

# Kommerzielle Nutzung von Mikrowellen zur Depolymerisation und Pyrolyse von organischen Materialien, Biomasse, Kunststoffabfällen, Altreifen und Raffinerie-Rückständen

Helmut Federmann

1.	Grundsätzliches zur Pyrolyse .....	416
2.	Wissenschaftlich-historischer Hintergrund .....	419
2.1.	Katalytische Pyrolyse .....	419
2.2.	Thermische Nutzung der Mikrowelle.....	420
2.3.	Was sind Mikrowellen? .....	420
2.4.	Mikrowellen Pyrolyse.....	420
3.	Der Weg zu $\mu$ Fuel-Technologie und $\mu$ Fuel-Prozess .....	421
4.	$\mu$ Fuel-Verarbeitungsprozess .....	424
4.1.	Feedstock-Aufbereitung.....	424
4.2.	Kernanlage .....	425
4.3.	Prozessbeschreibung.....	426
4.4.	Nachbehandlung der Produkte .....	427
5.	Feedstock und Produkte.....	427
5.1.	Feedstock-Produktmix .....	427
5.2.	Verarbeitbare Feedstocks .....	427
5.3.	Konversionsprodukte.....	429
5.3.1.	MWDP-Kohle.....	429
5.3.2.	Öl.....	430
5.3.3.	Nebenprodukte.....	430
6.	Die aktuellen Entwicklungen.....	430
6.1.	Aktuelle kommerzielle Projekte .....	430
6.1.1.	$\mu$ Soil – Ein Terra Preta Nova Produkt.....	430
6.1.2.	Kunststoff-Verwertung.....	431
6.1.3.	Klärschlamm-Verwertung .....	431
6.2.	Forschung und Entwicklung.....	431
7.	Quellen .....	432

Die Konfliktsituation dringt allmählich immer stärker ins allgemeine Bewusstsein: Dem Streben nach immerwährendem wirtschaftlichem Wachstum folgt die rapid steigende Beanspruchung und der Verzehr begrenzter Ressourcen und Rohstoffvorräte. Infolge ständig zunehmender Produktionsmengen und Konsumgüter entstehen wachsende Mengen an Abfällen, Abgasen und Abwässern, die Natur und Mensch immer mehr belasten, wenn nicht gar überlasten. Den nicht verwerteten Überresten aus Produktion und Konsum, den so genannten Abfällen, stehen zunehmend begrenzte Kapazitäten an *Senken zur Entsorgung* zu Verfügung.

Im gleichen Atemzug entwickelt sich ein fast unbegrenzter Hunger nach Energie. Deren herkömmliche Erzeugung pumpt noch immer zunehmende Mengen an Treibhausgas in die Atmosphäre. Wie wir gehört haben, noch nie so viel wie im Jahr 2016. Die Konsequenzen für die stattfindenden Klimaveränderungen und deren zu befürchtende Auswirkungen auf das menschliche Leben sind bekannt.

Zwei Korrektive sind möglich:

- Kein weiterer Transfer von Kohlenstoff mehr aus fossilen Senken in die Erdatmosphäre – und damit in den globalen Kohlenstoffkreislauf – oder
- die aktive Einbringung von Kohlenstoff in von Menschen geschaffenen Senken – dauerhafter Entzug von Kohlenstoff aus dem natürlichen Kreislauf – die Sequestrierung von Kohlenstoff.

Die Schwierigkeit der heute stark negativen Balance entgegen zu wirken ist offensichtlich.

Die Suche nach Lösungen und Auswegen aus dieser Situation lenkt den Blick naturgemäß auf technische Verfahren, mit denen in wirtschaftlicher, energieeffizienter Weise eine intelligente Wiedergewinnung der in den Abfällen enthaltenen Rohstoffe und Energiereserven gelingen kann.

Am besten eine regenerative Energiequelle, die Rohstoffsicherung, Energiegewinnung und den schonenden Umgang mit der Umwelt verbindet! Es gibt vielfältige Ansätze und Versuche, dies zu erreichen. Ein vielversprechender Weg wird im Folgenden dargestellt.

Seit mehr als 15 Jahren befasst sich Bionic Laboratories BLG GmbH, 64521 Groß-Gerau, mit dem Thema *Mikrowellengestützte Depolymerisation (MWDP)*. Ihr erfolgreicher kommerzieller Einsatz ist auf vielen unterschiedlichen Feldern möglich. Das Verfahren basiert auf der Weiterentwicklung einer althergebrachten, bewährten Methode, der Pyrolyse, die der Mensch bereits seit Jahrtausenden zur Herstellung von Holzkohle nutzt.

## 1. Grundsätzliches zur Pyrolyse

Spätestens seit Beginn der Industrialisierung haben Pyrolyseverfahren jedoch eine wesentlich weiterreichende Bedeutung errungen. Dies führte zu vielfältigen, teilweise höchst komplexen technischen Realisierungen. Entwicklungen wie Fließbett Reaktoren oder die Flashpyrolyse sind weithin bekannt.

Allen technischen Implementierungen waren zwei wichtige Ziele gemein:

- Einen möglichst effektiven und effizienten Energieeintrag zur Verbesserung von Prozessverlauf und Ausbeute.
- Eine möglichst präzise Kontrolle des Prozessverlaufs um eine optimale Produktausbeute und -qualität zu erreichen.

Sehr unterschiedlich waren und sind hingegen die technischen Zielsetzungen, was die verwendeten Eingangsmaterialien – i. F. Feedstock – und den beabsichtigten Output des Prozesses betrifft. Oft konnten die gesteckten Ziele insbesondere hinsichtlich Produktqualität und Wirtschaftlichkeit nicht wirklich erreicht werden.

Die vielfältigen Bemühungen hatten jedoch grundsätzlich immer das gleiche Ziel: Die Konvertierung eines **organischen** Feedstock – durch Erhitzung unter Abwesenheit von Sauerstoff – in eines oder mehrere höherwertige Produkte.

Als organischer Feedstock ist dabei nicht etwa nur jedwede Form von Biomasse zu verstehen, sondern jedes Material, in dem signifikante Mengen an Kohlenstoff gebunden sind. Neben Erdöl und Resten aus der Erdölverarbeitung betrifft das viele neuzeitliche Abfallstoffe wie Kunststoffe und Altreifen.

In der Regel fallen bei dieser Konvertierung, in unterschiedlichster Zusammensetzung, Verteilung und Qualität, vier typische Produktklassen an:

- fest, insbesondere Kohle,
- flüssig, insbesondere Öle,
- gasförmig, mehr oder weniger gut brennbares Gemisch und
- Wasser, sowohl als ursprüngliche Feedstockfeuchte, wie auch als Reaktionsprodukt.

