15. DGAW-WISSENSCHAFTSKONGRESS

Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

Anke Bockreis, Martin Faulstich, Sabine Flamme, Kathrin Greiff,
Martin Kranert, David Laner, Mario Mocker, Michael Nelles,
Peter Quicker, Gerhard Rettenberger, Vera Susanne Rotter,
Jörg Woidasky (Hg.)

Wissenschaftliche Organisation

Prof. Dr.-Ing. Anke Bockreis (Univ. Innsbruck)
Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich (INZIN e.V.)
Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme (FH Münster)
Prof. Dr. Kathrin Greiff (RWTH Aachen University, ANTS)
Prof. Dr.-Ing. Martin Kranert (i. R. Univ. Stuttgart)
Prof. Dr. David Laner (Univ. Kassel)
Prof. Dr. Mario Mocker (OTH Amberg-Weiden)
Prof. Dr. mont. Michael Nelles (Univ. Rostock/DBFZ Leipzig)
Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker (RWTH Aachen University, TEER)
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger (i. R. HS Trier)
Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter (TU Berlin)
Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky (HS Pforzheim)

Deutsche Gesellschaft für Abfall- und Kreislaufwirtschaft e.V.
DGAW
Von-der-Heydt-Straße 2
10785 Berlin
Tel.: 030.84 59 14 77
E-Mail: info@dgaw.de
www.DGAW.de

© *innsbruck* university press, 2026
Universität Innsbruck
1. Auflage
Alle Rechte vorbehalten.
innsbruck university press, Karl-Schönherr-Straße 3, 6020 Innsbruck
Tel. +43 512 507-31700, iup@uibk.ac.at, www.uibk.ac.at/iup
www.uibk.ac.at/iup
ISBN 978-3-99106-187-8
DOI 10.15203/99106-187-8
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Julian Klüttermann, Isabel Kaphahn, Peter Quicker

Bewertung des thermochemischen Verhaltens von Papierrejekten

***Abstract**: Papierrejekte aus der Aufbereitung von Altpapier, z. B. Wellpappenaltpapier (Old Corrugated Cardboard – OCC)-basierte-Rejektströme, stellen aufgrund ihrer heterogenen Zusammensetzung aus faserhaltigen, polymerbasierten und beschichteten Komponenten eine besondere Herausforderung für das stoffliche Recycling dar [1, 2]. Zur Erschließung stofflicher Nutzungspfade wurden ca. 40 Mg Papierrejekt mittels NIR-Sortierung in polymerreiche und papierfaserdominierte Fraktionen aufgetrennt, um Polyolefine für das chemische Recycling bereitzustellen. Als prozessintegrierte Alternative wird zudem eine zweistufige Pyrolyse untersucht, welche die durch TGA-FTIR bestimmten unterschiedlichen thermischen Zersetzungsbereiche faserhaltiger und polymerer Komponenten gezielt nutzt. Während sich die papierbasierten Bestandteile überwiegend im Bereich von 300–350 °C zersetzen, erfolgt die Degradation der Polyolefine primär zwischen 350–450 °C [3, 4, 5]. Die NIR-Sortierung reduziert den Massenverlust in der ersten Stufe deutlich und führt bei den polymerreichen Fraktionen zu einem Zersetzungsverhalten, das dem reiner Polyolefine entspricht. Die Ergebnisse zeigen, dass die PO/PS-Fraktion erfolgreich isoliert werden konnte, wodurch eine gezieltere Auslegung thermochemischer Prozesse ermöglicht wird. Gleichzeitig kann eine zweistufige Pyrolyse als in-situ-Strategie ähnliche Zielsetzungen adressieren und somit eine prozesstechnisch Alternative darstellen.*

