



Reduktion von Quecksilberemissionen bei der Herstellung von Zement -Abschlussbericht-

Projektbeginn: 08. November 2022

Projektlaufzeit: 25 Monate

Berichtszeitraum: 01. Januar 2023 bis 20.12.2024

Revisionstabelle

Nr.	Datum	Erstellt	Geprüft	Freigegeben
00	2025-04-30	Bloss/Heidrich	Rasche	Trautner
	[Datum]	[Name]	[Name]	[Name]

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Ausgangssituation	4
2.1	Das Problem der Hg-Emissionen für Umwelt und Gesundheit	4
2.1.1	Stand der Technik	6
2.1.2	Innovative Verfahren – Verfahrenvergleich	6
2.2	Motivation und Zielsetzung des Forschungsvorhabens	9
2.3	Aufgabenstellung	10
2.3.1	Darstellung der einzelnen Arbeitspakete und Projektverlauf	10
3	Darstellung der erzielten Ergebnisse	11
3.1	SOLL – IST – Vergleich	11
3.1.1	Versuchsvorbereitung – Beschreibung der Abweichungen	11
3.1.2	Technikumsversuche – Beschreibung der Abweichungen	13
3.1.3	Auswertung der Ergebnisse – Beschreibung der Abweichungen	14
3.1.4	Das Anlagenkonzept – Beschreibung der Abweichungen	14
3.1.5	Report – Beschreibung der Abweichungen	15
4	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	15
4.1	Beispielhafte Darstellung von Messergebnissen	15
4.2	Schlussfolgerungen für die Auslegung und Betrieb einer Anlage	17
4.2.1	Größenabschätzung für ein Zementwerk	18
4.3	Zusätzlicher prozesstechnischer Freiheitsgrad	18
5	Bewertung der Ergebnisse	18
5.1	Projektübergreifende Beurteilung	18
5.2	Ökologische Bewertung	19
5.2.1	Verminderung des Quecksilbergehaltes im Rohmehl/Filterstaub	19
5.2.2	Ressourcen- und Energieeffizienz	20
5.3	Technische Bewertung	21
5.3.1	Concept Design	21
5.4	Ökonomische Bewertung	23
5.4.1	Investitionskosten	24
5.4.2	Prozessparameter, spezifische Verbräuche	25
5.5	Genehmigungsrechtliche Aspekte	26
6	Weiterführung des Vorhabens – nächste Projektschritte	26
6.1	Optimierung im Technikumsmaßstab	26
6.2	Versuche im Zementwerk	26

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Die Quecksilberphasen im Zementprozess.....	5
Abbildung 2: Beispielskizze für „Dust Shuttling“ – hier im Direktbetrieb	6
Abbildung 3: Das ExMercury-Verfahren.....	7
Abbildung 4: HGEX-Verfahren – Gegenstand dieses Projektes.....	8
Abbildung 5: Gegenüberstellung von „X-Mercury“ und „HGEX-SE“ - Übersicht	9
Abbildung 6: Projektstrukturplan wie beantragt - Überblick.....	10
Abbildung 7: Gesamtanlage – ohne Isolierung	12
Abbildung 8: Ofen betriebsbereit, mit Isolierung, Abgasreinigung und Hg-Messeinrichtung..	12
Abbildung 9: Betriebsarten „Verbundbetrieb“ (links) und „Direktbetrieb“ (rechts)	13
Abbildung 10: Staubbehandlung: Wirkungsgrad steigt mit zunehmender Temperatur	15
Abbildung 11: Versuchsergebnisse im Vergleich mit Versuchen von Dritten	17
Abbildung 12: Nutzung regenerativer Energie (Ellipsen) im Zementwerk von morgen.....	21
Abbildung 13: Übersicht über die Hauptkomponenten.....	23
Abbildung 14: Anlagenausschnitt: Abgasleitung und -messung.....	23
Tabelle 1: Arbeitspaket 02 – Technikumsversuche.....	13
Tabelle 2: Arbeitspaket AP 03: Auswertung der Ergebnisse	14
Tabelle 3: Arbeitspaket 04 – Entwicklung des Anlagenkonzepts	14
Tabelle 4: Arbeitspaket 05 – Report	15
Tabelle 5: Schmelzpunkt, Siedepunkt und Sublimationspunkt unterschiedlicher Hg-Phasen	16
Tabelle 6: Betriebsdaten zur Auslegung eines Drehherdofens, Beispiel	22
Tabelle 7: Investitionskosten des SE - Verfahrens im Vergleich	25
Tabelle 8: Spezifische Verbrauchswerte zur Behandlung von Filterstaub	25

1 Zusammenfassung

Das Hauptziel des Vorhabens besteht in der Reduktion von Quecksilberemissionen bei der Herstellung von Zement durch Abscheidung eines Teils des eingetragenen Quecksilbers, welches am Rohmehl-Filterstaub adsorptiv anhaftet. Insbesondere soll dadurch erreicht werden, dass künftig keine Verschleppung von Quecksilber in das Produkt „Zement“ weiter stattfindet, sondern das gereinigte Rohmehl direkt in den Produktionsprozess zurückgeführt werden kann. Die Abtrennung des Quecksilbers vom Filterstaub erfolgt dabei durch thermische Behandlung in einem „Drehherdofen“ im Technikumsmasstab mit Filterstaub aus einem Zementwerk in NRW.

Abweichend von der ursprünglichen Projektplanung musste ein neuer Drehherdofen in Eigenkonstruktion und -fertigung hergestellt und in Betrieb genommen werden. Hierdurch musste die Laufzeit von 12 auf 24 Monate verlängert werden.

Die Drehherdofenanlage, bestehend aus Dosiereinrichtung, Ofen mit kompletter Ausstattung, Austragsvorrichtung, Abgasbehandlung und Abgasmessung, mit einer Durchsatzleistung von ca. 100 kg pro Stunde, wurde trotz einiger technischer Unterbrechungen insgesamt erfolgreich betrieben und quecksilberhaltiger Staub behandelt. Dabei konnte die Anzahl der geplanten Einzelversuche zwar nicht erreicht werden, die Versuchsergebnisse selbst decken sich jedoch mit den Ergebnissen aus einem alternativen innovativen Verfahren sowie auch mit vor diesem Projekt durchgeführten Laboruntersuchungen. Bei den durchgeführten Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die höchste Austreibungsrate (%) zwischen Temperaturen von ca. 200 °C und 300 °C vorliegt und damit bereits ca. 80 % des adsorptiv gebundenen Quecksilbers entfernt werden konnte, wobei die Verweilzeit 30 Minuten betrug.

Auf der Basis der erhaltenen Versuchsergebnissen war es möglich, eine Verfahrensbewertung insbesondere hinsichtlich Umweltrelevanz, Investitions- und Betriebskosten sowie technischer Ausführung zu erstellen. Ein grobes Concept Design für ein „mittelgroßes“ deutsches Zementwerk mit einer Tageskapazität von ca. 2.300 Tonnen Zementklinker konnte skizziert werden, wobei der Durchmesser eines Drehherdofens mit einer Kapazität von 2 - t/h Staub etwa 5 m betragen würde. Infolge der unterschiedlichen Rohstoffzusammensetzung und der eingesetzten Brennstoffe der einzelnen Zementwerke wird es jedoch notwendig sein, diese Werte standortspezifisch zu prüfen und zu verifizieren.

In der Gesamtbewertung ist das durchgeführte Projekt mit einem geschätzten Quotienten von 75 % als so erfolgreich zu bezeichnen, dass es weiter bis zur technischen Reife entwickelt werden soll.

Bei der Weiterführung des Projektes ist zu differenzieren in

- a. die chemisch-physikalischen und prozessbezogenen Aspekte der Untersuchungen und die
- b. mechanischen und konstruktiven Gegebenheiten des Drehherdofens.

Während die chemisch-physikalischen Ergebnisse der thermischen Austreibung von Hg aus dem Filterstaub bestätigt wurden, als erfolgreich bezeichnet werden müssen und das Ergebnis lediglich durch die geringe Zahl an Versuchen quantitativ geschmälert wird, muss hinsichtlich der Konstruktion und technischen Ausführung des Drehherdofens eine Überarbeitung erfolgen. Die nächsten Projektschritte zur Erlangung der technischen Reife sind dabei:

- Optimierung der Anlagentechnik und Ausdehnung der Behandlungsversuche in weitere Bereiche von Temperatur und Verweilzeit. Für diese weiterführenden Technikumsarbeiten sind ca. 12 Monate zu veranschlagen.
- Versuche mit der bestehenden Pilotanlage in einem Zementwerk mit dem Ziel, das Verfahren hinsichtlich Funktionssicherheit, Wartungs-, Instandhaltungs- und Reparaturfreundlichkeit zu optimieren und es leittechnisch in das Zementwerk zu integrieren. Hierfür ist ebenso ein Zeitraum von ca. 12 Monaten einzuplanen.

2 Ausgangssituation

2.1 Das Problem der Hg-Emissionen für Umwelt und Gesundheit

Das Schwermetall Quecksilber Hg stellt generell für die Umwelt und insbesondere für die Gesundheit von Mensch und Tier eine große Gefährdung dar. Es reagiert mit den im Körper vorhandenen schwefelhaltigen Proteinen unter Entzug dieser Schwefelatome (Disulfidbrücken, Cystin), womit diese ihre funktionelle Wirkung verlieren. Somit ist Quecksilber vor allem ein Nervengift.

Die Anwesenheit von Quecksilber (Hg) bei der Herstellung von Zement ist unvermeidlich, weil es sowohl in den Rohstoffen (sowohl in Primär- als auch in Sekundärrohstoffen wie z. B. Kalkstein, Mergel, Tonminerale, Hochofenschlacke, Rauchgasgips etc.), als auch in den Brennstoffen (Primär- und Sekundärbrennstoffe wie z.B. Braunkohle, Industrieabfälle, Plastik, Hausmüll, Klärschlamm etc.) vorkommt. Logischerweise wurden und werden Zementwerke in unmittelbarer Nähe einer Lagerstätte für den notwendigen „Hauptrohstoff“ Kalkstein (ein handelsüblicher Portlandzement enthält z.B. ca. 68 M.-% CaCO_3) errichtet und betrieben, sodass ein gewisser Quecksilbergehalt im Rohmehl, abhängig von der jeweiligen Lagerstätte, nicht zu vermeiden ist. Nach einer aktuellen Quecksilberbilanz für die gesamte deutsche Zementindustrie erfolgt der Quecksilbereintrag zu über 60 % über die Rohstoffe für die Klinker- und Zementherstellung und zu weniger als 40 % über die Brennstoffe¹.

Die deutschen Zementanlagen sind genehmigungsrechtlich gesehen sog. „Abfallmitverbrennungsanlagen²“ und unterliegen folglich dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Die Mitverbrennung von Abfällen hinterlässt bei diesem Prozess natürlicherweise keine „Asche“, sondern es handelt sich hierbei um eine nahezu vollständige Stoffumwandlung mit Ausnahme von geringen Mengen gasförmiger Schadstoffemissionen, die mit gemäß dem Stand der Technik („Beste verfügbare Technik“; BVT) geeigneten Verfahren weitgehend aus dem Abgas entfernt werden.

Hg wird sowohl auf der Rohmehl-Eintragsseite als auch auf der Brennstoff-Eintragsseite dem Prozess zugeführt. Das Hg aus den Brennstoffen verdampft sofort bei Eintritt in den Ofen bzw. in die Sekundär- /Tertiärfeuerung zu elementarem Quecksilber Hg und wird nicht

¹ Harraß, R.; Schäfer, S.; Hoenig, V. (2018): Quecksilber in der deutschen Zementindustrie – eine Bilanz. Cement International 6 (16), 50-61.