Unter den typischen Konvertierungsverfahren zur Nutzung organischer Abfälle stellt die Pyrolyse ein thermochemisches Verfahren dar. Parallel zur Weiterentwicklung der thermochemischen Verfahren steht eine intensive Beschäftigung mit biochemischen Verfahren – z.B. Biogasfermentierung. Beide Verfahrensklassen können sich häufig sinnvoll ergänzen. So können die Fermentierungsreste der Biogasproduktion als Feedstock für MWDP dienen. Wichtige thermochemische Verfahren sind neben der Pyrolyse (Vermeidung von Oxidation) die Verbrennung (vollständige Oxidation) und die Vergasung (teilweise Oxidation).

Herkömmliche Pyrolyseverfahren werden häufig in die folgenden Gruppen unterteilt:

Tabelle 1: Unterteilung herkömmlicher Pyrolyseverfahren

Technologie	Behandlungsdauer	Aufheizungsrate	Temperatur
Einheit	s	K/s	°C
Slow Pyrolysis	450 bis 550	0,1 bis 1	300 bis 700
Fast Pyrolysis	0,5 bis 10	10 bis 200	600 bis 1.000
Flash Pyrolysis	< 0,5	> 1.000	800 bis 1.100

Daneben wird heute noch eine so genannte Torrefraktion für Biomasse unterschieden. Ihre typische Temperatur von etwa 200 bis 250 °C liegt deutlich unter der Slow Pyrolysis, bei *Kochzeiten* von mehreren Stunden bis Tagen. Es wird eine der Holzkohleherstellung vergleichbare Karbonisierung erreicht, wobei nur die leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe und Wasserdampf entweichen, es kommt nicht zum Aufbrechen komplexer Molekülstrukturen und die Kohle ist relativ geringwertig. Sie entspricht typischer käuflicher Holzkohle und der immer häufiger eingesetzten Biokohle zur Bodenverbesserung.

Bei der im Folgenden ausführlich dargestellten mikrowellengestützten Depolymerisation handelt es sich zweifellos um eine Pyrolyse im Sinne der Definition, da dieses neu entwickelte Verfahren alle entscheidenden Kriterien erfüllt. Es beinhaltet einen thermochemischen Prozess und läuft in einer sauerstofffreien Atmosphäre ab.

Es fällt jedoch auf, dass eine Einordnung in das obige Schema nicht möglich ist, da sich die energetischen Reaktionsverhältnisse unter Mikrowelleneinfluss völlig anders darstellen.

### Besonderheiten der MWDP

Die Reaktortemperaturen bei der MWDP liegen deutlich unterhalb 350 °C, die typische Behandlungsdauer bei etwa einer Stunde. Die Aufheizrate folgt einer S-Kurve. Sie ist zunächst extrem schnell, worauf ein längeres Plateau praktisch ohne weitere Aufheizung folgt, um danach wieder stark anzusteigen bis sie durch gezielte Reduzierung der MW Leistung gestoppt werden sollte, um einen kritischen, in der Literatur häufig als *Run-Away* bezeichneten Effekt zu unterbinden.

MWDP nutzt

- Mikrowellentechnik zur Energieeinbringung,
- modernste Katalysatoren zur Reaktionsinduzierung und -optimierung,
- ein Reaktordesign, welches die konsequente Anwendung modernster digitaler Technologien hinsichtlich MW-Erzeugung, Sensorik, Prozesssteuerung usw. ermöglicht.

Auf Grund der deutlich niedrigeren Temperaturen gegenüber Fast- und Flash-Pyrolyse kann man eine erhöhte Energieeffizienz vermuten. Gemeinsam mit der Niederdruckatmosphäre erleichtern sie außerdem den konstruktiven und betrieblichen Aufwand.

Im Ergebnis wird ein hochflexibler Pyrolyseprozess realisiert, der hinsichtlich präziser Steuerbarkeit der Reaktionsabläufe und Produktqualität sowohl bei der Kohle als auch beim Öl alle bisher bekannten Verfahren weit hinter sich lässt. Eine wesentliche Herausforderung in der Realisierung von Anlagen zur Mikrowellenpyrolyse liegt in dem extrem breiten Spektrum an erforderlichen technischen Kompetenzen, vom Chemieingenieur über den Elektroniker bis hin zum Mikrowellen- und Katalysatorexperten, wobei einige dieser Fähigkeiten nicht weit verbreitet sind. Dennoch bleibt der technische Realisierungsaufwand relativ gering, da fast durchgängig Standardkomponenten mit nur wenigen, allerdings entscheidenden, Modifikationen zum Einsatz kommen.

Die tatsächlich geringe Anlagenkomplexität erlaubt hohe Standzeiten bei einem überschaubaren Wartungsaufwand.

MWDP wurde von der ersten Idee um die Jahrtausendwende über eher primitive anfängliche Garagenexperimente in den folgenden 15 Jahren durch das Team um den Erfinder und Anlagendesigner Heinz Brümmer konsequent bis zur kommerziellen Einsatzreife weiterentwickelt.

Ein voll funktionsfähiger, ausgetesteter Prototyp wurde 2013 fertiggestellt und steht heute zu Test- und Demonstrationszwecken bereit.

## 2. Wissenschaftlich-historischer Hintergrund

### 2.1. Katalytische Pyrolyse

Ein wesentlicher Grundstein für MWDP sind die Arbeiten von Professor Ernst Bayer [2] Mitte der 1980er Jahre an der Universität Tübingen. Die Ergebnisse seiner Laborversuche zeigten überzeugend die Wirksamkeit der Nutzung von Zeolithen als Katalysatoren im Zusammenspiel mit thermischer Depolymerisation (= Pyrolyse) von verschiedenen organischen Ausgangsmaterialien. In seinen Untersuchungen spielte vor allem Klärschlamm eine große Rolle. Er nannte seinen neuen Prozess *Niedertemperaturkonvertierung (NTK)*. Professor Bayer zeigte, wie mit Hilfe von ausgewählten Zeolithen die erforderliche Reaktionstemperatur der thermischen Depolymerisation deutlich reduziert werden konnte, wobei er gleichzeitig eine erhebliche Verbesserung der Produktqualität erreichte.

Aufbauend auf seinen Forschungsergebnissen wurde es möglich, u.a. Biomasseabfälle einschließlich Lignin aus der Zelluloseindustrie, sowie verschiedenste organische Abfälle in kurzkettige, aliphatische Kohlenwasserstoffe und Kohle zu konvertieren. Die dabei gewonnenen Flüssigkeiten sind den Leichtölen aus der Verarbeitung fossiler Rohöle sehr ähnlich. Sie sind keineswegs mit typischen Pyrolyseölen zum Beispiel aus der Flashpyrolyse vergleichbar. Sie entsprechen in ihren Eigenschaften weitgehend dem charakteristischen Dieselkraftstoff bzw. leichtem Heizöl bei deutlich weniger  $\text{NO}_x$ .

