BMU - Umweltinnovationsprogramm

Abschlussbericht

zum Vorhaben:

Hochwertige Verwertung von Gipsfaserabfallstoffen durch energieeffiziente Umwandlung von Calciumsulfat-alpha-Halbhydrat

Aktenzeichen: NKa3 - 002038

Fördernehmer/-in:

Lindner AG

Umweltbereich

Laufzeit des Vorhabens

17.07.2013 – 30.11.2014

Autoren

Dr. Winfried Aschern

Dr. Dieter Pietzsch

Gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Datum der Erstellung

Oktober 2015

Berichtskennblatt

Aktenzeichen: NKa3 - 002038	**Vorhaben-Nr.:** 20261
Titel des Vorhabens: Hochwertige Verwertung von Gipsfaserabfallstoffen durch energieeffiziente Umwandlung von Calciumsulfat-alpha-Halbhydrat	
Autor(en); Name(n); Vorname(n) Aschern, Winfried Pietzsch, Dieter	**Vorhabensbeginn:** 17.07.2013
	Vorhabensende **(Abschlussdatum):** 30.11.2014
Fördernehmer/-in (Name, Anschrift) Lindner AG	**Veröffentlichungsdatum:** 30.11.2015
	Seitenzahl: 74
Gefördert im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms des Bundesumweltministeriums	

Kurzfassung / Summary

Die Lindner AG produziert am Standort in Dettelbach Gipsfaserplatten für Doppel- und Hohlraumböden, Trockenestriche und weitere Trockenbauprodukte.
Bei der Produktion fallen jährlich bis ca. 22.000 Tonnen an staubförmigen Gipsfaserabfallstoffen (Schleif- und Frässtäube), Gipsfaserplattenabfällen sowie Gipsschlämmen an. Diese Abfallprodukte waren in der Produktion bislang nicht verwertbar und mussten auf Deponien entsorgt werden. Mit der im Rahmen dieses Vorhabens gebauten Anlage ist es möglich, die Abfälle energieeffizient in ein reaktives Bindemittel (Calciumsulfat-alpha-Halbhydrat) umzuwandeln und vollständig in den Produktionsprozess zurückzuführen.
Dazu wird aus den Abfallstoffen in einem mehrstufigen Batchverfahren eine Suspension hergestellt, auf ca. 120°C aufgeheizt und nach Umwandlung zu Calciumsulfat-alpha-Halbhydrat mit dem gewünschten Kristallhabitus wieder auf Verarbeitungstemperatur gekühlt und gelagert. Die so erzeugte Suspension wird mit weiteren Rohstoffen gemischt und zu Gipsfaserplatten verarbeitet.
Durch das neue Verfahren müssen die Abfälle nicht mehr deponiert werden und gleichzeitig wird bisher zugekaufter Primärrohstoff hochwertig substituiert. Dabei werden in einem ersten Schritt die staubförmigen Abfälle verwertet, später die übrigen Abfälle ergänzt. Durch die Verwertung der Abfälle mit dem energiesparenden integrierten Verfahren zusammen mit der Energierückgewinnung aus Abwärme kann unter Berücksichtigung der Einsparung eines Teiles der bisherigen Primärrohstoffe eine CO_2-Minderung von ca. 2.500 Tonnen pro Jahr realisiert werden.

Schlagwörter

Anzahl der gelieferten Berichte: Papierform: 5 Elektronische Datenträger: 1	**Sonstige Medien:** Veröffentlichung im Internet geplant auf der Homepage: www.umweltinnovationsprogramm.de

Kurzfassung

(1) Beschreibung

Bei der Herstellung von Gipsfaserplatten fallen Abfälle an, die bisher entsorgt werden müssen. Die Aufgabenstellung besteht darin, diese Abfälle so aufzubereiten, dass daraus wieder ein Rohstoff entsteht, der für die Produktion der Platten eingesetzt werden kann, um einen geschlossenen Stoffkreislauf zu erreichen. Die betrachteten Abfälle liegen sowohl als staubförmiges Material als auch in Form von großformatigen Platten vor. Zusätzlich fällt Sediment aus der Reinigung von Kreislaufwasser als Nassabfall an.
Das Vorhaben zielt darauf ab, eine Anlagentechnik zu installieren, mit der diese Abfälle in ein reaktives Material umgewandelt und in die Plattenproduktion zurückgeführt werden. Dafür werden die Abfälle in einem nassen Verfahren, das als mehrstufiges Batch-Verfahren aufgebaut ist, zu reaktivem Gips umgewandelt. Die Inbetriebnahme der Anlage soll zunächst mit den staubförmigen Abfällen durchgeführt werden. Mit dem Betrieb einer derartigen Anlage wird erreicht, dass die Materialeffizienz gesteigert wird. Dadurch wird die CO_2-Belastung der Umwelt verringert. Für die Umwandlung der Abfälle zu reaktivem Gips wurde ein energieoptimiertes Verfahren entwickelt, mit dem der Primärenergiebedarf für die Herstellung des Gipses deutlich reduziert wird, verglichen mit den Standard-Kalzinierverfahren. Mit der Rückführung der Abfälle wird herkömmlicher Rohstoff (Stuckgips oder α-HH auf Basis von REA-Gips) eingespart.

(2) Anwendbarkeit der Technik

Um einen abbindefähigen Gips herzustellen, wird entweder Naturgips (Gipsstein) oder REA-Gips kalziniert. Die Besonderheit des hier betrachteten Verfahrens ist, dass Abfälle kalziniert werden, bei denen eine deutlich geringere Reinheit vorliegt und bei denen das Material Zellulosefasern enthält, die bei der Verfahrensführung berücksichtigt werden müssen. Das Vorhaben schafft die Möglichkeit, unterschiedliche gipsbasierte Abfälle zu kalzinieren und in den Produktionsprozess für Gipsfaserplatten zurückzuführen.
Das Verfahren kann überall dort eingesetzt werden, wo Gipsabfälle (abgebundener Gips) zu reaktivem Material umgewandelt werden sollen. Voraussetzung dafür ist, dass die Abfälle so zerkleinert werden, dass damit eine Suspension hergestellt werden kann. Die Eigenschaften der Gipssuspension können durch Zusatz von REA-Gips oder anderen Gipsrohstoffen (z.B. Abfälle aus Gipskartonplattenrecycling bzw. aus der Gipskartonplattenverarbeitung) gezielt eingestellt werden.

Ideal für die Anwendung des Verfahrens ist ein Produktionsprozess, bei dem mit der reaktiven Gipssuspension ein Produkt hergestellt wird, z. B. bei der Herstellung von Vollgipsplatten oder Gipskartonplatten. In Fällen, bei denen nur trockener, pulverförmiger Gips verarbeitet werden kann, muss das Verfahren um die Prozessschritte Filtration und Trocknung erweitert werden.

(3) Wesentliche Vorteile für die Umwelt

Durch die Installation und den Betrieb der Anlage können alle am Standort anfallenden Abfälle, die bisher entsorgt werden müssen, verwertet werden. Im ersten Schritt werden die anfallenden Gipsfaserstäube verwertet, später die übrigen Abfälle.
Das sind bis zu 22.000 t Gips- und Gipsfaserabfälle, woraus ca. 18.400 t hochwertiger, abbindefähiger Gipsfaserrohstoff erzeugt wird (alpha-Halbhydrat).
Dadurch wird Primärrohstoff substituiert (Stuckgips, Fasern und alpha-Halbhydrat).
Das Recycling-Verfahren ist mit einem realen thermischen Energiebedarf von 186 kWh/t Produkt sehr energieeffizient.
Der thermische Energiebedarf zur Erzeugung des Primärrohstoffes ist wesentlich höher (thermischer Energiebedarf für alpha-Halbhydrat: 646 kWh/t nach [PEI 07]).
Die Vorteile für die Umwelt sind eine Verringerung der CO_2-Belastung um ca. 1.800 Tonnen CO_2 basierend auf dem thermischen Einsparpotenzial des Herstellprozesses verglichen mit herkömmlichen Verfahren zur Herstellung von alpha-Halbhydrat und der zusätzlichen Einsparung von Energie bei Nebenprozessen. Weitere 715 Tonnen CO_2 pro Jahr werden aufgrund reduzierter Lkw-Transporte eingespart.
Da Deponieraum für gipsbasierte Abfälle sehr knapp ist, liegt die Umweltrelevanz des Vorhabens auch auf der Entlastung von Deponieraum.

(4) Umwelt- und medienübergreifende Aspekte

Für die Umwandlung der abgebundenen Abfälle in ein reaktives Material wird thermische Energie in Form von Sattdampf benötigt. Der Sattdampf wird mit einem gasbefeuerten Dampfkessel erzeugt. Das benötigte Wasser wird aus einem werkseigenen Brunnen entnommen und entsprechend aufbereitet. Der Wasserbedarf wird nicht erhöht, da die für den gesamten Produktionsprozess erforderliche Wassermenge gleich bleibt. Wasser, das für das Abbinden und die Trocknung der Gipsfaserplatten ansonsten über Brunnenwasser ergänzt werden muss, wird jetzt über den kondensierenden Sattdampf gedeckt. Dadurch, dass der Gasverbrauch geringer ist als bei den herkömmlichen Verfahren zur

Gipserzeugung, wirkt sich weniger verbrauchtes Erdgas positiv auf die Abgasemissionen und damit auf die Umwelt aus.

(5) Kostendaten

Die Investitionskosten für die Anlage betrugen ca. 2,7 Mio. EUR. Die Energiekosten liegen bei ca. 4,3 EUR/t Produkt für die elektrische Energie und ca. 7,2 EUR/t für die thermische Energie. Die spezifische Energieeinsparung für die thermische Energie liegt bei ca. 460 kWh pro Tonne Produkt, verglichen mit herkömmlichen Verfahren zur Herstellung von alpha-Halbhydrat. Dadurch werden im Vergleich mit herkömmlichen Verfahren zur Herstellung von pulverförmigem alpha-Halbhydrat ca. 18 EUR/t pro Tonne Produkt an Kosten für die thermische Energie eingespart.
Weitere Angaben sind im Kapitel 3.5 enthalten.

(6) Sonstige Betriebsdaten

Um das hergestellte alpha-Halbhydrat in den Produktionsprozess zurückführen zu können, müssen die Rezepturen für die Gipsfaserplatten angepasst werden. Damit die Produktivität und die Plattenqualität erhalten bleiben, müssen das Entwässerungsverhalten der Nassmischung und die Entwässerungszeit entsprechend eingestellt werden. Weitere Eingriffe in den bestehenden Produktionsprozess sind notwendig, um die staubförmigen Abfälle in die Anlage zu dosieren, um die erforderliche thermische Energie bereitzustellen und um vorhandene Abwärme nutzbar zu machen.

Kurzfassung / Summary

(1) Description

The production of gypsum fibreboards causes different types of waste, i.e. such as dust coming from the sanding or milling of the panels, spoilt panels or wet waste, which had to be disposed in the past. The task was to treat all the waste in a way, that a new raw material could be created which could be used directly for the production of the panels in order to achieve a closed material cycle. The examined waste exists as dust-like material as well as large-size panels. Additionally wet waste, coming from the cleaning of the filtrate, has to be treated.

The aim of the project is to install a technical equipment to convert this waste material into a reactive material which can be used directly within the production process. Using a wet process, which is built up as a multi-stage batch-process, all types of waste are converted into plaster. The commissioning of this system should be started at first only with the dust-like waste. Running such a plant will increase the material efficiency and therefore reducing the CO_2-impact to the environment. For the conversion of the waste into plaster an energy-optimised process was developed which significantly reduces the primary energy consumption, compared to the standard calcining process. With the recycling and recirculation of the waste material, conventional raw material (stucco) or plaster based on flue gas desulphurisation gypsum, can be saved.

(2) Applicability

To produce plaster, either natural gypsum or FGD-gypsum can be calcined. The speciality of the process considered herein, where waste with significantly less purity and containing cellulose fibres is calcined, is the fact, that these parameters have to be considered in terms of the process technology. This project creates the option to calcine different types of gypsum based waste and put them back into the production process for gypsum fibre panels.

The process can be used universally where gypsum based waste should be converted into reactive material. It is required, that the waste is milled to a particle size, so that it is possible to prepare slurry. The properties of the gypsum slurry can be specifically adjusted by adding FGD-gypsum or other gypsum-based waste material, i.e. waste coming from the recycling of plasterboard respectively coming from the processing of plasterboard. The best case for using this procedure is a production process which needs a gypsum slurry to

create the product, i.e. the production of plasterboard. In cases where only dried and pulverised plaster can be processed, the procedure has to be expended by steps like filtration and drying.

(3) Main environmental benefits, main achieved emission levels

By means of installing and running such a plant, all types of gypsum-based waste emerging during production can be fully exploited instead of the previous disposal of the material. In a first step the emerging dust-like waste will be converted into plaster, subsequently all the waste. These are up to 22.000 tons of gypsum- and gypsum-fibre waste from which about 18.400 tons of high-quality plaster (alpha-semihydrate) will be produced.
As a result primary raw material (stucco, fibres and alpha-semihydrate) will be replaced. This recycling process, with a physical thermal energy consumption of 186 kWh/t of product, is very energy-efficient. The thermal energy consumption for producing stucco is significantly higher, i.e. for alpha-semihydrate: 646 kWh/t product, according to [PEI 07]. The advantages for the environment are the reduction of the CO_2-impact by approximately 1.800 tons CO_2 per year, based on the thermal saving potential of the production process compared to the conventional process for producing alpha-semihydrate and the additional energy saving by reducing process steps. Additional 715 tons of CO_2 per year can be saved due to less truck transports. Because of barely enough landfill capacities, the impact on the environment is also to relief the disposal sites.

(4) Cross-media aspects

For the conversion of the waste material into reactive material thermal energy in the form of saturated steam is needed. The saturated steam is produced by a gas-heated steam generator. The required water comes from a plant`s own spring. This water has to be processed appropriately. The demand for water will not be increased because the water demand for the whole production process will stay on the same level. Water, which is needed for the setting and drying of the gypsum fibre panels and normally comes from the spring, now comes from the condensate of the saturated steam. Thus the gas consumption is lower as compared with conventional processes for calcining of stucco, there also is a positive effect on the environment because of the reduced amount of exhaust gas.

(5) Economics

The investment costs for the plant add up to approximately 2.700.000 EUR. The energy costs amount to 4,3 EUR/ton of product for electrical energy and 7,2 EUR/ton of product for thermal energy. The specific energy saving for the thermal energy amounts to 460 kWh/tons of product, compared to conventional processes for producing alpha-hemihydrate. Thus, compared to conventional processes for producing powdery alpha-hemihydrate, the savings for energy add up to 18 EUR/ton of product. More details are included in chapter 3.5.

(6) Operational Data

To get the produced alpha-semihydrate-slurry back into the production process the general recipe for the gypsum fibre panels have to be adjusted. To maintain the productivity and panel quality, the dewatering behaviour of the (new) wet mix and the time for dewatering have to be justified adjusted accordingly. Further interventions have to be made to the existing production process in order to get a good metering of the waste material into the process, to provide the required thermal energy and to utilize the existing waste heat.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 10

1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens 10

1.2 Ausgangssituation 11

2 Vorhabensumsetzung 15

2.1 Ziel des Vorhabens 15

2.2 Darstellung der technischen Lösung 15

2.3 Darstellung der Umsetzung des Vorhabens 20

2.4 Behördliche Anforderungen 48

2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten 48

3 Ergebnisse 49

3.1 Bewertung der Vorhabensdurchführung 49

3.2 Stoff- und Energiebilanz 50

3.3 Umweltbilanz 53

3.4 Konzeption, Durchführung und Ergebnisse des Messprogramms 55

3.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse 64

3.6 Technischer Vergleich zu konventionellem Verfahren 67

4 Literatur 71

5 Abkürzungsverzeichnis 72

6 Abbildungsverzeichnis 73

7 Tabellenverzeichnis 74

1 Einleitung

1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens

Die Lindner Group ist Europas führender Spezialist in den Bereichen Innenausbau, Fassadenbau und Isoliertechnik. Das Familienunternehmen verfügt über 50 Jahre Erfahrung im „Bauen mit neuen Lösungen“, der Entwicklung und Ausführung von individuellen und fortschrittlichen Projektlösungen. Mit weltweit über 6.000 Mitarbeitern betreibt Lindner vom bayerischen Arnstorf aus Produktionsstätten und Tochtergesellschaften in mehr als 20 Ländern.
Innerhalb der Lindner Group werden am Standort Dettelbach ausschließlich Gipsfaserplatten hergestellt. Die Fertigungstiefe reicht von Schalungselementen für Hohlböden über Roh-, Industrie- und Trockenbauplatten für die Weiterverarbeitung bis hin zu fertig konfektionierten und applizierten Platten für Doppelböden.

Bild 1.1: Produktionsstandort in Dettelbach

1.2 Ausgangssituation

Am Standort Dettelbach werden Gipsfaserplatten nach dem Nassverfahren produziert. Dies bedeutet, dass aus dem pulverförmigen Gips und einer Zellulosepulpe eine Nassmischung hergestellt wird, die zu Platten geformt, entwässert und getrocknet wird (siehe Ablaufschema).