² Definition nach Art. 3 der IE-RL: BVT wird in Art. 3 allgemein definiert als "effizientester und fortschrittlichster Entwicklungsstand der Tätigkeiten und entsprechenden Betriebsmethoden, der bestimmte Techniken als praktisch geeignet erscheinen lässt, als Grundlage für die Emissionsgrenzwerte und sonstige Genehmigungsaufgaben zu dienen, um Emissionen in und Auswirkungen auf die gesamte Umwelt zu vermeiden oder, wenn dies nicht möglich ist, zu vermindern".

abgeschieden. Auf dem Abgasweg findet dagegen infolge der Abkühlung des Gases eine teilweise Kondensation bzw. Adsorption der Quecksilberverbindungen auf den Rohmaterialpartikeln statt. Der weitere Verbleib des Quecksilbers hängt jetzt von der Betriebsart ab:

- Im Verbundbetrieb („Rohmühle läuft“, ca. 90 – 95 % der Ofenlaufzeit) wird der Ofenstaub und mit ihm das daran adsorbierte Quecksilber zum großen Teil mit dem Rohmehl in der Mühle vermisch. Somit gelangt nur ein kleiner Teil des Staubs mit dem Abgas in das Staubfilter, der Großteil wird in das System zurückgeführt. Mit dieser Betriebsweise entsteht zwischen dem Vorwärmer und dem Staubfilter ein Quecksilberkreislauf, der als „äußerer Kreislauf“ bezeichnet wird.
- Im Direktbetrieb („Rohmühle steht“,) gelangt das mit dem Hg-haltigen Staub angereicherte Rohgas direkt in den Staubfilter, die Rohmühle wird umfahren und eine Adsorption findet nicht statt. Folglich ist jetzt die Quecksilberkonzentration hinter dem Filtersystem im Direktbetrieb wesentlich höher als im Verbundsystem, sodass bei dieser Fahrweise auch deutlich mehr Quecksilber am Filterstaub gebunden ist.

Das ans Rohmehl (Verbundbetrieb) oder an den Ofenstaub adsorbierte Quecksilber gelangt über das Rohmaterial-Silo in den Vorwärmer zurück, wo es wieder verdampft und mit dem Rohgasstrom wieder zurücktransportiert wird. Da über die Roh- und Brennstoffe weiterhin Quecksilber eingetragen wird, aus dem Abgaskamin im Verbundbetrieb nur sehr geringe Mengen ausgetragen werden, reichert sich das Quecksilber im Prozess an. Der Kreislauf wird deshalb irgendwann gesättigt sein mit der Folge, dass das Quecksilber nicht mehr effizient am Staub adsorbiert wird und es zu erhöhten Emissionen kommen kann.³

Die nachfolgende Abbildung zeigt hierzu die einzelnen Quecksilberphasen im Zementprozess sowie die Ein- und Ausschleusung des Quecksilbers:

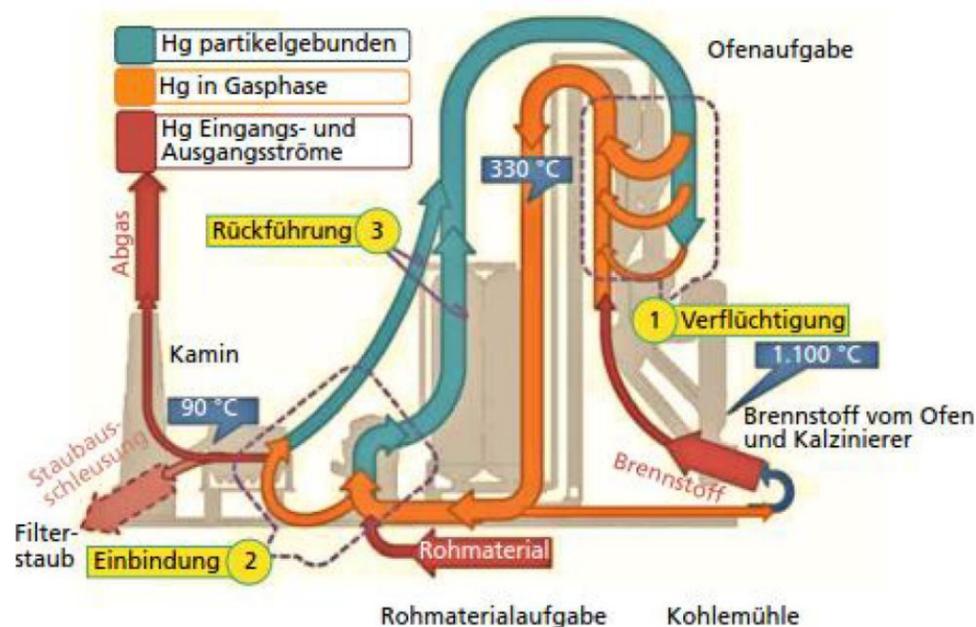


Abbildung 1: Die Quecksilberphasen im Zementprozess

³ Reinhold, H.; Steiner, D. (2017): Prozessintegriertes Verfahren zur Entlastung des Quecksilberkreislaufes und zur Reduktion von Quecksilberemissionen bei der Herstellung von Zementklinker. Energie aus Abfall, Band 14, TK-Verlag, Neuruppin. ISBN: 978-3-944310-32-9, 463-473.

2.1.1 Stand der Technik

Gemäß der zurzeit gültigen „Best Verfügbare Technik (BVT)“ empfiehlt die EU-Kommission, einen Teilstrom des abgeschiedenen Filterstaubes aus dem sog. „externen Kreislauf“, hier aus dem Staubfilter vor dem Kamin, auszuschleusen. (Es ist bekannt, dass die Quecksilberabscheidung auf dem Staub mit sinkender Gastemperatur im System steigt. So haben z.B. Messungen an Zementprozessen mit Zyklon – Vorwärmung gezeigt, dass mehr als 90 % auf Staubpartikeln bei einer Temperatur von kleiner als 130 ° C gefunden wurden). Dieser Teilstrom wird nun nicht wieder dem Brennprozess zugeführt, sondern in die Zementmühle zugegeben und mit dem Zementklinker und anderen Zusatzstoffen zu Zement vermahlen. Diese BVT – gerechte Methode wird als „Dust Shuttling“ bezeichnet und ist in Abbildung 1 in der Anlage A1 skizziert. Das Quecksilber wird im Zement chemisch nicht gebunden (im Gegensatz zu anderen Schwermetallen!), sondern durch den Abbindevorgang und das Erhärten des Zements/Betons lediglich mechanisch immobilisiert und deshalb bei Zerstörung/Verrottung/Abriß von Beton freigesetzt und unkontrolliert wieder an die Umwelt abgegeben.⁴

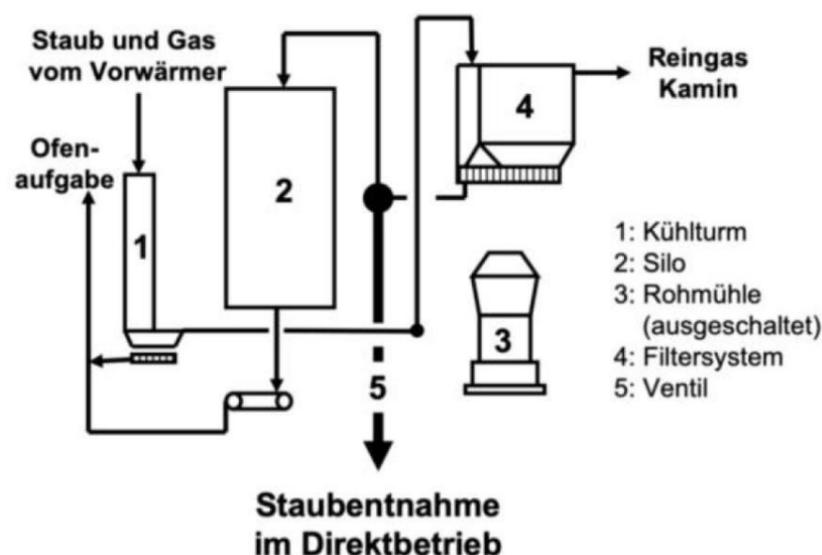


Abbildung 2: Beispielskizze für „Dust Shuttling“ – hier im Direktbetrieb

Obwohl diese Methode als „BVT – konform“ von der EU-Kommission empfohlen wird, kann sie nicht als nachhaltig bezeichnet werden und ist faktisch auch umweltgefährdend. Dust Shuttling wird von allen deutschen Zementwerken durchgeführt.

2.1.2 Innovative Verfahren – Verfahrensvergleich

Über die von der EU vorgeschlagenen Methoden zur Minderung der Quecksilberemissionen hinaus wurden in den letzten zusätzlich weiterführende innovative Verfahren entwickelt, deren Fortschritt in der Entwicklung darin besteht, das Quecksilber nicht nur aus dem Produktionskreislauf zu entfernen, sondern auch endgültig dem Umweltkreislauf als Ganzes dauerhaft zu entziehen und das gereinigte Rohmehl direkt wieder in den Prozess zurückzuführen.:

⁴ Texte Umweltbundesamt 68/2011: Quecksilberemissionen aus industriellen Quellen – Status Quo und Perspektiven, Teil 2; Seite 85

2.1.2.1 Verfahren „ExMercury“

Dieses Verfahren⁵ wurde bereits in zwei Zementwerken (Österreich und Deutschland) installiert. Dabei handelt es sich in Österreich um die erste großtechnisch realisierte Anlage, die als Prototyp getestet wurde und erfolgreich in Betrieb ist. Bei der zweiten Anlage handelt es sich um eine Teilmaßnahme, die in einen umfassenden Umbau des Zementwerks mit dem Ziel Ressourceneinsparung und der CO₂-Minderung integriert wurde.

