

TEXTE

77/2018

Evaluation neuer Entwicklungen bei alternativen thermischen Abfallbehandlungs- anlagen mit dem Schwerpunkt Verölungsverfahren

Abschlussbericht

TEXTE 77/2018

Projektnummer 82615

UBA-FB 002679

Evaluation neuer Entwicklungen bei alternativen thermischen Abfallbehandlungsanlagen mit dem Schwerpunkt Verölungsverfahren

von

Dr. Ing. Martin Pohl

ENVERUM - Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umweltverfahrenstechnik
mbH

Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker

Ingenieurbüro Qonversion

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

ENVERUM - Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umweltverfahrenstechnik
mbH
Hohe Str. 17
01069 Dresden

Ingenieurbüro Qonversion
Bamberger Straße 23 b
96173 Oberhaid

Abschlussdatum:

April 2018

Redaktion:

Fachgebiet III 2.4 Abfalltechnik, Abfalltechniktransfer
Markus Gleis

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, September 2018

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den
Autorinnen und Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einleitung und Aufgabenstellung	6
2 Vorgehen	7
2.1 Untersuchungsrahmen	7
2.2 Datenermittlung	7
3 Grundlagen	9
3.1 (Reifen-)Pyrolyse	9
3.2 Verölung	9
4 Verfahren auf dem Markt	11
4.1 Verfahren zur Reifenpyrolyse	11
4.2 Verölungsverfahren	12
5 Betrachtung ausgewählter Verfahren	13
5.1 Dieselwest	13
5.1.1 Verfahrensbeschreibung	14
5.1.2 Produktqualität	20
5.1.3 Betriebserfahrungen	22
5.1.4 Massen und Energiebilanz	24
5.1.5 Gesamtbewertung und Fazit	25
5.2 Logoil	26
5.2.1 Verfahrensbeschreibung	27
5.2.2 Produktqualität	29
5.2.3 Betriebserfahrungen	30
5.2.4 Massen und Energiebilanz	31
5.2.5 Gesamtbewertung und Fazit	32
5.3 Pyrum	33
5.3.1.1 Verfahrensbeschreibung	34
5.3.2 Produktqualität	37
5.3.2.1 Koks	37
5.3.2.2 Pyrolyseöl	39
5.3.2.3 Pyrolysegas	40
5.3.3 Betriebserfahrungen	41
5.3.4 Massenbilanz	44
5.3.5 Gesamtbewertung und Fazit	44
6 Fazit und Ausblick	46
Quellenverzeichnis	48
Abbildungsverzeichnis	50
Tabellenverzeichnis	51

Abkürzungsverzeichnis

CFPP	Cold Filter Plugging Point (Filtrierbarkeitsgrenze)
CTC	Catalytische Tribochemische Conversion
EBS	Ersatzbrennstoffe
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
IBC	Intermediate Bulk Container
KDV	Katalytische Drucklose Verölung
n.a.	nicht analysiert
n.b.	nicht bestimmt
n.e.	nicht erreicht
pKDV	pyrolysefreie Katalytische Drucklose Verölung
PAK	polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
REM	Rasterelektronenmikroskop
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Stand der Technik bei der thermischen Behandlung von Restabfällen ist die Verbrennung: Vollständige Inertisierung der Rückstände, weitgehende Zerstörung organischer Schadstoffe, Aufkonzentration der Schwermetalle und verbleibender organischer Bestandteile zur sicheren Ablagerung, das sind die Vorzüge der Müllverbrennung. Darüber hinaus werden Metalle recycelt und die frei werdende Energie als Strom, Wärme und Dampf verwertet.

Dennoch existieren schon seit langer Zeit Ansätze, mit alternativen thermischen Verfahren als Konkurrenz zur Verbrennung bzw. zur stofflichen Verwertung, ähnliche bzw. noch größere ökologische Vorteile bei der Abfallbehandlung zu erreichen. Früher waren dies die Pyrolyse- und Vergasungsverfahren, welche sich im Markt der Restabfallbehandlung etablieren sollten, was bis heute jedoch nicht geschehen ist.

Heute werden vermehrt Verfahren auf den Markt gebracht, die die Umsetzung von getrennt gesammelten bzw. speziell aufbereiteten Abfallfraktionen zum Ziel haben, wie z.B. Verölungsverfahren zur Behandlung von Kunststoffabfällen oder Pyrolyseverfahren zur Behandlung von Altreifen. Dabei sollen Produkte erzeugt werden, die stofflich oder energetisch in höherwertigeren Folgeprozessen eingesetzt werden können.

Derartige Verfahrensansätze erfüllen konzeptionell die Grundsätze der europäischen Abfallgesetzgebung und -politik (vgl. z.B. Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft [12]) und stoßen daher sowohl bei öffentlichen Institutionen als auch bei privaten Investoren auf Interesse. Allerdings sind für viele dieser Verfahrensansätze kaum transparente Daten verfügbar, die eine seriöse Einschätzung des Entwicklungsstandes und der technischen Reife ermöglichen würden. Noch viel weniger können folglich Aussagen zur Umwelt- und Ressourcenrelevanz dieser Verfahren getroffen werden.

Vor diesem Hintergrund hat das Umweltbundesamt das Sachverständigengutachten *Evaluation neuer Entwicklungen bei alternativen thermischen Abfallbehandlungsanlagen mit dem Schwerpunkt Verölungsverfahren* ausgeschrieben und beauftragt.

Im Gutachten wird ein kurzer Überblick der aktuell angebotenen bzw. betriebenen Verfahren in Deutschland gegeben. Außerdem wurde untersucht, inwieweit diese Verfahren zur Erzeugung von Sekundärressourcen geeignet sind und welche Abfälle (Art und Menge) hierbei zum Einsatz kommen können. Dabei wurden drei Verfahren im Detail betrachtet, mit Schwerpunkt auf Prozessen, die stofflich verwertbare Produkte aus spezifischen Abfallfraktionen, wie getrennt erfassten Kunststoffabfallfraktionen oder Altreifen, adressieren. In Absprache mit dem Umweltbundesamt wurden hierfür die folgenden Prozesse ausgewählt:

- ▶ Dieselwest (Verölung)
- ▶ Logoil (Verölung)
- ▶ Pyrum (Reifen-Pyrolyse)

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde abgeschätzt, ob die Verfahren künftig für die Abfallbehandlung von Bedeutung sein könnten und welche Schritte für eine mögliche Umsetzung erforderlich sind.

2 Vorgehen

2.1 Untersuchungsrahmen

Als alternative thermische Abfallbehandlungsverfahren werden die im folgenden aufgelisteten Ansätze bzw. Prozesskonzepte bezeichnet:

- ▶ Vergasung
- ▶ Pyrolyse
- ▶ Plasmaverfahren
- ▶ Verölungsverfahren

Verfahren zur Abfallpyrolyse und -vergasung wurden zwischen den 1970er und 1990er Jahren in Deutschland intensiv untersucht. Neben Pilot- und Technikumsanlagen wurden auch mehrere großtechnische Anlagen errichtet und zum Teil betrieben. Letztlich zeigte sich, dass diese Verfahren für die Behandlung von Restabfällen ungeeignet sind und unter den herrschenden Rahmenbedingungen nicht wirtschaftlich betrieben werden können. Die Produkte waren von minderer Qualität und die Prozesse von vielen, zum Teil gravierenden technischen Schwierigkeiten geprägt (vgl. auch [26]). Auch Plasmaverfahren konnten bisher den Nachweis der Funktionalität für den Einsatz von Restabfällen im großtechnischen Maßstab nicht erbringen.

Während die alternativen Verfahren für die Behandlung von Restabfällen also ungeeignet sind, könnte die Behandlung von Polymeren (z.B. Kunststoff- oder Verpackungsabfälle, Altreifen etc.) eine interessante Option zur stofflichen Verwertung darstellen. Durch Depolymerisationsvorgänge wäre die Rückgewinnung von Monomeren denkbar, die wieder im Produktkreislauf eingesetzt werden könnten. Solche Prozesse könnten – bei erfolgreicher Umsetzung der Technik – zur Erfüllung der stetig steigenden stofflichen Verwertungsquoten beitragen, wenn eine direkte werkstoffliche Weiternutzung der Reststoffe aus qualitativen Gründen nicht mehr möglich ist.

In diesem Zusammenhang besonders im Fokus stehen Verfahren zur Kunststoffverölung und zu Reifenpyrolyse. Diese beiden Ansätze wurden und werden in den letzten Jahren von verschiedenen Akteuren im Markt propagiert und mit dem Ziel weiterentwickelt, die Konzepte in den technischen Maßstab zu überführen. Obwohl einige Pilotanlagen existieren, steht bisher ein wissenschaftlich belegbarer Nachweis der ökologischen Vorteile, der Wirtschaftlichkeit und auch der Funktionalität dieser Verfahren aus.

Hier setzt die vorliegende Studie an. Aus den am Markt agierenden Anbietern wurden in Absprache mit dem Auftraggeber drei ausgewählt und einer näheren Betrachtung unterzogen.

2.2 Datenermittlung

Die Ermittlung aussagekräftiger Daten zur Bewertung der Verfahren stellt sich als grundsätzlich schwierig dar. Dies hat verschiedene Gründe. Zum einen sind dies Betreiberbedenken hinsichtlich der Geheimhaltung, zum anderen sind die Verfahren (insbesondere die Verölungsanlagen) aufgrund des Prozesskonzeptes teilweise so komplex aufgebaut, dass eine transparente Bewertung schwerfällt. Zudem werden die Verfahren meist nur kampagnenweise betrieben, so dass ein stationärer Betriebszustand kaum erreicht wird und Langzeiteffekte nicht ermittelt werden können.

Zur Evaluierung der Anlagenfunktionalität wurden bei den ausgewählten drei Verfahren Anlagenbegehungen durchgeführt. Dabei wurden die Anlagentechnik begutachtet, mögliche Schwachpunkte mit den Betreibern diskutiert und die für die Bewertung notwendigen Daten identifiziert.

Alle für die vorliegende Studie verwendeten Unterlagen und Daten wurden von den Betreibern zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Pläne, Skizzen und Zeichnungen der

Anlagen, Versuchs- bzw. Betriebsbeschreibungen, Messdaten aus den Betriebsprotokollen und der jeweiligen SPS sowie Analysenergebnisse für die gewonnenen Produkte.

Auf Basis dieser Unterlagen wurden, soweit möglich, Massen- und Energiebilanzen der Prozesse aufgestellt und diese anschließend bewertet. Weiterhin erfolgte eine Einschätzung der Produktqualität durch Vergleich von Produktanalysen (insbesondere von den Ölen bzw. dem Carbon Black beim Reifenpyrolyseverfahren), mit entsprechenden Primärprodukten bzw. den relevanten Normen und Richtlinien.

Ein weiterer Punkt der Bewertung war die Identifikation möglicher technischer Schwachstellen, die in einem Dauerbetrieb zu Funktionsschwierigkeiten und damit zur Beeinträchtigung des Anlagenbetriebs bzw. zur Erhöhung der Betriebskosten führen könnten.

3 Grundlagen

Aktuell am Markt angebotene Verfahren zur Gewinnung von Ölen, also flüssigen Kohlenwasserstoffen, aus Abfallstoffen, basieren entweder auf der pyrolytischen Zersetzung der Einsatzstoffe, oder deren direkter Verflüssigung in öliger Phase. In den folgenden beiden Unterkapiteln werden kurz die Grundlagen dieser thermochemischen Prozesse erläutert.

3.1 (Reifen-)Pyrolyse

Pyrolyse ist der Begriff für die Zersetzung organischer Substanzen unter Wärmeeinwirkung in Abwesenheit jedweder Reaktionspartner, wie zum Beispiel Sauerstoff. Durch die Wärmezufuhr werden flüchtige Bestandteile in die Gasphase überführt, als Feststoff verbleibt der fixe Kohlenstoff mit der Asche. Ein Teil der ausgetriebenen Komponenten ist kondensierbar, also bei Raumtemperatur flüssig. Bei der Kondensation entstehen (mindestens) zwei Phasen: eine wässrige – neben Wasser mit weiteren Bestandteilen wie Methanol, Acetaldehyd, Aceton, Ameisen- oder Essigsäure [39] – und eine ölige, mit vorwiegend aromatischem Charakter und den Hauptkomponenten Naphtalin und Benzol sowie höheren Ringsystemen, wie Anthracen, Phenantren und Pyren [35][38]. Das verbleibende Permanentgas besteht aus CO₂, CO, Wasserstoff, Methan sowie Ethan und Ethen.

Für die (quantitative) Zusammensetzung des Produktspektrums sind die Pyrolysetemperatur, die Aufheizgeschwindigkeit sowie die Geschwindigkeit der Produktgasabkühlung und die Verweilzeit ausschlaggebend.

Die Anwendung der Pyrolysetechnologie im Reifenrecycling, zur Rückgewinnung der eingesetzten Rohstoffe wird bereits seit den 1970er Jahren untersucht und erprobt [6][30]. Seither wurden von vielen Forschergruppen und Firmen unterschiedliche Ansätze, Reaktortypen und Betriebsbedingungen erprobt. Es kamen Retorten, Festbett-, Wirbelschicht-, Schnecken- und Vakuumreaktoren sowie Drehrohre zum Einsatz. Im Labormaßstab wurden auch thermogravimetrische Untersuchungen durchgeführt. Dabei standen die optimalen Reaktorkonfigurationen und Reaktionsbedingungen (insbesondere die Pyrolysetemperaturen, im Bereich von 300-800 °C), die Ausbeute der verschiedenen Produkte, kinetische Ansätze und Konzeptstudien mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen im Fokus. [3][6]

Vermarktbar Produkte aus der Reifenpyrolyse sind Carbon Black, das für eine stoffliche Verwertung als Pigment geeignet ist, und ein flüssiges Pyrolyseöl, das für energetische Zwecke eingesetzt werden kann. Weiterhin verbleibt ein nicht kondensierbares Gas, das in der Regel zur Beheizung des Prozesses genutzt werden kann. Mit 40-60 % stellen die Flüssigkeiten den größten Produktstrom dar, gefolgt vom Carbon Black mit 30-40 %, wobei zu beachten ist, dass hierin auch der Ascheanteil enthalten ist, der in der Regel einen Anteil von bis zu 20 Ma.-% im festen Produkt ausmacht. Der Anteil des Permanentgases liegt bei 5-20 Ma.-%. [18]

In den letzten zehn Jahren ist die Technologie der Reifenpyrolyse wieder in den Fokus gerückt. Inzwischen existieren einige industrielle Anlagen, die Mehrzahl auf Basis der Drehrohrtechnologie, die – laut Betreiberangaben – unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen Altreifen in die vermarktbar Produkte Carbon Black und Pyrolyseöl umsetzen können (vgl. Kapitel 4.1).

3.2 Verölung

Bei der direkten Verölung spielt die chemische Zusammensetzung der Abfallfraktionen eine wesentliche Rolle. Da das angestrebte Produkt aus flüssigen Kohlenwasserstoffen besteht, die wiederum nur Kohlenstoff- und Wasserstoffatome enthalten, sind Inputmaterialien mit ähnlicher Zusammensetzung für diese Prozesse besonders geeignet. Somit eignen sich Kunststofffraktionen, insbesondere solche ohne Heteroatome (Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel, Chlor) für den Einsatz in Verölungsprozess. Auf der anderen Seite sind beispielsweise Biomassen, die neben Stickstoff und Schwefel insbesondere sehr

viel Sauerstoff enthalten, keine optimalen Einsatzstoffe für diese Prozesse. Die Anwesenheit von Stickstoff, Schwefel oder Chlor im Einsatzstoff, wird auch zu einer entsprechenden Konzentration im Produktöl führen. Polyolefine, wie Polypropylen oder Polyethylen, können durch thermische Spaltung direkt in entsprechend kurzkettige Olefine und Paraffine gespalten werden. Höhere Temperaturen (> 600 °C) sowie kurze Verweilzeiten führen zur bevorzugten Bildung von kurzkettigen Kohlenwasserstoffen, länger-kettige Kohlenwasserstoffe bilden sich bei niedrigeren Temperaturen (ca. 400 °C) und längeren Verweilzeiten. Ohne ausreichende Sättigung mit Wasserstoff zeigen die Olefine eine Neigung zur Polymerisation und sind entsprechend instabil. [13]

Einige Technologien postulieren den Einsatz von Katalysatoren, um Produktöle mit hoher Produktqualität erzeugen zu können. Wissenschaftliche Untersuchungen hierzu konnten einen katalytischen Effekt bisher nicht bestätigen. [4]

Selbst beim Einsatz hochwertiger, also kunststoffreicher Fraktionen, werden die erzeugten Produktöle keine Kraftstoffqualität besitzen. Um die entsprechenden Normen einzuhalten – für Dieselkraftstoffe DIN EN 590, für Ottokraftstoffe DIN EN 228 – ist in jedem Fall eine weitere Aufbereitung erforderlich. Ein direkter Einsatz der erzeugten Öle in konventionellen (petro-)chemischen Anlagen, wie Raffinerien, Oxidations- oder Reforming-Anlagen, scheint bei Verwendung entsprechender Einsatzstoffe dagegen möglich.

Zur direkten Verölung existieren verschiedene Routen bzw. Verfahrensansätze, die sich in folgende Prinzipien einteilen lassen:

- ▶ Depolymerisation
- ▶ Hydrierung unter Druck
- ▶ Solvolyse

Alle genannten Verfahren werden in der flüssigen Phase durchgeführt. Dies erlaubt eine gute Mischbarkeit, ein schnelles Aufheizen der Inputmaterialien und eine konstante Temperaturführung.

Depolymerisation beschreibt die thermische Zersetzung der Inputmaterialien in einem vorgelegten „Anfahröl“. Die Verfahren nach diesem Prinzip werden zwischen 250 und 420 °C und meist bei geringen Unterdrücken betrieben. Die meisten aktuell auf dem Markt als Direktverölungsverfahren angebotenen Prozesse arbeiten nach dem Prinzip der Depolymerisation.

Bei der Druckhydrierung werden unter Wasserstoffatmosphäre vorwiegend gesättigte Produkte mit wenigen Heteroatomen erzeugt. Die Druckhydrierung, die schon von Bergius zur Kohleverflüssigung vorgeschlagen wurde, arbeitet bei Temperaturen zwischen 300 und 450 °C und Drücken von 100 bis zu mehreren hundert bar. Durch den Einsatz von Wasserstoff als Hydrierungsmittel werden mit hohem Aufwand relativ gute Produktqualitäten erreicht.

Während der Solvolyse nimmt das Lösungsmittel an der Reaktion teil. Es werden organische Verbindungen (z.B. Öle, Wasser-Phenol, Ethylen-Glykol) und/oder Wasser als Lösungsmittel verwendet. Die Temperaturen liegen zwischen 300 und 450 °C und die Prozessdrücke bei bis zu 200 bar. [4][36]

4 Verfahren auf dem Markt

Verfahren zur Direktverölung von Kunststoffen und zur pyrolytischen Verwertung von Altreifen im industriellen Dauerbetrieb existieren derzeit in Deutschland nicht¹. Es gibt allerdings eine ganze Reihe von Anbietern, die über Technikums- oder Pilotanlagen verfügen und versuchen diese Technik zu kommerzialisieren.

4.1 Verfahren zur Reifenpyrolyse

Die ersten Ansätze zur Pyrolyse von Altreifen, um daraus verwertbare Öle, aber auch Carbon Black zu gewinnen, gehen bis in die siebziger Jahre zurück. Im Folgenden sind die den Autoren bekannten Firmen bzw. Standorte aufgelistet, die zumindest über halbtechnische Anlagen verfügen:

► **TPL GmbH**

Von der TPL GmbH wurde am Standort Hoyerswerda eine Reifenpyrolyseanlage auf Basis der Drehrohrtechnologie entwickelt. Die Drehrohre wurden von einem chinesischen Hersteller bezogen, der vorher bereits andere Anlagen errichtet hatte.

► **Reoil Sp. z o.o.**

Auf Basis der Erfahrungen in Hoyerswerda wurde in Bukowno, Polen (Nähe Krakau) eine weitere Anlage mit vergleichbarem Konzept errichtet. Die Anlage verfügt über 2 Linien und ist mit Aufbereitungsstufen für das erzeugte Carbon Black ausgestattet. Nach Angaben der Betreiber arbeitet die Anlage seit einigen Jahren mit hoher Verfügbarkeit und die Produktqualität ist ausreichend gut, um einen vollständigen industriellen Absatz zu gewährleisten.

► **Pyrolyx AG**

Die Firma Pyrolyx hat ihren Sitz in München und betreibt eine Reifenpyrolyseanlage in Steglitz. Auch bei diesem Prozess liegt der Fokus auf der Gewinnung von Carbon Black. Die Firma firmierte früher unter dem Namen Scutum und fusionierte im Jahr 2015 mit der Firma CCT Steglitz. Pyrolyx hält mehrere Patente im Zusammenhang mit eigenen Pyrolyseprozess, die allerdings sehr allgemein gehalten sind und keine tieferen technischen Details enthalten. [10][11]

Es existieren verschiedene Berichte über großtechnischen Anlagen, insbesondere in den USA. Ein Projekt für den Standort Halle wurde im Jahr 2012 gestoppt. Detaillierte technische Angaben zur Pyrolyseanlage in Steglitz sind nicht verfügbar. Es ist zu vermuten, dass es sich dabei um einen diskontinuierlichen Betrieb von Batchreaktoren handelt. [1][16]

► **DRON Industries s.r.o.**

Im slowakischen Dunajská Streda, in der Nähe von Bratislava, wird von der Firma DRON Industries eine Anlage betrieben, bei der ein Schneckenreaktor (450-650 °C Pyrolysetemperatur) mit einer Kapazität von 2 Mg/h zum Einsatz kommt.