Ein hierzu eng verwandter Prozess ist das *katalytische Cracken*, ein Standardprozess aller heutigen Ölraffinerien, durch den es möglich wurde, die Treibstoffausbeute bei der Rohölverarbeitung stark zu erhöhen. In Form des so genannten *Houdrey Prozesses* kam katalytisches Cracken erstmals 1937 in der Markus Hook Raffinerie in Pennsylvania, USA zum Einsatz. Durch seine schnelle Verbreitung wurde die Treibstoffversorgung der Alliierten im zweiten Weltkrieg erst ermöglicht.

Schon Professor E. Bayer wies auch darauf hin, dass möglicherweise das zweite, mengenmäßig relevante, Produkt seines Verfahrens, die (Bio)kohle, zukünftig das wirtschaftlich-kommerziell bedeutendere Produkt sein könnte. Ein wichtiger Hinweis der in nachfolgenden Entwicklungen häufig nicht ernst genug genommen wurde.

## 2.2. Thermische Nutzung der Mikrowelle

Obwohl die Wärme- und Heizwirkung von Mikrowellen bereits 1946, allerdings durch reinen Zufall, entdeckt worden war, fand der Effekt jenseits von Kochkunst und Militär lange nur geringes Interesse. Insbesondere zeigte die einschlägige Wissenschaft bis zur Jahrtausendwende kaum Interesse an der Anwendung von Mikrowellentechnik im Zusammenhang mit chemischen Reaktionsprozessen. Dies hat sich erst in den vergangenen 10 bis 15 Jahren grundlegend geändert. Seitdem ist weltweit eine kontinuierlich zunehmende Zahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Mikrowellenpyrolyse zu verzeichnen.

In immer mehr modernen Labors, insbesondere solchen, die im Bereich der Umweltforschung arbeiten, gehört inzwischen ein einfacher Laborreaktor für wenige Gramm Reaktionsmasse schon fast zur Standardausstattung. Auch Bionic bietet neben seinen kommerziellen Großreaktoren diverse Laborgeräte an, die allerdings den üblicherweise zu findenden Standardgeräten in ihrer Leistungsfähigkeit weit überlegen sind und es erlauben, in vollem Umfang die zeitlichen Abläufe im Großreaktor zu simulieren.

Infolge des gesteigerten wissenschaftlichen Interesses finden sich in der Literatur immer mehr Bestätigungen der langjährigen empirischen Ergebnisse des Entwicklungs- und Forschungsteams um Heinz Brümmer. Detaillierte und fundierte wissenschaftliche Untersuchungen und Analysen auf Laborebene verifizieren diese einerseits und machen andererseits einen zunehmenden Teil der Forschungsergebnisse chemisch-physikalisch erklärbar.

Trotzdem sind noch immer einige der beobachteten chemischen Reaktionen theoretisch nicht vollkommen verstanden. Auch die Wissenschaftler sind noch häufig auf Vermutungen und Annahmen angewiesen, um Testergebnisse zu erklären. Dennoch besteht in der wissenschaftlichen Literatur Einigkeit über die unübersehbaren Vorteile und Potentiale des Mikrowellenverfahrens im Vergleich zu den konventionellen Pyrolysemethoden.

## 2.3. Was sind Mikrowellen?

Mikrowellen liegen im Spektrum der elektromagnetischen Wellen zwischen Infrarotem Licht und Radiowellen. Die Wellenlängen liegen zwischen 1 mm und 1 cm, korrespondierend mit Frequenzen zwischen 0,3 und 3 GHz.

Mikrowellen werden insbesondere eingesetzt im Mobilfunk inklusive WLAN, sowie für Radar und Satellitenkommunikation. Für die thermische Nutzung sind in den meisten Ländern zwei Frequenzbänder festgelegt: 0,915 und 2,45 GHz.

## 2.4. Mikrowellen Pyrolyse

Der am häufigsten hervorgehobene Vorteil des Einsatzes von Mikrowellentechnik besteht in einem sehr energieeffizienten, homogenen Heizvorgang, der seiner Natur nach von innen nach außen erfolgt. Dadurch wird keine direkte Erhitzung des Reaktorgefäßes erforderlich. Dies hat auch den Vorteil, dass sich an den Reaktorwänden keine Kohleablagerungen wegen Überhitzung bilden.

Die Wirkung der Mikrowellenstrahlung auf unterschiedlichste Materialien zerfällt in drei Kategorien, bestimmt durch ihre Interaktion mit dem Mikrowellenfeld:

- Isolatoren, sie werden von Mikrowellen durchdrungen ohne irgendwelche Energieverluste (Transparenz);
- Leiter, Mikrowellen können nicht eindringen und werden reflektiert;
- Absorber, Di-Elektrikum genannt. Sie absorbieren die Mikrowellen über zwei physikalische Effekte: Dipolbewegung und Maxwell-Wagner-Effekt. Wichtig ist die Ausrichtung der Dipole im elektromagnetischen Feld, wobei elektromagnetische Energie durch molekular Reibung in Wärme umgewandelt wird. Diese Ausrichtung erfolgt 2,5 Milliarden Mal in der Sekunde.

Gute Absorber sind Wassermoleküle als starke Dipole – Grundlage des Kochens mit Mikrowelle – Kohle, Mineralien wie z.B. Sand – inklusive Zeolithe – und viele Metalle. Grundsätzlich kann die Mikrowellenpyrolyse nur dann funktionieren, wenn ausreichend Absorber in der Reaktionsmasse enthalten sind. Man kann dies jedoch immer durch geeignete Beimischungen bzw. Additive erreichen.

Darüber hinaus sind die selektiven und sehr präzisen Steuerungsmöglichkeiten aufgrund der molekular-elektrischen Wechselwirkungen zwischen Zeolith und Mikrowelle von hoher Bedeutung. Die Mikrowellen beeinflussen dabei Reaktionsverläufe über Ionenaustausch unmittelbar, ihre Wirkung geht dabei weit über ein einfaches Erhitzen der Reaktionsmasse hinaus.

Der kombinierte Einsatz von Zeolith und Mikrowelle steht auch heute noch nicht ausreichend im wissenschaftlichen Fokus. Hierauf beruht jedoch die weitreichende Überlegenheit des hier dargestellten Konversionsverfahrens, auch im Vergleich zu den inzwischen vielfach beschriebenen Labor-Experimenten der MW-Pyrolyse. Umfangreiche vergleichende Versuche belegen eine signifikante Wechselwirkung zwischen Katalysator und Mikrowelle, deren Wirkung von Feedstock zu Feedstock stark variiert. Katalysatorauswahl und Abstimmung der Mikrowellen-Leistungskurve sind die wesentlichen Parameter der Verfahrens Anpassung und -optimierungen.

