



(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43)

Veröffentlichungstag:
07.08.2024 Patentblatt 2024/32

(51)

Internationale Patentklassifikation (IPC):
C21B 13/00 (2006.01) C21B 13/02 (2006.01)

(21)

Anmeldenummer: 24152848.8

(52)

Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
C21B 13/004; C21B 13/0073; C21B 13/026;
C21B 13/029

(22)

Anmeldetag: 19.01.2024

(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:
GE KH MA MD TN

(72)

Erfinder:
• Fabry, Matthias Jonas
48147 Münster (DE)
• Großarth, Marius
47137 Duisburg (DE)
• Schubert, Daniel
47057 Duisburg (DE)
• Weinberg, Matthias
47809 Krefeld (DE)

(30)

Priorität: 02.02.2023 DE 102023102571

(71)

Anmelder: ThyssenKrupp Steel Europe AG
47166 Duisburg (DE)

(74)

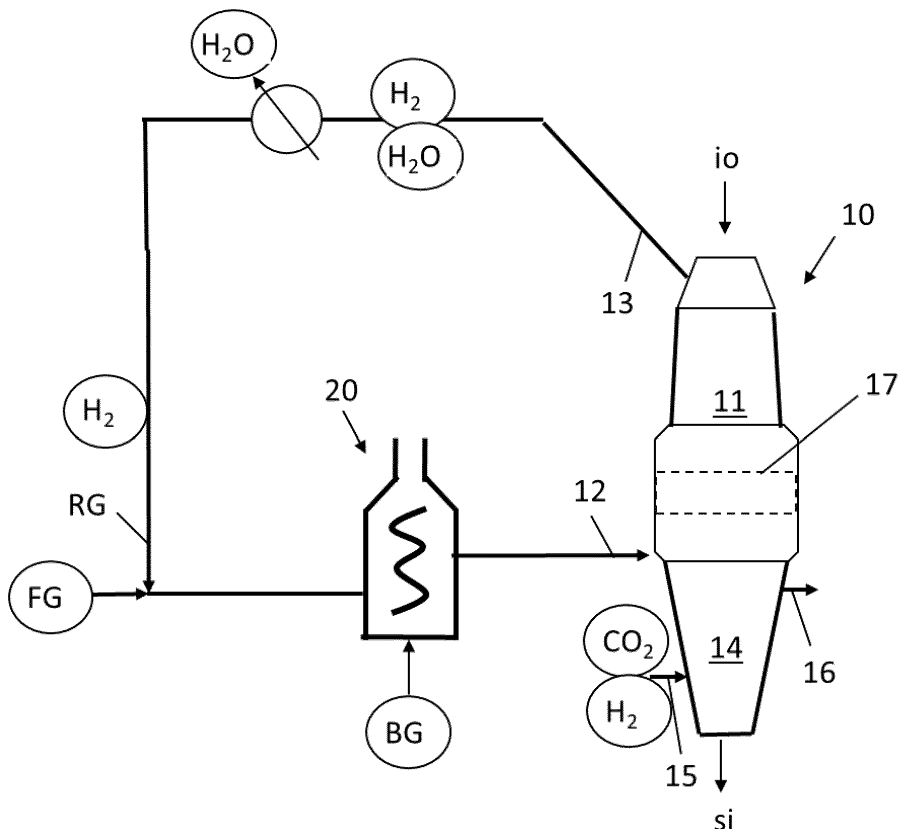
Vertreter: ThyssenKrupp Steel Europe AG
Patente/Patent Department
Kaiser-Wilhelm-Straße 100
47166 Duisburg (DE)

(54)

VERFAHREN ZUR DIREKTREDUKTION VON EISENERZTRÄGERN IN EINEM SCHACHTOFEN

(57)

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Direktreduktion von Eisenerz zu Eisenschwamm nach Anspruch 1.



Figur 1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Direktreduktion von Eisenerzträgern in einem Schachtofen.

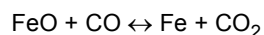
[0002] Beim Direktreduktionsverfahren findet eine heterogene Reaktion zwischen den Eisenerzträgern und dem Reduktionsgas statt, bei der Sauerstoff aus dem Eisenerz entfernt wird. Zur Erzeugung des Reduktionsgas werden klassisch Kohle und/oder Erdgas bzw. kohlenwasserstoffhaltige Verbindungen und/oder Verbindungen aus Kohlenstoff und Sauerstoff als Reduktionsgas verwendet. Der Trend in letzter Zeit geht dahin, dass häufiger auch Wasserstoff als Reduktionsgas vorgeschlagen wird. Die Reaktion findet unterhalb des Schmelzpunktes des Eisenerzes statt, sodass die äußere Form der Erze unverändert bleibt. Da es bei der Entfernung von Sauerstoff zu einer Gewichtsreduktion von etwa 1/4 bis 1/3 kommt, ergibt sich eine wabenförmige Mikrostruktur des Reaktionsproduktes (festes poröses Eisen mit vielen luftgefüllten Zwischenräumen). Daher wird das direktreduzierte Eisen ("direct reduced iron") häufig auch als Eisenschwamm ("sponge iron") bezeichnet. Klassisch wird beim Direktreduktionsverfahren ein Schachtofen als Reaktor mit einer Reduktionszone verwendet, durch welche das Eisenerz entgegen dem Reduktionsgas durchläuft. Bei einer speziellen Variante des Verfahrens ist die Reduktionszone oberhalb einer Kühlzone im Schachtofen angeordnet, wobei die Kühlzone mit einem Kühlgas durchströmt wird. Das Eisenerz durchläuft dann den Schachtofen in vertikaler Richtung von oben nach unten. Derartige Schachtöfen ermöglichen eine gute Durchströmung des Eisenerzes mit Reduktionsgas und optionalem Kühlgas aufgrund des zugrundeliegenden Kamineffektes. Insbesondere durchströmt das Reduktionsgas die Reduktionszone entgegen einer Bewegungsrichtung des Eisenerzes. Entsprechend durchströmt das Kühlgas die Kühlzone ebenfalls entgegen einer Bewegungsrichtung des erzeugten Eisenschwamms. Sowohl in der Reduktionszone als auch in der optionalen Kühlzone wird demnach das Gegenstromprinzip eingesetzt, um eine effiziente Reaktion zwischen den Gasen und den Feststoffen zu erreichen.