► **SIRIUS Eco Tec GmbH**

Die Firma SIRIUS Eco Tec, mit Sitz in Österreich, bietet Reifenpyrolyseanlagen auf Drehrohrbasis an. Laut Angaben des Herstellers wurde eine erste Anlage im Kosovo errichtet. Allerdings

¹ Pyrolyseverfahren zur Verwertung von Altreifen werden im Ausland bereits industriell betrieben

sind keine Informationen verfügbar, ob sich die Anlage bereits im Betrieb befindet. Vorgesehener Inbetriebnahmezeitpunkt war 2016.

► **Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd**

Der chinesische Anlagenbauer Huayin Energy bietet einen Reifenpyrolyseprozess im Drehrohr, mit einem Durchsatz von 3-10 Mg/h, an. Auf der Internetseite des Anbieters werden Referenzen in Asien, Afrika, Australien, aber auch mehrere Anlagen in Europa aufgeführt.

► **Pyrum Innovations AG**

Die Firma Pyrum betreibt im saarländischen Dillingen eine Pilotanlage im technischen Maßstab zur Reifenpyrolyse. Das Verfahren wird im Rahmen dieser Studie detailliert dargestellt und diskutiert, nähere Informationen finden sich in Kapitel 5.3.

4.2 Verölungsverfahren

Die in Deutschland aktiven Anbieter von Verölungsverfahren zielen auf die Erzeugung von flüssigen Energieträgern und Chemiegrundstoffen oder, nach Aufbereitung der erzeugten Produkte aus der Verölung, auf die Produktion von Treibstoffen. Aktuell sind folgende Anbieter in Deutschland aktiv:

► **Dieselwest GmbH**

Die Firma Dieselwest hat ihren Sitz im westfälischen Ennigerloh und betreibt am Standort eine halbtechnische Verölungsanlage. Das Verfahren wird in Kapitel 5.1 detailliert betrachtet.

► **Logmed Cooperation GmbH**

Die Firma mit Sitz in Halle an der Saale vertreibt, neben anderen Abfallbehandlungstechnologien, wie z.B. Sterilisatoren für Krankenhausabfälle, eine Technologie zur Verölung unter dem Markennamen Logoil. Das Verfahren wird in Abschnitt 5.2 detailliert betrachtet.

► **Alphakat GmbH**

Die Firma Alphakat, mit dem Firmengründer und Inhaber Dr. Christian Koch, vertreibt ihren Verölungsprozess unter dem Markennamen „Katalytische Drucklose Verölung, KDV“. Alphakat verwendet turbinenähnliche Rühraggregate, um im Ölbad bei Temperaturen unter 250 °C (laut Homepage; es existieren auch andere Angaben in der Literatur) eine katalytische Konversion diverser Einsatzstoffe (laut eigenen Angaben neben Kunststoffen auch Pflanzen und Pflanzenreste, Braunkohle etc.) in „hochqualitatives Dieselöl“ (Zitat Homepage, aus dem Englischen übersetzt) zu überführen. [2].

► **Clyvia Technology GmbH**

Das Verfahren der Firma Clyvia Technology in Wegberg-Wildenrath arbeitet laut Herstellerangaben nach dem Prinzip der „fraktionierten Depolymerisation“ bei Temperaturen von 380-420 °C und unter leichtem Unterdruck. Einsatzmaterial sind sortenreine Kunststoffe. [37]

Inwieweit die Firma aktuell noch am Markt aktiv ist, ist nicht bekannt. Der Internetauftritt lässt in den letzten Jahren keine Aktivitäten erkennen. [9]

► **Nill-Tech GmbH**

Die nach dem Firmengründer und Inhaber benannte Nill-Tech GmbH (Holzgerlingen) offeriert ein Verölungsverfahren mit dem Markennamen Syntrol, das ohne Katalysatoren, bei geringen Überdruck und 400 °C in einer Kaskade von drei Rührkesselreaktoren durchgeführt wird [34]. Die Technologie ist patentgeschützt und wurde in der Schweiz (Sihlbrugg) im technischen Maßstab durch die Firma Plastoil umgesetzt. Ob die Anlage noch betrieben wird ist nicht bekannt.

5 Betrachtung ausgewählter Verfahren

In Absprache mit dem Umweltbundesamt erfolgte die vertiefte Betrachtung der Verölungsverfahren an den Beispielen der Prozesse von Dieselwest und Logoil. Unter den Reifen-Pyrolyseverfahren wurde der innovative Ansatz von Pyrum näher untersucht. Die folgenden Abschnitte beinhalten eine detaillierte Beschreibung der drei Verfahren, Angaben zu den Massen- und Energiebilanzen (soweit möglich), die Diskussion der erzielbaren Produktqualitäten sowie eine Einschätzung der technologischen Reife und Umsetzungschancen.

5.1 Dieselwest

Dieselwest ist der Name der Betreibergesellschaft für die Pilot-Verölungsanlage des Verfahrensgebers Recenso in Ennigerloh. Der Ansatz basiert auf dem Alphakat-Verfahren (vgl. Kap. 4.2) und wurde im Vergleich zu diesem in verschiedenen Bereichen modifiziert. Es handelt sich laut Betreiber um ein heterogen katalysiertes Verfahren zur tribochemischen Depolymerisation. Weiterhin verwendete Bezeichnungen für den Prozess sind „(pyrolysefreie) Katalytisch Drucklose Verölung“ (pKDV, bzw. nur KDV) oder „Catalytische Tribochemische Conversion“ (CTC) [27].

Eine erste Anlage nach dem Prinzip wurde von der Firma Recenso zwischen 2007 und 2012 in Barrie (Kanada) mit Materialien aus dem Elektro- und Elektronikschrott-Recycling betrieben (vgl. Abbildung 5-2) [28]. Laut Betreiberaussage wurde diese Anlage nach einem Eigentümerwechsel außer Betrieb gesetzt, da sich signifikante Änderungen in der Qualität des Einsatzmaterials ergaben, die größere Umbauten an der Anlage erforderlich gemacht hätten. Im Jahr 2012 wurde dann die Dieselwest-Anlage in Ennigerloh in Betrieb genommen (Abbildung 5-1). Seitdem werden dort kampagnenweise Tests mit verschiedenen Einsatzmaterialien im Versuchsbetrieb durchgeführt.

Abbildung 5-1: Pilotanlage der Recenso GmbH am Standort Ennigerloh



Quelle: Recenso GmbH

Abbildung 5-2: Pilotanlage Nanofuel der Recenso GmbH am Barrie, Kanada



Quelle: Recenso GmbH

5.1.1 Verfahrensbeschreibung

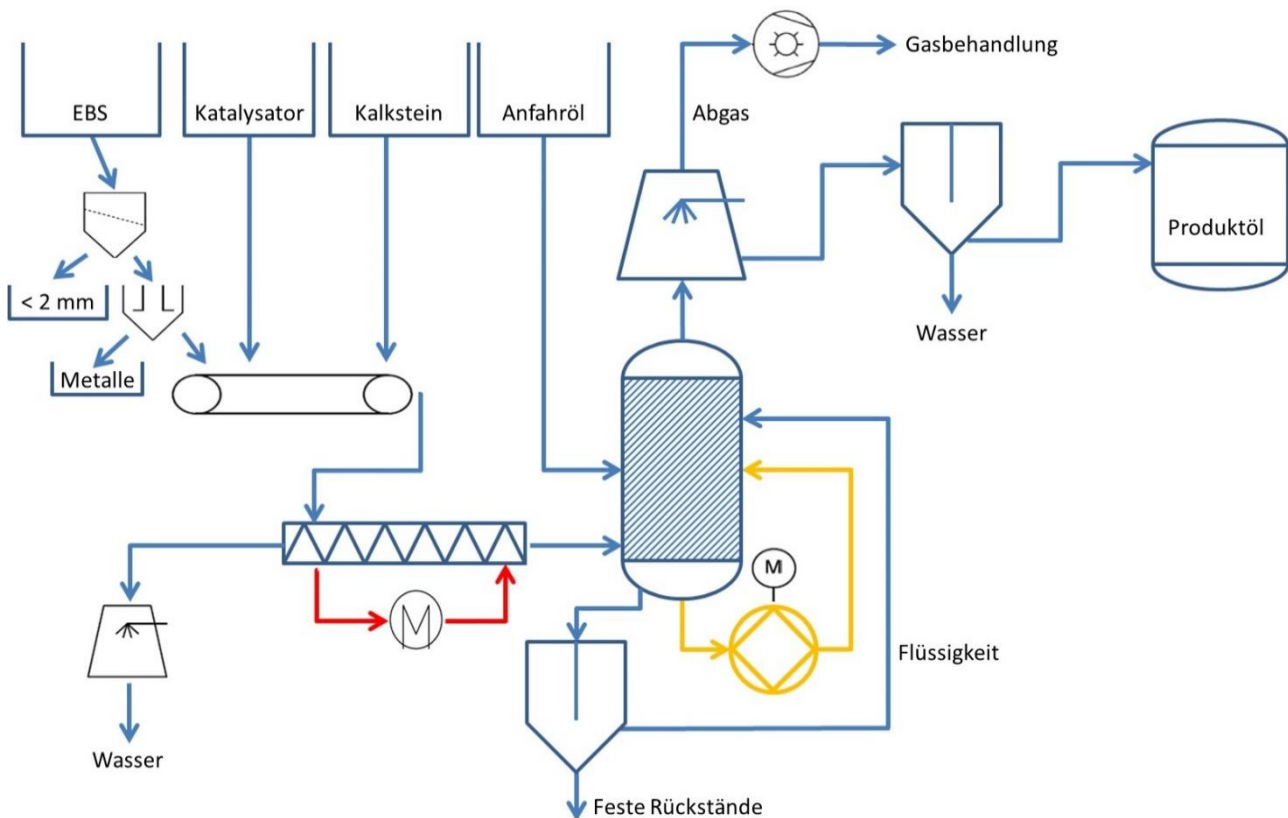
Die Dieselwest-Anlage in Enigerloh wurde für die Behandlung von Ersatzbrennstoffen aus Restabfällen konzipiert. Laut Betreiber können auch Kunststoffe und unterschiedliche Biomassefraktionen eingesetzt werden. Ein grobes Übersichtsschema der Anlage zeigt Abbildung 5-3, eine Schnittzeichnung ist in Abbildung 5-6 dargestellt.

Die Einsatzstoffe müssen hohen Qualitätsstandards entsprechen, da die Anlagentechnik – und hierbei insbesondere die Pumpen zur Umwälzung des Reaktorinhaltes, die vom Betreiber als Energieeintragsaggregate oder Turbinen bezeichnet werden – als sensibel und störanfällig hinsichtlich Fremdstoffen einzustufen ist. Dies macht eine intensive Vorbehandlung der notwendig. Die Einsatzstoffe (die Anlage ist für EBS ausgelegt, weitere Beispiele sind in Abbildung 5-5 dargestellt) werden daher am Standort einer mehrstufigen Aufbereitungsanlage (Abbildung 5-4) zugeführt.

Das Material wird nach der Anlieferung zunächst in einem Zwischenbunker gelagert und von dort mit Förderbändern (Knickbandförderer) einem Schwingwellensieb zugeführt. Das Sieb wird mit einem Unwuchtmotor angetrieben und ist mit einem Siebbelag der Maschenweite 2 mm ausgestattet. Bestandteile kleinerer Korngröße (vorwiegend Steine, Sande, sonst. Mineralien) sollen dort vom Einsatzgut getrennt werden.

Nächster Aufbereitungsschritt ist die Abtrennung der noch enthaltenen Eisen- und Nichteisenmetalle. Hierzu durchläuft das Material zunächst eine Magnettrommel zur Abscheidung der FE-Metalle und anschließend einen Wirbelstromscheider für die Entfernung der NE-Metalle.

Abbildung 5-3: Verfahrensschema der Dieselwest-Pilotanlage, Ennigerloh



Quelle: Recenso GmbH

Im Anschluss an die Metallabtrennung werden dem Eduktstrom die laut Betreiber erforderlichen Additive zugesetzt. Einerseits handelt es sich dabei um synthetische oder natürliche Zeolithe, welche die Konversion unterstützen, also die Funktion eines Katalysators übernehmen sollen. Es wird eine spezifische Menge von etwa 20 kg Katalysator pro Tonne Einsatzstoff (2 Ma-%) dosiert. Als weiteres Additiv wird ein vom Betreiber so genannter Neutralisator verwendet (ebenfalls 2 Ma-%), der hauptsächlich aus Brandkalk besteht und die Aufgabe hat, den pH-Wert in der Anlage zu stabilisieren. Dies sei vor allem dann notwendig wenn das eingesetzte Material größere Mengen Chlor oder Fluor enthält.

Abbildung 5-4: Brennstoffvorbehandlung in der Dieselwest-Pilotanlage, Ennigerloh. Links: Mechanische Aufbereitung mit Schwingwellensieb und Metallabscheidung (NE und Fe); Rechts beheizte Schnecken in Kaskadenschaltung zur Eduktvortrocknung



Quelle: Recenso GmbH und eigene Aufnahme

Die früher noch übliche Zugabe von Eisenoxid zur Schwefelbindung (vgl. [26]) wird aktuell nicht mehr praktiziert. Die Dosierung der Additive erfolgt durch direktes maschinelles Aufstreuen auf das laufende Förderband und wird über Wägezellen an den Lagergefäßen gesteuert.

Letzter Schritt vor der Zuführung des Materials in die eigentliche Verölungsanlage ist eine Trocknung, bei der der Wassergehalt der Einsatzstoffe von etwa 10-15 % auf weniger als 2 % reduziert wird. Dies erfolgt in drei, kaskadiert ausgeführten Heizschnecken (vgl. Abbildung 5-4, rechts). Die Schneckengehäuse sind mit einem Doppelmantel versehen und können über diesen mit Thermalöl auf 100-200 °C beheizt werden. Die Wandtemperatur ist dabei individuell auf jedes Edukt einzustellen, um ein Verkleben durch zu hohe Temperaturen zu vermeiden.

Die bei der Trocknung entstehenden Brüden werden in einem Wäscher kondensiert (Abbildung 5-6, Ebene B) und müssen einer entsprechenden Abwasserbehandlung zugeführt werden. Neben der Trocknung wird durch die Schnecken eine Vorheizung des Materials auf etwa 100 °C erreicht und damit der durch die Turbinen erforderliche Energieeintrag reduziert. Dritte Aufgabe der Schnecken ist die Kompaktierung des Einsatzmaterials zur Erhöhung der Schüttdichte, um den angestrebten Massedurchsatz zu erreichen.

Abbildung 5-5: Einsatzstoffe der Dieselwest-Pilotanlage, Ennigerloh. Oben: Ersatzbrennstoff aus Restabfällen; Mitte: Sägemehl; unten: Kunststofffolien aus Bau- und Produktionsabfällen, die vor der Aufbereitung zerkleinert wurden

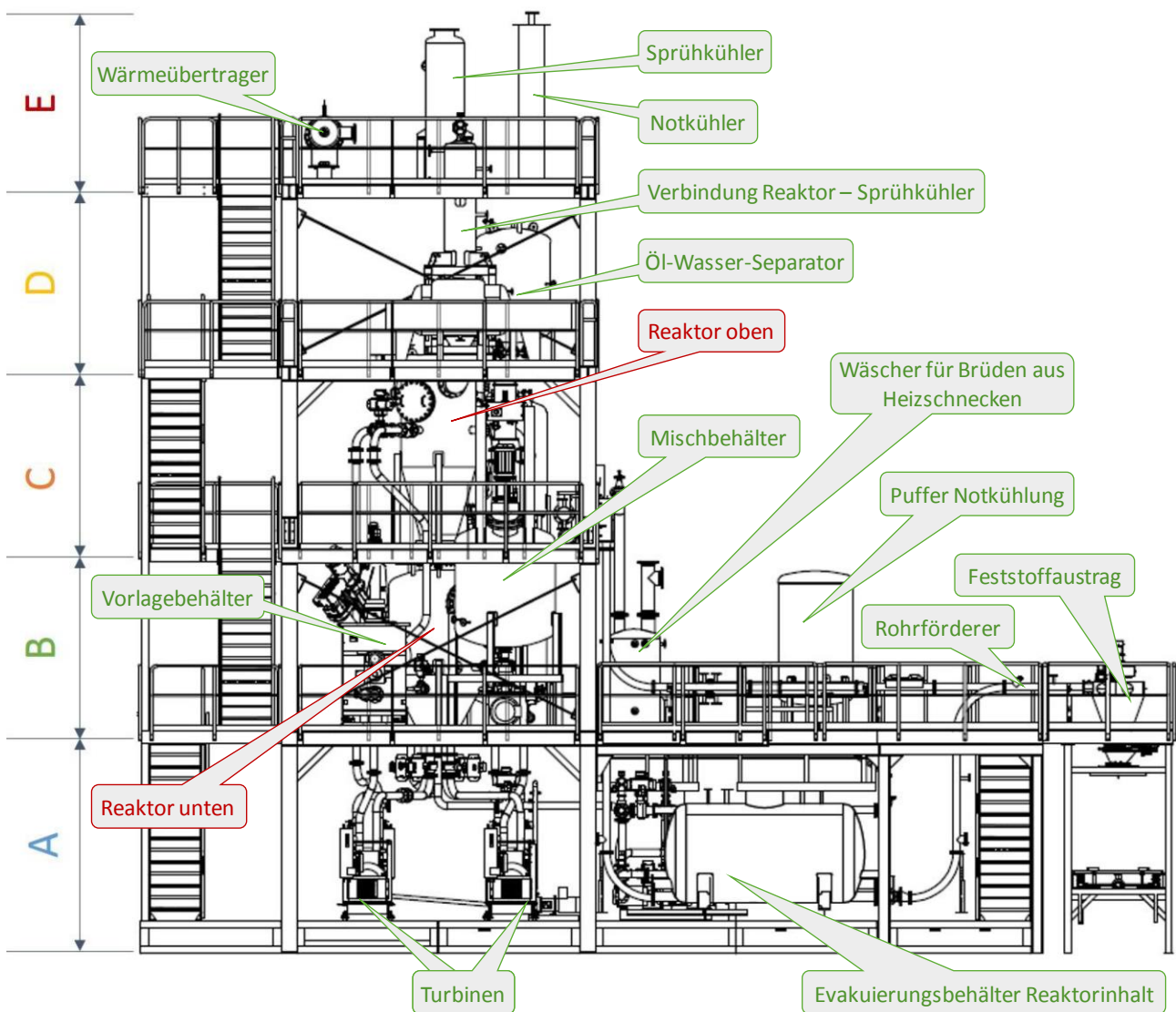


Quelle: Recenso GmbH

Der Verölungsprozess selbst wird in flüssiger Phase, in einem Ölbad durchgeführt. Für den Anfahrprozess muss der Reaktor hierfür mit Start-Öl (Altöl) gefüllt werden. Laut Aussage des Betreibers muss während des Prozesses kein weiteres Öl nachgefüllt werden. Vor Zuführung der festen Einsatzstoffe wird dieses Altöl zunächst auf Reaktionstemperatur (320-360 °C) erwärmt. Dies erfolgt durch vier sogenannte Energieeintragsaggregate (Turbinen) mit denen der Reaktorinhalt ständig gemischt und umgepumpt wird (Abbildung 5-6, Ebene A). Durch die entstehende Reibung wird so viel Wärme erzeugt, dass sich das System auf Reaktionstemperatur aufheizt.

Die wesentlichen Prozessparameter der Anlage in Ennigerloh sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Abbildung 5-6: Schnittzeichnung der Dieselwest-Pilotanlage, Ennigerloh



Quelle: Recenso GmbH, verändert

Der Reaktor besteht aus zwei zylindrischen Gefäßen, die sich im unteren Bereich kegelförmig verjüngen und übereinander angeordnet sind (Abbildung 5-7, Abbildung 5-6, Ebenen B und C). Die Feststoffzuführung erfolgt in den unteren Reaktor mittels einer Schnecke, die den Einsatzstoff unterhalb des Flüssigkeitsspiegels in den Reaktionsbehälter drückt (Abbildung 5-7, rechts). Dadurch wird erreicht, dass sich das zugeführte Material direkt mit dem vorgelegten Öl vermischt und eine Suspension entsteht. Diese wird am Reaktorunterteil über die Turbinen abgesaugt und über vier Leitungen und angeschlossene Düsen wieder in den oberen Teil des Reaktors injiziert (Abbildung 5-7, links).

Durch diese intensive Durchmischung ist ein guter Wärme- und Stoffaustausch sichergestellt. Infolgedessen stellt sich ein konstantes Temperaturniveau im System ein, das auch über längere Zeit sehr stabil gehalten werden kann (vgl. Abbildung 5-11 und Abbildung 5-13). Unter Einwirkung der Temperatur werden die Polymere aufgebrochen, es bilden sich Produkte mit kürzeren Ketten, eine Verflüssigung findet statt. Wenn die Kettenlänge der Kohlenwasserstoffe ausreichend kurz ist, kommt es zur Verdampfung. Ob und inwieweit der Katalysator und die tribochemischen Effekte an diesem Depolymerisationsvorgang beteiligt sind (wie dies vom Betreiber postuliert wird), ist bisher nicht geklärt.