1 Einleitung

In Europa werden jährlich 52,1 Mio. Mg Altpapier gesammelt, von denen etwa 46,1 Mio. Mg erneut in der Papierproduktion eingesetzt werden. Dies entspricht rund 50 % des gesamten Rohstoffeinsatzes der Papierindustrie. Der größte Einzelstrom ist Wellpappenaltpapier mit etwa 30,7 Mio. Mg Altpapier pro Jahr [6]. In den hierfür betriebenen Aufbereitungsprozessen fallen systematisch OCC-Rejekte als Nebenströme aus Aufschluss, Siebung und Sortierung an. In Deutschland entstehen rund 3 Mio. Mg Papierrejekte pro Jahr (EAV 03 03, 2021), von denen über 80 % energetisch verwertet werden [7].

Die stoffliche Verwertung dieser Rejektströme ist aufgrund ihrer heterogenen Zusammensetzung herausfordernd. Papierbasierte Verpackungen bestehen häufig aus mehreren funktionalen Materialschichten und enthalten neben Fasern auch Kunststoffe, polymerbasierte Verbund- und Barriereschichten (z. B. Papier-PE oder Papier-PE-Al-Laminierungen) sowie Beschichtungen. Während die faserhaltigen Bestandteile im Aufbereitungsprozess weitgehend zurückgewonnen werden können, verbleiben polymerhaltige und mineralische Komponenten im Rejektstrom. Diese Mischung aus Papier- und Kunststoffanteilen schränkt mechanische Recyclingrouten ein und macht thermochemische Prozesse als alternative Verwertungsoption zunehmend relevant. Insbesondere Polyolefine sind aufgrund der Abwesenheit von funktionellen Gruppen und Heteroatomen sowie ihres günstigen Pyrolyseverhaltens ein geeignetes Einsatzmaterial für das chemische Recycling. [1]

2 Material und Methoden

Für die Untersuchungen wurden 40 Mg OCC-Papierrejekt durch die Tomra Feedstock GmbH (gemeinsam mit dem ANTS-Institut der RWTH Aachen) mittels Nahinfrarot (NIR)-Sortierung fraktioniert. Aus dem unsortierten Ausgangsmaterial entstanden polymerreiche Zielfraktionen, die ebenso wie das Ausgangsmaterial einer Immediat- und Elementaranalyse sowie einer thermogravimetrischen Analyse (TGA) mit Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) des Abgases unterzogen wurden.

2.1 Material

Die NIR-Sortierung führte zu zwei polymerreichen Fraktionen, einer Polyolefinfraktion sowie einer Polyolefin-Polystyrol-Mischfraktion. Polystyrol wurde dabei gezielt miterfasst, um die Sortierausbeute zu erhöhen. Beide Fraktionen wurden zunächst getrennt untersucht. Für weiterführende Aufbereitungsversuche wurden die Fraktionen anschließend zusammengeführt, um eine ausreichende Materialmenge bereitzustellen. Das Gemisch wurde mechanisch zerkleinert und erneut einer NIR-Sortierung unterzogen, bei der gezielt 2D-PO/PS-Folien abgetrennt wurden. Die so isolierte 2D-PO/PS-Fraktion wurde anschließend in einem Scheibenagglomerator agglomeriert.

2.2 Methodik

Alle Proben wurden getrocknet und auf < 0,5 mm zerkleinert. Die thermogravimetrische Analyse wurde angelehnt an DIN 51005/51006 mit einer Linseis STA PT1600 durchgeführt. Die Proben wurden unter Stickstoff mit 10 K/min bis 500 °C erhitzt und anschließend 30 min isotherm gehalten.

Parallel erfolgte eine kontinuierliche Gasphasenanalyse mittels FTIR (Gasmet CX4000), mit der CO, CO_2, Kohlenwasserstoffe und weitere relevante Komponenten erfasst wurden. Die Kombination aus TGA und FTIR erlaubt die Zuordnung der freigesetzten gasförmigen Zersetzungsprodukte zu den jeweiligen thermischen Zersetzungsbereichen.