[0003] Als Reduktionsgas kann CO oder H₂ oder ein Mischgas umfassend CO und H₂ verwendet werden. Dieses Reduktionsgas(gemisch) wird dem Schachtofen zugeführt, in welchem es das Eisenerz reduziert. Als wesentliche Reaktionsprodukte entstehen CO₂, Wasserdampf (H₂O) und Eisenschwamm, bei Einsatz von 100 % H₂ entsteht im Wesentlichen kein CO₂. CO₂, Wasserdampf und unverbrauchtes Reduktionsgas werden mit frischem Gas gemischt und wieder dem Prozess zugeführt.

[0004] Die Erzeugung von Eisenschwamm kann zwei grundlegende Schritte umfassen. Als erster und notwendiger Schritt wird die Reduktion des Eisenerzes zu Eisenschwamm in einer Reduktionszone mit einem geeigneten heißen Reduktionsgas durchgeführt. Typischerweise umfasst ein Reduktionsgas im Wesentlichen Verbindungen oder Mischungen aus Kohlenstoff und Wasserstoff (beispielsweise CH₄), Verbindungen oder Mischungen aus Kohlenstoff und Sauerstoff (beispielsweise CO) und/oder Wasserstoff (H₂) bei Temperaturen im Bereich von 700 °C bis 1100 °C. Das heiße Reduktionsgas regiert nicht nur chemisch mit dem Eisenerz, sondern erwärmt dieses auch beim Durchströmen durch Kontakt. In einem zweiten und optionalen Schritt kann der erzeugte Eisenschwamm in einer Kühlzone mittels eines Kühlgases auf Temperaturen heruntergekühlt, die typischerweise unterhalb von 100 °C liegen. Entsprechende Verfahren sind der Fachwelt bekannt.

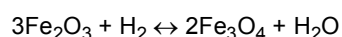
[0005] Natürliches Eisenerz besteht nebst Gangart aus Eisenoxid in Form von Hämatit (Fe₂O₃) oder Magnetit (Fe₃O₄). Beide Eisenoxidformen sind bei Umgebungstemperatur stabil. Pellets aus Eisenerz bestehen in der Regel aus Hämatit (Fe₂O₃), können aber auch noch einen Kern aus Magnetit (Fe₃O₄) aufweisen.

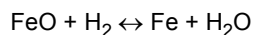
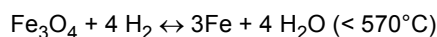
[0006] Bei CO als Reduktionsgas können auf einzelne Eisenoxidphasen folgende Reduktionsgleichungen angewandt werden:



[0007] Das bekannte Baur-Glässner Diagramm (BGD) für CO/CO₂-Gemische bietet eine gute Aussage über die Stabilität von Eisenerzphasen und Reduktionsgas. Das BGD zeigt Stabilitätsbereiche des Wüstits, Magnetits und Eisens bei unterschiedlichen Temperaturen und CO/CO₂-Verhältnisse, in Form von Linien (Gleichgewichtslinien), welche druckunabhängig sind.

[0008] Bei H₂ als Reduktionsgas können auf einzelne Eisenoxidphasen folgende Reduktionsgleichungen angewandt werden:





[0009] Das Baur-Glässner Diagramm (BGD, H_2) ist für Wasserstoff modifiziert worden. Auch das BGD, H_2 zeigt Stabilitätsbereiche des Wüstits, Magnetits und Eisens bei unterschiedlichen Temperaturen und $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ -Verhältnisse, in Form von Linien (Gleichgewichtslinien), welche druckunabhängig sind.

[0010] Auch eine Mischung aus CO und H_2 ist möglich und die Baur-Glässner Diagramme können miteinander für die jeweiligen Mischungen modifiziert werden. Die thermodynamische Grundlage bietet das bekannte Richard-Ellingham-Diagramm (RED), um das Verhalten von Eisenerz im Direktreduktionsprozess zu verstehen. Die oben genannten Gleichungen und angesprochenen unterschiedlichen BGD's und RED sind auf den Seiten 3-10, s. insbesondere Abbildungen 2-1, 2-3, 2-4 und 2-5, in der Masterarbeit von Anton Pichler gezeigt: "Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der morphologischen Veränderung von Feineisenerzen während der Reduktion im Wirbelschichtprozess", Oktober 2012, AC10704808n01vt.pdf (unileoben.ac.at).

[0011] Beim Reduzieren von Eisenerz beispielsweise mit H_2 bei Temperaturen über 570°C verläuft die Reduktion aus Hämatit über Magnetit zu Wüstit und schließlich zu metallischem Eisen. Unterhalb von 570°C erfolgt die Reduktion von Magnetit direkt zu metallischem Eisen, da Wüstit unterhalb von 570°C nicht stabil ist, vgl. die Untersuchungen von Spreitzer/Schenk "Iron Ore Reduction by Hydrogen Using a Laboratory Scale Fluidized Bed Reactor: Kinetic Investigation - Experimental Setup and Method for Determination", <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01650-9>, 2019.

[0012] Wie schnell die Temperatur von 570°C bei Direktreduktion erreicht und auch beibehalten werden kann, um Wüstit und in metallisches Eisen zu reduzieren, hängt von der Prozesszeit (Verweilzeit) in der Reduktionszone des Schachtofens wie auch der Dimensionierung der Reduktionszone des Schachtofens ab. Eine Optimierung wäre entweder die Prozesszeit, sprich die Verweilzeit während eines Zyklus, zu verlängern, wodurch aber die Wirtschaftlichkeit gesenkt werden würde oder die Temperatur des Reduktionsgases zu erhöhen, beispielsweise auf über 1100°C , was jedoch zu Problemen, insbesondere zu Verbackungen (Sticking) innerhalb der Reduktionszone und im schlimmsten Fall zu Störungen führen könnte.