### 3. Der Weg zu $\mu$ Fuel-Technologie und $\mu$ Fuel-Prozess

Es mangelt nicht an Versuchen, den urgeschichtlichen Prozess der Entstehung fossiler Rohstoffe mit Hilfe von Katalytischen Prozessen nachzuahmen. Die Nutzung organischer Abfallfraktionen, aus denen – mit Hilfe des Pyrolyseprinzips – durch Zusatz von Katalysatoren die Rückgewinnung von Grundstoffen bewirkt werden soll, steht dabei im Mittelpunkt des technischen, ökologischen und ökonomischen Interesses. Allerdings entsprechen die bisherigen Ergebnisse sowohl unter ökonomischen als auch ökologischen Aspekten meist nicht den gehegten Erwartungen.

Der seit dem Jahr 2003 intensiv vorangetriebene Einsatz der Mikrowellentechnik führte bei dem Groß-Gerauer Entwicklungs- und Forschungsteam bald zu der Erkenntnis, dass nur eine vorbereitende Pelletierung des Feedstock, gemeinsam mit Katalysatoren

und weiteren Reaktionsbeschleunigern einen kommerziell zuverlässigen Prozess ermöglichen würde. Erst durch die hohe Verdichtung und stabile Mischungshomogenität des Eingangsmaterials wird eine zuverlässige Prozessführung ermöglicht. Tatsächlich bildet jedes einzelne Pellet für sich einen *Reaktor im Reaktor*, innerhalb dessen alle entscheidenden Konvertierungsreaktionen ablaufen. Zunächst verlassen freie Wassermoleküle als Dampf die Pellets, wobei sich feinste Kapillaren aus dem Innern hin zur Oberfläche bilden. Diese ermöglichen später, bei erhöhten Innentemperaturen, den flüchtigen Crackingprodukten als Dampfgemisch die Pellets zu verlassen. Auf ihrem Weg durch diese feinen Kanäle finden weitere, teilweise katalytisch unterstützte Reaktionen statt. Dieser Vorgang setzt sich bei fein gesteuerter, abnehmender MW-Leistung solange fort, bis alle flüchtigen Stoffe das Pellet verlassen haben, dieses also praktisch zu Gänze nur noch aus Kohlenstoff und Zeolith besteht. Dieses vollständige *Ausdampfen* der Pellets nimmt etwa eine Stunde in Anspruch und ist der Schlüssel für das Erreichen der hohen Produktqualität.

Das entstehende Öl-Wasser-Dampfgemisch wird bei Unterdruck im Hauptreaktor über einen Kamin abgesaugt. Dabei bestehen, je nach Applikation, diverse Möglichkeiten, den noch heißen Gasstrom weiter zu behandeln, z.B. indem man ihn über weitere Katalysatoren leitet. Die Energieeffizienz nachgelagerter Produktaufbereitungen kann so weiter gesteigert werden. Danach wird der Gasstrom über spezielle Zyklone von Feststoffen gereinigt, der kondensierbare Teil verflüssigt und volatile Gase und Wasser abgeschieden.

Die im Reaktor verbliebene Kohle behält die ursprüngliche Pelletform, allerdings geschrumpft und stark porös. Sie wird über eine Transportschnecke ausgetragen und gekühlt, um eine Entzündung zu vermeiden.

### **Einzigartigkeit der $\mu$ Fuel-Technologie**

Die  $\mu$ Fuel-Technologie fasst zwei unabhängig voneinander und eigenständig funktionsfähige Methoden der Depolymerisation zu einem neuartigen hybriden Pyrolyseverfahren zusammen. Dadurch wurden zum ersten Mal die zwei besten verfügbaren Konversionsmethoden thermo-katalytische Depolymerisation (TCDP) und Mikrowellen-Pyrolyse (MP) zu einem einstufigen Prozess, *Mikrowellengestützte katalytischen Depolymerisation (MWDP)* vereinigt. Technisch können damit, unabhängig von der wirtschaftlichen Effizienz, sämtliche kohlenstoffhaltigen Feedstock-Materialien in gasförmige, flüssige und feste Produkte zerlegt werden.

Obwohl die thermo-katalytische Depolymerisation bereits seit einigen Jahrzehnte bekannt ist, haben viele technische Schwierigkeiten bisher den Erfolg ihres kommerziellen Einsatzes verhindert. Erst durch die Verbindung mit der Mikrowellentechnik und der Entwicklung hierfür geeigneter Reaktoren wurden die bestehenden technischen Hindernisse überwunden. Vor allem jedoch entstanden sehr vorteilhafte Zusatzeffekte, da nunmehr chemische Reaktionen ablaufen können, die so nur in Verbindung mit der Mikrowelle möglich sind. Die weiter oben beschriebenen, speziellen Eigenschaften der Mikrowelle ermöglichen in einer Reaktionsmasse mit äußerlich sehr moderaten Oberflächentemperaturen von nur 250 °C bis 350 °C die punktuelle Entstehung von extremen



Hitzezentren, so genannten Hotspots, die nur im Nanobereich und für Sekundenbruchteile existieren. Bei den resultierenden elektrischen Entladungen entsteht oft ein, als Mikrowellenplasma bekannter Effekt mit punktuellen Temperaturen bis zu 5.000 °C.

Man kann davon ausgehen, dass im  $\mu$ Fuel-Reaktionsverlauf schrittweise, in einer Art Kettenreaktion, immer mehr molekulare Kohlenstoffzentren entstehen, die im Mikrowellenfeld zu vielfachen winzigen Plasmaentladungen führen, welche das Cracking größerer Moleküle unterstützen. Bei geeignetem Versuchsaufbau und Beobachtungsmöglichkeit des Reaktorinneren kann man sie optisch häufig als winzige Blitze erkennen.

### $\mu$ Fuel-Design

Nach mehrjähriger Basisarbeit im Labor war im Jahr 2007 das originäre Design für einen kontinuierlich arbeitenden Reaktor fertiggestellt. Durch ausführliche Tests auf einer ersten Pilotanlage in den Jahren 2008 und 2009 wurden das grundsätzliche Anlagendesign und die Funktionsfähigkeit des Prozessablaufs erstmals bestätigt.

Die Erkenntnisse und Erfahrungen flossen in das folgende standardisierte Design des kommerziellen Grundmodells ein, aus dem verschiedene Reaktortypen und -größen abgeleitet wurden. Es besteht ein direktes Verhältnis zwischen Reaktorkapazität/-durchmesser und erforderlicher Mikrowellenleistung. Diese wird über die Anzahl der am Reaktorraum montierten MW-Generatoren mit je 3 kW Leistung realisiert.