Tabelle 5-1: Betriebsdaten der Anlage in Ennigerloh

Einsatzstoffe		Reaktionsparameter	
Ersatzbrennstoffe, Kunststofffraktionen, Gummi, unterschiedliche Biomassen		Temperatur	320-350 °C
Qualitätsvorgaben für die Einsatzstoffe		Verweilzeit	3 min
Korngröße	2D < 40 mm 3D < 5 mm	Betriebsdruck (absolut)	900-950 mbar
Wassergehalt	< 5 Ma-%	Zusatzstoffe	
Aschegehalt	< 10 Ma-%	Katalysator	Eisenoxid/Aluminiumsilikat 2 Ma-% des Inputs
Heizwert	> 20 MJ/kg	Additive	Kalk (Neutralisation) 2 Ma-% des Inputs Fe ₂ O ₃ (Schwefelbindung)
Produkte			
Gas	keine Erfassung		
Produktöl	400 l/Mg		
Feststoff	10-15 %		

Quelle: Recenso GmbH

Die entstehenden Kohlenwasserstoffdämpfe verlassen den Reaktor am Kopf und werden in einen Sprühkühler in der oberen Etage der Installation (Abbildung 5-6, Ebene E) geführt.

Abbildung 5-7: Reaktor der Dieselwest-Pilotanlage, Ennigerloh, mit oberem (links, mit Ölzuführung von den vier Turbinen) und unterem Behälter (rechts, mit Eintragsschnecke mit rotem Antriebsmotor im Vordergrund)



Quelle: Eigene Aufnahmen

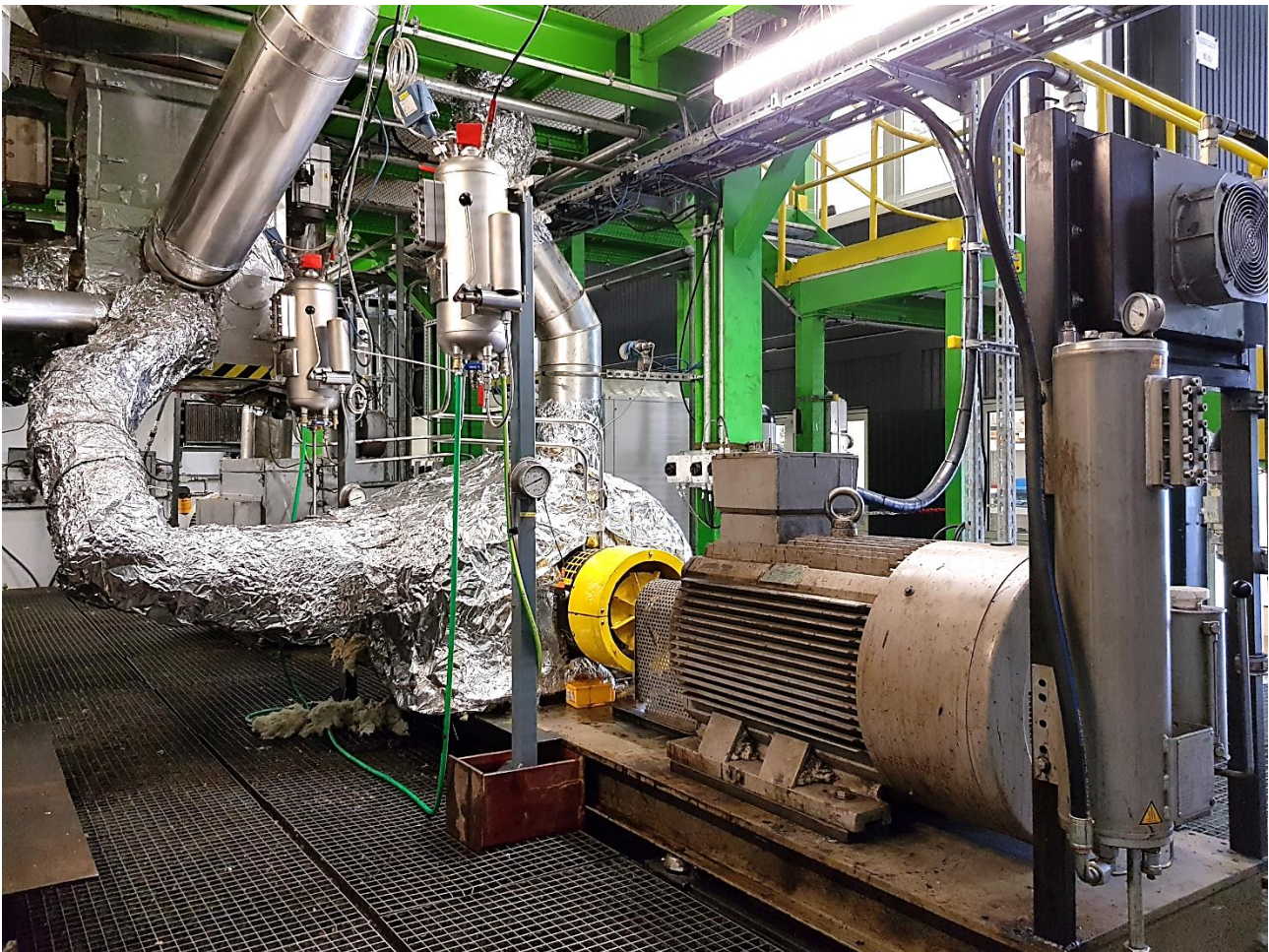
Dort erfolgt die Kondensation durch direkten Kontakt mit etwa 60 °C warmem Produktöl, das im Gegenstrom in die Dämpfe eingespritzt wird. Das entstehende Kondensat wird zur Phasentrennung in einen Öl-Wasser-Abscheider geleitet. Das abgetrennte Wasser wird gelagert und muss später behandelt werden. Das gebildete Öl wird (nach Zwischenkühlung in einem Rohrbündelwärmetauscher) als Sprühöl für den Kühler verwendet und der Überlauf in IBC-Behältern eingelagert.

Aktuell ist weder eine Nachbehandlung noch eine Fraktionierung des Produktöls am Standort Ennigerloh installiert. Recenso plant jedoch den Prozess mit einer innovativen Aufbereitungsstufe zur Schwefelentfernung auszustatten, die auf Basis einer ultrafeinen Natriumdispersion (Korngröße 2 µm) bei 280 °C durchgeführt und durch einen Destillationsschritt ergänzt werden soll [20].

Der geringe Unterdruck im System, der zur Absaugung der Dämpfe/Gase führt, wird durch eine Flüssigkeitsring-Vakuumpumpe erzeugt. Das verbleibende Permanentgas wird bis auf 15 °C weiter abgekühlt. Die Hauptbestandteile des Permanentgases sind Kohlendioxid und Stickstoff (aus der Inertisierung), allerdings sind auch rund 200 mg/m³ i.N. an organischen, vornehmlich aliphatischen Kohlenwasserstoffen enthalten. Aus diesem Grund kann das Gas nicht ohne weitere Behandlung in die Atmosphäre entlassen werden.

Am Standort Ennigerloh kann zur Gasbehandlung die TNV-Anlage der vorhandenen MBA mitgenutzt werden. Für den Neubau einer solchen Anlage sind allerdings geeignete Abgasbehandlungseinrichtungen (TNV, Aktivkohlefilter etc.) einzuplanen.

Abbildung 5-8: Eine der Turbinen an der Dieselwest-Pilotanlage, Ennigerloh



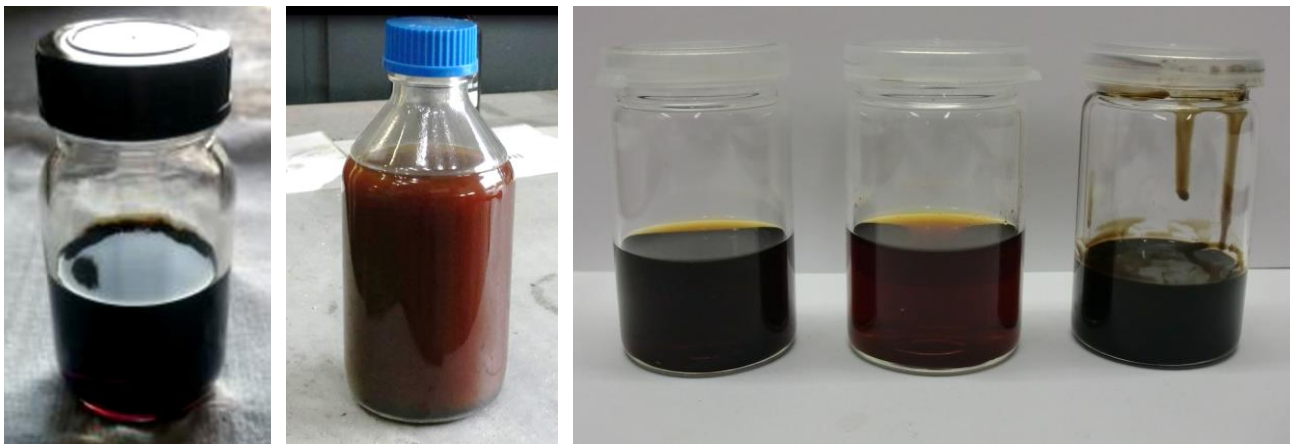
Quelle: Eigene Aufnahmen

Da sich im Reaktor die im zugeführten Material (trotz Aufbereitung) verbliebenen Feststoffe sowie Reste der zugegebenen Additive ansammeln, müssen diese in regelmäßigen Abständen über ein Pumpsystem aus dem Reaktorsumpf abgezogen werden. Dazu wird zunächst durch Reduzierung der Pumpenleistung eine Sedimentation der Partikel im unteren Reaktorbereich realisiert. Der Reaktorinhalt aus diesem Bereich wird sodann in einen Absetzbehälter (Abbildung 5-6, Ebene A) gepumpt und dort das Feststoff-Katalysator-Gemisch von der mitgeführten Ölfraction durch Sedimentation getrennt. Zum Austrag der Feststoffe wird ein langsam laufender Rohrkettenträger verwendet, der die pastöse Masse aus dem Absetzbehälter kratzt und in einen Container austrägt (Abbildung 5-6, Ebene B). Der Heizwert des festen Rückstands beträgt etwa 30 MJ/kg [21].

5.1.2 Produktqualität

Die Zusammensetzung des Flüssigproduktes aus der Dieselwest-Anlage hängt stark von der Art des Einsatzmaterials ab. Abbildung 5-9 zeigt Proben, die aus verschiedenen Edukten gewonnen wurden. Im linken Bild ist das Flüssigprodukt aus einem Versuch mit vorsortierten Kunststofffolien dargestellt, im mittleren Bild das Produkt aus Sägemehl und rechts die verschiedenen Flüssigfraktionen aus der Behandlung von Ersatzbrennstoffen. Die dunkle Farbe und die zum Teil recht hohe Viskosität machen unmittelbar deutlich, dass eine hochwertige Nutzung des erzeugten Öls nur nach einer entsprechenden Aufbereitung möglich ist.

Abbildung 5-9: Flüssigprodukte aus der Dieselwest-Anlage. Links: Ölfraction aus der Behandlung von Kunststoffen (vorsortierte Kunststofffolien aus Bau- und Produktionsabfällen); Mitte: Öl aus Sägemehl (in Altölvorlage); rechtes Bild: Flüssigprodukte EBS-Behandlung, links Leichtöl, Mitte wässrige Phase, rechts Schweröl



Quelle: Recenso GmbH und eigene Aufnahmen

Dieser Eindruck wird durch Abbildung 5-10 noch unterstrichen. Zu sehen ist eine Düsenadel, vor (linkes Bild) und nachdem (rechts) diese über eine Woche einem Produktöl aus der Dieselwest-Anlage ausgesetzt war (hierzu wurde die Düsenadel in das Öl eingelegt). Bereits in dieser relativ kurzen Zeit bildeten sich massive nur schwer wieder zu entfernende Beläge. Zusätzlich wurde das Metall durch das Öl korrosiv angegriffen [32].

Tabelle 5-2 zeigt Analysenergebnisse von Produktölen aus verschiedenen Einsatzstoffen, die in der Verölungsanlage in Ennigerloh erzeugt wurden. Bestimmt wurden typische Parameter für flüssige Brennstoffe. Neben vier verschiedenen unbehandelten Ölen, die im Wesentlichen aus kunststofffreien Fraktionen erzeugt wurden, sind auch die Werte für ein aufbereitetes Produktöl aus Ersatzbrennstoffen aufgeführt. Darüber hinaus sind zum Vergleich die Vorgaben aus der Dieselnorm DIN EN 590 angegeben. Alle Werte, die nicht den Vorgaben der Norm entsprechen, sind rot hervorgehoben.

Abbildung 5-10: Angriff einer Düsenadel aus Stahl durch (nicht aufbereitetes) Produktöl aus der Dieselwest-Anlage. Links: Neue Düsenadel; rechts: Düsenadel nach einer Woche im Produktöl



Quelle: WTZ Roßlau und Recenso GmbH [32]

Tabelle 5-2: Analysen verschiedener Produktöle aus der Anlage in Ennigerloh (n.a. = nicht analysiert, n.e. = nicht erreicht, * aus Zeichnung entnommen)

Parameter	Einheit	Produktanalysen Dieselwest					Diesel DIN EN 590
		EBS		EBS	Kunststoff		
		roh	behandelt		Granulat	Folien	
Cetanzahl		43	57	37	31	57	› 51
Cetanindex		49	67	42			› 46
Dichte [15 °C]	[kg/m³]	850	832	850	903	843	820-845
PAK	[Ma-%]	3,1	2,0	2,7	4,1	2,2	‹ 8,0
Schwefel	[mg/kg]	1240	‹ 5	1400	980	1170	‹ 10,0
Mangan	[mg/l]	‹ 1					‹ 2,0
Flammpunkt	[°C]	31,5	36	‹ 20	‹ -20	22	› 55
Koksrückstand	[Ma-%]	1,26	‹ 0,01	0,20	0,36	1,50	‹ 0,30
Aschegehalt	[Ma-%]	0,004	‹ 0,001	0,024	0,045	0,008	‹ 0,010
Wassergehalt	[Ma-%]	0,080	0,0025	0,21	0,38	0,143	‹ 0,020
Gesamtverschmutzung	[mg/kg]	161	8,5	698	987	147	‹ 24
Kupferkorrosion	Rating	Class 1		Class 2	Class 1	Class 2	Class 1
FAME -Anteil	[Vol-%]	1,3	‹ 0,1	3,4	1,9	n.a.	‹ 7,0
Oxidationsbeständigkeit	[g/m³]	n.a.	12	n.a.	n.a.		‹ 25
	[h]	n.a.	2,7	n.a.	n.a.		› 20
Schmierfähigkeit [60 °C]	[µm]	368	417	360	349	361	‹ 460
Viskosität [40 °C]	[mm²/s]	3,5	4,7	2,18	4,46	4,39	2-4,5
Destillat							
	bei 250 °C [Vol-%]	*ca. 33	*ca. 7	48	35	27	‹ 65
	bei 350 °C [Vol-%]	*ca. 75	*ca. 78	93	66	58	› 85
	95 Vol-% bei [°C]	*ca. 400	*ca. 380	353	389	n.e.	‹ 360
Filtrierbarkeitsgrenze [CFPP]	[°C]	-5	-10	-20	-10	n.a.	

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten der Recenso GmbH

Es ist offensichtlich, dass keine der untersuchten Proben die Anforderungen der DIN-Norm einhalten kann. Selbst die aufbereitete Fraktion zeigt Abweichungen im Destillationsverhalten und hat einen signifikant geringeren Flammpunkt als er für Dieselkraftstoff vorgeschrieben ist.

Die unbehandelten Öle zeigen durchweg viele Überschreitungen der Normvorgaben. Besonders hervorzuheben ist der hohe Schwefelgehalt in allen Proben. Schwefel ist ein Katalysatorgift, führt zu Korrosion in Motoren und zu unerwünschten Emissionen. Wie beim aufbereiteten Öl zeigen auch die unbehandelten Fraktionen einen sehr niedrigen Flammpunkt. Eine motorische Nutzung der unbehandelten Öle dürfte daher zumindest im Dauerbetrieb mit Problemen verbunden sein.

Die Verwendung in einem Ölbrenner (je nach Inhaltsstoffen, zum Beispiel Schwermetallen, unter Einsatz der erforderlichen Emissionsminderungsmaßnahmen) erscheint jedoch unproblematisch.

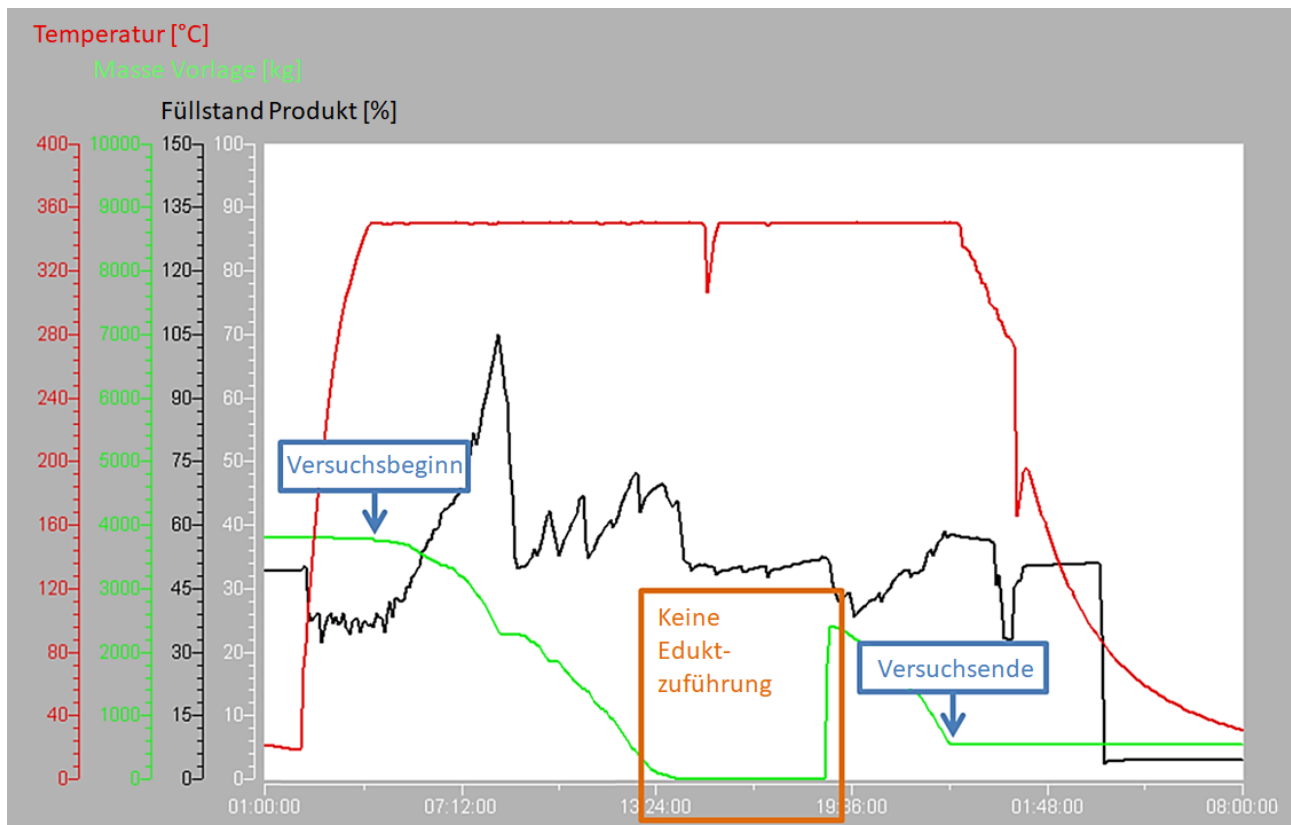
Eine weitere Option zur Verwertung der erzeugten Öle könnte die stoffliche Nutzung in chemischen Anwendungen darstellen. Da hier eine stoffliche Nutzung der eingesetzten Abfälle erreicht wird, könnte diese Variante interessant sein, um künftig die gesetzlich vorgeschriebenen Quoten für eine stoffliche Verwertung von Abfällen zu erreichen.

5.1.3 Betriebserfahrungen

Wie bereits erläutert, wurde und wird die Anlage in Ennigerloh nur im Rahmen von Kampagnen betrieben. Ein durchgängiger Betrieb konnte daher nur im Umfang von einigen Tagen realisiert werden. Dementsprechend liegen noch keinerlei Erfahrungen zur Dauerbetriebsfähigkeit der Technologie vor. Aus der Vielzahl der bisher durchgeführten Messkampagnen konnten dennoch verschiedene Erfahrungen zum Anlagenbetrieb gewonnen werden.

Abbildung 5-11 zeigt die Prozessparameter Temperatur, Einsatzstoffmenge und Produktausbeute für einen viertägigen Versuchslauf mit EBS aus kommerziellen Restabfällen.

