

ENERGIEWENDE IN DER INDUSTRIE

AP2A DEKARBONISIERUNGSMÄßNAHMEN IN DEN FOKUS-BRANCHEN

BERICHT AN: BUNDESMINISTERIUM FÜR
WIRTSCHAFT UND ENERGIE

20.02.2020






BRANCHENÜBERGREIFENDER ÜBERBLICK ALLER BETRACHTETEN TECHNOLOGISCHEN HANDLUNGSOPTIONEN



Branche	Subbranche	Status Quo	Elektrifizierung	Synthetisch	H ₂	Bio	CCS / CCU	Sonstige
Glas	Behälter- und Flachglas	Reg. U-Flammenwanne Reg. Querbrennerwanne	Vollelek. Schmelzwanne	Synthet. Methan				Oxy-Fuel-Schmelzwanne
Papier	Papier-herstellung	Fossiler Brennstoffkessel	Wärmepumpen Elek. Dampferzeugung Prozesselek.			Brennstoffwechsel zu Biomasse / Biogas		
Chemie	HVC	Dampfspalter	Elektro-Cracker	MTO		Bionaphtha Bioethylen	Dampfspalter mit CCS	
	Ammoniak	Dampfreformierung mit Methan			Wasserelektrolyse	Dampfreformierung mit Biomethan	Dampfreformierung mit CCS	Methanpyrolyse
NE-Metalle	Aluminium	Bayer und Hall- Héroult Prozess						Sekundärroute In. Anoden & benetzte Kathoden
	Kupfer	Primärroute						Sekundärroute
	Gießerei	Fossil befeuerter Ofen	Elektroofen					
Zement	Zement-herstellung	Klinker aus dem Drehofen					CCS Oxyfuel neu CCS Oxyfuel Nach. CCS – Absorptionst.	Innov. Bindemittel Flugasche Granuliert. Schlacke
Nahrung	Milch-verarbeitung	Erwärmung mit Brennstoff	Industriewärmepumpe Mikrowelle					
	Backwaren-herstellung	Erwärmung mit Brennstoff	Industriewärmepumpe Mikrowelle					
Stahl	Stahlherstellung	Primärstahlerzeugung			Direktreduktion mit Wasserstoff	Direktreduktion mit Biogas	z.B. Hisarna, Carbon2Chem, Steelanol	Gichtgasrückf. Stahlrecycling







GLAS | KURZBESCHREIBUNG DER DEKARBONISIERUNGSMAßNAHMEN

Basistechnologie	Kurzbeschreibung
U-Flammenwanne (Querbrennerwanne) mit Regenerativkammern	Schmelzen des Gemenges in einer erdgasbetriebenen U-Flammenwanne (Behälterglas) bzw. Querbrennerwanne (Flachglas), welche die Wärme der Abluft durch Regenerativkammern zurückgewinnt.
Dekarbonisierungsmaßnahme	Kurzbeschreibung
 Voll-elektrische Schmelzwanne	Schmelzen des Gemenges durch direkte Energieeinbringung (Strom) über Elektroden. Die Prozesswärme wird dabei durch Widerstandserhitzung auf das Schmelzgut übertragen.
 Einsatz erneuerbarer Gase (Synthetisches Methan)	Identisches Schmelzverfahren wie in der Baseline (U-Flammenwanne/Querbrennerwanne mit Regenerativkammern) unter Substitution des Energieträgers Erdgas durch synthetisches Methan.
 Oxy-Fuel-Schmelzwanne	Bereitstellung der Schmelzenergie in der Schmelzwanne durch Oxidation des Energieträgers (Erdgas) mit reinem Sauerstoff. Der Sauerstoff wird zuvor onsite über eine (stromintensive) Luftzerlegung erzeugt. Das Abgas einer Oxy-Fuel-Schmelzwanne besteht hauptsächlich aus Wasserdampf und CO ₂ , sodass ein CCS/CCU-Verfahren zusätzlich für eine vollständige Dekarbonisierung (energie- und prozessbedingte Emissionen) installiert werden könnte.








