



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
16.08.2023 Patentblatt 2023/33

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
C10B 57/12^(2006.01) C10G 1/06^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **23156163.0**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
C10B 57/12; C10G 1/06

(22) Anmeldetag: **10.02.2023**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(71) Anmelder: **Wiederkehr Engineering Gmb**
6331 Hünenberg (CH)

(72) Erfinder: **Wiederkehr, Peter**
5624 Bünzen (CH)

(74) Vertreter: **Felber, Josef et al**
Felber & Partner AG
Dufourstrasse 116
8008 Zürich (CH)

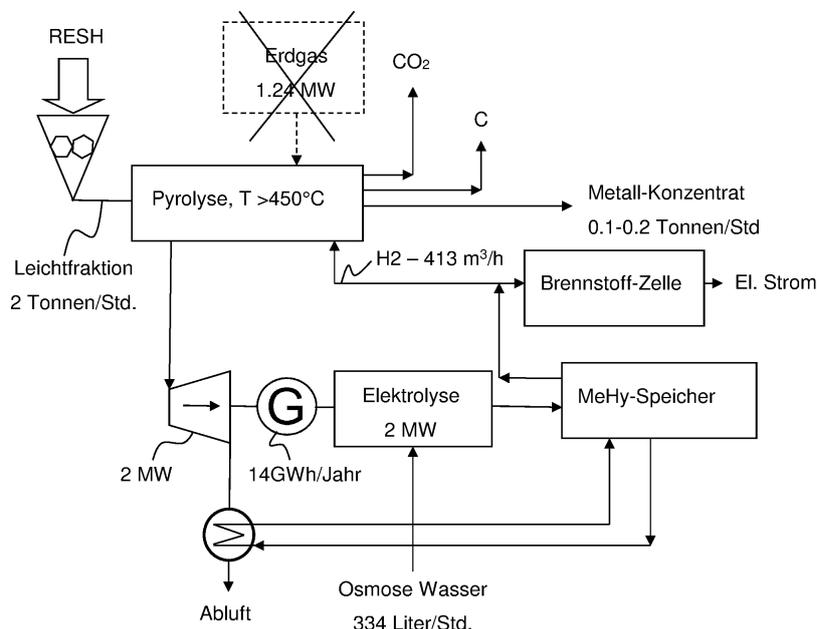
(30) Priorität: **14.02.2022 CH 1342022**

(54) **VERFAHREN UND ANLAGE ZUR ERZEUGUNG VON ELEKTRISCHER ENERGIE UND WASSERSTOFF AUS RESH**

(57) Nach diesem Verfahren werden Wasserstoff H_2 und Sauerstoff O_2 durch Nutzung der Abwärme aus einer Pyrolyseanlage, in welcher kohlenstoffhaltige Reststoffe (RESH) thermisch aufgearbeitet werden, hergestellt. Die erzeugte Wärme wird zum Heizen eines Brenners eines Dampfkessels (2) genutzt. Der Druckdampf wird über eine Turbine (4) entspannt, die einen Generator (6) antreibt. Die elektrische Energie wird zum Betrieb und Aufrechterhaltung der Wasser-Elektrolyse eingesetzt und

dafür auf die geeignete Spannung herunter transformiert und dann gleichgerichtet, wonach die Spannung an einen Alkalielektrolyse-Stapel angelegt wird. Die entstehenden Gase Wasserstoff H_2 und Sauerstoff O_2 werden aufgefangen und der Wasserstoff wird vorzugsweise in Metallhydrid-Speichern eingelagert, für eine bedarfsweise Nutzung. Ein Teil des erzeugten Wasserstoffs H_2 wird zur Aufrechterhaltung der Pyrolyse des RESH eingesetzt und kann das sonst dafür nötige Erdgas ersetzen.

Fig. 4



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren wie auch eine Anlage zur Energiegewinnung aus RESH (RE aus Reststoffe und SH aus dem englischsprachigen *shredder*), und generell von belasteten kohlenwasserstoffhaltigen organischen und anorganischen Materialien als Ersatzbrennstoffe, insbesondere von Reststoffen aus Schredderanlagen von ausgedienten Fahrzeugen. Dabei wird als Endprodukt Wasserstoff erzeugt, welcher beliebige Zwecke, namentlich aber für Verbrennungsmotoren von Fahrzeugen eingesetzt werden kann. Nebst einer Kosteneinsparung ist auch die Eindämmung des CO₂ Ausstosses ein vorrangiges Ziel, was mit dem Betrieb eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor auf der Basis von Wasserstoff hervorragend gelingt.

[0002] In Schredderanlagen für ausgediente Fahrzeuge fallen grosse Mengen von Reststoffen an, die einen zum Teil hohen Energiewert aufweisen. Man denke bloss an die zahlreichen Kunststoffteile und sonstigen brennbaren Teile, die in einem Fahrzeug verbaut sind. Hat ein Fahrzeug ausgedient, so muss es zerlegt werden, um seine Rohstoff-Bestandteile und seine energiehaltigen Teile zu separieren und einer sinnvollen Verwertung zuzuführen. Alles was flüssig ist wird abgelassen, das heisst noch im Tank befindliche Treibstoffe, Motor- und Schmieröle, Bremsflüssigkeit, Hydraulikflüssigkeit etc. Der gesamte Innenraum wird demontiert, das heisst die Sitze werden ausgebaut, die Armaturenbretter inklusive der Lenkräder werden entfernt, ebenso Türverkleidungen, Innenraumverkleidungen, das heisst die Bodenteppiche, auch im Kofferraum, die Dachhimmel und alle elektronischen Bestandteile und Kabelbäume, und alles Brennbare wird demontiert, so auch die Reifen. Im Prinzip wird alles demontiert was nicht Stahl oder Metall ist, auch Glas. Dieser brennbare Restmüll wird in der Fachsprache wie schon erwähnt RESH genannt. Der Innenausbau mit Sitzen, Isolierung und Armaturenbrett machen den Hauptanteil des RESHs aus. Nicht zu RESH werden die Metallteile wie Karosserie, Motor und Fahrwerk gezählt. Typischerweise besteht RESH aus folgenden Komponenten, mit ungefähren Gewichtsanteilen, die allerdings schwanken können:

Kunststoffe, Gummi	62%
Autoglas, Sand	16%
Lackstaub, Rost	16%
Textilien, Leder, Faserstoffe	6%
Holzfasern, Pappe	4%
Metalle	1%

Der vom Fahrzeug verbleibende Stahlkörper wird mechanisch geschreddert und zu einem kompakten Paket gepresst, welches dann in einen Schmelzofen kommt, zur Rückgewinnung der verschiedenen darin enthaltenen Metalle.

[0003] In der Schweiz zum Beispiel verlangt die Tech-

nische Verordnung über Abfälle (TVA) seit Februar 1996 ein Deponieverbot für brennbare Abfälle. Mit der Gründung der *Stiftung Autorecycling Schweiz* legten die Automobilimporteure den Grundstein für die Suche und Umsetzung einer umweltgerechten und wirtschaftlich tragbaren Lösung für die Verwertung von RESH (Schredder-Leichtfraktion). Etwa ein Viertel des Fahrzeuggewichts fällt nach dem Schreddern als RESH an. RESH besteht aus den oben erwähnten Bestandteilen und enthält wegen der groben Trennung im Schredderprozess manchmal bis zu ca. 10 Prozent Restmetalle. RESH gilt als Sonderabfall.

[0004] Nach umfangreichen Untersuchungen konnte RESH ab 1996 in Kehricht- bzw. Müll-Verbrennungsanlagen (KVA) thermisch entsorgt werden. Das Beimischungsverhältnis zum Hauskehricht wurde vom Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) auf 5 Gewichts-% festgelegt. Damit wird das Emissionsverhalten bei der Verbrennung nicht verändert, die organischen Stoffe werden verbrannt und die Schlacke kann ohne Gefährdung der Umwelt in geordneten Deponien abgelagert werden. So reduziert sich das Volumen des RESH um 70 Prozent und die Masse um 50 Prozent. Der hohe Heizwert von RESH wird als wertvolle Energie zur Stromproduktion und als Fernwärme genutzt.

[0005] Gegenüber der früheren Ablagerung bedeutet dieser Schritt einen grossen ökologischen Fortschritt. Allerdings sind mit dieser Verwertung deutlich höhere Kosten verbunden. Um einen Ausgleich zu den tieferen Deponiekosten der ausländischen Schredderwerke zu schaffen, entrichtet die *Stiftung Autorecycling Schweiz* Entsorgungsbeiträge an die schweizerischen Schredderwerke. Als Kontrolle und Berechnungsgrundlage müssen die Schredderwerke die annullierten Fahrzeugausweise der geschredderten Fahrzeuge einreichen.

[0006] Neben der KVA-Lösung untersuchte die *Stiftung Autorecycling Schweiz* weitere Verfahren. Bis heute ist aber keine ökologisch und wirtschaftlich bessere Technologie auf dem Markt. Zudem zeichnen sich technische Verbesserungen bei der Behandlung von KVA-Rückständen ab, die einen weiteren Entwicklungsstand darstellen. Zuerst hat das Kehrichtheizkraftwerk Hinwil in der Schweiz, danach die KVA Monthey ebenfalls in der Schweiz, den trockenen Schlackenausstrag realisiert. Gegenüber dem bisher gewohnten Nassaustrag besitzt dieses System einige Vorteile wie zum Beispiel die bessere Qualität und Quantität der aussortierten Metalle. In einem gross angelegten Projekt in Hinwil wird der Fokus auf die Rückgewinnung der feinen Metalle unter 5 mm Korngrösse untersucht. Es sind auch Messungen mit RESH vorgesehen, die von der *Stiftung Autorecycling Schweiz* finanziell unterstützt werden.