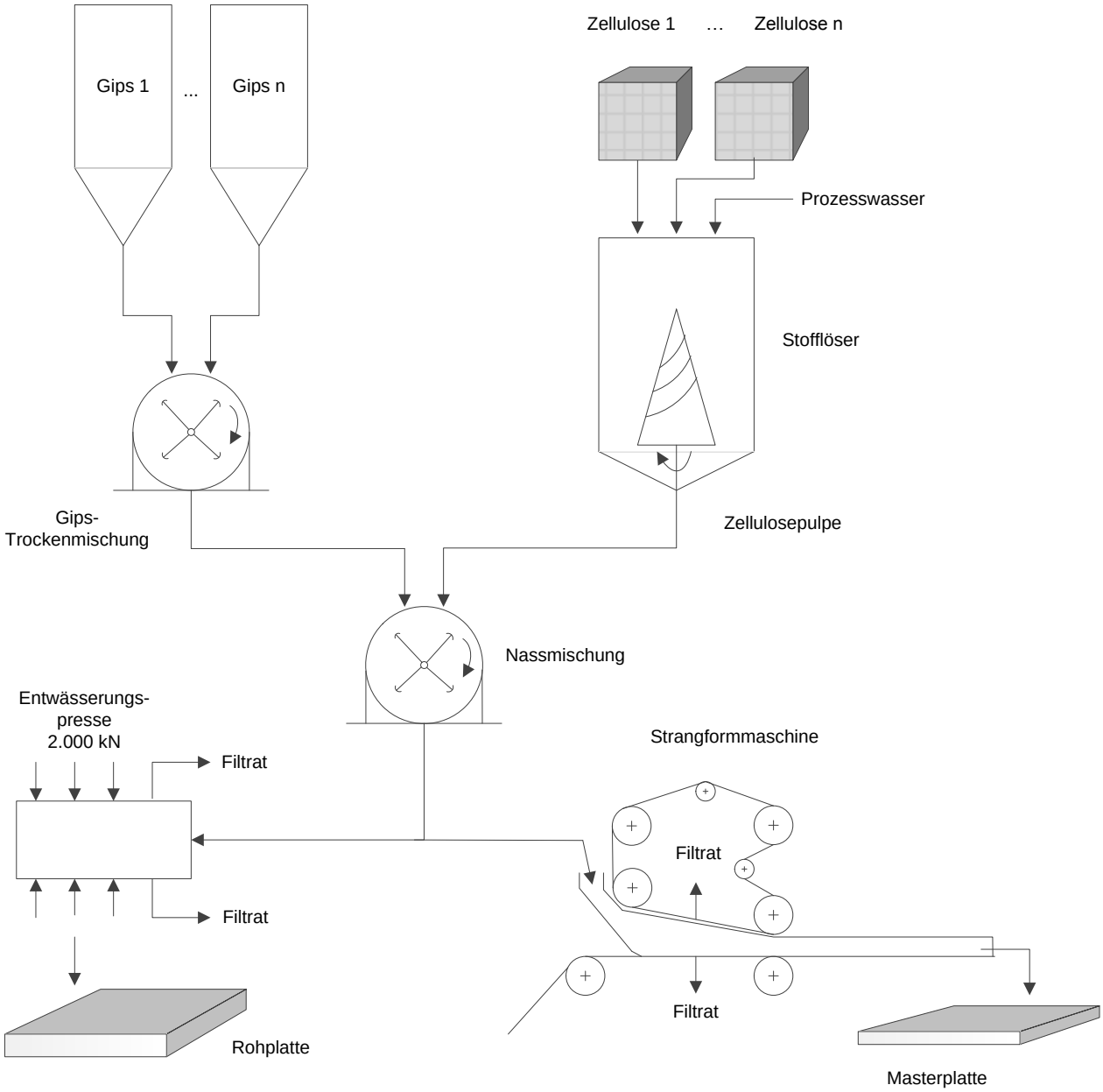

Bild 1.2: Ablaufschema der Gipsfaserplattenproduktion

Der verwendete Gips basiert auf entsprechend aufbereitetem REA-Gips, als Fasern werden Zellulosefasern aus Recycling-Papieren eingesetzt. Das für den Prozess erforderliche Wasser wird aus einem werkseigenen Brunnen entnommen.
Die durch die Produktion der Gipsfaserplatten bedingten Umweltbelastungen lassen sich wie folgt darstellen:

Abfallstoffe (Basis für die Darstellung sind die Produktionsdaten aus dem Jahr 2011, diese Werte können für die Betrachtung allgemein angesetzt werden, da die jährliche Produktionsleistung nur in geringen Grenzen schwankt):

-12.400 Tonnen staubförmige Gipsfaserabfälle (Schleif-, Fräs-, und Sägestäube)
- 7.000 Tonnen Gipsfaserplattenabfälle (trockene Hartabfälle)
- 2.600 Tonnen Sedimentationsschlamm (mit ca. 50-60% Wasseranteil)

Die Abfälle können nur noch auf ausgewählten Deponien (bei unseren Produkten Deponieklasse 1, bei Produkten mit höherem Anteil an Zellulosefasern sogar nur Deponieklasse 2) entsorgt werden. Mittlerweile ist die Verwertung fast nur noch auf Deponien im Raum Sachsen-Anhalt möglich.

Durch die interne Verwertung dieser Abfälle wird also wertvoller Deponieraum eingespart.

Einsparung von Transportwegen durch interne Verwertung bei folgenden Randbedingungen:
Beladung 25 t je Transport, mittlerer Transportweg: 250 km = 500 km hin und zurück (Sedimentationsschlamm: 80 km):

-12.400 t/a staubförmige Gipsfaserabfälle: 497 Silotransporte = 248.500 km
- 7.000 t/a Gipsfaserplattenabfälle: 282 Silotransporte = 141.000 km
- 2.600 t/a Gipssedimentationsschlamm: 104 Silotransporte = ca. 8.300 km

Gesamteinsparung Lkw-Transporte: ca. 398.000 km pro Jahr.

Einsparung Rohstoff

Bei der Umwandlung aller Abfälle zu Alpha-Halbhydrat wird eine Gesamtmenge von ca. 18.360 t/a recyceltes Produkt erzeugt. Dieses Produkt muss nicht mehr hergestellt und transportiert werden. Dadurch verringern sich auch die Transporte:

Transporte Rohstoff (29 Tonnen / LKW): 633 Silo Lkw-Transporte x 600 km = 380.000 km

Gesamte Einsparung Lkw-Transporte Rohstoffe und Entsorgung: ca. 778.000 km. Bei einem angenommenen Durchschnittsverbrauch von 35 l/100 km Dieselkraftstoff entspricht diese Laufleistung einer CO_2-Emission von 715 Tonnen pro Jahr.

Energiebedarf durch energiesparendes und integriertes Verfahren:
Der thermische Energiebedarf für die Herstellung von Alpha-Halbhydrat beträgt nach dem Stand der Technik ca. 2,3 MJ/kg = ca. 646 kWh/t. [Pei07]
Der reale Verbrauch durch den vereinfachten und integrierten Prozess mit Nutzung der Abwärme aus dem Produktionsprozess beträgt ca. 186 kWh/t thermisch.

Energieeinsparung thermisch:

Das ergibt eine thermische Energieeinsparung von 460 kWh/t x 18.360 t/a = 8.445.600 kWh/a im Vergleich zum Kauf des pulverförmigen Alpha-Halbhydrat Rohstoffes.
Damit beträgt das gesamte thermische Einsparpotenzial aus geringerem Energiebedarf zur Erzeugung und energetischer Einsparung bei Nebenprozessen ca. 9,1 Millionen kWh/a. Der erforderliche thermische Energiebedarf entspricht einer CO_2-Emission von ca. 1.800 Tonnen pro Jahr, auf Basis einer spezifischen CO_2-Emission von 0,198 kg CO_2 pro kWh bei der Verbrennung von Erdgas.
Die Umweltbelastungen, die aus den Lkw-Frachten resultieren, können nur vermieden werden, wenn diese teilweise oder insgesamt nicht mehr benötigt werden. Aufgrund des Produktionsverfahrens ist eine signifikante Reduzierung der staubförmigen Abfälle nicht möglich.

Die direkte Rückführung der staubförmigen Abfälle in den Produktionsprozess ist nicht möglich, weil der Staub hauptsächlich feinkörniges Dihydrat enthält, das bei Zugabe in die Mischung die Abbindereaktion der Mischung so stark beschleunigt, dass keine kontrollierte Produktion möglich ist. Zusätzlich würde aufgrund der Fein-

heit des Materials das Entwässerungsverhalten so stark verändert werden, dass eine wirtschaftliche Produktion nicht mehr möglich wäre und aufgrund des dann deutlich höheren Restwassergehaltes im Produkt wesentlich höhere Trocknungskosten entstehen. Diese Erkenntnisse basieren auf umfangreichen Betriebserfahrungen aus der Produktion in Werk 2. In diesem Werk betreiben wir eine Flash-Kalzinieranlage, mit der die Stäube in einen reaktiven Stuckgips umgewandelt werden, wobei dabei durch die eigentliche Kalzinierung die Feinheit des Materials nicht verändert wird.

Das in der Branche übliche Verfahren ist oder war die Verbringung der Abfälle in Deponien oder die Verwendung als Füllmaterial für die Rekultivierung von Kalihalden. Durch die Änderung der Kalihalden-Richtlinie (KHR) ist der zweitgenannte Verwertungsweg insbesondere hinsichtlich des Abfallschlüssels 17 08 02 - Baustoffe auf Gipsbasis - seit August 2011 nicht mehr möglich. [Fth10]

2 Vorhabensumsetzung

2.1 Ziel des Vorhabens

Nach dem Motto „Abfall ist kein Müll, sondern Ressource von morgen“ soll ein geschlossener Stoffkreislauf für die Produktion von Gipsfaserplatten erreicht werden. Ziel des Projektes ist es deshalb, den im Herstellungsprozess der Gipsfaserplatten anfallenden Staub von zellulosefaserhaltigem, abgebundenen Gips $CaSO_4 \times 2\ H_2O$ sowie weitere Gips- und gipsfaserhaltige Abfallstoffe (siehe Kapitel 1.2), die am Standort anfallen, stofflich zu verwerten, d.h. in den Produktionsprozess zurückzuführen. Der anfallende Gipsstaub soll mit Hilfe eines speziellen verfahrenstechnischen Prozesses in das aktiv abbindende α-Halbhydrat, $CaSO_4 \times ½\ H_2O$, umgewandelt werden.

Folgende jährliche Umweltschutzwirkungen sollen mit dem Projekt erreicht werden:

- Steigerung der Materialeffizienz:
  Substitution von 20.000 t/a REA-Stuckgips
- Reduzierung der CO_2-Emissionen durch unnötige Lkw-Transporte:
  Transport der Abfälle 398.000 km
  Transport Rohgips 380.000 km
  CO_2-Reduktion 715 Tonnen
- Reduzierung der CO_2-Emissionen durch den energetisch günstigeren Alpha-Prozess im Vergleich zu kommerziell erhältlichem Alpha-Halbhydrat:
  Energieeinsparung 9,1 Millionen kWh/a
  CO_2-Reduktion 1.800 Tonnen/a
- Reduzierung des Treibhauspotenzials um ca. 2.200 Tonnen CO_2-Äquivalent gegenüber dem Istzustand. Diese Reduzierung wurde durch Simulation des Prozesses im Nachgang zur Ökobilanzierung des Standortes gemäß DIN EN ISO 14040 im Jahr 2011 berechnet.

2.2 Darstellung der technischen Lösung

Im Rahmen des DBU-Projektes 27776 wurden in insgesamt drei Phasen, von Dezember 2009 bis August 2012, die Umwandlung von unterschiedlichen Abfallstoffen zu Alpha-Halbhydrat und deren direkte Rückführung in den Produktionsprozess umfangreich und mit verschiedenen Verfahren (Suspensions- und Sattdampfverfahren)

untersucht. Im Vorfeld wurden sowohl Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss der Rohstoffe, verschiedener Additive und Herstellungsbedingungen auf die Umwandlungskinetik und das Kristallisationsverhalten durchgeführt, als auch die anwendungsnahe Untersuchung zur Verwertung der erzeugten Suspensionen durchgeführt. In der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 2.1) ist das Verfahren zum Recycling von Gipsabfällen zu a-HH mit direkter Rückführung in die Produktion dem Stand der Technik gegenüber gestellt.

Tabelle 2.1: Verfahrensvergleich Gipsabfallrecycling zu α-HH mit direkter Rückführung in die Produktion im Vergleich zum Stand der Technik (Standard Suspensionsverfahren zur Herstellung von α-HH)

Nr.	Stand der Technik	Gefördertes Verfahren
1	Herstellung einer Suspension aus REA- oder Naturgips mit Wasser und kristallisationsbeeinflussenden Additiven und umwandlungsbeschleunigenden Additiven in einem Rührbehälter	Herstellung und Vorheizung einer Suspension aus Abfallgipsen und eventuell REA-Gips mit Wasser und kristallisationsbeeinflussenden Additiven in einem Rührbehälter
2	Umwandlung der Gipssuspension zu α-HH im Reaktor (Druck-Rührbehälter). Dazu ist die Suspension auf Zieltemperatur aufzuheizen und eine entsprechende Verweilzeit bei Zieltemperatur sicherzustellen. Ggf Zugabe von Kristallisationskeimen.	Umwandlung der Gipssuspension zu α-HH im Reaktor (Druck-Rührbehälter). Dazu ist die Suspension auf Zieltemperatur aufzuheizen und eine entsprechende Verweilzeit bei Zieltemperatur sicherzustellen. Ggf Zugabe von Kristallisationskeimen (bei Mischungen aus Abfallgipsen und REA-Gipsen nicht erforderlich)
3	Förderung in Pufferbehälter	Förderung in Lagerbehälter (mit Notbeheizung über Doppelmantel)
4	Entwässerung der Suspension auf einem Vakuumbandfilter oder in einer Zentrifuge	nicht erforderlich
5	Trocknung	nicht erforderlich
6	Mahlen	nicht erforderlich
7	Lagerung des pulverförmigen α-HH im Silo	nicht erforderlich
8	Herstellung einer Trockenmischung aus dem pulverförmigen α-HH und anderen Gipsrohstoffen	nicht erforderlich
9	nicht erforderlich	Förderung der α-HH Suspension vom Lagerbehälter in den Nassmischer
10	Herstellung der Nassmischung aus der Trockenmischung, der Papierfaserpulpe und den Additiven	Herstellung der Nassmischung aus der α-HH Suspension, Papierfaserpulpe, Additiven und den anderen Gipsrohstoffen gemischt
11	Formgebung und Entwässerung der Nassmischung zur Gipsfaserplatte	Formgebung und Entwässerung der Nassmischung zur Gipsfaserplatte

Die Verfahrensschritte 1 bis 7 sind Stand der Technik bei einer α-HH Anlage nach dem Suspensionsverfahren.
Mit dem neuen Verfahren sind die Schritte 4,5 und 6 nicht erforderlich. Damit sind im Vergleich zum Stand der Technik deutlich geringere Investitionen erforderlich. Der Energiebedarf wird dadurch ebenfalls deutlich reduziert.
Der reale thermische Energiebedarf beträgt bei diesem Verfahren nach der bisher erfolgten Auswertung 186 kWh/t Produkt (Kondensatverluste, Absalzverluste und Wirkungsgrad des Dampfkessels zur Dampferzeugung sind berücksichtigt).
Nach ursprünglicher Berechnung lag der thermische Energiebedarf bei 171 kWh/t (ohne Berücksichtigung von Verlusten und Wirkungsgrad des Dampfkessels).
Bei herkömmlichen Verfahren liegt der thermische Energiebedarf dagegen bei 646 kWh/t α-HH [Pei 07].
Damit wird selbst der Energiebedarf zur Herstellung von Stuckgips beinahe halbiert (ca. 330 +/- 60 kWh/t, abhängig vom Verfahren und Rohstoff).

Technologisch ist bei herkömmlichen Suspensionsverfahren vor allem der Schritt 4 sehr problematisch, die Zentrifugen müssen häufig gereinigt werden, wodurch es zu Prozessunterbrechungen kommt und Wartungsaufwand entsteht.
Der Schritt 5 erfordert einen hohen thermischen Energiebedarf.
Der Schritt 6 erfordert einen hohen elektrischen Energiebedarf. Bei dem geförderten Verfahren können durch eine entsprechende Rohstoffmischung in Kombination mit geeigneter Additiv-Dosierung gezielte Korngrößen und eine ausreichende Reaktivität eingestellt werden, ohne dass ein Mahlprozess erforderlich ist.
Neu bei diesem geförderten Verfahren ist damit, dass durch eine gezielte Rohstoffmischung mit hohen Anteilen an schwer verwertbaren Abfallstoffen definierte granulometrische Eigenschaften eingestellt werden können.

Auch in früheren Patenten wurden bereits integrierte Verfahren mit Einsparung der Prozessschritte 4 bis 6 vorgeschlagen. Nachteilig bei den genannten Verfahren ist der geringe Feststoffanteil in der Suspension, da α-Halbhydrat Kristalle mit hohem L/D zur Verarbeitung einen hohen Wasseranteil benötigen.

Die Entscheidung für das Suspensionsverfahren basiert im Wesentlichen auf der Tatsache, dass bei einer herkömmlichen, trockenen Kalzinierung die BET-Oberfläche des erzeugten Materials im Vergleich zum Ausgangsrohstoff vergrößert wird. Dadurch ist, selbst nach Umwandlung in einen Stuckgips, die mögliche

Rückführmenge begrenzt, da sich durch das extrem hohe Wasseraufnahmevermögen der kalzinierten Stäube der Zeitbedarf für die Entwässerung der Nassmischung derart vergrößert, dass eine wirtschaftliche Produktion nicht mehr möglich ist. Zusätzlich steigen die Energiekosten für die Trocknung der Gipsfaserplatten deutlich an, da aufgrund der schlechten Entwässerbarkeit der auszutrocknende Wassergehalt ebenfalls stark ansteigt.

Diese Nachteile treten bei dem Suspensionsverfahren nicht auf, da die staubförmigen Abfälle zunächst in eine Suspension überführt werden, aus der heraus der Kristallisationsprozess stattfindet. Bei geeigneter Prozessführung und durch Zugabe von Additiven ist es möglich Gipskristalle zu erzeugen, die aufgrund ihrer Größe und spezifischen Oberfläche einen deutlich geringeren Wasseranspruch aufweisen und beim Abbinden deutlich höhere Festigkeiten entwickeln als dies bei einem trockenkalzinierten Stuckgips der Fall ist.

Weitere maßgebliche Kriterien für die Auswahl dieses Verfahrens waren die Verfahrenssicherheit, die Energieeffizienz und der apparative Aufwand.