[0013] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, den Direktreduktionsprozess zu verbessern.

[0014] Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1.

[0015] Die Erfindung betrifft somit ein Verfahren zur Direktreduktion von Eisenerzträgern zu Eisenschwamm, wobei der Eisenerzträger in einem Schachtofen von oben chargiert wird, wobei der Eisenerzträger eine im Schachtofen befindliche Reduktionszone zum Reduzieren des Eisenerzträgers zu Eisenschwamm in vertikaler Richtung nach unten durchläuft, wobei die Reduktionszone mit einem auf mindestens 500°C heißen Reduktionsgas gespeist wird, welches die Reduktionszone im Gegenstromprinzip nach oben durchströmt, wobei das heiße Reduktionsgas den Eisenerzträger erwärmt und reduziert, wobei das Reduktionsgas ein Frischgas aus einer Wasserstoff-Quelle umfasst. Der die Reduktionszone durchlaufende Eisenerzträger wird zusätzlich durch eine elektrisch betriebene Quelle erwärmt.

[0016] Somit umfasst ein Schachtofen zur Direktreduktion von Eisenerzträgern zu Eisenschwamm eine Reduktionszone, Mittel zum Speisen von einem eine Temperatur von mindestens 500°C betragenden heißen Reduktionsgas in die Reduktionszone. Im Bereich der Reduktionszone ist eine elektrisch betriebene Quelle zum zusätzlichen Erwärmen des Eisenerzträgers angeordnet.

[0017] Um den bestehenden Prozess im Wesentlichen beizubehalten, haben die Erfinder herausgefunden, dass eine zusätzliche Erwärmung des Eisenerzträgers über die Erwärmung durch das kontaktierende heiße Reduktionsgas durchgeführt wird, um eine schnellere Erwärmung im Vergleich zur reinen Gaserwärmung, insbesondere über eine Temperatur oberhalb von 570°C in kürzerer Zeit, zu erzielen, so dass die Verweilzeit bei der zu erreichenden Temperatur oberhalb von 570°C innerhalb der bestehenden Prozesszeit (Zyklus) verlängert und dadurch eine Erhöhung des Metallisierungsgrads des Eisenschwamms im Vergleich zum bestehenden Prozess erzielt werden kann.

[0018] Beim Reduzieren vom Eisenerzträger zu Eisenschwamm nimmt das elementare Eisen zu und lässt sich durch den Metallisierungsgrad beschreiben:

$$\text{Metallisierungsgrad [\%]} = 100 * \text{Fe}_{\text{elementar}} [\%] / \text{Fe}_{\text{total}} [\%].$$

[0019] Aufgrund des Kontakts der Eisenerzträgeroberfläche mit dem heißen Reduktionsgas beginnen die Reaktionsvorgänge und letztendlich das Metallisieren von außen nach innen. Eine vollständige Reduktion, sprich ein Metallisierungsgrad von 100 % ist zwar theoretisch möglich, in der Praxis spielt die Wirtschaftlichkeit eine wichtige Rolle und somit die Zeit für das Reduzieren, so dass ein Metallisierungsgrad bis zu 100 %, insbesondere eher bis zu 98 % angestrebt wird. Ein Metallisierungsgrad von mindestens 70 %, insbesondere 75 %, vorzugsweise mindestens 80 %, bevorzugt

mindestens 85 % und besonders bevorzugt 90 % wird im Direktreduktionsprozess angestrebt.

[0020] Eisenerzträger können in Form von Sinter, Pelletes und/oder Eisen-/Stückerz bereitgestellt werden.

[0021] Die Quelle zum Erwärmen wird elektrisch betrieben und wird daher mit Strom gespeist. Der Strom kann bevorzugt aus regenerativer Energie bereitgestellt werden. Die Quelle kann damit schnell und bedarfsgerecht die erforderliche zusätzliche Erwärmung bereitstellen. Dabei ist die Quelle im Bereich der Reduktionszone, in welcher eine zusätzliche Erwärmung des Eisenerzträgers benötigt wird, angeordnet. Die Quelle kann bedarfsgerecht ausgelegt werden und je nach Dimensionierung des Schachtofens, insbesondere der Reduktionszone, und auch nach Fahrweise angeordnet werden, ob Eisenerzträger chargiert wird, eine definierte Prozesszeit mit heißem Reduktionsgas reduziert wird und anschließend als (heißer) Eisenschwamm abgelassen wird, oder ob ein kontinuierlicher Durchsatz vorgesehen ist, d.h., dass der chargierte Eisenerzträger ohne Stillstand die Reduktionszone durchläuft und anschließend als heißer Eisenschwamm abgelassen wird.

[0022] Das zusätzliche Erwärmen kann induktiv durchgeführt werden. Die elektrisch betriebene Quelle kann mindestens einen Induktor umfassen. Es kann ein Induktor oder mehrere Induktoren über den Umfang der Reduktionszone des Schachtofens in einem Abschnitt verteilt angeordnet sein, welche aus elektrischer Energie ein magnetisches Wechselfeld erzeugen, welches in dem bereits mit der Metallisierung begonnenen Eisenerzträger und somit zum Teil elektrisch leitenden Eisenerzträger aufgrund von Wirbelstrom- und Ummagnetisierungsverlusten zusätzliche Wärme im Eisenerzträger entstehen lässt. Dabei ist oder sind die Bereiche oder Abschnitte, die entsprechend mit dem Induktor oder den Induktoren bestückt, welche auf das durchlaufende, bereits teilmetallisierte Eisenerzträger einwirken können. Es kann beispielsweise mindestens ein Induktor in Form einer Spule innerhalb des Schachtofens an der Wandung am Umfang angeordnet werden, beispielsweise innerhalb einer feuerfesten Ausmauerung integriert sein, ohne im Wesentlichen einen Kontakt zu dem durchlaufenden Eisenerzträger zu haben. Vorzugsweise ist mindestens eine Wicklung, insbesondere mehrere Wicklungen innerhalb der Ausmauerung in der Reduktionszone angeordnet. Das Prinzip zur Induktionserwärmung ist der Fachwelt bekannt.