[0007] Mit der seit dem Jahr 2000 hundertprozentigen thermischen RESH-Verwertung hat die Schweiz innerhalb Europas eine Spitzenposition inne. Die Stiftung ist jedoch offen, alternative Lösungen zu prüfen, welche ökologisch und wirtschaftlich besser sind als die heute praktizierten. Für die thermische Behandlung der

Schredderleichtfraktion (RESH, RE für Reststoffe und SH für shredder) ist der schweizerische Abfallmarkt teilweise abhängig von Anlagen im Ausland, da die Kapazitäten der schweizerischen Kehrichtverbrennungsanlagen (KVAs) nicht ausreichend sind, um die anfallenden Mengen an RESH zu verarbeiten. Eine Verwertung besteht zum Beispiel darin, dass durch Hochtemperaturvergasung in einer Plasmakammer die Abfallbestandteile auf über 3000°C erhitzt werden. Dabei entstehen Synthesegase, eine inerte Schlacke und Metalle. Das Synthesegas kann in mehreren Stufen verfahrenstechnisch behandelt werden, so dass reiner Wasserstoff, flüssiges CO₂ und eine kleine Menge Abgas entstehen. Verglichen mit konventionellen KVAs sollten nur rund 10 bis 20% der Abgasmenge anfallen unter Einhaltung der Vorgaben der Luftreinhalte-Verordnung (LRV). Die inerte Schlacke und Metalle können aus der Plasmakammer abgezogen werden, wobei die inerte und auch eluatsichere Schlacke entweder als Sekundär-Baustoff (z.B. im Strassenbau) verwendet oder in niederklassigen Deponien eingelagert werden kann und die Metalle dem Recycling zugeführt werden können. Desweiteren ist aus dem Stand der Technik eine Pyrolyse von Polyurethan-Material bekannt, nämlich aus WO 2020/239716 A1. Dort wird ein Verfahren zur Verwertung von Polyurethane Materialabfall zur Herstellung von chemikalischen Rohstoffen für die Herstellung von Isocyanaten und Poyurethanen offenbart. Das Verfahren beruht zusammengefasst auf einer

- a) Pyrolyse des Polyurethan Materials,
- b) gegebenenfalls einer Raffination des in Schritt a) erhaltenen Gemisches von niedermolekularen Kohlenwasserstoffen unter Erhalt von einem Gemisch von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen und einem Gemisch von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid, sowie Wasserstoff und weiteren gasförmigen Kohlenwasserstoffverbindungen, und Trennung der erhaltenen Gemische in einer Gas-trennung,
- c) Verbrennung der erhaltenen Rückstände und gegebenenfalls von weiterem Polyurethan Materialabfall unter Erhalt von Kohlendioxid enthaltendem Gas,
- d) Reinigung des aus Schritt c) und allenfalls a) erhaltenen Kohlendioxids und von Nebenbestandteilen,
- e) Elektrolyse des in Schritt d) erhaltenen gereinigten Kohlendioxids, insbesondere elektrochemische Umsetzung des Kohlendioxids an einer Gasdiffusions-elektrode, unter Erhalt eines Gemisches mindestens von Kohlenmonoxid, nicht umgesetztem Kohlendioxid und gegebenenfalls Wasserstoff,
- f) Abtrennung des nicht umgesetzten Kohlendioxids von dem in Schritt e) erhaltenen Gemisch unter Erhalt eines Gemischs von mindestens Kohlenmonoxid und gegebenenfalls Wasserstoff und Rückführung des nicht umgesetzten Kohlendioxids in die Elektrolyse,

g) optional Abtrennung des gegebenenfalls erhaltenen Wasserstoffs aus dem in Schritt f) erhaltenen Gemisch von Kohlenmonoxid und gegebenenfalls Wasserstoff,

5 h) Umsetzung des aus Schritt g) oder f) erhaltenen Kohlenmonoxids mit Chlor zu Phosgen in einem Prozess zur Herstellung von Isocyanat, und

10 i) gegebenenfalls Umsetzung des aus Schritt h) erhaltenen Isocyanats mit Polyethern und gegebenenfalls zusätzlich mit Polyester zu einem fertigen Polyurethan Material.

US 2010/0077711 A1 zeigt einen thermochemischen Reaktor für die ablative Flash-Pyrolyse, der gleichmäßige Reaktionsbedingungen auf der gesamten Kontaktfläche zwischen dem Rohstoff und dem Kontaktkörper erreicht und dazu die verfügbare Oberfläche des Kontaktkörpers gut ausnutzt. Das wird dadurch erreicht, dass im Falle eines thermochemischen Reaktor, der einen Reaktionskörper aufweist, der um eine Achse drehbar ist und an dem die Pyrolysereaktionen ablaufen, und der eine Pressvorrichtung zum Pressen des pyrolysierenden Rohmaterials gegen eine Kontaktfläche des Reaktionskörpers aufweist, wobei die Kontaktfläche mindestens einen Teil einer Umfangsfläche des Reaktionskörpers darstellt. Aufgrund dieser Konstruktion wird die Variabilität der Relativgeschwindigkeit zwischen der Kontaktfläche und dem Rohmaterial über den Querschnitt des Kontaktes zwischen den beiden reduziert. Es ist daher möglich, eine große Kontaktfläche mit homogenen Reaktionsbedingungen in einer kompakten Bauweise bereitzustellen.

35 **[0008]** Eingedenk des oben Vorgetragenen besteht die Aufgabe der vorliegenden Erfindung darin, ein Verfahren und ein Anlage anzugeben, mit denen ermöglicht wird, dass allerlei belastete kohlenwasserstoffhaltige Abfälle und insbesondere RESH wie er in grosser Masse vor allem beim Abbruch von ausgedienten Fahrzeugen anfällt, als Energiequelle für die möglichst einfache und

40 möglichst direkte und effiziente Erzeugung von Wasserstoff genutzt werden kann. Ein so erzeugter Wasserstoff könnte dann vornehmlich zum Betreiben von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, für ein Fahren ohne CO₂-Ausstoss.

45 **[0009]** Diese Aufgabe wird gelöst von einem Verfahren zur thermischen Aufarbeitung von kohlenstoffhaltigen Reststoffen (RESH) zur Erzeugung von Energieträgern in Form von elektrischem Strom und Wasserstoff, *dadurch gekennzeichnet*, dass mit Wasserstoff ein Teilkreislauf erzeugt wird, indem

50 a) der RESH in einem Reaktor (R) unter Sauerstoffabschluss in einer Pyrolyse durch Wasserstoff-Zugabe thermisch zerlegt wird und hernach die Pyrolyse-Produkte Öl, Gas und Koks getrennt in einer technisch-chemischen Aufarbeitung (GP, Q, WT, CT) von Schadstoffen befreit und gereinigt werden, b) Öl, Gas und Koks über Lieferleitungen (D1-D4)

direkt einer Verbrennung zwecks Wärmerzeugung zugeführt werden und damit in einem Dampfkessel Druckdampf erzeugt wird,

c) der Druckdampf über eine Turbine (4) mit elektrischem Generator (6) entspannt wird und vom Generator (6) elektrischer Wechselstrom erzeugt wird,

d) der elektrische Wechselstrom nach Gleichrichtung für eine Elektrolyse genutzt wird und damit Sauerstoff und Wasserstoff aus zugeführtem Wasser erzeugt werden,

e) ein Teil des erzeugten Wasserstoffes, etwa ein Drittel, zur Aufrechterhaltung der Pyrolyse an dieselbe zurückgeführt wird, und der überschüssige Wasserstoff in einen Drucktank gepumpt wird oder in einem Metallhydrid-Speicher eingelagert wird, für eine bedarfsweise Nutzung, und auch der erzeugte Sauerstoff in einen Drucktank gepumpt wird.

[0010] Die Anlage zur Durchführung des Verfahrens zur thermischen Aufarbeitung von kohlenstoffhaltigen Reststoffen (RESH) zur Erzeugung von Energieträgern in Form von elektrischem Strom und Wasserstoff nach Anspruch 1 zeichnet sich durch die technischen Merkmale gemäss dem Patentanspruch 6 aus.

[0011] Das Verfahren wird anhand einer schematischen Darstellung der Anlage nachfolgend genauer beschrieben und erläutert.

Es zeigt;

Figur 1: Eine Pyrolyse-Anlage als Schema;

Figur 2: Eine Pyrolyse-Anlage nachgeschaltete Anlage für die Stromerzeugung als Schema;

Figur 3: Eine dem Generator nachgeschaltete Anlage für die Wasser-Elektrolyse als Schema;

Figur 4: Die gesamte Anlage aus Pyrolyse, Stromerzeugung, Elektrolyse und Wasserstoff-Speicherung in einem Schema.