Die Hauptverfahrensschritte des Suspensions-Prozesses sind in folgendem Schema dargestellt:

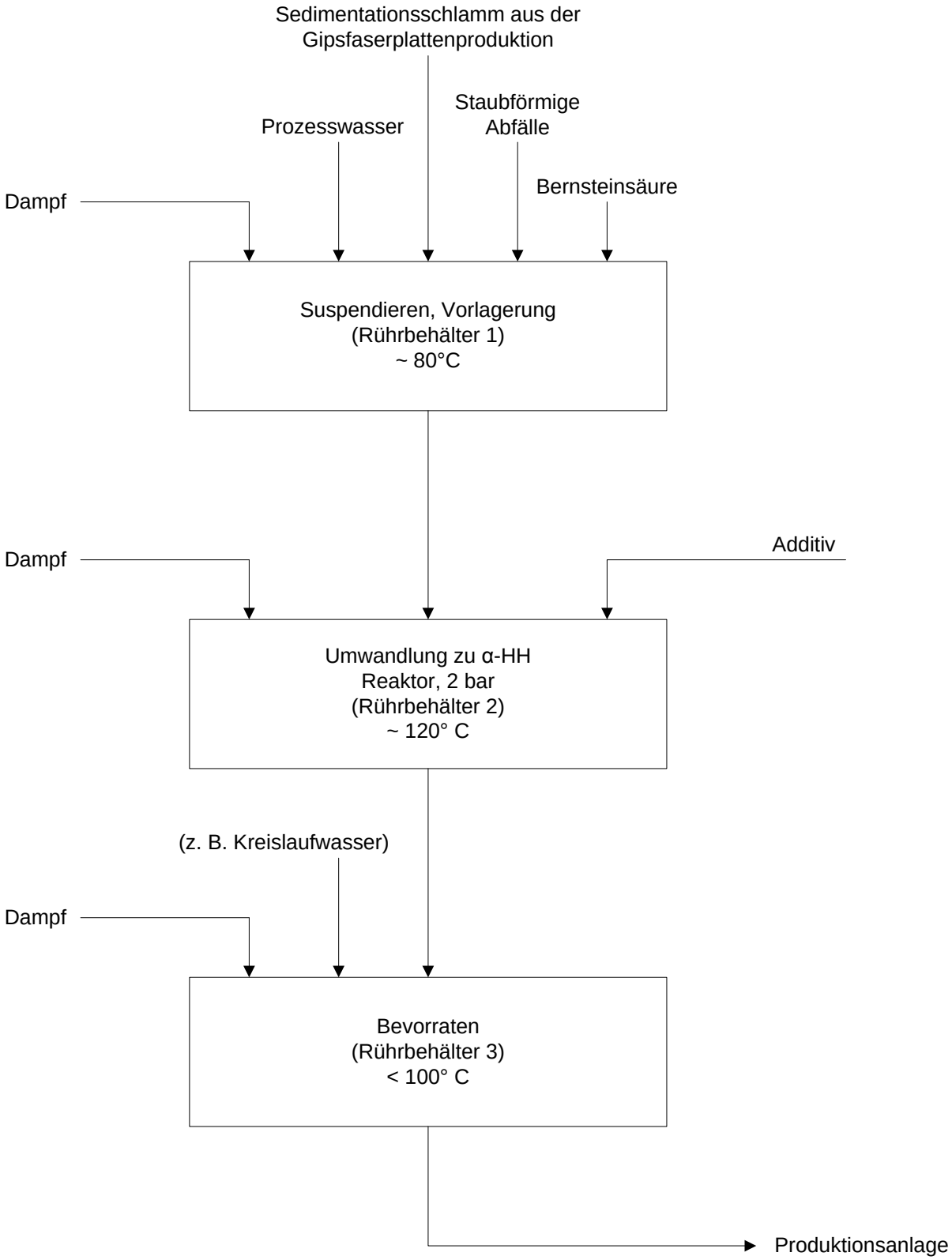

Bild 2.1: Verfahrensschema für die Umwandlung von Gipsfaserabfällen im Suspensionsverfahren

Der Prozess gliedert sich in drei Teilprozesse:

- Suspendieren und Vorlagerung der staubförmigen Abfälle
- Umwandlung zu Alpha-Halbhydrat in einem Druckreaktor
- Bevorraten der reaktiven Alpha-Halbhydrat-Suspension

Dafür werden folgende Medien benötigt:

- Prozesswasser (Brauchwasser aus der Produktion)
- Sattdampf (Entnahme aus vorhandener Dampfkesselanlage)
- Kühlwasser (Entnahme aus werkseigenem Brunnen)

Grundsätzlich kann das Suspensionsverfahren als kontinuierlicher Prozess oder als Batch-Prozess umgesetzt werden. Die Entscheidung für den Batch-Prozess ist das Ergebnis aus der Abwägung der verfahrenstechnischen Risiken. Die Gefahr beim kontinuierlichen Prozess liegt darin, dass nicht alle Teilchen ausreichend thermisch behandelt werden oder dass bestimmte Verweilzeiten nicht erreicht werden für den Fall, dass in der Anlage Totzonen entstehen, die nicht komplett umgewälzt bzw. durchströmt werden. Dieses Risiko kann bei einem Batch-Prozess sehr weit reduziert werden. Außerdem ist hier die Möglichkeit gegeben, durch Dosierkorrekturen unmittelbar Einfluss auf die Produktqualität pro Batch zu nehmen.

2.3 Darstellung der Umsetzung des Vorhabens

Für die Projektrealisierung waren folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- Erstellung einer Verfahrensbeschreibung
- Verfahrenstechnische Berechnung der Prozesse je Behälter gemäß Schema in Bild 2.1
- Verfahrenstechnische Auslegung der Nebenanlagen (Prozesswasser-Vorwärmung, Gipsstaub-Förderung, Additivdosierung, Dampfsystem und Suspensionskühlung)
- Erstellen der Fließbilder für den Kernprozess und die erforderlichen Nebenanlagen
- Erstellen von Lastenheften für die Komponenten, insbesondere Definition von kritischen Anlagenkomponenten

- Überprüfung der Schlüsselkomponenten durch eigene Versuche und durch Versuche im Technikum der Lieferanten
- Erstellen des Lastenheftes für die Steuerung der Anlage, insbesondere unter Beachtung der funktionalen Anlagensicherheit, der Prozessvisualisierung und Bedienoberfläche
- Vergabeverhandlungen mit den Anbietern und Koordination der Schnittstellen zwischen den Gewerken
- 3D-Aufstellungsplanung mit Kollisionsprüfung für Rohrleitungen und die bauseitigen Komponenten
- Planung der Montageabläufe
- Bau der Anlage
- Festlegen der Abläufe für die Inbetriebnahme und der Schulung der Mitarbeiter im Dreischichtbetrieb
- Freigabe Produktionsstart

Verfahrensbeschreibung:

Die einzelnen Verfahrensschritte werden nachfolgend beschrieben (siehe Bild 2.1). Sie unterliegen folgenden grundlegenden Randbedingungen:
Während des gesamten Prozessablaufes muss vermieden werden, dass die Gipssuspension zur Ruhe kommt, da sich ansonsten der Feststoff absetzt. Deshalb sind sämtliche Behälter mit Rührwerken ausgerüstet. Zusätzlich wird der Behälterinhalt ständig umgepumpt. Um Sedimentation zu vermeiden, müssen alle Apparate und Rohrleitungen totraumfrei und möglichst selbstentleerend ausgeführt werden. Die produktberührten Oberflächen sind so zu gestalten, dass eine Anhaftung erschwert wird und eine leichte Reinigung möglich ist.

Anrühren und Suspendieren (Rührbehälter 1):

Im Rührbehälter 1 wird eine Suspension aus Prozesswasser und Gipsfaserabfällen hergestellt. Die Dosierung des Gipsfaserstaubes erfolgt über eine Dosiereinrichtung aus einem Vorratssilo in den Behälter.
Der Eintrag des Gipsstaubes erfolgt in mit Kalziumsulfat gesättigtem Prozesswasser, welches durch die Nutzung von vorhandener Abwärme auf ca. 60 °C vorgewärmt wird (Bild 2.2).

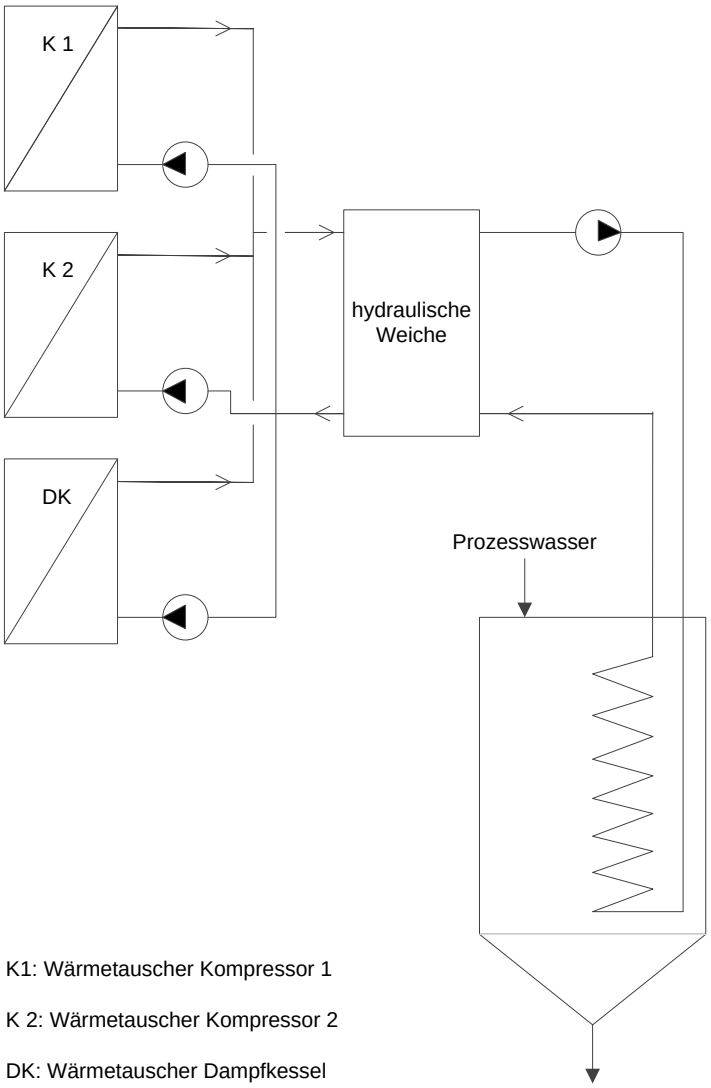

Bild 2.2: Schema zur Abwärmenutzung

In den Rührbehälter 1 wird über eine Dosierpumpe ein Additiv zugegeben, um die Kristallisation aus der Suspension zu beeinflussen.
Das Rührwerk ist so konstruiert, dass der Austrag der Suspension über dem Bodenablass unterstützt wird und gleichzeitig mögliche Gipskrusten zerkleinert werden.
Nachdem die Suspension durch Rühren und Umpumpen homogenisiert ist, wird in diesen Kreislauf Sattdampf injiziert, bis die Suspension eine Temperatur von 80 °C erreicht hat. Durch das Kondensat wird dabei die angesetzte Suspension verdünnt.

Umwandlung (Rührbehälter 2):
Der Rührbehälter 2 ist der eigentliche Reaktor, in welchem die Umwandlungsreaktion abläuft. Die Umwandlungsreaktion in Alpha-Halbhydrat findet bei einer Temperatur von 120 °C statt. Da das in der Suspension enthaltene Wasser bei dieser

Temperatur sieden würde, findet die Umwandlung in einem geschlossenen Rührbehälter statt, in dem sich durch den Dampfdruck ein Überdruck von ca. 1 bar aufbaut.
Die Aufheizung der Suspension erfolgt gleichfalls in einem Umpumpkreislauf durch Eindüsen von Sattdampf mittels eines Injektors.
Die Erwärmung von 80 °C auf 95 °C mittels Sattdampf erfolgt in kurzer Zeit.
Der Rührbehälter 2 wird erst entleert, wenn die Temperatur der Suspension von 120 °C über eine gewisse Haltezeit gehalten wurde. Dadurch soll gewährleistet werden, dass sich kein abgebundener Gips (Dihydrat) mehr in der Suspension befindet, da dieser den nachfolgenden Abbindeprozess der Nassmischung in der Produktion beschleunigt und somit negativ beeinflusst.

Kühlung, Lagerung, Förderung (Rührbehälter 3):
Nach der Umwandlungsreaktion wird die Suspension in einen Lagerbehälter, Rührbehälter 3, abgepumpt.
Dieser dient zum einen zur Abkühlung der Suspension und zum anderen als Materialpuffer für die nachfolgende Produktion.
Dieser Behälter sollte im normalen Betriebsfall immer mit mindestens einer Charge aus dem Rührbehälter 2, heruntergekühlt auf < 100 °C, gefüllt sein. Wird der Behälter 2 entleert, so hat diese frische Suspension eine Temperatur von 120 °C. Während sie in den Behälter 3 gepumpt wird, wird gleichzeitig das Kühlmedium zugegeben.
Die Suspension aus dem Rührbehälter 3 wird gleichfalls mittels einer Förderpumpe über eine Ringleitung zu den Nassmischern und zurück zum Behälter im Kreislauf gefahren. Entsprechend der Abnahme durch die Nassmischer 1 bis 4 wird die Suspension aus diesem Kreislauf entnommen (siehe Schema in Bild 2.3).
Der Rührbehälter 3 ist im unteren Teil mit außenliegenden, aufgeschweißten Heizrohren versehen. Damit kann der Behälter für den Anfahrprozess vorgeheizt werden.

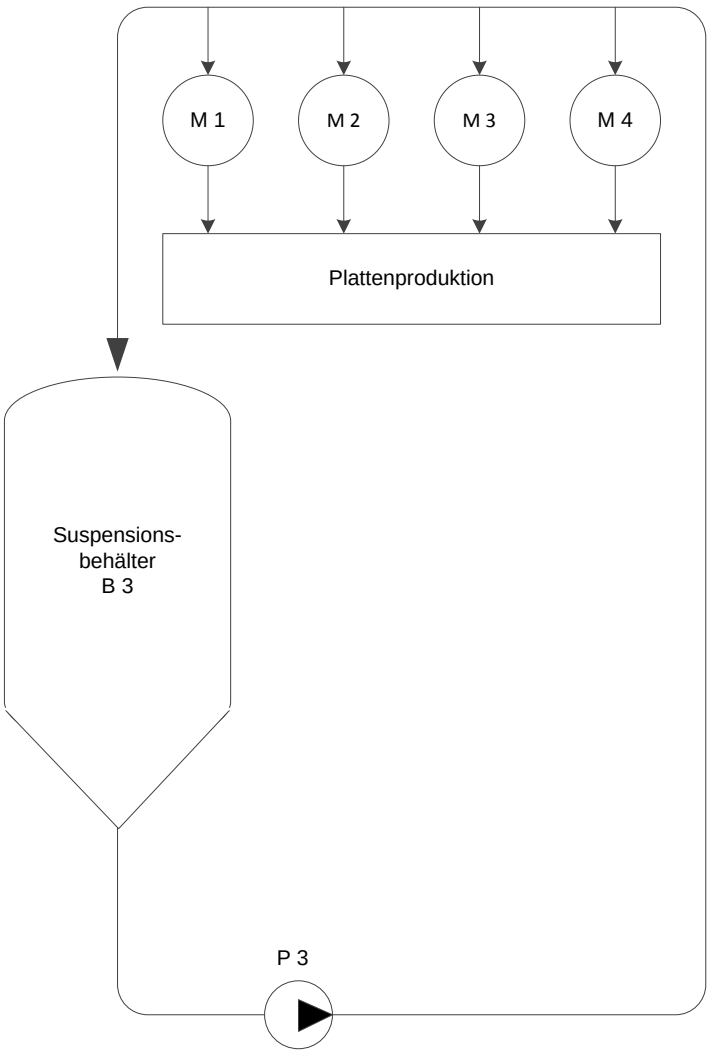

Bild 2.3: Schema für Ringleitung an Behälter 3

Reinigung

Alle Behälter sind mit entsprechenden Systemen zur Reinigung der Behälterinnenflächen und der Rührwerkzeuge während der Produktion und nach dem Abfahren der Produktion ausgerüstet. Dabei handelt es sich um speziell für den Reinigungszweck konstruierte Reinigungslanzen, die mit Hochdruckwasser gespeist werden. Das Reinigungswasser bzw. die Reinigungsflüssigkeit kann entweder in einen zusätzlichen Behälter abgelassen werden oder in dem jeweils gereinigten Behälter verbleiben. In letztgenanntem Fall wird die Menge an Reinigungswasser / Reinigungsflüssigkeit mit der für den Batch erforderlichen Wassermenge verrechnet und so ausgeglichen, dass die für den vorgegebenen Feststoffgehalt erforderliche Wassermenge im Behälter vorhanden ist.

Zur Überprüfung der Innenflächen der Behälter und der darin eingebauten Rührwerkzeuge sind alle Behälter jeweils mit einem Mannloch oder einer In-

spektionsöffnung ausgerüstet. Diese Behälteröffnungen sind mit einem Schlüsseltransfersystem gesichert, so dass die Öffnung der Behälter erst dann freigeschaltet wird, wenn alle Bedingungen für eine gefahrlose Inspektion erfüllt sind. Im Falle der Mannlöcher ist eine Begehung des Behälters erst dann möglich, wenn die funktionale Sicherheit hergestellt ist, d.h. dass während der Begehung keine gefahrbringenden Schalthandlungen (z. B. Anlaufen des Rührwerkes, Freischalten von Dampfventilen, etc.) ausgelöst werden können.

Verfahrenstechnische Berechnung der Prozesse

Voraussetzung für die Auslegung der Behälter und Komponenten ist die verfahrenstechnische Berechnung der Prozesse pro Behälter. Für die Berechnungen wurden die maximale Durchsatzleistung der Anlage und der Feststoffgehalt in Rührbehälter 1 vorgegeben. Die Anlage läuft umso energieeffizienter, je höher der Feststoffgehalt der Ansetzmischung ist.

Vorgabe war ebenfalls, dass die Suspension mittels Sattdampf aufgeheizt wird, da eine indirekte Beheizung, z. B. über einen doppelwandigen Behälter oder über aufgeschweißte Halbrohrschlangen, nicht energieeffektiv wäre, da sich bereits bei kleinen Materialablagerungen auf der Behälteroberfläche der Wärmeübergang in das Material extrem verschlechtert. Bei der Sattdampfbeheizung muss die Kondensatmenge rechnerisch berücksichtigt werden, da sich der Feststoffgehalt der Suspension entsprechend reduziert.

Die jeweilige Behältergröße ist abhängig von der Batchzeit und demzufolge auch von den Lagerungszeiten, Homogenisierzeiten und Aufheizzeiten. Für jeden Behälter wurden die Stoffströme für Brauchwasser, Gipsstaub, Additive, Dampf (Sattdampf und Kondensat) und Kühl- bzw. Reinigungswasser berechnet. Erforderliche Stoffdaten für die Berechnung sind die entsprechenden Materialdichten, Viskositäten und die Wärmekapazitäten.

Tabelle 2.2: Technische Daten der Behälter

Behälter	**Volumen (Liter)**			**Betr.Druck**
	Suspension	Unterteil	Gesamt	bar abs
Behälter 1	6.196	0	0	1
Behälter 2	6.852	0	0	4
Behälter 3	14.487	18.343	21.424	1
Behälter 5	451	670	797	1

Bild 2.4 zeigt exemplarisch die Zeit- und Temperaturverläufe für die Verfahrensschritte Dosieren, Mischen, Homogenisieren, Aufheizen und Entleeren am Beispiel des Rührbehälters 1 und einen Anfangs-Feststoffgehalt von 50 M-%.