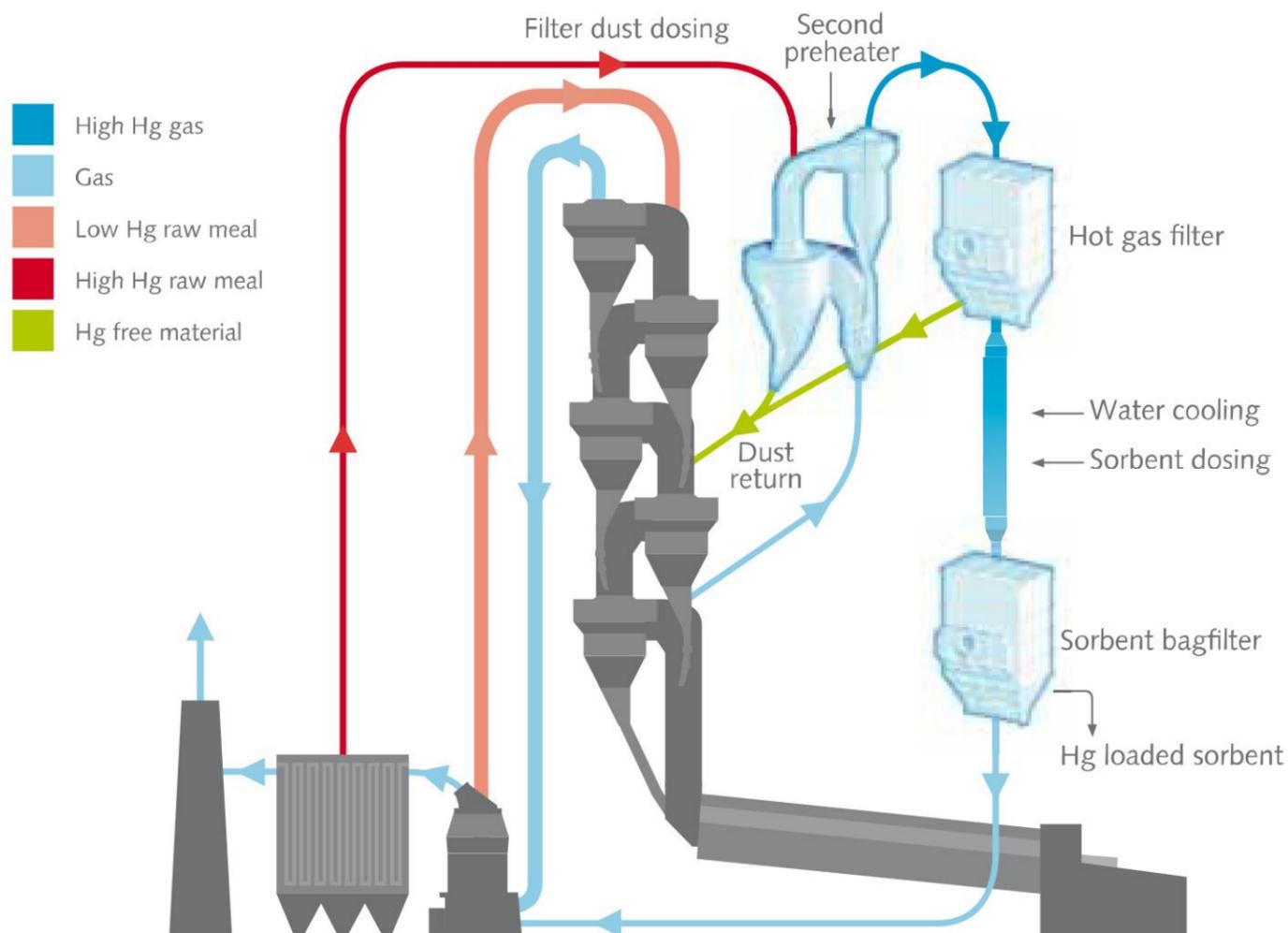


Abbildung 3: Das ExMercury-Verfahren⁶

Nach diesem Verfahren wird der mit Hg beladene Filterstaub einem zusätzlich installierten Zyklon zugeführt, der im Gegenstrom mit heißen Ofenabgasen aufgeheizt wird, sodass das Hg wieder gasförmig wird. Danach wird es über ein Heißgasfilter geleitet, sodass der nun Hg-arme Staub wieder dem Prozess zugeführt werden kann (grüner Pfeil). Das mit gasförmigem Hg beladene staubarme Gas wird mit Wasser abgekühlt, sodass das Hg wieder kondensiert und mit dem restlichen (wenigen) Staub mittels über ein Tuchfilter (mit Aktivkohle) abgetrennt wird.

⁵ Patent PCT/AT2012/000138 Verfahren und Vorrichtung zur Quecksilberabscheidung bei der Zementklinkerherstellung

⁶ Kern, S.; Salzer, F.; Reinhold, H.: Breaking the mercury cycle for emission abatement with the “ExMercury – Splitting Preheater System”. ZKG-Handbuch Zementanlagenbau 2016/2017; S. 120 – 129.

2.1.2.2 Verfahren „HGEX“-Gegenstand dieses Projektes

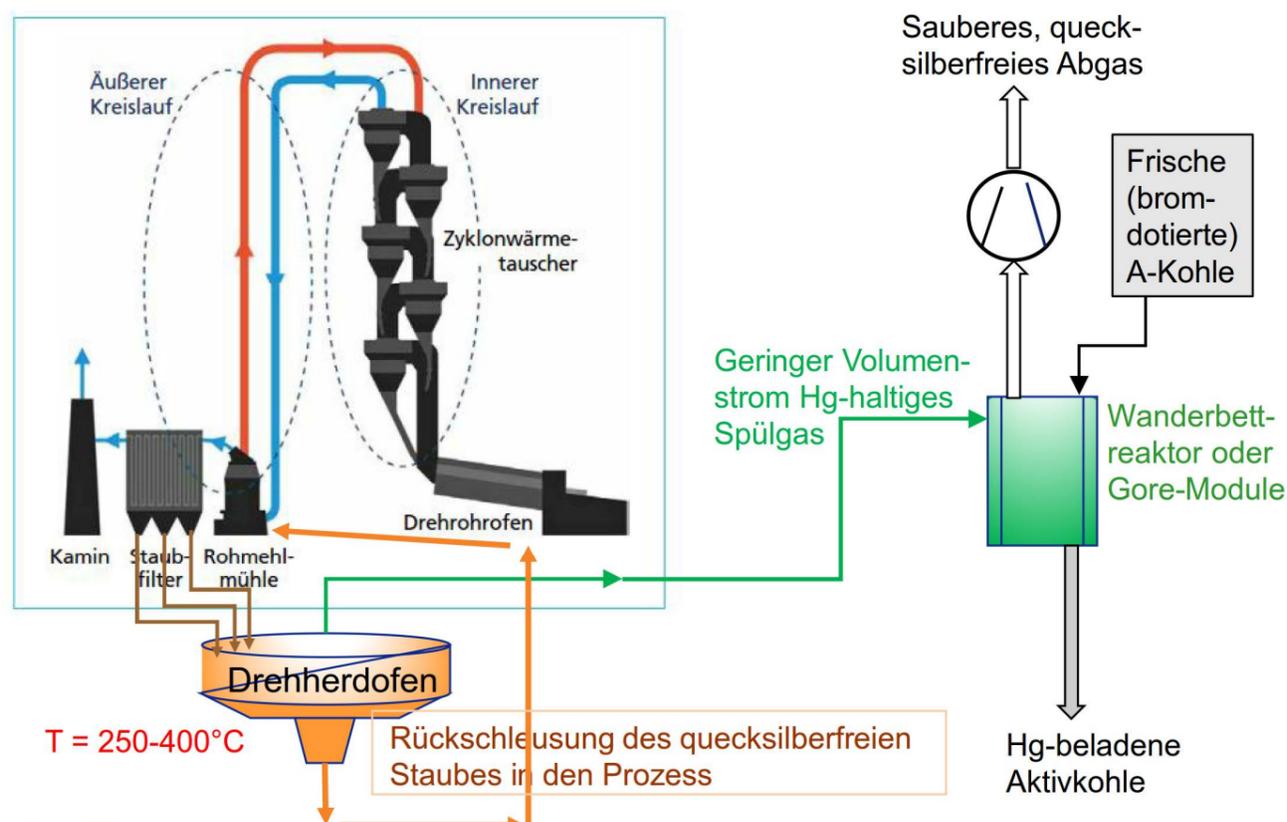


Abbildung 4: HGEX-Verfahren – Gegenstand dieses Projektes

Bei dem hier vorgestellten Verfahren wird ebenfalls mit Hg beladener Filterstaub behandelt, der einem Drehherdofen zugeführt wird. Drehherdöfen werden üblicherweise in der Industrie zum schonenden Kalzinieren/Brennen von Pulvern und Stäuben eingesetzt. Der Ofen wird bei Temperaturen betrieben, bei denen das Hg nahezu quantitativ oder auch nur teilweise in die Gasphase überführt wird. Der Staub darf dabei nicht aufgewirbelt werden, damit nicht der Einsatz eines weiteren Filters erforderlich wird.

Der Hg-beladene Rohmehl-Zementstaub wird durch eine Aufgabevorrichtung auf den äußeren Rand des Drehherdofens dosiert, wandert langsam – durch Umlenkschaufeln umgewälzt – auf dem Teller von außen nach innen und wird dabei von unten indirekt bis auf ca. 250 °C – 400 °C aufgeheizt. Die Wärme zum Aufheizen soll aus bisher nicht genutzter Abwärme (z.B. aus der Klinkerkühlung) bestehen oder aber auch aus anderen regenerativen Energiequellen, so dass als Nebeneffekt dieses Verfahrens auch die Energieeffizienz gesteigert werden kann.⁷

Dabei wird das Quecksilber in unterschiedlichen Verbindungen gasförmig aus dem Staub ausgetrieben und dabei von einer sehr schwachen Schleierluft, die über das Gut hinweg streicht, aus dem Ofen nach oben ausgetragen.

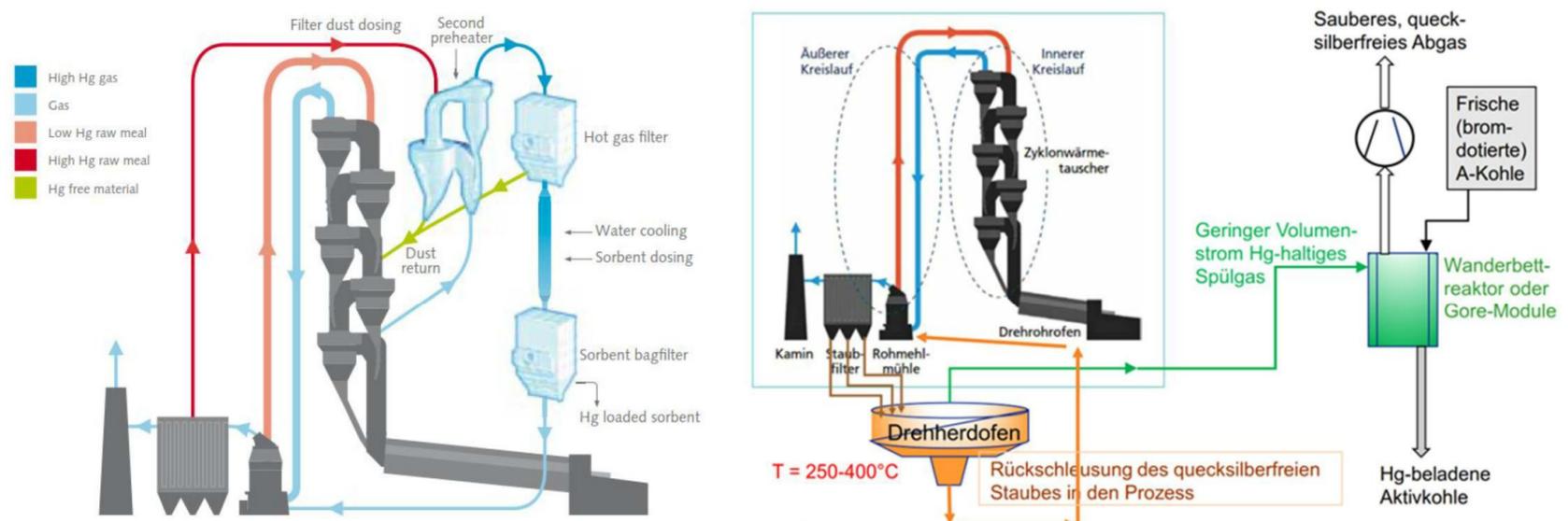
Danach lässt sich das Gas nach leichter Abkühlung mit herkömmlicher Abscheidetechnik über z.B. ein bromdotiertes Festbett – Aktivkohlefilter über ein sehr kleines Zusatzgebläse wieder in den Prozess zurückgeben.

⁷ Für die in diesem Projekt vorgesehenen Versuche wurde elektrisch beheizt, da nicht Gegenstand des Projektinhaltes.

Der nun ebenfalls nahezu quecksilberfreie Filterstaub wird als zusätzlich gewonnener Rohstoff in den Prozess zurückgeführt, vorzugsweise in die Rohmehlmühle – andere Optionen sind betriebsbedingt selbstverständlich ebenso möglich.

