betriebsergebnis auswirken können. Rohstoffeigenschaften und die Absatzmöglichkeiten der Produkte müssen daher genau evaluiert werden bei der Planung einer Anlage. Ein günstiger Rohstoff führt nicht automatisch zu einem besseren Betriebsergebnis. Sowohl die Erlöse aus Kohleverkauf, als auch die Erlöse vom Energieverkauf sind notwendig, um alle Kosten decken bzw. Gewinn erzielen zu können.

Ein mögliche zusätzliche Erlösquelle könnte hier über den Verkauf von CO₂-Zertifikaten erwirtschaftet werden. Soweit aktuell bekannt, erfolgen diese CO₂ Zertifikate außerhalb des Europäischen ETS Handel-Systems sondern in unterschiedlichen Plattformen, in welchen CO₂ Senken verkauft werden (z.B. www.carbonfuture.earth). Auch das European Biochar Certificate (<https://www.european-biochar.org/en/c-sink>) unterstützt diese Vorgehensweise bereits, indem Herstellungs-Prozesse als auch Nutzungsmöglichkeiten zertifiziert und damit qualitätsgesichert verkauft werden können. Es wurde deshalb untersucht, wie sich die Wirtschaftlichkeit der Pyrolyseanlagen mit und ohne KWK Technologie, bei einem zusätzlichen CO₂ Erlös von 50 und 100 €/t entwickelt und in Abbildung 24. Bereits ab 50€/t können Erlöse von mehr als 10% der jährlichen Gesamtkosten lukriert werden und steigen bei 100€/t auf über 100.000€/Jahr.

Abbildung 24: Sensitivitätsanalyse der Gewinn/Verlust Rechnung bei zusätzlichen Erlösen aus CO₂ Zertifikaten



4.4 Steckbrief Pyrolysetechnologien in Europa

Gefördert durch

 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie



Technologie-Steckbrief

Intermediate Pyrolyse

Kurzbeschreibung

Pyrolyse ist eine thermochemische Konversionsmethode von organischen Roh- und Reststoffen. Dabei entstehen feste, flüssige und gasförmige Kohlenstoffprodukte, welche zur Energieerzeugung, als Wertstoff und zur CO₂ Speicherung verwendet werden können. Dementsprechend ist Pyrolyse eine Kopplungstechnologie für diverse Sektoren Energie – Kreislaufwirtschaft – CO₂ Negativ-Emission.

Technologie Readiness Level (TRL)

5-8

Technologiepotenzial

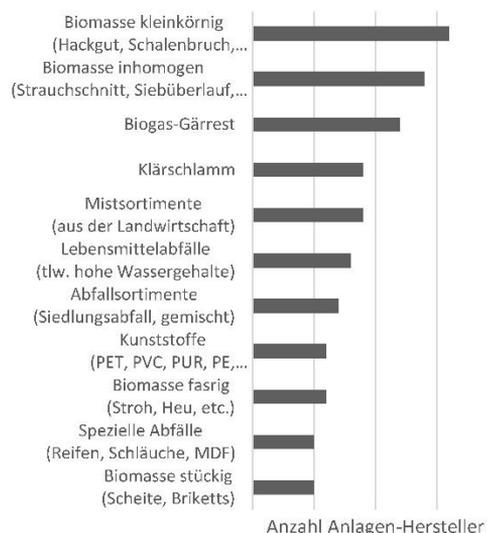
Je nach Betriebsparameter können unterschiedliche Produktqualitäten und -ausbeuten erzielt werden. Bei der Intermediate (mittelschnellen) Pyrolyse können bis zu 40% des Kohlenstoffs in Form von Pflanzenkohle umgesetzt werden. Insbesondere für dezentrale Anwendungen stellt die Pyrolyse eine interessante Technologie dar, um organische Roh- und Reststoffe zu verwerten.



GreenCarbon Lab Pilot Pyrolyseanlage, BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies, Wieselburg (Foto: Elisabeth Wopienka)

Einsatzrohstoffe

Europaweit sind 57 Hersteller ansässig – hier ein Überblick über die eingesetzten Einsatzrohstoffe.



BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH

Firmensitz Graz | Inffeldgasse 21b | A 8010 Graz

T +43 5 02378-9201 | F +43 5 02378-9299 | office@best-research.eu | www.best-research.eu

FN 232244k | Landesgericht für ZRS Graz | UID-Nr. ATU 56877044 | Seite 1 von 2

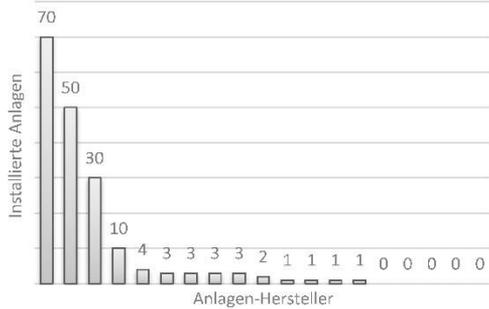
Gefördert durch

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie



Referenzanlagen

Nur wenige Hersteller haben bisher Anlagen installiert. Viele junge Unternehmen kommen gerade mit neuen Entwicklungen an den Markt.



Wachstumspotenzial in Österreich

Aktuell befindet sich der Hotspot für Pyrolysetechnologien in Deutschland (18 Hersteller), Schweiz (7), Niederlande (6) und Österreich (6). Österreich hat bedingt durch die große Erfahrung im Bioenergie-Sektor großes Potenzial aufzuholen.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Zusammenhang Kohlenstoff-Produkt Qualitäten mit Prozessbedingungen
- Verwendungsmöglichkeiten für flüssige und gasförmige Kohlenstoff-Produkte
- Schnittstellen für Sektorkopplung

Beitrag zum Klimaschutz

Pro kg verwerteter organischer Reststoff können 580g CO₂ als Pflanzenkohle gebunden werden.

Beitrag zum Umweltschutz

Pflanzenkohle kann in unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt werden. Unter anderem in Böden zur Erhöhung der Biodiversität, oder in der Wasseraufbereitung.

Beschleuniger (+) und Hemmnisse (-)

- + Europäische Carbon Removal Certificate Framework hat Pflanzenkohle als langlebiges Produkt berücksichtigt
- + Pyrolyse als eine der Schlüsseltechnologie für Kreislaufwirtschaftsstrategien
- keine Standards und Normen für Herstellungsprozesse und Produktqualitäten
- Abfallrechtlich sind Produkte aus Pyrolyse gleichgesetzt mit den eingesetzten Reststoffen.



4.5 Folien Pyrolysetechnologien in Europa



Pyrolysetechnologien in Europa

Projektabschlussbesprechung
Wien, 19.03.2024

Gefördert durch

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

Manuel Schwabl, Franziska Klauser, Markus Schwarz





Pyrolysetechnologien sind Multi-Sectoral



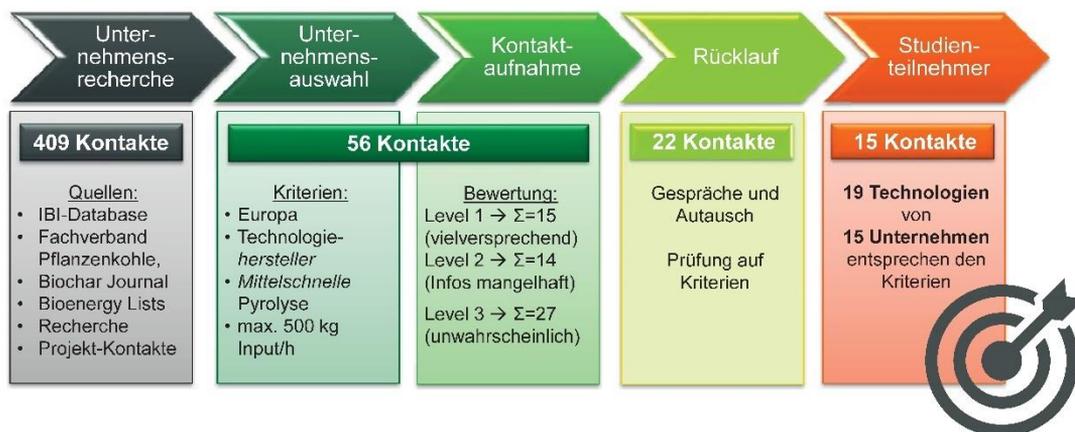
3

PyroTechOverview - Pyrolysetechnologien in Europa

26.04.2024



Unternehmenskontakte



4

PyroTechOverview - Pyrolysetechnologien in Europa

26.04.2024

Europäische Hersteller

Intermediate Pyrolysis
Dezentrale Anwendungen,
insgesamt 57 Hersteller

Studienteilnehmer

Country	
Germany	9
Switzerland	2
Great Britain	1
Austria	1
Czech Republic	1
Poland	1

5 PyroTechOverview - Pyrolysetechnologien in Europa

26.04.2024

Pyrolyse Weltweit



USA
• Von klein bis groß
• Förderungen



Asien – Pazifik
• Co-Combustion
• Große Anlagen



Afrika
• Ersatz von Holzkohle

6 PyroTechOverview - Pyrolysetechnologien in Europa

26.04.2024

Technologie - Daten

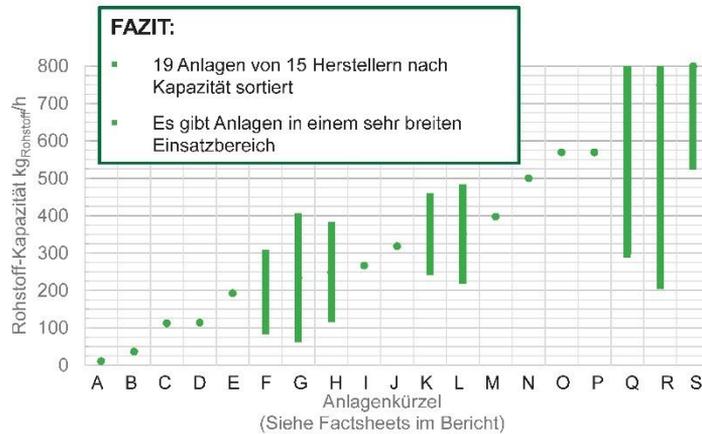
- Kapazitäten
- Rohstoffe
- Produkte
- Technologie
- CAPEX
- OPEX
- Zielmärkte
- Technologiereife



7

26.04.2024

Kapazitäten der erhobenen Anlagen



8

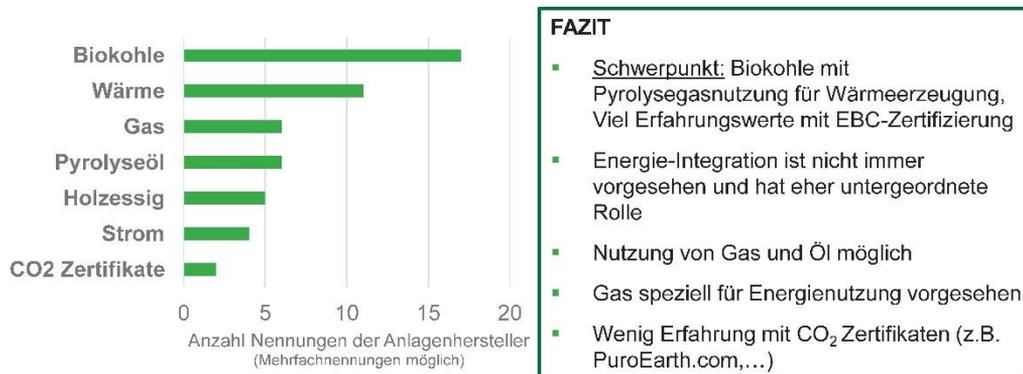
PyroTechOverview - Pyrolysetechnologien in Europa

26.04.2024

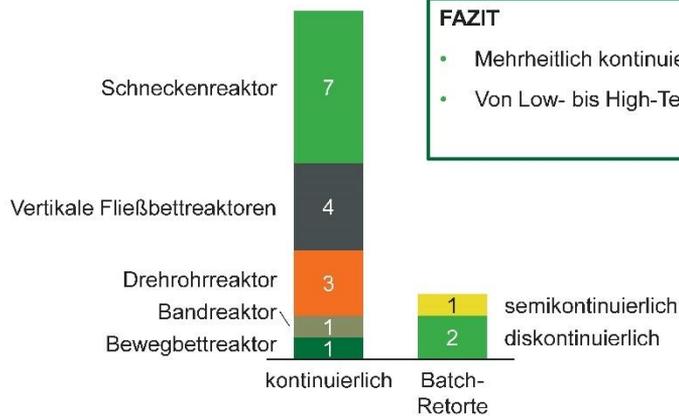
Eignung der Anlagen für Roh-/Reststoffe



Mögliche Produkte der erhobenen Anlagen



Pyrolyse-Technologien



FAZIT

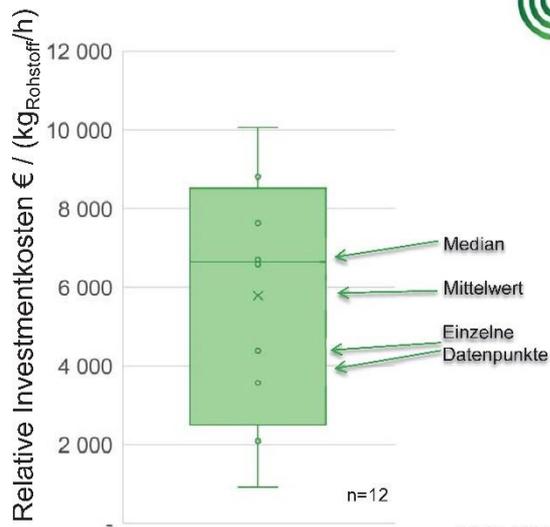
- Mehrheitlich kontinuierliche Systeme
- Von Low- bis High-Tech Systeme

Relativer CAPEX



FAZIT

- Mittlerer Investitionspreis: **5800 €/ (kg/h)** oder **1.450.000 €/MW** (Rohstoffleistung)
- Hoher Schwankungsbereich
- Kein Trend entsprechend der Kapazität ersichtlich

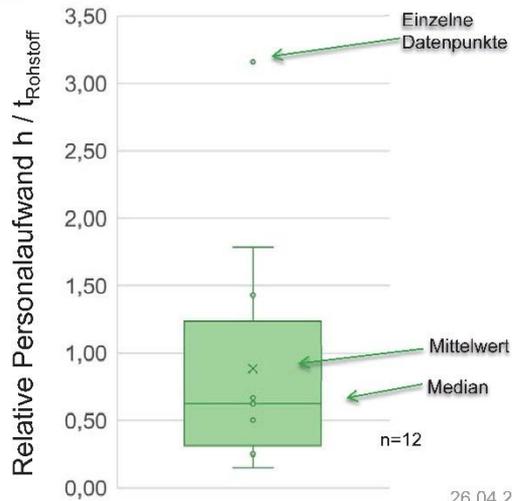


OPEX - Personalaufwand



FAZIT

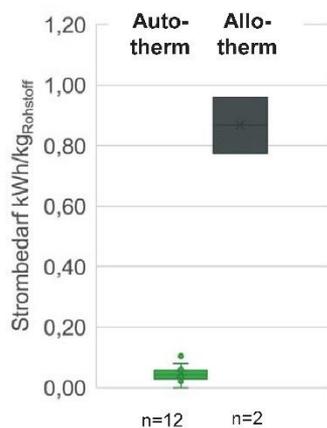
- Mittlerer Personalaufwand: **0,9 h/t Rohstoffeinsatz** bzw. **4,5 h/t Biokohle** (bezogen auf Hackgut mit 20% Wassergehalt, 25% Ausbeute)
- Mittelwert für kontinuierliche Anlagen: 0,6 h/t (Rohstoffeinsatz)
- Höherer Personalaufwand bei Batchanlagen
- Für fast alle Anlagen ist zusätzlich **Fernüberwachung** erforderlich



13

26.04.2024

OPEX - Strombedarf



Autotherm – Energie des Rohstoffes wird genutzt für Prozess

Allotherm – externe/zusätzliche Energie wird benötigt für Prozess

FAZIT

- Autotherme Pyrolyse-Anlagen brauchen vergleichbar viel Strom als Verbrennungsprozesse
- Allotherme Prozesse benötigen einen signifikanten Stromaufwand, und ist stark abhängig von Rohstoff und Technologie

14

PyroTechOverview - Pyrolysetechnologien in Europa

26.04.2024

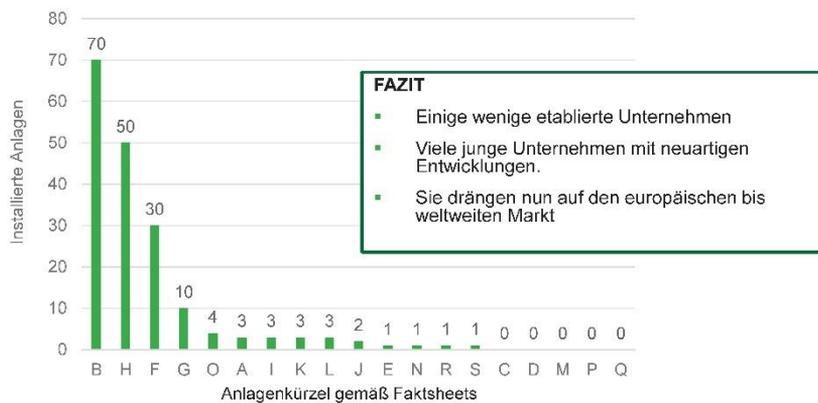
Zielmarkt laut Hersteller



15

26.04.2024

Technologiereife



16

PyroTechOverview - Pyrolysetechnologien in Europa

26.04.2024

Wirtschaftlichkeitsanalyse - Annahmen



- Berechnungen anhand einer **fiktiven Pyrolyseanlage**

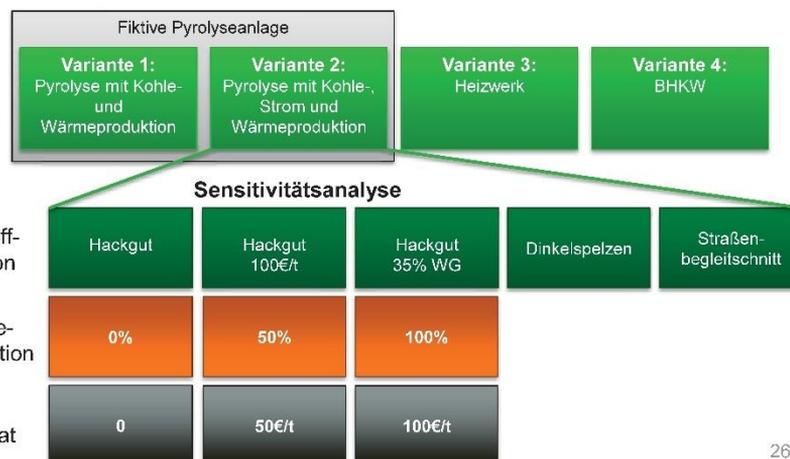


- Anwendung der Erhebungsdaten (Investkosten, Personalkosten, Betriebsstunden,...)