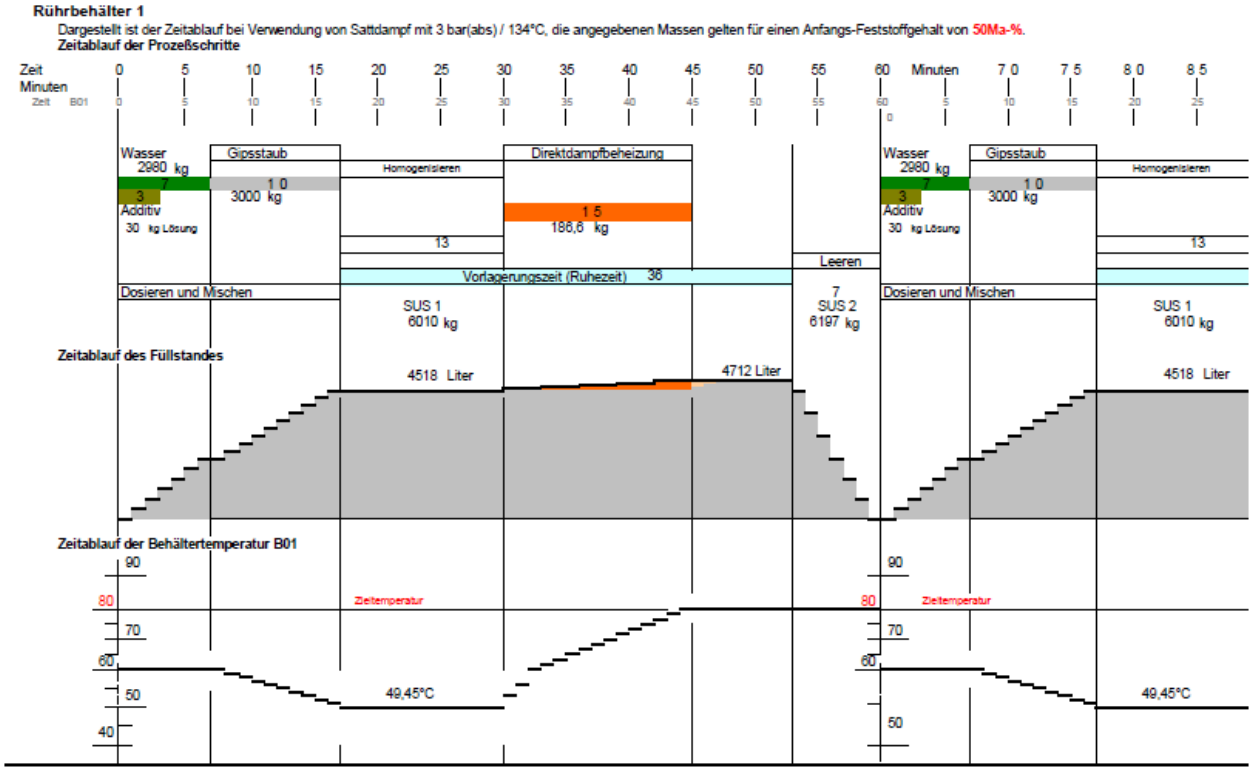

Bild 2.4: Zeit- und Temperaturverlauf für Rührbehälter 1

Verfahrenstechnische Auslegung der Nebenanlagen

Für den Betrieb der Anlage sind folgende Nebenanlagen erforderlich:

- Prozesswasser-Vorwärmung
- Gipsstaub-Förderung
- Additivdosierungen
- Dampfsystem
- Suspensionskühlung
- Brüdenabsaugung

Da der Prozess bei einer Temperatur von ca. 125 °C gefahren wird, soll das benötigte Brauchwasser zur Herstellung der Suspension (mechanisch geklärtes Filtratwasser aus der Produktion) entsprechend vorgewärmt werden. Als Energiequellen sollen das Abgas der Dampfkesselanlage und die Abwärme der Schraubenkompressoren genutzt werden, um den Primärenergiebedarf für den Prozess so niedrig wie möglich zu halten. Dafür wurde eine Anlage konzipiert, bei der diese Abwärmen zur Aufhei-

zung eines Schichtspeichers genutzt werden. Die darin gespeicherte Energie wird für den Betrieb einer Heizspirale benutzt, um das Brauchwasser auf eine Temperatur von ca. 60°C aufzuheizen.

Der aus der Produktion anfallende Gipsstaub (Schleif- und Fräsprozesse) wird in einem Silo bevorratet und bisher über eine Verladegarnitur in Silo-Lkw verladen. Diese Anlage wurde so modifiziert, dass der fluidisierte Staub durch die Austragsschnecke hindurch über eine Zellenradschleuse gefördert wird. Diese Zellenradschleuse dient als Luftabschluss für die nachfolgend angeordnete Durchblaseschleuse. Mittels Förderluftgebläse wird der Gipsstaub pneumatisch in ein Empfangssilo gefördert, das als Vorlagepuffer für die Beschickung des Rührbehälters 1 dient.

Für die Dosierung der Additive und des Verzögerers werden handelsübliche Baugruppen eingesetzt. Das trockene, pulverförmige Additiv wird mittels einer Differenzialdosierwaage in den Behälter gefördert, der flüssige Verzögerer wird mittels Dosierpumpen direkt in die Behälter gepumpt.

Der für den Umwandlungsprozess benötigte Sattdampf wird einer vorhandenen Dampfkesselanlage entnommen. Das Dampfsystem besteht neben dem Dampfkessel im Wesentlichen aus den Baugruppen Einspeiseleitung, Dampfverteiler und Kondensatsammelbehälter. Der Dampfverteiler ist mit einem Sicherheitsventil ausgerüstet. Sämtliche Abgänge zu den Verbrauchern sind mit Handabsperrarmaturen und Regelventilen ausgerüstet. Beim Betrieb der Anlage ist darauf zu achten, dass Dampfschläge aufgrund großer Temperaturunterschiede von Dampf und Rohrleitungen vermieden werden. Ebenfalls zum Dampfsystem gehören die Injektoren, d. h. die Armaturen, in denen der Sattdampf in die Suspension geleitet wird. Hierbei handelt es sich um speziell für diesen Einsatz konstruierte, auswechselbare Siebeinsätze, um den Sattdampf direkt in das Material einzublasen.

Nach der Umwandlung zu Alpha-Halbhydrat hat die Suspension eine Temperatur von ca. 125 °C. Für eine drucklose Lagerung im Rührbehälter 3 muss die Suspension auf unter 100 °C abgekühlt werden. Um dies zu erreichen, wird die Suspension während des Abpumpens aus dem Reaktor (Rührbehälter 2) mit Kühlmedium (Brauchwasser) vermischt. Dabei stellt sich eine Temperatur von < 100 °C ein.

Oberhalb von ca. 80 °C muss mit Wasserdampfbildung in den Behältern gerechnet werden. Damit diese Dämpfe (Brüden) nicht in die Umgebung entweichen, wurden sämtliche Behälter mit einer entsprechenden Absaugung ausgestattet. Die Brüden werden über einen Wärmetauscher (Betrieb mit Brunnenwasser, Temperatur 11 °C) kondensiert und dem Rührbehälter 3 zugeführt.

Fließbilder

Der prinzipielle Aufbau der Anlage mit der kompletten Instrumentierung wird in entsprechenden Fließbildern dokumentiert. Aus den Fließbildern können direkt die Verbraucherlisten generiert werden, da jedes Element im Fließbild in einer Datenbank abgelegt wird.

Schlüsselkomponenten

Da es sich bei der Anlage um eine Prototyp-Anlage handelt, wurden speziell die Rührwerke, Pumpen und einige Armaturen als Schlüsselkomponenten betrachtet, d.h. ein Ausfall dieser Komponenten würde den gesamten Prozess gefährden. Im Rahmen des DBU-Projektes und gemeinsam mit potenziellen Lieferanten der kritischen Komponenten wurden experimentelle Versuche durchgeführt, um die Eignung dieser Komponenten vor der Vergabe abzusichern. Dies hat wesentlich zur erfolgreichen Inbetriebnahme beigetragen.

Besonders wichtig war die richtige Materialauswahl für produktberührte Teile und die Prüfung der Reinigungsmöglichkeiten.

Lastenhefte (Komponenten)

Die gesamte Anlage musste in einzelne Baugruppen eingeteilt werden, ein Generallieferant für den kompletten Projektumfang konnte nicht gefunden werden.
Um Angebote für diese Baugruppen einholen zu können, wurden dafür Lastenhefte erstellt und den potenziellen Anbietern zur Verfügung gestellt. Damit sollte sichergestellt werden, dass die Angebote bezüglich des angebotenen Umfanges miteinander verglichen werden können.

Lastenheft für die Steuerung der Anlage

Im Lastenheft für die Steuerung der Anlage sind sämtliche Schrittketten für die Abläufe in den Behältern sowohl für den Einrichtbetrieb als auch für den Automatikbetrieb definiert.

Darüber hinaus sind sämtliche Komponenten beschrieben, die für die funktionale Sicherheit der Anlage erforderlich sind. Ebenso werden darin die Prozessvisualisierung und die Bedienoberfläche vorgegeben.

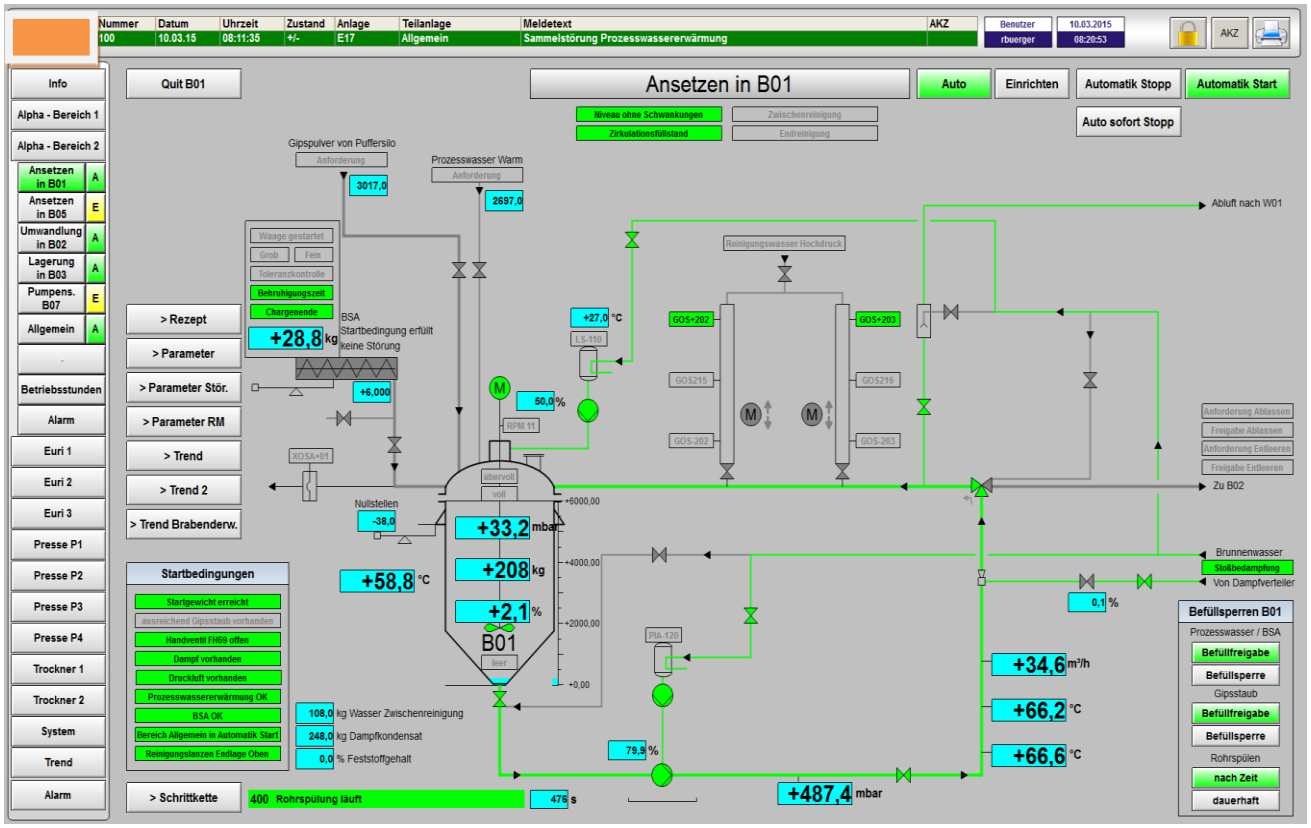

Bild 2.5: Visualisierung und Bedienoberfläche für Rührbehälter 1 (Ansetzbehälter)

3D-Aufstellungsplanung

Da die Anlage in ein bestehendes Produktionsgebäude integriert werden musste, war die Aufstellungsplanung für die Komponenten nur mit Hilfe eines 3D-Modelles möglich, um eventuelle Kollisionen mit bestehenden Anlagen frühzeitig erkennen zu können. Aufgrund der extrem beengten Platzverhältnisse auf den Behälterdeckeln mussten die Rohrleitungsanschlüsse und die erforderlichen Bauräume für Reparaturarbeiten ebenfalls in einer dreidimensionalen Ansicht geprüft werden. Die nachfolgenden Darstellungen zeigen die Anlage als Gesamtanlage und Ansichten aus verschiedenen Richtungen sowie Detailschnitte.

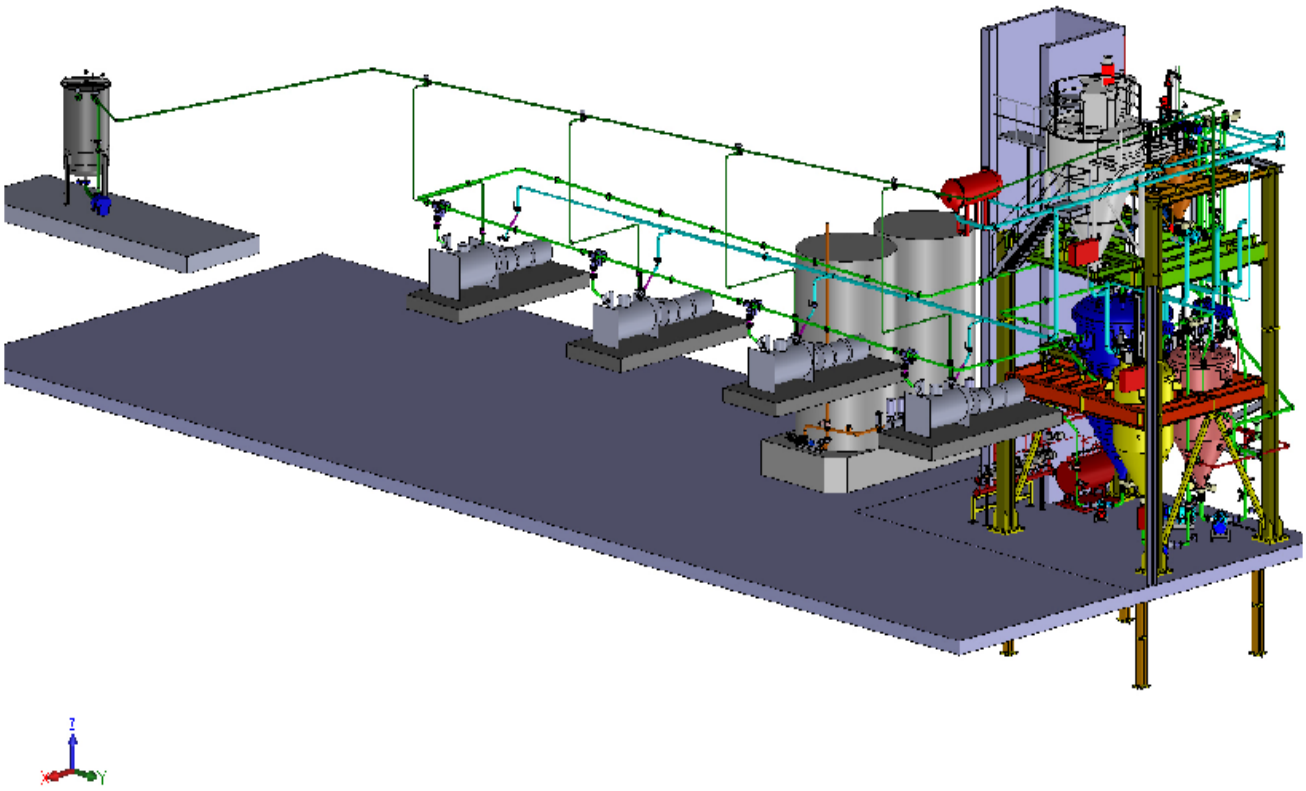

Bild 2.6: Gesamtansicht der Alpha-Anlage mit Prozesswasserbehälter und Umpumpleitung für die Versorgung der Nassmischer