2.1.2.3 Technischer Vergleich wesentlicher Merkmale

Nachfolgend wird ein Übersichtsvergleich wesentlicher Merkmale der beiden Verfahren dargestellt:



Behandlung von Filterstaub	Behandlung von Filterstaub
Abscheidegrad bis über 95 %	Abscheidegrad bis über 95 %
Verfahren ist im Zementprozess integriert-zusätzlicher Druckverlust	Verfahren arbeitet unabhängig vom Zementprozess-kein zusätzlicher Druckverlust im System
Gereinigter Staub wird in den Prozess rückgeführt	Gereinigter Staub wird in den Prozess rückgeführt
Heißgasfilter notwendig	Heißgasfilter nicht erforderlich
Langer Transportweg für Filterstaub	Kurzer Transportweg für Filterstaub
Montagekosten hoch wegen großer Höhe	Montage auf beliebiger Höhe

Abbildung 5: Gegenüberstellung von „ExMercury“ und „HGEX-SE“ - Übersicht

2.2 Motivation und Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Die Motivation für die Inangriffnahme des vorliegenden Projektes war insbesondere die Erfahrung aus der beruflichen Praxis, dass die große Mehrzahl der Zementwerke bereits seit vielen Jahren in Betrieb sind und im Verlaufe dieser Zeit oft bzw. mehrfach Umbauten und Ergänzungen bzw. Erneuerungen bestehender Anlagensysteme vorgenommen werden mussten. Dabei entstehen in den Bestandsanlagen oft technisch anspruchsvolle Situationen, wenn zusätzliche Einrichtungen / Systeme installiert werden sollen, z. B.:

- Durch Einplanung von zusätzlich zu installierenden Systemen entsteht immer die Frage nach dem zusätzlichen Druckverlust des neuen Systems, weil das Bestands-Hauptgebläse oft bereits an der Grenze der ursprünglichen Auslegung betrieben wird.
- Wenn neu zu installierende Systeme baulich-mechanisch mit bestehenden Gebäuden bzw. Gerüsten, Fundamenten oder Stahlbau verbunden werden müssen oder sollen, kommt es oft vor, dass zusätzliche statische Maßnahmen erforderlich werden, die die Um- oder Nachrüstung erheblich verteuern können.

Diese Überlegungen führten dazu, ein Verfahren zu entwickeln, welches unabhängig vom Prozess der Klinkerherstellung das Quecksilber aus dem Zementrohmehl (als Filterstaub) zu entfernen und den gereinigten Staub wieder in Produktionsprozess zurückzuführen.

Das Hauptziel des Vorhabens besteht deshalb in der Reduktion der Quecksilberemissionen bei der Herstellung von Zement durch Abscheidung eines Teils des eingetragenen Quecksilbers, welches am Rohmehl-Filterstaub adsorptiv anhaftet. Insbesondere soll dadurch erreicht werden, dass künftig keine Verschleppung von Quecksilber in das Produkt „Zement“ weiter stattfindet, sondern das gereinigte Rohmehl wieder in den Produktionsprozess zurückgeführt werden kann. Die Abtrennung soll dabei durch thermische Behandlung in einem „Drehherdofen“ im Pilotmaßstab (Technikumsmassstab) erfolgen.

2.3 Aufgabenstellung

Die Aufgabe des Forschungsvorhabens war es, die in diversen Labor-Voruntersuchungen erreichten Ergebnisse hinsichtlich der Abscheidung von Quecksilber in einem Drehherdofen im Pilotmaßstab zu bestätigen und somit die Grundlage zu schaffen, in diesem Vorhaben nachfolgenden Schritten eine Anlage zu konzipieren, die an einem Zementwerk im großtechnischen Maßstab angeschlossen, getestet und zur technischen Reife entwickelt werden kann.

Hierzu wurde das Vorhaben in einzelne Arbeitspakete strukturiert, die im folgende Kapitel dargestellt sind:

2.3.1 Darstellung der einzelnen Arbeitspakete und Projektverlauf

Die nachfolgend dargestellten Arbeitspakete stellen das ursprüngliche Programm vor dem Projektstart dar, das jedoch – wie in Kapitel 3 und 4 ausführlich beschrieben – in mehreren Teilbereichen abgeändert werden musste.

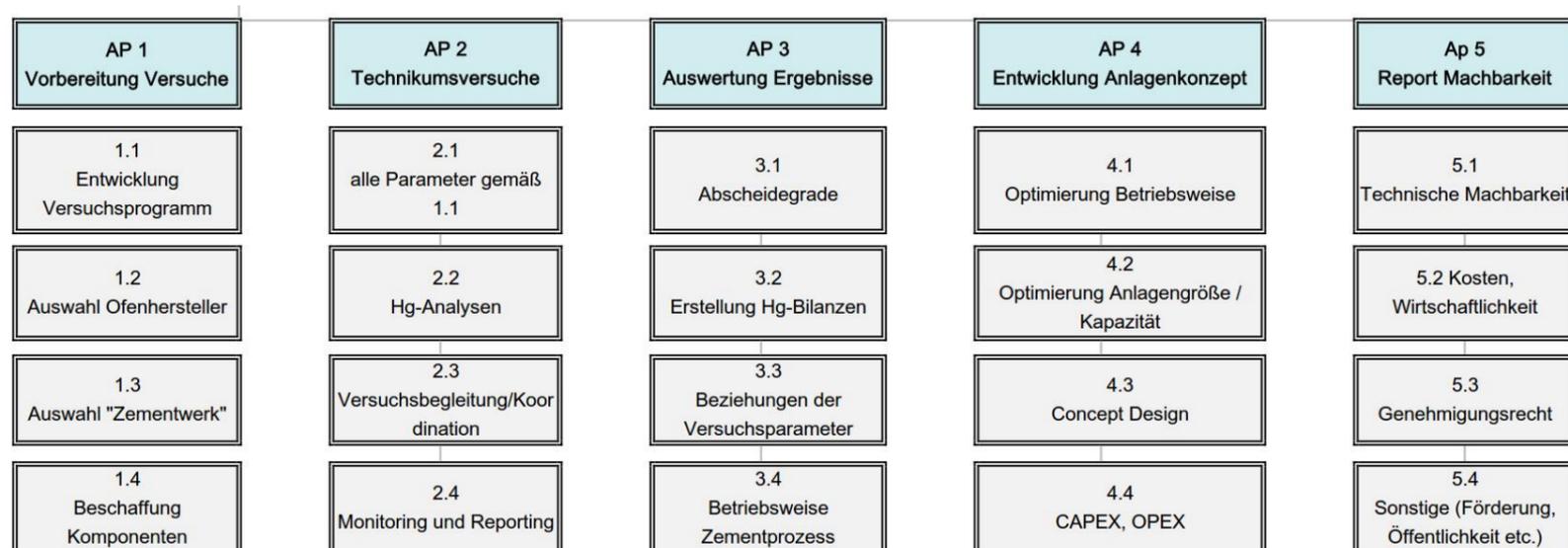


Abbildung 6: Projektstrukturplan wie beantragt - Überblick

Während der Projektbearbeitung traten zwei Ereignisse ein, die eine zweimalige Verlängerung der Projektbearbeitung nach sich zog, so dass die Projektdauer sich von ursprünglich geplanten 12 Monaten auf nun insgesamt 24 Monate ausdehnte. Die Ursachen hierfür lagen in zwei Ereignissen, die von der Antragstellerin im Detail so nicht vorhersehbar waren:

- Es konnte kein Ofenhersteller gefunden werden, der einen geeigneten Drehherdofen für die geplanten Versuche zur Verfügung stellen konnte oder wollte, und
- Das Zementwerk, welches das für die Versuche geeignete Zementrohmehl mit einem „geeigneten“ Quecksilbergehalt zur Verfügung stellen konnte und auch sollte, konnte wegen eines tiefgreifenden Umbaus (Ersatz eines Klinkerkühlers) 6 Monate nicht betrieben werden, wobei kurzfristig keine alternatives Zementwerk gefunden wurde.

Infolgedessen musste das Projekt umstrukturiert werden und auch der Projektinhalt angepasst und dergestalt modifiziert werden, dass nunmehr in Eigenregie ein Drehherdofen konstruiert und gefertigt wurde. Details hierzu sind unter Kapitel 4 beschrieben.

3 Darstellung der erzielten Ergebnisse

Für die Darstellung der erzielten Ergebnisse wurde zunächst ein SOLL – IST – Vergleich durchgeführt, um darzustellen, inwieweit die verfolgten Ziele im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung erreicht wurden.

Danach werden in Kapitel 4 die Ergebnisse hinsichtlich der Versuche zur Reduktion von Quecksilberemissionen im Zementprozess selbst betrachtet und beurteilt.

3.1 SOLL – IST – Vergleich

3.1.1 Versuchsvorbereitung – Beschreibung der Abweichungen

Tabelle 1: Arbeitspaket 01 – Versuchsvorbereitung

Arbeitspaket 01 Versuchsvorbereitung	
SOLL	IST
1.1 Vorbereitung der Versuche	Ausführung vollständig
1.2 Entwicklung Versuchsprogramm	Ausführung vollständig
1.3 Auswahl des Ofenherstellers mit geeigneter Technikumsanlage, NRW;	Nicht erfüllt; es wurde stattdessen ein Drehherofen in Eigenregie ausgelegt, konstruiert, gefertigt und in Betrieb gesetzt. Dadurch verursachte Projektverlängerung ca. 6 Monate
1.4 Auswahl des Partners „Zementwerk“ (Standort der später zu planenden Pilotanlage) sowie Probenbeschaffung aus dem Zementwerk. Potenziell: Standorte Geseke, Ennigerloh, Hamm (mit den höchsten Hg-Werten)	Ausführung vollständig.

Bereits während der Vorbereitung des geplanten Vorhabens trat ein nicht vorherzusehendes Hindernis auf, das einem termingerechten Ablauf des Vorhabens entgegenstand: Es konnte kein Ofenhersteller gefunden werden, der in seiner Technikums-Einrichtung einen geeigneten Drehherdofen zur Verfügung stellen konnte.

Daraufhin wurden Ofenhersteller angefragt, Angebote zur Fertigung und Lieferung eines Drehherdofens vorzulegen. Auch diese Suche blieb erfolglos. Eine Recherche nach den Ursachen

ergab schließlich, dass wegen der Nachfrage nach thermischen Behandlungsanlagen zur Aufbereitung seltener Erden keine Kapazitäten frei waren.⁸

Auf Grund dieses Sachverhaltes musste das komplette Projekt umstrukturiert werden, indem nach interner Abstimmung seitens der Antragstellerin beschlossen wurde, einen Drehherdofen selbst auszulegen, zu konstruieren und nach eigenen Anweisungen fertigen zu lassen. Das Projekt musste dadurch entsprechend zeitlich verlängert und kostenbezogen modifiziert werden, ohne den Gesamtrahmen der Gesamtinvestition zu verlassen.

Der Drehherdofen einschließlich einer Abgasreinigungsanlage konnte Ende 2024 fertiggestellt werden und stand nach Inbetriebnahme, Kaltversuchen zur Einstellung aller mechanischen Einrichtungen und Anbringung der Isolierung ab September für Versuche zur Verfügung.



Abbildung 7: Gesamtanlage – ohne Isolierung



Abbildung 8: Ofen betriebsbereit, mit Isolierung, Abgasreinigung und Hg-Messeinrichtung

⁸ Zeitgleich ereignete sich der erste „Boom“ für Elektroautos (Information eines Ofenbauers), es herrschte Überlastung bei der thermischen Aufbereitung seltener Erden.

3.1.2 Technikumsversuche – Beschreibung der Abweichungen

Tabelle 1: Arbeitspaket 02 – Technikumsversuche

Arbeitspaket 02 Technikumsversuche		
	SOLL	IST
2.1	Durchfahren aller unter 1.1 erfassten Parameter (Temperaturen, Betriebsweise „Verbundbetrieb“, „Direktbetrieb“, Verweilzeiten,)	Ausführung teilweise: Verzicht auf „Verbundbetrieb“; reduzierte Zahl an Parametern, siehe Erläuterungstext
2.2	Hg – Analysen sämtlicher behandelten Proben durch Labor	Vollständig ausgeführt
2.3	Versuchsbegleitung und Koordination durch SE;	Vollständig ausgeführt
2.4	Zwischenberichte, Jour Fixe, Korrekturen am Versuchsprogramm	Vollständig ausgeführt

Die im AP 01 erfassten Versuchsparameter mussten aus Zeitgründen⁹ zum Teil gekürzt und nur die aussagekräftigen und vor allem für die spätere praktische Anwendung relevanten Parameter erfasst werden.