Im August 2013 ging ein Prototyp mf60 mit 20 MW Generatoren als Demonstrationsmodell in Betrieb. Dies ist eine herunterskalierte Variante des derzeitigen Standarddesigns mf120. Der Prototyp war zunächst Entwicklungsplattform und hat eine Vielzahl von Detailänderungen durchlaufen. Die vollständig modulare Bauweise hat dieses Vorgehen stark begünstigt. Seit 2015 ist der Reaktor unverändert stabil und hat viele Demonstrations- und Testläufe, oft im Kundenauftrag, absolviert. Der Prototyp hat den letzten Schritt zur kommerziellen Reife der Technologie erfolgreich abgeschlossen. Die Vorbereitung von mehreren kommerziellen Projekten ist in vollem Gange und teilweise weit fortgeschritten.



Bild 1: Der Pilotreaktor mit  $\mu$ Fuel-Design

## 4. $\mu$ Fuel-Verarbeitungsprozess

### 4.1. Feedstock-Aufbereitung

Der Konvertierung geht eine Materialvorbereitung voraus. Hier besteht die größte Feedstockabhängigkeit in der gesamten Prozessführung.

Die wesentlichen Schritte einer typischen Materialvorbereitung:

#### **Sortierung**

In vielen Fällen ist eine Vorsortierung allein deshalb sinnvoll, um nicht konvertierbare anorganisch-mineralische Anteile vorab zu entfernen. Beispiel Sand und Erdreich: Die Anlage kann kontaminierten Sand nach einer Tankerhavarie oder verseuchtes Erdreich genau wie natürlichen Teersand von Kohlenwasserstoffen und anderer Organik befreien. Hierbei werden allerdings zwangsläufig Erdreich und Sand durch die Anlage geschleust und sterilisiert. Aufheizen und Abkühlen der mineralischen Anteile verbraucht viel Energie, ohne ein kommerziell nutzbares Produkt zu liefern. Das Beispiel zeigt, die  $\mu$ Fuel-Anlage ist – fast – ein *Allesfresser*, auch wenn nur aus organischen Anteilen des Feedstock Öl, Kohle und Gas gewonnen werden kann.

#### **Trocknung**

Eine Vortrocknung, mindestens bis auf 10 % Masseanteil ist äußerst empfehlenswert, es sei denn man möchte die Anlage zum Wasserkochen verwenden.

#### **Zerkleinerung**

Es kommen eine Vielzahl an Zerkleinerungstechniken infrage, eventuell auch in Serie nacheinander. Die Bedingung ist ein Endprodukt mit einer Granularität und sonstigen Eigenschaften die für die anschließende Pelletierung geeignet sind.

#### **Pelletierung**

Die Pelletierbarkeit in Verbindung mit den notwendigen Zusatzstoffen muss sichergestellt sein. In bestimmten Fällen kann es notwendig sein, geeignete Zusätze als *Klebstoff* beizumischen. Ligninabfälle der Zellstoffindustrie sind hierfür gut geeignet. Eine Ausnahme bildet die Verarbeitung von Altrefien, hier kann auf eine Pelletierung grundsätzlich verzichtet werden.

Die folgende Grafik zeigt einen typischen Aufbau zur Materialvorbereitung für Biomasse. Häufig bietet es sich an, an dieser Stelle mit Zulieferern zu kooperieren die über große Pelletierkapazitäten und damit über einen deutlichen Kostenvorteil verfügen.

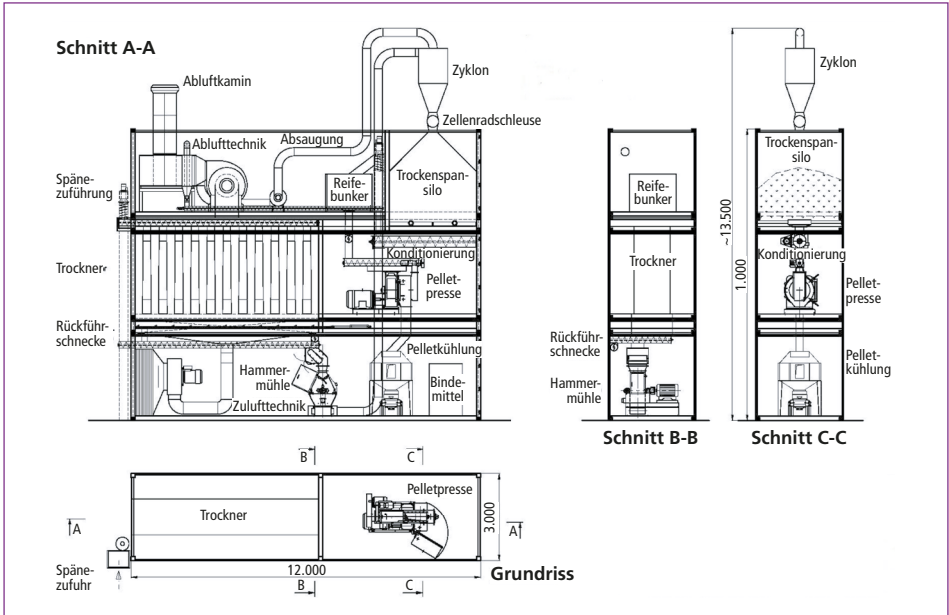


Bild 2: Materialvorbereitung in dreistöckiger Ausführung

## 4.2. Kernanlage

Der zentrale Teil der Anlage besteht aus einem horizontal rotierenden, kreisförmigen Flachbettreaktor mit 8 Segmenten. Die Rotationsgeschwindigkeit bestimmt die Verweilzeit der Reaktionsmasse unter MW-Bestrahlung.