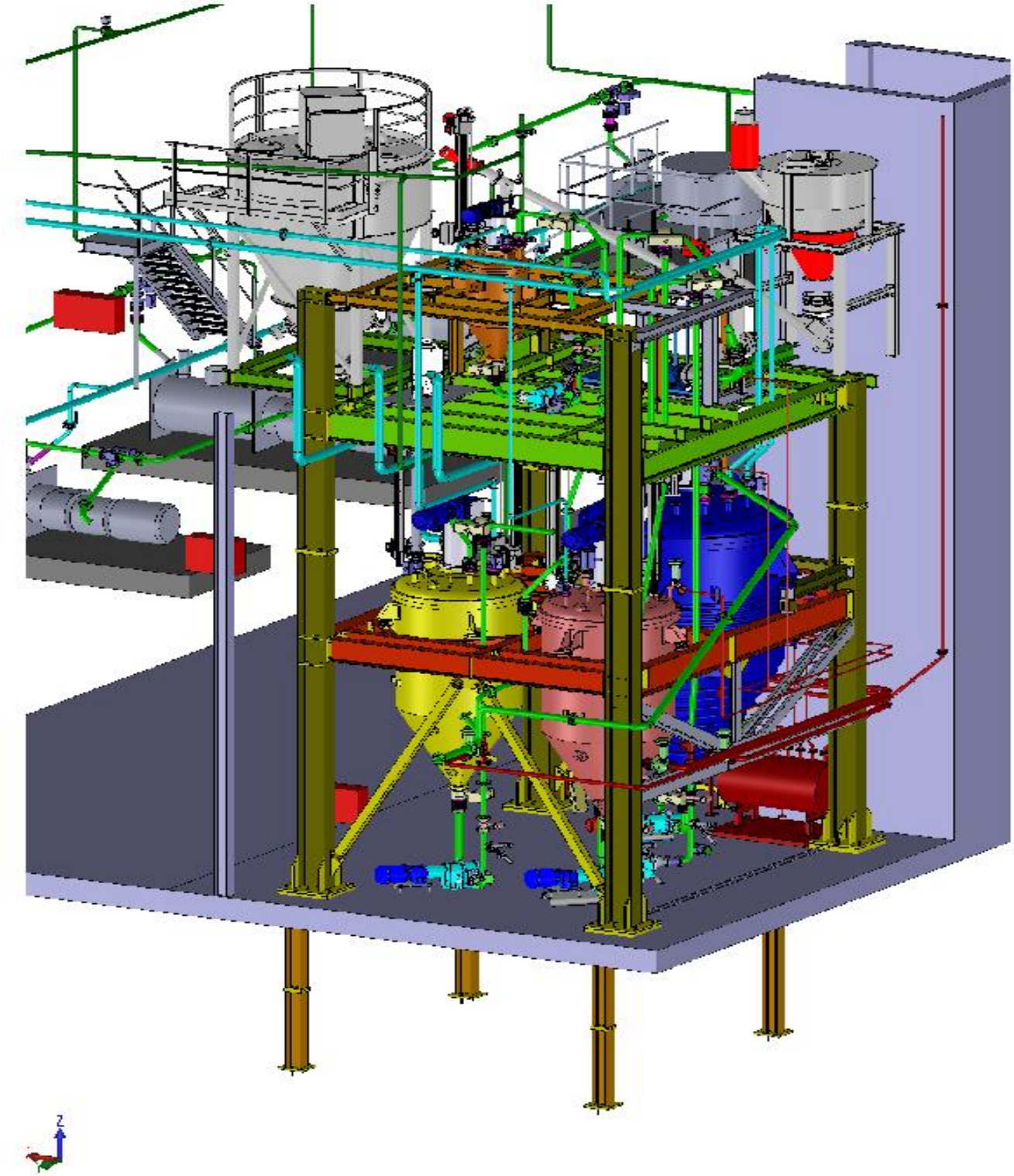

Bild 2.7: Isometrieansicht der Anlage

Rührbehälter 1 (gelb): Anrühren der Suspension

Rührbehälter 2 (rot): Umwandlung zu Alpha-Halbhydrat

Rührbehälter 3 (blau): Lagerbehälter für die Beschickung der Produktion

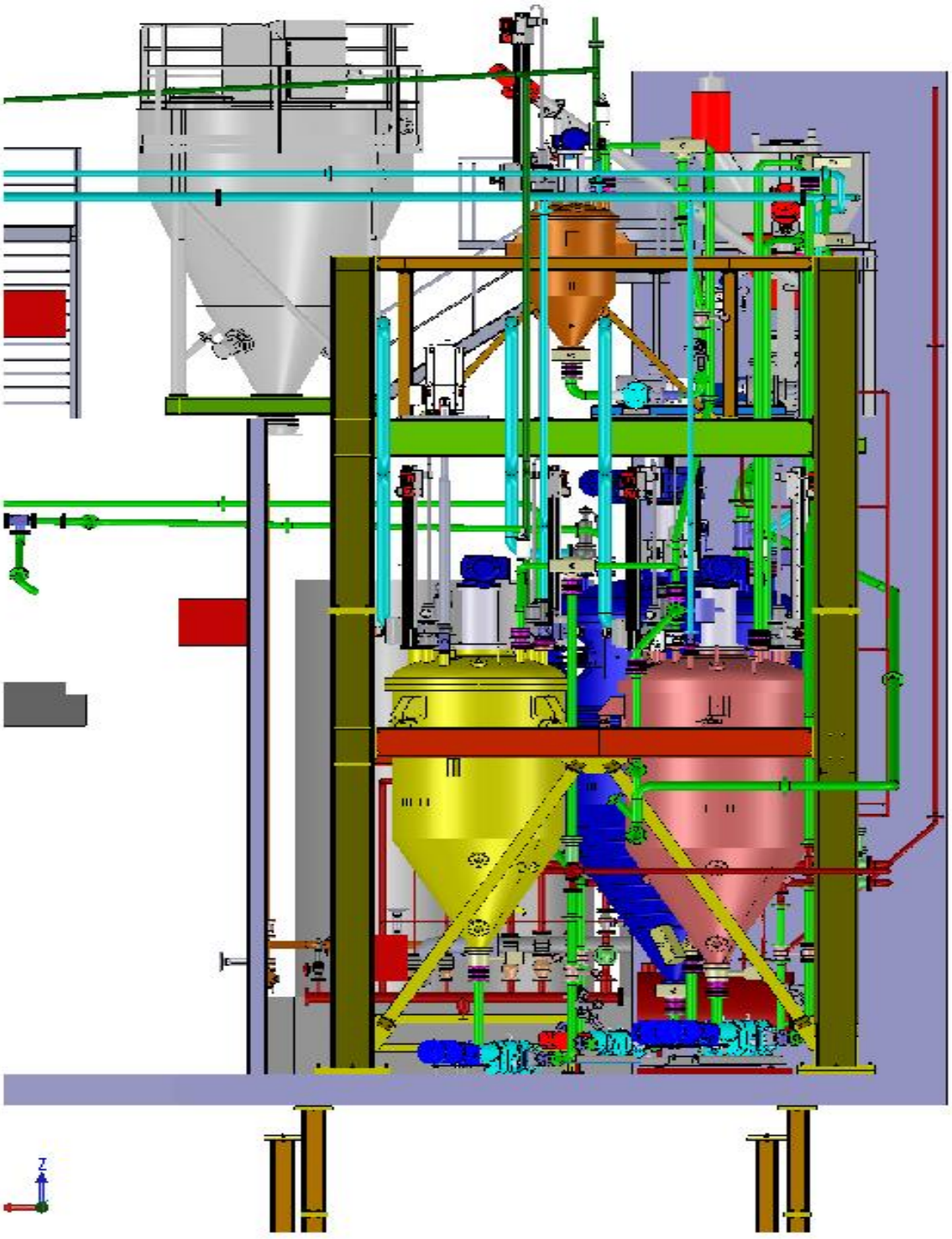

Bild 2.8: Seitenansicht der Anlage

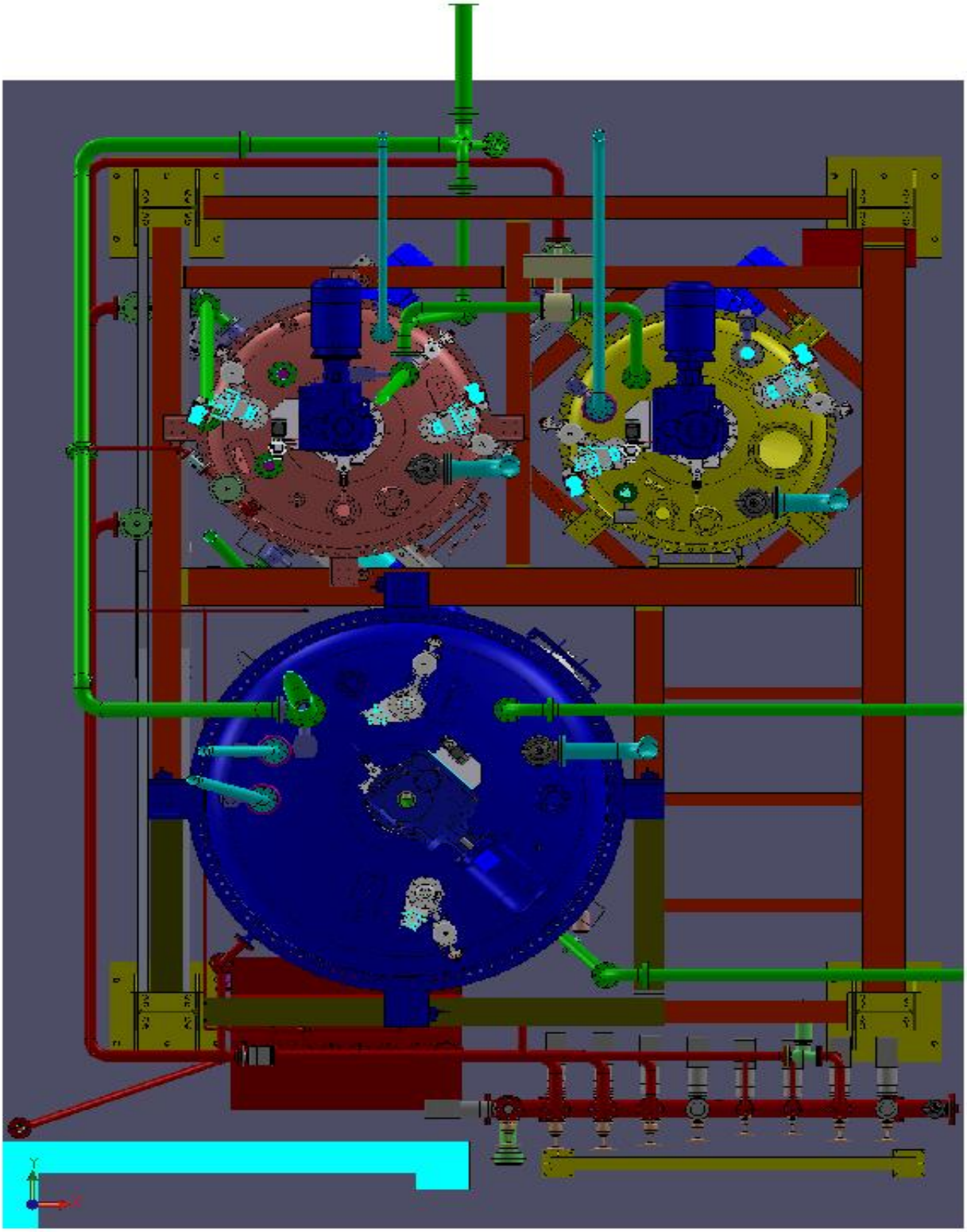

Bild 2.9: Draufsicht auf die Rührbehälter 1 (gelb), 2 (rot) und 3 (blau)

Die nachfolgende Fotodokumentation gibt einen Überblick über die Anordnung der Behälter für den Kernprozess mit den Verfahrensschritten Anrühren und Suspendieren, Umwandlung und Lagerung sowie über die Baugruppen der Nebenanlagen.

Kernprozess mit Rührbehältern 1, 2 und 3:

Bild 2.10: Rührbehälter 1, 2 und 3 (Behälterunterteile mit Isolierung und Pumpen)

Bild 2.11: Rührbehälter 1, 2 und 3 (Behälterdeckel mit Isolierung)

Bild 2.12: Rührbehälter 5 mit Zuführschnecke

Gipsstaubförderung und –dosierung:

Bild 2.13: Ausschleusung von Gipsstaub mit Gebläse und Durchblaseschleuse

Bild 2.14: Empfangsbehälter für Gipsstaub als Puffer für die Befüllung von Rührbehälter 1

Prozesswasservorwärmung:

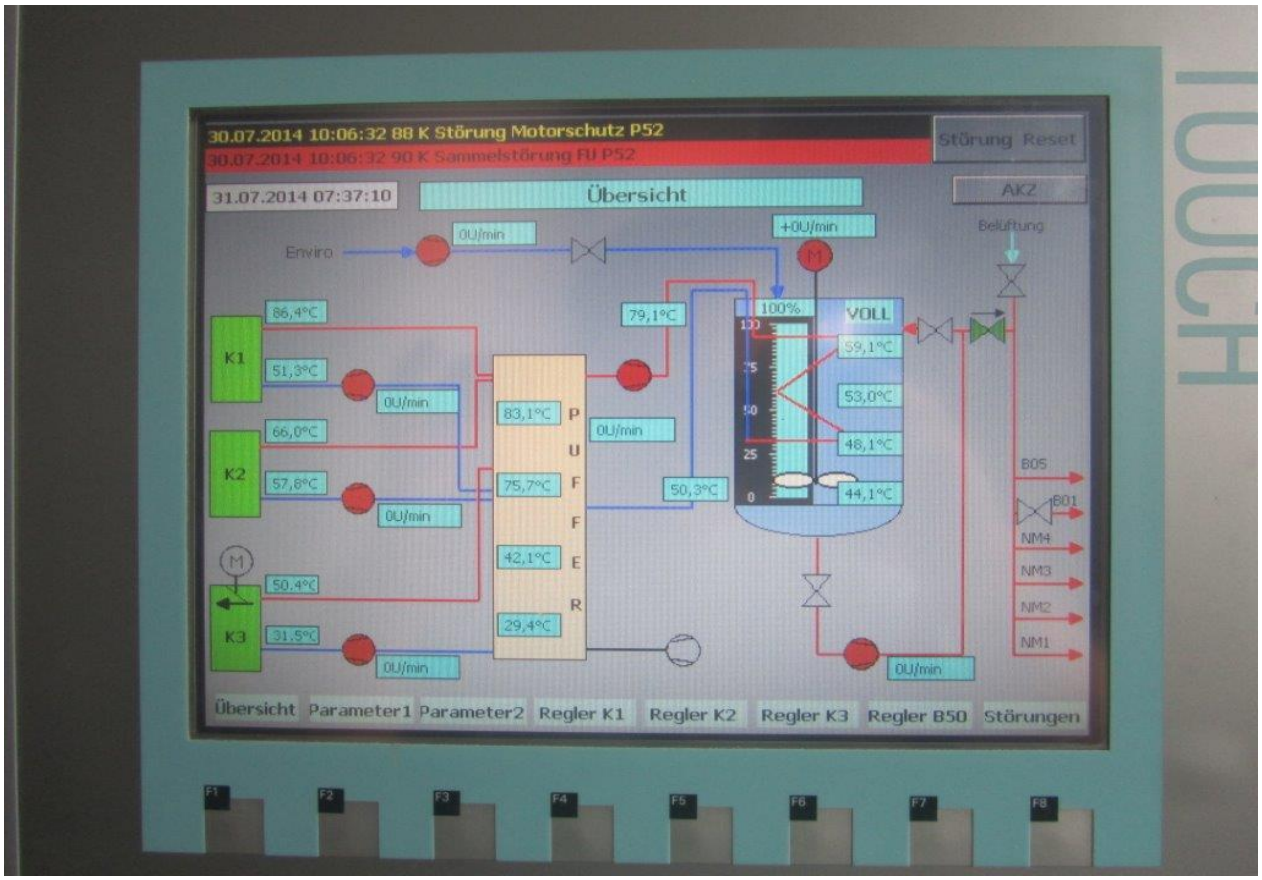

Bild 2.15: Visualisierung und Bedienoberfläche für die Prozesswasservorwärmung

Bild 2.16: Schichtenspeicher mit Verrohrung und Umwälzpumpen

Bild 2.17: Brauchwasserbehälter mit Abzugs- und Umwälzpumpe

Bild 2.18: Abgaswärmetauscher nach Dampfkessel

Brüdenkühlung:

Bild 2.19: Brüdenkühlung mit Gebläse und Wärmetauscher

Dampfversorgung:

Bild 2.20: Dampfeinspeisung mit Druckbegrenzungsventil

Bild 2.21: Dampfverteiler mit Hand- und Automatikventilen

Reinigungssystem:

Bild 2.22: Druckerhöhungsstation für Reinigungswasser

Bild 2.23: Reinigungslanze (Erprobung Prototyp)

Not-Ablassbehälter:

Bild 2.24: Behälter mit Pumpe und Krählwerk für die Aufnahme von Fehlchargen und Reinigungswasser

Montageablauf

Der Platz für den Aufbau der Anlage innerhalb des bestehenden Produktionsgebäudes wurde durch Rückbau von bestehenden Komponenten und Stahlbühnen geschaffen. Die Geschossdecke auf Ebene +/- 0 m musste durch zusätzliche Stützen im Kellerraum unterbaut werden, um die Lasten abtragen zu können.

Nach Einbau des Stahlbaues wurden die Behälter über Dach eingehoben, die Pumpen installiert, die Komponenten miteinander verrohrt und mit der Messtechnik ausgerüstet. Letzter Schritt der Montage war die Isolierung der Behälter und die Befestigung der Kabel auf den Behälterdeckeln.

Die nachfolgenden Fotos geben einen kleinen Einblick in die Montagearbeiten.

Bild 2.25: Montage Stahlbau über drei Ebenen (+/- 0 m, + 4,5 m, + 8,5 m)

Bild 2.26: Stabilisierung der Geschoßdecke durch Zusatzfundamente und –stützen im Kellerraum

Bild 2.27: Anlieferung Rührbehälter auf Spezialfahrzeug

Bild 2.28: Einheben von Rührbehälter 3 durch die Dachöffnung

Bild 2.29: Positionierung von Rührbehälter 3 im Stahlbau

Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme der Anlage vollzog sich in mehreren Schritten. Nach der Signalkontrolle der elektrischen und elektronischen Komponenten wurde die grundsätzliche Funktion der Einzelkomponenten geprüft und entsprechende Kalibrierungen durchgeführt, z. B. für die Wiegezellen. Anschließend wurden die Abläufe pro Behälter im Einrichtbetrieb ohne und mit Wasser in kaltem Zustand getestet und eine Dichtigkeitsprüfung für die gesamte Anlage durchgeführt. Nach erfolgreicher Kaltinbetriebnahme wurde das Dampfsystem in Betrieb genommen. Letzter Schritt der Inbetriebnahme war der Automatikablauf mit Gipsstaub und Dampfbeheizung.

Produktionsstart

Die Anlage läuft seit dem 19. Januar 2015 gemäß den Vorgaben und Berechnungen. Das Ziel, die anfallenden Gipsstäube in aktiv abbindendes Bindemittel (Alpha-Halbhydrat) umzuwandeln, wurde vollständig erreicht. Die Ergebnisse sind im Einzelnen in Kapitel 3 beschrieben.

2.4 Behördliche Anforderungen

Für die Umsetzung des Verfahrens bestehen keine speziellen behördlichen Anforderungen.

2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Die Betriebsdaten werden auf einem Datenbankserver archiviert und können über eine Exportfunktion als csv-Files übertragen werden. Sämtliche Analogwerte werden als Trendverläufe langfristig gespeichert. Zusätzlich werden Bedienerhandlungen gespeichert, auf Plausibilität geprüft und überwacht. Die Material- und Energieverbräuche werden stündlich aufgezeichnet und sind über beliebig lange Zeiträume abrufbar. Die Energiezufuhr wird pro Tonne Alpha-HH-Suspension dargestellt. Sämtliche Daten können in nutzerdefinierten Berichten dargestellt werden.

3 Ergebnisse

3.1 Bewertung der Vorhabensdurchführung

Auf Basis der ersten 9 Monate seit Beginn der Inbetriebnahme wurde nachgewiesen, dass der Herstellungsprozess gemäß den Erwartungen funktioniert.
Eine kontinuierliche Produktion über einen Zeitraum von etwa einer Woche ohne Unterbrechung für Reinigungsvorgänge ist möglich. Das An- und Abfahren mit den installierten Reinigungsmöglichkeiten funktioniert problemlos. Eine in den Automatikablauf integrierte, intensive Reinigung der Behälter und ebenso das Spülen der Rohrleitungen (CIP) nach dem Ende der Produktionswoche sind ausreichend.

Der elektrische Energiebedarf (25 kWh/t Produkt) ist geringer als angenommen.
Die ermittelten Dampfmengen für die thermische Energie entsprechen in etwa den verfahrenstechnischen Berechnungen. Der reale thermische Energiebedarf zur Erzeugung des Dampfes beträgt 186 kWh/t Produkt.

Eine generelle Brauchbarkeit der verwendeten Anlagenkomponenten ist gegeben.
Auf Basis der jetzt erst 9 monatigen Laufzeit lassen sich noch keine verlässlichen Aussagen zur Standzeit kritischer Komponenten wie Armaturen und Pumpen treffen.
In den ersten 9 Monaten lagen keine gravierenden Ausfälle vor.
Die verfahrenstechnischen Berechnungen zur Auslegung der Anlage konnten im Wesentlichen bestätigt werden.
Geringe Abweichungen ergaben sich bei der Umwandlungsdauer.
Die vollständige Umwandlung des Produktes war bei der gewählten Prozessführung und der eingestellten Additiv-Dosierung nach durchschnittlich 30 Minuten ab Erreichen von 120 °C Suspensionstemperatur abgeschlossen.
Die Verlängerung der Umwandlungsdauer gegenüber den Versuchen im Technikum ist aktuell nicht zeitkritisch.

Das umgewandelte Produkt entspricht den Erwartungen.
Das aus den Abfallstäuben hergestellte α-HH lässt sich wie erwartet in die Produktionsmischung einarbeiten und zu Gipsfaserplatten verarbeiten.
Seit dem Beginn der Inbetriebnahme musste noch kein Batch verworfen oder entsorgt werden.

3.2 Stoff- und Energiebilanz

Nachfolgend wird die Stoff- und Energiebilanz in den Rührbehältern 1 und 2 dargestellt. Dabei werden die Berechnungsgrundlagen für den thermischen Energiebedarf und die Annahmen für die Auslegung den Ist-Werte gegenübergestellt. Die Ist-Werte wurden den WinCC Daten und den gemittelten Daten aus dem Datenarchiv entnommen. Dabei wurden die Daten von 1.262 Batches über einen Zeitraum von 5 Monaten ausgewertet.