[0012] Im ersten Teil der Anlage wird der RESH mit einer Pyrolyse zu Oel und Gas gewandelt. Mit diesem Oel-Gas Gemisch wird ein Brenner gespeist, der bei 2200 Grad Celsius innert 2 Sekunden diesen Brennstoff verbrennt. Mit der freigesetzten Energie wird in einem Dampfkessel Druckdampf erzeugt. Der Dampf wird dafür eingesetzt, um über eine Dampfturbine entspannt zu werden, wobei die Abtriebsachse der Dampfturbine einen Wechselstrom-Generator anzutreiben. Der so produzierte Strom wird in einer Gleichrichteranlage gleichgerichtet und dient zur Speisung einer Elektrolyse-Anlage zur Spaltung von Wasser H_2O in Wasserstoff H_2 und Sauerstoff O_2 . Mit einem Teil des erzeugten Wasserstoffes wird die Pyrolyse in Gang gehalten, die sonst üblicherweise mit Erdgas betrieben wird. Der überschüssige Wasserstoff wird vorzugsweise in einem Metall-Hydrid MeHy Speicher gespeichert. Er kann zum Tanken

von Wasserstoff-Fahrzeugen verwendet werden oder einer Brennstoffzelle zugeführt werden, um mit derselben elektrische Energie zu erzeugen. Das Metallkonzentrat kann für die Kupferaufbereitung eingesetzt werden, und die Abluft vom Brenner wird über eine CO_2/NO_x Reduktion zu Brennstoff oder anderen Stoffen umgewandelt. Überschüssiger Dampf auf der Abgangsseite der Turbine kann über ein Fernwärme-Netz als Wärmespende verwendet werden, oder zum Trocknen von Metallen oder Klärschlamm eingesetzt werden.

[0013] Für die Anwendung des hier vorgestellten Verfahrens wird die vorschriftsgemässe Verwendung von belasteten Einsatzmaterialien umgesetzt, sodass nach deren thermischer Behandlung diese belasteten Materialien als Energielieferanten genutzt werden können. Schadstoffe werden durch die Anlage vor der energetischen Verwendung der Reststoffe ausgeschleust. Um bekannte und erfolgreich eingesetzte Verfahren zur länderspezifischen, vorschriftsgemässen und umweltgerechten Reinigung von Flüssigkeiten und Gasen anwenden zu können, wird also eine Pyrolyse-Anlage eingesetzt wie sie im Folgenden beschrieben wird. Die Steuerung der chemischen Prozesse und damit deren Anpassung an die technisch-chemische Aufarbeitung erfolgt durch den Einsatz von Katalysatoren. Typisch entstehen nach dem Stand der Technik dann vier verschiedene noch schadstoffbelastete Produktanteile:

1. Permanentgasanteil und kurzkettige Kohlenwasserstoffe
2. Pyrolyse-Öl
3. Pyrolyse-Wasser
4. Pyrolyse-Koks (weitestgehend kohlenwasserstofffrei)

[0014] Durch die thermische Spaltung der kohlenwasserstoffhaltigen Abfälle, Reststoffe und/oder Ersatzbrennstoffe mit nachfolgender Reinigung wird die Möglichkeit eröffnet, diese vier vorliegenden Pyrolyseprodukte energetisch für den Betrieb die Dampferzeugung zu nutzen, indem eine Separation von unerwünschten Kontaminanten in den oben genannten vier Produkten vorgenommen wird. Einige nicht erwünschte Kontaminanten können auch durch Nichtverwendung des Pyrolyse-Kokses der nachfolgenden thermischen Verwertung entzogen werden und separat abgeführt und anderweitig verwertet werden.

[0015] Der Schlüssel zum Einsatz von RESH als Brennstoff zur Erzeugung von Wasserstoff liegt in einem Pyrolyseverfahren in einer entsprechend ausgelegten Pyrolyse-Anlage wie sie in **Figur 1** als Schema dargestellt ist. Diese Pyrolyse wird vorzugsweise auf drei Stufen betrieben. Zunächst wird der RESH auf ca. 450° C aufgezeigt, um das darin enthaltene Wasser zu verdampfen und damit zu entfernen. In einer zweiten Stufe wird auf 550° C Prozessgas erzeugt, also ein Synthesegas. Anfallende Restenergie wird auf 600° C vergast und gelangt auf 450° C zu einem nachgeschalteten Brenner,

während übrig aus der Pyrolyse des RESH bloss noch inerte Schlacke übrigbleibt. Insgesamt dient die Pyrolyse-Anlage zur thermischen Umsetzung von kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterialien, z.B. Biomassen oder Abfallstoffe in flüssiges Pyrolyseöl, Pyrolysegas und Pyrolysekoks und erfolgt unter Sauerstoffabschluss oder zumindest im Wesentlichen ohne Anwesenheit von Sauerstoff. Die Pyrolyse ist ein endothermer Prozess, einzelne Teilprozesse können allerdings exotherm verlaufen. Insgesamt muss die Pyrolyse mit einem Energielieferanten aufrechterhalten werden. Hierzu reicht ein kleiner Anteil des nach diesem hier vorgestellten Verfahren erzeugten Wasserstoffs aus. Die prozentualen Anteile der genannten Pyrolyseprodukte sind durch das Eingangsmaterial, dessen Restfeuchte und durch die Verfahrensbedingungen wie beispielsweise Temperatur, Verweilzeit, Druck und die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit beeinflussbar. Mittels dieser Pyrolyse von RESH entstehen also Gas, Öl und Koks, die als Alternativbrennstoffe für die Dampferzeugung verwendet werden können und dabei andere Energieträger teilweise oder ganz ersetzen können. Anhand der **Figur 1** wird zunächst das Pyrolyse-Verfahren näher erläutert. Ein Pyrolyse-Reaktor R wird hierzu mit RESH-Pellets beschickt, die je nach Standort per Bahn, Schiff oder Lastwagen angeliefert werden können. Sie enthalten das, was bei der Verwertung von alten Autos nach Entfernung aller Metallteile übrig bleibt. Die RESH-Pellets selber werden in einem Bunker B mit einem Volumen von zum Beispiel 250 Kubikmetern zwischengelagert und von dort aus nach einer Vorbehandlung kontinuierlich dem Pyrolyse-Reaktor R zugeführt. In diesem Reaktor R erfolgt die Pyrolyse des RESH unter Luftabschluss bei Temperaturen zwischen 350°C bis 800°C. Der RESH geht, bevor er in den Reaktor R gelangt, zunächst durch eine Vorbehandlung PT (Pre-Treatment) und wird in diesem Verfahrensschritt unter Zufuhr von Wasserdampf aufbereitet. Ein Teil wird hernach dem Pyrolyse-Reaktor R zugeführt, während der Rest über eine Lieferleitung D1 (Delivery Line 1) direkt dem Brenner für die Druckdampf-Erzeugung zugeführt wird.

[0016] Der Pyrolyse-Reaktor R, beispielsweise ein EREKA Bioreaktor der M.E.E. Schwerin GmbH in Deutschland, zerlegt kohlenwasserstoffhaltige Abfälle, Reststoffe und/oder Ersatzbrennstoffe in die vier typischen Pyrolyseprodukte. Bei diesem Reaktor R handelt es sich um ein liegendes, geschlossenes Stahlrohr, in dessen Innerem mindestens eine heizbare drehbare Förderschnecke das auf einer Seite zugeführte Inputmaterial langsam auf die andere Seite fördert. Je nach Konstruktion können auch mehrere derartige heizbare Förderschnecken im Innern des Reaktor-Rohres angeordnet sein. Die Pyrolyse des Inputmaterials erfolgt unter Sauerstoffabschluss auf einer Temperatur von 350°C bis 800°C. Nach der Pyrolyse folgt die unerlässliche Nachbehandlung der Pyrolyseprodukte Öl, Gas und Koks zwecks Entfernung von nicht erwünschten Kontaminanten aus diesen Pyrolyseprodukten. Das erfolgt mit der

hier vorgestellten Anlage nach der thermischen Spaltung des Ausgangsmaterials mittels der Pyrolyse im Reaktor R durch eine Aufarbeitung in einer dem Reaktor R nachgeschalteten zentralen technisch-chemischen Aufarbeitungs-Einrichtung.

[0017] Die aus dem Pyrolyse-Prozess resultierenden Pyrolyse-Produkte werden je nach Art verschieden weiterbehandelt. Das Pyrolysegas wird einer Gasreinigung GP (Gas Purification) zugeführt, für die auch Wasser benötigt wird, wie man anhand einer eingezeichneten Wasserzufuhr erkennt. Die Gasreinigungseinrichtung beinhaltet einen Quenscher und einen elektrostatischen Filter. Die Gase werden also gewaschen, gekühlt und mittels eines elektrostatischen Feldes werden feste Partikel abgeschieden. Der aus dem Reaktor R austretende Permanentgasanteil und die kurzkettingen Kohlenwasserstoffe enthalten NOx, SOx, Quecksilber, Cl, HCl, div. weitere Halogene und deren Verbindungen. Die Dekontamination erfolgt in der Gasreinigungseinheit GP mittels Säure, und einer basischen Wäsche in einer Quensch-Einrichtung Q. In der weitergehenden Filterung können in dieser Gasreinigungseinheit GP Aerosole, Staubpartikel, die ebenfalls schadstoffbelastet sein können, abgeschieden werden. Das erfolgt mittels des nachgeschalteten elektrostatischen Abscheiders. Nach einer Reinigung kann eine vorschriftskonforme energetische Nutzung dieses Pyrolyse-Gases erfolgen und wird über die Lieferleitung D2 direkt dem Brenner und Kessel zugeführt. Dazu darf die Lieferleitung D2 nicht länger als 50 Meter lang sein, um sonst auftretende Harzausscheidungen zu vermeiden.

[0018] Das im Reaktor R durch die Pyrolyse des RESH entstandene Pyrolyse-Öl enthält Schwermetalle wie Cd, Se, Ba usw. Seine Dekontamination erfolgt in einem Quenscher Q, in welchem es gewaschen wird. Das Öl/Wassergemisch fließt hernach in die Wasserbehandlung WT, in welcher Wasser abgetrennt wird und das Öl fein gefiltert wird. Das Restwasser aus der Wasserbehandlung wird abgezogen und über die Lieferleitung D5 einer gesonderten Abwasserreinigung zugeführt, während das Öl nach dieser Reinigung über die Lieferleitung D3 direkt dem Brenner zugeführt wird. Nach dieser Reinigung kann also dieses Pyrolyse-Öl dem Brenner und Kessel als Energieträger direkt zugeführt werden.