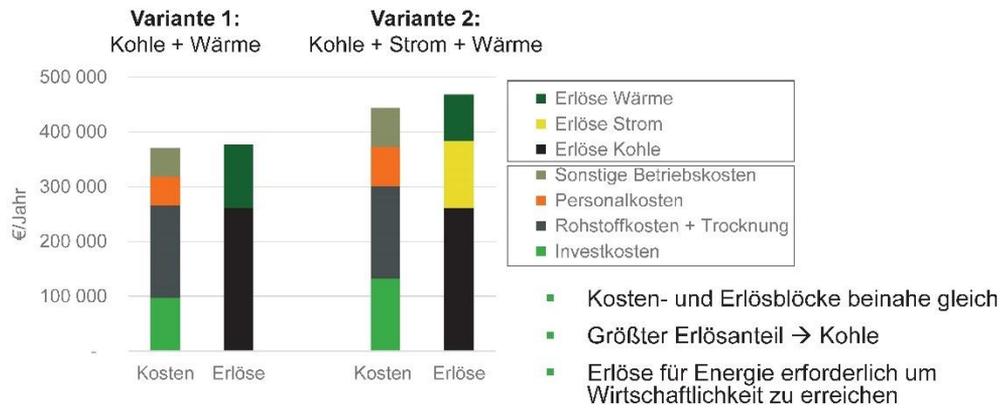
Weitere Annahmen:

- Ausbeuten:** Kohleausbeute 25%, Verbrennung: $\eta_{\text{therm}}=95\%$, KWK: $\eta_{\text{el}}=20\%$, $\eta_{\text{therm}}=70\%$
- Preise:** Hackgut: 110€/t_{stroh}, Kohle: 700 €/t, Wärme 0,05€/kWh, Strom 0,125 €/kWh, Verkauf von 50% der anfallenden Wärme
- Investition:** Invest Verstromung: 5.000 €/kW, Investitionszinssatz: 3,5%,

Wirtschaftlichkeitsanalyse - Herangehensweise



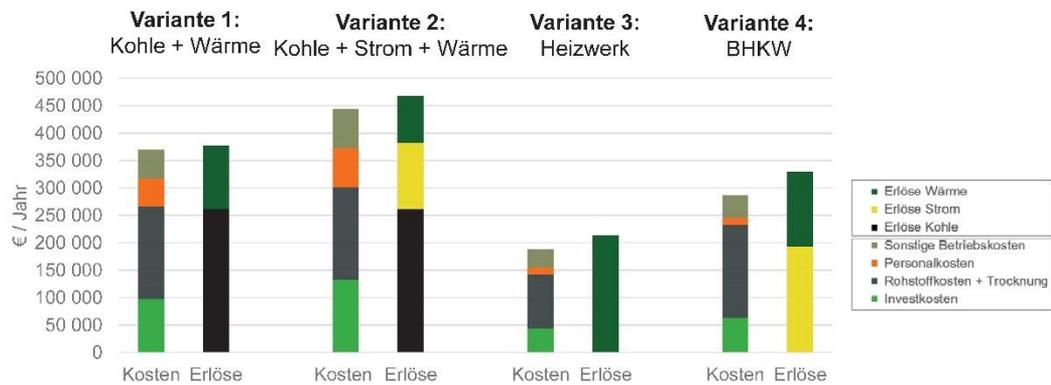
Wirtschaftlichkeit Pyrolyse jährliche Kosten- und Erlösstruktur



21 PyroTechOverview - Pyrolysetechnologien in Europa

26.04.2024

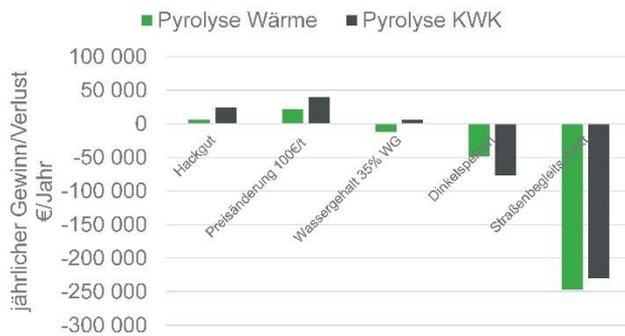
Wirtschaftlichkeit Vergleich Pyrolyse und Verbrennungstechnologien



22 PyroTechOverview - Pyrolysetechnologien in Europa

26.04.2024

Sensitivitätsanalysen - Rohstoff



FAZIT

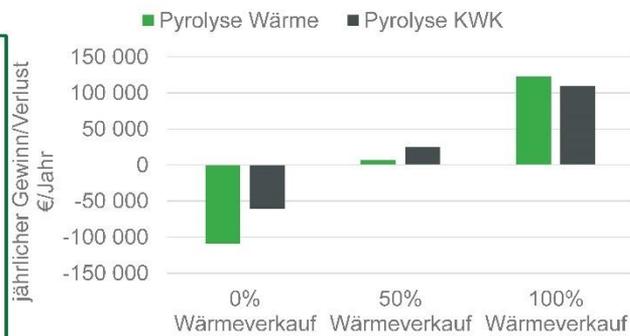
- Rohstoff-Preisänderung um ca. 10% hat ca. 4% Einfluss auf Kostenseite.
- Wassergehalt von 20 auf 35% resultiert in ca. 4% Reduktion der Erlöse
- Effekt von Rohstoff Dichte (Dinkelspelzen) ist hier sehr stark dargestellt, in Realität ist dieser deutlich schwächer, da nicht alle Anlagenkomponenten auf die geringere Dichte ausgelegt werden müssen, was hier nicht dargestellt ist.
- Rechtliche Einschränkungen - Verwertung von Biokohle aus Straßenbegleitschnitt ist aktuell in Österreich nicht erlaubt - eine Pyrolyse ohne Kohlenstoffvalorisierung ist **nicht** wirtschaftlich

Sensitivitätsanalyse - Energieintegration

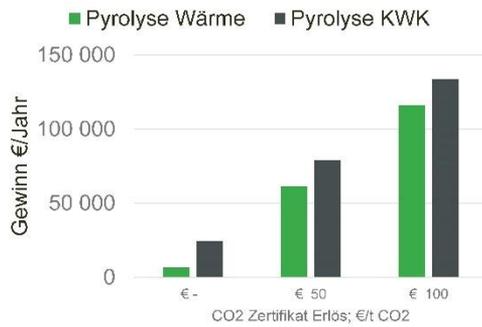


FAZIT

- Energieintegration hat einen signifikanten Einfluss auf Wirtschaftlichkeit
- Ausgehend von einem Base-Case von 50% Wärmeverkauf, verändern sich die Erlöse um +/- 30%
- KWK-Technologie schwächt diesen Effekt etwas ab



Sensitivitätsanalyse – CO₂ Zertifikat Verkauf



FAZIT

- Zusätzliche Einnahmen können Risiko an Wärmeintegration und Rohstoff-Qualität deutlich abpuffern.
- Aktuell wird Biokohle nicht im ETS gehandelt. Es gibt aber diverse private Plattformen, welche die CO₂ Senken verkaufen.
- Bereits mit 50€/t CO₂ können die Erlöse um 14% gesteigert werden.

Schlussfolgerungen

Technologiestatus in Europa
Technologie-Variation
Wirtschaftlichkeit



Schlussfolgerungen



Technologiestatus

- Dynamischer Markt
- Unsicherheiten bei Anwendern
- Wenig etablierte Standards



Technologievariationen

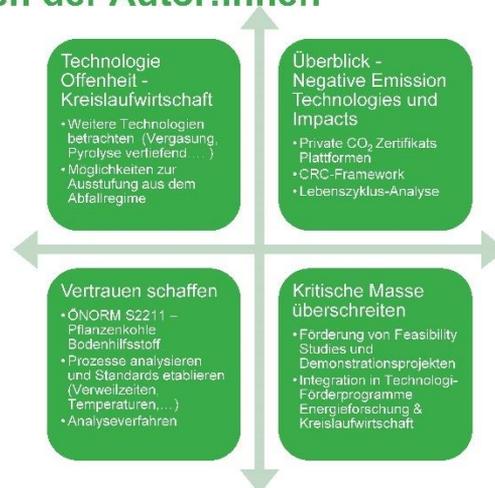
- Breites Rohstoff-Spektrum
- Variable Produkte
- Unterschiedliche Technologisierung



Wirtschaftlichkeit

- Vergleichbarkeit zu Biomasse-Heizanlagen
- Energie-Integration, Produktabsatzbarkeit als größtes Risiko
- Zusätzliche Einnahmen aus CO2 Zertifikaten große Chance

Empfehlungen der Autor:innen



Manuel Schwabl

manuel.schwabl@best-research.eu

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



v.l.n.r. Stefan Martini, Markus Schwarz, Jakob Sarsteiner, Konstantin Moser, Irene Sedlmayer, Franziska Klausner, Elisabeth Wopienka, Manuel Schwabl. Nicht am Bild: Elisa Carlon, Don Thomas, Jasna Keiffenheim

Want a reminder for the report,
as soon as it is available?



5 Schlussfolgerungen

Der **Markt** für mittelschnelle Pyrolyse im kleinen Maßstab befindet sich in einem jungen Stadium, was anhand der bisher meist niedrigen Verkaufszahlen und den Gesprächen abgeleitet werden kann. Bisher wird der Markt von wenigen Herstellern dominiert. Die Studie ist jedoch auf eine hohe Resonanz der Hersteller gestoßen. Es zeigt sich, dass die Hersteller präsent sein und sich am Markt positionieren wollen, was auf hohe Entwicklungsaktivitäten in den letzten Jahren schließen lässt.

Die Kontaktrecherche hat gezeigt, dass Hersteller für Anlagen in einem kleinen Maßstab im Vergleich zu Herstellern von Großanlagen verhältnismäßig selten sind. Der Bedarf für kleinmaßstäbliche Pyrolysekonzepte dürfte sich durch den höheren Bedarf von klimaneutralen Wertschöpfungsketten und dadurch zunehmende Wirtschaftlichkeit auch für kleine Anlagenskalen gerade erst entwickeln.

Eine hohe Anzahl der Hersteller weist der mitteleuropäische Raum auf, was auf die traditionell starke Nutzung von Holz und die technische Expertise im Heizungssektor zurückgeführt wird.

Die **vielfältige Einsatzmöglichkeit** der Pyrolyse zeigt sich anhand der Rohstoffvielfalt, der unterschiedlichen Produkte und der zahlreichen Verfahren. Fokus liegt dabei auf kontinuierlichen also automatischen betriebenen Systemen was auf die niedrigeren Personalkosten zurückgeführt wird. So können Batchsysteme für Kleinstanwender wie z. B. Einzelunternehmer, Landwirte oder Hobbygärtner mit eher geringeren Investitionskosten aufgrund kleiner Kapazitäten eine interessante Option darstellen. Für einen gewinnbringenden Produktionsprozess dürften sie jedoch aufgrund höherer Personalkosten ungeeignet sein.

Besonders viel Erfahrung bezüglich Rohstoffe gibt es mit Biomasse-basierten Schüttgütern, Biogas-Gärrest und Klärschlamm. Für die Auswahl der Pyrolyseanlage sollte eine Analyse der bisherigen Entwicklungstätigkeiten und Rohstoff Erfahrungen durchgeführt werden, da die Hersteller die Anlagen häufig für bestimmte Zielsetzungen entwickelt haben, die sich vorteilig für den eigenen Einsatzbereich auswirken können.

Trotz noch unsicherem Marktpreis setzen die meisten Hersteller auf Biokohle als Hauptprodukt. Offenbar setzt man auf den wachsenden Bedarf der Biokohle aufgrund klimapolitischer Entwicklungen, die in einer stärkeren Nutzung in Landwirtschaft und Industrie resultieren.

Die **Wirtschaftlichkeit** beim Betrieb von Pyrolyseanlagen setzt derzeit noch sehr günstige Bedingungen voraus. Sie ist vor allem durch hohe Kapitalkosten und noch unsicheren Absätzen der Produkte geprägt. Für die Verwirklichung von Projekten sind daher Rohstoffpotenzial, erwartbare Produkteigenschaften und Absatzmöglichkeiten der Kohle und des anfallenden Pyrolysegases z. B. in Form von Wärme und Strom genau zu evaluieren.

Die Nutzung von Pyrolysegas für Energieerzeugung ist ein essenzieller Faktor, für den gewinnbringenden Betrieb der von Pyrolyseanlagen im untersuchten Maßstab. Die Integration der Pyrolyseanlage in ein Gesamtkonzept, bei dem ein hoher Anteil der anfallenden Energie genutzt bzw. verkauft werden kann, sind ausschlaggebend und können den Gewinn um ein Vielfaches erhöhen.

Auch schwankende Rohstoffpreise aufgrund dynamischer Marktbedingungen können die Wirtschaftlichkeit kritisch beeinflussen. Aufgrund einer eher geringen Gewinnspanne wirken sich diese Faktoren rasch und unmittelbar auf das Betriebsergebnis aus und können auch schnell zu Verlusten führen.

Die bisher meist niedrigen Verkaufszahlen lassen jedoch noch auf ein Kostensenkungspotenzial der Investitionen schließen. Zudem ist zu erwarten, dass zukünftig zusätzliche Einnahmen über den Verkauf von CO₂-Zertifikaten realisiert werden können. Hierdurch könnte es zu einen Booster-Effekt kommen, da die erhöhte Wirtschaftlichkeit in höheren Verkaufszahlen und folglich zu niedrigeren Investitions- bzw. Servicekosten resultieren könnten. Zusätzliche Märkte im industriellen Bereich sind momentan am Entstehen (z. B. grüner Stahl, Beton- oder Asphaltindustrie) und würden zu einer zusätzlichen Nachfrage von Biokohle führen, die sich in einem gesteigerten Marktpreis auswirken könnten.

Im Laufe der Studie hat sich **hohes Interesse** von Herstellern, Stakeholdern und anderen Forschungseinrichtungen gezeigt. Dieses Interesse lässt auf die zunehmend hohe Bedeutung dieser Technologie schließen, die als potenzielle Schlüsseltechnologie für klimaneutrale Prozesse angesehen werden kann.

6 Ausblick und Empfehlungen

Die Gespräche mit den Anlagenherstellern haben gezeigt, dass viele Technologieentwicklungen in den letzten Jahren stattgefunden haben. Nun müssen die Anlagen verkauft werden. Trotz der internationalen Bestrebungen Richtung CO₂-Neutralität ist der Markt nicht gesichert. Wirtschaftliche Faktoren, wie Preise, Absatzmärkte und klimapolitische Entwicklungen haben direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Pyrolyse und sind daher ausschlaggebend für die Etablierung der Unternehmen in den nächsten Jahren.