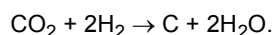
[0023] Das zusätzliche Erwärmen kann alternativ und bevorzugt konduktiv durchgeführt werden. Die elektrisch betriebene Quelle kann als Widerstandserwärmung ausgeführt sein, welche in Form von zumindest bereichsweise am Umfang der Reduktionszone des Schachtofens verteilte Konduktoren, welche unterschiedlich gepolt sind, angeordnet sein können. Bei der konduktiven Erwärmung wird der Eisenerzträger und die Eisenerzträger untereinander mit einem elektrischen Heizstrom durch Kontakt Wärme direkt in dem zu erwärmenden Eisenerzträger erzeugt. Aufgrund des teilmetallisierten, wobei die Metallisierung zunächst oberflächlich beginnen kann und nach innen, wie beschrieben, fortschreitet, die kontaktierenden Eisenerzträger selbst ein Teil des Heizstromkreises einen Stromkreis bilden und dadurch die konduktive Erwärmung infolge eines Fließens eines elektrischen Stroms nach dem ohmschen Gesetz in Abhängigkeit von der angelegten Spannung und dem elektrischen Widerstand des erwärmenden Eisenerzträgers erfolgt. Die dabei wirksame Erwärmungsleistung lässt die Temperatur im Eisenerzträger zusätzlich zu der mittels Reduktionsgas übertragenen Wärme in Abhängigkeit von der Aufheizdauer ansteigen, welche mit der Zeit als Energiemenge dem Eisenerzträger zugeführt wird. Somit entsteht die zusätzliche Wärme im Eisenerzträger selbst. Dabei ist oder sind die Bereiche, die entsprechend mit den mindestens zwei Konduktoren bestückt, welche auf das durchlaufende, bereits teilmetallisierte Eisenerzträger einwirken können. Die mindestens zwei Konduktoren sind beispielsweise innerhalb des Schachtofens an der Wandung am Umfang angeordnet, insbesondere innerhalb oder an einer feuerfesten Ausmauerung integriert, wobei ein Kontakt zu dem durchlaufenden Eisenerzträger bestehen soll. Vorzugsweise ist sind die Konduktoren zum Teil vorstehend innerhalb der Ausmauerung in der Reduktionszone angeordnet. Um den rauen Bedingungen standzuhalten, können die Konduktoren aus Stahlplatten oder aber auch als elektrisch leitfähigen Keramiken bestehen. Das Prinzip der konduktiven Erwärmung ist der Fachwelt bekannt. Der Vorteil der konduktiven Erwärmung besteht insbesondere in einer einfachen Automatisierung, sofortigen Verfügbarkeit der Erwärmung, hohe Anlagenverfügbarkeit und Standzeit sowie einer bewährten, langlebigen Anlagentechnologie.

[0024] Bei einer weiteren Alternative kann das zusätzliche Erwärmen durch Verwendung von Strahlungsrohre durchgeführt werden. Die elektrisch betriebene Quelle kann als Strahlungsrohr ausgeführt sein, in welchem ein Heizelement integriert ist. Ein oder bevorzugt mehrere Strahlungsrohre sind beispielsweise zumindest bereichsweise am Umfang der Reduktionszone des Schachtofens in einem Abschnitt verteilt und ragen ins Innere der Reduktionszone. Insbesondere durch eine Kombination aus Wärmestrahlung und Wärmeleitung wird der durchlaufende Eisenerzträger in dem Abschnitt der Reduktionszone, in welchem die Strahlungsrohre angeordnet, sind zusätzlich erwärmt. Bei Bedarf können auch mehrere Abschnitte mit (am Umfang verteilte und ins Innere der Reduktionszone ragende) Strahlungsrohre versehen sein. Das Prinzip der Erwärmung mit in Strahlungsrohren integrierte Heizelemente ist der Fachwelt bekannt.

[0025] Das Reduktionsgas wird auf eine Temperatur zwischen 500 und 1100 °C erwärmt. Aufgrund der zusätzlichen Erwärmung durch die elektrisch betriebene Quelle, kann die Temperatur im Vergleich zu konventionell betriebenen Direktreduktionsanlagen gesenkt werden, insbesondere auf maximal 1050 °C, vorzugsweise auf maximal 1000 °C, bevorzugt auf maximal 950 °C, wodurch Einsatzstoffe zum Betreiben mindestens eines Reduktionsgaserwärmers, welcher das Reduktionsgas vor dem Einspeisen in die Reduktionszone auf die erforderliche Temperatur erwärmt, um das Eisenerz zu erwärmen und die Reduktionsarbeit zu verrichten, verringert werden können, insbesondere Brenngas. Die

Temperatur des eingespeisten Reduktionsgases kann insbesondere 600 °C, vorzugsweise mindestens 700 °C, bevorzugt mindestens 800 °C betragen. Bei einem Einspeisen von (im Wesentlichen 100 %) Wasserstoff kann eine Einspeisung ohne insbesondere zusätzliche Beaufschlagung und somit Nachverbrennung mit Sauerstoff erfolgen, sprich, dass dadurch die vollständige Nutzung des Wasserstoffs für die Reduktion des Eisenerzträgers gewährleistet und dadurch das Verfahren wirtschaftlicher betrieben werden kann. Sehr hohe Wasserstoffanteile müssen nicht auf so hohe Prozesstemperaturen erwärmt werden, da die Reduktion des Eisenerzes, vgl. Baur-Glässner-Diagramm, bei niedrigen Temperaturen stattfinden kann.