[0019] Pyrolyse-Koks ist weitestgehend frei von Kohlenwasserstoffen, ist aber trotzdem gering belastet mit organischen Substanzen wie Mineralöl-Kohlenwasserstoffen MKW, Polyaromatischen Kohlenwasserstoffe PAK, sowie Mischungen von allerlei aromatischen Kohlenwasserstoffen BTX, sowie ausserdem Schwermetallen, z.B. Kupfer, Cd, Fe, Ni, Co, Zn, Sn, Al, sowie anorganischen Bestandteilen wie SiO₂ und ähnlichen. Die Dekontamination erfolgt durch magnetische Eisenentfernung in einer gesonderten Koks-Nachbehandlung CT (Coke Treatment). Dort wird sortiert, werden die Schadstoffe chemisch ausgewaschen, oder sie werden elektrolytisch getrennt oder ein Teil wird über die Lieferleitung D6 einer direkten Verhüttung zugeführt. Die abgetrenn-

ten Metalle sowie sämtliche abgetrennten Nicht-Eisen-Stoffe werden somit einer Wiederverwendung zugeführt. Anfallendes Metallkonzentrat kann zum Beispiel an einen Kupferaufbereiter geliefert werden. Die energetische Verwertung des Kohlenstoffanteiles erfolgt nach dieser Reinigung des zuvor belastet gewesenen Koks, in dem er über die Lieferleitung D7 direkt einem nachgeschaltete Brenner eines Kessels zugeführt wird, oder aber für eine spätere Verwendung zwischengelagert werden kann.

[0020] Pyrolyse-Wasser enthält an Kontaminanten Cl, HCl, weitere Halogene sowie deren Verbindungen, verschiedene Salze eine organische Belastung (BTX, Phenole, PAK usw.). Dessen Dekontamination geschieht durch Neutralisation, Fällung und Filterung. Nach einer Reinigung kann über die Lieferleitung D5 die weitere Nutzung erfolgen.

[0021] Die Zufuhr der nach dieser Behandlung gewonnenen und nun vorschriftskonformen Ersatzbrennstoffe erfolgt je über eine höchstens 50 Meter lange Leitung D1 bis D4 direkt in den Brenner einer Dampferzeugungs-Anlage. Damit kann eine Ausscheidung von Harzen in der Gasleitung D2 vermieden werden. Das Öl wird zusammen mit dem Pyrolyse-Wasser über die Leitung D3 eingespritzt, und der Koks über eine gesonderte Zufuhrleitung D4. Diese Zufuhr dieser Ersatzbrennstoffe erfolgt also entweder direkt aus den Nachbehandlungseinheiten PT, GP, WT oder CT, oder aber aus entsprechenden Speichertanks, in denen das Öl auf wenigstens 150°C gehalten wird, und das Gas auf >1 bar, das heisst auf einem Druck über dem Atmosphärendruck, damit es von selbst in den nachgeschalteten Brenner strömen kann.

[0022] Damit stehen nach technisch bekannter und effektiver Reinigung in der zentralen technisch-chemischen Aufarbeitung unter Einhaltung der bekannten Grenzwerte (z.B. einer Zementrichtlinie oder ähnlichen Vorschriften), die folgenden Produkte zur energetischen Verwertung zur Verfügung, und zwar innerhalb der gesetzlichen Vorgaben:

- Ersatzbrennstoffe aus der Lieferleitung D1
- Permanentgasanteil und kurzketten Kohlenwasserstoffe, aus der Lieferleitung D2
- Pyrolyseöl, aus der Lieferleitung D3
- Pyrolysekoks, aus der Lieferleitung D4

[0023] Folgende Produkte aus der zentralen technischen Aufarbeitung stehen ausserdem zu einer anderweitigen als zu Heizzwecken zu Verfügung:

- Produkte aus der Aufarbeitung des Inputmaterials (Fe, Zn, Cu auch PE, PET usw.) aus der Lieferleitung D3
- Produkte aus dem Wasser (HCl, Gips, Kalk usw.), aus der Lieferleitung D5
- Metalle aus der Koks-Aufbereitung, aus der Lieferleitung D6
- Produkte aus der Kohle (Cu, Kohlenstoff usw.), aus der Lieferleitung D7

[0024] Öle und Gase aus der Pyrolyse können nach dieser Behandlung uneingeschränkt eingesetzt werden und sind sogar schadstoffärmer als etwa Kohle. Alternativbrennstoffe sind unter anderem Pneu, Kunststoffschmelze, Altöl, sterilisiertes Fleischmehl, Klärschlamm und Lösungsmittel. All dieses kann mit dem vorgestellten Pyrolyse-Verfahren aufbereitet werden.

[0025] Der als Abfallprodukt aus dem Pyrolyse-Prozess resultierende unbehandelte Koks weist einen Heizwert von 10-20 MJ/kg auf. Dieser Koks enthält aber Schwermetalle in einer Menge, welche zum Beispiel die Vorgaben nach der «Zementrichtlinie» überschreitet und selbst in Zementöfen der Schweiz nicht verwendet werden darf. Dieser schmutzige Koks wird deshalb über die Leitung D7 abgeschieden und in Containern gesammelt und zur weiteren Aufbereitung ohne direkten Nutzen für die Verbrennung und Dampferzeugung abtransportiert.

[0026] Die Umweltverträglichkeitsprüfung hat ergeben, dass die Umweltauswirkungen insgesamt gering sind, wenn eine Wärmeerzeugung von Steinkohle auf Koks umgestellt wird, der aus einer Pyrolyse von RESH gewonnen wird. Insgesamt wird sogar CO₂ eingespart, weil die RESH-Pellets sowieso verbrannt werden müssten. Statt in einer Abfallverbrennungsanlage werden sie nach dem hier vorgestellten Verfahren für die Dampferzeugung eingesetzt, mit nachgeschalteter Verstromung, Elektrolyse von Wasser und Sauerstoff/Wasserstoff-Speicherung.

[0027] Als besondere Vorteile des Verfahrens sind die folgenden zu nennen: Erstens wird neben der Lösung des Brennstoff-Problems weiterhin ein Recycling von Schwermetallen wie zum Beispiel Kupfer, Eisen und Zink ermöglicht. Zweitens wird mittels des Verfahrens ermöglicht, Abwärme des Brenners in Fernwärmeleitungen einzuspeisen. Drittens kann RESH als Ausgangsmaterial für die Schwermetallproduktion verwendet werden, bei gleichzeitiger energetischer Nutzung zur Erzeugung von Wasserstoff/Sauerstoff. Viertens, selbst wenn der schwermetallbelastete Koks nicht aufgearbeitet wird, entsteht der Vorteil, dass die zu deponierenden Mengen auf ca. 50% reduziert werden. Ausserdem ist als Seiteneffekt eine Kupferverhüttung möglich.

[0028] Weiter vorteilhaft an diesem Verfahren und der Beheizung eines Kessels mit den Pyrolyse-Produkten für die Dampferzeugung ist ganz offensichtlich, dass die sonst unter Umständen zu deponierenden Massen von RESH auf etwa 50% gegenüber der Masse des Ausgangsmaterials reduziert werden. Vorteilhaft ist auch, dass die Pyrolyse-Produkte Gas und Öl speicherfähig sind, was einem kontinuierlichen Betrieb eines Kessels und der Dampf- und Stromerzeugung förderlich ist. So kann fein gesteuert jederzeit mehr oder weniger Gas und/oder Öl der Verbrennung zudosiert werden.

[0029] Die Technologien, um Druckdampf ab einem Brennstoff zu gewinnen, sind in vielerlei Ausführungen im Stand der Technik bekannt, auch das Entspannen von Druckdampf über eine Turbine zum Antreiben eines elektrischen Generators ist hinreichend bekannt. Das

Grundschemata dazu ist in **Figur 2** dargestellt. Die Wärmezufuhr 1 stammt aus den Lieferleitungen D1 bis D4 der Pyrolyseanlage. Im Kessel 2, der von Brenner erhitzt wird, erfolgt die Dampferzeugung. Der heisse Dampf wird über die Dampfleitung 3 einer Turbine 4 zugeführt und über diese entspannt. Die Abtriebswelle 5 dieser Turbine 4 treibt einen Generator 6 an, welcher elektrische Wechselspannung generiert, wobei für die hier einer RESH-Pyrolyse-Anlage nachgeschaltete Stromerzeugung ca. 10 Megawatt Strom liefern soll. Der Turbine 4 ist ein Kondensator 7 nachgeschaltet, dessen Abwärme 8 einer weiteren Nutzung zugeführt wird, zum Beispiel zum Heizen von Wohnungen, Gewerbe- und Büroräumen sowie Treibhäusern. Sie kann zu diesem Zwecke in ein allenfalls bestehendes Fernwärmenetz in der näheren Umgebung eingespeist werden. Der kondensierte und entspannte Dampf, das heisst das Wasser, wird über eine Speisepumpe 10 über die Speiseleitung 9 in den Kessel 2 gefördert.