Die Studie ist auf eine hohe Resonanz von Herstellern und Stakeholdern gestoßen. Mit zunehmender Projektlaufzeit hat sich zusätzliches Interesse von weiteren Herstellern entwickelt, die zum Ende nicht mehr in die Studie aufgenommen werden konnten. Zudem konnten anhand der Auswertungen der Ergebnisse weitere Fragestellungen für die Erhebung definiert werden, die sich vor allem auf das Verfahren, die Wirtschaftlichkeit und die Peripherie beziehen. Eine Erweiterung der Studie und kontinuierliches Update der Stakeholder in diesem Bereich wäre deshalb empfehlenswert, um die Veränderungen des dynamischen Marktes auch abzubilden.

Empfehlungen der Studienautor*innen:

- **Technologie-Offenheit und Innovations-Monitoring.** Pyrolyse stellt ein möglicher Pfad der dezentraler Roh-/Reststoffverwertung dar. Die aktuelle Studie hat daAktueller Fokus auf dezentrale Pyrolysetechnologien,
 - Eine **Erweiterung der aktuellen Studie um andere Technologien** (Vergasung, und Prozesskombinationen Vergasung/Pyrolyse) soll aufzeigen, welche weiteren Möglichkeiten es gibt, um lokale/regional verfügbare Reststoffe im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu verwerten und dabei Kohlenstoffprodukte und und/oder Bioenergie herstellen. Dazu zählen Vergasungstechnologien als auch Kombinationen aus Pyrolyse und Vergasungstechnologien.
 - Die Studie ist auf eine hohe Resonanz von Herstellern und Stakeholdern gestoßen. Mit zunehmender Projektlaufzeit hat sich zusätzliches Interesse von weiteren Herstellern entwickelt, die zum Ende nicht mehr in die Studie aufgenommen werden konnten. Zudem konnten anhand der Auswertungen der Ergebnisse weitere Fragestellungen für die Erhebung definiert werden, die sich vor allem auf das Verfahren, die Wirtschaftlichkeit und die Peripherie beziehen. **Eine Erweiterung der Studie und kontinuierliches Update der Stakeholder in diesem Bereich wäre deshalb empfehlenswert, um die Veränderungen des dynamischen Marktes auch abzubilden.**
- Die Technologien stehen an einem entscheidenden Punkt – es gilt **Vertrauen in erneuerbare Kohlenstoffprodukte und Produktionsprozesse aufzubauen und zu verbessern.**

Dazu sind insbesondere die Etablierung von Produkt- und Prozessstandards/Normen ein wichtiger Anhaltswert. Dafür fehlt es allerdings nach wie vor an wichtigen grundlegenden und gestützten Daten:

- **Monitoring von Prozessbedingungen und Produkteigenschaften existierender Pyrolyse- und Vergasungstechnologien**
- **Ringversuche von analytischen Labors zur Analyse von Biokohlen**
- **Definition von Standard-Prozessbedingungen für einen/mehrere Biokohle-Referenzprodukten und Validierung in unterschiedlichen Technologien.**
- **Förderung von Austausch und Kooperation mit internationalen Institutionen in Europa.** Auch ein Austausch mit USA und Kanada sollte gefördert werden, da die Verwertungspfade sehr ähnlich sind wie in Europa.
- Förderung von Demonstrationsprojekten und LivingLabs für Kreislaufwirtschafts
- **Unterstützung von pre-normativer Forschung für einen ISO-Standardisierungsprozess**
- Eine weitere Unsicherheit ergibt sich dadurch, dass solche Anlagen aktuell in Einzelanlagengenehmigungen errichtet werden. Ein gesicherter Rechtsraum für die Anlagen-Implementierung würde deshalb ebenfalls mehr Sicherheit in die Technologie ermöglichen.
- **Kritische Masse überschreiten.** Wie in der Studie dargestellt, ist die Technologie gerade dabei sich am Markt zu etablieren. Ein besonderes Augenmerk für die Wirtschaftlichkeit der Anlagen muss auf eine holistische Einbindung der Technologie in einen Wertschöpfungskreislauf gelegt werden. Dabei müssen neben dem eingesetzten Roh/Reststoff und der stofflichen Verwertung der Kohlenstoffprodukte insbesondere auch die Integration in ein Bioenergie-System berücksichtigt werden. Da diese Abstimmung und Optimierung nicht trivial und sehr sorgfältig ausgeführt werden sollte, ist dies zum aktuellen Zeitpunkt des Marktes mit viel Aufwand verbunden.
 - **Hier können Förderung/Subventionierung von Feasibility Studies zur regionalen Verwertung von organischen Roh- und Reststoffen helfen, um eine gewisse kritische Masse an Anlagen zu etablieren.**
 - **Zur Förderung von österreichischen Technologien würden explizite Forschungs- & Technologieförderungsmöglichkeiten unterstützen.** Da Pyrolyse und Vergasungstechnologien eine Kopplung für die Sektoren Bioenergie und Kreislaufwirtschaft darstellen, wäre eine Implementierung im Energieforschungsprogramm und Kreislaufwirtschafts Call 2025 zu empfehlen.
- **Negative Emission Technologies bewerten - CO₂ Zertifikate und Nachhaltigkeitsanalyse**
Die umfassende Bewertung der Nachhaltigkeit inklusive sozialer Aspekte für den gesamten Wertschöpfungskreislauf ist anzustreben, um ein fundiertes Gesamtbild der Auswirkungen von Pyrolyseprozessen zu gewinnen.
 - **Dazu gilt es eine Übersicht über privat-finanzierte Plattformen zu bekommen und wie diese die Implementierung von Kreislaufwirtschafts-Technologien fördern können.**

- Auf EU-Ebene wird aktuell über die Carbon Removal Certificate – Framework diskutiert und in welcher Form Biokohle als Kohlenstoff-Senke dient. In diesem Zusammenhang ist es wichtig auch auf der Forschungsseite dies zu unterstützen: z.B. Untersuchung zu Langzeitstabilität von Biokohlen, Einsatzmöglichkeiten in langlebigen Produkten (z.B. Beton, Asphalt,...), Lebenszyklusanalysen,...
- **Abfallrecht überprüfen.** Wie in der Studie dargestellt, sind aktuell Kohlenstoff-Produkte aus manchen Reststoff aus rechtlichen Gründen nicht verwertbar, da das Abfallende eine andere Verwertungsmethodik vorsieht. Die Qualität dieser Kohlenstoff-Produkte könnten allerdings durchaus verwertbare Eigenschaften besitzen, die ein vorzeitiges Abfallende ermöglichen könnten. Aus diesem Grund möchten die Autor*innen anregen, dass **eine Überprüfung der Möglichkeiten für ein vorzeitiges Abfallende für bestimmte Biomasseabfälle (z.B. Straßenbegleitschnitt) beim Einsatz in Pyrolyseanlagen durchgeführt wird.**

7 Verzeichnisse

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Herangehensweise für den Unternehmensüberblick.....	16
Abbildung 2: Anzahl der Unternehmenskontakte von der Kontaktrecherche bis zu den Studienteilnehmern.	26
Abbildung 3: Geografische Herkunft der Studienteilnehmer	28
Abbildung 4: Mögliche Rohstoffe der erhobenen Technologien laut Herstellereinschätzung gruppiert nach physikalisch-chemischen Eigenschaften. (grün: alle der im Text genannten Einsatzstoffe können eingesetzt werden; gelb: ein Teil der genannten Einsatzstoffe können eingesetzt werden).....	32
Abbildung 5: Hauptprodukte der Pyrolyseanlagen laut Hersteller-Angabe.	33
Abbildung 6: Bisher erreicht EBC-Standards laut Herstellerangabe	33
Abbildung 7: Überblick der Rohstoff-Kapazitäten in kg/h	35
Abbildung 8: links Relativer Anschaffungspreis bezogen auf Rohstoff-Kapazität (bezogen auf Referenzrohstoff), rechts Personalaufwand pro t Einsatzrohstoff.	37
Abbildung 9: Bedarf und Modus der Anlagenüberwachung.....	37
Abbildung 10: Übersicht über Strombedarf von autothermen (interne Zirkulation des Energieinhalts des Pyrolysegases) und allothermen (Zufuhr von externer Energie durch Strom) Pyrolyseanlagen	38
Abbildung 11: Branchenübersicht, für welche Pyrolyseanlagen hergestellt werden.	39
Abbildung 12: Zielmarkt laut Herstellerangaben	40
Abbildung 13: Anzahl realisierter Projekte der erhobenen Technologien.....	41
Abbildung 14: Verfahren und Grundprinzipien der Technologien im Überblick	45
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Wärmeübertragungsrichtung	47
Abbildung 16: Zieltemperaturbereich der Anlagen; Für Anlage E wurde eine Mindesttemperatur, für die Anlagen R, O und Q eine Maximaltemperatur angegeben.	48
Abbildung 17: Verweilzeiten der Anlagen A-S; *Für die Angabe von „ein paar Minuten“ wurde ein Wert von 10 min angenommen; Keine Grenzen für die Anlagen N und R definiert („individuell regelbar“), daher werden sie nicht im Diagramm angezeigt; Die Verweilzeiten der Batch-Anlagen A und B, entsprechen der Dauer eines Batch-Prozesses.....	49
Abbildung 18: Energieanteile der Produkte für mittelschnelle Pyrolyse mit Wärmeerzeugung und mit Strom- und Wärmeerzeugung und für ein Biomasseheizwerk und ein Biomasseheizkraftwerk.	52
Abbildung 19: jährliche Kosten für Technologievarianten	54
Abbildung 20: jährliche Erlöse für Technologievarianten	55
Abbildung 21: Gewinn für Technologievarianten	56
Abbildung 22: Einfluss von Wärmeverkauf auf die Wirtschaftlichkeit der Pyrolyse.....	57

Abbildung 23: Einfluss von Rohstoffkosten und Rohstoffwassergehalt auf die Wirtschaftlichkeit der Pyrolyse	58
Abbildung 24: Sensitivitätsanalyse der Gewinn/Verlust Rechnung bei zusätzlichen Erlösen aus CO2 Zertifikaten	59

7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick der Prozessparameter der Langsamen, Mittelschnellen und Schnellen Pyrolyse (Quicker, Kruse, Weber, & Blöhse, 2016), (Baumbach, et al., 2016), (Bridgewater, 2012), (Al-Rumaihi, Shahbaz, Mckay, Mackey, & Al-Ansari, 2022), (Kazawadi, Ntalikwa, & Kombe, 2021)	11
Tabelle 2: Investitionskosten für Anlagen mit einer Rohstoff-Kapazität von 250 kg/h bezogen auf Referenzrohstoff für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen	20
Tabelle 3: Jährliche Personalkosten für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen	22
Tabelle 4: Jährliche Sonstige Betriebskosten für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen	22
Tabelle 5: Beschreibung der Einsatzmaterialien der Referenzbrennstoffe	25
Tabelle 6: Teilnehmende Unternehmen der Studie und Webseite	27
Tabelle 7: Herstellerfirma und Bezeichnungen der Technologien und Alleinstellungsmerkmale und Besonderheiten laut Herstellerangabe.	29
Tabelle 8: Zusammenhang zwischen Rohstoff-Kapazität, Produkt-Kapazität und Rohstoff-Leistung bei Biomassebasierten Pyrolyseanlagen bezogen auf den Referenzrohstoff.....	34
Tabelle 9: Übersichtsraaster der möglichen Hauptprodukte der Anlagen entsprechend der Rohstoff-Kapazität (bezogen auf Referenzrohstoff) bzw. Input Leistung. (Bezeichnung und Hersteller der Technologien A-S befinden sich in Tabelle 7).....	36
Tabelle 10: Verfahren, Reaktortyp und Pyrolysegasführung von Anlagen A-S.....	42
Tabelle 11: Art, Wärmequelle und Richtung der Wärmeübertragung	43
Tabelle 12: Vor- und Nachteile von Batch-Retorten, Schneckenreaktoren, Drehrohrreaktoren, Fließbettreaktoren und Bandreaktoren (Quellen: (Moser, et al., 2023), (Ertl, 2018))	45
Tabelle 13: Massenbilanz und Kohlenstoffbilanz der Pyrolyse ⁽¹⁾ zuzüglich Verbrennungsluft; WG...Wassergehalt).....	50
Tabelle 14: Energiebilanzen für Pyrolyse mit Kohle- und Wärmeerzeugung und mit Kohle-, Wärme- und Stromerzeugung. (WG...Wassergehalt; *höhere Energiewerte aufgrund von Trocknung).....	51
Tabelle 15: Energiebilanzen für ein Heizwerk und ein BHKW (WG...Wassergehalt; *höhere Energiewerte aufgrund von Trocknung)	52
Tabelle 16: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	53

7.3 Literaturverzeichnis

- Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., Mckay, G., Mackey, H., & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reveiws*(167).
- Baumbach, G., Hartmann, H., Höfer, I., Hofbauer, H., Hülsmann , T., Kaltschmitt, M., . . . Winter, F. (2016). Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe. In M. Kaltschmitt, H. Hartmann, & H. Hofbauer, *Energie aus Biomass Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Vieweg.
- BEST GmbH. (2023). <https://best-research.eu>. Abgerufen am 15. 09 2023 von https://best-research.eu/content/de/kompetenzbereiche/alle_projekte/view/614
- BMK. (14. 09 2023). https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/nachhaltigkeit/ressourceneffizienz/reset2020/handlungsfelder.html. Von https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/nachhaltigkeit/ressourceneffizienz/reset2020/handlungsfelder.html abgerufen
- BMLFUW. (01. 08 2017). <https://info.bml.gv.at>. Abgerufen am 11. 10 2023 von <https://info.bml.gv.at/dam/jcr:841be926-d7ca-4efa-b9b8-c4f365c6f75c/Biokohle%20E2%80%93Potential%20und%20Grenzen%20der%20Anwendung%20in%20der%20Land-%20und%20Forstwirtschaft.pdf>
- Bridgewater, A. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*(38), S. 68-94.
- Dengel, A., Groß, B., & Außendorf, Y. (2016). Thermische Nutzung von getrocknetem Gärrest. *Thermische Nutzung von getrocknetem Gärrest*. Graz. Abgerufen am 11. 10 2023 von https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2016/files/lf/Session_B5/LF_Dengel.pdf
- Dißbauer, C., Binner, E., Fuhrmann, M., Huber-Humer, M., Ladurner, T., Salhofer, S., & Strasser, C. (2023). *Zukunftsweisende Nutzung des Biomassepotntial aus der Pflege der Verkehrsinfrastruktur BIOPOT*. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz. Abgerufen am 10. 26 2023 von https://projekte.ffg.at/anhang/64c913cbf2075_BioPot_Ergebnisbericht.pdf
- Dißbauer, C., Strasser, C., Enigl, M., & Matschegg, D. (2020). Techno-economic modelling of bioeconomy value chains. 6. *Mitteleuropäische Biomassekonferenz (CEBC)*.
- e-control. (11. 10 2023). www.e-control.at. Von <https://www.e-control.at/marktteilnehmer/oekoenergie/marktpreis> abgerufen
- Ertl, F. (2018). *Summary of Different Types of Pyrolysis Concepts*. Stockholm: Pamoja Cleantech AB.

- European Biochar Industry Consortium. (2023). <https://www.biochar-industry.com/>. Abgerufen am 15. 09 2023 von <https://www.biochar-industry.com/about/#our-members>
- Fachverband Pflanzkohle. (s.a.). <https://fachverbandpflanzkohle.org>. Abgerufen am 15. 09 2023 von <https://fachverbandpflanzkohle.org/pflanzkohle/industrielle-produktionsanlagen/>
- FNR. (2014). www.fnr.de. Abgerufen am 11. 10 2023 von https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/leitfadenfestbiobrennstoffe_web.pdf
- Frogner, K. (08 2015). <http://biochar.bioenergylists.org/>. Abgerufen am 15. 09 2023 von <http://biochar.bioenergylists.org/>
- Fuhrmann, M., Dißauer, C., & Strasser, C. (2023). In 7. M. CEBC (Hrsg.), *Wood-Value-Tool. Techno-economic assessment of the forest-based sector in Austria*.
- Fuhrmann, M., Dissauer, C., Strasser, C., & Schmid, E. (2020). Sawmill by-products in a bioeconomy - Econometrics analysis of price conintegration and value chain interlinkages. *3rd Doctoral Colloquium BIOENERGY (DBFZ)*.
- Groß, B., & Manns, H. (29. 03 2018). *Technologiebericht 6.3 Stromerzeugungstechnologien zur Abwärmenutzung innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende*. (I. f.-u. gGmbH, Hrsg.) Abgerufen am 11. 10 2023 von https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7066/file/7066_Stromerzeugungstechnologien.pdf
- International Biochar Initiative. (2013). <https://biochar-international.org>. Abgerufen am 15. 09 2023 von https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/company_list_2013.pdf
- Ithaka Institute. (2023). *EBC (2012-2023) European Biochar Certificate - Richtlinien für die Zertifizierung von Pflanzkohle*. Abgerufen am 11. 10 2023 von european-biochar.org: https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_de_10_3.pdf
- Jouhara, H., Ahmad, D., van den Boogaert, I., Katsou, E., Simons, S., & Spencer, N. (2018). Pyrolysis of domestic based feedstock at temperatures up to 300 °C. *Thermal Science and Engineering Progress*, S. 117-143. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.11.007>
- Kazawadi, D., Ntalikwa, J., & Kombe, G. (2021). A Review of Intermediate Pyrolysis as a Technology of Biomass Conversion for Coproduction of Biooil and Adsorption Biochar. *Journal of Renewable Energy*(21). doi:<https://doi.org/10.1155/2021/5533780>
- Lewandowski, I., & Wilhelm, C. (2016). Biomasseentstehung. In M. Kaltschmitt, H. Hartmann, & H. Hofbauer, *Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken, Verfahren* (3. Ausg.). Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.