[0026] Ist ein Heißeinsatz des aus der Reduktionszone kommenden Eisenschwamms mit einer Temperatur zwischen 500 und 1000 °C, insbesondere zwischen 600 und 1000 °, vorzugsweise zwischen 700 und 1000 °C, bevorzugt zwischen 800 und 1000 °C nicht möglich, kann der Eisenschwamm eine der Reduktionszone nachgelagerte Kühlzone durchlaufen, welche mit einem Kühlgas gespeist wird. Somit kann das Verfahren vorsehen, dass der Eisenerzträger nacheinander eine Reduktionszone zum Reduzieren des Eisenerzträgers zu Eisenschwamm und eine Kühlzone zum Kühlen des Eisenschwamms durchläuft. Das Kühlgas dient zum Kühlen des Eisenschwamms auf eine zum Weitertransport geeigneten Temperatur beispielsweise unterhalb von 100 °C und kann zudem in Abhängigkeit der Zusammensetzung des Kühlgases auch ein (weiteres) "Aufkohlen" des Eisenschwamms bewirken, insbesondere wenn kohlenstoffhaltige Verbindungen zum Einsatz kommen, vorzugsweise Kohlenstoffdioxid (CO₂), welches bevorzugt aus dem ausgeschleusten Prozessgas aus der Reduktionszone abgetrennt werden kann und nicht beispielsweise CCS oder CCU zugeführt wird. In der Kühlzone findet am Beispiel von Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff die sogenannte Bosch-Reaktion statt



[0027] Kohlenstoffdioxid kann bei dem "Aufkohlen" des Eisenschwamms unter den dort vorherrschenden Bedingungen verbraucht werden. In der Kühlzone und durch das Kühlgas, welches zumindest eine kohlenstoffhaltige Verbindung umfasst, kann der Kohlenstoffgehalt des Eisenschwamms nach dem Kühlen respektive nach der Kühlzone größer als 0,5 Gew.-%, insbesondere größer 1,0 Gew.-%, vorzugsweise größer 2,0 Gew.-% eingestellt werden. Weiterhin kann der Kohlenstoffgehalt des Eisenschwamms nach der Kühlzone kleiner als 4,5 Gew.-%, insbesondere kleiner als 4,0 Gew.-%, vorzugsweise kleiner 3,5 Gew.-% eingestellt werden.

[0028] Sowohl in der Reduktionszone als auch in der Kühlzone wird demnach das Gegenstromprinzip eingesetzt, um eine effiziente Reaktion zwischen den Gasen und den Feststoffen zu erreichen.

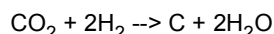
[0029] Näher erläutert wird die Erfindung anhand der folgenden Ausführungsbeispiele in Verbindung mit den Figuren.

[0030] In **Figur 1** wird die Erfindung am Beispiel eines Schachtofens (10) erläutert. Eisenerzträger in Form von beispielsweise Stück-/Eisenerz "iron ore" (io) werden am oberen Ende des Schachtofens (10) eingebracht. Am unteren Ende des Schachtofens (10) wird der erzeugte Eisenschwamm "sponge iron" (si) entnommen. Im Schachtofen (10) ist eine Reduktionszone (11) und optional eine Kühlzone (14) angeordnet. Die Reduktionszone (11) ist dabei oberhalb der optionalen Kühlzone (14) angeordnet. Die Kühlzone (14) ist nicht zwingend erforderlich, wenn ein Heißeinsatz des unmittelbar die Reduktionszone (11) verlassenden heißen Eisenschwamms (si) möglich ist. Das Reduktionsgas (12) wie auch das optionale Kühlgas (15) durchströmen den in der Reduktionszone (11) befindlichen Eisenerzträger und den in der optionalen Kühlzone (14) befindlichen Eisenschwamm im Gegenstromprinzip, somit entgegen einer Bewegungsrichtung des Eisenerzträgers (io) bzw. Eisenschwamm. Das Reduktionsgas (12) wird vor dem Einspeisen durch einen Reduktionsgaserwärmer (20) durchgeleitet und auf eine Temperatur von mindestens 500 und bis zu 1100 °C erwärmt. Das Reduktionsgas (12) umfasst ein Frischgas (FG) aus einer Wasserstoff-Quelle. Das Frischgas (FG) kann mit einem reformierten und/oder getrockneten Gas (RG), welches aus dem aus der Reduktionszone (11) des Schachtofens (10) ausgeschleusten Prozessgas (13) aufbereitet wird, gemischt werden. Dabei kann sich das ausgeschleuste Prozessgas (13) aus unverbrauchtem Reduktionsgas aus etwaigen gasförmigen Reaktionsprodukten zusammensetzen. Das ausgeschleuste Prozessgas (13) kann Wasserstoff (H₂) und/oder mindestens eine wasserstoffhaltige Verbindung (H₂O) und unvermeidbare Verunreinigungen umfassen. Das ausgeschleuste Prozessgas (13) kann einem ersten Prozessschritt zugeführt, beispielsweise in einer Einheit zur Prozessgasreinigung und Entstaubung, in welcher zumindest ein Teil der unvermeidbaren Verunreinigungen aus dem ausgeschleusten Prozessgas (13) abgetrennt werden. In einem weiteren Prozessschritt kann das Prozessgas durch eine Einheit durchgeleitet werden, beispielsweise durch einen Kondensator und entsprechend abgekühlt, so dass der im Prozessgas befindliche Wasserdampf (H₂O) kondensiert und somit vom Prozessgas abgetrennt wird. Durch das Kondensieren und Ableiten des Kondensats wird das Prozessgas "entfeuchtet". Das von Wasserdampf befreite und/oder reformierte Gas (RG) kann in einem weiteren Prozessschritt der Direktreduktion wieder zu geführt werden, indem es mit dem Frischgas (NG) gemischt wird, insbesondere bevor die Mischung im Reduktionsgaserwärmer (20) auf eine Temperatur zwischen 500 und 1100 °C erwärmt wird.