3 Ergebnisse

Die TGA-Verläufe in Abbildung 1 zeigen deutliche Unterschiede zwischen dem unsortierten Rejekt (Input) und den sortierten polymerreichen Fraktionen (PO, PO/PS). Die erste Massenabnahmestufe bis etwa 350 °C ist bei den polymerreichen-Fraktionen deutlich geringer ausgeprägt und bei der zusätzlich sortierten sowie agglomerierten PO/PS-Fraktion nahezu vollständig reduziert. Dies ist auf den verringerten Faseranteil zurückzuführen. Darauf folgt zwischen 350 und 450 °C der typische Zersetzungsbereich von Polyolefinen. [1, 3]

Die zugehörige FTIR-Gasphasenanalyse (Abbildung 2) des Ausgangsmaterials (Input) zeigt im Bereich der ersten Massenabnahmestufe (300-350 °C) erhöhte CO_2- und CO-Konzentrationen sowie Hinweise auf Stickstoffverbindungen. Im Temperaturfenster der Polyolefinzersetzung (350-450 °C) steigen CH_4, höhere Kohlenwasserstoffe und BTEX deutlich an. Zusätzlich treten geringe Mengen Styrol auf. Die Abgaszusammensetzung der PO/PS-Fraktion (Abbildung 3) bestätigt, dass die in Abbildung 2 beobachteten CO_2- und CO-Konzentrationen mit der Zersetzung papierbasierter Bestandteile zusammenhängen. Diese Konzentrationen treten im Abgas der PO/PS-Fraktion nicht mehr auf, während CH_4, höhere Kohlenwasserstoffe und aromatische Verbindungen dominieren.

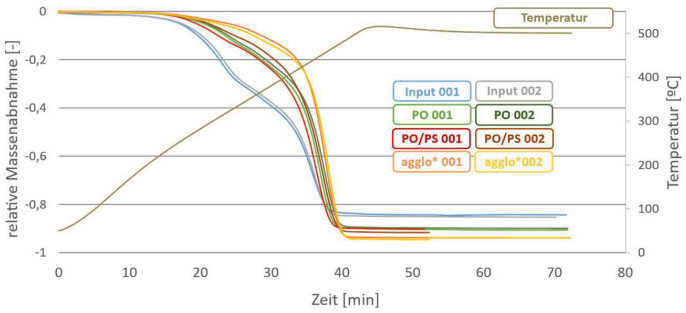


Abbildung 1: TGA-Analysen des OCC-Papierrejekts (Input) und der sortierten Fraktionen sowie der zusätzlich sortierten sowie agglomerierten Fraktion (agglo) unter N_2-Atmosphäre. Aufheizrate: 10 K/min bis 500 °C, 30 min Haltezeit*