Tabelle 3.1: Stoff- und Energiebilanz in Rührbehälter 1:

Berechnung	Annahmen für Auslegung	Ist-Werte (Mittel aus 1.262 Batches)
<u>Heizen Suspension:</u> QSus = m Sus * cp Sus * ΔT QSus = 5.818 kg * 2,64 kJ/kgK * 30,75 °C = 472.305 kJ m Dampf = (mSus * cpSus * ΔT) / (h'' Dampf – h' Zieltemp) h'' 2 bar Ü: 2.725 kJ/kgDampf h' 80 °C = 340 kJ m Dampf = 472.305 KJ / 2.385 kJ/kg = 198 kg	5.818 kg Suspension mit 51,6% Feststoff und 2,64 KJ/kgK Von 49,25 °C auf 80 °C heizen m Dampf = 198 kg Annahme: Rührwerk und Pumpe wandeln einen Teil der elektrischen Energie in Wärme um. Dies entspricht der Wärmemenge, die in 16 kg Dampf enthalten ist: Dampfbedarf: 182 kg (727 kg/h) 5.818 kg Suspension + 182 kg Dampfkondensat = 6.000 kg Suspension mit 50% Feststoff	5.900 kg Suspension mit 52,5% Feststoff und 2,57 KJ/kgK Von 55,4 °C auf 85,2 °C heizen m Dampfkondensat = 180,2 kg 5.900 kg Suspension + 180 kg Dampfkondensat = 6.080 kg Suspension mit 51,0% Feststoff

Tabelle 3.2: Stoff- und Energiebilanz in Rührbehälter 2:

Berechnung	Annahmen für Auslegung	Ist-Werte (Mittel aus 1.262 Batches)
<u>Heizen Suspension:</u> QSus = m Sus * cp Sus * ΔT QSus = 6.000 kg * 2,64 kJ/kgK * 38°C = 601.920 kJ <u>Heizen Behältermasse:</u> QBeh. = mBeh. * cp Edelstahl * ΔT QBeh. = 2.094 kg * 0,477 kJ/kgK * 38°C = 37.586 kJ <u>Wärmemenge für Umwandlung:</u> QReaktion = m DH * ΔH Reaktion = 2.580 kg DH * 100 kJ/kg DH = 258.000 kJ QGesamt = 601.920 kJ + 37.585 kJ + 258.000 kJ = 897.505 kJ mDampf = QGesamt / (h''-h'Zielt.) h'' 2 bar Ü: 2.725 kJ/kgDampf h' 120 °C = 505 kJ mDampf = 897.505 kJ / (2725 kJ - 505 kJ) mDampf = 404 kg	6.000 kg Suspension mit 50% Feststoff und 2,64 KJ/kgK werden durch den 120 °C warmen Behälter von 80 °C auf 82 °C geheizt 6000 kg Suspension von 82 °C auf 120 °C heizen Behälter von 82 °C auf 120 °C heizen. 3.000 kg Staub enthält 86% Dihydrat = 2.580 kg Dihydrat + 420 kg Inert (Fasern + mineral. Bestand.) 16 kg Dampfeinsparung durch Eintrag elektr. Energie Nach Umwandlung: Feststoffe: 2.580 kg DH*(145/172) = 2.175 kg alpha-HH 2.175 kg + 420 kg Inert = 2.595 kg Feststoffe freigesetztes Kristallwasser: 2.580 kg - 2.175 kg = 405 kg Dampfkondensat: 404 kg – 16 kg = 388 kg Wasser: 3.000 kg + 388 kg + 405 kg = 3.793 kg Gesamtmasse: 6.388 kg Feststoff = 40,6%	6.005 kg Suspension mit 51,0% Feststoff und 2,61 KJ/kgK Von 91,4 °C auf 126,5 °C heizen (35,1 °C) m Dampfkondensat = 364,4 kg 6.005 kg Suspension + 364 kg Dampfkondensat = 6.369 kg Suspension mit 42,3% Feststoff Anmerkung: die Differenz zwischen 6.080 kg in Behälter 1 und 6.005 kg in Behälter 2 verbleibt im Behälter 1 im Behälter und in der Rohrleitung

Unterschiede zwischen den Suspensionsmengen in Behälter 1 (Entleergewicht) und 2 (Startgewicht) werden dadurch verursacht, dass die Behälter und Rohrleitungen nicht vollständig entleerbar sind.

Gesamte in Behälter 1 und 2 kondensierte Sattdampfmenge: 180,2 kg + 364,4 kg = 545 kg

Rechnerische Auslegungsdaten: 182 kg + 388 kg = 570 kg.

Über die installierte Datenarchivierung wurden alle Batches ab Mai bis September berücksichtigt. In diesem Zeitraum waren Monate mit produktionsbedingt erheblich schwankenden Durchsatzmengen, Stillstandzeiten und Abschaltungen dabei.
Bei den Monaten mit geringer Produktion und langen Stillstandzeiten lagen die größten Verbräuche vor (Mittelwert: 181 kg Sattdampf je Tonne Staub), bei dem Monat mit der höchsten Produktivität und der geringsten Stillstandzeit mit durchschnittlich 169 kg Sattdampf je Tonne Staub.

In dem ausgewerteten Erfassungszeitraum wurden fast 4.000 Tonnen Staub verarbeitet. In diesem Zeitraum ergab sich ein Mittelwert von:

176 kg Sattdampf je Tonne Staub
204 kg Sattdampf je Tonne Produkt

204 kg Sattdampf mit 4 bar Ü (2.740 kJ/kg) weisen eine Enthalpie (h‘‘) von ca. 559 MJ = ca. 155 kWh auf.
In der Realität liegen Kondensatverluste vor, die über die Gewichtserfassung der Behälter B01 und B02 nicht ermittelt werden. Weiterhin treten Verluste bei der Dampferzeugung auf (Wirkungsgrad des Dampfkessels und Absalzverluste beim Speisewasser).
Zur Berechnung des realen thermischen Energieverbrauches wird die im erfassten Sattdampf enthaltene Energie mit 20% beaufschlagt.

Dadurch ergibt sich ein Energieverbrauch von **186 kWh / t Produkt**

Die Feststoffe der Suspension ersetzen äquivalent die Gipsfaserrohstoffe Stuckgips, α-HH und Papierfasern in der Produktion.

Gesamte Energiebilanz:
Elektrische Energie: 25 kWh/t Produkt (Feststoffe der Suspension)
Thermische Energie: 186 kWh/t Produkt (Feststoffe der Suspension)

3.3 Umweltbilanz

Für die Umweltbilanz werden folgende Kenngrößen herangezogen:

Vermeidung Gipsfaserabfall:

Gerundete Mengen der Gipsfaserabfallstoffe aus dem Jahr 2011:

12.400 t/a Gipsfaserstaub

7.060 t/a Gipsfaserplattenabfälle (trockene Hartabfälle)

2.600 t/a Gipssedimentationsschlamm

Für die aktuelle Umweltbilanz kann dann nur der Gipsfaserstaub berücksichtigt werden, da die anderen Abfallstoffe bislang noch nicht in der Anlage verwertet werden.

Einsparung Rohstoff:

Aus 12.400 t/a Gipsfaserstaub ergibt sich 10.726 t/a recyceltes Produkt.

Dadurch wird eine Menge von 10.726 t/a REA-Stuckgips, α-HH und Papierfasern ersetzt. Dieses Produkt muss nicht mehr hergestellt und transportiert werden.

Einsparung Transporte:

REA-Stuckgips, α-HH und Papierfasern:

370 Lkw-Transporte (29 Tonnen/Lkw) x 600 km hin und zurück = 222.000 km

Entsorgung:

25 t je Transport, mittlerer Transportweg 250 km = 500 km hin und zurück

Daraus ergeben sich für den Gipsfaserstaub 496 Silotransporte = 248.000 km

Gesamte Einsparung Lkw-Transporte beim Gipsfaserstaub durch Einsparung Entsorgung und Einsparung Rohstoffe: 248.000 km + 222.000 km = 470.000 km.

Bei einem angenommenen Durchschnittsverbrauch von 35 l/100 km Dieselkraftstoff entspricht diese Laufleistung einer CO_2-Emission von 432 Tonnen.

Einsparung Energie durch den energetisch günstigeren α-HH-Herstellprozess:

Thermische Energie:

Dieses Verfahren: 186 kWh/t Produkt (auf Basis der Messungen der Inbetriebnahme)

Konventionelles Verfahren: 646 kWh/t Produkt [Pei07]

Die Differenz des thermischen Energiebedarfs der Verfahren beträgt damit: 460 kWh/t

10.726 t/a x 460 kWh/t = 4.933.960 kWh/a

Bei 0,198 kg CO_2 je kWh thermischer Energie aus Erdgas ergibt sich:

4.933.960 kWh/a x 0,198 kg CO_2/kWh = 977 Tonnen CO_2 pro Jahr

Gesamte Einsparung CO_2-Emission durch die Gipsfaserstaubverwertung ohne Berücksichtigung weiterer thermischer Nebeneffekte: 1.409 Tonnen.
Durch die später geplante Verwertung der weiteren Abfälle kann die Einsparung der CO_2-Emission noch signifikant auf deutlich über 2.000 Tonnen verbessert werden.

3.4 Konzeption, Durchführung und Ergebnisse des Messprogramms

Konzeption:

Basis der Anlagenplanung und -auslegung waren die im Technikum anhand von Versuchen ermittelten Daten. Ein wesentlicher Schwerpunkt für die Planung war dabei der Einfluss der Stoffzusammensetzung und –konzentration in der Suspension auf die Umwandlungskinetik abhängig von der Temperatur und deren Einfluss auf die Produktqualität.

Darauf basierend wurde das bezüglich Energiebedarf, Prozesssicherheit und Investitionskosten optimale Anlagenkonzept entwickelt.

Für die Auslegung der wesentlichen Anlagenkomponenten (Behälter inklusive Rührwerk, Pumpen) wurden Berechnungen der Energie- und Stoffströme vorgenommen.

Zur Bestätigung der Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse und Berechnungen wurde in der Anlage eine Messtechnik installiert und Möglichkeiten zur repräsentativen Probennahme geschaffen.

Das Messprogramm ist eine Kombination aus Daten, die in der Anlage erfasst und über die installierte Software ausgewertet werden (Massen- und Volumenströme, Aufheizzeiten, Temperaturen, Drücke, thermischer und elektrischer Energiebedarf) und Analysen von Proben, die in der Anlage nach einem festgelegten Plan entnommen werden.

Die in der Anlage erfassten Messdaten werden in Echtzeit in eine Datenbank ausgelagert und können zeitgetaktet und batchweise ausgewertet werden, wobei jeder Batch fortlaufend durchnummeriert wird.

Damit soll bestätigt werden, dass die Produktivität, der Energiebedarf und die erzeugte Bindemittelqualität den Planungsdaten entsprechen.

Durchführung:

Bei Start der Inbetriebnahme lag die Datenbank noch nicht vor. Die genaue Definition dieser Datenbank sollte auf Basis der Erfahrung aus der Inbetriebnahme vorgenommen werden. Die für uns wichtigen Kennwerte, thermischer und elektrischer Energiebedarf/Tonne Inputmaterial, stehen dann sofort zur Verfügung. Der thermische Energiebedarf durch die Erfassung der Kondensatmengen in den Behältern 1 und 2 hinreichend genau ermittelt.

Begleitend zur Inbetriebnahme wurden daher die Daten per Hand anhand der WinCC-Aufzeichnungen ausgewertet, die im Labor ermittelten Werte wurden diesen gegenübergestellt.

Nachfolgend werden Trendverläufe für die drei Behälter gezeigt, wobei jeweils ein Batch dargestellt wurde.

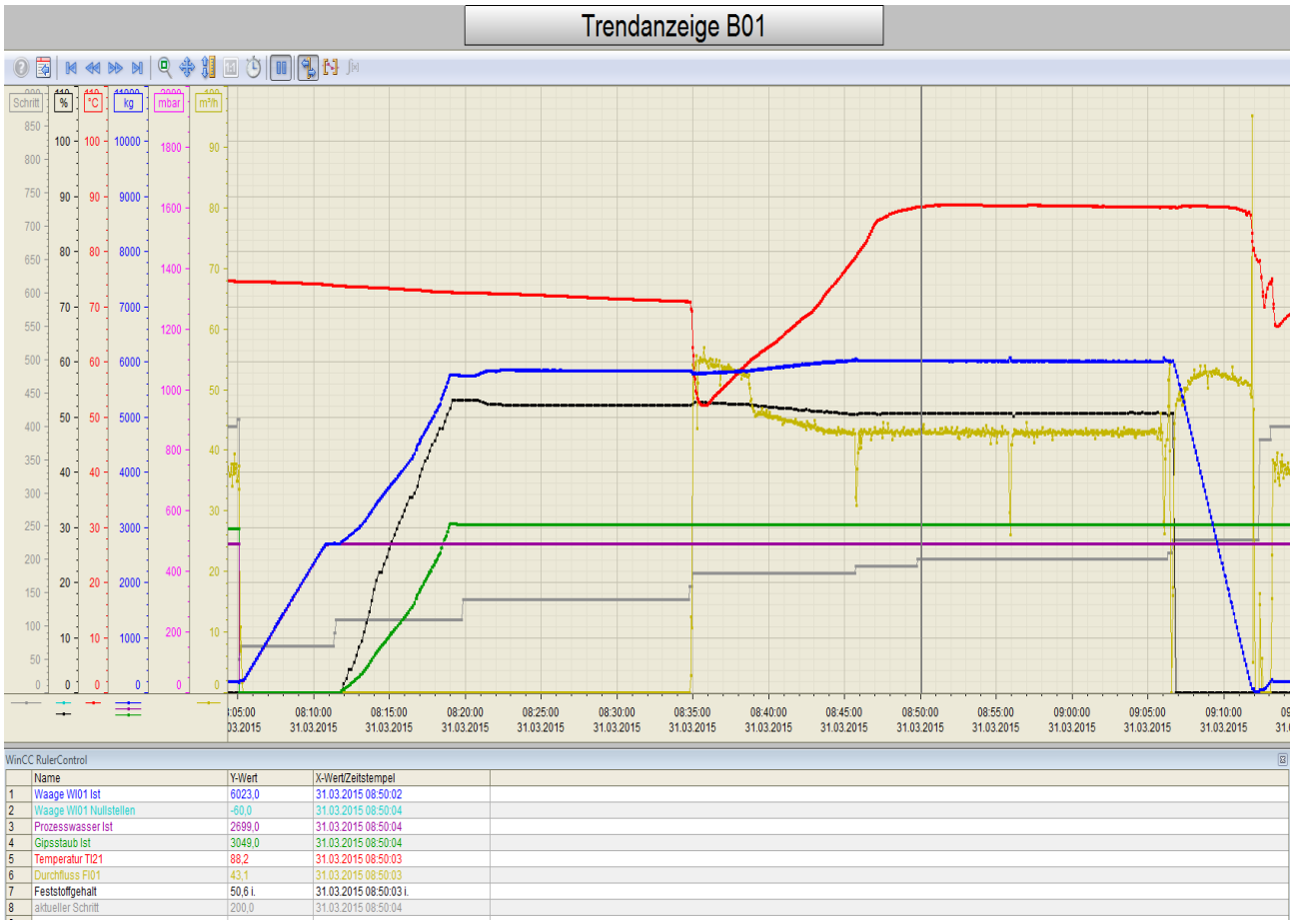

Bild 3.1: Trendverlauf eines Batches in Behälter 1

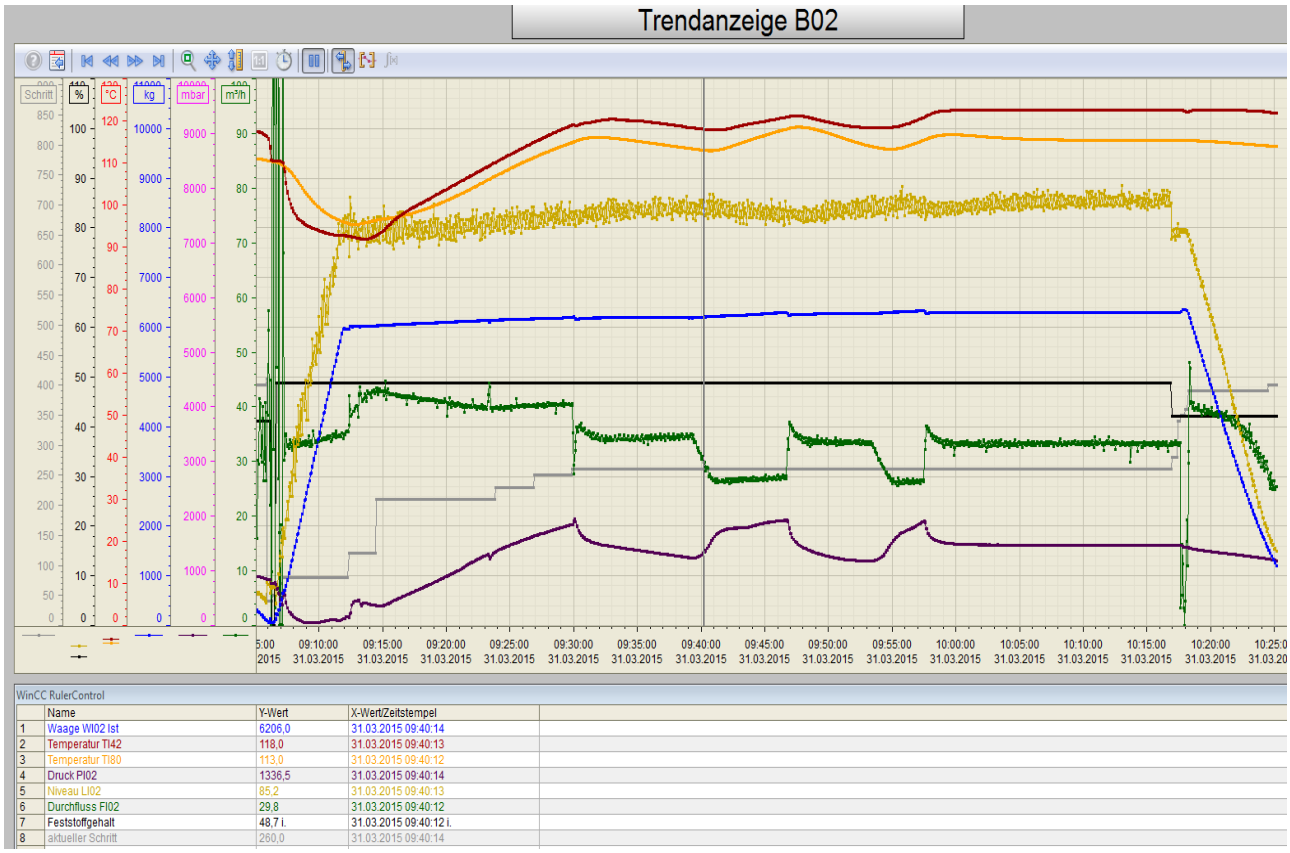

Bild 3.2: Trendverlauf eines Batches in Behälter 2

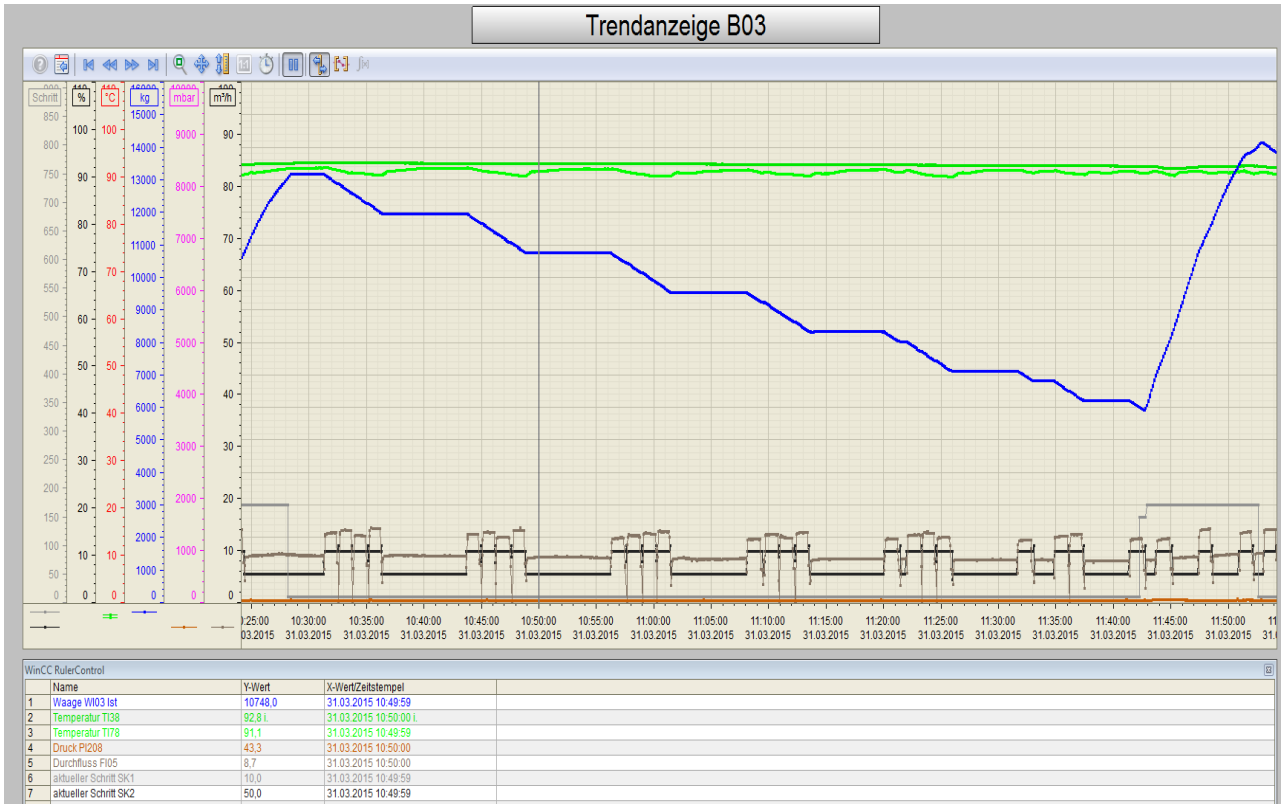

Bild 3.3: Trendverlauf zur Verarbeitung eines Batches in Behälter 3 (mit zweimaliger Nachfüllung aus Behälter 2)

Ergebnisse:

Elektrischer Energiebedarf:

Der elektrische Energiebedarf der gesamten Recycling-Anlage setzt sich zusammen aus dem Wert, der über die Haupteinspeisung erfasst wird und dem Wert der Brauchwasservorwärmung. Der Energiebedarf der Brauchwasservorwärmung beträgt bei voller Produktion im Mittel 3,6 kWh.