PAPIER | KURZBESCHREIBUNG DER DEKARBONISIERUNGSMAßNAHMEN

Basistechnologie	Kurzbeschreibung
Baseline (ohne Faserstoffherstellung)	Die Papierbahn wird in einer mit Dampf versorgten Papiermaschine getrocknet. Der Dampf wird überwiegend anhand von fossilen Brennstoffen bereitgestellt
Dekarbonisierungsmaßnahme	Kurzbeschreibung
 Einsatz von Wärmepumpen zur Dampferzeugung & elektrische Zusatzheizung	Die Kondensate aus den Trocknungszylindern werden anhand von (einer) Wärmepumpe(n) und elektrischen Zusatzheizungen verdampft. Die warme Abluft aus der Haube der Trockenpartie dient als Wärmequelle für die Wärmepumpe(n).
 Elektrische Dampferzeugung	Der für den Prozess benötigte Dampf wird anhand von einem Elektroden- bzw. Elektrokessel bereitgestellt.
 Brennstoffwechsel zu Biomasse/Biogas	Die lokalen Wärmeerzeuger werden auf Biomasse bzw. Biogas umgerüstet.
 Brennstoffwechsel zu synthetischen Gasen	Die lokalen Wärmeerzeuger werden auf synthetische Brennstoffe (Wasserstoff, synthetisches Methan) umgerüstet.

CHEMIE | HIGH-VALUE-CHEMICAL-PRODUKTION | KURZBESCHREIBUNG DER DEKARBONISIERUNGSMÄßNAHMEN



Basistechnologie	Kurzbeschreibung
Dampfspalter	Längerkettige Kohlenwasserstoffe (z.B. Naphtha) werden in Gegenwart von Wasserdampf in kurzkettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden. Es entstehen vor allem Wasserstoff, Methan, Ethen und Propen als Hauptprodukt.

Dekarbonisierungsmaßnahme	Kurzbeschreibung
 Elektrisch beheizte Dampfspalter	Dampfspalter, in dem das eingesetzte Ausgangsmaterial (z.B. Naphtha) mit einer elektrischen Widerstandsheizungen erhitzt wird, anstatt der Verwendung fossiler Brennstoffe.
 MTO-Prozess	Ethylen und Propylenproduktion wird durch Hydrierung von synthetisch hergestelltem Methanol aus abgeschiedenem CO ₂ und grünem Wasserstoff hergestellt.
 CCS am Dampfspalter	Carbon Capture and Storage (CCS) scheidet große Mengen an CO ₂ aus den Abgasen des Dampfspalters ab und speichert es dauerhaft, wodurch ein Großteil der entstehenden CO ₂ -Emissionen nicht an die Atmosphäre abgegeben werden.
 Nutzung von Bio-Naphtha	Teilweiser Ersatz von fossilem Naphtha durch Bionaphtha aus Pyrolyseöl.
 Bioethylen aus Biomasse	Herstellung von Bioethylen und/oder Biopropylene durch Dehydrierung von Bioethanol.


CHEMIE | AMMONIAK-PRODUKTION | KURZBESCHREIBUNG DER DEKARBONISIERUNGSMAßNAHMEN





Basistechnologie	Kurzbeschreibung
------------------	------------------


Dampfreformierung	Bei der Dampfreformierung mit fossilem Methan wird der Wasserstoff aus Methan (CH_4), der Hauptkomponente von Erdgas, und Wasserdampf (H_2O) unter hohem Druck und hohen Temperaturen mit Hilfe eines Katalysators gewonnen. Als Resultat werden große Mengen Kohlenstoffmonoxid/-dioxid freigesetzt.
--------------------------	--

Dekarbonisierungsmaßnahme	Kurzbeschreibung
---------------------------	------------------

 Wasserelektrolyse	Bei der Wasserelektrolyse ist der Lieferant des Wasserstoffmoleküls, welcher zur Herstellung von Ammoniak nötig ist, nur Wasser. Strom wird dabei durch das Wasser geleitet, wodurch sich die Wassermoleküle in Sauerstoff- und Wasserstoffmoleküle aufspalten.
---	---

 Dampfreformierung mit CCS	Carbon Capture and Storage (CCS) am Dampfreformer entnimmt große Mengen an CO_2 aus den Abgasen der Ammoniakherstellung und speichert es dauerhaft, wodurch ein Großteil der entstehenden CO_2 -Emissionen nicht an die Atmosphäre abgegeben werden.
---	--

 Dampfreformierung mit Biomethan	Ein biobasiertes Synthesegase (i.e. Biomethan), welches aus der Vergasung von (Ligno-) Cellulose gewonnen wird, ersetzt das gesamte fossile Methan, welches für die Herstellung von Ammoniak als Rohstoff und Energieträger verwendet wird.
---	---