[0031] Ein entsprechendes Brenngas (BG), beispielsweise Erdgas, aber auch Biomethan oder weitere, insbesondere in einem integrierten Hüttenwerk verfügbare, brennbare Gase, wie zum Beispiel Prozessgase abgeführt aus Konverter und/oder Wärmebehandlungsöfen für die Stahlherstellung, und/oder mindestens ein Teil des ausgeschleusten Prozessgases (13) und/oder mindestens ein Teil des optionalen Prozessgases (16) wird zur Befeuerung des mindestens einen

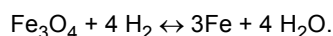
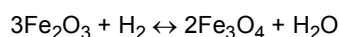
Reduktionsgaserwärmers (20) bereitgestellt.

[0032] Nach dem Verlassen der Reduktionszone (11) tritt der Eisenschwamm (si) in die optionale Kühlzone (14) ein. Dabei hat der Eisenschwamm eine Temperatur im Bereich von 500 bis 1000 °C. Auch der in der Kühlzone (14) befindliche Eisenschwamm wird mit Kühlgas (15) entgegen der Bewegungsrichtung des Eisenschwamms (si) durchströmt. Unverbrauchtetes Kühlgas tritt zusammen mit etwaigen gasförmigen Reaktionsprodukten als Prozessgas (16) wieder aus. Das Kühlgas (15) kann insbesondere eine kohlenstoffhaltige Verbindung oder Mischung, vorzugsweise Kohlenstoffdioxid (CO₂) oder Methan umfassen. Wasserstoff (H₂) kann bei Bedarf dem Kühlgas (15) beigemengt werden, wodurch in der Kühlzone (14) das Kühlgas (15) die Bosch-Reaktion unter Anwesenheit des heißen Eisenschwamms als Katalysator durchläuft. Wasserstoff (H₂) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) im Kühlgas (15) reagieren somit nach der Reaktion

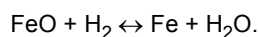


zu Wasserdampf (H₂O) und Kohlenstoff (C), wobei sich der Kohlenstoff (C) auf dem als Katalysator dienenden Eisenschwamm (si) abgelagert. Der Wasserdampf (H₂O) mit anderen gasförmigen Reaktionsprodukten wird als Prozessgas (16) aus der Kühlzone (14) des Schachtofens (10) ausgeschleust. Der abgelagerte Kohlenstoff diffundiert anschließend ins Innere des Eisenschwamms (si) und bildet Zementit (Fe₃C). Durch diesen Effekt erhöht sich der Kohlenstoffgehalt des Eisenschwamms (si) auf 2,0 Gew.-% bis zu 4,5%. Der so aufgekohlte und gekühlte Eisenschwamm (si) kann im unteren Bereich des Schachtofens (10) entnommen werden und auf bekannte Weise der Stahlerzeugung zur Weiterverarbeitung zugeführt werden. Nicht dargestellt, kann das abgeführte Prozessgas (16) zum Teil oder vollständig mit dem Brenngas (BG) zur Befuerung des Reduktionsgaserwärmers (20) gemischt werden.

[0033] In der Reduktionszone (11) beruht die Reaktion bei Verwendung von Wasserstoff (H₂) als Reduktionsgas (12) des Eisenerzes (io) zu Eisenschwamm (si) bei einer Temperatur des Eisenerzes unterhalb von 570 °C im Wesentlichen auf



[0034] Mit Erreichen und Überschreiten der 570 °C Eisenerztemperatur erfolgen die Reaktionen



[0035] Bei einem Schachtofen (10) mit einer Reduktionszone (11) stellt sich, insbesondere abgeleitet aus dem BGD, H₂ und einem vorherrschenden Verhältnis der Partialdrücke H₂ zu H₂O, ein thermodynamisches Gleichgewicht bei ca. 570 °C ein, welches sich bei einem Normalbetrieb auf einem bestimmten Level (N) in der Reduktionszone (11) einstellen würde. Mit der Erfindung lässt sich dieses Phänomen dahingehend verbessern, dass die Temperatur des Eisenerzträgers (io) von mindestens 570 °C in der Reduktionszone (11) schneller erreicht und überschritten wird, indem eine elektrisch betriebene Quelle (17) im Bereich der Reduktionszone zum zusätzlichen Erwärmen des Eisenerzträgers (io) angeordnet ist, mit welcher das Level (E) schneller erreicht wird. Dadurch verlängert sich die Verweilzeit zur Reduktion im Prozess und der Metallisierungsgrad kann im Vergleich zum Normalbetrieb durch die zusätzliche Erwärmung mit der elektrisch betriebenen Quelle (17) erhöht werden, oder alternativ bei Beibehaltung des Metallisierungsgrads, sprich zur Erzeugung eines Eisenschwamms mit gegenüber dem Normalbetrieb vergleichbarem Metallisierungsgrad, die Prozesszeit verkürzt und die Produktionsmenge erhöht werden.

[0036] Bevorzugt wird die elektrische betriebene Quelle (17) in einem Bereich der Reduktionszone (11) des Schachtofens (10), in welchem ein bereits teilmetallisiertes Eisenerzträger vorliegt, um eine elektrische Leitfähigkeit innezuhaben, um so auf die von der elektrisch betriebenen Quelle (17), entweder induktiv oder konduktiv ausgehenden Erwärmungsleistung aufnehmen zu können. Diese kann beispielsweise in einem Bereich im mittleren und/oder im unteren Abschnitt der Reduktionszone (11), in ihrer Längserstreckung und vertikalen Verlaufs in Bewegungsrichtung des Eisenerzträgers (io) von oben nach unten betrachtet, angeordnet sein.