Über die Haupteinspeisung wird die Wirkenergie stundenweise gemittelt. Bei vollem Betrieb ergibt sich bei einer durchgehenden Produktion im Normalbetrieb über 58 Stunden ein Mittelwert von ca. 30 kWh. In diesem Zeitraum wurden 35 Batches mit je 3 Tonnen Gipsstaub umgewandelt und weiterverarbeitet.

Die stündlichen Mittelwerte der Wirkenergie schwanken zwischen 22 bis 37 kWh, vor allem abhängig von der Auslastung der Antriebe der Rührwerke, Pumpen und Gebläse für die Förderung der Trockenstoffe.

Beim Abfahren der Anlage reduziert sich der Wert auf 12 kWh, sobald nur noch der Vorratsbehälter in Benutzung ist und die weiteren Behälter abgestellt sind.

Während der Reinigung und dem Abfahren sinkt der stündliche Wert auf 6 bis 12 kWh, nach dem vollständigen Abfahren der Anlage auf ca. 1 kWh.

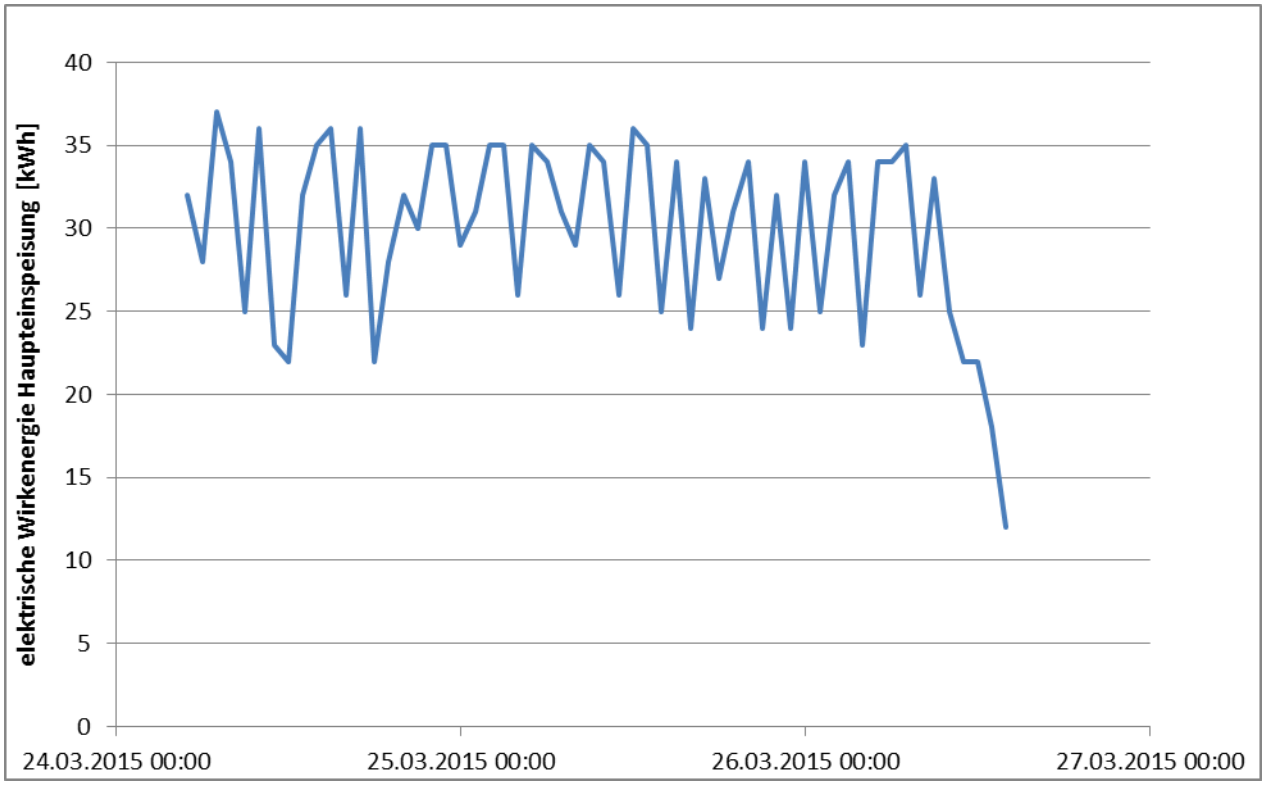

Bild 3.4: Stündliche Mittelwerte der elektrischen Wirkenergie der Haupteinspeisung der Recyclinganlage im Zeitraum 24.3.15, 5:00 Uhr bis 26.3.15, 14:00 Uhr

Die folgenden “screen shots“ aus dem WIN CC zeigen die Werte der Wirkleistung bei unterschiedlichen Anlagenzuständen. Einen besonders großen Einfluss auf die Wirkleistung hat das Fördergebläse für den Transport des Gipsstaubes in den Vorlagebehälter.

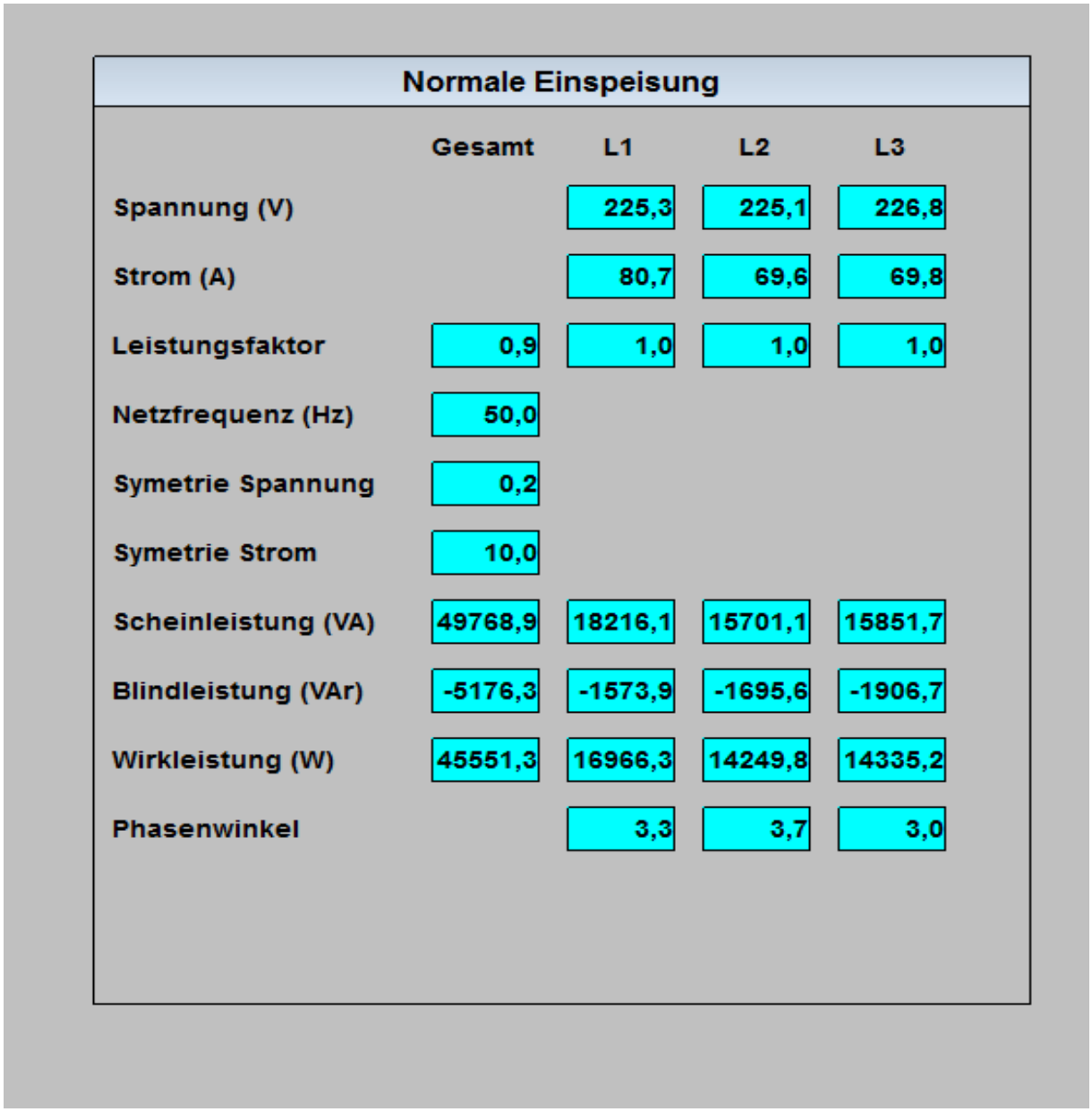

Bild 3.5: “screen shot“ der Haupteinspeisung der Recyclinganlage am 11.2.15 um 9:20 Uhr

Die Pumpen und Rührwerke aller Behälter sind um 9:20 Uhr in Betrieb, die Förderung des Gipsstaubs aus dem Silo in den Vorlagebehälter ist aktiv. Dabei stellt sich ein typischer Wert von 46 +/-2 kW Wirkleistung ein, der maximale Wert beträgt ca. 51 kW.

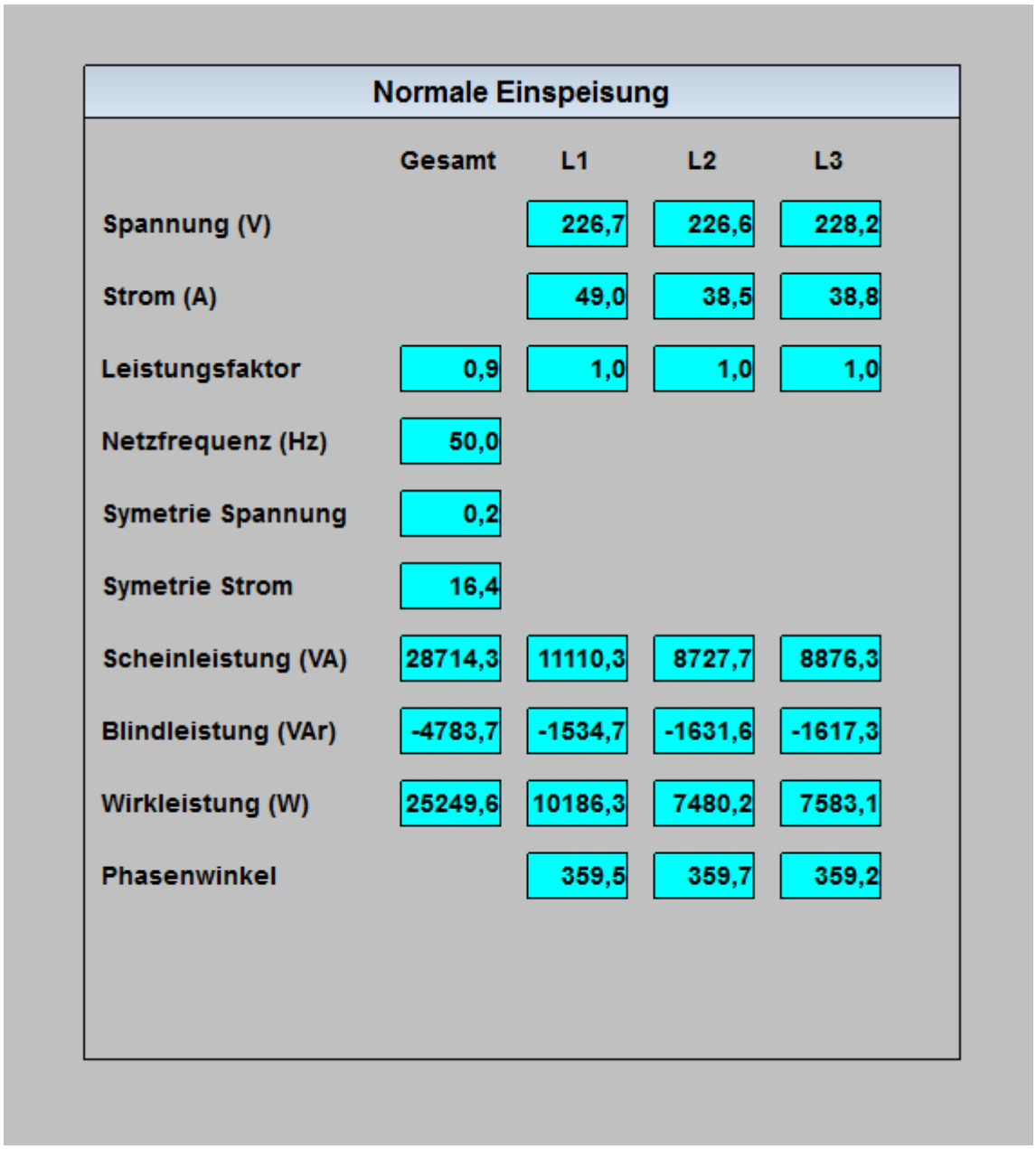

Bild 3.6: “screen shot“ der Haupteinspeisung der Recyclinganlage am 11.2.15 um 11:55

Zu diesem Zeitpunkt wird Behälter 1 mit Gipsstaub befüllt, die Pumpe in Behälter 1 ist außer Betrieb, Behälter 2 und 3 sind voll in Betrieb. Das Gebläse für die Förderung des Gipsstaubes in den Vorlagebehälter ist inaktiv.

Seit dem 1.5.2015 wird auch der elektrische Energieverbrauch im Datenarchiv abgelegt. Seitdem wurde über einen Zeitraum von ca. 5 Monaten ein mittlerer Verbrauch von 21,7 kWh/t Staub ermittelt, was 25,0 kWh/t Produkt entspricht (inklusive Wasservorwärmung).

Thermischer Energiebedarf :

Im Dauerbetrieb der Anlage wurden die mittleren Kondensatmengen seit Mai (Datenarchivierung) über einen Zeitraum von 5 Monaten (1262 Batches) über die Gewichtszunahmen aus der Dampfbeheizung in den Behältern ermittelt.

In diesem Zeitraum wurden 3,1 t Staub je Batch eingewogen, woraus nach der Umwandlung 2,686 t Produkt (Feststoff der Suspension) je Batch entstehen.

Behälter 1: 180,2 kg Dampfkondensat (Temperaturerhöhung der Suspension von im Mittel 55,4 °C auf 85,2 °C)

Behälter 2: 364,4 kg Dampfkondensat (Temperaturerhöhung der Suspension von im Mittel 91,4 °C auf 126,5 °C und Reaktionsenthalpie zur Umwandlung von DH in HH)

Die 545 kg Sattdampfkondensat in Behälter 1 und 2 je Batch ergeben 176 kg Sattdampf je Tonne Staub, was 204 kg Sattdampf je Tonne Produkt entspricht.

Die Enthalpie von Sattdampf mit 4 bar Ü beträgt 2.740 MJ/1.000 kg, woraus sich über den erfassten Dampfverbrauch ca. 559 MJ = ca. 155 kWh je Tonne Produkt ergibt.

Unter Berücksichtigung der Verluste und des Wirkungsgrades (physikalischer Energieinhalt Dampf aus B01 und B02 um 20% beaufschlagt ergibt den realen Verbrauch, siehe Kapitel 3.2) errechnet sich ein realer Verbrauch von 16,4 Nm³ Erdgas / t Produkt.

Produkt:

In den ersten 2,5 Monaten wurde jeder Batch auf Vollständigkeit der Umwandlung mit einer eigens dafür entwickelten Schnellprüfmethode geprüft. Spätestens 10 Minuten nach der Entnahme liegt das Ergebnis vor, ob die Suspension vollständig zu Alpha-Halbhydrat umgewandelt ist.

Die Umwandlung des Produktes war bei der gewählten Prozessführung und der eingestellten Additivierung nach durchschnittlich 30 Minuten ab Erreichen von 120 °C Suspensionstemperatur abgeschlossen. Damit werden ca. 10 bis 20 Minuten längere Haltezeiten benötigt, als dies in der Technikumsanlage ermittelt wurde und ca. 10 Minuten längere Haltezeit, als dies für die Konzeption der Anlage angesetzt wurde.

Diese Verlängerung ist bedingt durch eine Anreicherung von Inhaltsstoffen im Kreislaufwasser, welche sich verzögernd auf die Umwandlung auswirken.

Durch den Zusatz von Kristallisationskeimen ist eine Kürzung der Zeit um 10 bis 20 Minuten machbar, womit die Auslegungswerte erreicht werden.