Deshalb wurde der Betriebszustand „Verbundbetrieb“ weggelassen, da er in der Praxis kaum genutzt wird, weil – wie unter 2.1 bereits beschrieben – im Verbundbetrieb weit weniger Quecksilber am Staub anhaftet als im Direktbetrieb:

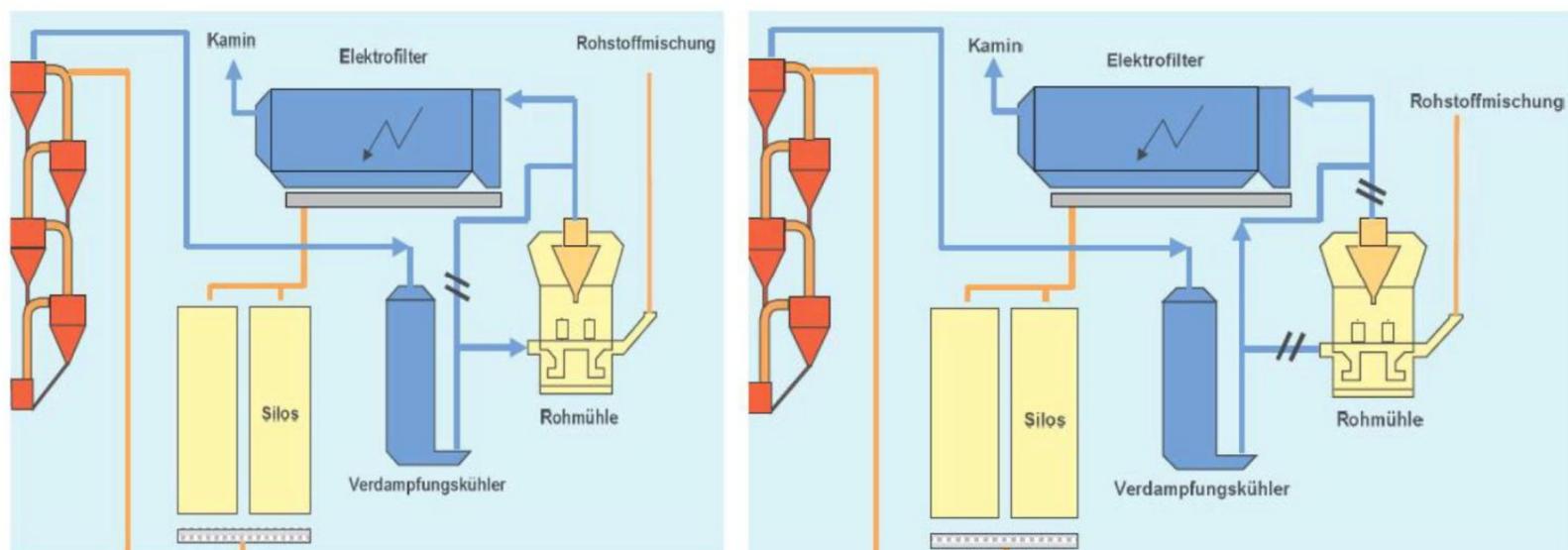


Abbildung 9: Betriebsarten „Verbundbetrieb“ (links) und „Direktbetrieb“ (rechts)¹⁰

Ebenso musste auf einen Teil der Parameter „Verweilzeit“ und „Temperatur“ verzichtet werden, um den (bereits verlängerten) Zeitplan einhalten zu können. Es wurde jedoch darauf geachtet, dass die Aussagekraft sowie die aus den Ergebnissen gezogenen Schlussfolgerungen nicht beeinträchtigt wurden.

⁹ Ein Teil der für Versuche zur Verfügung stehenden Zeit musste in den Fertigungsprozess für den Drehherdofen verschoben werden.

¹⁰ Quelle: M. Achternbosch, K.-R. Bräutigam: Herstellung von Zementklinker; S. 13 -14; Forschungszentrum Karlsruhe 2000; Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse.

3.1.3 Auswertung der Ergebnisse – Beschreibung der Abweichungen

Die Ergebnisse konnten aufgrund der bereits beschriebenen Beschränkung in der Zahl und Menge der untersuchten Betriebsparameter mit Einschränkungen ausgewertet werden, ohne das Projektziel wesentlich zu gefährden:

Tabelle 2: Arbeitspaket AP 03: Auswertung der Ergebnisse

Arbeitspaket 03 Auswertung der Ergebnisse		
	SOLL	IST
3.1	Abscheidegrade Hg in Abhängigkeit von Einzelparametern	Durchgeführt mit Einschränkungen
3.2	Erstellung von Hg-System-Gesamtbilanzen	Durchgeführt mit Einschränkungen
3.3	Erfassung der Verbräuche (Energie [thermisch, elektrisch], Luftmengen, Absorptionsmittel soweit wie möglich abschätzen);	Durchgeführt mit Einschränkungen

3.1.4 Das Anlagenkonzept – Beschreibung der Abweichungen

Tabelle 3: Arbeitspaket 04 – Entwicklung des Anlagenkonzepts

Arbeitspaket 04 Entwicklung des Anlagenkonzepts		
	SOLL	IST
4.1	Entwicklung der optimalen Fahrweise der Anlage hinsichtlich relevanter Betriebsparameter (Direktbetrieb, Verbundbetrieb)	Ausgeführt, jedoch kein Verbundbetrieb
4.2	Entwicklung der optimalen und/oder der notwendigen Größe einer Reinigungsanlage unter Berücksichtigung des angestrebten Wirkungsgrades η_{Hg} (Kapazität min / max., Nennleistung).	Ausgeführt im Zusammenhang mit 4.1
4.3	Concept Design der Anlage, bestehend aus „Design Basis“, „Process Design“, Verfahrensbeschreibung, Entwurf Regelkonzept und Anbindung, Auswahl der Hauptkomponenten, Beschaffung und Lieferung, Errichtung und Inbetriebsetzung, Aufstellungsentwurf.	Ausgeführt, jedoch noch kein Regelkonzept und Anbindung, Aufstellungsplanung im Werk nur werksbezogen möglich.
4.4	Entwicklung eines Budgetpreises: CAPEX und OPEX werden dargestellt auf Basis von Budgetangebot	CAPEX ausgeführt; OPEX nur grobe Schätzung möglich

Wie in 3.1.2 bereits beschrieben, wurde der Betriebszustand „Verbundbetrieb“ aus dargelegten Gründen nicht betrachtet.

Weiterhin hat sich herausgestellt, dass die Erfassung der Betriebskosten nicht auf eine großtechnische Anlage skalierbar sind, da in einer großtechnischen Anlage andere Heizsysteme zum Einsatz kommen als in der Technikumsanlage. Dies war aus technischen Gründen nicht anders zu realisieren.

3.1.5 Report – Beschreibung der Abweichungen

Tabelle 4: Arbeitspaket 05 – Report

Arbeitspaket 05 Report		
	SOLL	IST
5.1	Darstellung der Durchführbarkeit hinsichtlich: Technik, Möglichkeiten der Nutzung von Abwärme aus dem Zementwerk, Sicherheitstechnik	Sicherheitstechnik konnte nicht mehr bearbeitet werden
5.2	CAPEX/OPEX, „Wirtschaftlichkeit“, Amortisation mit und ohne finanzielle Förderung	OPEX nur grob abschätzbar und nicht übertragbar, da unterschiedliche Rohstoffe und deshalb Verbrauchswerte etc.
5.3	Genehmigungsrecht (UVP erforderlich?, Präsentation bei der Behörde?)	UVP nicht erforderlich, keine Präsentation durchgeführt
5.4	Sonstige Aspekte einer Machbarkeit (Öffentlichkeitsarbeit, politische Rahmenbedingung, Förderung etc.), Veröffentlichung	keine Aktivitäten

Der Verbundbetrieb wurde aus bereits dargelegten Gründen nicht betrachtet. Bezüglich der nicht exakt übertragbaren Betriebskosten (Siehe Kapitel können jedoch einige Abschätzungen aus praktischer Erfahrung gemacht und dargelegt werden.

4 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

4.1 Beispielhafte Darstellung von Messergebnissen

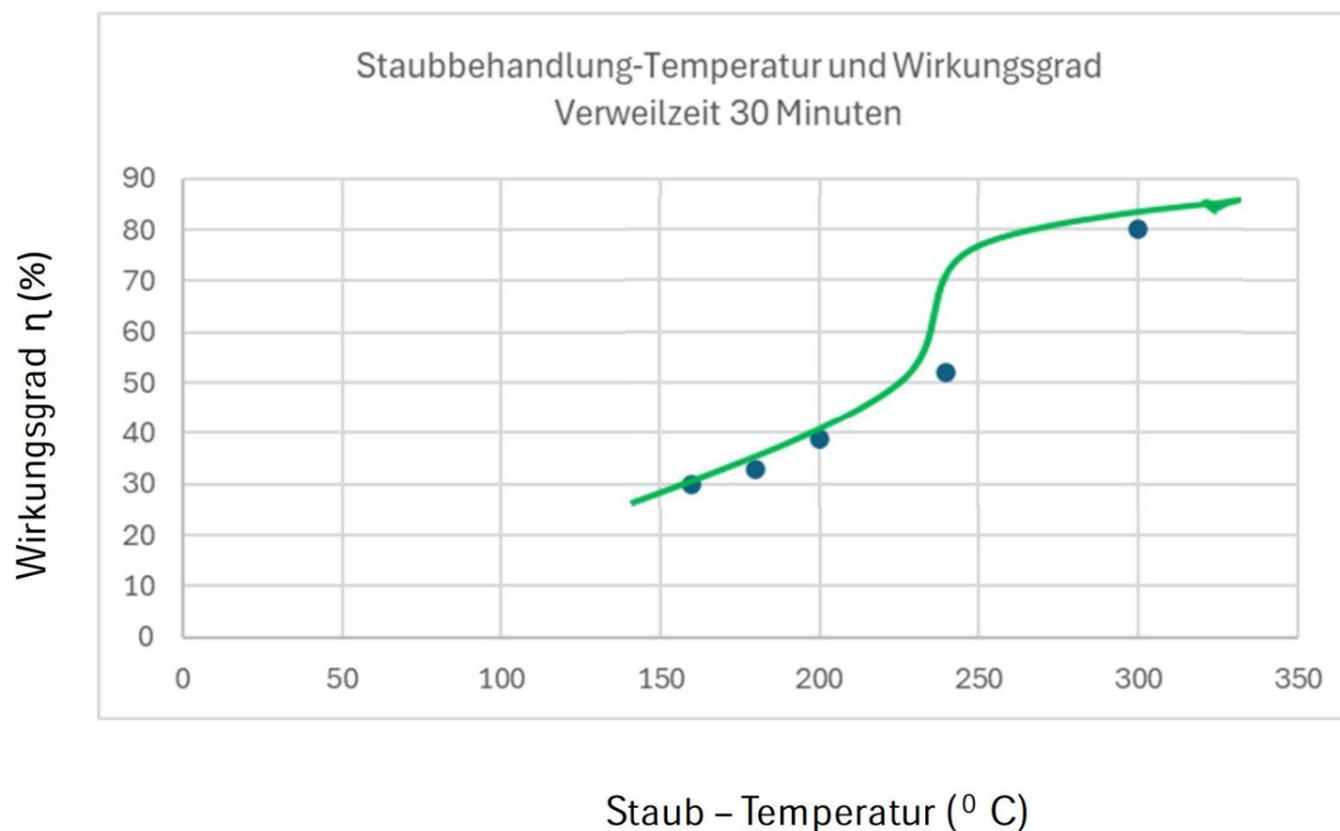


Abbildung 10: Staubbehandlung: Wirkungsgrad steigt mit zunehmender Temperatur

Wie bereits in Labor-Vorversuchen, ist die Austreibungsrate bei dem Filterstaub zwischen ca. 200 ° C und 300 ° C am höchsten. Allerdings darf dieses Ergebnis wie auch alle anderen unter anderen Bedingungen erzielten Ergebnisse nicht verallgemeinert werden, da die unterschiedlichen Quecksilberphasen in den jeweiligen Filterstäuben nicht immer in demselben quantitativen Anteil vorhanden sind und gleichzeitig unterschiedliches Verhalten mit steigender Temperatur aufweisen (Tabelle 5). Die Art und Menge der einzelnen Quecksilbermodifikationen hängt vor allem ab von der jeweiligen Lagerstätte des Zementwerkes, aber auch von den jeweils eingesetzten Brennstoffen.