- LK Österreich. (09 2023). *www.holz-fair-kaufen.at*. Abgerufen am 11. 10 2023 von <https://www.holz-fair-kaufen.at/wp-content/uploads/2023/09/Preistabelle-September-2023-1.pdf>
- Lutter, S., Giljum, S., & Randles, M. (2016). *Regionale Kreislaufwirtschaft, Inputpapier für die Implementierung von RESET2020*. Wirtschaftsuniversität Wien. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Abgerufen am 14. 09 2023 von https://www.wu.ac.at/fileadmin/wu/d/i/ecocon/PDF/RESET2020_Regionale_Kreislaufwirtschaft_Report.pdf
- Mollet Füllstandtechnik GmbH. (2023). *www.mollet.de*. Abgerufen am 10. 11 2023 von https://www.mollet.de/uploads/tx_cinproducts/00-0_AI_Schuettdichte_AI-SG-00_02-22_de.pdf
- Moser, K., Wopienka, E., Pfeifer, C., Schwarz, M., Sedlmayer, I., & Haslinger, W. (2023). Screw reactors and rotary kilns in biochar production – A comparative review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 174, S. 106112.
- Österreichischer Biomasse-Verband. (09 2023). *www.biomasseverband.at*. Abgerufen am 11. 10 2023 von <https://www.biomasseverband.at/energetraegervergleich/>
- Quicker, P., Kruse, A., Weber, K., & Blöhse, D. (2016). Thermochemische Prozesse zur Herstellung von Biomassekarbonisation. In P. Quicker, & K. Weber, *Biokohle, Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten* (S. 22-23). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Rasaq, W. A., Golonka, M., Scholz, M., & Bialowiec, A. (31. 08 2021). Opportunities and Challenges of High-Pressure Fast Pyrolysis of Biomass: A Review. *Energies*(14, 5426). doi:<https://doi.org/10.3390/en14175426>
- Schmidt, H. (26. 08 2014). Biochar – a key technology for the planet,. *The Biochar Journal*. Abgerufen am 15. 09 2023 von <https://www.biochar-journal.org/en/ct/13>
- Teichmann, I. (2014). Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten. *DIW Wochenbericht*(1+2). Abgerufen am 11. 10 2023 von https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.434583.de/14-1-1.pdf
- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*(217), S. 240-261. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>

Appendix – Anlagen Factsheets

Firma: Pyronet GmbH
<https://www.pyronet.ch/>
Bezeichnung: PyroFarm P60
 (Anlage A)



1. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Diskontinuierlich
Reaktortyp: Doppelretorte
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Direkt über Glutbett; Kreuzstrom
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegase (internes Glutbett)
Pyrolysegasführung: Gasabzug nach oben
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: kleine Heizanlage für 2 Wohnhäuser zur dezentralen Holznutzung und Pflanzenkohleproduktion
Sonstiges: Integrierte Kohlebefeuchtung und -mahlung

2. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Holzhackschnitzel, Pellets, Rindenmulch, Kaffeehütchen, in der Schweiz nur naturbelassenes Holz erlaubt für Pyrolyse
Maximaler Wassergehalt: 35%
Anforderungen Stückigkeit: max. 50 mm
Sonstiges: -

3. Produkte:

Hauptprodukt: Kohle und Wärme
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 20% (bezogen auf Referenzrohstoff atro)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: EBC-AgroBio, EBC-Agro
Sonstiges: -

4. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut, 25% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 27 kg/batch (2 batches pro Tag möglich)
Rohstoffkapazität: 140 kg/batch (2 batches pro Tag möglich)
Volllaststunden pro Jahr: i.d.R. 1400 h bzw. 400 Batches/Jahr
Sonstiges: -

5. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: 600 - 700°C
Typische Anlagenverweilzeit: 3,5 h (Dauer der Batch); 2-5 min (Glutbett)
Systemdruck: Umgebungsdruck (leichter Unterdruck)
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: nicht vorgesehen
Sonstiges: -

6. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:	
<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Förderschnecke zur Batchbefüllung, danach manuelle Verschließung des Pyrolysereaktors mit Brennkammer
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Kühlung im Reaktor - Absaugung mittels Sauglanze - Abkühlbehälter - Besprühung mit Wasser - Mühle - Lagerung
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Vollständige Verbrennung
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	kundenspezifisch, Wärmenutzung für Heizzwecke optimiert, Vorlauftemperatur max. 90°C, 5000-Liter-Heißwasserspeicher erforderlich
<i>Platzbedarf:</i>	5,3m * 4,1m * 2,75m (L*B*H; inkl. Sicherheitsabstände; Anlagenmaße: 3,77m * 1,8m * 2,45m)
<i>Mobilität:</i>	LKW Transport möglich
<i>Sonstiges:</i>	Separates Kohlelager mit Absaugung, Befeuchtung und Mühle

7. Ökonomische Daten:	
<i>Anschaffungspreis:</i>	82.000 €
<i>Anlagenüberwachung:</i>	Fernüberwachung über Internet oder Handy-App inkl. sms-Alarm bei Störung
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	0,5 h/Tag (bei 2 batches)
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	Brennstoff, Strom
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	1,5 kW
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	0,5 kW
<i>Frequenz und Aufwand für Service und</i>	
<i>Wartung:</i>	2000 €/10 t Pflanzenkohle
<i>Sonstiges:</i>	-

8. Markt und Referenzen	
<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	Landwirtschaft; deutschsprachiger Raum
<i>Installierte Anlagen:</i>	3
<i>Referenzkontakt:</i>	https://www.biohofacker.ch/



Firma: SPSC GmbH
www.sp-sc.de
Bezeichnung: Mobile Retorten VARIO L+
 (Anlage B)



9. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Diskontinuierlich
Reaktortyp: Retorte
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Doppelmantel; Kreuzstrom
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegase
Pyrolysegasführung: Gasabzug nach oben
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Autonomer Prozess ohne externe Energiequellen
Sonstiges: -

10. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Scheitholz (hart und weich), Hackgut, Maisspindel, Malzreste, Reb-
 stöcke, Kaffeeholz, Walnusschalen, Palmkernschalen, Dinkelspel-
 zen (brikettiert), Heu (brikettiert), Stroh (brikettiert), ...
Maximaler Wassergehalt: 25% bei Scheitholz, 15% bei anderem Einsatzmaterial
Anforderungen Stückigkeit: hohe Flexibilität; Sowohl grobteiliges Material (Scheitholz, Briketts)
 wie feinkörniges Material (z. B. Hackgut, Schalenbruch)
Sonstiges: -

11. Produkte:

Hauptprodukt: Kohle und Wärme
*Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptpro-
 dukt):* 30-45% (bezogen auf Referenzrohstoff atro; H/C und/oder H/Corg
 ≈ 0,15 - 0,2)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: EBC-FutterPlus, EBC-Futter, EBC-AgroBio, EBC-Agro
Sonstiges: Darüber hinaus ermöglicht die SPSC-Technologie sogar reinere
 Kohlenstoff-Qualitäten zu erzeugen

12. Kapazität:

Referenzrohstoff: Scheitholz, 25% Wassergehalt bzw. Hackgut, max. 15% Wassergehalt
*Produktionskapazität Kohle (oder anderes
 Hauptprodukt):* 150 – 200 kg/batch (1 batch pro Tag möglich)
Rohstoffkapazität: 500-1400 kg/batch (1 batch/Tag möglich)¹⁾
Volllaststunden pro Jahr: 365 Batches pro Jahr
Sonstiges: ¹⁾Masse des Einsatzmaterials und Produktionsmenge variieren mit
 der Biomasseart, Stückelung und Restfeuchte, usw.

13. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: 800 - 900°C
Typische Anlagenverweilzeit: 2 - 6 Stunden (Dauer der Batch)
Systemdruck: 500 - 700 mbar Überdruck
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: möglich; je nach Füllgrad der Retorte
Sonstiges: autark und selbstregulierend

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

14. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	betreiberspezifisch, manuell oder mittels technischer Hilfsmittel
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Kühlung im Reaktor - Kohleaustrag über oberen Deckel mittels Kippmechanismus
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Vollständige Verbrennung
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	Kundenspezifisch, Wärmenutzung für Heizzwecke möglich, 3000-L Heißwasserboiler erforderlich
<i>Platzbedarf:</i>	1,7m * 1,7m * 2,8m (L*B*H)
<i>Mobilität:</i>	LKW-Transport möglich
<i>Sonstiges:</i>	Weitere Integrationen je nach Bedarf und Gegebenheiten möglich

15. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	33.750 € (Vario L+)
<i>Anlagenüberwachung:</i>	nicht erforderlich ¹⁾
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	2-4 h/Tag
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	Holz zum Starten (Ca. 10-15 L Brennholz)
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	kein Strom erforderlich
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	kein Strom erforderlich
<i>Frequenz und Aufwand für Service und</i>	
<i>Wartung:</i>	nicht erforderlich
<i>Sonstiges:</i>	¹⁾ Sichtkontrolle vor dem Prozess; Siehe Betriebsanleitung

16. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	Land- und Forstwirtschaft, Gärtnereibetriebe, Hobbygärtner, Gemeinden, Forschungseinrichtungen; Weltweit
<i>Installierte Anlagen:</i>	>70
<i>Referenzkontakt:</i>	-



Firma: Pyrum Innovations AG
<http://www.pyrum.net>
Bezeichnung: Pyrum Thermolyse TA-1.3
 (Anlage C)

**17. Grundprinzip/Verfahren:**

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Fließbettreaktor¹⁾
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Elektrisch, über Heizplatten; Kreuzstrom
Wärmequelle: Elektrisch
Pyrolysegasführung: Gleichstrom²⁾
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Komplett Elektrisch beheizt, Permanent technisch dicht da keine beweglichen Teile, sehr präzises Temperaturprofil, Wartung möglich in vollem Betrieb
Sonstiges: ¹⁾vertikaler Schacht, mit Heizelementen, Rohstoff fällt auf heiße Platten
²⁾Gase werden in einem zentralen Rohr in der Mitte im aufsteigenden Strom gesammelt und dann nach unten abgezogen

18. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Carbonfaser verstärkte Kunststoffe(läuft), Reifen, Kohlenfaser verstärkte Kunststoffe, Schläuche, PUR
Maximaler Wassergehalt: 2%
Anforderungen Stückigkeit: nicht definiert
Sonstiges: -

19. Produkte:

Hauptprodukt: Öl und rCB (recovered Carbon Black)
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): ~45% rCB und ~35% Öl (bezogen auf Referenzrohstoff atro)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: REACH Zulassungen für Öl (Thermo tire oil) und Carbon black (rCB - Recovered carbon black)
Sonstiges: -

20. Kapazität:

Referenzrohstoff: Altreifen
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 40% Öl, 45% rCB, 15% Gas
Rohstoffkapazität: 50 kg/h
Volllaststunden pro Jahr: 7800 Stunden/Jahr
Sonstiges: -

21. Betriebsparameter:

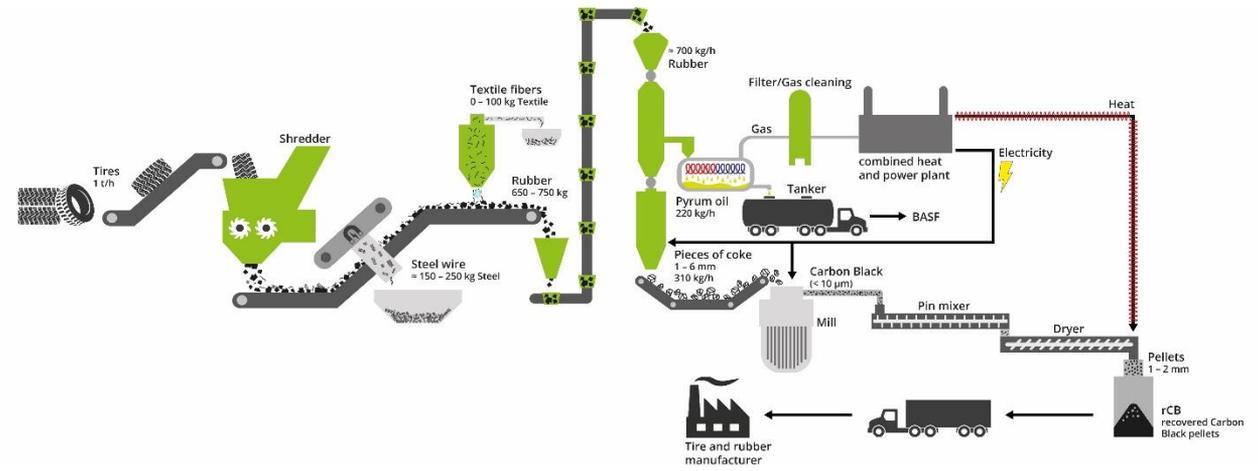
Möglicher Zieltemperaturbereich: 650°C
Typische Anlagenverweilzeit: 40 min
Systemdruck: Umgebungsdruck (leichter Unterdruck)
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: nicht vorgesehen
Sonstiges: -

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

22. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:	
<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Stickstoffgefühlter Vorlagebehälter und Doppelschieber mit Zwischenkammer zur Dosierung (auch mit Stickstoff geflutet).
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Austrag über stickstoffgefühlten Plattenkühler über Doppelschieber und Gasdichter Zellerschleuse
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Vollständige Verbrennung bei >1000°C
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	keine Standardlösung, projektspezifisch
<i>Platzbedarf:</i>	Zwischen 140 m ² und 15.000 m ²
<i>Mobilität:</i>	nicht vorgesehen
<i>Sonstiges:</i>	Öl wird dekantiert, Abwärme 20%, hohe Temperaturen für Wirbelschichttrockner der Pelletieranlage

23. Ökonomische Daten:	
<i>Anschaffungspreis:</i>	1.000.000 €
<i>Anlagenüberwachung:</i>	vor Ort
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	nicht definiert
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	Stickstoff, ca. 400 € im Monat
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	-
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	-
<i>Frequenz und Aufwand für Service und Wartung:</i>	Reinigung alle 8 Wochen für 3 Tage, Kompletstillstand 1 Mal pro Jahr für 3 Wochen
<i>Sonstiges:</i>	-

24. Markt und Referenzen	
<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	Reifenhersteller, Chemiefirmen, Autoindustrie; Europa
<i>Installierte Anlagen:</i>	0 (Erfahrung mit größeren Anlagen, mehrere Anlagen dieser Dimension in Planung)
<i>Referenzkontakt:</i>	-



Firma: SPSC GmbH
www.sp-sc.de

Bezeichnung: Vollautomat VARIO XS 250 KW
 (Anlage D)



25. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Multiretorte¹⁾
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Doppelmantel; Kreuzstrom²⁾
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegas mit FLOX-Verfahren
Pyrolysegasführung: Gasabzug seitlich³⁾
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Keine bewegten Teile im Reaktor, Flexibilität bezüglich Biomassenstückelung, Autonomer Prozess ohne externe Energiequellen
Sonstiges: ¹⁾zwei Retorten werden zur Prozess- und Versorgungssicherheit empfohlen, Anzahl kann beliebig erhöht werden
²⁾Prozessparameter – bedingt Gleichmäßige Verteilung über den Doppelmantel
³⁾Geregelt mit MSR (Messstellenregelung) durch DCS (Distributed Control System)

26. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Hackgut, Maisspindel, Malzreste, Rebstöcke (zerkleinert), Kaffeeholz, Walnussschalen, Palmkernschalen, Dinkelspelzen (brikettiert), Heu (brikettiert), Stroh (brikettiert)
Maximaler Wassergehalt: 15%, (bei Scheitholz 25%)
Anforderungen Stückigkeit: hohe Flexibilität; Sowohl grobteiliges Material (Briketts) als auch feinkörniges Material (z. B. Hackgut, Schalenbruch)
Sonstiges: Bei Einsatzstoffen mit großen Unterschieden in Wassergehalt und Stückelung ist eine Aufbereitung möglicherweise erforderlich.