 Methanpyrolyse	Erdgas wird in einer Pyrolysereaktion in seine elementaren Bestandteile – also gasförmigen Wasserstoff und festen Kohlenstoff – gespalten. Der so gewonnene Wasserstoff dient als Ausgangsprodukt für die Ammoniakherstellung. CO_2 Emissionen werden weitgehend vermieden.
--	--


NE-METALLE | ALUMINIUM | KURZBESCHREIBUNG DER DEKARBONISIERUNGSMÄßNAHMEN





Basistechnologie	Kurzbeschreibung
------------------	------------------


Bayer und Hall-Héroult Prozess	Herstellungsrouten für Primäraluminium. Aus Bauxit wird mit Hilfe des Bayer-Prozesses Aluminiumoxid hergestellt. Hieraus wird mittels Schmelzfluss-Elektrolyse Aluminium produziert.
---------------------------------------	--

Dekarbonisierungsmaßnahme	Kurzbeschreibung
---------------------------	------------------

 Innovative Anoden	Substitution der Kohlenstoffanode durch eine Anode, die inert zum in der Zelle verwendeten Elektrolyt ist. Der Ersatz führt zu einer Reduktion des Anodenverbrauchs und somit der prozessbedingten Emissionen in der Aluminiumelektrolyse. Aufgrund des geringeren Bedarfs an Kohlenstoffanoden können zudem die während des Anodenbackens auftretenden Emissionen reduziert werden.
---	--


 Benetzte Kathoden	Substitution heute üblicher Kohlenstoffkathoden durch benetzte Kathoden. Benetzte Kathoden erlauben einen geringeren Abstand zwischen Anoden und Kathoden in der Elektrolysezelle. Dies führt zu einer Reduktion des Zellwiderstands und damit einhergehenden Senkung des Stromverbrauchs.
---	--

 Innovative Anoden und benetzte Kathoden	Die Maßnahme „inerte Anode“ wird oftmals im Zusammenhang mit der Maßnahme „benetzte Kathode“ betrachtet. Grund hierfür ist, dass der durch die Verwendung von inerten Anoden auftretende Mehrstrombedarf durch Verwendung von benetzten Kathoden zum Teil kompensiert werden kann.
---	--

 Sekundärroute aus Altschrott	Wechsel der Verfahrensrouten von Primär- hin zur Sekundärherstellung, Sekundäraluminium wird in einem Recyclingprozess aus Aluminiumschrotten wie Neu- und Altschrotten, Krätze und Spänen hergestellt. Das Potenzial der Maßnahme wird durch die Schrottverfügbarkeit begrenzt. Die Höhe der Emissionsminderung ist abhängig von der Schrottzusammensetzung.
--	---

NE-METALLE | KUPFER | KURZBESCHREIBUNG DER DEKARBONISIERUNGSMÄßNAHMEN



Basistechnologie	Kurzbeschreibung
Primärroute	Aus Kupferkonzentrat wird im Schwebeschmelzofen Kupferstein hergestellt. Danach wird Kupferstein im Konverter zu Kupferblister umgewandelt. Anschließend werden im Anodenofen Kupferanoden hergestellt, die letztendlich bei der Elektrolyse zu Kupferkathoden weiterverarbeitet werden.
Dekarbonisierungsmaßnahme	Kurzbeschreibung
 Sekundärroute aus Altschrott	Wechsel der Verfahrensrouten von Primär- hin zur Sekundärherstellung. Durch den Wechsel der Verfahrensrouten werden energieintensive Produktionsschritte der Primärkupferherstellung redundant. In der sekundären Verfahrensrouten wird Kupferschrott recycelt um daraus neuwertigen Kupfer herzustellen. Der Schrott wird sortiert, gewaschen, geschmolzen und zu Anoden gegossen, die mittels Elektrolyse zu Kathoden weiterverarbeitet werden. Das Potenzial der Maßnahme wird durch die Schrottverfügbarkeit begrenzt. Die Höhe der Emissionsminderung ist abhängig von der Schrottzusammensetzung.