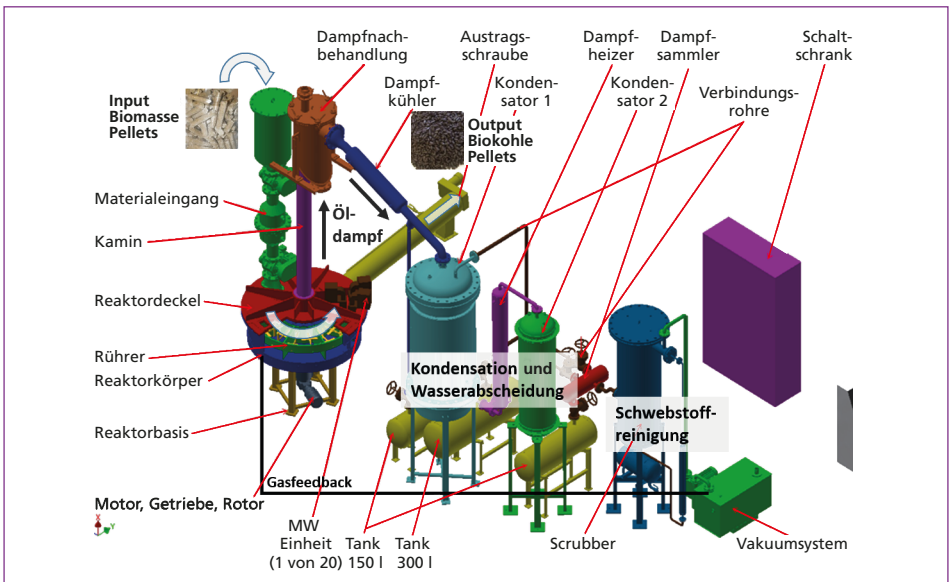


Bild 3: Prozessfluss der  $\mu$ Fuel-Technologie

Segment 1 dient der Befüllung, die Segmente 2 bis 7 der eigentlichen MW-Behandlung und das Segment 8 dem Kohleaustag.

Im Reaktorinnenraum herrscht eine inerte Atmosphäre zur Verhinderung von Selbstentzündung, Unterdruck unterstützt das kontinuierliche Entweichen der flüchtigen Reaktionsprodukte. Die Gasabsaugung erfolgt über einen zentralen Kamin mit direktem Übergang in Nachbehandlung und Reinigung des Gasstroms.

Im Anschluss folgt eine Kondensationsstrecke mit Wasser- und Gasabscheidung.

### 4.3. Prozessbeschreibung

Die aufbereiteten Pellets werden zunächst erwärmt. Die Wärme entstammt der Nutzung des Gasproduktes, entweder durch ein anlageninternes Blockheizkraftwerk (BHKW) oder einen einfachen Gasbrenner. In einer inerten Umgebung – Argon, Stickstoff, CO<sub>2</sub>, mit Feedbackmöglichkeit für einen Teil der Reaktionsgase – und bei Unterdruck wandern sie durch die Mikrowellenzone. Unter Kontrolle einer präzisen Temperatursteuerung entwickelt sich zunächst in den Pellets ein innerer Dampfdruck, der eine erste chemische Reaktionsphase induziert, die Pellets öffnet und als Wasserdampf entweicht.

Schon ab einer Oberflächentemperatur von 180 °C setzen die kombinierten Wirkeffekte von Mikrowellenbestrahlung, Katalysator und aktivierten Kohlenstoffzentren ein. Die hochkomplexen Kohlenwasserstoffmoleküle werden dabei noch innerhalb der Pellets in kleinere, beweglichere Moleküle aufgebrochen, wobei sie schlagartig verdampfen. Ein Großteil dieser Kohlenwasserstoffmoleküle liegt im Spektrum der chemischen Strukturen des üblichen Dieseltreibstoffs. Diese *gecrackten* Moleküle verlassen den Reaktor über den Kamin als ein *Öl-Dampf-Gemisch* das anschließend gereinigt, kondensiert und nachbehandelt wird.

Durch den im Pellet eingelagerten Katalysator wird ein Effekt erzielt, der wissenschaftlich oft als *in-situ Veredelung* bezeichnet wird. Die verdampfenden flüchtigen Kohlenwasserstoffe werden nicht direkt abgeführt, sondern zunächst durch nachgelagerte Reaktionen weiter veredelt, z.B. mit Wasserstoff gesättigt, bevor sie das Pellet in Richtung Reaktorkamin verlassen.

Das anschließend in der Kondensation entstehende flüssige Produkt kann durch petrochemische Verfahren wie Hydrogenierung so nachbehandelt werden, dass es den Anforderungen der Zielprodukte entspricht. Ein schwedisches Partnerunternehmen hat dies mit seiner proprietären Hydriertechnologie mehrfach überzeugend nachgewiesen. [1]

Der nach dem vollständigen Ausdampfen aller flüchtigen Substanzen im Reaktor verbleibende, nichtflüchtige Rest besteht nur noch aus Kohle mit geringen Einlagerungen des beigefügten Zeoliths sowie eventuellen mineralischen Bestandteilen (Asche) aus der Eingangsmasse. Dieses hoch-kalorische, sehr saubere Kohleprodukt bildet eine zweite Produktlinie des  $\mu$ Fuel-Prozesses mit vielfältigen Einsatzmöglichkeiten jenseits einer energetischen Verwendung.

## 4.4. Nachbehandlung der Produkte

Mögliche Nachbehandlungen der einzelnen Produkte, abhängig von beabsichtigter Verwendung und Qualität, werden primär durch die Feedstockqualität bestimmt.

### Öl

- Energetische Nutzung > Hydrierung, Entschwefelung
- Nutzung als chemischer Rohstoff > Reinigung, Separierung

### Kohle

- Direkte Nutzung [7]
- Rohstoff für Kohlechemie > *neue Werkstoffe*
- Aktivkohle > kontrolliertes Mahlen, eventuell weitere MW Behandlung
- Bodenzusatz > biologische Aktivierung

### Gas

- Direkte Verbrennung
- Wasser
- Osmotische Reinigung

## 5. Feedstock und Produkte

### 5.1. Feedstock-Produktmix

Trotz aller Flexibilität des Verfahrens gibt es technisch und wirtschaftlich begründete Präferenzen bei der sinnvollen Auswahl geeigneter Feedstocks und daraus erzeugter Produkte. Nicht alles, was mit der Technologie grundsätzlich machbar ist, wird in der überschaubaren Zukunft auch von den potentiellen Anwendern akzeptiert werden.

Der Rest dieses Beitrags soll daher im Rahmen einiger Beispiele erläutern, wo reale Umsetzungen entweder heute bereits im Gange sind oder aber nach Überzeugung des Autors in absehbarer Zeit in Gang kommen werden.

### 5.2. Verarbeitbare Feedstocks

Die Flexibilität des neu entwickelten Verfahrens in der Verarbeitung von unterschiedlichen Feedstocktypen ist einzigartig. Das Konstruktionsprinzip der Reaktoren ermöglicht nahezu unbegrenzte Möglichkeiten zur Mikrowellenbehandlung unterschiedlichster Materialien, auch solcher, die bei der Entwicklung der Technologie gar nicht im Fokus standen.

Der folgende Überblick listet nur solche Materialien auf, deren Verarbeitung dem Autor grundsätzlich sinnvoll erscheint und die im Laufe der Technologieentwicklung schon einmal untersucht bzw. getestet wurden. Aufgeteilt in vier Gruppen geht es fast ausschließlich um Abfälle oder Umweltprobleme.