27. Produkte:

Hauptprodukt: projektspezifisch (Biokohle, Wärme, Strom, Pyrolysegas, Kondensate, Holzessig)
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 35% (bezogen auf Referenzrohstoff atro)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: EBC-FutterPlus, EBC-Futter, EBC-AgroBio, EBC-Agro
Sonstiges: -

28. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut, max. 15% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): Je nach Anlagenauslegung; z. B. bei Biokohle ~ 40 kg/h möglich
Rohstoffkapazität: 50-250 kg/h¹⁾
Volllaststunden pro Jahr: 7500
Sonstiges: ¹⁾Masse des Einsatzmaterials und Produktionsmenge variieren mit der Biomasseart, Stückelung und Restfeuchte

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

29. Betriebsparameter:

<i>Möglicher Zieltemperaturbereich:</i>	350 - 900°C, einstellbar
<i>Typische Anlagenverweilzeit:</i>	3 - 10 min
<i>Systemdruck:</i>	Umgebungsdruck
<i>Möglichkeit zur Leistungsreduktion:</i>	Leistungsschwankungen aufgrund unterschiedlicher Stoffeigenschaften möglich, jedoch kontrollierbar
<i>Sonstiges:</i>	-

30. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

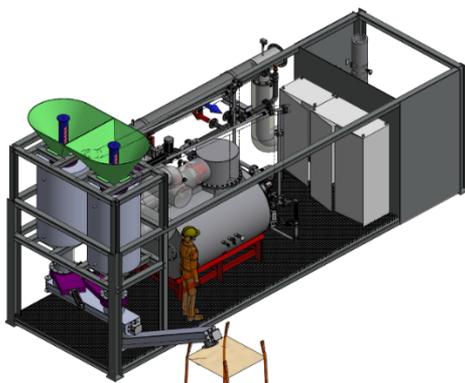
<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Automatische Befüllung, eigenes Dosierungsverfahren
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Eigenes Verfahren für den Austrag - Austragsschnecke optional mit Anfeuchtung
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Vollständige Verbrennung oder Teilverbrennung, je nach Energienutzungskonzept
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	Kundenspezifisch, Wärmenutzung für Heizzwecke, Trocknung, Kalte-Erzeugung usw.
<i>Platzbedarf:</i>	10m * 3m * 3m (L*B*H; 20-Fuß-Container)
<i>Mobilität:</i>	LKW-Transport möglich
<i>Sonstiges:</i>	-

31. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	750.000 € ¹⁾
<i>Anlagenüberwachung:</i>	Fernüberwachung
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	1-2 h/Tag (24-Stunden-Betrieb) ²⁾
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	1 m3 Propangas pro Start
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	12 kW
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	4 kW
<i>Frequenz und Aufwand für Service und</i>	
<i>Wartung:</i>	Gering
<i>Sonstiges:</i>	¹⁾ Richtpreis; Die Peripherietechnik-Kosten sind von lokalen Gegebenheiten abhängig und werden während der Engineering-Phase definiert; Preise exkl. MwSt., Transport-, Montage- und Inbetriebnahme-Kosten ²⁾ hängt von Prozessautomatisierung ab

32. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	Stadtwerke, Land- und Forstwirtschaft, Gärtnereibetriebe, Hobbygärtner, Gemeinden, Forschungseinrichtungen, Energieversorger, Netzbetreiber, ... ; Weltweit
<i>Installierte Anlagen:</i>	0 (7 werden derzeit gefertigt, 4 sind beauftragt)
<i>Referenzkontakt:</i>	-



Firma: Metal Expert Sp. z o.o.
<https://metalexpert.pl/>

Bezeichnung: El Prio 3.0
 (Anlage E)



33. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Vertikaler Rührreaktor
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Reaktorwand; Kreuzstrom
Wärmequelle: Elektrisch
Pyrolysegasführung: Gleichstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Möglichkeit zur Müllentsorgung
Sonstiges: -

34. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Brennstoff aus Abfällen (Refused derived fuel; RDF), Mitteldichte Faserplatte (Medium density fibre board; MDF)
Maximaler Wassergehalt: 20% (Empfehlung: 10%)
Anforderungen Stückigkeit: kein Limit definiert, kleine Partikel mit max 1 mm von Vorteil
Sonstiges: -

35. Produkte:

Hauptprodukt: Syngas für Strom und Wärme
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): variiert stark nach Art des Einsatzmaterials
Bisher erreichte Qualitätsstandards: -
Sonstiges: -

36. Kapazität:

Referenzrohstoff: Brennstoff aus Abfällen (Refused derived fuel; RDF), Mitteldichte Faserplatte (Medium density fibre board; MDF); 125 kg/m³, 12- 19 MJ/kg
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): bezogen auf RDF: 17 kg/h Gas, 25 kg/h Öl, 1,5 kg/h Kohle; bezogen auf MDF: 50 kg/h Gas, 30 kg/h Öl, 20 kg/h Kohle¹⁾
Rohstoffkapazität: 100-250 kg/h (abhängig vom Einsatzmaterial)
Volllaststunden pro Jahr: 7500 - 8000
Sonstiges: ¹⁾bei RDF: 65% Pyrolysegas, 25% Pyrolyseöl, 15% Kohle; bei MDF: 50% Pyrolysegas, 30% Pyrolyseöl, 20% Kohle

37. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: mind. 750 °C
Typische Anlagenverweilzeit: einige Minuten
Systemdruck: Umgebungsdruck
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: nicht vorgesehen (Leistungsschwankungen aufgrund unterschiedlicher Stoffeigenschaften möglich)
Sonstiges: -

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

38. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Eigene Entwicklung zur Dosierung der RDF-Flakes, zur Luftreduktion und zur Limitierung des Gas-Rückstroms
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Zellradschleuse - gekühlte Schnecke
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Eigene Entwicklung zur Gasaufbereitung (Heißgasreinigung, Kühlung, Kaltgasreinigung)
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	Kundenspezifisch, keine Standardlösung, auch Stromnutzung möglich
<i>Platzbedarf:</i>	15m * 6m * 6m (L*B*H)
<i>Mobilität:</i>	nicht vorgesehen
<i>Sonstiges:</i>	-

39. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	auf Anfrage
<i>Anlagenüberwachung:</i>	vor Ort (aus gesetzlichen Gründen), aber vollautomatisch
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	nicht definiert
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	< 1 m ³ /h Stickstoff
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	250 kW
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	185 kW
<i>Frequenz und Aufwand für Service und Wartung:</i>	Ziel: 6000 - 7000 €/Jahr, abhängig von Einsatzmaterial und Arbeitsparametern
<i>Sonstiges:</i>	-

40. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	In Kombination mit Kraftwerken und Abfallverbrennungsanlagen; Europa
<i>Installierte Anlagen:</i>	1
<i>Referenzkontakt:</i>	-



Firma: **Biomaccon GmbH**
<https://www.biomaccon.com/>

Bezeichnung: **Pyrolysekessel Farm und Industry**
Edition
(Anlage F)



41. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Schneckenreaktor
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Konvertermantel¹⁾; Gegenstrom
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegase
Pyrolysegasführung: Gegenstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Pyrolysebereich ist in Brennkammer integriert, daher keine gasgeführten Bauteile/Leitungen; Alle Wartungsbauteile von außen zugänglich
Sonstiges: ¹⁾Verbrennung der Pyrolysegase nach Austritt aus dem Schneckenreaktor im Konvertermantel, keine bauliche Trennung der Verbrennereinheit

42. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Hackschnitzel, Waldhackschnitzel, Maisspindeln, Kompostüberlauf, Klärschlamm pellets, Graspellets
Maximaler Wassergehalt: 30%
Anforderungen Stückigkeit: max. 70 mm
Sonstiges: -

43. Produkte:

Hauptprodukt: Kohle und Wärme
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 24% (bezogen auf Referenzrohstoff atro)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: EBC-FutterPlus, EBC-Futter, EBC-AgroBio, EBC-Agro; EBC-Sink
Sonstiges: -

44. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut/holzartige Biomasse, max. 30% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 20-60 kg/h
Rohstoffkapazität: 90-300 kg/h (je nach Anlagenmodell)¹⁾
Volllaststunden pro Jahr: 8000
Sonstiges: ¹⁾Anlagenmodelle mit unterschiedlichen Kapazitäten erhältlich

45. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: 600 - 800°C, einstellbar
Typische Anlagenverweilzeit: 1 h
Systemdruck: Umgebungsdruck
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: 50 - 100%
Sonstiges: -

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

46. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:

Zellradschleuse

Kohleaustrag & -kühlung: Gekühlte Austragsschnecke – Zellenradschleuse - Kohle Förderschnecke - Abfüllstation

Pyrolysegasnutzung: Vollständige Verbrennung

Integration im Wärmeverbund: Wärmenutzung für Heizzwecke vorgesehen, grundlasttauglich, Vorlauftemperatur max. 95°C

Platzbedarf: 5,4m * 2,4m * 2,2m – 11,6m * 3,5m * 2,7m (L*B*H; mind. 3m Raumhöhe erforderlich)

Mobilität: nicht vorgesehen

Sonstiges: -

47. Ökonomische Daten:

Anschaffungspreis: 224.400 € – 514.800 €

Anlagenüberwachung: Fernüberwachung

Durchschnittlicher Arbeitsaufwand: 2-4 h/Tag (24-Stunden-Betrieb)

Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten): auf Anfrage

Erforderliche Anschlussleistung: 16 kW

Mittlerer Strombedarf: 12 kW

Frequenz und Aufwand für Service und Wartung: 12h pro Monat

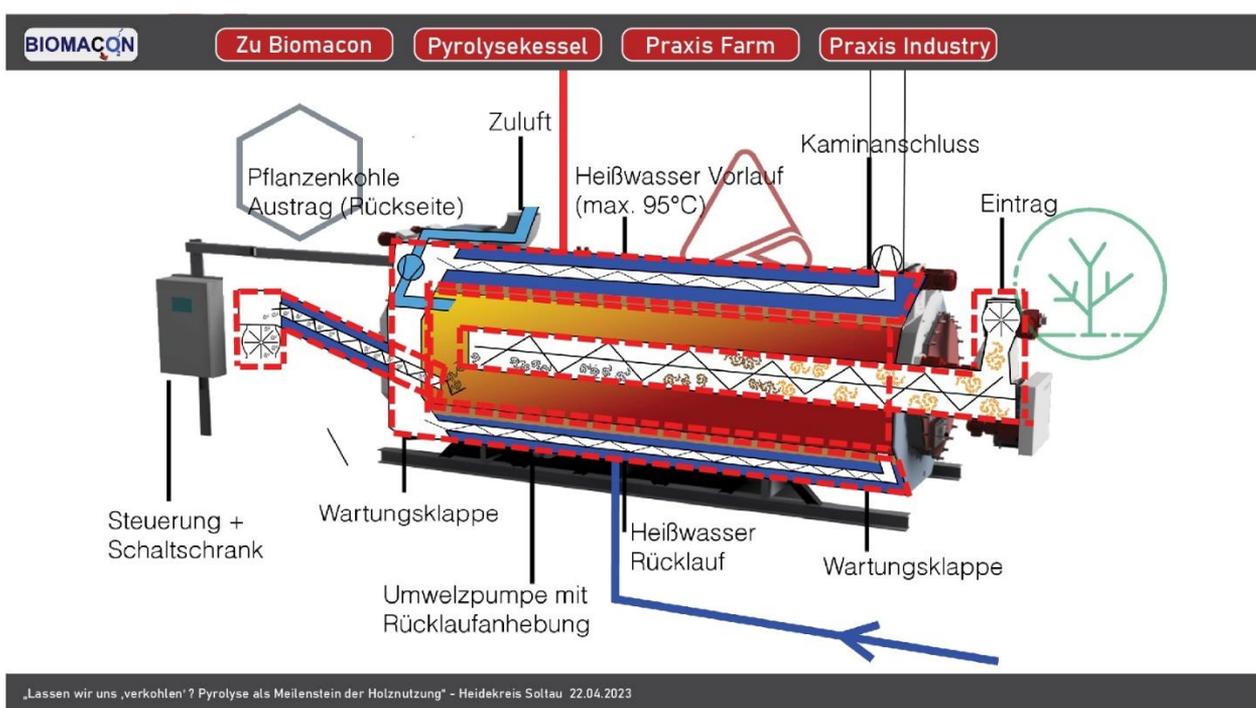
Sonstiges: -

48. Markt und Referenzen

Zielmarkt (Branche; geografisch): Land- und Forstwirtschaft, Industriebetriebe, Kommunale Dienstleister; Europa und Nordamerika

Installierte Anlagen: 30

Referenzkontakt: <https://www.a-p-d.ch>



Firma: REW Regenerative Energie
Wirtschaftssysteme GmbH
<https://www.regenis.de>



Bezeichnung: Regenis MAX / Regenis MAX GT
(Anlage G)

49. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Doppelschneckenreaktor
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Doppelmantel; Gegenstrom
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegase
Pyrolysegasführung: Gegenstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Über 20 Jahre Forschung und Entwicklung im Bereich Pyrolyse; großes Spektrum an Inputmaterialien bei Kombination von Pyrolyse mit hauseigener, vorgeschalteter Trocknereinheit (Regenis GT)
Sonstiges: -

50. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Hackgut, Gärrest, Klärschlamm (getrocknet), Strauchschnitt, feuchter Klärschlamm-Strauchschnitt-Mix (mit Regenis GT Vortrocknung), Rindenmulch, Pellets, Zuckerrohrbagasse, Calciumsillikat (Isolierindustrie), Pizza, Eierschalen, Lederreste, Hühnerfedern, Altbrot
Maximaler Wassergehalt: 25% (bei vorgeschalteter Regenis GT Trocknereinheit bis zu 80% Wassergehalt möglich)
Anforderungen Stückigkeit: max. 50 mm, bisher kein Problem mit erhöhtem Feinanteil identifiziert
Sonstiges: -

51. Produkte:

Hauptprodukt: Kohle, Wärme, Pyrolyseöl, Pyrolysegas
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): abhängig von Einsatzmaterial
Bisher erreichte Qualitätsstandards: -
Sonstiges: -

52. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut, 20% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 20-120 kg/h
Rohstoffkapazität: 70-400 kg/h (je nach Anlagenmodell)¹⁾
Volllaststunden pro Jahr: 7500 - 8000
Sonstiges: ¹⁾Anlagenmodelle mit unterschiedlichen Kapazitäten erhältlich

53. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: 300 - 600°C
Typische Anlagenverweilzeit: 20 min - 40 min (je nach Anforderung)
Systemdruck: Umgebungsdruck (leichter Unterdruck)
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: 33 - 100%
Sonstiges: -

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

54. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Eintragförderschnecke – Doppelschieberschleuse - Produktvorlagentrichter
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Doppelschieberschleuse - Austragsförderschnecke - a) indirekte Kühlung (Luft oder Wasser gekühlte Schnecke)/b) direkte Kühlung (Wasserbesprühung der Kohle)
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Vollständige Verbrennung bzw. Aufbereitung bei Überschussgas
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	Kundenspezifische Einbindung / definierte Schnittstelle
<i>Platzbedarf:</i>	1-2 Stück 40-Fuß-Container
<i>Mobilität:</i>	LKW-Transport möglich
<i>Sonstiges:</i>	Prozesswärmeproduktion Warmwasser-, Warmluft-, Heiße Rauchgas-, Dampf-, Thermoölproduktion

55. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	Regenis MAX: 750.000 € - 1.350.000 € (je nach Modell); Regenis MAX GT: ab 1.000.000 €
<i>Anlagenüberwachung:</i>	Fernwartung und -überwachung der Anlage möglich
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	2-4 h/Tag (24-Stunden-Betrieb)
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	ca. 15 kg Propangas (ca. 50 EUR) pro Start
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	12 kW
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	5 kW
<i>Frequenz und Aufwand für Service und Wartung:</i>	Es gibt einen Wartungsplan wonach diverse Servicearbeiten anfallen. Der Kostenaufwand wird mit ca. 10.000 EUR/a - je nach Anlagentyp und Größe - veranschlagt
<i>Sonstiges:</i>	-

56. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	Landwirtschaft, Industrie und Kommunen; deutschsprachiger Raum/Europa
<i>Installierte Anlagen:</i>	10 (seit 2004)
<i>Referenzkontakt:</i>	https://best-research.eu/



Firma: PYREG GmbH
<http://www.pyreg.de/>

Bezeichnung: PX 500 - PX 1500 für Biomasse
 oder Klärschlamm
 (Anlage H)

57. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Schneckenreaktor
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Doppelmantel; Gegenstrom
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegase
Pyrolysegasführung: Gegenstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Patentierte Technologie mit effizienter Wärmerückführung; Langlebigkeit der einzelnen Komponenten (Speziallegierungen im Reaktor oder keramische Hochtemperatur-Prozessgasfilter)
Sonstiges: -

58. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: bereits Hunderte verschiedenen Biomassen, Klärschlamm und Gärreste, sowie industrielle Abfälle an Laboranlage getestet
Maximaler Wassergehalt: 20%
Anforderungen Stückigkeit: max. 30 mm; Feinanteil max. 15%
Sonstiges: Heizwert mindestens 10 MJ/kg, Feinpartikelanteil < 15%

59. Produkte:

Hauptprodukt: Kohle
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 20-30 % (bezogen auf Referenzrohstoff atro)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: EBC-FutterPlus, EBC-Futter, EBC-AgroBio, EBC-Agro
Sonstiges: Erfahrung mit Zertifikaten bei carbonfuture und puro

60. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut, 20% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 30-90 kg/h
Rohstoffkapazität: 125-375 kg/h (je nach Anlagenmodell)¹⁾
Volllaststunden pro Jahr: max. 8000
Sonstiges: ¹⁾Anlagenmodelle mit unterschiedlichen Kapazitäten (PX 500 und PX 1500) und auch für Klärschlamm als Einsatzmaterial erhältlich.

61. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: 500 - 800°C einstellbar durch Wärme-Bypass System
Typische Anlagenverweilzeit: 15 - 20 min
Systemdruck: leichter Unterdruck
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: 60 - 100%
Sonstiges: -

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

62. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

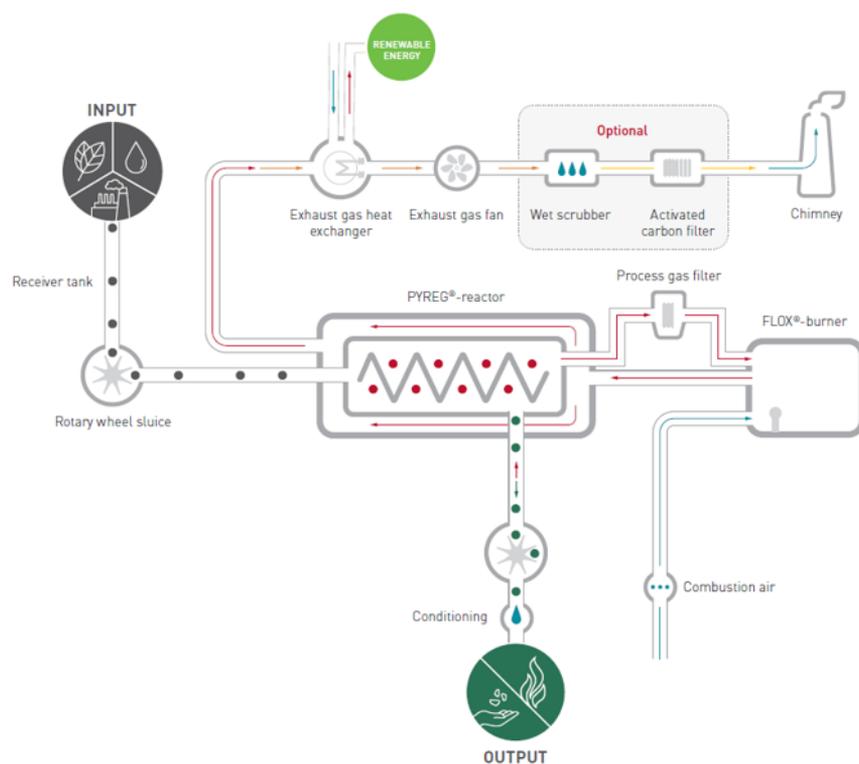
<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	projektspezifisch
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Wassergekühlte Austragsschnecke mit Wasserquenschnecke. Auch Abkühlung mit Stickstoff möglich.
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Vollständige Verbrennung
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	Kundenspezifisch, Heißwasser mit 140°C, ORC-Anlage oder Satteldampfgenerator bis 15 bar möglich
<i>Platzbedarf:</i>	12m * 6m * 5m - 13m * 7m * 7,8m (L*B*H; PX 500 und PX 1500)
<i>Mobilität:</i>	nicht vorgesehen
<i>Sonstiges:</i>	-

63. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	1.000.000 € - 2.000.000 € (+150.000 € für Klärschlammanlage)
<i>Anlagenüberwachung:</i>	Fernwartung und -überwachung der Anlage möglich
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	4 h/Tag (24-Stunden-Betrieb)
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	200 bzw. 400 kg/Gas pro Start, 150-200 m ³ Wasser/Jahr bei PX1500
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	400 V 300 A
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	12 kW und 40 kW; (bei Klärschlammanlagen: 16 und 48 kW)
<i>Frequenz und Aufwand für Service und Wartung:</i>	4 Mal pro Jahr über Pyreg Service- und Wartungsvertrag; 2,5 % von Anschaffungspreis pro Jahr
<i>Sonstiges:</i>	-

64. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	Landwirte, Energieanbieter, Industrie, Vermarkter von CO2 Zertifikaten; Europa, Nordamerika, Asien
<i>Installierte Anlagen:</i>	>50
<i>Referenzkontakt:</i>	https://www.bionero.de/



Firma: Next Generation Elements GmbH
<http://www.nge.at>
Bezeichnung: T:CRACKER®_DH5000
(Anlage I)

65. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Schneckenreaktor
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Doppelmantel; Gegenstrom
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegase
Pyrolysegasführung: Gegenstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Patentiertes, optional koppelbares System zur Trocknung und direkter Rauchgasnutzung aus der Pyrolyse (PyroDry); Pyrolyse energieautark; Gute Eignung für Materialien mit hohem Wassergehalt
Sonstiges: Zusätzlich wird eine Laborversuchsanlage angeboten ("Synlab", Batch, Produktionskapazität von 2,5 kg Kohle)

66. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Vielzahl an biogenen Rohstoffen (Waldhackgut, Siebreste, Dinkelspelzen, getrockneter Gärrest, getrockneter Klärschlamm)
Maximaler Wassergehalt: 20%
Anforderungen Stückigkeit: max. 70 mm (abhängig von Zellradschleuse)
Sonstiges: -

67. Produkte:

Hauptprodukt: Kohle und Wärme
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 28% (bezogen auf Referenzrohstoff atro)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: EBC-Futter, EBC-AgroBio, EBC-Agro
Sonstiges: PyroDry System ermöglicht die Verwertung von feuchter Biomasse

68. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut, 15% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 60-80 kg/h
Rohstoffkapazität: 250 kg/h
Volllaststunden pro Jahr: 7500
Sonstiges: -

69. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: 700 - 800°C
Typische Anlagenverweilzeit: 30 - 120 min
Systemdruck: Umgebungsdruck (leichter Unterdruck)
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: nicht vorgesehen (Leistungsschwankungen aufgrund unterschiedlicher Stoffeigenschaften möglich)
Sonstiges: -

70. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt: Förderschnecke - Zellradschleuse

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Zellradschleuse - Schnecke - Besprühung mit Wasser
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Vollständige Verbrennung
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	Wärmenutzung für Heizzwecke möglich , grundlasttauglich, Vor- lauftemperatur max. 85°C
<i>Platzbedarf:</i>	10m * 3,5m * 5,3m (L*B*H)
<i>Mobilität:</i>	LKW-Transport möglich
<i>Sonstiges:</i>	Wärmenutzung über Trockner der Firma Jumbo Group GmbH (--> PyroDry System: Kombination aus Trocknung und Pyrolyse)

71. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	auf Anfrage
<i>Anlagenüberwachung:</i>	vor Ort
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	2-4 h/Tag (24-Stunden-Betrieb)
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	Strom, Wasser, Druckluft
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	30 KW
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	10 - 15 kW
<i>Frequenz und Aufwand für Service und Wartung:</i>	1 Mal pro Jahr, 2 % von Investition pro Jahr
<i>Sonstiges:</i>	-

72. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	Landwirte, kommunale Betriebe, Lebensmittelindustrie bzw. Produ- zenten von feuchten Materialien, Biokohlehersteller; weltweit
<i>Installierte Anlagen:</i>	3 (1 in Bau)
<i>Referenzkontakt:</i>	https://www.sonnenerde.at/de/



Firma: Carbo-FORCE GmbH
<https://www.carbo-force.de/>

Bezeichnung: Carbo Force 250
 (Anlage J)



73. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Bewegtbettreaktor¹⁾
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Direkte Erhitzung über partielle Oxidation (Carbo-CAP-TEC-Verfahren); Gegenstrom
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegase
Pyrolysegasführung: Kreuzstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Carbo-CAP-TEC-Verfahren, keine Kondensationprodukte, sehr wartungsarmer Reaktor
Sonstiges: ¹⁾Eine Welle mit aufgeschweißten Paddel läuft durch den Reaktor; Vorschub erfolgt über Materialeintrag und Paddelbewegungen

74. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Alle biogenen Einsatzstoffe mit einem hohen Rohfaseranteil sind geeignet, z.B. Hackgut, Sägespäne, Kerne, Schalen, Hanfpellets, holziger Siebüberlauf, ...
Maximaler Wassergehalt: 25%
Anforderungen Stückigkeit: max. 150 mm; Die Anforderungen an die Stückigkeit liegen zwischen G30 bis G50
Sonstiges: -

75. Produkte:

Hauptprodukt: Kohle und Wärme
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 25% (bezogen auf Referenzrohstoff atro)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: EBC-AgroBio, EBC-Agro
Sonstiges: -

76. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut, 10% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 70 kg/h
Rohstoffkapazität: 280 kg/h
Volllaststunden pro Jahr: 7785
Sonstiges: -

77. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: 650 - 850°C, einstellbar
Typische Anlagenverweilzeit: 20 min
Systemdruck: Umgebungsdruck (leichter Unterdruck)
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: nicht vorgesehen (Leistungsschwankungen aufgrund unterschiedlicher Stoffeigenschaften möglich)
Sonstiges: -

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

78. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Dosierbehälter - Förderschnecke - Zellradschleuse
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Kühlschnecke - Zellradschleuse – Austragsystem mit Befeuchtung
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Vollständige Verbrennung
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	kundenspezifisch, Wärmenutzung für Heizzwecke möglich, grundlasttauglich, Vorlauftemperatur max. 90°C
<i>Platzbedarf:</i>	ein 45-Fuß-Container
<i>Mobilität:</i>	nicht vorgesehen
<i>Sonstiges:</i>	-

79. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	auf Anfrage
<i>Anlagenüberwachung:</i>	Fernüberwachung, optional Wartungsvertrag möglich
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	1 h/Tag (24-Stunden-Betrieb)
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	max. 5 Anfahrten pro Jahr, 20 kg Propan pro Anfahrt
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	nicht definiert
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	10 kW
<i>Frequenz und Aufwand für Service und</i>	
<i>Wartung:</i>	3-4 Mal pro Jahr
<i>Sonstiges:</i>	-

80. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	Landwirtschaft, kommunale Betriebe, Industrie; Mittel- und Nordeuropa, USA
<i>Installierte Anlagen:</i>	2 (5 in Planung)
<i>Referenzkontakt:</i>	Block Bio Innovationen GmbH



Firma: **BIOUHEL.CZ**
<https://www.microchar.eu/>;
<https://biouhel.cz/>



Bezeichnung: **Karbotech**
(Anlage K)

81. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Schneckenreaktor
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Doppelmantel; Gegenstrom
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegase
Pyrolysegasführung: Gegenstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Produktionsmöglichkeit von MicroCHAR, Lizenzerwerb statt Ankauf
Sonstiges: -

82. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Klärschlamm, Gärrest, landwirtschaftliche Reststoffe (Hackgut, Stroh), Dinkelspelzen
Maximaler Wassergehalt: 20%
Anforderungen Stückigkeit: max. 25 mm, hoher Staubanteil akzeptabel
Sonstiges: höhere Staubgehalte möglich

83. Produkte:

Hauptprodukt: Kohle
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 30% (bezogen auf Referenzrohstoff atro)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: -
Sonstiges: System vorgesehen zur Produktion von MicroCHAR (microchar.eu) als Bodenzusatzstoff: Anreicherung der Kohle mit Mikroorganismen und Nährstoffen; Erfahrung mit puro.earth CO2 Zertifikaten

84. Kapazität:

Referenzrohstoff: getrockneter Gärrest, 15% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 115-175 kg/h (je nach Anlagenmodell)¹⁾
Rohstoffkapazität: 250-450 kg/h (je nach Anlagenmodell)
Volllaststunden pro Jahr: max. 8000
Sonstiges: ¹⁾Anlagenmodelle mit unterschiedlichen Kapazitäten erhältlich

85. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: 470 - 550 °C
Typische Anlagenverweilzeit: 20 - 30 min
Systemdruck: Umgebungsdruck (leichter Unterdruck)
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: 30 - 100%
Sonstiges: -

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

86. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

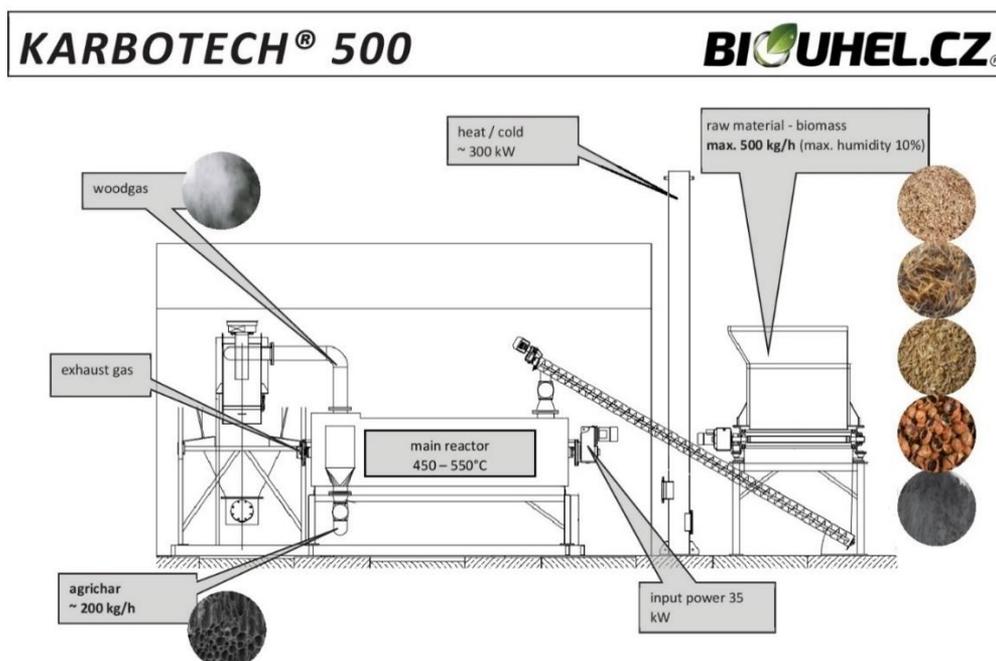
<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Vorbehälter - Förderschnecke - Doppelschieberschleuse
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Doppelschieberschleuse - Förderband - Besprühung - Lager
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Vollständige Verbrennung
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	kundenspezifisch, Temperatur von 300°C wird erreicht
<i>Platzbedarf:</i>	nicht definiert
<i>Mobilität:</i>	nicht vorgesehen, aber möglich
<i>Sonstiges:</i>	-

87. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	Lizenzverkäufe in Planung, 1.000.000 €/Lizenz (Service und Wartung inkludiert); MicoChar Produktionslinie ist inkludiert
<i>Anlagenüberwachung:</i>	Fernüberwachung
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	1-2 Personen 8 h/Tag
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	Erdgas, bzw. Biogas zum Starten
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	35 kW
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	14 kW
<i>Frequenz und Aufwand für Service und</i>	
<i>Wartung:</i>	Inkludiert in die Lizenz
<i>Sonstiges:</i>	-

88. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	Landwirtschaft, Biogasanlagen; Europa
<i>Installierte Anlagen:</i>	3
<i>Referenzkontakt:</i>	-



Firma: Akkodis Germany Tech Experts
GmbH
<https://www.akkodis.com/>



Bezeichnung: MINI
(Anlage L)

89. Grundprinzip/Verfahren:

<i>Verfahren:</i>	Kontinuierlich
<i>Reaktortyp:</i>	Drehrohrreaktor
<i>Wärmeübertragung (Modus; Richtung):</i>	Indirekt über Reaktorwand im Doppelmantel (Heizmuffel); Gleich- oder Gegenstrom
<i>Wärmequelle:</i>	Verbrennung der Pyrolysegase oder Elektroheizung (optional)
<i>Pyrolysegasführung:</i>	Gleich- oder Gegenstrom
<i>Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit:</i>	optional elektrisch beheizter emissionsfreier Prozess, hohe Vielseitigkeit bzgl. Materialien
<i>Sonstiges:</i>	Bisher für Forschungszwecke genutzt

90. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

<i>Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe:</i>	Restholz, Klärschlamm, Braunkohle, Hühnermist, Altholz, Klärschlamm, Tetrapak, gemischte Kunststoffe, Sonnenblumenschalen, Haselnusschalen, ...
<i>Maximaler Wassergehalt:</i>	kein technisches Limit, niedrige Wassergehalte wirtschaftlicher
<i>Anforderungen Stückigkeit:</i>	bei Hackgut max. 50 mm, bei anderen Materialien max. 20 mm
<i>Sonstiges:</i>	-

91. Produkte:

<i>Hauptprodukt:</i>	Kohle bzw. projektspezifisch
<i>Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt):</i>	projektspezifisch (Optimierung je nach Zielprodukt)
<i>Bisher erreichte Qualitätsstandards:</i>	projektspezifisch
<i>Sonstiges:</i>	-