Tabelle 5: Schmelzpunkt, Siedepunkt und Sublimationspunkt unterschiedlicher Hg-Phasen¹¹

Formula	Melting point [°C]	Boiling point [°C]	Decomposition/Sublimation temperature [°C]
Hg(0)	-39	357	n.a.
Hg ₂ Cl ₂	525	n.a.	383
HgCl ₂	277	302	n.a.
Hg ₂ SO ₄	n.a.	n.a.	n.a.
HgS	n.a.	446-583	580
HgO	n.a.	356	500
Hg ₂ Br ₂	405	n.a.	340-350
HgBr ₂	237	322	n.a.
Hg ₂ I ₂	n.a.	n.a.	140
HgI ₂	259	350	n.a.
Hg ₂ F ₂	n.a.	n.a.	570
HgF ₂	645	650	645
Hg ₂ (NO ₃) ₂	n.a.	n.a.	70
Hg(NO ₃) ₂	79	n.a.	n.a.

Die nachfolgende Abbildung 11 zeigt die Auswertung von Vorversuchen zur Entwicklung des „ExMercury“ – Verfahrens, welches unter Kapitel 2.1.2.1 bereits beschrieben wurde. Zum Vergleich mit Ergebnissen aus Versuchen in der SE – Technikumsanlage wurden Ergebnisse in die Grafik integriert (gelbe Ellipsen). Unter Berücksichtigung der einschränkenden Randbedingungen der in unterschiedlichen Anteilen vorliegenden Quecksilber - Phasen (Tabelle 5) in den Roh- und Brennstoffen können die Ergebnisse als gut vergleichbar bewertet werden. Es darf daraus auch die Schlussfolgerung gezogen werden, dass Ergebnisse auch gut übereinstimmen bei höheren oder niedrigeren Behandlungstemperaturen.

¹¹ Perry, R.H.; Green, D.W.; Maloney, J.O.; (editors): Perry`s chemical engineers` handbook, 7th edition, The McCraw-Hill Companies Inc., 1997

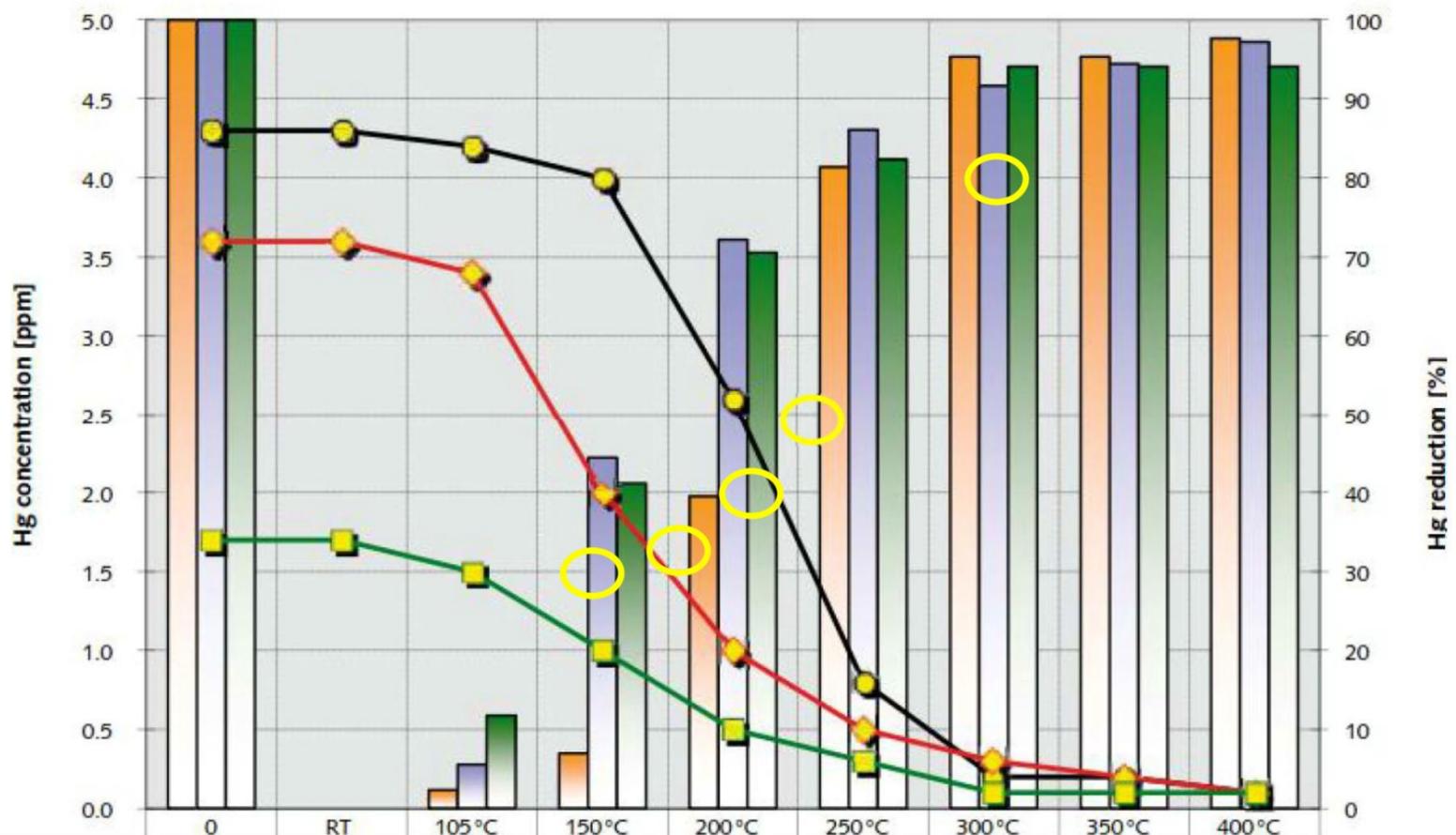


Abbildung 11: Versuchsergebnisse im Vergleich mit Versuchen von Dritten¹²

4.2 Schlussfolgerungen für die Auslegung und Betrieb einer Anlage

Die in Abbildung 11 dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf eine jeweilige Verweilzeit eines Versuches im Ofen von ca. 30 Minuten. Grundsätzlich besteht ein Zusammenhang zwischen der Behandlungstemperatur und der Verweilzeit dergestalt, dass der Wirkungsgrad der Quecksilberaustreibung bei einer Verkürzung der Verweildauer im Ofen wettgemacht werden kann durch eine entsprechende Erhöhung der Behandlungstemperatur und auch umgekehrt, wirtschaftlich sinnvoll selbstverständlich nur bezogen auf einen bestimmten Bereich. So sollte ein Drehherdofen in erster Näherung so ausgelegt werden, dass die maximale Behandlungstemperatur 350 ° C und die maximale Verweilzeit 30 Minuten betragen sollten (Abweichungen zu größeren Werten sind aber jederzeit möglich und verbessern die Variabilität nochmals erheblich).

Bei einer Realisierung im großtechnischen Maßstab sind aufgrund der unterschiedlichen Gegebenheiten in den Zementwerken hinsichtlich Rohstoffzusammensetzung und eingesetzten Brennstoffen auf jeden Fall Voruntersuchungen im Technikumsmassstab durchzuführen, um eine optimale Auslegung des Drehherdofens hinsichtlich Baugröße (Investitionskosten) und Betriebskosten zu erreichen.

¹² Kern, S.; Salzer, F.; Reinhold, H.: Breaking the mercury cycle for emission abatement with the “Ex-Mercury – Splitted Preheater System”. ZKG-Handbuch Zementanlagenbau 2016/2017; S. 120 – 129.

4.2.1 Größenabschätzung für ein Zementwerk

Die produzierte Gesamtmenge an Zementwerk-Abgas-Filterstaub aus einem E-Filter oder ggf. Schlauchfilter ist für die Drehherdofenauslegung nicht von Bedeutung, da nur der davon zu separierende und auszuschleusende, weil hoch quecksilber-angereicherte Anteil dieses Filterstaubes der Drehherdofen-Behandlung zuzuführen ist. Ausgeschleust wird vorwiegend im Direktbetrieb, wenn die Rohmehl - Mühle umfahren wird. Während dieser Zeit ist erfahrungsgemäß der gasförmige Hg-Gehalt am höchsten, so dass beim Abkühlen des Abgasstromes auch die höchste Anlagerung am Filterstaub stattfindet.

Wie viele Stunden am Tag ein Zementwerk im Direktbetrieb fahren muss, ist sehr unterschiedlich und hängt davon ab, um wieviel höher die Kapazität der Rohmühle gegenüber den Wärmetauschern (Zyklonen) und dem Drehrohrföfen ist. Die Leistung der Rohmühle ist immer höher, da sie „auf Vorrat ins Rohmehlsilo“ produziert, damit sie bei Bedarf gewartet oder repariert werden kann. So ergibt sich ein sehr individueller Betrag an Direktbetrieb für ein Zementwerk, der über alles in Deutschland gesehen zwischen etwa 5 % und 30 % der Gesamtlaufzeit des Zementofens liegt.

Der Drehherdofen sollte auf jeden Fall so ausgelegt werden, dass er kontinuierlich das ganze Jahr über durchläuft, wobei in der Regel eine jährliche durchschnittliche Gesamt-Betriebsstundenanzahl von 7.300 Stunden veranschlagt wird.

Der Mengenunterschied zwischen „Eintrittsmenge in den Drehherdofen“ gegenüber der größeren „Menge während der Phase der Ausschleusung“ kann durch Installation eines kleinen Zwischensilos kompensiert werden. Bei einer Skalierung für eine Großanlage setzen wir zurzeit eine Kapazität von 2 – 5 t/h an. Diese Größenordnung muss aber für ein einzelnes Zementwerk später überprüft, verifiziert und bei Bedarf angepasst werden.

4.3 Zusätzlicher prozesstechnischer Freiheitsgrad

Das Vorhandensein dieser individuellen Auslegungsoptionen unterscheidet sich damit auch prozesstechnisch vom bereits beschriebenen ExMercury-Prozess, der in die Klinkerproduktion integriert ist: Die Behandlungstemperatur kann hier im Gegensatz nicht variiert werden, weil Heißgas zur Behandlung an einer bestimmten Stelle abgenommen wird. Es gibt hier jedoch auch eine Möglichkeit, in den Prozess einzugreifen, indem der dem „Split-Preheater“ zugeführte Staubanteil und die Rauchgasmenge in gewissen Grenzen variiert werden können (gemäß der unter Fußnote 12 genannten Veröffentlichung beträgt der behandelte Staubanteil ca. 5 – 7 t/h bei einer entnommenen Abgasmenge von 3 % bis 5 % des Gesamt-Abgasstroms).

5 Bewertung der Ergebnisse

5.1 Projektübergreifende Beurteilung

Der während der Projektbearbeitung eingetretenen Ereignisse / Änderungsumstände musste insofern Rechnung getragen werden, als im Gegensatz zum ursprünglichen Projektprogramm ein Drehherdofen in Eigenregie geplant und gebaut werden musste. Ursprünglich war vorgesehen, die Versuche in einem Drehherdofen eines potenziellen Ofenherstellers in dessen

Technikum durchzuführen und das Schwergewicht auf die Versuche selbst zu legen, um möglichst viele Einzelergebnisse zu erzielen und bereits aus der Theorie und den Vorversuchen bekannte Zusammenhänge z: B. zwischen Temperatur und Verweilzeit vs. Wirkungsgrad der Hg-Reduktion lückenlos nachweisen und bestätigen zu können.

Aus den beschriebenen Gründen musste jedoch ein Teil der für die vorgesehenen Versuche einkalkulierten Aufwendungen (finanziell, zeitlich und bezogen auf Personaleinsatz) für die Planung, Fertigung und Inbetriebsetzung des „Eigenbau-Ofens“ aufgewendet werden, sodass die eigentlichen Hg-Austreibungsversuche nur noch reduziert ausgeführt werden konnten.