Abbildung 5-11: Betriebsparameter beim viertägigen Versuchsbetrieb der Dieselwest-Anlage in Ennigerloh, mit EBS aus kommerziellen, haushaltsähnlichen Abfällen



Quelle: Recenso GmbH

Es zeigt sich, dass die gewünschte Prozesstemperatur durch die eingebrachte Reibungswärme zügig erreicht werden kann. Hervorzuheben ist die bemerkenswerte Konstanz der Temperatur, über den gesamten Versuchsverlauf, die durch die offensichtlich hervorragende Vermischung im System (Rührkessel-Verhalten) gut gesteuert werden können. Der kurze Einbruch in der Temperatur erklärt sich durch den Austausch des Reaktorinhaltes, zur Entfernung der Feststoffe (vgl. Kapitel 5.1.1)

Das Signal der Wägezelle, zur Messung des Eingangsmassenstroms, zeigt ebenfalls einen glatten und stabilen Verlauf. Die Unterbrechung der Zuführung (ca. 24 h) war auf ein Problem in der Lieferung des EBS zurückzuführen.

Während des Tests (ungefähr fünf Stunden nach Beginn der Eduktzufuhr) zeigte eine der Turbinen eine Leckage und musste abgeschaltet und vom System entkoppelt werden. Der Prozess wurde durch diese Maßnahme nicht beeinflusst, da laut Betreiber bereits zwei Turbinen ausreichen, um die nötige Energie in das System einzutragen. Allerdings ist festzuhalten, dass die Turbinen eine potentielle Schwachstelle des Verfahrens darstellen. Die hohen Rotationsgeschwindigkeiten der Läufer können in Verbindung mit potenziell zugeführten Fremdstoffen leicht zu Beschädigungen und zum Ausfall der Turbinen führen.

In Anbetracht der sehr homogenen Betriebsbedingungen (Temperatur und Eingangsmassenstrom), zeigte die Ölproduktion einen überraschend fluktuierenden Verlauf. Es ist kein direkter Zusammenhang zwischen dem Eingangsmassenstrom und der erzeugten Ölmenge zu erkennen.

Da bisher noch keine längeren Betriebserfahrungen vorliegen, sind Aussagen über die Stabilität des Gesamtprozesses und einzelner Aggregate aktuell nur schwer zu treffen. Bereits angesprochen wurde die offensichtliche Problematik der schnell rotierenden Energieeintragsaggregate, die naturgemäß empfindlich für Beschädigungen sind.

Abbildung 5-12: Blockaden im Zuführsystem der Dieselwest-Anlage bei der Behandlung von vorsortierten Kunststofffraktionen



Quelle: Recenso GmbH

Weitere mechanische Probleme können in der Zuführung auftreten. Abbildung 5-12 zeigt Verstopfungen in den Zuführschnecken, deren Beseitigung mit hohem Aufwand verbunden war. Zu hohe Temperaturen (180 °C) in den beheizten Schnecken führten bei sehr kunststoffreichen Einsatzstoffen zum

Erweichen der Materialien und in der Folge zu einem Verblocken der Zuführung, bis hin zur Beschädigung der Schnecken. Eine Reduktion der Temperatur auf 130-150 °C brachte keine Abhilfe, sodass das Material mit weniger kunststoffhaltigem EBS vermischt werden musste [29]. Für die Behandlung polymerreicher Fraktionen stellt dies sicherlich ein Problem dar.

Laut Betreiber konnte derartige Schwierigkeiten inzwischen dadurch gelöst werden, dass jeder neue Einsatzstoff zur Ermittlung der optimalen Einstellungen auf sein Verhalten in den Heischnecken getestet wird.

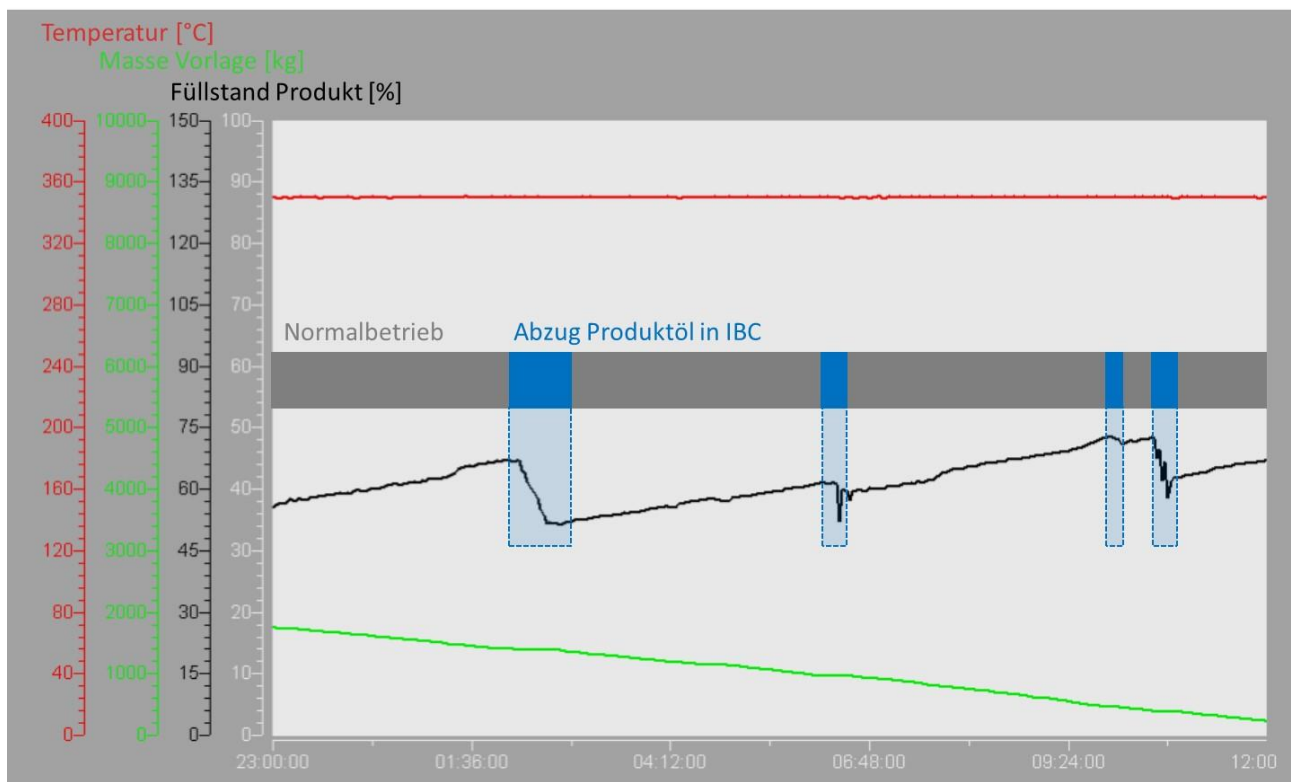
5.1.4 Massen und Energiebilanz

Eine geschlossene Massen- und Energiebilanz für das Verfahren konnte bisher nicht aufgestellt werden. Dies liegt vor allem daran, dass im Reaktor eine große Menge Altöl vorgelegt werden muss. Zudem wird ein Teil des Reaktorinhalts zum Austrag der Feststoffe periodisch mit dem Inhalt des, ebenfalls mit vorgelegtem Öl gefüllten, Evakuierungsbehälter ausgetauscht. Bei kurzen Versuchszeiten von wenigen Tagen ist der Einfluss dieser Ölmengen derart groß, dass eine korrekte Bilanzierung unmöglich gemacht wird.

Abbildung 5-14 zeigt den Versuch, dennoch eine solche Bilanzierung auf Basis eines mehrtägigen Versuches zu erstellen. Die Angaben in der Massenbilanz beruhen auf der Auswertung eines Großversuchs für einen industriellen Auftraggeber und wurden zum Teil korrigiert und durch eigene Berechnungen ergänzt.

Abbildung 5-13 zeigt den Verlauf der Betriebsparameter während dieser Testphase. Die Temperatur bewegte sich auf konstantem Niveau und der Einsatzstoff wurde in gleichbleibender Menge dosiert. Am Füllstand im Produktbehälter ist gut zu erkennen, wann Öl abgezogen und in die Lagerbehälter überführt wurde. Dies wurde bei der Auswertung berücksichtigt.

Abbildung 5-13: Auszug aus den Betriebsdaten der Dieselwest-Anlage, Enigerloh, für den betrachteten Versuch mit EBS



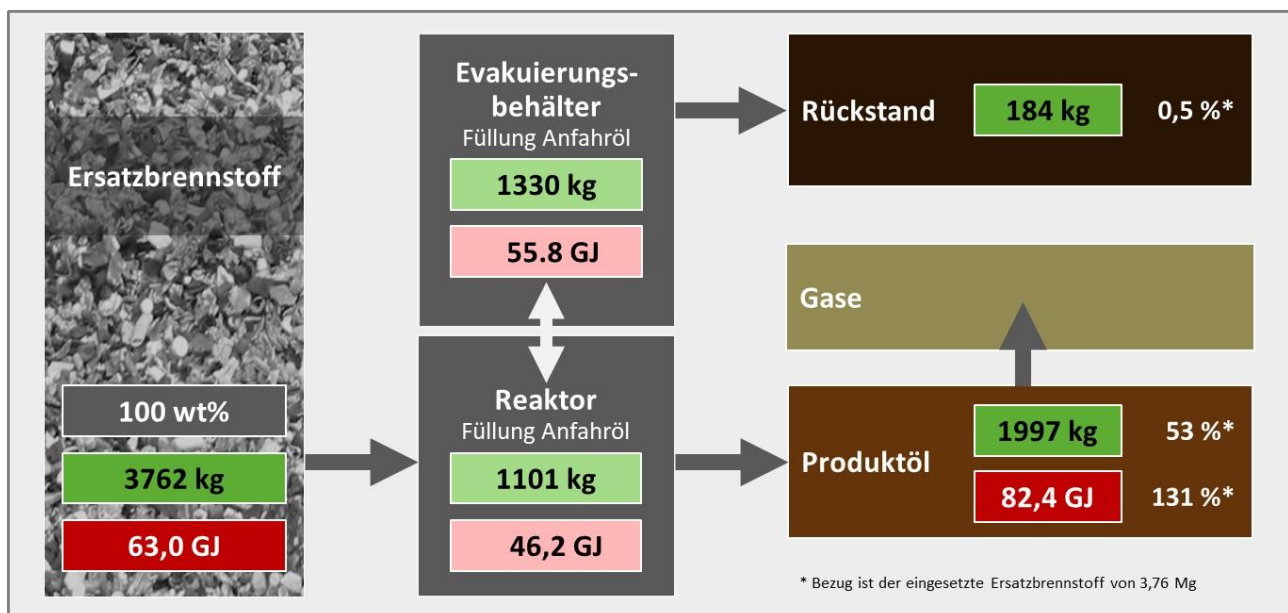
Quelle: Recenso GmbH

Für die Bilanzierung wurden nur Phasen mit stationären Bedingungen betrachtet. Hierfür wurden aus dem mehrtägigen Versuchszeitraum insgesamt 6 Perioden mit einer Gesamtdauer von 30 Stunden ausgewählt. In dieser Zeit wurden insgesamt 3762 kg EBS mit einem Energiegehalt von 63 GJ in die Anlage eingebracht (Abbildung 5-14). Im Reaktor befanden sich zur Versuchsbeginn bereits 1101 kg Anfahröl (Altöl) mit einem Energiegehalt von 46,2 GJ. Im Evakuierungsbehälter für den Austrag der Feststoffe befand sich eine Vorlage von 1330 kg mit einem Energiegehalt von 54,8 GJ.

In den betrachteten 30 Stunden wurden insgesamt 1997 kg Produktöl erzeugt. Bezogen auf die eingesetzte Ersatzbrennstoffmenge entspricht dies einer Ausbeute an flüssigen Kohlenwasserstoffen von 53 Ma-%. Gleichzeitig wurden 184 kg an festen Rückstand aus dem System ausgetragen (0,5 Ma-% des eingesetzten EBS). Der Verbleib der fehlenden 46,5 Ma-% ist unklar. Vermutlich ist ein Teil des großen Massedefizits auf die instationären Rahmenbedingungen (insbesondere die Ölvorlage) zurückzuführen. Ein anderer Teil ist durch die Bildung von Reaktionswasser erklärbar.

Für das produzierte Öl wurde ein unterer Heizwert von 41,3 MJ/kg bestimmt. Damit ergibt sich ein Energiegehalt der knapp 2 Tonnen an produziertem Öl von 82,4 GJ. Bei einem mittleren Heizwert der eingesetzten EBS-Fraktion von 16,75 MJ/kg ergibt dies eine Energieausbeute von 131 %. Es ist zu vermuten, dass dieser (thermodynamisch unmögliche) Zugewinn an Energie auf den Einsatz des Altöls zurückzuführen ist. Offensichtlich werden Anteile von diesem in die Produktfraktion überführt. In welchem Umfang das stattfindet, ist auf Basis der vorliegenden Informationen und Daten nicht zu ermitteln. Eine solche Bestimmung ist nur im Rahmen eines Langzeitversuches machbar, während dem – im Vergleich zum vorgelegten Altöl – ein Vielfaches an Einsatzstoff durchgesetzt wird.

Abbildung 5-14: Massen- und Energiebilanz über ausgewählte Zeiträume eines Versuchs mit EBS in der Dieselwest-Anlage, Enigerloh (die Massenbilanzierung bezieht sich auf eine Betriebszeit von insgesamt 30 Stunden, verteilt auf drei Zeiträume)



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten der Recenso GmbH

5.1.5 Gesamtbewertung und Fazit

Durch die Bezeichnung „Catalytische Tribochemische Conversion“ wird suggeriert, dass der Prozess wesentlich durch Reibung, erzeugt über mehrere Rührturbinen, induziert wird. Ob tatsächlich ein tribochemischer Effekt bis hinunter in die molekulare Ebene auftritt und direkt zur Depolymerisation

beiträgt, darf bezweifelt werden. Wahrscheinlicher scheint, dass die Depolymerisation thermisch induziert ist. Zur Zerkleinerung größerer Strukturen und Agglomerate tragen die Rühraggregate aber sicherlich bei.

Zweifel sind auch bei der Wirkung des Katalysators angebracht. Zunächst ist die Bezeichnung Katalysator dahingehend irreführend, dass das entsprechende Additiv verbraucht bzw. nicht aus dem Reaktionsgemisch zurückgewonnen wird. Zudem konnte die katalytische Wirkung des Zusatzes bisher nicht experimentell nachgewiesen werden.

Trotz dieser Einschränkungen ist zu konstatieren, dass das Verfahren grundsätzlich geeignet ist, aus Polymerabfällen eine hochkalorische Flüssigkeit zu erzeugen, die als Brennstoff verwendet werden oder als Einsatzstoff für Raffinerien oder die chemische Industrie interessant sein kann. Die Qualität höherwertiger, normierter Treibstoffe wird allerdings nicht erreicht.

Deutlich in Frage gestellt wird die Aussage des Betreibers, dass neben Polymerfraktionen auch andere Einsatzstoffe, wie Holz und weitere Biomassen, in Öl mit guter Qualität und hoher Ausbeute umgewandelt werden können. Aufgrund des großen Sauerstoffanteils der Biomasse von etwa 40 % erscheint dieses Szenario unrealistisch. Vielmehr steht zu vermuten, dass die in entsprechenden Versuchen erzeugten Produkte zu einem Großteil aus dem vorgelegten Altöl gewonnen wurden (vgl. Erläuterungen zur Problematik der Massen- und Energiebilanzierung).

Eine weitergehende Bewertung des Verfahrens ist derzeit nicht möglich, da weder Langzeiterfahrungen noch belastbare Ergebnisse zur Massen- und Energiebilanzierung vorliegen. Es können also keine Aussagen zu den technisch erzielbaren Ausbeuten getroffen werden. Ebenso ist die Robustheit und Stabilität der Technik nicht einschätzbar. Dementsprechend sind auch keine Aussagen zur Wirtschaftlichkeit möglich.

Um das grundsätzlich vorhandene Potenzial der Technologie weiter auszuloten und gleichzeitig die angesprochenen offenen Fragen (Bilanzen!) zu klären, ist ein Langzeitversuch über mehrere Wochen unerlässlich. Es wird vorgeschlagen, den Prozess über mindestens 1000 Stunden ohne Unterbrechung mit einer polymerreichen Abfallfraktion zu beschicken und diesen Dauerversuch wissenschaftlich und analytisch zu begleiten. Auf dieser Basis sollte es möglich sein, fundierte Aussagen zu den erzielbaren Ölausbeuten, zur Stabilität des Prozesses und über mögliche Schwachstellen zu gewinnen. Aufgrund des hohen Aufwandes für den Betrieb über eine so lange Zeit, ist dies nicht durch den Betreiber allein finanzierbar, sondern nur bei einer entsprechenden öffentlichen Förderung oder einem industriellen Engagement realisierbar.

5.2 Logoil

Konstrukteur und Entwickler des Logoil-Verfahrens ist Helmut Göldner, Inhaber der Logmed Cooperation GmbH und der Göldner Umwelt- und Hygienetechnik GmbH in Fischen/Allgäu.

Die Logmed Cooperation GmbH wurde als Logoil GmbH im September 2006 in Halle/Saale gegründet und im Januar 2008 umbenannt. Die Göldner Umwelt- & Hygienetechnik GmbH ist über 20 Jahre auf dem Gebiet der Desinfektion und Sterilisation von Abfällen aus dem Gesundheitswesen tätig und hat weltweit über 30 Logmed-Anlagen aus eigener Entwicklung im Einsatz.

Kern der Entwicklungsarbeit seit 2006 ist die Logoil-Technologie. Logoil-Anlagen sind nach Angaben des Entwicklers thermodynamische katalytische Verwertungsanlagen, in denen die behandelten Abfälle zu synthetischen Ölen verarbeitet werden. Über das Verfahren der katalytischen Niedertemperaturdepolymerisation werden synthetische Öle in Form von Rohbenzin, leichtem und schwerem Heizöl destilliert.

Zum Zeitpunkt der Anlagenbesichtigung befand sich eine Technikumsanlage in Halberstadt in Betrieb, mit welcher die Funktionalität des patentierten Verfahrens in der Praxis nachgewiesen werden sollte.

Die als Demonstrationsanlage für potentielle Kunden dieser Technologie dienende Installation sollte außerdem Untersuchungen zu den Möglichkeiten und Grenzen der Kunststoffverölung ermöglichen.

Zur Erweiterung der Technikumsanlage wurde die gesamte Anlage aus strategischen Gründen im Frühjahr 2018 zu einem Entsorgungsunternehmen nach Bayern verlagert.

Abbildung 5-15: Technikumsanlage der Logmed Cooperation in Halberstadt



Quelle: Logmed Cooperation

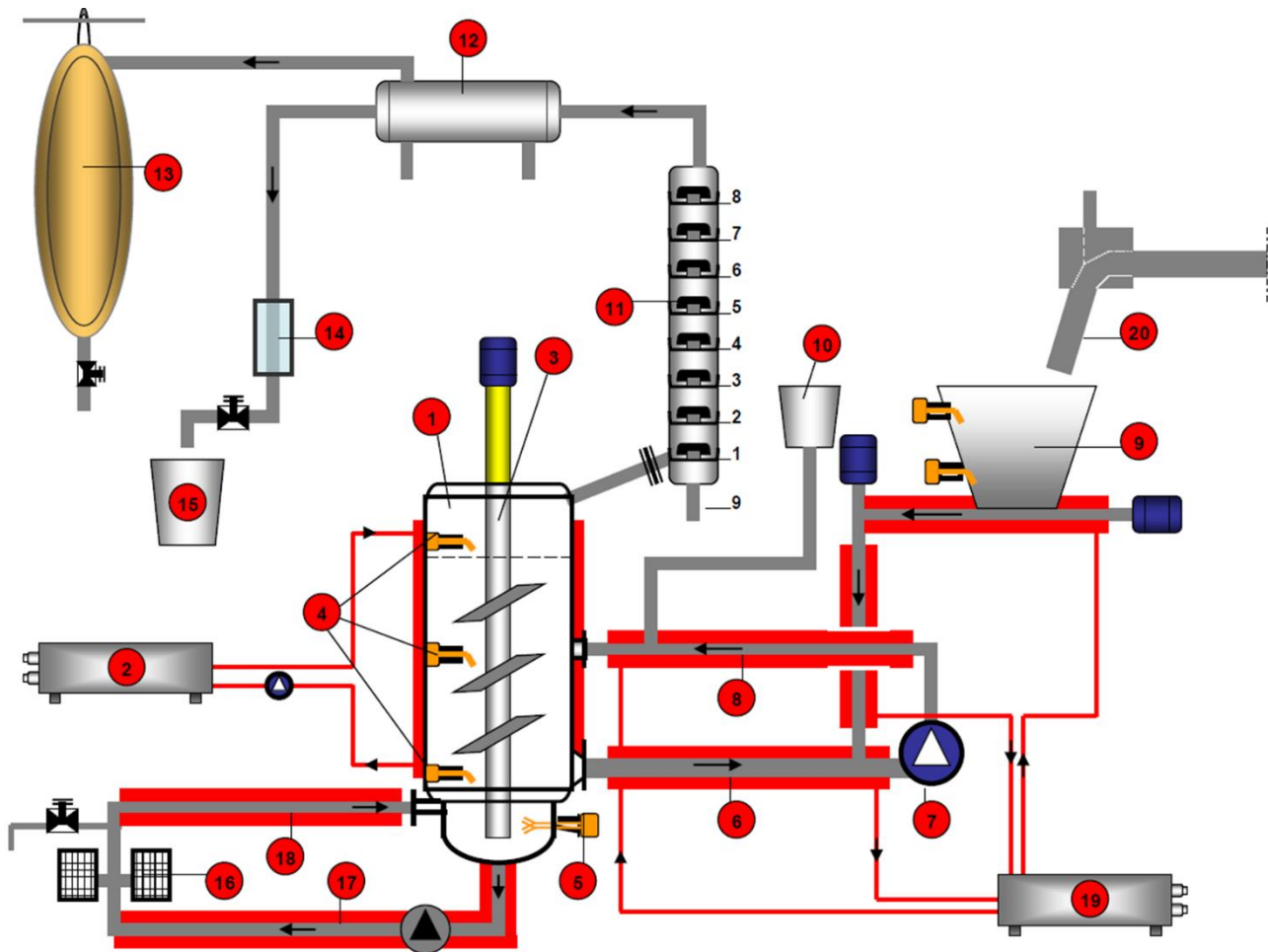
5.2.1 Verfahrensbeschreibung

In Abbildung 5-16 ist das Verfahrensschema der Logoil-Anlage dargestellt. Das Prinzip der Logoil-Anlage lässt sich verfahrenstechnisch prinzipiell folgendermaßen beschreiben:

1. Die Rohstoffe und gegebenenfalls benötigte Zusatzstoffe (Additive) werden über eine Dosiereinrichtung der Anlage zugeführt (20, 9) und in einem ersten Schritt durch eine Temperaturerhöhung getrocknet, so dass hier zunächst Energie zur Aufheizung des Rohstoffes und zur Verdampfung des Wassers benötigt wird.
2. Nach der Trocknung wird der Einsatzstoff in den Turbinenumlauf (6, 7, 8) gefördert. Dort wird er über den Schmelzpunkt hinaus erwärmt. Hier wird weitere Energie zur Aufheizung des Einsatzmaterials und für den Phasenübergang fest-flüssig (schmelzen) benötigt.
3. Nachdem der Rohstoff schmelzflüssig vorliegt, wird er dem Reaktor (1) zugeführt, in welchem nun der eigentliche Crack-Prozess und der Phasenübergang flüssig-gasförmig (Verdampfung) stattfindet. Hier wird weitere Energie zur Aufheizung und zur Realisierung der Umwandlungsprozesse benötigt. Des Weiteren ist ein Abzug für das sogenannte Sumpf-Material (z.B. Wachse) vorhanden (17, 18), welches aus dem Reaktor geschleust werden kann. Die Filtereinheit hat

die Aufgabe, nicht verflüssigbare Bestandteile im Produkt über den Sumpfkreislauf aus dem System zu entfernen. In die Filtereinheit wird zudem das Wachs aus der Anlage abgeführt.