[0030] Die **Figur 3** zeigt die Anlagekomponenten anhand einer beispielsweise Elektrolyse-Anlage, welche dem Generator 6 nachgeschaltet wird. Zunächst wird der erzeugte Wechselstrom im Transformator 11 auf eine geeignete Spannung für die Elektrolyse heruntertransformiert. Der energetische Wirkungsgrad der Elektrolyse von Wasser liegt bei ca. 70%. Mehrere Anlagenhersteller (z.B. Electrolyser Corp., Brown Boweri, Lurgi, De Nora) bieten grosse Elektrolysegeräte mit einem noch höheren Wirkungsgrad - von nahezu 100% - an. Da die Elektrolytkonzentration und die Temperatur einer Elektrolytlösung grossen Einfluss auf den Zellwiderstand und somit auf die Energiekosten haben, wird bei modernen Anlagen eine 25-30%ige KOH Lösung verwendet, und die Temperatur liegt bei ca. 70-90°C. Die Stromdichte liegt bei ca. 0,15 A/cm² und die Spannung bei ca. 1.90 V, mit Überspannung ca. 2.06 V. Bei Verwendung von Iridiumdioxid-Katysatoren als Anode, Platin als Kathode und perfluorierten, sulfonsäurehaltigen Membranen (Nafion) als Elektrolyt wurden schon Wirkungsgrade von 93% erreicht. Hernach erfolgt in einem Gleichrichter 12 die Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom. Durch die sogenannte Autoprotolyse des Wassers liegt das Wasser nicht immer in seiner reinen Form vor und bildet Oxonium-Ionen H₃O⁺ und Hydroxid-Ionen OH⁻. Beim Anlegen einer Spannung wandern die positiv geladenen Oxonium-Ionen H₃O⁺ im Alkali-Elektrolysestapel 13 zur Kathode 26. Dort können sie jeweils ein Elektron aufnehmen und es bilden sich neue Wasserstoffmoleküle H₂ die in einem Cryogen-Tank 27 aufgefangen werden. Die negativen geladenen Hydroxide OH⁻ wandern zur Anode 18. Dort verbinden sie sich entweder mit Protonen H⁺ zu Wasser H₂O oder sie geben Elektronen ab und wandeln sich zu Sauerstoff O₂ um, der ebenfalls in einem Cryogen-Tank 29 aufgefangen wird. Gute Anlagen benötigen für die Gewinnung von 1 kg Wasserstoff ca. 50 kWh elektrische Energie, was einen Wirkungsgrad von 66 % bezogen auf den Heizwert von Wasserstoff ergibt. Der energetische Wirkungsgrad der Elektrolyse

von Wasser beträgt je nach angewandtem Detailverfahren zwischen etwas über 60% und 85%. Die gewonnenen Gase H₂O und O₂ werden in Reinigern 15 noch weiter rein gemacht. Flüssiger Wasserstoff H₂ gelangt durch einen Filter 16 in einen Laugenbehälter und über einen Motor 18 wird diese Lauge zum Alkali-Elektrostapel 13 gepumpt, zur Förderung der Elektrolyse. Der gasförmige Wasserstoff H₂ gelangt nach dem Reiniger 15 in einen Zwischentank 30. Von diesem wird flüssiger Wasserstoff H₂ unten abgezweigt und fliesst durch einen Verdichter und wird von einer Pumpe 32 über eine Leitung in einen oberen Bereich des Zwischentanks 30 zurückgeführt und dort über das Ventil 33 unter Abkühlung entspannt. Der gasförmige Wasserstoff H₂ oberhalb des Flüssigkeitsspiegels wird oben über die Leitung 34 abgeführt und in einem Gasbehälter 21 gepuffert. Von dort wird er über einen Flüssigas-Kompressor in einen Deoxidierer 23 geführt und dann über die beiden Trockner 24 und über ein Kontrollventil 25 in einen Speichertank entlassen. Die entstehenden Stoffe Wasserstoff H₂ und Sauerstoff O₂ werden aufgefangen und der Wasserstoff wird vorzugsweise in Metallhydrid-Speichern eingelagert, für eine bedarfsweise Nutzung. Ein Teil des erzeugten Wasserstoffs H₂, etwa ein Drittel, wird zur Aufrechterhaltung der Pyrolyse des RESH eingesetzt und kann das sonst dafür nötige Erdgas ersetzen. Die Abluft vom Brenner wird über eine Co₂/NO_x-Reduktion zu Brennstoff oder anderen Stoffen umgewandelt. Der überschüssige Dampf kann in ein Fernwärme-Netz eingespeist werden, oder zum Trocken von Metallen oder Klärschlamm eingesetzt werden.

[0031] Für die Speicherung des erzeugten Wasserstoffs bieten sich im Grundsatz verschiedene Technologien an. Um wesentliche Mengen von Wasserstoff-Gas in einem begrenzten Volumen speichern zu können, muss man das Gas auf einen hohen Druck komprimieren. Hierfür gibt es Druckgasflaschen und Drucktanks, die typischerweise für Drucke in der Grössenordnung von einigen hundert bar geeignet sind. Beispielsweise können Drucktanks für mit Wasserstoff betriebene Kraftfahrzeuge, etwa solche mit Brennstoffzellen für Elektroantrieb gebaut werden, die heute üblicherweise für einen Maximaldruck von 700 bar oder gar 800 bar ausgelegt sind. Eine weitere Entwicklung für Drucke sogar deutlich oberhalb von 1000 bar erscheint als technisch möglich. Die verwendeten Druckgasflaschen müssen aus optimierten Materialien bestehen, die durch den Wasserstoff nicht spröde werden und spezielle Verschlüsse aufweisen, da sonst hohe Verluste durch Diffusion auftreten würden. Leider erreicht man selbst mit sehr hohen Drücken keine allzu hohen Energiedichten.

[0032] Die volumetrische Energiedichte von Wasserstoff selbst bei hohen Drücken ist relativ gering, die Dichte ist eben relativ niedrig. Beispielsweise beträgt die Dichte bei 700 bar lediglich ca. 40kg/m³. Um 1 kg Wasserstoff zu speichern, braucht es selbst bei 700 bar noch ein Volumen von ca. 25 Litern. Zusammen mit dem relativ hohen spezifischen Heizwert von 120 MJ/kg erhält man

eine volumetrische Energiedichte von 4,8 MJ/l (Megajoule pro Liter). Das ist etwa 6 x weniger als Benzin mit 31 MJ/l bietet. Dies führt dazu, dass beispielsweise ein 40-Tonnen-Lkw nur ca. 400 kg komprimierten Wasserstoff transportieren kann. Für eine Belieferung von Wasserstoff-Tankstellen wäre dies beispielsweise ein ziemlich unbefriedigender Wert. Der Transportaufwand wäre weitaus höher als jener für flüssige Treibstoffe.

[0033] Ein weiteres Problem ist der Energieaufwand für die Kompression des Wasserstoffs, der natürlich mit dem Druck ansteigt. Beispielsweise kostet die Kompression von 1 bar auf 800 bar ca. 17MJ/kg, was ca. 12% des Brennwertes oder 14% des Heizwertes des Wasserstoffs ausmacht. Eine Rückgewinnung bei der Entspannung ist nicht praktikabel.

[0034] Eine höhere Speicherdichte bei gleichzeitig stark reduziertem Druck ist möglich durch die Speicherung verflüssigten Wasserstoffs bei einer sehr niedrigen Temperatur von -253°C. Aber dann handelt man sich die Schwierigkeiten mit dem Umgang mit so tiefen Temperaturen ein. Ausserdem ist die Energiedichte des flüssigen Wasserstoffs mit 8,5 MJ/l weniger als ein Drittel des Wertes für Benzin. Der Energieaufwand für die Verflüssigung des Wasserstoffs ist ausserdem erheblich. Je nach gewählter Technologie entspricht er mindestens etwa einem Fünftel des Heizwertes, oft aber sogar mehr als ein Viertel. Ausserdem ist das Abdampfen für Anwendungen in Fahrzeugen ein grosses Problem.

[0035] Um die oben beschriebenen Probleme der Speicherung von Wasserstoff zu lösen, kann man auch diverse Arten von Wasserstoffträgern einsetzen, also feste oder flüssige Substanzen, an die grössere Mengen von Wasserstoff angelagert werden können. Relative hohe Speicherdichten sind möglich mit Metallhydridspeichern. Hier reagiert der Wasserstoff mit einem spröden Metall, wobei ein festes Metallhydrid entsteht. Hierin wird der Wasserstoff so fest gebunden, dass er normalerweise bei Raumtemperatur nicht mehr entweicht. Für eine Entladung muss ein solcher Speicher stark aufgeheizt werden. Metallhydridspeicher wurden erfolgreich entwickelt, sind aber bisher nur für Spezialanwendungen eingesetzt worden, zum Beispiel in U-Booten. Bei der Optimierung von Metallhydridspeichern muss ein Kompromiss zwischen einer hohen Speicherkapazität und einer akzeptablen Temperatur und Wärmemenge für die Entnahme gefunden werden. Ein Problem ist häufig die hohe Masse des Metalls. Der Anteil des gespeicherten Wasserstoffs beträgt höchstens ganz wenige Prozente dieser Masse.