[0037] Dabei kann die elektrische betriebene Quelle (17) mindestens einen nicht dargestellten Induktor in Form einer Spule umfassen, welcher innerhalb des Schachtofens (10) an der nicht dargestellten Wandung am Umfang angeordnet sein kann, wobei der Induktor innerhalb einer nicht dargestellten feuerfesten Ausmauerung integriert sein kann und dabei im Wesentlichen keinen Kontakt zu dem durchlaufenden Eisenerzträger (io) aufweist.

[0038] Eine weitere Alternative wäre, als elektrisch betriebene Quelle (17) ein oder mehrere nicht dargestellte Strahlungsrohre zu verwenden, in welchen Heizelemente integriert sind. Ein oder bevorzugt mehrere nicht dargestellte Strahlungsrohre können beispielsweise zumindest bereichsweise am Umfang der Reduktionszone des Schachtofens (10) in

einem Abschnitt oder bei Bedarf in mehreren Abschnitten verteilt sein und ins Innere der Reduktionszone (11) ragen.

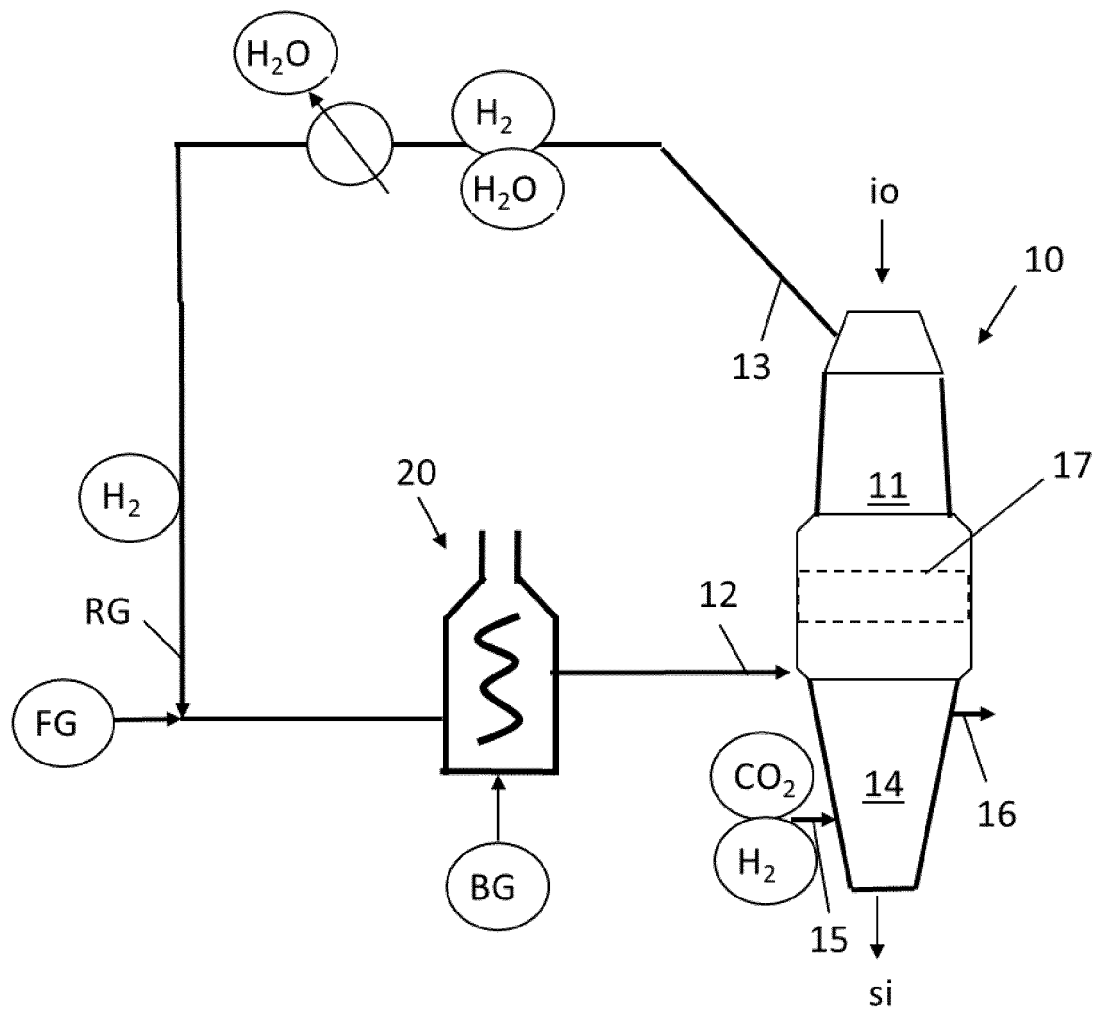
[0039] Alternativ und bevorzugt ist die elektrische Quelle (17) als Widerstandserwärmung ausgeführt und umfasst mindestens zwei Konduktoren (18), s. Skizze in **Figur 2**, welche innerhalb des Schachtofens (10) an der nicht dargestellten Wandung am Umfang angeordnet sind. Besonders bevorzugt sind die Konduktoren (18) innerhalb oder an einer nicht dargestellten feuerfesten Ausmauerung integriert und weisen einen Kontakt zu dem durchlaufenden Eisenerzträger (io) auf, welcher notwendig ist, um einen elektrischen Stromfluss zwischen den beiden entsprechend gepolten Konduktoren (18), welche vorzugsweise gegenüberliegend an der Wandung des Schachtofens (10) angeordnet sind, und den dazwischen liegenden, in Kontakt stehenden bereits an der Oberfläche teilmetallisierten Eisenerzträgern durch Beaufschlagung einer Spannung, hier einer Gleichspannung, mit gleichzeitiger zusätzlicher Erwärmung des Eisenerzträgers zu bewirken.