Abbildung 5-16: Verfahrensschema der Logoil-Anlage



- 1 Reaktor
- 2 Energieversorgung
- 3 VEGA-Radar-Füllstandssonde
- 4 Füllstandsmeßsysteme
- 5 Viskositätsmesser
- 6 Turbinenzulauf
- 7 Turbine
- 8 Reaktorzulauf
- 9 Vorratsbehälter mit Füllstandsmelder
- 10 Behälter mit Injektorzulauf

- 11 Kolonne mit 8 Böden
- 12 Kopfkondensator
- 13 Gasblase – Propan/Butan
- 14 Schauglas
- 15 Entnahme Leichtbenzin
- 16 Taschenfiltersystem
- 17 Zulauf Taschenfiltersystem
- 18 Rücklauf zum Reaktor
- 19 Heizsystem Materialzufuhr
- 20 Automatische Rohstoffzuführung

Quelle: Logmed Cooperation

4. Die verdampften Gase werden in die Kolonne (11) geleitet und dort teilweise in Destillate umgewandelt bzw. weiter bis zum Kondensator geführt. In der Kondensationskolonne wird das Synthesegas in einzelne Fraktionen zerlegt. Die Anzahl der Fraktionen hängt von der Geometrie

der Kolonne ab. Gemäß Abbildung 5-16 besitzt die Kolonne der Anlage 8 bauähnliche Kolonnenböden, so dass 8 verschiedene Fraktionen (Fraktionen 1 bis 8) erzeugt werden können. Hinzu kommen noch eine schwere Fraktion aus dem Boden der Kolonne (Fraktion 9) und eine leichte Fraktion als Produkt des Kopfkondensators (Fraktion 10).

5. Die unter den im Kondensator herrschenden Bedingungen nicht kondensierbaren Gase werden weiter in den Gasspeicher geleitet.

Die erforderliche Prozesswärme wird über ein Heizungssystem für Wärmeträgeröl in die Anlage eingebracht. Entsprechend der Eigenschaften der einsetzbaren Wärmeträgeröle muss das System unter Druck betrieben werden.

Die prinzipiellen Betriebsdaten der Anlage sind in Tabelle 5-3 dargestellt.

Tabelle 5-3: Betriebsdaten der Logoil-Anlage

Einsatzstoffe		Reaktorparameter	
Voraufbereitete unterschiedliche Kunststoff-Fraktionen (PE und PP), insbesondere Monochargen		Temperatur	360-400 °C
Vorgaben Einsatzstoffe		Verweilzeit	abhängig von Temperatur und Einsatzstoff
Korngröße	k. A (Testversuche möglich)		
Wassergehalt	k. A. (Testversuche möglich)	Betriebsdruck (absolut)	k.A.
Aschegehalt	möglichst gering	Produkte	
Heizwert	> 20 MJ/kg	Gas	Gas
Zusatzstoffe		Feststoff	Flüssig
Katalysator	ja	Feststoff	Feststoff
Additive	nein		

Quelle: Logmed Cooperation

5.2.2 Produktqualität

In Tabelle 5-4 sind ausgewählte Analysenparameter von zwei Produkten aus dem Verfahren wiedergegeben. Anhand dieser Analysen wird offensichtlich, dass auch beim Logoil-Verfahren keine der untersuchten Proben die Anforderungen der DIN-Norm einhalten kann. Offensichtlich ist auch, dass die Proben aus den unterschiedlichen Kolonnenbereichen unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Signifikant ist, wie auch bei dem zuvor beschriebenen Dieselwest-Verfahren, bei beiden Proben der niedrige Flammpunkt und der hohe Schwefelgehalt. Schwefel ist, wie erläutert, ein Katalysatorgift, führt zu Korrosion in Motoren und zu unerwünschten Emissionen.

Insgesamt bestätigt sich die Aussage, dass eine motorische Nutzung der unbehandelten Destillate problematisch ist und eine Dauerbetriebsfähig nicht gegeben erscheint. Weitere Untersuchungen sind derzeit am neuen Standort in Bayern geplant, wobei insbesondere eine weitere Vorbehandlung der Inputmaterialien mit einem sogenannten turbolaminaren Trennverfahren (TLT) vorgesehen ist.

Die Verwendung in einem Ölbrenner (je nach Inhaltsstoffen, zum Beispiel Schwermetallen, unter Einsatz der erforderlichen Emissionsminderungsmaßnahmen) erscheint auch hier unproblematisch. Gleiches gilt für die Option zur Verwertung der erzeugten Destillate in chemischen Anwendungen zur letztlich stofflichen Nutzung der eingesetzten Abfälle (Erreichen der gesetzlich vorgeschriebenen Quoten für eine stoffliche Verwertung von Abfällen).

Tabelle 5-4: Analysen der Produktöle aus der Logoil-Anlage

Parameter	Einheit	Produktanalysen Logoil		Diesel DIN EN 590
		Kolonne 4-6	Kopfcondensat	
Dichte [15 °C]	[kg/m³]	851,6	763,0	820-845
Schwefel	[mg/kg]	253	423	< 10.0
Mangan	[mg/l]			< 2.0
Flammpunkt	[°C]	-1	< -20	> 55
Viskosität [40 °C]	[mm²/s]	1,590	0,6018	2-4.5

Quelle: Logmed Cooperation

5.2.3 Betriebserfahrungen

Die seit 2006 gesammelten Betriebserfahrungen sind nach Aussagen des Entwicklers zunächst in die Optimierung der Anlagentechnik eingeflossen. Die Anlage verfügt inzwischen über einen hohen Automatisierungsgrad und über erweiterte Sensorik, welche sich aus den durchgeführten Versuchskampagnen als notwendig ergeben hat.

Zielstellungen der in den vergangenen Jahren durchgeführten Untersuchungen waren die Optimierung des Anlagenbetriebs in Abhängigkeit der Einsatzstoffe (Abstimmung Reaktortemperaturen), die Gewinnung weiterer Informationen zu den verwendbaren Start-Ölen sowie deren Einfluss näher zu untersuchen. Dies zeigen die Ergebnisse aus durchgeführten Untersuchungen, welche hier zusammengefasst dargestellt sind [33]²:

- ▶ Der Testlauf belegte die Erkenntnis aus der Theorie sowie aus den vorangegangenen Laborversuchen an der Hochschule Merseburg sowie von Steinbeis R.T.M., dass ein Betrieb mit wirtschaftlichen Ausbeuten aus polyolefinischen Kunststoffabfällen Reaktortemperaturen von über 400°C erfordert.
- ▶ Start-Öle mit einem Siedebereich, der unterhalb der Siedebereiche der Kunststoffe liegt, verhindern solange das Pyrolysieren der Kunststoffe bzw. reduzieren deren Spaltgeschwindigkeiten, solange sie im Reaktor vorhanden sind. Wie weit der prozentuale Anteil des Start-Öls am gesamten Reaktorinhalt abdestilliert werden muss, damit die Verdampfung der Kunststoffe einsetzt bzw. sich auf eine praktikable Crackrate beschleunigt, konnte bislang nicht ermittelt werden. In jedem Falle spielen dabei auch die konkrete Zusammensetzung des Inputmaterials und die Höhe der Reaktortemperatur eine wesentliche Rolle.
- ▶ Polyolefinische Kunststoffe werden bei Reaktortemperaturen unterhalb des jeweiligen Siedepunktes bereits gecrackt. Die C-H-Kettenlängen verkürzen sich jedoch nur insoweit, dass sie denen von Hartwachsen entsprechen. Das bedeutet, dass im Bereich zwischen 280 und 340°C (PE 360°C) eine irreversible Kunststoffschmelze erfolgt, die als Sumpf solange im Reaktor verbleibt, bis die Siedetemperatur der Kunststoffe erreicht wird.
- ▶ Bei Mischkunststoffen sieden die Fraktionen mit einem niedrigeren Siedepunkt naturgemäß vor jenen mit höherem Siedepunkt. Da sich z.B. der Fremdstoff PVC – je nach Art des PVC –

² Die Beschreibung der Ergebnisse wurde teilweise wortgleich aus dem Bericht zum DBU-Projekt 32463/01-23 übertragen.

bereits ab 280 °C zu zersetzen beginnt, gehen auch die Chlorbestandteile früher in die Gasphase über, als die Produkte aus dem Cracken der Polyolefine; Polypropylen siedet früher als HD-Polyethylen. Das bedeutet für die Temperaturführung bei der kontinuierlichen Fahrweise der Logoil-Anlage, dass für hohe Ausbeuten bzw. für hohe Crackraten die Reaktortemperatur stets nach der Kunststofffraktion mit dem höchsten Siedepunkt auszurichten ist.

- ▶ Der von der Logmed Cooperation bislang mit bestem Erfolg getestete Katalysator wurde auch für die Laborverölung eingesetzt. Dabei zeigte sich, dass er bei Mischabfällen die Spaltung der einzelnen Kunststofffraktionen mit unterschiedlichen Zersetzungsgeschwindigkeiten beschleunigt, vor allem bei den leicht zersetzbaren Substraten mit Siedetemperaturen unter 360°C, einschließlich des Start-Öls. Gleichzeitig tritt aber eine Akkumulation der schwerer zersetzbaren Substrate wie PP und vor allem PE auf. Das bedeutet, dass der Katalysator weder im Labor noch in der Technikumsanlage eine Reduzierung der Zersetzungstemperatur der Polyolefine ermöglicht. Ob bei einem Langzeittest ohne Start-Öl oder bei der Verwendung anderer Katalysatoren andere Ergebnisse erzielt werden können, muss mit weiteren Testläufen in der Logoil-Anlage geprüft werden.

Die bislang durchgeführten Untersuchungen und die dazugehörigen Ergebnisse müssen aus Sicht der Gutachter durch Langzeit-Testreihen reproduzierbar belegt werden, was bislang noch nicht in der erforderlichen Größenordnung erfolgt ist.

Hinsichtlich der Instandhaltung können nur wenige Aussagen getroffen werden, da sich über den derzeit stattfindenden Kampagnenbetrieb und das damit einhergehende häufige An- und Abfahren der Anlage große Bauteilbelastungen ergeben. Dabei sind viele Problemstellen bekannt, die durch entsprechende Maßnahmen inzwischen zumindest verbessert wurden.

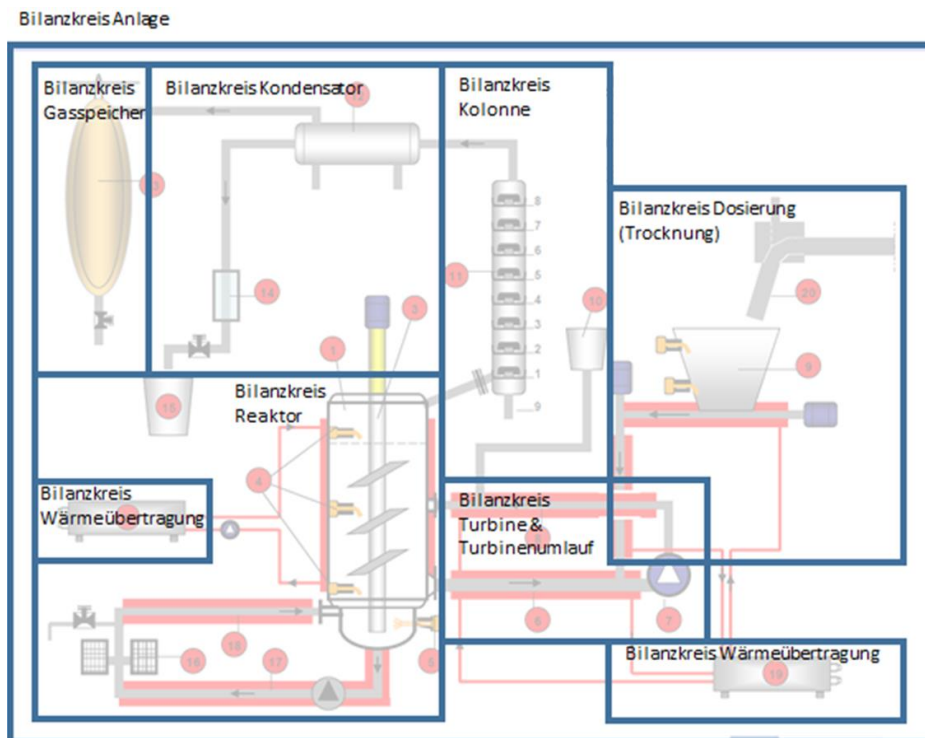
5.2.4 Massen und Energiebilanz

In Abbildung 5-17 ist das Fließbild der Logoil-Anlage und die Bezeichnung der einzelnen Anlagenteile wiedergegeben. Auf Grundlage dieses Fließbildes wurde die Anlage in einzelne Bilanzkreise unterteilt:

- ▶ Dosierung
- ▶ Turbine & Turbinenumlauf
- ▶ Reaktor
- ▶ Kolonne
- ▶ Kondensator
- ▶ Gasspeicher und
- ▶ Wärmeübertrager (elektrische Energie – Wärmeträgermedium).

In Abbildung 5-17 ist das auf Grundlage der prinzipiellen Verfahrensbeschreibung entwickelte Bilanzschema dargestellt. Die ein- und ausgehenden Massen-, Stoff- und Energieströme wurden eingezeichnet. Das für die Anfahrprozesse benötigte Start-Öl wurde für das Bilanzierungs-Schema nicht berücksichtigt. Das setzt voraus, dass ausgeschlossen werden kann, dass sich das Start-Öl zum Zeitpunkt der Bilanzierung noch im Reaktor befindet. Dies wiederum kann nur über Langzeit-Versuche sichergestellt werden, welche im Rahmen der Studie nicht durchgeführt wurden. Die vorliegenden Daten der bislang erfolgten Messungen ermöglichen es nicht, eine plausible Bilanzierung durchzuführen.

Abbildung 5-17: Verfahrensschema der Logoil-Anlage mit Bilanzkreisen



Quelle: Logmed Cooperation, verändert

5.2.5 Gesamtbewertung und Fazit

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die einzelnen verfahrenstechnischen Prozesse:

- ▶ Dosierung
- ▶ Trocknung
- ▶ Schmelzvorgang
- ▶ Verdampfungs- und Crackvorgang
- ▶ Destillation

apparatetechnisch getrennt voneinander regelbar sind, was für verfahrenstechnische Optimierungen des Gesamtverfahrens zunächst günstig erscheint.

Das Verfahren ist dem zuvor vorgestellten Dieselwest-Verfahren sehr ähnlich, unterscheidet sich im Grundsatz nur in der Wahl der miteinander verschalteten Apparate.

Wie bei dem Verfahren der Recenso ist zu konstatieren, dass das Verfahren grundsätzlich geeignet ist, aus Polymerabfällen eine hochkalorische Flüssigkeit zu erzeugen, die als Brennstoff verwendet werden oder als Einsatzstoff für Raffinerien oder die chemische Industrie interessant sein kann. Die Qualität höherwertiger, normierter Treibstoffe wird allerdings nicht erreicht.

Eine weitergehende Bewertung des Verfahrens ist derzeit nicht möglich, da weder Langzeiterfahrungen noch belastbare Ergebnisse zur Massen- und Energiebilanzierung vorliegen. Es können also keine Aussagen zu den technisch erzielbaren Ausbeuten getroffen werden. Ebenso ist die Robustheit und Stabilität der Technik nicht einschätzbar. Dementsprechend sind auch keine Aussagen zur Wirtschaftlichkeit möglich.

Um das grundsätzlich vorhandene Potenzial der Technologie weiter auszuloten und gleichzeitig die angesprochenen offenen Fragen (Bilanzierung) zu klären, ist auch hier ein Langzeitversuch über mehrere Wochen unerlässlich. Es wird wiederum vorgeschlagen, den Prozess über mindestens 1000 Stunden ohne Unterbrechung mit einer polymerreichen Abfallfraktion zu beschicken und diesen Dauerversuch wissenschaftlich und analytisch zu begleiten. Auf dieser Basis sollte es möglich sein, fundierte Aussagen zu den erzielbaren Destillat-Ausbeuten, zur Stabilität des Prozesses und hinsichtlich möglicher Schwachstellen zu gewinnen. Aufgrund des hohen Aufwandes für den Betrieb über eine so lange Zeit, ist dies nicht durch den Betreiber allein finanzierbar sondern nur bei einer entsprechenden öffentlichen Förderung oder einem industriellen Engagement realisierbar.

5.3 Pyrum

Die Pyrum Innovations AG wurde im Jahr 2008 mit dem Ziel gegründet, einen neuen Verfahrensansatz zur Pyrolyse von Altreifen [31] zur technischen Reife zu führen und zu vermarkten [25]. Hierzu wurde der Prozess zunächst in einer Technikumsanlage mit einem Durchsatz von 25 kg/h erprobt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde am Standort Dillingen im Jahr 2015 eine Pilotanlage im technischen Maßstab, mit einem Durchsatz von 5000 Mg/a, errichtet (Abbildung 5-18), die seither in Kampagnen zur technischen Erprobung und Weiterentwicklung des Verfahrens betrieben wird.