[0036] Flüssige Wasserstoffträger als weitere Variante haben den Vorteil, dass sie einfach in Tanks gespeichert oder durch Rohrleitungen transportiert werden können. Hierfür kommen im Prinzip diverse Substanzen infrage. Schon lange bekannt ist die Möglichkeit der Verwendung von Ammoniak (AHs). Interessant sind zudem diverse organische, also auf Kohlenstoff und Wasserstoff basierende Substanzen, die als LOHC (= *liquid organic hydrogen carriers*) bezeichnet werden. Gegenüber Ammoniak

haben sie den grossen Vorteil, bei Zimmertemperatur flüssig und wesentlich einfacher handhabbar zu sein. Untersucht wurde insbesondere Toluol, dass durch Hydrierung zu Methylcyclohexan umgewandelt wird, ausserdem N-Ethylcarbazol und Dibenzyltoluol. In all diesen Fällen werden C-C-Doppelbindungen bei der Hydrierung in Einfachbindungen überführt. Üblicherweise wird ein Katalysator für die Ein- und Ausspeicherung eingesetzt. Dibenzyltoluol hat besonders interessante Eigenschaften für die Verwendung als flüssiger Wasserstoffträger. Es wird bereits seit Jahrzehnten als Wärmeträgeröl verwendet und hat sich in mehrerer Hinsicht gegenüber anderen Trägersubstanzen als überlegen erwiesen. Das Dibenzyltoluol kann immerhin mehrere Prozent seines Gewichts an Wasserstoff aufnehmen. Ein Liter kann so ca. 660 Liter Wasserstoffgas bei Normaldruck speichern, was allerdings in Bezug auf den Heizwert auch nur zu einer Energiedichte von 7,1 MJ/l führt, also gut viermal weniger als für Benzin. Durch den niedrigen Dampfdruck gelangt nur sehr wenig der Trägersubstanz bei der Entladung in den herausgelösten Wasserstoff - trotz der relativ hohen Entladetemperaturen von z. B. zwischen 250 °C und 320 °C. Auch sicherheitstechnisch ist diese Substanz günstig, beispielsweise weitaus besser als Dieselöl: Es tritt bei moderaten Temperaturen praktisch kein Wasserstoff aus, wodurch die Substanz selbst in beladener Form praktisch unbrennbar ist.

[0037] Flüssige Wasserstoffträger (LOHC) könnten also im Prinzip wie konventionelle flüssige Treibstoffe verwendet werden, um Brennstoffzellen in Fahrzeugen zu versorgen, wobei die Energiedichte leider rund 4 bis 5 mal niedriger wäre als jene konventioneller Treibstoffe. Ein Teil dieses Nachteils wird aber dadurch ausgeglichen, dass der Wirkungsgrad der Verstromung des Wasserstoffs mittels Brennstoffzellen erheblich ist und besser als die direkte Verbrennung von Treibstoffen in Verbrennungsmotoren. Dadurch werden die zu transportierenden und speichernden Flüssigkeitsmengen "nur" um einen Faktor 2 bis 3 gegenüber Benzin oder Diesel erhöht.

[0038] Idealerweise verwendet man Hochtemperatur-Brennstoffzellen, deren Abwärme ausreichend ist, um die Entladung des Speichers zu ermöglichen. Der entladene Wasserstoffträger wird beim Tanken abgesaugt, um anderswo wieder neu mit Wasserstoff beladen zu werden. Der "Ladezustand" solcher LOHC-Speicher lässt sich relativ einfach messtechnisch überprüfen, beispielsweise optisch über den Brechungsindex.

[0039] Die **Figur 4** zeigt die gesamte Anlage in einem Überblick, aus Pyrolyse, Stromerzeugung, Elektrolyse und Wasserstoff-Speicherung in einem Schema. Zu diesem Schema werden nachfolgend typische zusammenfassende Grössenangaben zu dieser Anlage wiedergegeben, wenn von einer jährlichen Betriebsdauer von 7'000 Stunden ausgegangen wird. Der RESH wird einem Shredder zugeführt und die Leichtfraktion daraus wird der Pyrolyse zugeführt. Wenn zum Beispiel 14'000 Tonnen RESH pro Jahr anfallen, so ergibt das pro Stunde 2 Tonne RESH, welcher einer Pyrolyse zugeführt wird. Die Py-

rolyse wird auf einer Temperatur von mindestens 450°C betrieben, in weiteren Stufen auf bis zu 600°C. Die Abfallprodukte sind CO₂, Kohlenstoff und Metallkonzentratione in einer Menge von ca. 1'400 Tonnen pro Jahr, oder 0.1 bis 0.2 Tonnen pro Stunde. Aus der Pyrolyse kommt Abwärme in Form von Heissdampf im Energiebetrag von ca. 50 Gigawatt-Stunden Energie pro Jahr, was einer Wärmeleistung von 7.14 Megawatt entspricht. Der Dampf wird über eine 2 Megawatt-Turbine entspannt und es werden damit ca. 14 Gigawattstunden Strom pro Jahr produziert. Dieser wird für den Betrieb einer 2 Megawatt Wasserelektrolyse-Einheit eingesetzt, mit einer Zufuhr und einem Verbrauch von Osmosewasser im Umfang von 334 Litern/Stunde. Der erzeugte Wasserstoff H₂, ca. 1'240 kWh/h, was einer Wasserstoffleistung von 1.24 MW entspricht, wird in einem Metallhydrid Speicher eingelagert. Ca. ein Drittel davon wird als Prozessgas für die Aufrechterhaltung der Pyrolyse eingesetzt, der Rest ist der Netto-Ertrag der Anlage an Wasserstoff H₂, etwa 825 kWh/h. Dieser wirkt mit einem Kreislauf für Wasser oder Dampf zusammen. Eine Leitung dafür geht vom Metallhydrid-Speicher zur Abdampfleitung aus der Turbine und dort durch einen Wärmetauscher und wieder zurück in den Metallhydrid-Speicher. Aus dem Metallhydrid-Speicher geht ein Teil, etwa ein Drittel des erzeugten Wasserstoffs H₂ zurück in die Pyrolyse-Anlage, zur Aufrechterhaltung der Pyrolyse, die damit auf die Zufuhr von Erdgas im Umfang von ca. 840'000 m³/Jahr oder 120 m³ pro Stunde bzw. auf eine Wärmezufuhr von 1.24 Megawatt verzichten kann. Der grössere Anteil des erzeugten und gespeicherten Wasserstoffs H₂, etwa zwei Drittel, kann in Wasserstoff-Druckbehälter von Fahrzeugen gepumpt werden und wird dort letztlich über Brennstoff-Zellen in den Fahrzeugen zu Fahrstrom umgewandelt werden.

Legende

[0040]

B	Bunker
R	Reaktor
C	Katalysator
PT	(Pre-Treatment) Vorbehandlung des RESH
GP	(Gas Purification) Gasreinigung
Q	Quentscher
WT	(Water Treatment) Wasserbehandlung
CT	(Coal Treatment) Koksbehandlung
F1	(Feeder line 1) Zufuhrleitung für Resh
F2	(Feeder line 2) Zufuhrleitung von behandeltem Resh in den Reaktor
F3	(Feeder line 3) Zufuhrleitung Pyrolysegas in die Gasreinigung
F4	(Feeder line 4) Zufuhrleitung Pyrolyseöl in den Quentscher
F5	(Feeder line 5) Zufuhrleitung gereinigtes Gas in die Wasserbehandlung
1	Wärmezufuhr

2	Kessel
3	Druckdampfleitung
4	Turbine
5	Abtriebswelle zum Antrieb eines Generators
6	Generator
7	Kondensator auf der Abdampfseite der Turbine
8	Abwärme für weitere Nutzung
9	Speiseleitung in den Kessel
10	Speisepumpe
11	Transformer
12	Gleichrichter
13	Alkalielektrolyse-Stapel
14	Gas-Separator
15	Reiniger
16	Filter
17	Laugenbehälter
18	Motor
19	Wasser-Reinigung
20	Speisepumpe für Wasser
21	Gasbehälter
22	Flüssiggas-Kompressor
23	Deoxidierer
24	Trockner
25	Kontroll-Ventil
26	Kathode
27	Wasserstoff-Cryotank
28	Anode
29	Sauerstoff-Cryotank
30	Zwischentank
31	Verdichter
32	Motor/Pumpe
33	Entspannungsventil
34	H ₂ -Leitung

35

Patentansprüche

- Verfahren zur thermischen Aufarbeitung von kohlenstoffhaltigen Reststoffen (RESH) zur Erzeugung von Energieträgern in Form von elektrischem Strom und Wasserstoff, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit Wasserstoff ein Teilkreislauf erzeugt wird, indem
 - der RESH in einem Reaktor (R) unter Sauerstoffabschluss in einer Pyrolyse durch Wasserstoff-Zugabe thermisch zerlegt wird und hernach die Pyrolyse-Produkte Öl, Gas und Koks getrennt in einer technisch-chemischen Aufarbeitung (GP, Q, WT, CT) von Schadstoffen befreit und gereinigt werden,
 - Öl, Gas und Koks über Lieferleitungen (D1-D4) direkt einer Verbrennung zwecks Wärmeerzeugung zugeführt werden und damit in einem Dampfkessel Druckdampf erzeugt wird,
 - der Druckdampf über eine Turbine (4) mit elektrischem Generator (6) entspannt wird und vom Generator (6) elektrischer Wechselstrom erzeugt wird,