92. Kapazität:

<i>Referenzrohstoff:</i>	Hackgut, 10% Wassergehalt
<i>Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt):</i>	50-125 kg/h
<i>Rohstoffkapazität:</i>	200-420 kg/h (je nach Anlagenmodell)
<i>Volllaststunden pro Jahr:</i>	7000 - 7500
<i>Sonstiges:</i>	-

93. Betriebsparameter:

<i>Möglicher Zieltemperaturbereich:</i>	450 - 900 °C, einstellbar (Manteltemperatur)
<i>Typische Anlagenverweilzeit:</i>	30 - 60 min
<i>Systemdruck:</i>	Umgebungsdruck (leichter Unterdruck)
<i>Möglichkeit zur Leistungsreduktion:</i>	0 - 100% bei elektrischer Beheizung, 10 - 100% wenn mit Gas beheizt
<i>Sonstiges:</i>	-

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

94. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

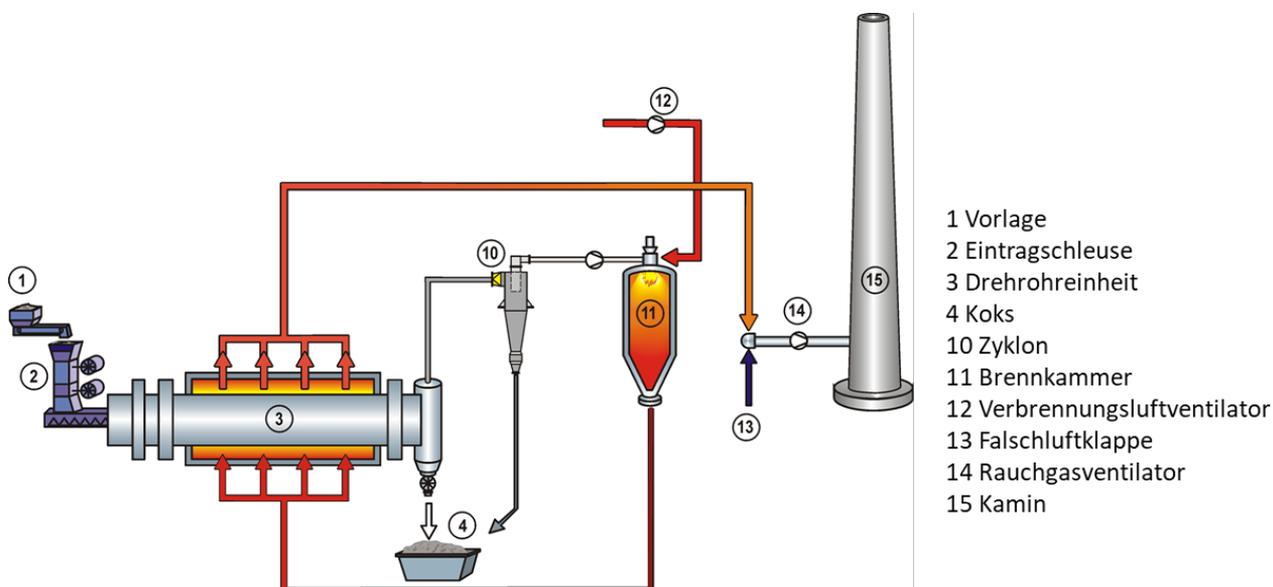
<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Doppelschieberschleuse – Eintragschnecke (mit Stickstoffinertisierung)
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Füllschacht mit Levelmessung und geregelter Kühlschnecke – Zelleradschleuse (mit Stickstoffinertisierung)
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	projektspezifisch
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	kundenspezifisch, keine Standardlösung
<i>Platzbedarf:</i>	ein 40-Fuß-Container
<i>Mobilität:</i>	LKW-Transport möglich, kann am LKW bleiben
<i>Sonstiges:</i>	-

95. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	500.000 € - 1.000.000 € (MINI-Basis-Rack, zuzüglich externes Equipment)
<i>Anlagenüberwachung:</i>	über zentrales Leitsystem
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	je nach Fördertechnik
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	Stickstoff, Schmiermittel, Diesel (zum Starten); Kosten abhängig von Einsatzfall
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	25 kW
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	10 kW (Gasbeheizung) / 200 kW (erlektrische Beheizung)
<i>Frequenz und Aufwand für Service und</i>	
<i>Wartung:</i>	projektspezifisch
<i>Sonstiges:</i>	-

96. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	Kleinstunternehmen, Forschungseinrichtungen; weltweit
<i>Installierte Anlagen:</i>	3 (1 in Planung)
<i>Referenzkontakt:</i>	-



- 1 Vorlage
- 2 Eintragschleuse
- 3 Drehrohreinheit
- 4 Koks
- 10 Zyklon
- 11 Brennkammer
- 12 Verbrennungsluftventilator
- 13 Falschlufklappe
- 14 Rauchgasventilator
- 15 Kamin



Firma: PyroCore Ltd. And PyroCore S.A.
<https://pyrocore.com/en/>

Bezeichnung: Phoenix
 (Anlage M)

97. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Schneckenreaktor
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Doppelmantel; Gleich- oder Gegenstrom
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegase
Pyrolysegasführung: Gleich- oder Gegenstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Anlagen entsprechen der EU-Richtlinie für Mittelgroße Feuerungsanlagen (MCPD), keine weitere Abgasreinigung erforderlich
Sonstiges: -

98. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Biomasse: Hackgut, Miscanthus, Hanf, getrockneter Gärrest, Kakaoschalen, Fischabfälle, Stroh; Andere Abfälle: Elektronikabfälle, PET-Flaschen, Autositze, Glasfasermaterialien, Altholz, ...
Maximaler Wassergehalt: 25% (mind. 10% zur Rußvermeidung)
Anforderungen Stückigkeit: max. 35 mm, mind. 10 mm
Sonstiges: Störstoffe wie Steine, Glas und Keramik müssen entfernt werden

99. Produkte:

Hauptprodukt: Kohle
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 15-35% (bezogen auf Referenzrohstoff atro)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: EBC-FutterPlus, EBC-Futter, EBC-AgroBio, EBC-Agro
Sonstiges: -

100. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut, 15-25% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): nicht definiert
Rohstoffkapazität: 100-700 kg/h
Volllaststunden pro Jahr: nicht definiert
Sonstiges: -

101. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: max. 800°C (900°C auf Anfrage möglich)
Typische Anlagenverweilzeit: 10 - 35 min
Systemdruck: Umgebungsdruck (leichter Unterdruck)
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: nicht vorgesehen (Leistungsschwankungen aufgrund unterschiedlicher Stoffeigenschaften möglich)
Sonstiges: -

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

102. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt: nicht definiert

Kohleaustrag & -kühlung: Indirekt gekühlte Schnecke mit Kühlmittel - Schieberventil , Option zur Besprühung mit Wasser--> bitte Reihenfolge überprüfen und ggfs ergänzen!!

Pyrolysegasnutzung: projektspezifisch

Integration im Wärmeverbund: Kundenspezifisch, Thermoöl 200°C oder Wasserdampf mit 200°C, 10 bar möglich

Platzbedarf:

Mobilität: LKW-Transport möglich

Sonstiges: Keine Abgasreinigung erforderlich da die Anlage der EU-Richtlinie für Mittelgroße Feuerungsanlagen (MCPD) entspricht

103. Ökonomische Daten:

Anschaffungspreis: auf Anfrage (zwischen 2.500.000 € - 5.000.000 €)

Anlagenüberwachung: nicht definiert

Durchschnittlicher Arbeitsaufwand: nicht definiert

Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten): nicht definiert

Erforderliche Anschlussleistung: nicht definiert

Mittlerer Strombedarf: nicht definiert

Frequenz und Aufwand für Service und Wartung: nicht definiert

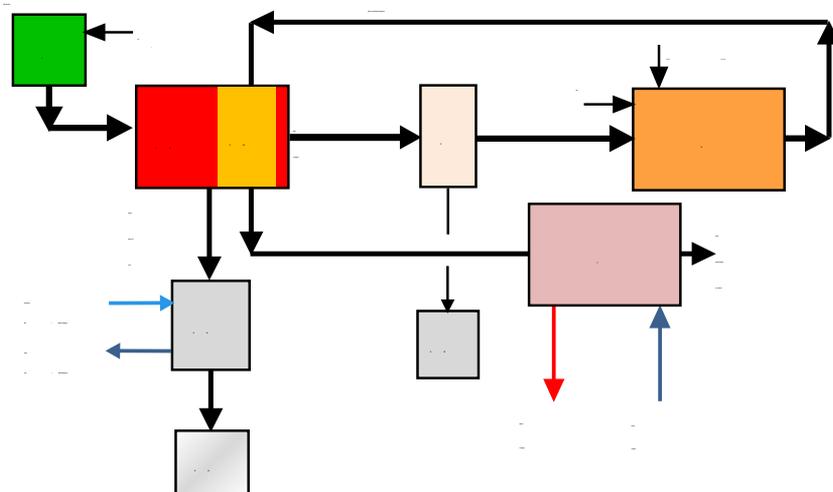
Sonstiges: -

104. Markt und Referenzen

Zielmarkt (Branche; geografisch): kommunale Energielieferanten, Biokohlehersteller; Europa, Nordamerika

Installierte Anlagen: 0 (viel Erfahrung und installierte Anlagen anderer Typen)

Referenzkontakt: -



Firma: Next Generation Elements GmbH
<http://www.nge.at>
Bezeichnung: T:CRACKER® 1000
(Anlage N)

105. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Schneckenreaktor
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Reaktorwand; Kreuzstrom
Wärmequelle: Elektrisch
Pyrolysegasführung: Gleichstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Zonenweis einstellbar, elektrisch beheizter Schneckenreaktor, Nutzung des Pyrolysegas für weiterführende Anwendungen (hochkalorisches Gas, Öl); Zusätzlich wird eine Laborversuchsanlage angeboten ("Synlab", Batch, Produktionskapazität von 2,5 kg Kohle)
Sonstiges: Möglichkeit zur Kombination mit dem SynCycle Prozess: Kunststoff zu Öl

106. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Diverse Kunststoff- und Biomassefraktionen (ca. 30 Unterschiedliche)
Maximaler Wassergehalt: 10-15 %
Anforderungen Stückigkeit: Abhängig vom Rohstoff
Sonstiges: -

107. Produkte:

Hauptprodukt: Hochkalorisches Gas
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): Gas: maximal 90%
Bisher erreichte Qualitätsstandards: -
Sonstiges: Je nach Inputmaterial, auch Produktion von Biokohle möglich

108. Kapazität:

Referenzrohstoff: Reject Materialien aus dem mechanischen Recycling, 35-42 MJ/kg
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 180 kg/h Gas¹⁾
Rohstoffkapazität: 200 kg/h
Volllaststunden pro Jahr: 7500
Sonstiges: ¹⁾Größer möglich z.b. 1 t/h Input bei dieser Anlage

109. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: 400 - 500°C (max. 600°C)
Typische Anlagenverweilzeit: Individuell regelbar
Systemdruck: Umgebungsdruck (leichter Unterdruck)
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: 0 - 100% (theoretisch); Reduktionsmodus fürs Wochenende mit Temperatursenkung
Sonstiges: -

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

110. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

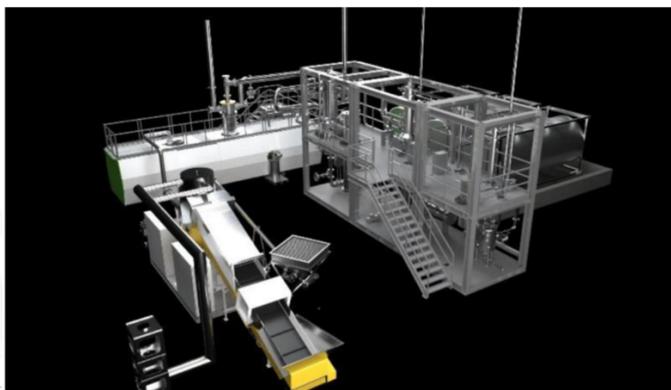
<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Individuell anpassbar an Inputmaterial, (z.B. Schmelzeleitung oder Zellrad-schleuse)
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Schneckenausstrag
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Energetische Nutzung des hochkalorischen Gases oder Ölgewinnung
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	keine Standardlösung, projektspezifisch
<i>Platzbedarf:</i>	12m * 2m * 3,5m (L*B*H)
<i>Mobilität:</i>	nicht vorgesehen
<i>Sonstiges:</i>	-

111. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	auf Anfrage
<i>Anlagenüberwachung:</i>	vor Ort, Fernzugriff
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	2-4 h/Tag (24-Stunden-Betrieb)
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	Strom, Wasser, Druckluft, Stickstoff
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	380 kW
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	anwendungsspezifisch/projektspezifisch
<i>Frequenz und Aufwand für Service und Wartung:</i>	1 Mal pro Jahr, 2 % von Investition pro Jahr
<i>Sonstiges:</i>	-

112. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	Chemische Industrie, Biokohleproduktion; weltweit
<i>Installierte Anlagen:</i>	1
<i>Referenzkontakt:</i>	https://www.syncycle.com/



Firma: Carbon Technik Schuster GmbH
www.ct-schuster.de

Bezeichnung: CTS40
 (Anlage O)

**113. Grundprinzip/Verfahren:**

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Fließbettreaktor
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Reaktorwand; Kreuzstrom
Wärmequelle: Elektrisch
Pyrolysegasführung: Gegenstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: -
Sonstiges: -

114. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: nicht definiert
Maximaler Wassergehalt: 5-10% (die Gesamtlösung beinhaltet einen Trockner)
Anforderungen Stückigkeit: max. 70 mm, Feinanteil <10%
Sonstiges: Optimale Materialeigenschaften: rieselfähig, 10-60 mm, 200 kg/Srm, 1000 kWh/Srm

115. Produkte:

Hauptprodukt: Kohle, Wärme, Strom, (Öl)
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 32% Kohle, 20-30% Öl, Rest Gas (H₂, CH₄, C₂H₆ etc...)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: EBC-FutterPlus, EBC-Futter, EBC-AgroBio, EBC-Agro
Sonstiges: -

116. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut, 5-10% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 170 kg/h; Wärme: 1,1 MW, Strom: 200 MW
Rohstoffkapazität: 500 kg/h
Volllaststunden pro Jahr: 7500
Sonstiges: -

117. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: max. 900°C
Typische Anlagenverweilzeit: 2-3 Stunden
Systemdruck: leichter Überdruck
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: 75 - 100%
Sonstiges: -

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

118. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Vollautomatischer Vorlagebehälter - Förderschnecken - Trockner - Dosierschnecke - Vorlagebehälter - Doppelschieberschleuse - Stopfschnecke
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Doppelschieberschleuse - Kühlschnecke - Waage - Tagesbunker - BigBag-Absackung (ggf. Mühle und Sieb)
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Vollständige Verbrennung/projektspezifisch
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	Kundenspezifisch, keine Standardlösung
<i>Platzbedarf:</i>	12m * 12m * 12m (ohne Kamin, ca. 20m)
<i>Mobilität:</i>	nicht vorgesehen
<i>Sonstiges:</i>	-

119. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	3.500.000 - 6.500.000 € ¹⁾
<i>Anlagenüberwachung:</i>	Fernüberwachung
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	2-4 h/Tag (24-Stunden-Betrieb)
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	Propangas; ca. 5000 L/Jahr
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	60 -110 kW
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	50 - 100 kW (Inkl. Vorlage, Biomassetransport Trocknung und Kohletransport)
<i>Frequenz und Aufwand für Service und</i>	
<i>Wartung:</i>	30.000 €/Jahr (Jahresinspektion + Verschleißteileinbau)
<i>Sonstiges:</i>	¹⁾ abhängig vom gewünschten Anlagendesign und der gewünschten Peripherie

120. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	nicht definiert
<i>Installierte Anlagen:</i>	4
<i>Referenzkontakt:</i>	https://www.carbon-cycle.de/



Firma: 3R Systems GmbH
<https://www.3r-systems.de/>

Bezeichnung: 3R-8000
 (Anlage P)

**121. Grundprinzip/Verfahren:**

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Drehrohrreaktor
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Doppelmantel; nicht definiert
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegase
Pyrolysegasführung: Gleichstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Robust, wirtschaftlich, wartungsarm, einfach in Montage und Betrieb
Sonstiges: -

122. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: von Holzschnitzel A1 bis zu Siedlungsabfall²
Maximaler Wassergehalt: 40%
Anforderungen Stückigkeit: max. 60 mm
Sonstiges: -

123. Produkte:

Hauptprodukt: Kohle
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 28% (bezogen auf Referenzrohstoff atro)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: EBC-FutterPlus, EBC-Futter, EBC-AgroBio, EBC-Agro
Sonstiges: -

124. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut, 12% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 120-140 kg/h
Rohstoffkapazität: 500 kg/h
Volllaststunden pro Jahr: 8000
Sonstiges: -

125. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: 450 - 650°C, einstellbar
Typische Anlagenverweilzeit: 1 Stunde
Systemdruck: Umgebungsdruck (leichter Überdruck)
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: 50 - 100%
Sonstiges: -

² Auf die Einhaltung der abfallrechtlichen Vorgaben muss ausdrücklich hingewiesen werden.