NE-METALLE | GIEßEREI | KURZBESCHREIBUNG DER DEKARBONISIERUNGSMÄßNAHMEN



Basistechnologie	Kurzbeschreibung
------------------	------------------

Fossil befeuerter Ofen	Ca. 70 % der 3.000 bis 4.000 Schmelzöfen in deutschen Gießereien sind brennstoffbetrieben. In Leichtmetallgießereien beträgt der Anteil der Erdgasschmelzen ca. 90 %, in Buntmetallgießereien beläuft sich dieser Anteil auf ca. 80 %.
-------------------------------	--

Dekarbonisierungsmaßnahme	Kurzbeschreibung
---------------------------	------------------











Elektroofen

Die Maßnahme „Strombetriebene Schmelzöfen in Gießereien“ beschreibt die Substitution fossil befeuerter Anlagen durch strombetriebene Schmelzöfen. Da fast der gesamte fossile Energiebedarf der Gießereien durch den Einsatz der Schmelzöfen bedingt ist, kann die Substitution durch Strom, bei ausreichend hohem Anteil emissionsfreien Stroms, zu einer Verminderung der energiebedingten Emissionen führen. Für NE-Metallgießereien sind in erster Linie die folgenden elektrischen Öfen relevant: Netzfrequenz- und Mittelfrequenz-Induktionstiegelöfen sowie Widerstands- und Induktionsbeheizte Warmhalteöfen.

STAHLBRANCHE | KURZBESCHREIBUNG DER DEKARBONISIERUNGSMÄßNAHMEN









Basistechnologie	Kurzbeschreibung
Primärstahlerzeugung	Beim Hochofenverfahren wird Roheisen aus Eisenerz mit Hilfe von Koks hergestellt . Danach wird durch weitere Verfahren aus dem Roheisen der Stahl hergestellt, dazu wird zusätzlich noch Schrott eingesetzt.

Dekarbonisierungsmaßnahme	Kurzbeschreibung
 Primärstahlerzeugung mit Gichtgasrückführung	Verfahren der Gichtgasrückführung am Hochofen, bei der CO ₂ aus dem Gichtgas abgeschieden und das gereinigte Gichtgas erneut in den Hochofen als Reduktionsmittel und zur energetischen Verwertung eingeblasen.
 Primärstahlerzeugung mit CCS	Carbon Capture and Storage (CCS) Technologien entnehmen große Mengen an CO ₂ aus den Abgasen und speichern es dauerhaft, wodurch ein Großteil der entstehenden CO ₂ -Emissionen nicht in die Atmosphäre gelangt.
 Hlsarna Technologie mit CCS	Das Hlsarna-Verfahren ersetzt den Hochofenprozess und kann in bestehende Hüttenwerke integriert werden: Anstelle von Koks, Sinter oder Pellets werden Kohle und Eisenerz eingesetzt.
 Carbon2Chem – Primärstahlerzeugung mit CCU	Carbon Capture and Utilization (CCU) Verfahren zur Herstellung von Methanol (und/oder Ammoniak) aus Prozessgasen und zusätzlichem Wasserstoff.
 Steelanol – Primärstahlerzeugung mit CCU	Carbon Capture and Utilization (CCU) Verfahren mit Mikroorganismen, welche das Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und den Wasserstoff aus den Prozessgasen in Ethanol und andere Chemikalien umwandeln.
 Direktreduktion mit Biogas	Primärstahl wird über eine Direktreduktion mit anschließendem Elektrostahlverfahren hergestellt, in welcher Biogas zu einem Synthesegas reformiert und dann als Reduktionsmittel zur Erzeugung von Eisenschwamm direkt aus Eisenerz verwendet wird (Verfahren ist auch als Midrex-Verfahren bekannt).
 Direktreduktion mit Wasserstoff	Primärstahl wird über eine Direktreduktion mit anschließendem Elektrostahlverfahren hergestellt, in welcher Wasserstoff als Reduktionsmittel zur Erzeugung von Eisenschwamm direkt aus Eisenerz verwendet wird.
 Sekundärstahlerzeugung durch Stahlrecycling	Verbesserung der Schrott-Recyclingquote, durch die der Anteil des über die Elektrostahlroute erzeugten Rohstahls erhöht und somit der Anteil der emissionsintensiven Primärstahlerzeugung reduziert werden kann