Abbildung 5-18: Pilotanlage Pyrum Innovations AG, Dillingen/Saar [24]



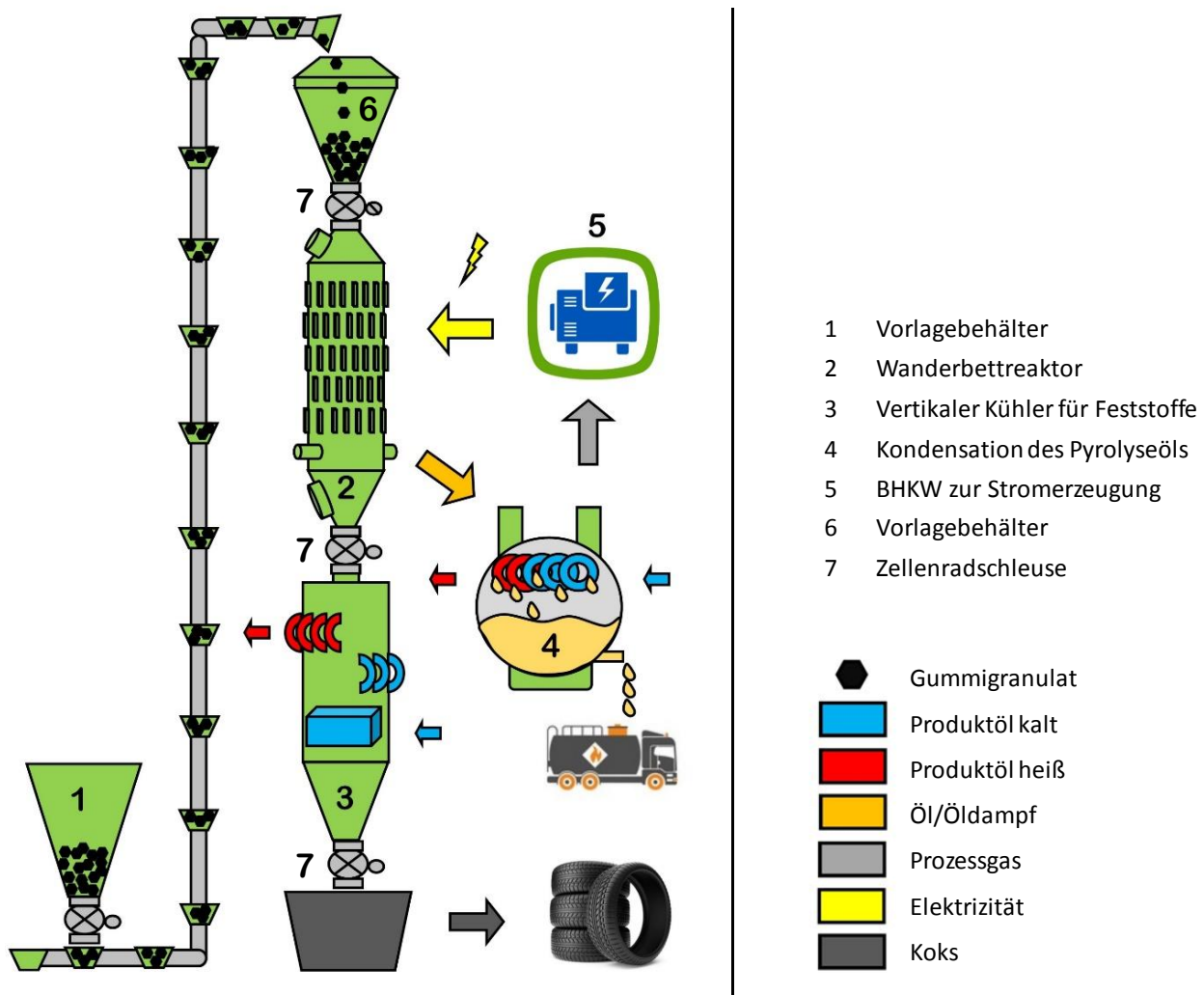
Quelle: Pyrum Innovations AG

Charakteristikum des Verfahrens ist der verwendete Reaktor. Im Gegensatz zu den üblicherweise eingesetzten Drehrohren (vgl. Kapitel 3.1) wird von Pyrum ein neuartiger, elektrisch beheizter Wanderbettreaktor zur Reifenpyrolyse eingesetzt. Als vermarktbar Produkte werden Koks und Öl erzeugt. Der Koks soll nach Aufbereitung beispielsweise als Pigment in die Farbenindustrie verkauft werden. Das kondensierte Öl wird derzeit an Raffinerien abgegeben. Mit zwei industriellen Partnern wird aktuell die Herstellung von Carbon Black aus dem kondensierten Öl erprobt. Das verbleibende Permanentgas wird in einem Gasmotor verstromt und die dabei erzeugte Elektrizität zur Beheizung des Reaktors genutzt, ein geringer Überschuss in Netz eingespeist.

5.3.1.1 Verfahrensbeschreibung

Abbildung 5-19 zeigt ein grobes Übersichtsschema des Gesamtverfahrens, in Abbildung 5-20 ist der Pyrolysereaktor dargestellt, wie er in der zugehörigen Patentschrift der Firma Pyrum Innovations beschrieben wird [31]. Charakteristische Betriebsdaten des Verfahrens finden sich in Tabelle 5-5.

Abbildung 5-19: Verfahrensschema des Reifenpyrolyseverfahrens der Firma Pyrum Innovations



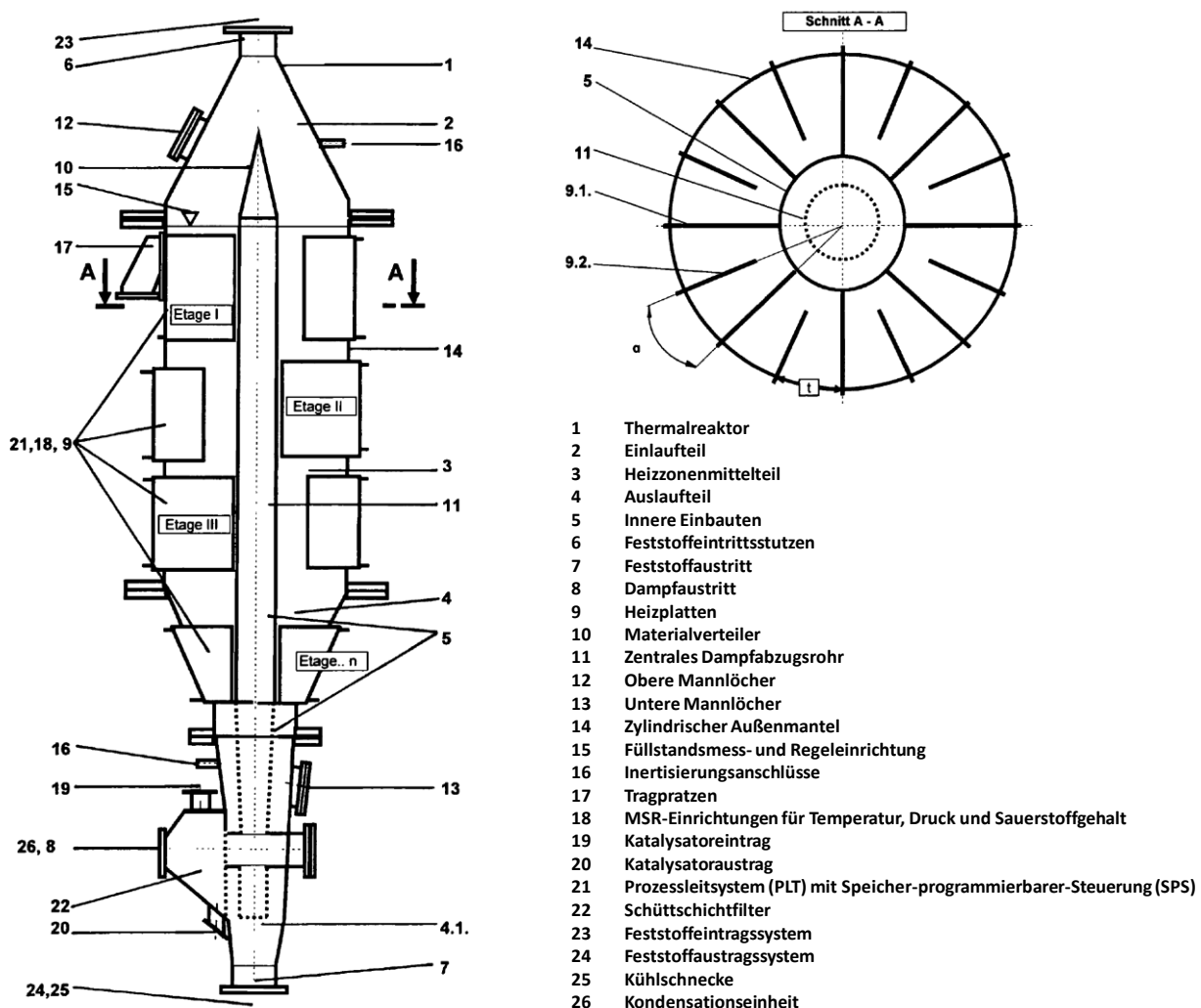
Quelle: Pyrum Innovations AG

Wesentliche Einsatzstoffe für das Verfahren sind vorzerkleinerte Altreifen und ähnliche Reststoffe aus Gummi. Laut Angaben des Betreibers soll das Verfahren auch dazu geeignet sein, weitere Materialien,

wie EPDM³ und bestimmte Kunststoffabfälle, aber auch Bitumen zu behandeln. Die bisher gemachten und hier dargestellten Betriebserfahrungen beziehen sich jedoch ausschließlich auf den Betrieb mit vorzerkleinerten Altreifen.

Im aktuellen Zustand der Pilotanlage in Dillingen ist es erforderlich, dass die Einsatzmaterialien bereits vorkonfektioniert angeliefert werden, da bisher noch keine Aufbereitungsanlagen, also Shredder und Metallabscheidung, am Standort vorhanden sind. Diese Verfahrensbestandteile sollen in nächster Zukunft nachgerüstet werden, um den gemeinsamen Betrieb der vollständigen Prozesskette abbilden zu können. Es ist vorgesehen, eine entsprechende Annahmelogistik zur Einlagerung der angenommenen Altreifen aufzubauen. Von dort sollen die Reifen zunächst einem Mehrwellen-Zerkleinerer zugeführt werden. Im Anschluss daran werden Stahl und Textilteile abgetrennt und einer stofflichen Verwertung zugeführt. Das verbliebene Material, das im Wesentlichen aus Gummi besteht (nach der Zerkleinerung auf < 6 mm mit weniger als 1 Ma-% Metallanteil), kann dem Reaktor (nach Zwischenlagerung) in einem Korngrößenspektrum zwischen 1 und 14 mm (ideal 3-6 mm) zugeführt werden.

Abbildung 5-20: Patentierter Wanderbettreaktor zur Reifenpyrolyse der Firma Pyrum Innovations



Quelle: Patentschrift DE 10 2011 000 037 B4 [30]

³ EPDM = Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk

Hierfür wird das Gummigranulat mithilfe eines Becherwerks zum Vorlagebehälter über dem Kopf des Reaktors gefördert. Die Dosierung des Materials über eine Verteileinrichtung und der Transport durch den Wanderbettreaktor erfolgt rein schwerkraftgetrieben. Der Koksaustrag am Boden des Reaktors wird über eine Zellenradschleuse gesteuert. Die Materialbeheizung im Reaktor wird über elektrische Heizelemente realisiert, die mit Eigenstrom aus dem Pyrolysegas-BHKW versorgt werden. In der Reaktorskizze in Abbildung 5-20 (vgl. runden Querschnitt rechts in der Abbildung) ist die Anordnung der Heizplatten gut zu erkennen. In verschiedenen Etagen sind Einbauten ringförmig wie Radspeichen im Reaktor angeordnet, die die Heizelemente enthalten. Die Elemente sind so gestaltet und positioniert, dass ein ungehinderter Materialtransport bei gleichzeitig gutem Wärmeeintrag realisiert werden kann.

Tabelle 5-5: Betriebsdaten der Anlage in Dillingen

Einsatzstoffe		Reaktionsparameter	
Altreifen, sonst. Gummiabfälle, bestimmte Kunststoffabfälle, Bitumen		Temperatur	600-700 °C
Qualitätsvorgaben für die Einsatzstoffe		Verweilzeit Feststoff	2,5-3,5 h
Korngröße	1-14 mm (optimal 3-6 mm)	Betriebsdruck (absolut)	1-1,2 bar
Wassergehalt	< 1 Ma-%	Produkte	Produkte
Aschegehalt	< 10 % (höhere Werte möglich)	Gas	10-20 %
Heizwert	28-36 MJ/kg	Pyrolyseöl	30-50 %
		Koks	40-55 %

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten der Pyrum Innovations AG

Abbildung 5-21: Unterteil des Kokskühlers und Rohrkettenförderer am Reaktor der Firma Pyrum Innovations, Standort Dillingen



Quelle: Pyrum Innovations AG

Während des Durchgangs durch den Reaktor, von oben nach unten, wird das Gummigranulat schnellst möglich bis zu Temperaturen von 600-700 °C aufgeheizt (Abbildung 5-24) und dabei entgast. Die bei der Pyrolyse entstehenden Dämpfe werden über ein zentrales Sammelrohr abgezogen und einer mehrstufigen Kondensationseinheit zugeführt. Dort werden die kondensierbaren Bestandteile im Pyrolysegas verflüssigt (Pyrolyseöl). Das erzeugte Pyrolyseöl wird über Wärmeübertrager weiter abgekühlt und vor dem Abtransport in zwei großen Erdtanks zwischengelagert. Ein Teilstrom des Pyrolyseöls wird als Kühlmedium für den Kondensator verwendet.

Das nach der Kondensation verbleibende Permanentgas wird in einem Zyklon von Flüssigkeitströpfchen befreit, verdichtet und in einem Gastank zwischengespeichert. Das Gas wird in der An- und Abfahrphase des Reaktors mit Hilfe einer Gasmischanlage durch Zugabe von Erdgas auf den erforderlichen Heizwert von 5kWh/m³ i.N. eingestellt, bevor es im Blockheizkraftwerk verstromt wird. Im kontinuierlichen Betrieb werden die BHKW mit reinem Pyrolysegas (ohne Erdgasbeimischung) betrieben. Als Sicherheitseinrichtungen, bei Ausfall der BHKW, ist eine Notfackel vorhanden.

Der nach dem Entgasen des Gummis verbleibende Koks wird unter dem Reaktor in einem Kokskühler indirekt abgekühlt. Anschließend wird der Koks mit einem Rohrkettentransporter (vgl. Abbildung 5-21) zur Lagerung einem Container zugeführt. Eine weitere Konfektionierung oder Aufbereitung des Kokes ist am Standort Dillingen derzeit noch nicht vorhanden, eine Mahlanlage ist in Planung.

5.3.2 Produktqualität

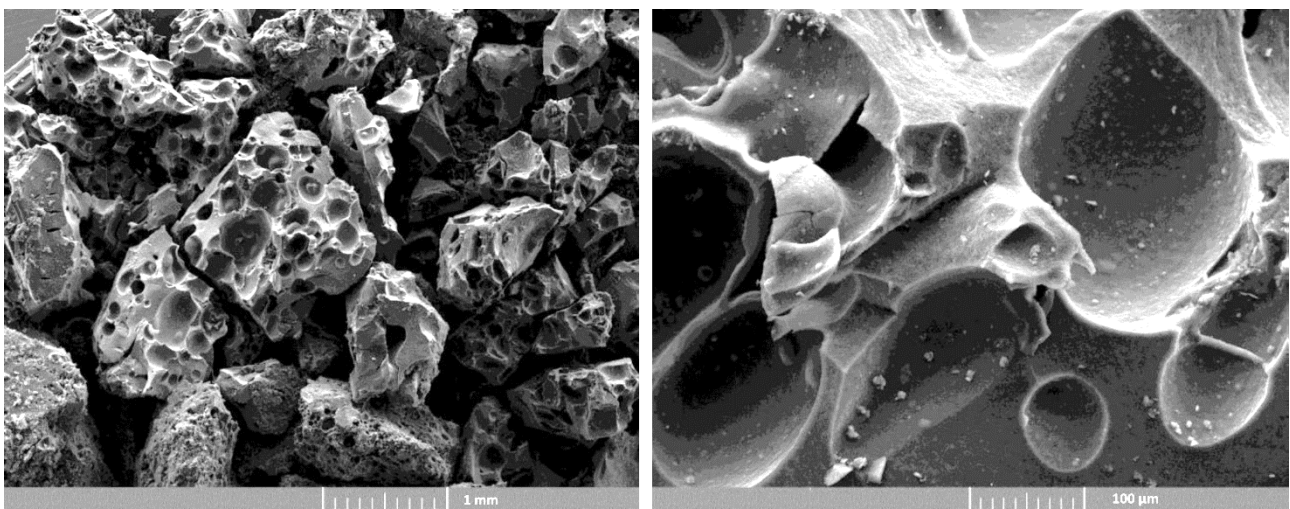
Produkte der Reifenpyrolyseanlage von Pyrum Innovations sind Koks und Pyrolyseöl. Das verbleibende Permanentgas wird zur Stromerzeugung in einem BHKW am Standort verwertet.

5.3.2.1 Koks

Tabelle 5-8 zeigt eine Übersicht der charakteristischen Parameter für das in der Dillinger Anlage erzeugte koksartige Produkt, im Vergleich zu fossilem Carbon Black aus der Primärproduktion und dem Produkt aus einem anderen Reifenpyrolyseverfahren. In Abbildung 5-22 sind REM-Aufnahmen des ungemahlene Kokes aus Dillingen wiedergegeben.

Da die Reifenschnitzel im Reaktor keiner mechanischen Belastung unterliegen, erfolgt lediglich eine Entgasung und keine Zerkleinerung des Materials. Dementsprechend nimmt die Korngröße der Partikel während der Pyrolyse kaum ab und liegt am Ausgang zwischen 2 und 5 mm (Abbildung 5-22). Das Material wirkt porös, offensichtlich verursacht durch die Entgasung während der Pyrolyse.

Abbildung 5-22: REM-Aufnahme des Kokes aus der Reifenpyrolyse der Pyrum Innovations AG



Quelle: Pyrum Innovations AG [14]

Tabelle 5-6: Charakteristische Parameter von Carbon Black aus der Pilotanlage der Pyrum Innovations AG [5] [14], sowie Vergleichswerte von Rußen aus der Primärproduktion [22] und aus der Reifenpyrolyse mittels Drehrohrverfahren (n.b. = nicht bestimmt)

Parameter	Einheit	Anderes Verfahren zur Reifenpyrolyse	Pyrum [5]	Pyrum [14]	Primär-Produktion [22]
BET-Oberfläche (N ₂)	[m ² /g]	29-70		55	6-500
STSA ¹ (N ₂)	[m ² /g]	57-60			
Primärpartikelgröße Ø	[nm]	65			10-500
Leervolumen	[cm ³ / 100g]	62			
OAN ²	[ml/ 100 g]	86-95			37-200
COAN ³	[mg/ 100 g]	71-78			
Iodadsorptionszahl	[mg/g]	96		114,5	6-450
Mahlgrad	[µm]	< 10			
Siebrückstand (45 µm)	[ppm]	< 100			
Dichte	[g/cm ³]	1,9			1,7-1,9
Schüttdichte	[g/l]	450-480		300-500	
Abrieb	[Ma-%]	2			
Feinanateil	[Ma-%]	2			
Wassergehalt	[Ma-%]	0,7-1,3	0,6-1	0,9	
Asche	[Ma-%]	18,5-22	19,9-23,5	15-25	< 1
Flüchtige	[Ma-%]	4,2	0,8-1,3		
Elementarzusammensetzung					
Kohlenstoff	[Ma-%]	75-80	74,2-77,9	75-92	96-99,5
Wasserstoff	[Ma-%]	0,9-1,2	0,19-0,45	0,2-0,45	0,2-1,3
Stickstoff	[Ma-%]	0,2-1	0,27-0,32	0,3-0,4	< 0,7
Schwefel	[Ma-%]	1,9-2,6	1,7-1,9	1,7-2,5	0,1-1
Halogene ges.	[Ma-%]	< 0,1			
Silizium	[Ma-%]	1,9-4,5		1,4-7,9	
Zink	[Ma-%]	3,2-4,5		2,3-4	
Aluminium	[Ma-%]	0,1-0,5		0,1-0,6	
Kalzium	[Ma-%]	1,1-4,5			
Eisen	[Ma-%]	0,1-0,2		0,1-0,4	
Kalium	[Ma-%]	0,1		0,1-0,2	
Heizwert	[MJ/kg]	27,7		23-30	
pH-Wert	[-]	8-8,2			4-10
Toluol – extrahierbare Anteile (Restölgehalt)	[Ma-%]	1			< 0,1
Toluolverfärbung	[Ma-%]	35-60			20-160

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten der Pyrum Innovations AG und aus [5] [14] [22]

Nach der Aufmahlung des Kokes werden laut Betreiberangaben Partikelkorngrößen im Bereich von 0-250 µm erreicht. Da von diesem Material keine weiteren Daten bzw. mikroskopischen Aufnahmen vorliegen, kann keine Aussage über die Primärpartikelgröße des Carbon Black getroffen werden. Üblicherweise liegt diese unterhalb von 500 nm, also weit unterhalb des angegebenen Bereichs. Derartige Korngrößen werden auch von anderen Pyrolyseverfahren für Altreifen erreicht (vgl. Tabelle 5-6).

Die übrigen in der Tabelle angegebenen Parameter liegen zumeist im Bereich von Literaturwerten für die Reifenpyrolyse. Flüchtigen- und Wasserstoffgehalt zeigen im Vergleich zum Carbon Black aus der Drehrohranlage signifikant niedrigere Werte. Dies deutet darauf hin, dass die Entgasung im Pyrum Wanderbettreaktor weitergeht als im Drehrohr.

Der Betreiber gibt an, dass die nach der Pyrolyse vorhandene BET-Oberfläche des nicht aufgemahlenen Kokes von 55 m²/g durch eine Dampfaktivierung bei 800-870 °C auf 480-525 m²/g erhöht werden konnte [14].

5.3.2.2 Pyrolyseöl

Abbildung 5-23 zeigt eine Fotografie des in Dillingen erzeugten Pyrolyseöls. Die Zusammensetzung des Öls ist in Tabelle 5-7 wiedergegeben. Zum Vergleich ebenfalls in der Tabelle angegeben sind die entsprechenden Parameter für das Pyrolyseöl aus einem anderen Reifenpyrolyseverfahren im Drehrohr, sowie für konventionellen Diesel nach der Norm DIN EN 590. Rot markiert sind jeweils die Werte, die nicht der Dieselnorm entsprechen.