In allen Fällen kann MWDP einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung oder Etablierung von Ressourcenkreisläufen leisten, meist unter Reduzierung der heute üblichen Emissionen. Wo heute vielfach eine Verbrennung mit bestenfalls geringem energetischen Nutzen als Ultima Ratio gilt, da kann MWDP eine echte, auch wirtschaftliche stoffliche Verwertung erreichen.

### **Biomasse und Bioabfälle**

- Energiepflanzen – nachhaltige Erzeugnisse aus der Forst- und Landwirtschaft;
- Algen und Wasserpflanzen
- Extrahiertes Lignin aus der Zellstoff- und Papierindustrie;
- Abfälle aus Holzgewinnung und -verarbeitung;
- Landwirtschaftliche Abfälle aus Feld- und Viehwirtschaft;
- Abfälle aus Lebensmittelindustrie und -handel – pflanzlich und tierisch;
- Feststoffe aus der Biogasfermentierung;
- Organische Fraktionen aus dem Siedlungsabfall;
- Tierische Fäkalien und Klärschlamm;

### **Kunststoffabfall**

- Kunststoffverpackungen (DSD);
- Industrielle Kunststoffabfälle;
- Kunststofffraktionen aus der Abfallsortierung – auch gemischt, Siebunterläufe;

### **Altreifen**

- PKW- und LKW-Reifen – auch ohne vorherige Entfernung von Metall oder textilen Bestandteilen verarbeitbar. Das Altmetall wird dabei aus der Kohle zurückgewonnen;
- Vollgummireifen;

### **Verschiedenes**

- giftige Abfälle – Zerstörung organischer Gifte;
- Recycling von Kohlefaserprodukten – Windräder;
- kontaminiertes Erdreich – Öl aus Leckagen, organische Altlasten;
- Teersande – natürlich oder aus Ölunfällen;
- Ölschiefer;

Im Feedstock enthaltene organische Substanzen fossilen oder biogenen Ursprungs werden in flüssiger und fester Form extrahiert und als Rohstoff oder Energieträger wieder nutzbar gemacht, Trägermaterial und Wasser werden gereinigt, brennbare Gase der internen Energieversorgung zugeführt. Organische Gifte werden unschädlich gemacht.

### 5.3. Konversionsprodukte

Wesentliche Parameter des Produktmix sind einerseits die Verteilung von Menge und Energie – Masse- und Energiebilanz des Prozesses. Diese Parameter variieren sehr stark. Die hauptsächlichen Determinanten hierfür sind Feedstockauswahl, Additive und Prozessbedingungen wie Temperaturverlauf und Verweilzeit. Der hier vorgestellte Prozess erlaubt die Beeinflussung und Steuerung aller ergebnisrelevanten Parameter in großer Bandbreite.

Organischer Feedstock besteht nahezu vollständig aus den chemischen Elementen C, H und O. Alle drei Elemente treten auch in den flüssigen und gasförmigen Produkten auf, während die Kohle vorwiegend aus C besteht. Hier ergibt sich ein grundlegender Unterschied zu unseren traditionellen Erdölprodukten, da Erdöl so gut wie kein O enthält, die typischen Produkte somit vorwiegend aus C und H bestehen. In bestimmten Fällen wird Dieseltreibstoff heute mit O angereichert, um eine sauberere Verbrennung zu erreichen. Biodiesel enthält 10 bis 12 % O, was zu niedrigeren Emissionen bei gleichzeitiger Leistungsverringerung um etwa 4 % führt.

Um das MWDP Öl in den Bereich des aktuellen Dieselstandards zu bringen genügt es, das Verhältnis C : H : O so zu verändern, dass sich der H-Anteil erhöht und der O-Anteil verringert. Dies lässt sich durch eine Hydrierung (= Zuführung von Wasserstoff) erreichen. Da hierbei ein Teil des zugeführten H mit O zu  $H_2O$  reagiert und abgeschieden wird, lässt sich die notwendige Verhältnisverschiebung in einem einzigen Prozessschritt erreichen, wobei gleichzeitig der Energieinhalt des Treibstoffs in seine Zielmenge angehoben wird.

#### 5.3.1. MWDP-Kohle

Die gewonnene Mikrowellenkohle verfügt über eine Reihe spezieller Eigenschaften. Sie erzeugt bei ihrer Verbrennung wesentlich weniger Schadstoffe als fossile Kohle. Sie ist dank ihrer sehr hohen Qualität auch als Aktiv-Kohle, als Rohstoff für Kohlefaser-Produkte und in vielen weiteren Anwendungen industriell verwendbar.

Handelt es sich beim Feedstock ausschließlich um Biomasse so ist die Kohle als Biokohle klassifiziert und kann als hochwertiger Bodenzusatz und -ergänzung direkt oder in Verbindung mit Kompostprodukten in der Land- und Gartenwirtschaft eingesetzt werden. Dies dient nicht nur der Bodenqualität, sondern speichert Kohlenstoff für tausende von Jahren im Boden und entzieht ihn damit der Atmosphäre – Carbon Sequestration.

### 5.3.2. Öl

Das flüssige Öl-Produkt ist zunächst, in erster Linie als Kraftstoff verwendbar, enthält jedoch hochwertige chemische Bestandteile, die kostengünstig daraus extrahiert und in der chemischen Industrie verwertet werden können. Laufende Forschungsarbeiten zu Bio- Raffinerie-Konzepten lassen vielversprechende neue Verwertungsmöglichkeiten erwarten.

Die derzeitigen Vermarktungsmöglichkeiten umfassen:

- Verkauf an Raffinerien als Rohstoff,
- Mischung mit herkömmlichen Dieselmotorkraftstoffen oder Kerosin,
- Stromerzeugung durch Generatoren als Möglichkeit der umweltfreundlichen Deckung von Spitzenlasten.

### 5.3.3. Nebenprodukte

Nebenprodukte der Konversion sind:

- Gas zur Befeuerung integrierter Energieerzeugung,
- aufbereitetes Wasser kann ins lokale Abwasser eingeleitet oder industriell genutzt werden – Fischzucht,
- Überschüssige Abwärme zur internen Nutzung – Feedstocktrocknung und Vorheizung – oder in nahegelegenen Industrieanlagen, angeschlossener Fischzucht u.v.m.

Im Vergleich zu ähnlichen Recyclingprozessen treten praktisch keine Emissionen auf. Nur falls sich im Feedstock problematische Inhalte befinden, können diese in meist reduzierter Form auch hier als flüssige oder feste (Sonder-)Abfallstoffe nicht ausgeschlossen werden und müssen einer entsprechenden Nachbehandlung zugeführt werden.

## 6. Die aktuellen Entwicklungen

MWDP in Verbindung mit dem kommerziellen Reaktordesign weist eine extrem große Bandbreite möglicher Einsatzprofile auf. Die Entwickler sind deshalb gezwungen, sich zunächst auf einige wenige reale Einsatzvarianten zu beschränken.