ZEMENT | KURZBESCHREIBUNG DER DEKARBONISIERUNGSMÄßNAHMEN

Basistechnologie	Kurzbeschreibung
Klinker aus dem Drehofen	Im Drehrohrföfen werden vorgemahlene Rohstoffe wie Kalkstein bei Temperaturen von bis zu 1.450°C gebrannt, um Klinker herzustellen. Anschließend wird durch Mahlen und Mischen Zement hergestellt.
Dekarbonisierungsmaßnahme	Kurzbeschreibung
 Granulierte Hochofenschlacke	Durch den vermehrten Einsatz von Hochofenschlacke im Zement reduziert sich der Klinker-Zementfaktor. Infolgedessen muss weniger Klinker im Brennprozess hergestellt werden. Verfügbarkeit abhängig vom Hochofenprozess der Stahlindustrie
 Flugasche	Durch den vermehrten Einsatz von Flugasche im Zement reduziert sich der Klinker-Zementfaktor. Infolgedessen muss weniger Klinker im Brennprozess hergestellt werden. Verfügbarkeit abhängig von Verbrennungsprozessen im Energie- und Umwandlungssektor.
 Innovative Bindemittel	Neuartige Bindemittel können den Zement teilweise substituieren. Die dafür notwendigen Verfahren verursachen weniger Emissionen in der Herstellung und benötigen keinen Klinker.
 CCS - Oxyfuel neu	Ca. 95 % der Emissionen des Drehrohrföfens (inkl. prozessbedingter Emissionen) können abgeschieden werden.
 CCS - Oxyfuel Nachrüstung	Ca. 95 % der Emissionen des Drehrohrföfens (inkl. prozessbedingter Emissionen) können abgeschieden werden.
 CCS - Abscheidung mit Absorptionstechnologien	Ca. 95 % der Emissionen des Drehrohrföfens (inkl. prozessbedingte Emissionen) können abgeschieden werden.


NAHRUNG | MILCHVERARBEITUNG | KURZBESCHREIBUNG DER DEKARBONISIERUNGSMÄßNAHMEN





Basistechnologie	Kurzbeschreibung
------------------	------------------

Fossiler Brennstoffkessel	Verfahren, in dem die Wärmebehandlung in der Milchverarbeitung (z.B. Pasteurisierung) über einen fossilen Brennstoffkessel erfolgt.
---------------------------	---

Dekarbonisierungsmaßnahme	Kurzbeschreibung
---------------------------	------------------

 Mikrowellen-Erwärmung	Verfahren, in dem die Wärmebehandlung in der Milchverarbeitung über Mikrowellenstrahlung , d.h. elektromagnetische Strahlen, erfolgt; die Mikrowellen dringen in das Erwärmungsgut mit hohen Frequenzen ein und versetzen die Moleküle des zu erwärmenden Lebensmittels in Schwingung.
---	---

 Joulsche Erwärmung (auch als Widerstandserhitzung bekannt)	In diesem Verfahren, welches zu den Hochtemperatur-Kurzzeit-Verfahren zählt, wird das Lebensmittel Milch erhitzt, in dem dieses direkt einer Spannung ausgesetzt wird und dadurch elektrische Wechselströme induziert werden.
--	--

 Industriewärmepumpe	Die stetige Weiterentwicklung der Wärmepumpen-Technologie durch Kombination verschiedener Kältemittel und verbesserten Verdichtern ermöglicht Wärmepumpenanlagen, welche über einen thermodynamischer Kreisprozess mit Verdampfung funktionieren, den Einsatz in der Wärmebehandlung der Milchverarbeitung.
---	---

NAHRUNG | BACKWARENHERSTELLUNG | KURZBESCHREIBUNG DER DEKARBONISIERUNGSMÄßNAHMEN



Basistechnologie	Kurzbeschreibung
------------------	------------------

Fossiler Brennstoffkessel	Verfahren, in dem der Backprozess in der Backwarenherstellung über fossile Brennstoffe erfolgt.
---------------------------	--

Dekarbonisierungsmaßnahme	Kurzbeschreibung
---------------------------	------------------



Mikrowellen-Erwärmung

Verfahren, in dem die **Wärmebehandlung in der Backwarenherstellung über Mikrowellenstrahlung**, d.h. elektromagnetische Strahlen, erfolgt; die **Mikrowellen dringen in das Erwärmungsgut mit hohen Frequenzen ein** und versetzen die Moleküle des zu erwärmenden Lebensmittels in Schwingung.



Industriewärmepumpe

Die stetige **Weiterentwicklung der Wärmepumpen-Technologie** durch **Kombination verschiedener Kältemittel und verbesserten Verdichtern** ermöglicht Wärmepumpenanlagen, welche über einen thermodynamischer Kreisprozess mit Verdampfung funktionieren, den Einsatz in der Wärmebehandlung der Backwarenherstellung.

KONTAKT

MATTHIAS SCHIMMEL

Managing Consultant

Matthias.Schimmel@guidehouse.com