- d) der elektrische Wechselstrom nach Gleichrichtung für eine Elektrolyse genutzt wird und damit Sauerstoff und Wasserstoff aus zugeführtem Wasser erzeugt werden,
- e) ein Teil des erzeugten Wasserstoffes zur Aufrechterhaltung der Pyrolyse an dieselbe zurückgeführt wird, und der überschüssige Wasserstoff in einen Drucktank gepumpt wird oder in einem Metallhydrid-Speicher eingelagert wird, für eine bedarfsweise Nutzung, und auch der erzeugte Sauerstoff in einen Drucktank gepumpt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Abluft vom Brenner über eine CO_2/NO_x -Reduktion zu Brennstoff umgewandelt wird.
3. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der überschüssige Dampf nach seiner Entspannung in ein Fernwärme-Netz eingespeist wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der überschüssige Dampf nach seiner Entspannung zum Trocken von Metallen eingesetzt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der überschüssige Dampf nach seiner Entspannung zum Trocken Klärschlamm aus Abwasser-Reinigungsanlagen eingesetzt wird.
6. Anlage zur Durchführung des Verfahrens zur thermischen Aufarbeitung von kohlenstoffhaltigen Reststoffen (RESH) zur Erzeugung von Energieträgern in Form von elektrischem Strom und Wasserstoff nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie einen Reaktor (R) einschliesst, in dem RESH unter Sauerstoffabschluss in einer Pyrolyse durch Wasserstoff-Zugabe thermisch zerlegbar und hernach die Pyrolyse-Produkte Öl, Gas und Koks trennbar in einer technisch-chemischen Aufarbeitung (GP, Q, WT, CT) von Schadstoffen befreibar und reinigbar sind, weiter Lieferleitungen (D1-D4), über welche das Öl, das Gas und der Koks direkt einer Verbrennung zwecks Wärmerzeugung einem Brenner mit beheiztem Dampfkessel (2) zuführbar sind, zur Erzeugung von Druckdampf im Dampfkessel (2), und wobei eine Dampfleitung vom Dampfkessel (2) zu einer Turbine (4) mit angeschlossenen Generator (6) führt, zur Erzeugung von Wechselstrom, weiter dass die Anlage eine Gleichrichter-Anlage (12) zur Transformation des erzeugten Wechselstroms in Gleichstrom einschliesst, und schliesslich eine Elektrolyse-Anlage (Figur 3), die speisbar mit dem erzeugten Gleichstrom ist, zur Aufspaltung von zugeführtem Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff mittels Elektrolyse, und die mit je einem Drucktank für den Sauerstoff O_2 und für den Wasserstoff H_2 oder mit einem Drucktank für den Sauerstoff O_2 und einem Metall-Hydrid-Speicher für den Wasserstoff H_2 ausgestattet ist, wobei eine Rückleitung für den Wasserstoff in die Pyrolyse-Anlage zur bedarfsweisen Unterstützung und Aufrechterhaltung der Pyrolyse des RESH führt.
7. Anlage nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie nach dem Materialzufluss des RESH mindestens folgende Anlagekomponenten aufweist:
- einen Pyrolyse-Reaktor (R),
 - eine Gasreinigungs-Einheit (GP) für die Nachbehandlung und Reinigung von Pyrolyse-Gas,
 - einen Quenscher (Q) für die Nachbehandlung und Reinigung von Pyrolyse-Öl,
 - eine Wasserbehandlungs-Einheit (WT) für die Nachbehandlung, Trennung und Reinigung von Gas aus (GP) und Öl aus (Q),
 - eine Koks-Behandlungs-Einheit (CT), zur mechanischen Behandlung von Pyrolyse-Koks, sowie
 - Lieferleitungen (D1 bis D4) für die bereitgestellten Brennstoffe aus (PT), (GP), (WT) und (CT).
 - einen Dampfkessel (2) mit Brenner, in welchen die Lieferleitungen (D1)-(D4) münden, zur Verbrennung der bereitgestellten Brennstoffe und Erzeugung von Druckdampf,
 - eine Turbine (4) mit angeschlossenen Generator (6) zur Erzeugung von Wechselstrom, welche mit Druckdampf aus dem Dampfkessel (2) gespeist ist,
 - einen Transformator (11) zur Transformation des erzeugten Wechselstroms in eine für eine Wasser-Elektrolyse geeigneten Spannung;
 - eine Gleichrichteranlage (12) für Gleichrichtung des transformierten Wechselstroms in Gleichstrom;
 - eine Elektrolyse-Anlage, gespeist mit dem erzeugten Gleichstrom, zur Aufspaltung von zugeführtem Wasser in Sauerstoff O_2 und Wasserstoff H_2 , mit Ableitungen und elektrischen Druckpumpen, und die mit je dem Drucktank für den Sauerstoff O_2 und für den Wasserstoff H_2 oder mit dem Drucktank für den Sauerstoff O_2 und einem Metall-Hydrid-Speicher für den Wasserstoff H_2 ausgestattet ist, wobei eine Rückleitung für den Wasserstoff in die Pyrolyse-Anlage zur bedarfsweisen Unterstützung und Aufrechterhaltung der Pyrolyse des RESH führt.