### 6.1. Aktuelle kommerzielle Projekte

#### 6.1.1. $\mu$ Soil – Ein Terra Preta Nova Produkt

Die drei aktuell am weitesten fortgeschrittenen Projekte beschäftigen sich mit der Herstellung eines Terra Preta Nova Produktes, genannt  $\mu$ Soil. Hierbei wird in Kooperation mit skandinavischen Pelletierunternehmen Holz aus nachhaltigem Anbau eingesetzt um hochwertige Biokohle zu erzeugen. Diese wird biologisch aktiviert und anschließend gemeinsam mit Agrarabfällen, Fermentierungsresten, grünem Haushaltsabfall



und Gülle aus der Massentierhaltung in einem patentierten Kompostierverfahren zu einer modernen Form des klassischen Terra Preta verarbeitet. Es entsteht ein hochwertiger organischer Dünger und Bodenverbesserer, der sowohl in Landwirtschaft und professionellem Landschafts- und Gartenbau als auch beim Hobbygärtner erstklassige Ergebnisse erzielt. Die Umwelt wird dabei zweifach entlastet:

- Kohlenstoff wird in der Erde eingelagert und so dem atmosphärischen Kreislauf entzogen und
- die Gülle aus der Massentierhaltung wird einer umweltfreundlichen Nutzung zugeführt ohne das Grundwasser zu belasten.

Das anfallende Bioöl wird von Spezialunternehmen zu einem vollwertigen Dieseleratz (HVO100) hydriert, ein Kraftstoff der es u.a. skandinavischen Landwirten und Transportunternehmen erlaubt, ihren Carbon Footprint bis auf NULL zu reduzieren. Laut aktueller Analysen ist auch der  $\text{NO}_x$  Ausstoß deutlich niedriger als bei herkömmlichen Treibstoffen.

### 6.1.2. Kunststoff-Verwertung

In einem weiteren Projekt soll die Technologie genutzt werden, um nicht recycelbare Kunststoffreste aus der Abfallsortierung zu verwerten, anstatt sie der Abfallverbrennungsanlage zuzuführen.

### 6.1.3. Klärschlamm-Verwertung

Ein letztes aktuelles Projekt beschäftigt sich mit der Verwertung von getrocknetem Klärschlamm der gegenwärtig ebenfalls meist in die Abfallverbrennung geht. Die erzeugte Kohle kann ebenfalls in den  $\mu\text{Soil}$  Prozess eingebracht werden, es stehen jedoch auch viele weitere Nutzungsmöglichkeiten zur Verfügung, z.B. auch als Filtermedium für Medikamentenreste in der Kläranlage selbst.

## 6.2. Forschung und Entwicklung

In vielen Bereichen haben die vorbereitenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Kooperation mit Wirtschaftsunternehmen und wissenschaftlichen Organisationen einen Status erreicht, der die direkte oder baldige Umsetzung in kommerziellen Projekten erlaubt. Hierzu gehören, um nur einige zu nennen, insbesondere die Verarbeitung von

- Altreifen,
- verschiedenen Kunststoffabfällen,
- Ölsänden und
- extrahiertem Lignin aus der Zellstoffindustrie.

## 7. Quellen

- [1] Aatola, H; Larmi, M.; Sarjovaara, T.: Helsinki University of Technology, Seppo Mikkonen. Neste Oil; Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NO<sub>x</sub>, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine. Copyright 2008 SAE International
- [2] Bayer, E.: Theorie und Praxis der Niedertemperaturkonvertierung zur Rezyklisierung von Abfällen; Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften Natur-, Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften Vortrag. N 413
- [3] Bionic Fuel Knowledge Partners Inc., Oswego NY, & Bionic Laboratories BLG GmbH, Groß-Gerau: The official Bionic  $\mu$ fuel Brochure 2014 – bionic  $\mu$ fuel – Catalytic Microwave Depolymerization (MWDP), 2014; <https://www.scribd.com/document/221575035/The-official-Bionic-%C2%B5fuel-Brochure-2014>, zuletzt abgerufen: 29.11.2017
- [4] Bionic Fuel Knowledge Partners Inc., Oswego NY: Bionic  $\mu$ oil – Arable Oil for Future Generations, 2014; <https://www.scribd.com/document/218639055/Bionic-%C2%B5oil-Arable-Soil-for-Future-Generations>, zuletzt abgerufen: 29.11.2017
- [5] Bionic Fuel Knowledge Partners Inc., Oswego NY: The bionic  $\mu$ Fuel conversion process used with lignocellulosic feedstock: Thermochemical depolymerization facilitated by a combination of catalytic and microwave induced physical and chemical pathways, 2014; <http://bionic-world.eu/index.php/en/download/send/2-presentations/2-lignocellulosiv-conversion-process>, zuletzt abgerufen: 29.11.2017
- [6] Fernández, Y; Arenillas, A; Ángel Menéndez, J.: Microwave Heating Applied to Pyrolysis. Instituto Nacional del Carbón (CSIC) Apartado 73, 33080 Oviedo Spain. *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials*, book edited by Stanisław Grundas, ISBN 978-953-307-522-8, Published: February 14, 2011 under CC BY-NC-SA 3.0 license.
- [7] Ithaka Journal 1/2012: 55 Anwendungen von Pflanzenkohle; S. 99-102 (2012); <http://ithaka-journal.net/druckversionen/162012-pflanzenkohle-anwendungen.pdf>, zuletzt abgerufen: 29.11.2017
- [8] Lanigan, B. A.: Microwave processing of lignocellulosic biomass for production of fuels. Submitted for the degree of Doctor of Philosophy University of York; Department of Chemistry, 2010 Schmidt HP
- [9] Menéndez, J. A.; Arenillas, A.; Fidalgo, B.; Fernández, Y.; Zubizarreta, L.; Calvo, E. G.; Bermúde, J. M.: Microwave heating processes involving carbon materials. Instituto Nacional del Carbón, CSIC, Apartado 73, 33080 Oviedo, S. Final version published in *Fuel Processing Technology*, 2010, 91 (1), 1-8
- [10] Ševčík, J.; Hlušík, P.; Raček, J.; Hlavínek, P.; Dvořák, K.: Microwave pyrolysis of sewage sludge. Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology. Veverí 331/95, 602 00 Brno, Czech Republic

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel • Elisabeth Thomé-Kozmiensky • Daniel Goldmann (Hrsg.):  
**Recycling und Rohstoffe** – Band 11

ISBN 978-3-944310-40-4 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2018

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,  
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Claudia Naumann-Deppe, Janin Burbott-Seidel, Sandra Peters,  
Ginette Teske, Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.