Tabelle 5-7: Zusammensetzung von Produktölen aus der Reifenpyrolyseanlage der Pyrum Innovations AG (* Dichtebestimmung bei 20 °C)

Parameter	Einheit	Anderes Verfahren zur Reifenpyrolyse	Pyrum [19]	Pyrum [7]	Pyrum [8]	Pyrum [15]	Diesel DIN EN 590
Cetanzahl							> 51
Cetanindex		27,9					> 46
Dichte [15 °C]	[kg/m ³]	916	* 909	910	953	* 810-910	820-845
PAK	[Ma-%]		8,9				< 8,0
Kohlenstoff	[Ma-%]			73,3	74,0	85	
Wasserstoff	[Ma-%]			10,4	10,5	12	
Stickstoff	[Ma-%]			0,85	1,64	2	
Schwefel	[mg/kg]	8.000-9.000		14.700	16.400	10.000	< 10,0
Chlor	[mg/kg]			265	56	400	
Mangan	[mg/l]						< 2,0
Flammpunkt	[°C]	< 20		<-20	<-20	(<-20) <40	> 55
Heizwert	[MJ/kg]	38,5-41,5		41,7	41,7	35-45	
Koksrückstand	[Ma-%]						< 0,30
Aschegehalt	[Ma-%]						< 0,010
Wassergehalt	[Ma-%]	0,1-1,1	0,15	0,4	0,4		< 0,020
Viskosität [20 °C]	[mm ² /s]	2,4-6,4				2,5-4,5	
Viskosität [40 °C]	[mm ² /s]	3,3	1,92	0,81	1,54	1,1-2,6	2-4,5
Viskosität [50 °C]	[mm ² /s]	2,0				1,6	

Destillat							
bei 250 °C	[Vol-%]		58			55	< 65
bei 350 °C	[Vol-%]	94	80			78	> 85
95 Vol-% bei	[°C]		470			470	< 360

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten der Pyrum Innovations AG [7] [8] [15] [19]

Es fällt direkt auf, dass, ähnlich wie bei den betrachteten Verölungsverfahren für Kunststoffe, eine ganze Reihe von Parametern nicht den Vorgaben der Dieselnorm entspricht. Allerdings ist dies kein Spezifikum des Pyrum-Verfahrens sondern, aufgrund der Zusammensetzung der Einsatzstoffe, typisch für die Produkte aus der Reifenpyrolyse, wie der Vergleich mit den Ergebnissen aus dem anderen Recycling-Verfahren zeigt.

Typisch für Pyrolyseöl aus Altreifen sind die Abweichungen bei den Parametern Schwefelgehalt und Flammpunkt. Während die Norm einen Schwefelgehalt unter 10 mg/kg vorschreibt, erreichen typische Pyrolyseöle aus der Reifenbehandlung Werte von 10 g/kg und mehr. Diese Werte sind noch erheblich höher, als bei den oben beschriebenen Produktölen aus den Kunststoff-Verölungsverfahren. Eine Entschwefelung ist vor einer energetischen Nutzung also unerlässlich. Da auch noch andere Parameter Abweichungen zur Norm zeigen, empfiehlt sich die Aufbereitung des erzeugten Öls in klassischen Raffineriebetrieben, wie es derzeit vom Betreiber auch vorgesehen ist. In der Erprobung befindet sich aktuell die Erzeugung von Carbon Black aus dem Pyrolyseöl. Laut Angaben des Betreibers kann das erzeugte Pyrolyseöl für weniger als 0,15 € pro Liter produziert werden [25].

Abbildung 5-23: Produkt der Pyrolyse von Reifengranulat aus der Pilotanlage von Pyrum Innovations



Quelle: Pyrum Innovations AG

5.3.2.3 Pyrolysegas

Tabelle 5-8 zeigt die typische Zusammensetzung des Permanentgases aus der Anlage in Dillingen. Da der Reaktor zu Beginn jeder Kampagne vollständig mit Stickstoff inertisiert werden muss, stellt sich

die angegebene Pyrolysegaszusammensetzung erst nach einer gewissen Betriebszeit ein. Ein geringer Stickstoffanteil ist zusätzlich zu den in der Tabelle angegebenen Komponenten immer vorhanden.

Der hohe Anteil an Wasserstoff und Methan im Gas zeigt, dass es für eine energetische Verwertung sehr gut geeignet ist. Problematisch ist für eine derartige Nutzung aber der hohe Anteil an schwefelhaltigen Komponenten, insbesondere von Schwefelwasserstoff. Bei der motorischen Nutzung entstehen daraus durch Oxidation mit Luftsauerstoff Schwefeloxide, die problematische Emissionen darstellen und in Reaktion mit Feuchtigkeit zur Bildung von schwefliger und Schwefelsäure führen und damit in kurzer Zeit zur Versauerung des Motoröls im BHKW führen können.

Tabelle 5-8: Zusammensetzung des Pyrolysegases aus der Pilotanlage der Pyrum Innovations AG

Komponente		Einheit	Anteil
Kohlendioxid	CO ₂	[Vol.-%]	0,5-3
Wasserstoff	H ₂	[Vol.-%]	35-48
Methan	CH ₄	[Vol.-%]	30-40
Kohlenmonoxid	CO	[Vol.-%]	1,5-5
Ethen	C ₂ H ₄	[Vol.-%]	2-9
Ethin	C ₂ H ₂	[Vol.-%]	bis 0,2
Ethan	C ₂ H ₆	[Vol.-%]	3-7
Propen	C ₃ H ₆	[Vol.-%]	1,5-5
Propan	C ₃ H ₈	[Vol.-%]	0,5-4
Isobuten (2-Methyl-1-propen)	C ₄ H ₈	[Vol.-%]	1 – 3
cis-2-Buten	C ₄ H ₈	[Vol.-%]	0,2 – 1,3
trans-2-Buten	C ₄ H ₈	[Vol.-%]	bis 0,12
Iso-Butan	C ₄ H ₁₀	[Vol.-%]	Bis 1,5
n-Butan	C ₄ H ₁₀	[Vol.-%]	0,15-1
n-Pentan	C ₅ H ₁₂	[Vol.-%]	bis 2
Benzol	C ₆ H ₆	[Vol.-%]	bis 0,7
Toluol	C ₇ H ₈	[Vol.-%]	bis 0,2
Xylol	C ₈ H ₁₀	[Vol.-%]	bis 0,13
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	[mg/m ³]	bis 25.000
Carbonylsulfid	COS	[mg/m ³]	bis 250
Kohlenstoffdisulfid	CS ₂	[mg/m ³]	bis 50
Ammoniak	NH ₃	[mg/m ³]	bis 900

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten der Pyrum Innovations AG

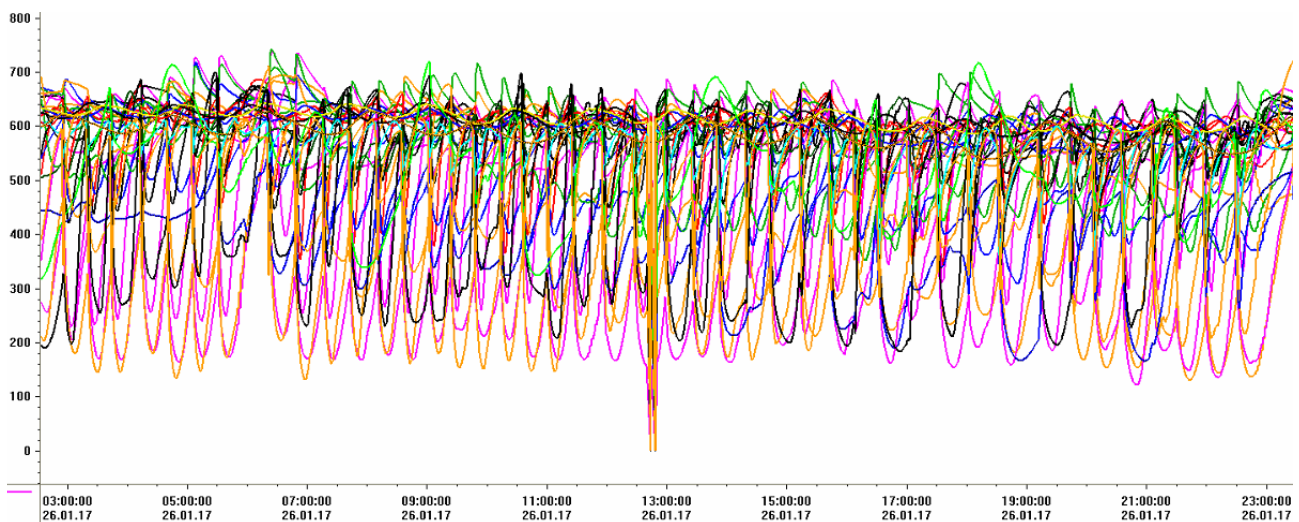
5.3.3 Betriebserfahrungen

Beim Betrieb des Reaktors erfolgt keine kontinuierliche Granulatdosierung, um Verklebungen in der Schüttung und somit Verstopfungen am Reaktorkopf zu vermeiden. Vielmehr wird eine periodische Zuführung des Einsatzmaterials realisiert, um ein direktes Ausgasen der leichter flüchtigen Kompo-

nennten aus dem neu eingetragenen Granulat vor dessen Weitertransport durch den Reaktor zu ermöglichen. Unter diesen Betriebsbedingungen kann ein ungehinderter und störungsfreier Feststofftransport und Reaktorbetrieb sichergestellt werden. Anhand von Abbildung 5-24 ist die Betriebsweise des Wanderbettreaktors gut nachzuvollziehen. Dargestellt sind die Temperaturverläufe über die Zeit in den verschiedenen Reaktionszonen, von unten nach oben in orange – pink – schwarz – blau – grün.

Abbildung 5-24: Temperaturverläufe im Wanderbettreaktor von Pyrum Innovations in Dillingen

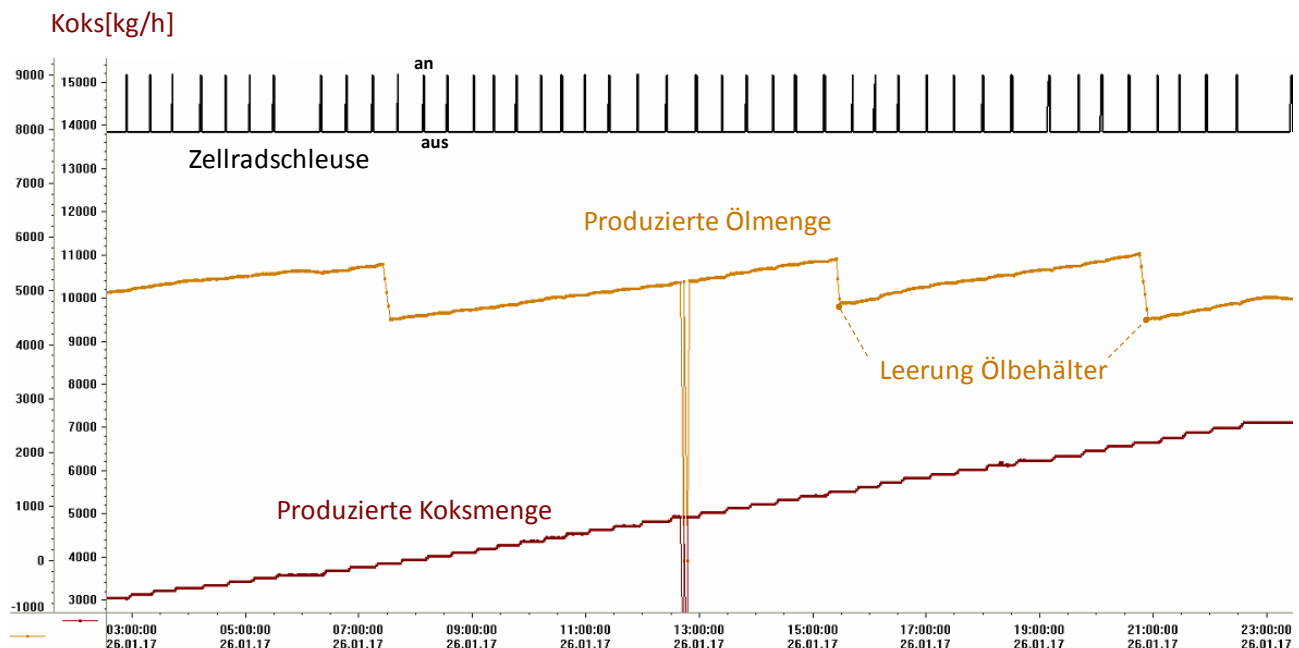
Temperatur im Reaktor [°C]



Quelle: Pyrum Innovations AG

Abbildung 5-25: Koks und Pyrolyseölproduktion, sowie Dosierung (Signal Zellenradschleuse) an der Versuchsanlage von Pyrum Innovations in Dillingen

Füllstand Ölbehälter [l]



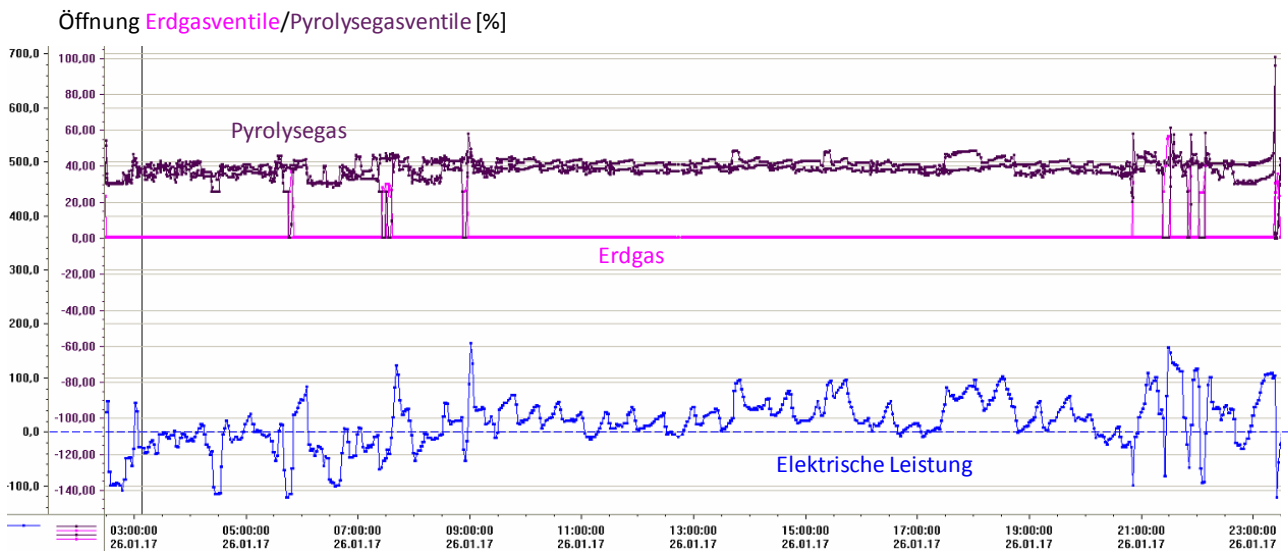
Quelle: Pyrum Innovations AG

Bei jedem Befüll- und Förderzyklus fällt die Temperatur in den einzelnen Heizzonen. Je weiter oben die Heizzone angeordnet ist, desto tiefer sinkt die Temperatur. In den obersten Heizzonen stellen sich dabei kurzzeitig Temperaturen von 150 °C und weniger ein. Nach der Befüllung steigt die Temperatur dann sehr schnell an. In den unteren Heizzonen werden in der Nähe der Heizelemente Temperaturen über 700 °C erreicht. Das Material erreicht an allen Stellen eine Mindesttemperatur von 500 °C.

Abbildung 5-25 zeigt, dass der Wanderbettreaktor sehr stabil betrieben werden kann. Anhand des schwarz dargestellten Signals der Zellenradschleuse kann die Dosierung des Gummigranulates gut nachvollzogen werden. Da die Zugabe neuen Einsatzstoffes die Ausschleusung einer entsprechenden Menge an Koks erfordert, zeigt auch der Verlauf der produzierten Koksmenge ein stufenförmliches Profil. Die Produktion des Pyrolyseöls wird von der periodischen Zugabe jedoch wenig beeinflusst, es zeigt sich ein fast stationärer und störungsfreier Verlauf.

Abbildung 5-26: Energieverbrauch und -produktion der Versuchsanlage von Pyrum Innovations

Elektrische Leistung [kW]



Quelle: Pyrum Innovations AG

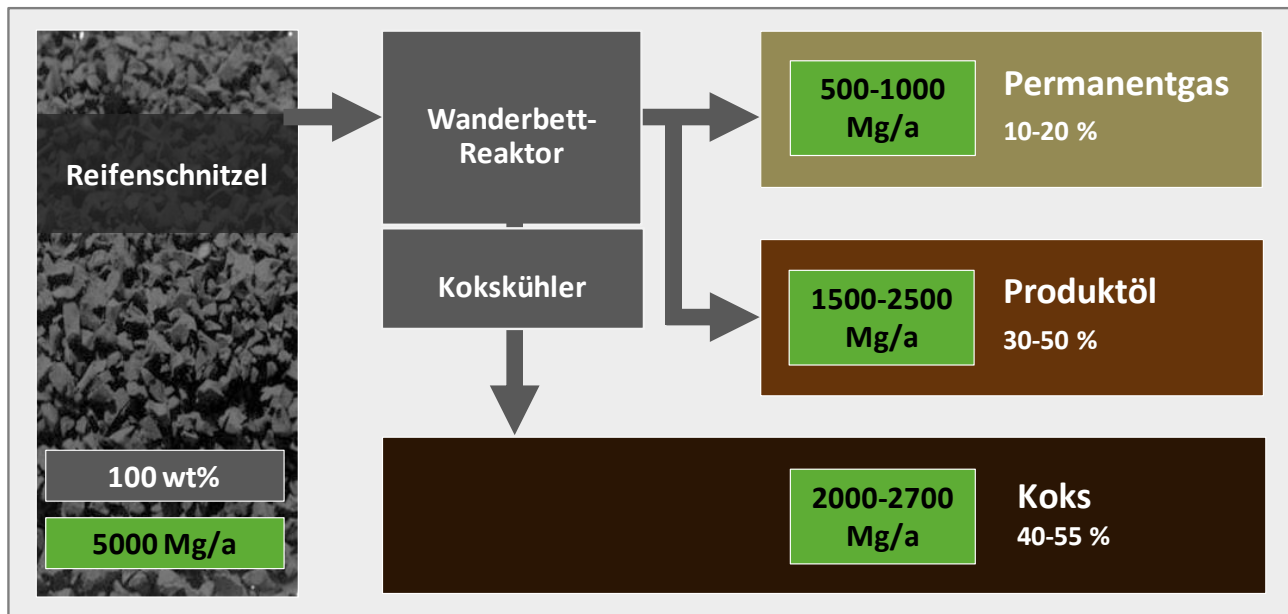
In Abbildung 5-26 sind Energieverbrauch und -produktion der Versuchsanlage in Dillingen abzulesen. Anhand der prozentualen Öffnung der jeweiligen Ventile kann die im BHKW eingesetzte Menge an Pyrolysegas (braun) und Erdgas (pink) nachvollzogen werden. Es zeigt sich, dass über den hier betrachteten beispielhaften Zeitraum fast ausschließlich Pyrolysegas und nur wenig Erdgas zur Verstromung im BHKW verwendet wurde. Zudem war die erzeugte elektrische Leistung (blau) meist ausreichend, um einen Überschuss an Elektrizität ins Netz einzuspeisen (positive Werte der blauen Kurve). Das Verfahren ist also grundsätzlich für einen autothermen Betrieb geeignet und kann im Idealfall sogar geringe Überschüsse an elektrischer Energie abgeben.

Abbildung 5-27 zeigt Angaben zur Massenbilanz, wie sie vom Betreiber zur Verfügung gestellt wurden. Die Aufstellung einer Energiebilanz ist für das Verfahren nicht möglich, da nicht für alle Stoffströme die entsprechenden Heizwerte vorliegen.

Die Angaben zur Massenbilanz sind schlüssig und liegen im typischen Bereich, wie sie für die Produkte aus der Reifenpyrolyse in der Literatur beschrieben werden [18].

5.3.4 Massenbilanz

Abbildung 5-27: Massenbilanz Pyrum Reifenpyrolyseanlage mit einem Durchsatz von 5000 Mg/a



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten der Pyrum Innovations AG

5.3.5 Gesamtbewertung und Fazit

Aus terminlichen Gründen konnte der Besuch an der Anlage nicht während des laufenden Betriebes erfolgen. Daher war es den Verfassern der vorliegenden Studie nicht möglich, die Funktionalität des Verfahrens durch persönlichen Augenschein zu prüfen. Durch die vorgelegten Dokumente, Produktproben, Analysenergebnisse, Prozessdaten und Fotodokumentationen sowie die Begehung der Anlage im kalten Zustand, konnten die Betreiber dennoch ein schlüssiges und überzeugendes Bild vom Verfahren und dessen Funktionalität vermitteln.

Es konnte überzeugend dargestellt werden, dass im Reaktor – obwohl dieser über keinerlei bewegliche Einbauten verfügt – ein rein schwerkraftgetriebener kontinuierlicher Feststofftransport (Wanderbett) bei gleichzeitiger fast vollständiger Entgasung der flüchtigen Gummibestandteile realisiert werden kann. Der erzeugte Koks ist grobstückig, von der Größe vergleichbar mit dem eingesetzten Gummigranulat, und kann laut Betreiberangaben nach weiterer Aufbereitung vermarktet werden. Gleiches gilt für das produzierte Pyrolyseöl, das zur weiteren Aufbereitung gegen Entgelt abgegeben wird.