Generell ist in diesem Zusammenhang auszuführen, dass bezüglich der Ergebnisse der thermischen Behandlung des Filterstaubes keine abweichenden Ergebnisse im Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Verfahren oder aus Laborversuchen erzielt wurden, sondern dass durch die erwähnte notwendigen Modifikation bzw. Reduzierung des Projektschwerpunktes lediglich die geplante Anzahl an Versuchsergebnissen nicht wurde. Dass jedoch der Zusammenhang zwischen Behandlungstemperatur, Verweilzeit und Wirkungsgrad der Reduktion des Quecksilbergehaltes im Filterstaub quantitativ existiert – wie in den Vorversuchen und durch Versuche von Dritten ebenso gefunden – kann nachgewiesen und deshalb nicht bezweifelt werden.

Im Endeffekt muss deshalb das Gesamtergebnis des durchgeführten Projektes als positiv gewertet werden; es spricht für eine Weiterführung des Projektes.

Bei einer Weiterführung des Projektes ist zu differenzieren in

- c. die chemisch-physikalischen und prozessbezogenen Aspekte der Untersuchungen und die
- d. mechanischen und konstruktiven Gegebenheiten des Drehherdofens.

Während die chemisch-physikalischen Ergebnisse der thermischen Austreibung von Hg aus dem Filterstaub bestätigt wurden, als erfolgreich bezeichnet werden müssen und das Ergebnis lediglich durch die geringe Zahl an Versuchen quantitativ geschmälert wird, muss hinsichtlich der Konstruktion und technischen Ausführung des Drehherdofens nachgebessert werden, wie in Kapitel 5.3 beschrieben wird.

5.2 Ökologische Bewertung

5.2.1 Verminderung des Quecksilbergehaltes im Rohmehl/Filterstaub

Für eine ökologische Bewertung des Verfahrens sind vorwiegend die Ergebnisse aus der thermischen Behandlung des Filterstaubes zu betrachten. Auch bei einer verminderten Anzahl an Versuchsergebnissen gegenüber der ursprünglichen Planung lässt sich zuverlässig ableiten, dass eine Reduktion von ca. 30 % bis zu ca. 90 % des im Filterstaub vorhandenen Quecksilbers bei Temperaturen zwischen 150 °C bis ca. 300 °C erreicht werden kann, wie in Kapitel 4 bereits dargestellt. Diese Menge an Quecksilber wird irreversibel aus dem Zementprozess entfernt und einer separaten Behandlung (z.B. Wiederaufbereitung und weitere Verwendung) zugeführt.

Gleichzeitig kann damit das Zementrohmehl unmittelbar nach der thermischen Behandlung wieder in der Produktionskreislauf zurückgeführt werden und steht als Rohstoff zur Verfügung:

5.2.2 Ressourcen- und Energieeffizienz

Die ökologische Bewertung hinsichtlich der Ressourcen- und Energieeffizienz lässt sich am besten mit einem Beispiel aus der deutschen Zementproduktion darstellen:

Ein namentlich nicht genanntes Zementwerk in NRW produziert eine Stundenmenge an Zementklinker von ca. 150 Tonnen. Dies erfordert eine Menge an eingehendem Rohmehl von ca. 300 t/h. Dabei werden, um den Quecksilberhaushalt im System stabil zu halten, ca. 3 t/h Mehl abgezogen, dies ergibt bei einer Jahresbetriebszeit von 7.300 h ca. 36.000 t eingespartes Rohmehl.

Die gleichzeitige Steigerung der Energieeffizienz lässt sich grob wie folgt abschätzen.

Die Vermahlung des aus der Lagerstätte kommenden und vorgebrochenen Materials benötigt auf der Grundlage der vorhandenen Maschinenausrüstung im Durchschnitt 25 kWh/t Rohmehl, dies ist ein gemittelter Wert, der sich aus dem Einsatz unterschiedlicher Mühlenaggregate mit verschiedenen spezifischen Energieverbräuchen ergibt.

Danach darf ein jährlicher Energiebedarf wie folgt angenommen werden:

$5 \text{ t/h} * 7300 \text{ h} * 25 \text{ kWh/t} \sim 913 \text{ MWh}$. Mit Hilfe des spezifischen CO_2 – Faktors für Inlandsstrom von derzeit 0.435 ergibt sich somit eine geschätzte Einsparung von etwa 397 t CO_2 . (Die benötigte Energie für das Sprengen, Brechen und logistische Aktivitäten wurde noch nicht mitbetrachtet).

Je nach Beladung des Filterstaubes ist der Einspareffekt höher oder niedriger.

Nicht im Programm dieses Projektes vorgesehen, jedoch insgesamt geplant ist der Einsatz erneuerbarer Energie zur Behandlung des beladenen Filterstaubes, was im Zementwerk von morgen ohnehin bereits vorgesehen ist im Zuge des Erreichens einer klimaneutralen Zementproduktion insgesamt. In dieses System – dargestellt in nachfolgender Abbildung – soll das Verfahren zur Quecksilberabscheidung integriert werden:

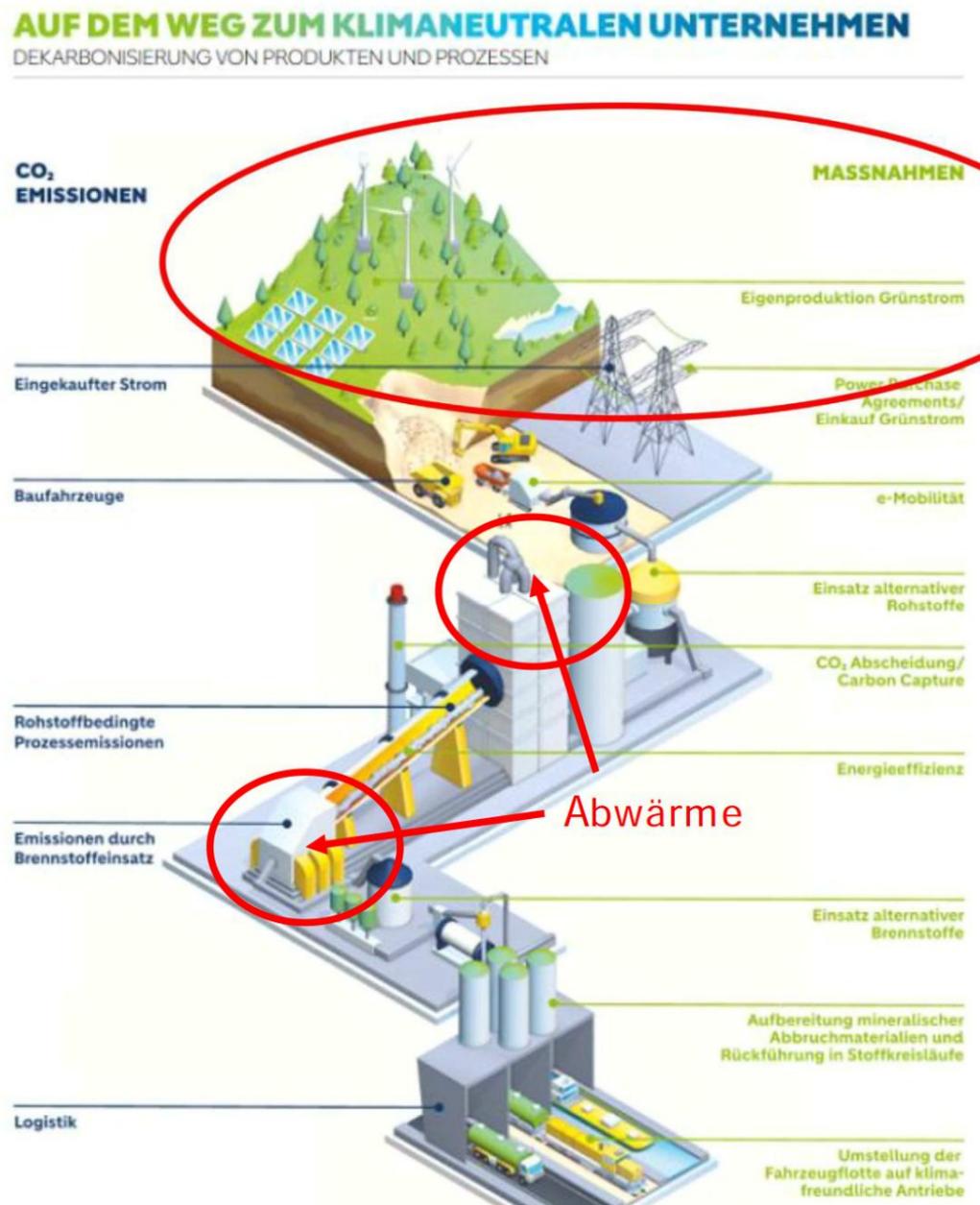


Abbildung 12: Nutzung regenerativer Energie (Ellipsen) im Zementwerk von morgen.¹³

5.3 Technische Bewertung

Prinzipiell kann konstatiert werden, dass das System „Drehherdofen“ sowohl maschinentechnisch, hinsichtlich der notwendigen Baugröße und auch vom Funktionsprinzip her geeignet ist, die vorgesehene Aufgabenstellung zu erfüllen.

5.3.1 Concept Design

Vor der Auslegung einer Anlage, die an ein Zementwerk anzuschließen ist, müssen einige Vorüberlegungen und Festlegungen getroffen werden, die in der nachfolgenden Tabelle als „Design Base“ aufgeführt sind. Dabei handelt es sich um Angaben aus einem realistischen Anwendungsfall eines deutschen Zementwerke mittlerer Größe.

Da die einzelnen Zementwerke standortbedingt unterschiedliche Ausschleuszeiten und auszuschießende Mengen für Filterstaub aufweisen, ist jeweils im Anwendungsfall eine Einzelfallbetrachtung und -auslegung erforderlich.

¹³ Quelle: HOLCIM

Tabelle 6: Betriebsdaten zur Auslegung eines Drehherdofens, Beispiel

Basisdaten Beispiel	
spez. RG-Vol.-Strom \varnothing in m ³ / t Klinker	2.200,00
RG-Vol.-Strom pro Stunde	210.833,33
Staubgehalt nach Zyklon \varnothing ; g / m ³	150,00
Staubgehalt im spez. RG-Vol.-Strom, g	330.000,00
Staubgehalt im spez. RG-Vol.-Strom, t	0,33
Tagesproduktion, t/d	2.300,00
Klinkerproduktion pro Stunde	95,83
Bypass: Gas zur Behandlung von Hg 5 % vom RG-Vol.-Strom, pro Stunde, in m ³	10.541,67
Staubgehalt zu behandeln, pro Stunde, g	1.581.250,00
Staubgehalt zu behandeln, t pro Stunde,	1,58
Staubgehalt zu behandeln, t pro Tag,	37,95
Auslegung für Investition in t/h Durchsatz	3,00
Durchmesser Ofen ca. m	4,00

5.3.1.1 Hauptkomponenten, Bewertung der Beschaffung, technische Optimierung

Nachfolgend werden zusammengefasst Aspekte der Beschaffungsmöglichkeiten für die einzelnen Hauptkomponenten bewertet, da dies von Wichtigkeit ist hinsichtlich der weiteren Planungsarbeiten für eine Anlage, die großtechnisch eingesetzt werden könnte.

Der Drehherdofen wurde für dieses Projekt in Eigenfertigung hergestellt, da zur Zeit der Notwendigkeit für eine Fertigung keine der bekannten Ofenhersteller verfügbar waren. Die Fertigung des Ofens ist die am längsten dauernde Aktivität und kann mit min. 10 Monaten veranschlagt werden.