Fig. 1

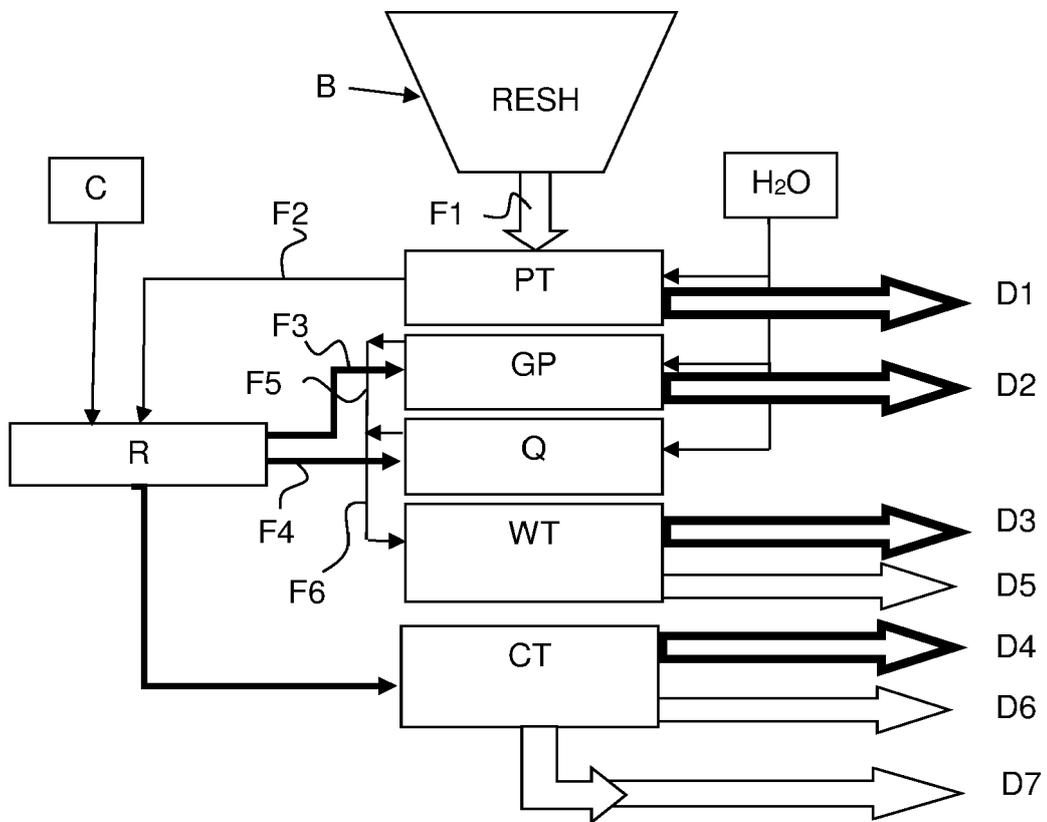


Fig. 2

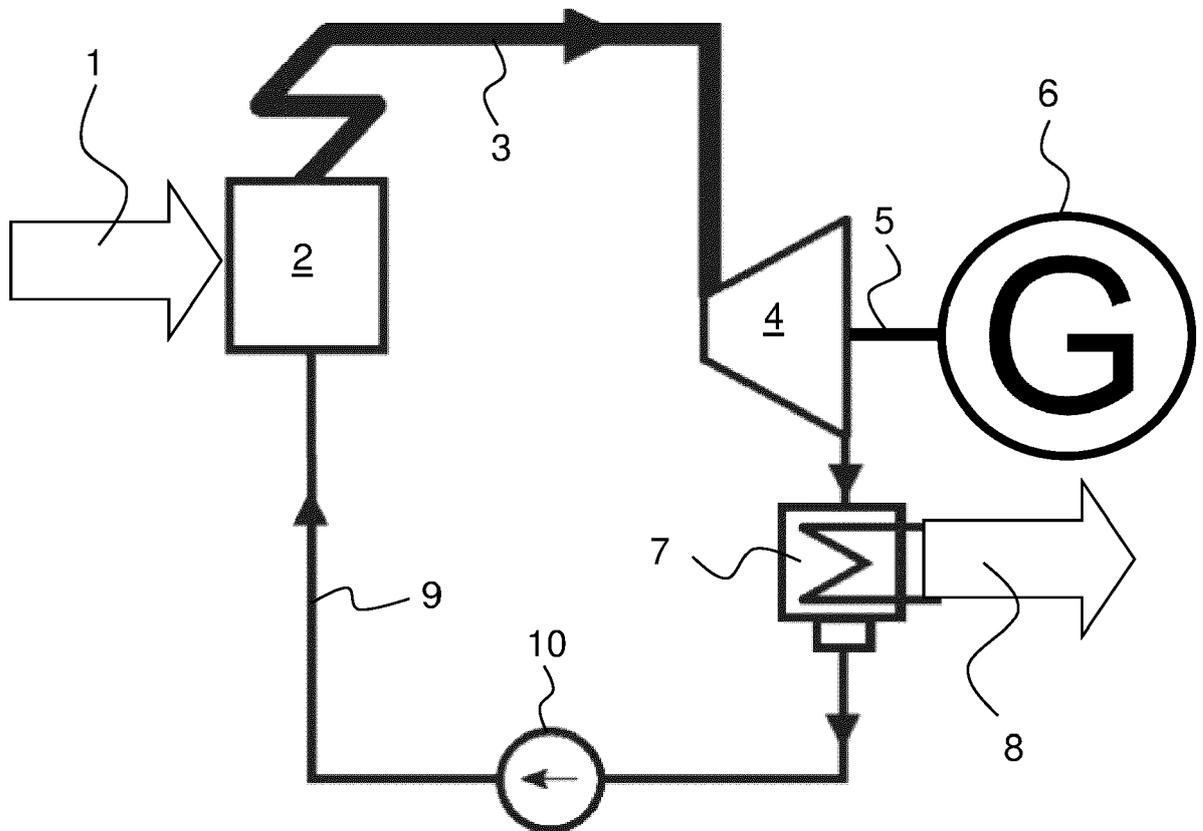


Fig. 3

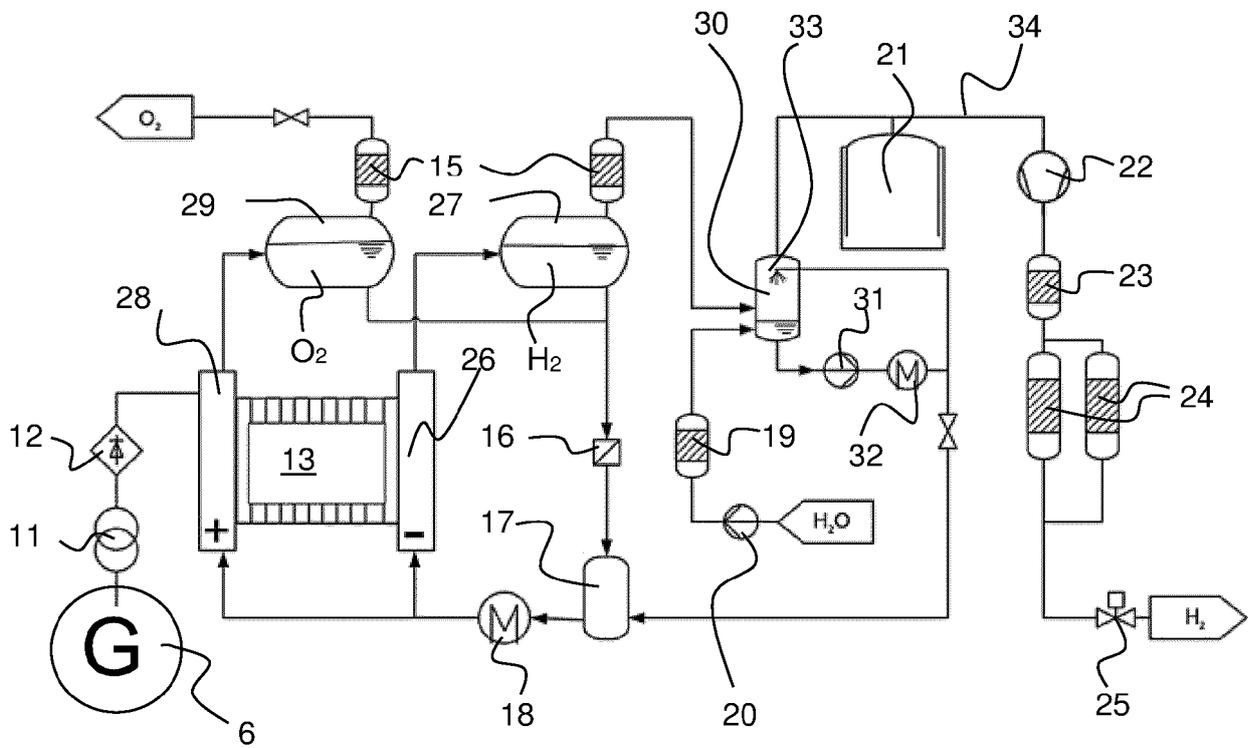
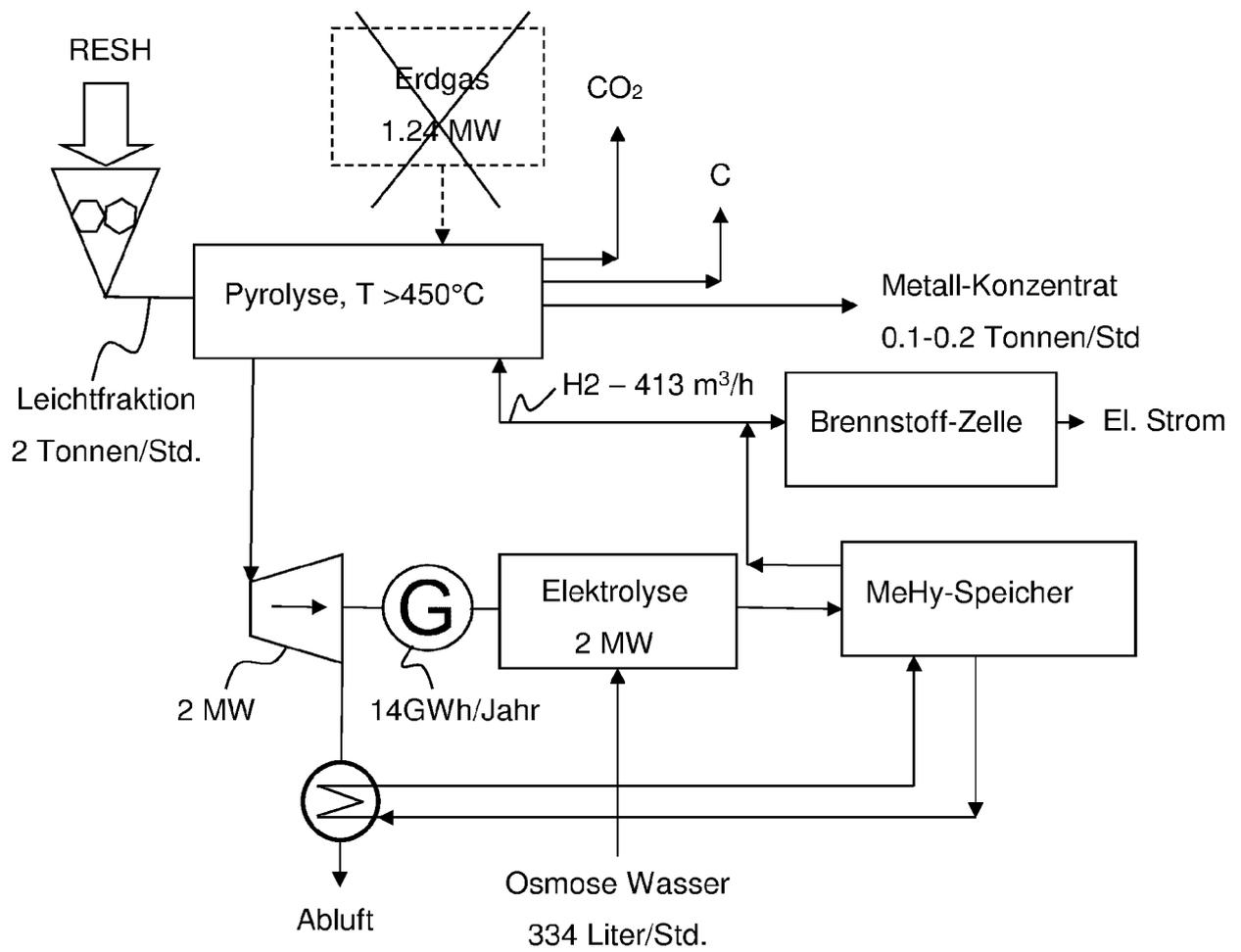


Fig. 4





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 23 15 6163

5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
Y	WO 2020/239716 A1 (COVESTRO INTELLECTUAL PROPERTY GMBH & CO KG [DE]) 3. Dezember 2020 (2020-12-03) * Seite 14, Zeile 1 - Seite 15, Zeile 16; Abbildung 1; Beispiel 1 * -----	1-7	INV. C10B57/12 C10G1/06
Y	US 2010/077711 A1 (WEIGELT HORST [DE]) 1. April 2010 (2010-04-01) * Absätze [0042], [0043]; Ansprüche; Abbildung 1 *	1-7	
A	DE 20 2011 110102 U1 (NEW POWER PACK GMBH [DE]) 19. November 2012 (2012-11-19) * Zusammenfassung; Ansprüche; Abbildungen * -----	1-7	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			C10B C10G
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 14. Juni 2023	Prüfer Bertin, Séverine
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

1
EPO FORM 1503 03.82 (P04/C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 23 15 6163

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

14-06-2023

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2020239716 A1	03-12-2020	CN 113853398 A	28-12-2021
		EP 3744812 A1	02-12-2020
		ES 2909402 T3	06-05-2022
		HU E057982 T2	28-06-2022
		JP 2022534099 A	27-07-2022
		KR 20220012858 A	04-02-2022
		PT 3744812 T	24-03-2022
		US 2022227701 A1	21-07-2022
		WO 2020239716 A1	03-12-2020

US 2010077711 A1	01-04-2010	DE 102008049350 A1	01-04-2010
		EP 2169030 A2	31-03-2010
		US 2010077711 A1	01-04-2010

DE 202011110102 U1	19-11-2012	DE 102011086499 A1	16-05-2013
		DE 202011110102 U1	19-11-2012
		EP 2594624 A1	22-05-2013
		HR P20150490 T1	03-07-2015
		PL 2594624 T3	31-07-2015
		SI 2594624 T1	29-05-2015

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- WO 2020239716 A1 [0007]
- US 2010077711 A1 [0007]