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

126. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

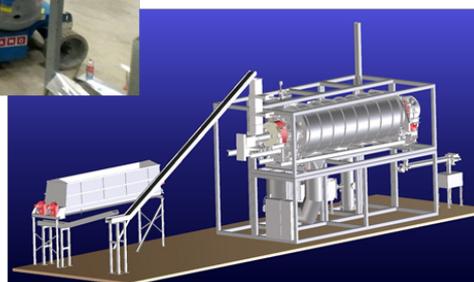
<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Vordosierer - Förderband – Einfülltrichter - Doppelschieberschleuse – Einbringschneckenschnecke,
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Ausbringschnecke - indirekt gekühlte Schnecken
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Vollständige Verbrennung für den Prozess + Wärmeauskopplung
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	Kundenspezifisch, keine Standardlösung
<i>Platzbedarf:</i>	12,5m * 6m * 6m (L*B*H; Einbring- und Ausbringtechnik noch nicht eingerechnet)
<i>Mobilität:</i>	6 Segmente mit LKW zu Aufstellungsort transportierbar, Standortwechsel nur mit hohem Aufwand möglich
<i>Sonstiges:</i>	-

127. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	ab 1.850.000 €
<i>Anlagenüberwachung:</i>	nicht erforderlich, Prozessbegleitung über Fernüberwachung möglich; Rufbereitschaft im Störfall möglich
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	2-4 h/Tag (24-Stunden-Betrieb)
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	nicht definiert
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	150 kW
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	45 kW
<i>Frequenz und Aufwand für Service und</i>	
<i>Wartung:</i>	1 Mal pro Jahr, ca. 30.000 € pro Jahr ¹⁾
<i>Sonstiges:</i>	¹⁾ 2 Wartungen nach Bedarf, je nach Inputmaterial und Verschleißgrad

128. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	Kompostierer, Abfallgesellschaften, Land- und Forstwirtschaft, Entsorgungsbetriebe, Energierzeuger, Lebensmittelindustrie, sonstige Industrie mit Abfall Entsorgungsproblemen; weltweit
<i>Installierte Anlagen:</i>	0 (viel Erfahrung und installierte Anlagen anderer Typen)
<i>Referenzkontakt:</i>	-



Firma: **Akkodis Germany Tech Experts GmbH**
<https://www.akkodis.com/de/branchen/energie-saubere-technologien>



Bezeichnung: **MIDI (Anlage Q)**

129. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Drehrohrreaktor
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Reaktorwand im Doppelmantel (Heizmuffel); Kreuzstrom
Wärmequelle: Elektrisch
Pyrolysegasführung: Gleich- oder Gegenstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: elektrisch beheizter emissionsfreier Prozess, hohe Vielseitigkeit bzgl. Materialien
Sonstiges: -

130. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Restholz, Klärschlamm, Braunkohle, Hühnermist, Altholz, Klärschlamm, Tetrapak, gemischte Kunststoffe, Sonnenblumenschalen, Haselnusschalen, ...
Maximaler Wassergehalt: kein technisches Limit, niedrige Wassergehalte wirtschaftlicher
Anforderungen Stückigkeit: bei Hackgut max. 50 mm, bei anderen Materialien max. 20 mm
Sonstiges: -

131. Produkte:

Hauptprodukt: projektspezifisch (Biokohle, Wärme, Strom, Pyrolysegas, Kondensate, Holzessig)
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): projektspezifisch (Optimierung je nach Zielprodukt)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: projektspezifisch
Sonstiges: -

132. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut, 20% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): Je nach Anlagenauslegung
Rohstoffkapazität: 300-1000 kg/h
Volllaststunden pro Jahr: 7500 - 8000
Sonstiges: -

133. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: max. 1200°C, einstellbar (Manteltemperatur)
Typische Anlagenverweilzeit: 30 - 60 min
Systemdruck: Umgebungsdruck (leichter Unterdruck)
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: 0 - 100%
Sonstiges: -

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

134. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

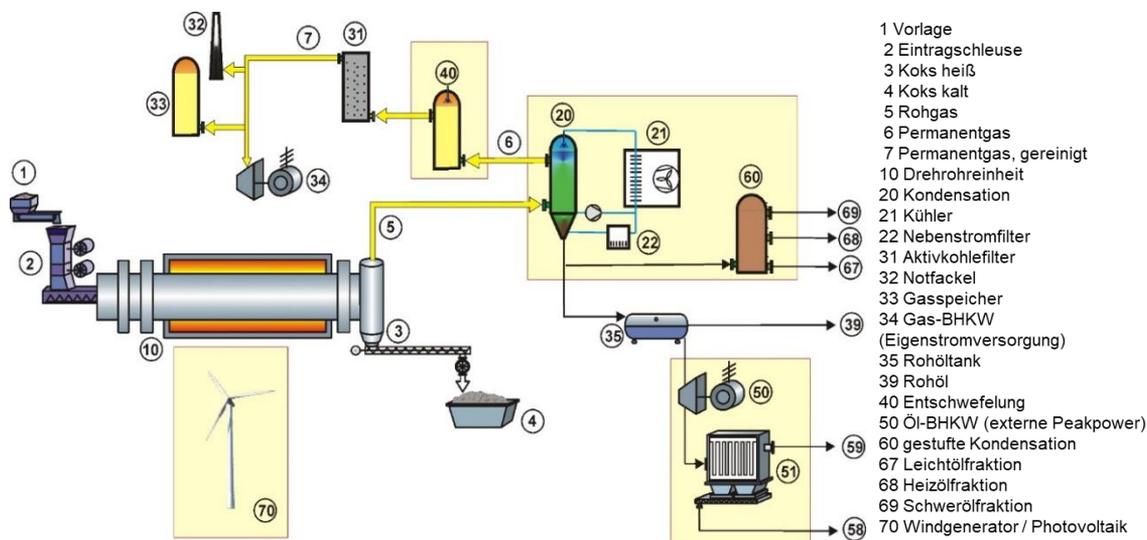
<p><i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i></p> <p><i>Kohleustrag & -kühlung:</i></p> <p><i>Pyrolysegasnutzung:</i></p> <p><i>Integration im Wärmeverbund:</i></p> <p><i>Platzbedarf:</i></p> <p><i>Mobilität:</i></p> <p><i>Sonstiges:</i></p>	<p>Schubbodencontainer – Vibrosieb - Becherwerk – Doppelschieberschleuse – Eintragschnecke (mit Stickstoffinertisierung)</p> <p>Füllschacht mit Levelmessung und geregelter Kühlschnecke – Zelleradschleuse – Kettenförderer (mit Stickstoffinertisierung)</p> <p>projektspezifisch (Kondensate + Permanentgas)</p> <p>Kundenspezifisch, keine Standardlösung</p> <p>zehn 40-Fußcontainer (inklusive vertikaler Kolonne u.a. zu Teer- & Staubabscheidung, Fördersysteme, Produktlagersystem, Elektroverteilung und Leitstand)</p> <p>semimobil, Standortwechsel innerhalb von 2 Wochen möglich</p> <p>-</p>
--	---

135. Ökonomische Daten:

<p><i>Anschaffungspreis:</i></p> <p><i>Anlagenüberwachung:</i></p> <p><i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i></p> <p><i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i></p> <p><i>Erforderliche Anschlussleistung:</i></p> <p><i>Mittlerer Strombedarf:</i></p> <p><i>Frequenz und Aufwand für Service und</i></p> <p><i>Wartung:</i></p> <p><i>Sonstiges:</i></p>	<p>4.500.000 € - 5.000.000 €¹⁾</p> <p>vor Ort</p> <p>Gering, im Vergleich zur Aufbereitungstechnik</p> <p>(integrierter Kompressor und Stickstoffgenerator)</p> <p>750 kW</p> <p>500 kW</p> <p>projektspezifisch</p> <p>¹⁾MIDI-Basis-Einheit, zzgl. Gasreinigung, BHKW, Aufbereitung, Silos, Tanks;</p> <p>Bis 450 kW (Heizleistung) können zur Netzregulierung in Sekunden abgeschaltet werden.</p>
---	--

136. Markt und Referenzen

<p><i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i></p> <p><i>Installierte Anlagen:</i></p> <p><i>Referenzkontakt:</i></p>	<p>In Kombination mit Biogas- und Kläranlagen, für Bodensanierung, Industrieanlagen, Land- und Forstwirtschaft, Gemeinden/Stadtwerke, Energieversorger, Biokohleproduzenten, Reifenhersteller; Europa, Asien</p> <p>1 (4 in Planung)</p> <p>-</p>
--	---



Firma: CarbonZero Sagl
<http://carbonzero.ch/>

Bezeichnung: Precision Batch Kiln
 (Anlage R)

**137. Grundprinzip/Verfahren:**

Verfahren: Semikontinuierlich
Reaktortyp: 4-6 Retorten
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Indirekt über Doppelmantel; Kreuzstrom
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegas
Pyrolysegasführung: Gasabzug nach unten
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Kombination von Holzessig und Kohleproduktion ermöglicht ein höchst profitables Geschäftsmodell
Sonstiges: Gute Kontrollmöglichkeiten von Temperatur und Verweilzeit; Zuverlässiges und simples Design

138. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Hackgut, Pellets, Mandelschalen, Walnusschalen, Bambus Chips, Holz-scheite oder Briquettes
Maximaler Wassergehalt: Keine Obergrenze, je höher der Wassergehalt, desto länger dauert der Prozess
Anforderungen Stückigkeit: Feinanteil und Staub müssen entfernt werden
Sonstiges: -

139. Produkte:

Hauptprodukt: Holzessig und Kohle
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): Holzessig: bis zu 20% (bezogen auf Referenzrohstoff atro)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: -
Sonstiges: Erträge und Qualität hängen vom Rohstoff und Prozessparametern ab, die vom Betreiber gut gesteuert werden können

140. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut, 200 kg/m³ (atro; Wassergehalt nicht relevant)
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 33-200 kg/h bei 1-6 Retorten mit je 10 m³ (entspricht 2 batches; bis zu sechs Retorten in einer Einheit möglich)
Rohstoffkapazität: 170-1000 kg/h (1-6 Retorten mit je 10 m³ (entspricht 2 Batches; Bis zu sechs Retorten möglich in einer Einheit möglich)
Volllaststunden pro Jahr: 8000
Sonstiges: Einfach skalierbare Kapazität durch Zugabe von Retorten

141. Betriebsparameter:

Möglicher Zieltemperaturbereich: Umgebungstemperatur bis 750° C, variabel einstellbar
Typische Anlagenverweilzeit: variabel einstellbar
Systemdruck: Umgebungsdruck
Möglichkeit zur Leistungsreduktion: möglich; je nach Füllgrad der Retorten
Sonstiges: Prozessdesign ermöglicht exakte Temperaturemessungen in jedem Prozessschritt

FACTSHEET PYROLYSEANLAGE

142. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Befüllung der Retorten mit Förderband oder manuell. Durch Schließung des Deckels wird Lufteintritt verhindert
<i>Kohleaustrag & -kühlung:</i>	Aktive Kohlekühlung in der Retorte mit Wärmerückgewinnung. Entleerung mittels Kippmechanismus.
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Kondensation oder Verbrennung
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	Kundenspezifisch, keine Standardlösung
<i>Platzbedarf:</i>	Abhängig von Kapazität und Anlagenkonfiguration, auf Anfrage erhältlich
<i>Mobilität:</i>	nicht vorgesehen
<i>Sonstiges:</i>	-

143. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	auf Anfrage
<i>Anlagenüberwachung:</i>	vor Ort
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	1-2 Personen pro Batch
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	nicht definiert
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	nicht definiert
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	nicht definiert
<i>Frequenz und Aufwand für Service und Wartung:</i>	gering, Details noch nicht definiert
<i>Sonstiges:</i>	Produktionskapazität kann leicht erhöht werden, wenn Absatzmärkte gegeben sind;

144. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	keine Branchen definiert; weltweit
<i>Installierte Anlagen:</i>	0
<i>Referenzkontakt:</i>	-



Firma: CarbonZero Sagl
<http://carbonzero.ch/>
Bezeichnung: Horizontal Bed Kiln Reactor
(Anlage S)



145. Grundprinzip/Verfahren:

Verfahren: Kontinuierlich
Reaktortyp: Bandreaktor
Wärmeübertragung (Modus; Richtung): Direkt mit Abgas aus Pyrolysegasverbrennung; Kreuzstrom
Wärmequelle: Verbrennung der Pyrolysegase
Pyrolysegasführung: Kreuzstrom
Alleinstellungsmerkmale / Besonderheit: Kombination von Holzessig und Kohleproduktion ermöglicht ein höchst profitables Geschäftsmodell
Sonstiges: Prozesseinstellungen ermöglichen die Produktion von Holzessig und Biokohle, die für sehr spezifische Anwendungsfälle geeignet sind

146. Rohstoff - Erfahrungen und Anforderungen:

Bisher erfolgreich getestete Rohstoffe: Hackgut, Pellets, Mandelschalen, Walnusschalen
Maximaler Wassergehalt: 20% (für wirtschaftliche Betriebsweise; höhere Wassergehalte technisch möglich)
Anforderungen Stückigkeit: je nach Konstruktion, max. Stückgrößen werden von der eingesetzten Zentralschleuse vorgegeben; je homogener, desto effizienter der Prozess; Feinanteil und Staub müssen entfernt werden
Sonstiges: -

147. Produkte:

Hauptprodukt: Holzessig und Kohle
Ausbeute Kohle (oder anderes Hauptprodukt): Holzessig: 7,5%, Kohle: 28% (bezogen auf Referenzrohstoff atro)
Bisher erreichte Qualitätsstandards: OMRI Zertifizierung für Holzessig und Biokohle
Sonstiges: -

148. Kapazität:

Referenzrohstoff: Hackgut, max. 15% Wassergehalt
Produktionskapazität Kohle (oder anderes Hauptprodukt): 40-75 kg/h Holzessig; 165-330 kg/h Kohle (je nach Anlagenmodell)¹⁾
Rohstoffkapazität: 500-1000 kg/h
Volllaststunden pro Jahr: 8000
Sonstiges: ¹⁾Anlagenmodelle in zwei unterschiedlichen Größen erhältlich (HBK 10, HBK 20); Kapazität ist einfach zu adaptieren

149. Betriebsparameter:

<i>Möglicher Zieltemperaturbereich:</i>	300 – 650°C, einstellbar; vorgelagerte Trocknungsstufe 140°C, Holzessigextraktion bei 280°C,
<i>Typische Anlagenverweilzeit:</i>	45 - 60 min
<i>Systemdruck:</i>	Umgebungsdruck
<i>Möglichkeit zur Leistungsreduktion:</i>	möglich; durch Geschwindigkeit und Auflagedicke am Förderband einstellbar
<i>Sonstiges:</i>	Horizontales Bettdesign ermöglicht genaue Temperaturmessungen und -einstellung in jedem Prozessschritt; Möglichkeit für zusätzliche Temperaturstufen

150. Peripherie/Integration ins Gesamtsystem:

<i>Rohstoffzuführung, Dosierung und Maßnahmen gegen Lufteintritt:</i>	Förderband - Zellschleuse
<i>Kohleustrag & -kühlung:</i>	Zellschleuse - Förderband mit Wasserbesprühung (oder Kühlschnecke)
<i>Pyrolysegasnutzung:</i>	Vollständige Verbrennung
<i>Integration im Wärmeverbund:</i>	Kundenspezifisch, keine Standardlösung
<i>Platzbedarf:</i>	Abhängig von Kapazität und Anlagenkonfiguration, auf Anfrage erhältlich
<i>Mobilität:</i>	nicht vorgesehen
<i>Sonstiges:</i>	-

151. Ökonomische Daten:

<i>Anschaffungspreis:</i>	2.100.000 € und 3.400.000 €
<i>Anlagenüberwachung:</i>	vor Ort
<i>Durchschnittlicher Arbeitsaufwand:</i>	1 Person pro Batch
<i>Bedarf Betriebsmittel (Art; Kosten):</i>	Hackgut, Propan oder Erdgas zum Aufheizen; Kosten variabel
<i>Erforderliche Anschlussleistung:</i>	nicht definiert
<i>Mittlerer Strombedarf:</i>	35 kW
<i>Frequenz und Aufwand für Service und</i>	
<i>Wartung:</i>	gering, Details noch nicht definiert
<i>Sonstiges:</i>	Bei hohen Laufzeiten und guten Absatzbedingungen kann eine payback-period von weniger als einem Jahr erreicht werden (laut Hersteller)

152. Markt und Referenzen

<i>Zielmarkt (Branche; geografisch):</i>	keine Branchen definiert; weltweit (eher für Industrieländer)
<i>Installierte Anlagen:</i>	1
<i>Referenzkontakt:</i>	https://sfbiochar.com/

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 800 21 53 59

servicebuero@bmk.gv.at

bmk.gv.at