Das Pyrolyseverfahren der Firma Pyrum Innovations ist grundsätzlich geeignet, aus vorzerkleinerten Altreifen und anderen, vergleichbaren Gummirückständen einen Koks zu erzeugen, der nach entsprechender Aufbereitung wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden kann. Das ebenfalls als Produkt anfallende Öl hat allerdings sehr hohe Schwefelgehalte und niedrige Flammpunkte. Eine direkte Vermarktung erscheint daher nicht zielführend. Eine Abgabe an Raffinerien zur weiteren Aufbereitung ist grundsätzlich möglich, wird jedoch von der zuverlässigen Lieferung relevanter Mengen abhängen. Als interessanten Vermarktungsweg für das gewonnene Öl gibt der Betreiber die Weiterverarbeitung zu Carbon Black und den direkten Einsatz als Ersatzbrennstoff in Stromgeneratoren oder Schiffsmotoren an.

Alle hier getroffenen Aussagen beziehen sich ausschließlich auf den Anlagenbetrieb mit Gummigranulat. Der (von den Betreibern als Option bezeichnete) Einsatz weiterer Reststoffe, wie zum Beispiel von Kunststoffen, wird dagegen kritisch gesehen. Da das Verfahren eine weitgehende Entgasung der

flüchtigen Bestandteile zur Folge hat, stellt sich die Frage, welche Prozesse beim Einsatz reiner Kunststofffraktionen, die fast ausschließlich aus flüchtigen Bestandteilen bestehen, im Reaktor ablaufen sollen. Ein Verkleben des Kunststoffmaterials im Eingangsbereich scheint dabei nicht unwahrscheinlich.

Ähnlich wie bei den beiden diskutierten Verölungstechnologien (vgl. Kapitel 5.1 und 5.2) besitzt auch das vorgestellte Verfahren zur Reifenpyrolyse das grundsätzliche Potenzial für einen erfolgreichen technischen Einsatz (hier für Gummifraktion). Für die weitere Verfahrensentwicklung sowie die Identifikation und Beseitigung von Schwachstellen sollte am Standort Dillingen zunächst die vollständige Verfahrenskette zur Reifenaufbereitung, inklusive Vorzerkleinerung und Aufbereitung des Carbon Black, errichtet und über einen längeren Zeitraum im kontinuierlichen Betrieb erprobt werden. Nur nach mehrwöchigem Dauerbetrieb lässt sich das Potenzial der Technologie verlässlich abschätzen.

6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden Verfahren zur Pyrolyse und Verölung von Kunststoff- und Gummifractionen betrachtet, die dem Zweck dienen, die verwendeten Einsatzstoffe thermochemisch soweit zu zerlegen, dass die erzeugten Feststoffe und Flüssigkeiten wieder in den Rohstoffkreislauf zurückgeführt werden können.

Der Fokus der Verölungsverfahren liegt – wie der Name bereits nahelegt – auf der Gewinnung eines flüssigen Produktes, das als Brenn- oder Kraftstoff eingesetzt werden kann. Für hochwertige Einsatzgebiete ist hierfür in der Regel eine Aufbereitung bzw. Raffinierung unerlässlich. Meist haben die erzeugten Öle einen zu hohen Schwefel- und Wassergehalt, oft sind Partikel enthalten und in der Regel entsprechen Flammpunkt und Destillationsverlauf nicht den üblichen Kraftstoffnormen (z.B. DIN EN 590).

Auch viele Pyrolyseverfahren verfolgen den Ansatz, die erzeugten flüssigen Kohlenwasserstoffe als Brenn- oder Kraftstoffe zu verwerten. Die Qualität dieser Öle ist noch deutlich geringer als bei den Verölungsverfahren, eine motorische Nutzung entsprechend schwieriger. Haupt- bzw. Zielprodukt der Pyrolyseverfahren ist aber meist der verbleibende Feststoff, der Pyrolysekoks. Im Fall der Reifenpyrolyse handelt es sich dabei im Wesentlichen um Carbon Black, das nach einer Aufbereitung in der Regel als Pigment in der Farbenindustrie Verwendung finden soll, da die Qualität für einen erneuten Einsatz bei der Reifenproduktion meist nicht ausreichend ist.

Im Rahmen dieser Studie wurden zwei Verölungsverfahren für Kunststoffabfälle und ein Pyrolyseverfahren für Altreifen näher betrachtet:

- ▶ Dieselwest (Verölung)
- ▶ Logoil (Verölung)
- ▶ Pyrum (Reifen-Pyrolyse)

Als wesentliches Fazit der Evaluation ist festzuhalten, dass alle drei betrachteten Verfahren grundsätzlich dazu geeignet sind, die spezifizierten Einsatzstoffe zu verwerten.

Mit beiden Verölungsverfahren können entsprechend sortenreine und aufbereitete Kunststoffe depolymerisiert und in ein flüssiges kohlenwasserstoffreiches Produkt überführt werden. Die Zerlegung der Polymere ist dabei auf die Temperaturbehandlung zurückzuführen. Die Wirkung der von den Betreibern häufig als notwendig erachteten Katalysatoren oder ebenfalls postulierte “tribochemische Effekte“ auf molekularer Basis werden in diesem Zusammenhang als wenig oder nicht relevant angesehen. Es ist davon auszugehen, dass auch eine rein thermische Behandlung der eingesetzten Kunststoffe zu einem ähnlichen Ergebnis mit vergleichbaren Produktqualitäten führen würde. Eine abschließende wissenschaftliche Bewertung des Einflusses dieser von den Betreibern postulierten Effekte steht allerdings noch aus.

Kritisch zu sehen sind die eingesetzten Umwälzaggregate, als Pumpen oder Turbinen bezeichnet, die aufgrund der häufig hohen Rotationsgeschwindigkeiten für Verschleiß und Beschädigungen geradezu prädestiniert sind. Die während der Anlagenbesuche mehrfach festgestellten Defekte der Aggregate bestätigen diese Einschätzung.

Wesentlich für die Funktionalität der Verfahren und die Qualität der erzeugten Produkte ist die Wahl und Aufbereitung der Einsatzstoffe. Da die thermische Behandlung im Ölbad lediglich zu einer Depolymerisation der Kunststoffe und anschließenden Aufspaltung längerer Molekülketten führt, ist die Zusammensetzung des Produktöls direkt mit der Wahl des Einsatzstoffes verknüpft. Es ist daher sehr stark in Zweifel zu ziehen, dass Einsatzstoffe, wie zum Beispiel Biomasse, für derartige Prozesse geeignet sind. Der hohe Sauerstoffgehalt in diesen Stoffen führt zwangsläufig auch zu einem hohen Gehalt sauerstoffhaltiger Produkte im erzeugten Öl und damit zu sehr niedrigen Ölqualitäten, die selbst bei

weitgehender Aufbereitung die üblichen Qualitätsstandards, zum Beispiel für Kraftstoffe, nur schwer erreichen können.

Auch beim betrachteten Verfahren zur Reifenpyrolyse ist auf eine entsprechende Wahl der Einsatzstoffe und deren Aufbereitung zu achten. Nach aktuellem Wissensstand ist das Verfahren nur für Altreifen und ähnliche Gummifractionen (zum Beispiel Förderbänder etc.) geeignet. Dies ist von besonderer Bedeutung, da im vorliegenden Fall der Materialtransport durch den Reaktor rein schwerkraftgetrieben erfolgt. Bereits der Einsatz von Kunststofffractionen könnte hier zu Problemen führen. Der Einsatz anderer Fractionen scheint ohne Modifikation des Reaktorkonzeptes problematisch.

Unklar ist beim Verfahren der Pyrum Innovations AG die Verwertung des erzeugten Pyrolysekokes. Aufgrund der angegebenen Korngröße, die mit bis zu 250 µm selbst nach Aufmahlung deutlich größer ist, als bei vergleichbaren Reifenpyrolyseverfahren im Drehrohr (in der Regel < 500 nm), müssen kommerzielle Verwertungswege zunächst mit den einschlägigen Industrieunternehmen diskutiert bzw. geprüft werden. Die Verwertung der erzeugten Öle als Brenn- beziehungsweise Kraftstoff erscheint jedoch unproblematisch und wird am Standort der Anlage bereits praktiziert. Für höherwertige Einsatzbereiche ist jedoch auch in diesem Fall eine weitergehende Aufbereitung bzw. Raffination (insbesondere Entschwefelung) erforderlich. Ob die vom Betreiber postulierte Verwertung bei der Herstellung von Carbon Black (Primärproduktion) mit Erfolg durchgeführt werden kann, wird aktuell erprobt und bleibt abzuwarten.

Das tatsächliche Potenzial der betrachteten drei Verfahren, insbesondere unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Rahmenbedingungen, kann letztlich nur dann ermittelt werden, wenn entsprechende Langzeitversuche im industriellen Maßstab durchgeführt werden. Für alle Verfahren sind entsprechende Pilotanlagen vorhanden, die derartige Untersuchungen ermöglichen würden. Es wird vorgeschlagen, die einzelnen Prozesse unterbrechungsfrei, über einen Zeitraum von mindestens 1000 Stunden zu betreiben und diese Untersuchungen durch unabhängige Dritte wissenschaftlich und analytisch zu begleiten. Die Ergebnisse sollten belastbare Aussagen zu den bisher offenen Fragen, wie Bilanzen, Ausbeuten, Produktqualitäten und Prozessstabilität ermöglichen.

Da die vorhandenen Firmenstrukturen und finanziellen Möglichkeiten der Betreiber limitiert sind, ist für die fundierte Durchführung solcher Versuche eine finanzielle Beteiligung öffentlicher Fördermittelegeber oder privater Investoren erforderlich.

Quellenverzeichnis

- [1] 320 Grad: Pyrolyx expandiert in den USA. URL: <http://320grad.de/pyrolyx-expandiert-in-den-usa/>
- [2] Alphakat: Homepage Alphakat GmbH. URL: <http://www.alphakat.de/>
- [3] Aydin H, Ilkiliç C: Optimization of fuel production from waste vehicle tires by pyrolysis and resembling to diesel fuel by various desulfurization methods. Fuel 102 (2012) 605–612
- [4] Behrendt F, Neubauer Y, Schulz-Tönnies K, Wilmes B, Zobel N: Direktverflüssigung von Biomasse – Reaktionsmechanismen und Produktverteilungen. Studie der TU Berlin für die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Berlin 2006
- [5] Bialy R, Michels S: Prüfbericht 3121354. SGS Institut Fresenius GmbH. Sulzbach 19.10.2016
- [6] Bouvier J M, Charbel F, Gelius M: Gas-Solid Pyrolysis of Tire Wastes - Kinetics and Material Balances of Batch Pyrolysis of Used Tires. Resources and Conservation 15 (1987) 205-214
- [7] Brixius B: Analysenbericht 231/08/15a. Chemische Produkte-Beratung und -Analysen GmbH. Kinkel-Limbach 09.09.2015
- [8] Brixius B: Analysenbericht 231/08/15b. Chemische Produkte-Beratung und -Analysen GmbH. Kinkel-Limbach 09.09.2015
- [9] Clyvia: Homepage Clyvia Technology GmbH. URL: <http://www.clyviatec.de/>
- [10] Dülger F., Merz H., Raeder N.: Process and apparatus for multistage thermal treatment of rubber waste, in particular scrap tires. Applied for by Pyrolyx AG on 9/25/2009. App. no. US13498032. Patent no. US8865112B2. 2009
- [11] Dülger F., Merz H., Raeder N.: Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Hybrid - Carbon Black - Teilchen. Applied for by Pyrolyx AG on 6/29/2012. App. no. DE201210105796. Patent no. DE102012105796B4. 2012
- [12] Europäische Kommission: Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. 02.12.2015 URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015DC0614&from=EN>
- [13] Franz M: Treibstoffherstellung aus Kunststoffabfällen. Müll und Abfall. 40 (2008) 609-616
- [14] Gemmer J: Stoffsteckbrief Pyrolysekoks. Pyrum Innovations ESC GmbH. Dillingen 2017
- [15] Gemmer J: Stoffsteckbrief Pyrolyseöl. Pyrum Innovations ESC GmbH. Dillingen 2017
- [16] Halle Spektrum: Pyrolyx: ein neuer Versuch an der „Investruine“. URL: <http://hallespektrum.de/nachrichten/wirtschaft/pyrolyx-ein-neuer-versuch-an-der-investruine/9062/>
- [17] Herklotz A M: Entwicklung eines teilkontinuierlichen Thermolyseverfahrens zum rohstofflichen Recycling von polyolefinischen Kunststoffabfällen in einer Rührkesselskaskade. Dissertation. TU Chemnitz 2016
- [18] Juma M, Koreňová Z, Markoš J, Annus J, Jelemenský L: Pyrolysis and combustion of scrap tire. Petroleum & Coal 48 (2006) 15-26
- [19] Mehliş D, Vogle H: Analysenzertifikat. PetroLab GmbH. Speyer 21.08.2017
- [20] Na+S GmbH: Homepage. URL: <http://www.nasgmbh.de/english/home.html>
- [21] neovis GmbH, Recenso GmbH: FINAL REPORT: Waste to Diesel -Tests executed in December 2016 / January 2017. Münster, Remscheid, 2017
- [22] Orion Engineered Carbons LLC: What is Carbon Black? Firmeninformationsschrift (2015)
- [23] Pyrolyx AG: Konzernabschluss 2016. München. URL: http://pyrolyx.com/fileadmin/download/investor-relations/Pyrolyx-AG_Konzern_JAB_Veroeffentlichung_final_korr.pdf
- [24] Pyrum Innovations: Präsentation zur Pressekonferenz „IPO Pyrum“ 11.10.2017
- [25] Pyrum Innovations: Company and Technology presentation
- [26] Quicker P, Neuerburg F, Noel Y, Huras A: Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen, Umweltbundesamt. Dessau (2017)
- [27] Recenso GmbH: Positionspapier CTC – Stand der Technik. Version 1.6. Remscheid (2017)

- [28] Recenso GmbH: Nanofuel project flyer. URL: http://www.recenso.eu/fileadmin/user_upload/RECEN-SONanofuel.pdf
- [29] Recenso GmbH: FINAL REPORT - Test of pre-sorted RDF from XXX (interne Vorversion eines Versuchsberichtes der Recenso GmbH für einen Industriekunden)
- [30] Schnecko H: Zur Pyrolyse von Altreifen. Chem.-Ing.-Tech. 48 (1976) 443-447
- [31] Schulz K-P: Thermalreaktor. Patentschrift DE 10 2011 000 037 B4
- [32] Schuster T: Motorbetrieb mit KDV-Diesel. Vortrag WTZ Roßlau 28.02.2014
- [33] Steinbeis Transferzentrum R.T.M.: Untersuchung der Nutzbarkeit existierender Kunststoffabfallströme zur Erdöl substituierenden Herstellung hochwertiger chemischer Rohstoffe mit Hilfe der Logoil-Technologie. DBU-Projekt 32463/01-23 (2015)
- [34] Syntrol: Homepage Nill-Tech GmbH. URL: <http://www.syntrol.de/>
- [35] Thomé-Kozmiensky K, Heil J, Link K, Segebrecht J: Prozessgestaltung Abfallpyrolyse - Untersuchungen über die Entgasung von Abfällen in einem kontinuierlich betriebenen Schachtreaktor. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums des Innern. Berlin (1979)
- [36] Tukker A, de Groot H, Simons L, Wiegersma S: Chemical recycling of plastic waste (PVC and other resins) TNO-Report STB-99-55 Final. Netherlands Organisation for Applied Scientific Research. Delft 1999 19-22
- [37] Turek T, Pinnow S, Voelskow K: Bewertung thermischer/katalytischer Verfahren zum Abbau von Kunststoffen. Technische Universität Clausthal, Institut für Chemische Verfahrenstechnik. Clausthal 2009
- [38] Warnecke R, Erz M: Pyrolyseatlas – Überblick über Verfahren zur pyrolytischen Abfallbehandlung. Universität Duisburg, Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Thermodynamik. Duisburg (1991)
- [39] Weinstein J, Toro F: Thermal Processing of Municipal Solid Waste for Resource and Energy Recovery. Ann Arbor Science Publishers. (1976)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-1:	Pilotanlage der Recenso GmbH am Standort Ennigerloh	13
Abbildung 5-2:	Pilotanlage Nanofuel der Recenso GmbH am Barrie, Canada.....	14
Abbildung 5-3:	Verfahrensschema der Dieselwest-Pilotanlage, Ennigerloh	15
Abbildung 5-4:	Brennstoffvorbehandlung in der Dieselwest-Pilotanlage, Ennigerloh. Links: Mechanische Aufbereitung mit Schwingwellensieb und Metallabscheidung; Rechts beheizte Schnecken in Kaskadenschaltung zur Eduktvortrocknung	15
Abbildung 5-5:	Einsatzstoffe der Dieselwest-Pilotanlage, Ennigerloh, Oben: Ersatzbrennstoff aus Restabfällen; Mitte: Sägemehl; Unten: Kunststofffolien aus Bau- und Produktionsabfällen, die vor der Aufbereitung zerkleinert wurden	16
Abbildung 5-6:	Schnittzeichnung der Dieselwest-Pilotanlage, Ennigerloh	17
Abbildung 5-7:	Reaktor der Dieselwest-Pilotanlage, Ennigerloh, mit oberem (links, mit Ölzuführung von den vier Turbinen) und unterem Behälter (rechts, mit Eintragsschnecke mit rotem Antriebsmotor im Vordergrund)	18
Abbildung 5-8:	Eine der Turbinen an der Dieselwest-Pilotanlage, Ennigerloh.....	19
Abbildung 5-9:	Flüssigprodukte aus der Dieselwest-Anlage. Links: Ölfraktion aus der Behandlung von Kunststoffen; Mitte: Öl aus Sägemehl; Rechtes Bild: Flüssigprodukte EBS- Behandlung, links Leichtöl, Mitte wässrige Phase, rechts Schweröl	20
Abbildung 5-10:	Angriff einer Düsennadel aus Stahl durch (nicht aufbereitetes) Produktöl aus der Dieselwest-Anlage. Links: Neue Düsennadel; Rechts: Düsennadel nach einer Woche im Produktöl	21
Abbildung 5-11:	Betriebsparameter beim viertägigen Versuchsbetrieb der Dieselwest-Anlage in Enigerloh, mit EBS aus kommerziellen, haushaltsähnlichen Abfällen	22
Abbildung 5-12:	Blockaden im Zuführsystem der Dieselwest-Anlage bei der Behandlung von vorsortierten Kunststofffraktionen.....	23
Abbildung 5-13:	Auszug aus den Betriebsdaten der Dieselwest-Anlage, Enigerloh, für den betrachteten Versuch mit EBS	24
Abbildung 5-14:	Massen- und Energiebilanz über ausgewählte Zeiträume eines Versuchs mit EBS in der Dieselwest-Anlage, Enigerloh	25
Abbildung 5-15:	Technikumsanlage der Logmed Cooperation in Halberstadt.....	27
Abbildung 5-16:	Verfahrensschema der Logoil-Anlage.....	28
Abbildung 5-17:	Verfahrensschema der Logoil-Anlage mit Bilanzkreisen	32
Abbildung 5-18:	Pilotanlage Pyrum Innovations AG, Dillingen/Saar [23]	33
Abbildung 5-19:	Verfahrensschema des Reifenpyrolyseverfahrens der Firma Pyrum Innovations ...	34
Abbildung 5-20:	Patentierter Wanderbettreaktor zur Reifenpyrolyse der Firma Pyrum Innovations .	35
Abbildung 5-21:	Unterteil des Kokskühlers und Rohrkettenförderer am Reaktor der Firma Pyrum Innovations, Standort Dillingen.....	36
Abbildung 5-22:	REM-Aufnahme des Kokes aus der Reifenpyrolyse der Pyrum Innovations AG	37
Abbildung 5-23:	Produkt der Pyrolyse von Reifengranulat aus der Pilotanlage von Pyrum Innovations	40

Abbildung 5-24: Temperaturverläufe im Wanderbettreaktor von Pyrum Innovations in Dillingen	42
Abbildung 5-25: Koks und Pyrolyseölproduktion, sowie Dosierung (Signal Zellenradschleuse) an der Versuchsanlage von Pyrum Innovations in Dillingen	42
Abbildung 5-26: Energieverbrauch und -produktion der Versuchsanlage von Pyrum Innovations ...	43
Abbildung 5-27: Massenbilanz Pyrum Reifenpyrolyseanlage.....	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Betriebsdaten der Anlage in Ennigerloh.....	18
Tabelle 5-2: Analysen verschiedener Produktöle aus der Anlage in Ennigerloh	21
Tabelle 5-3: Betriebsdaten der Logoil-Anlage.....	29
Tabelle 5-4: Analysen der Produktöle aus der Logoil-Anlage.....	30
Tabelle 5-5: Betriebsdaten der Anlage in Dillingen.....	36
Tabelle 5-6: Charakteristische Parameter von Carbon Black aus der Pilotanlage der Pyrum Innovations AG [5] [13], sowie Vergleichswerte von Rußen aus der Primärproduktion [21] und aus der Reifenpyrolyse mittels Drehrohrverfahren	38
Tabelle 5-7: Zusammensetzung von Produktölen aus der Reifenpyrolyseanlage der Pyrum Innovations AG	39
Tabelle 5-8: Zusammensetzung des Pyrolysegases aus der Pilotanlage der Pyrum Innovations AG	41