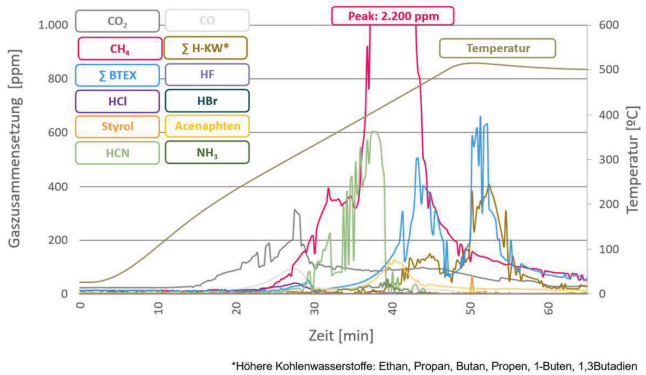


Abbildung 2: FTIR-TG-Abgasanalyse der Probe Input 001

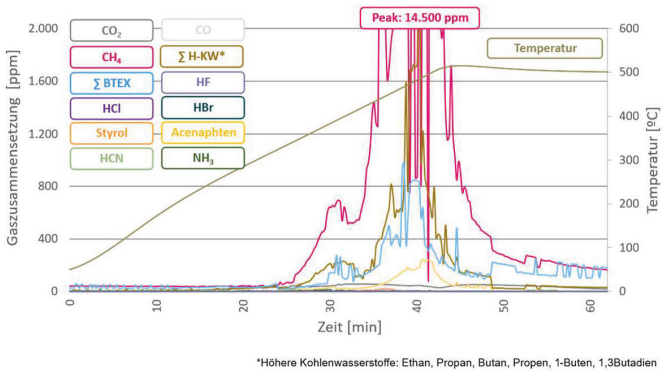


Abbildung 3: FTIR-TG-Abgasanalyse der Probe agglo 001

Das thermische Zersetzungsverhalten der Faser- und Polymeranteile unterscheidet sich grundsätzlich, weist jedoch in bestimmten Temperaturbereichen Überlappungen auf, sodass keine vollständige Abgrenzung möglich ist. Dies gilt es vertieft zu untersuchen, um den Ansatz einer zweistufigen Pyrolyse zu evaluieren.

4 Fazit & Ausblick

Die Untersuchungen bestätigen, dass die Papierrejekte bei der Pyrolyse in zwei getrennten Stufen zersetzt werden. Faserbasierte Bestandteile reagieren überwiegend bei 250-350 °C, polymerbasierte Anteile bei 350-450 °C. Das Verhältnis dieser Komponenten bestimmt maßgeblich die Qualität thermochemischer Produkte. Die NIR-Sortierung reduziert den papierdominierten Masseverlust deutlich und führt bei polymerreichen Fraktionen zu einem Abbauverhalten, das nahezu reinen Polyolefinen entspricht. Durch eine zweistufige Pyrolyse können die Produkte der Faser- und Polymerzerlegung getrennt gewonnen und gezielt verwertet werden.

In weiteren Arbeiten werden zusätzliche Sortieroptionen untersucht sowie diskontinuierliche und kontinuierliche Pyrolyseversuche durchgeführt, um den Schadstofftransfer und die Qualität größerer Kondensatmengen zu bewerten und darauf aufbauend ein geeignetes Prozesskonzept für das Recycling von OCC-Rejektströmen zu entwickeln.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Projekts *SPaRe (03EN2131 A-D).*

Literatur/Quellen

[1] Johansson, A.-C.; Selander, A.; Soleimanisalim, A. H.; Nordsvahn, R.; Shafaghat, H.: Chemical recycling of complex reject streams from the paper industry via thermal and catalytic pyrolysis. In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 181. Jg., 2024, S. 106572

[2] Quicker, P. und Seitz, M.: Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecyclings. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, Januar 2024

[3] Matsuzawa, Y.; Ayabe, M.; Nishino, J.: Acceleration of cellulose co-pyrolysis with polymer. In: Polymer Degradation and Stability. 71. Jg., 2001, Nr. 3, S. 435–444

[4] Burhenne, L.; Messmer, J.; Aicher, T.; Laborie, M.-P.: The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 101. Jg., 2013, S. 177–184

[5] Quicker, P.; Weber, K. (Hrsg.): Biokohle. Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016

[6] CEPI, Confederation of European Paper Industry: Cepi Key Statistics 2024. European pulp & paper industry. URL: https://www.cepi.org/cepi-key-statistics-2024/ [Stand: 06.12.2025]

[7] Statistisches Bundesamt: Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Abfallarten. Erhebung der Abfallentsorgung in Deutschland. EAV 03 03. URL: https://www-genesis.destatis.de/genesis/online [Stand: 03.10.2025]

Kontakt
M. Sc., Julian Klüttermann, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
RWTH Aachen/LuF-TEER
Tel.-Nr. +49 241 80-96696
Kluettermann@teer.rwth-aachen.de
Homepage: https://www.teer.rwth-aachen.de