[0040] Die Anordnung und der Abschnitt bzw. Bereich in der Reduktionszone (11), in welcher die elektrisch betriebene Quelle (17) vorgesehen werden soll, sowie auch die Art der elektrisch betriebenen Quelle (17), insbesondere zur Steigerung der Effektivität, können durch entsprechende Versuche ermittelt werden und/oder durch Simulationen bestimmt werden.

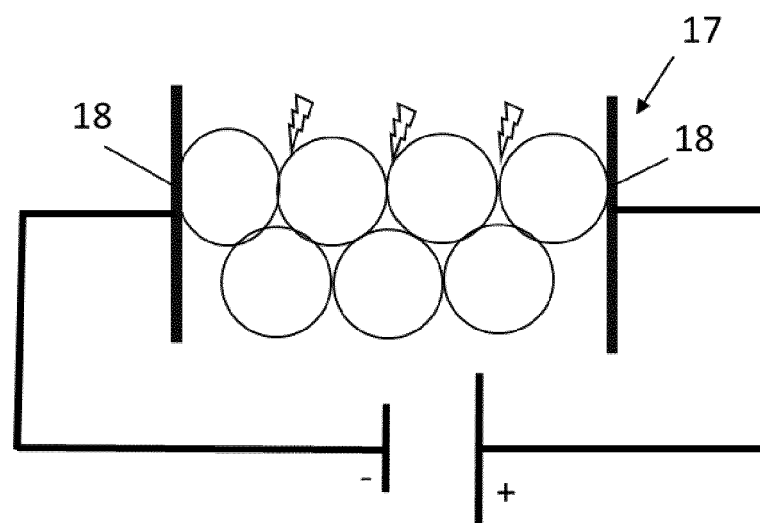
[0041] In die Kühlzone (14) kann ein Kühlgas (15) aus Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Wasserstoff (H₂) eingeschleust werden und den Eisenschwamm (si) auf eine Temperatur unterhalb von 100 °C abgekühlt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Direktreduktion von Eisenerzträger (io) zu Eisenschwamm (si), wobei der Eisenerzträger (io) in einem Schachtofen (10) von oben chargiert wird, wobei der Eisenerzträger (io) eine im Schachtofen (10) befindliche Reduktionszone (11) zum Reduzieren des Eisenerzträgers (io) zu Eisenschwamm (si) in vertikaler Richtung nach unten durchläuft, wobei die Reduktionszone (11) mit einem auf mindestens 500 °C heißen Reduktionsgas (12) gespeist wird, welches die Reduktionszone (11) im Gegenstromprinzip nach oben durchströmt, wobei das heiße Reduktionsgas (12) den Eisenerzträger (io) erwärmt und reduziert, wobei das Reduktionsgas (12) ein Frischgas (FG) aus einer Wasserstoff-Quelle umfasst, **dadurch gekennzeichnet, dass** der die Reduktionszone (11) durchlaufende Eisenerzträger (io) zusätzlich durch eine elektrisch betriebene Quelle (17) erwärmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das zusätzliche Erwärmen induktiv durchgeführt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das zusätzliche Erwärmen konduktiv durchgeführt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das zusätzliche Erwärmen durch Verwendung von Strahlungsrohren durchgeführt wird.
5. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, wobei eine schnellere Erwärmung im Vergleich zur reinen Gaserwärmung über eine Temperatur oberhalb von 570 °C in kürzerer Zeit erzielt wird.
6. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, wobei das Reduktionsgas auf eine Temperatur zwischen 500 und 1100 °C erwärmt wird.
7. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, wobei der Eisenschwamm (si) eine der Reduktionszone nachgelagerte Kühlzone durchläuft, welche mit einem Kühlgas gespeist wird.



Figur 1



Figur 2



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 24 15 2848

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	GB 776 260 A (NORSK HYDRO ELEKTRISK) 5. Juni 1957 (1957-06-05) * Abbildung 1 * * Seite 1, Zeile 9 - Zeile 17 * * Seite 1, Zeile 69 - Seite 2, Zeile 57 * * Seite 2, Zeile 97 - Seite 3, Zeile 83 * -----	1-7	INV. C21B13/00 C21B13/02
X	GB 846 284 A (NORSK HYDRO ELEKTRISK) 31. August 1960 (1960-08-31) * Abbildungen 1, 2 * * Seite 1, Zeile 9 - Zeile 12 * * Seite 1, Zeile 29 - Seite 2, Zeile 11 * * Seite 3, Zeile 3 - Seite 4, Zeile 61 * -----	1-7	
X	CH 619 736 A5 (GEISSELER MAX) 15. Oktober 1980 (1980-10-15) * Abbildung 1 * * Seite 2, Zeile 1 - Zeile 36 * * Seite 3, Zeile 15 - Seite 4, Zeile 24 * * Seite 4, Zeile 55 - Seite 5, Zeile 23 * -----	1-7	
A	CN 107 227 386 A (SHENWU TECH GROUP CO LTD) 3. Oktober 2017 (2017-10-03) * Abbildung 1 * * Absatz [0004] - Absatz [0015] * * Absatz [0017] * * Absatz [0018] - Absatz [0036] * -----	1-7	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) C21B
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 13. Juni 2024	Prüfer Jung, Régis
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 : nichtschriftliche 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	

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

EP 24 15 2848

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentedokumente 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.

13-06-2024

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
	GB 776260 A	05-06-1957	KEINE	

15	GB 846284 A	31-08-1960	KEINE	

	CH 619736 A5	15-10-1980	KEINE	

	CN 107227386 A	03-10-2017	KEINE	
20	-----			
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				

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 Nicht-Patentliteratur

- **ANTON PICHLER.** *Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der morphologischen Veränderung von Feineisenerzen während der Reduktion im Wirbelschichtprozess*, Oktober 2012 [0010]
- **SPREITZER/SCHENK.** *Iron Ore Reduction by Hydrogen Using a Laboratory Scale Fluidized Bed Reactor: Kinetic Investigation - Experimental Setup and Method for Determination*, 2019, <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01650-9> [0011]