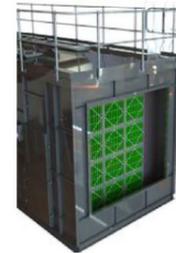
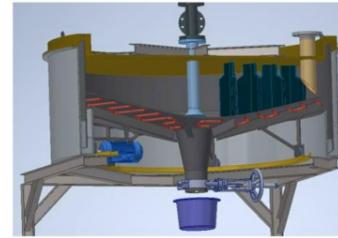
Allerdings wurden während der Inbetriebnahme und auch während der Versuche technische Mängel festgestellt, die eine konstruktive Überarbeitung des Ofens erforderlich machen. Nach einer technischen Modifikation sind noch einmal systematische Versuche durchzuführen, die insbesondere die Betriebssicherheit und Betriebszuverlässigkeit des Drehrohrofens verbessern sollen; im Einzelnen

- Optimierung des Neigungswinkels des Drehtellers (Optimierung Staubtransport)
- Vergrößerung des Wasserbades zur Abdichtung (Dimensionierung)
- Geometrie der Schaufeln kann verbessert werden
- Staubaustrag muss staubdicht gekapselt werden (Ohnehin vorgesehen für großtechnische Anlage)
- Optimierung der Elektroheizung bzw. alternative Heizung

Die weiteren in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Hauptkomponenten sind auf dem freien Markt verfügbar und stellen kein Beschaffungsproblem dar, sodass die Zeitdauer für ein technisches Projekt, beginnend mit dem Engineering nach Auslegung bis zur Inbetriebsetzung, mit ca. 18 Monaten veranschlagt werden kann.

Hauptkomponenten

- Drehherdofen
- Saugzuggebläse
- Aktivkohle-Filter
- Kühlfalle/Quenche
- Leitung für Spülgas und Abgas
- Staubzuleitung und -aufgabe
- Staubrückführung: Transportmittel + Leitung + Aufgabe



Betriebsmittel

- Spülgas (Umgebungsluft)
- Aktivkohle
- Energie (vorzugsweise Abwärme und reg. elektrische Energie)

Abbildung 13: Übersicht über die Hauptkomponenten



Abbildung 14: Anlagenausschnitt: Abgasleitung und -messung

5.4 Ökonomische Bewertung

Generell befasst sich eine ökonomische Bewertung mit der Analyse und Beurteilung von wirtschaftlichen Projekten, um deren Rentabilität und Effizienz festzustellen. Für den vorliegenden Fall wurde ebenfalls versucht, diese Vorgehensweise anzuwenden, wobei jedoch eine Reihe von Parametern, die die Gesamt-Wirtschaftlichkeit des Projektes nicht abschätzbar hoch

beeinflussen, nicht einmal ansatzweise abzuschätzen sind und somit nur qualitativ hervorgehoben werden können und auf deren hohen Einfluss hingewiesen werden kann.

Gut abschätzbar in dieser Betrachtungsweise sind dabei natürlicherweise die Investitions- und Betriebskosten des Verfahrens („CAPEX“, „OPEX“) sowie „eingesparte Ressourcen“, wie z.B. energetische, stoffliche (Rohmaterial) und finanzielle Ressourcen.

Was in dieser Betrachtungsweise an finanzieller Einsparung nicht abgeschätzt werden kann, jedoch von unschätzbare Bedeutung ist, sind die eingesparten Kosten durch Vermeidung von Gesundheitsschäden an Mensch und Tier, wobei nicht nur ärztliche Behandlungskosten, sondern auch der Kostenfaktor durch verlorene Arbeitstage und weiterer sekundärer Folgeerscheinungen zu berücksichtigen ist.

Bei Beschränkung auf Investitions- und Betriebskosten lassen sich die nachfolgenden Abschätzungen machen:

Als Beispiel wird ein für deutsche Verhältnisse ein Zementwerk mit „kleiner bis mittlerer Tageskapazität“ an produziertem Zementklinker von etwa 2.300 Tonnen benutzt, wobei ein Rauchgasvolumenstrom von ca. 215.000 Nm³/h zugrunde gelegt wird. Dies ist deshalb erforderlich, weil bei einer vergleichenden Betrachtung des in diesem Projekt vorgestellten Verfahrens ein bereits bestehendes Verfahren gewählt werden muss, das bereits großtechnisch schon zweimal installiert wurde. Weitere Verfahren zur Austreibung von Hg aus dem Zementprozess sind derzeit großtechnisch nicht verfügbar¹⁴. Da das zum Vergleich herangezogene Verfahren direkt im Gasstrom des Zementklinker-Produktionsprozesses installiert werden muss und jeweils ein Teilstrom des Abgases behandelt wird, ist die Kenntnis vom Gesamt-Rauchgasvolumenstrom erforderlich. Dies trifft für das in diesem Projekt vorgestellte Verfahren nicht zu.

5.4.1 Investitionskosten

Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Vergleich der beiden Verfahren hinsichtlich der Investitionskosten, wobei das in diesem Projekt vorgestellte ca. 50 % weniger Kosten verursacht, die wie folgt begründet werden können:

- Verzicht auf einen sehr kostenintensiven Heißgasfilter aus Keramik
- Geringe Stahlbaukosten, weil der Drehherdofen ebenerdig installiert werden kann
- Der Drehherdofen kann an die auszuschleusende Jahresmenge an Filterstaub angepasst werden, indem er für dieselbe Laufzeit ausgelegt wird, wie auch der Drehrohrföfen zur Klinkerherstellung läuft; dadurch ist eine sehr kompakte Bauweise möglich. Der Ofen kann im kontinuierlichen Betrieb gefahren werden; zusätzlich kann das „Puffer-silo“ für aus dem Staubfilter ausgetragenes Rohmehl, so großzügig ausgelegt werden, dass der Drehherdofen auch dann weiterlaufen kann, wenn im Werk unvorhergesehene Kurzstillstände des Ofenbetriebs eintreten sollten.
- Deutlich geringere Montagekosten, da die Montage nicht zwingend in größerer Höhe stattfinden muss.

¹⁴ Siehe hierzu auch Kapitel 2.2.2 „Innovative Verfahren – Vergleich“

Tabelle 7: Investitionskosten des SE - Verfahrens im Vergleich

SE Lieferumfang	EURO	Alternatives Verfahren Lieferumfang
Drehherdofen 4 m Ø	500.000	nicht im System erforderlich
Staubtransport Zuführung / Rückführung 80 m plus Dosierung	250.000	Becherwerk + Dosierung, 80 - 120 m
Isolierung gesamt	40.000	
nicht erforderlich		
Elektrik	20.000	Split Preheater
MSR	200.000	
nicht erforderlich		
Stahlbau 12 t	50.000	
Fundament	40.000	
Saugzug	15.000	
Zwischensilo/Hopper	50.000	
Reingaskanal bis Rückführpunkt	15.000	
Gaskühlung,	20.000	Water Cooling System, Additive Dosierung,
Kohlefilter	15.000	Bag Filter
Behälter, diverse	40.000	---
Montage 20 %	289.000	Montage
Summe	1.544.000	
Summe Prozent	ca. 50	100

5.4.2 Prozessparameter, spezifische Verbräuche

Zur Abschätzung der Betriebskosten ist der Bedarf für die Parameter Energie für den Heizbetrieb und Energie für den Betrieb der Anlage (Gebläse, Staubtransport und Dosierung, etc.) sowie für die Aktivkohle zu betrachten.

Der Betrag für den Bedarf an Betriebsmitteln hängt natürlich ab von der Art der Betriebsweise in Verbindung mit dem jeweils erreichten Abscheidegrad, also im Wesentlichen von der gefahrenen Behandlungstemperatur sowie der Verweilzeit eines Staubteilchens im Drehherdofen. Das wiederum bedeutet, dass die Kosten für thermische und elektrische Energie den größten Anteil ausmachen und die Kosten für Staubtransport und Gebläsebetrieb als Konstante addiert werden dürfen, da sie die Gesamt-Betriebskosten nur unerheblich beeinflussen und bei der Abschätzung in diesem Projektstadium noch nicht detaillierter betrachtet werden müssen.

Die folgenden Angaben können deshalb nur beispielhaft sein und sind später für den jeweiligen betrachteten Standort entsprechend den betrieblichen Randbedingungen zu errechnen.

Von der im Projektverlauf betriebenen Reinigungsanlage wurde hochskaliert auf eine Werksgröße wie eingangs dieses Kapitels beschrieben. Dabei wird eine mittlere Jahresbetriebsdauer von 7.300 Stunden angenommen, dies ergibt eine Jahresklinkerproduktion von rund 700.000 Tonnen Zementklinker. Daraus ergeben sich folgende geschätzten Betriebszahlen:

Tabelle 8: Spezifische Verbrauchswerte zur Behandlung von Filterstaub

Position "Verbrauch"	Dimension	Wert
Spez. Energiebedarf el.	kWh/t Klinker	< 1
Therm. Energiebedarf Hg-Behandlung	kWh/t Klinker	< 28
Bromierte Aktivkohle	g / t Klinker	< 3

5.5 Genehmigungsrechtliche Aspekte

Die genehmigungsrechtlichen Randbedingungen wurden in dieser Phase noch nicht bis ins Detail untersucht, nachdem klar geworden war, dass das Projektziel durch eine notwendige Eigenfertigung des Drehherdofens neu auszurichten war.

Folgendes lässt sich jedoch bereits aktuell feststellen:

Durch das neue Verfahren wird im Zementwerk selbst keine neue Emissionsquelle erzeugt, da das behandelte Rauchgas nach Durchlauf durch das Aktivkohlefilter direkt in den Klinkerproduktionsprozess an geeigneter Stelle zurückgeführt wird. Es liegt also ein geschlossener Kreislauf vor.

Damit kann eine, wie beschriebene Anlage in der Form einer „wesentlichen Änderung“ genehmigungsrechtlich behandelt werden. Eine UVP ist nicht erforderlich.

6 Weiterführung des Vorhabens – nächste Projektschritte

Das Gesamtergebnis des durchgeführten Projektes ist insgesamt so positiv einzustufen, dass die Entwicklung des Verfahrens weiter fortgeführt werden soll. Allerdings sind durch die eingetretenen unvorhersehbaren Ereignisse und die damit verbundene Neuausrichtung des Projektes zunächst weitere Untersuchungen durchzuführen, um die technische Reife für dieses Verfahren zu erreichen:

6.1 Optimierung im Technikumsstabsstab

Die Drehherdofenanlage ist im nächsten Schritt hinsichtlich der Konstruktion in einigen Bereichen noch einmal zu überarbeiten und zu testen. Dies betrifft namentlich die Komponenten, die bereits unter 5.3.1.1 beschrieben wurden

Eine weitere Versuchskampagne ist im Technikumsstabsstab im Hinblick auf die Prozessparameter „Behandlungstemperatur“ und „Verweilzeit“ durchzuführen, um bisher nicht getestete Bereiche der Temperatur ($> 300^{\circ}\text{C}$) und Verweilzeit (> 30 Minuten; < 20 Minuten) aufzunehmen und damit die Flexibilität für eine spätere Auslegung zu erhöhen. Gleichzeitig sollte versucht werden, Rohmehlqualitäten aus diversen Zementwerke zu testen.

Geplante Zeitdauer: 12 Monate

6.2 Versuche im Zementwerk

Die dem unter 6.1 beschriebenen Projektschritt folgenden Aktivitäten sind Behandlungsversuche mit der bestehenden Technikumsanlage in einem Zementwerk, um die Anlage für den täglichen Betrieb zu testen; insbesondere soll die Eignung in Hinsicht auf

- Funktionssicherheit
- Freundlichkeit gegenüber Wartung, Instandhaltung und Reparatur
- Schwankende Stoffströme

geprüft und bei Bedarf angepasst werden.

Des Weiteren muss die Anlage mess- und regeltechnisch angebunden und in der zentralen Warte integriert werden, damit sie nach Möglichkeit ohne zusätzlichen Personalaufwand betrieben werden kann.

Geplante Zeitdauer: 12 Monate

Danach soll das Verfahren seine betriebliche Eignung nachgewiesen haben und bereit sein für eine künftige großtechnische Anwendung.