Durch Einsatz eines weiteren Additives und / oder durch eine Temperaturanpassung kann die erforderliche Haltezeit auf den Auslegungswert und auch noch weiter reduziert

werden, was aber derzeit nicht erforderlich ist, da die Batchzeiten sicher ausreichend sind für die Verarbeitung der anfallenden Abfallstäube.

Die Eigenschaften des umgewandelten Produktes entsprechen den Erwartungen.
Das folgende Bild zeigt eine typische mikroskopische Aufnahme einer aus dem Staub hergestellten α-HH Probe.

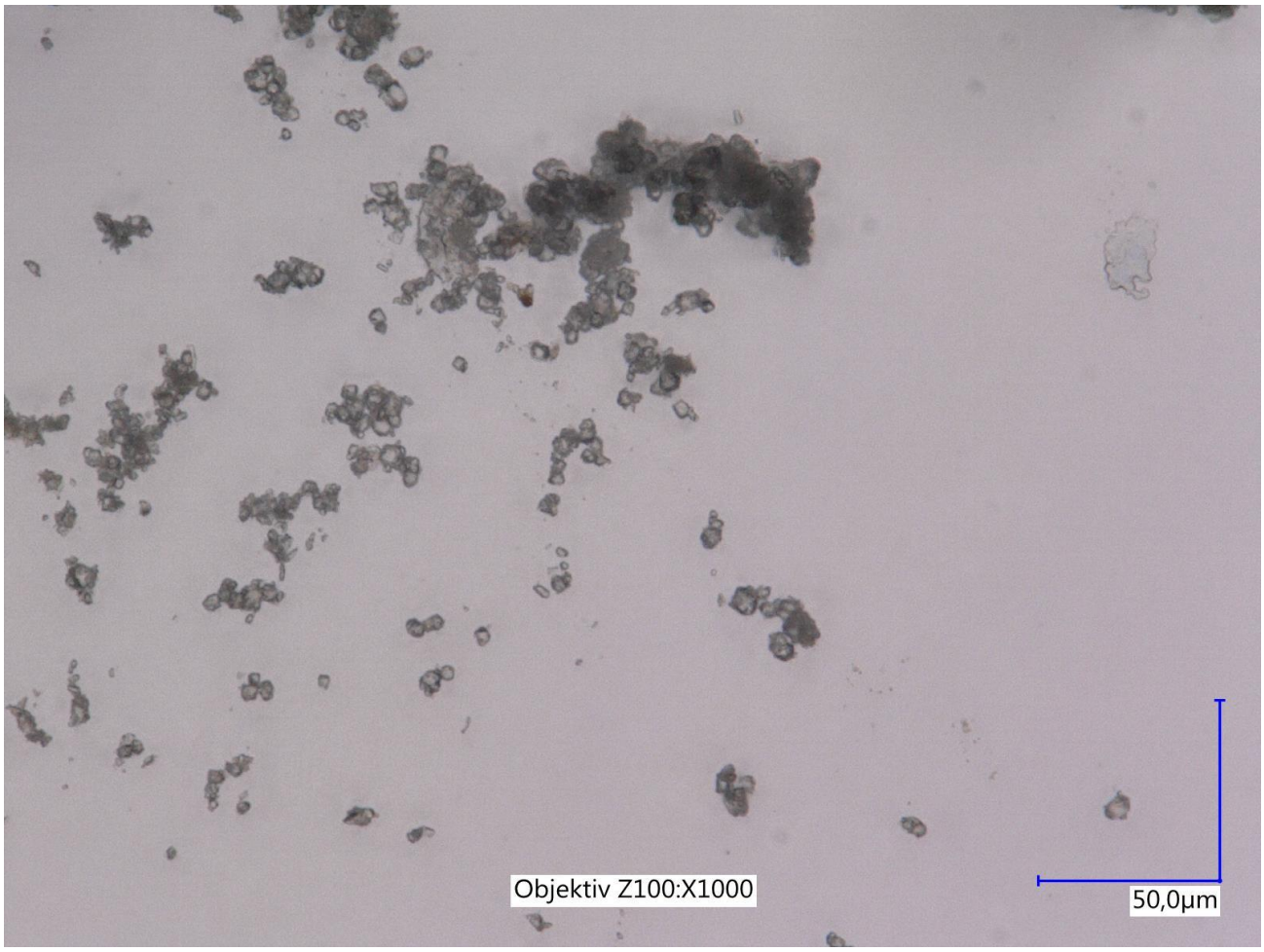

Bild 3.7: Mikroskopische Durchlicht-Aufnahme einer nach Umwandlung zu α-HH getrockneten und filtrierten Gipsfaserstaub-Suspension

Das L/D - Verhältnis der Kristalle liegt bei nahezu 1, die Kristalle zeigen eine rundliche bis quadratische Form. Die typische Größe der α-HH Kristalle beträgt 5 µm (1 bis 10 µm). Teilweise liegen 10 bis 25 µm große Agglomerate mehrerer Kristalle vor.
Die typische mittlere Korngröße x_{50} nach lasergranulometrischer Analyse beträgt 10 µm. Bei den von uns gewählten Parametern findet durch die Umkristallisation der staubförmigen Abfälle keine Korngrößenerhöhung statt, aber eine signifikante Reduzierung der BET-Oberfläche.

Die mittlere Korngröße, die Korngrößenverteilung und das Aspekt-Verhältnis kann durch die Menge und Art der Additive, durch die Wahl der Rohstoffe und durch Zusätze von Keimkristallen in einem großen Bereich beeinflusst werden.

Das aus den Abfallstäuben hergestellte α-HH lässt sich wie erwartet in die Produktionsmischung einarbeiten und zu Gipsfaserplatten verarbeiten.
Überraschend hat sich bei Versuchen mit diesem Material herausgestellt, dass auch sehr hohe Anteile des anfallenden Abfallstaubes trotz der geringen Korngrößen ohne Einbußen der Produktivität und der Produkteigenschaften eingearbeitet werden können. Daher ist nach jetzigen Kenntnissen keine Anpassung der Rohstoffmischung bei Erhöhung der verarbeiteten Abfallmengen erforderlich.

3.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde auf Basis der aktuellen Kosten (Energie, Rohstoffe, Entsorgung, Additive, Mitarbeiterkosten) und des während der Inbetriebnahme ermittelten Energiebedarfs mit den Mengen aus dem Förderantrag für die anfallenden Gipsfaserabfälle vorgenommen. Berücksichtigt wurde der aktuelle Zustand, bei welchem nur die staubförmigen Abfälle, aber nicht die stückigen und schlammförmigen Abfälle verwertet werden.

Tabelle 3.3: Berechnung der Wirtschaftlichkeit bei 7.200 Produktionsstunden pro Jahr mit zusätzlichen Personalkosten für die Bedienung (50 Wochen, 6 Tage/Woche)

Recycling-Anlage	Nur Gipsfaserstäube			
Kaufpreis:	2.700.000 €	Summe aller Kosten		
	500.000 €	Förderung		
	2.200.000 €	Investition für Lindner Dettelbach		
Entsorgung	12.400 t/a	Staub		
	10.726 t/a	recyceltes Produkt (Feststoffe)		
Investitionsrechnung				
kalk. Abschreibung	169.231 €/a		13	Jahre
kalk. Zins	55.000 €/a		5%	Zins
Personal	216.000 €/a		7.200	Stunden/Jahr
			30	€/h
Betriebskosten	162.000 €/a	Instandhaltung	6%	vom Kaufpreis
	57.040 €/a	Additive		
	45.586 €/a	Energie elektrisch	25 kWh/t Produkt	0,17 €/kWh
	77.399 €/a	Energie thermisch Dampferzeugung	16,4 Nm³Gas/t Produkt	0,44 €/Nm³
	39.140 €/a	Zusatzkosten für Dampfanlagen (Personal, Chemie, Wartung, Reparaturen, TÜV)		
Summe Betriebskosten	**821.395 €/a**	Abschreibung + Zins + Personalkosten + Betriebskosten		
Einnahmen	533.200 €/a	Einsparung Entsorgung	43,00 €/t	
	482.670 €/a	Einsparung Rohstoffeinkauf	45,00 €/t	
Summe Einnahmen	**1.015.870 €**			
Ergebnis	**194.475 €**	Summe Einnahmen - Summe Betriebskosten		
Amortisationszeit	**5,3 Jahre**	Anschaffungskosten / (Ergebnis + kalk. Abschreibung + kalk. Zins)		

Tabelle 3.4: Berechnung der Wirtschaftlichkeit bei 7.200 Produktionsstunden pro Jahr ohne zusätzliche Personalkosten für die Bedienung (50 Wochen, 6 Tage/Woche)

Recycling-Anlage	Nur Gipsfaserstäube			
Kaufpreis:	2.700.000 €	Summe aller Kosten		
	500.000 €	Förderung		
	2.200.000 €	Investition für Lindner Dettel-bach		
Entsorgung	12.400 t/a	Staub		
	10.726 t/a	recyceltes Produkt (Feststoffe)		
Investitionsrechnung				
kalk. Abschreibung	169.231 €/a		13	Jahre
kalk. Zins	55.000 €/a		5%	Zins
Personal	0 €/a		7.200	Stunden/Jahr
Betriebskosten	162.000 €/a	Instandhaltung	6%	vom Kaufpreis
	57.040 €/a	Additive		
	45.586 €/a	Energie elektrisch	25 kWh/t Produkt	0,17 €/kWh
	77.399 €/a	Energie thermisch Dampferzeugung	16,4 Nm³Gas/t Produkt	0,44 €/Nm³
	39.140 €/a	Zusatzkosten für Dampfanla-gen (Personal, Chemie, Wartung, Reparaturen, TÜV)		
Summe Betriebskosten	**605.395 €/a**	Abschreibung + Zins + Person-alkosten + Betriebskosten		
Einnahmen	533.200 €/a	Einsparung Entsorgung	43,00 €/t	
	482.670 €/a	Einsparung Rohstoffeinkauf	45,00 €/t	
Summe Einnahmen	**1.015.870 €**			
Ergebnis	**410.475 €**	Summe Einnahmen - Summe Betriebskosten		
Amortisationszeit	**3,5 Jahre**	Anschaffungskosten / (Ergebnis + kalk. Abschreibung + kalk. Zins)		

Das Ergebnis und die Amortisationszeit werden wesentlich dadurch beeinflusst, ob die Anlage ohne zusätzliches Personal bedient werden kann, also nur durch den Schichtführer der Leitwarte, der auch den übrigen Prozess der Gipsfaserplattenherstellung überwacht.

Nach den ersten neun Monaten seit Beginn der Inbetriebnahme zeichnet sich ab, dass der Schichtführer dazu in der Lage ist. Die Personalkosten für die Instandsetzung sind bereits im Kostenblock Instandhaltung enthalten. Die 6% vom Kaufpreis sind kalkulatorisch relativ hoch angesetzt, da Betriebserfahrungen mit den verwendeten Komponenten nicht vorliegen.

Das Ergebnis und die Amortisationszeit hängen zudem erheblich von den Betriebsstunden ab. Bei einem Durchsatz von 10.330 t Staub pro Jahr (6.000 Betriebsstunden pro Jahr = 50 Wochen mit 5 Tage/Woche) erhöht sich die Amortisationszeit ohne Zusatzpersonal auf 4,4 Jahre.

Das Ergebnis ist bis zu einem minimalen Durchsatz von 6.320 t Staub pro Jahr neutral (3.670 Betriebsstunden pro Jahr), wobei die Amortisationszeit auf ca. 10 Jahre ansteigt.

3.6 Technischer Vergleich zu konventionellem Verfahren

Die als Abfall anfallenden Gipsfaserstäube (Calciumsulfat-Diyhdrat) sind auch mit herkömmlichen Anlagen wie Drehöfen oder Mahlkalzinieranlagen zu Stuckgips (Calciumsulfat-Beta Halbhydrat) kalzinierbar.
Aber die praktische Erfahrung hat gezeigt, dass ein aus diesen Abfallstoffen erzeugter Stuckgips bei der Rückführung in die Gipsfaserplattenproduktion mengenmäßig stark limitiert ist und nachteilige Eigenschaften bei Produktivität und Produkteigenschaften bewirkt. Um diese Nachteile zu umgehen, ist eine Umkristallisation zu Calciumsulfat-Alpha-Halbhydrat (α-HH) erforderlich, was bislang mit einem derartigen Rohstoff wie dem Abfallstaub noch nicht durchgeführt wurde.

Der tabellarische Vergleich des neu entwickelten Verfahrens zum Stand der Technik ist in Kapitel 2.2, Tabelle 2.1, beschrieben. Im Vergleich zu dem Stand der Technik werden die energetisch und maschinell aufwändigen Prozessschritte 4 bis 6 aus der Tabelle 2.1 eingespart.
Im Vergleich zu bekannten integrierten Verfahren, bei denen die Prozessschritte 4 bis 6 aus Tabelle 2.1 ebenfalls eingespart werden, liegt bei dem neu entwickelten Verfahren ein deutlich reduzierter Energiebedarf vor.
Bei den bekannten integrierten Verfahren ist ein geringer Feststoffanteil in der Suspension erforderlich, da α-Halbhydrat Kristalle mit hohem L/D-Verhältnis zur Verarbeitung einen hohen Wasseranteil benötigen. Das bewirkt einen um den Faktor 3 bis 6 höheren thermischen Energiebedarf als bei dem geförderten Verfahren.

Der Feststoffgehalt in der Suspension wirkt sich entscheidend auf den thermischen Energiebedarf aus. Da Wasser etwa die 4-fache spezifische Wärmekapazität wie Gips aufweist, bewirkt ein möglichst hoher Feststoffanteil in der Suspension erhebliche energetische Einsparungen bei der Beheizung, da die Hauptmenge der Energie der thermischen Behandlung für die Beheizung und nicht für die endotherme Umwandlung benötigt wird.

Zur Erläuterung des Zusammenhanges Feststoffanteil in der Suspension und Energiebedarf für die Aufheizung und Umwandlung wurden Berechnungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Bild 3.8 grafisch dargestellt sind. Die Berechnungen zum Energiebedarf wurden auf Grundlage der spezifischen Wärmekapazitäten der Suspen-

sion und dem Energiebedarf für die endotherme Reaktion von DH zu HH durchgeführt.

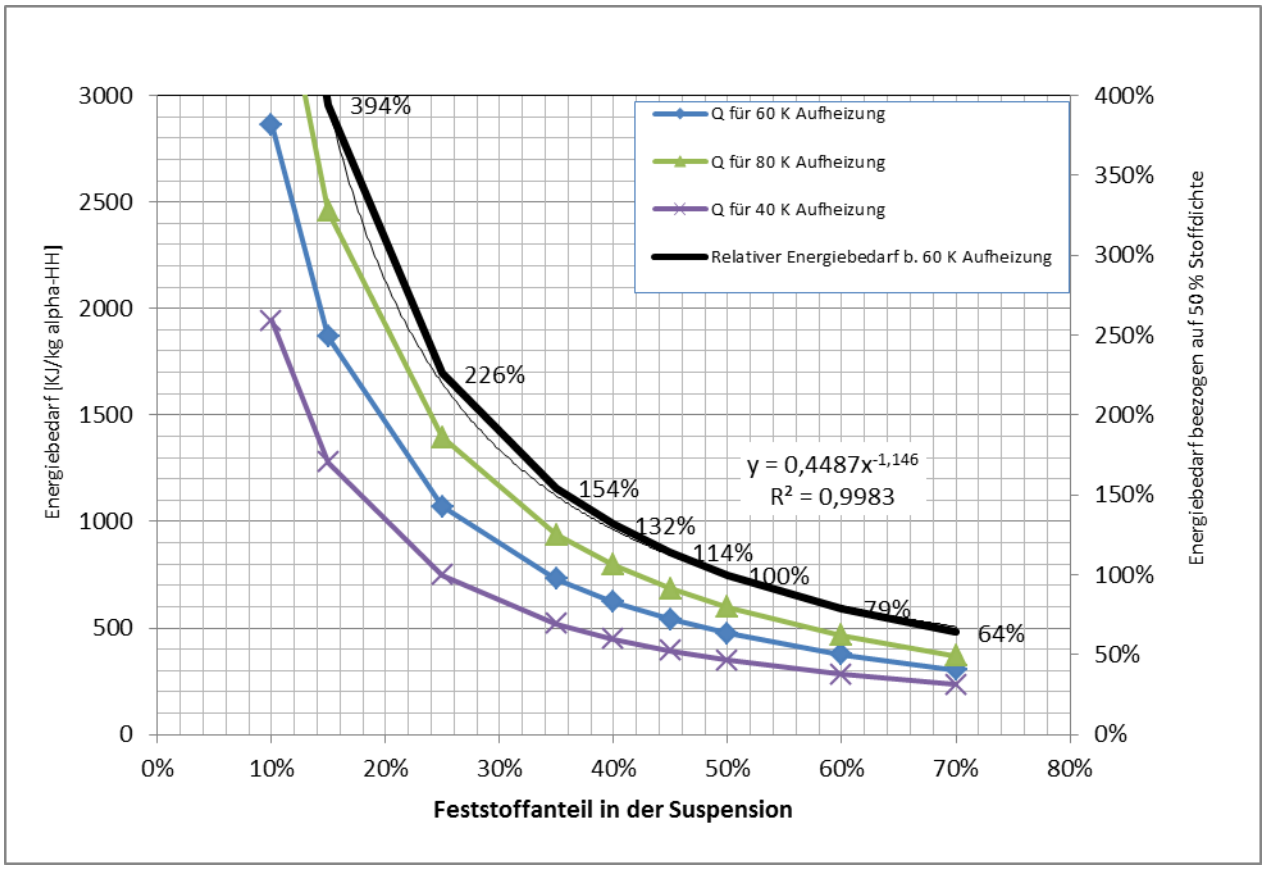

Bild 3.8: Energiebedarf für Aufheizung und Umwandlung der Suspension abhängig vom Feststoffanteil für drei unterschiedliche Temperaturdifferenzen zum Kochen der Suspension.

Bei dem geförderten Verfahren liegt ein Feststoffgehalt von 50 M-% der Suspension vor. Diese Suspension wird typischerweise um 60 K aufgeheizt.

Der absolute Energiebedarf für die Aufheizung um 60 K und Umwandlung ist auf der linken Ordinatenachse dargestellt (blaue Linie, Energiebedarf: ca. 480 kJ/kg alpha-HH).

Der relative Energieverbrauch bei 60 K Aufheizung abhängig vom Feststoffgehalt wird mit der schwarzen Linie dargestellt, die sich auf die rechte Ordinatenachse bezieht. Der Energiebedarf der anderen Feststoffgehalte wurde hier auf den Energiebedarf der Suspension mit 50% Feststoffgehalt normiert (Wert an schwarzer Linie: 100% bei 50% Feststoffgehalt).

Dem Kurvenverlauf ist zu entnehmen, dass der spezifische thermische Energiebedarf mit zunehmendem Feststoffgehalt abnimmt. Dieser Zusammenhang ist nicht

linear, sondern potentiell, wobei die Unterschiede bei Feststoffgehalten < 35 M-% besonders groß werden.

Der im Prozess maximal mögliche Feststoffgehalt ist abhängig von der Viskosität der Suspension. In der Praxis wurde festgestellt, dass die Grenze für eine pumpfähige Suspension bei ca. 50 – 55 M-% liegt, wenn reiner Schleifstaub als Rohstoff verwendet wird.

Im Gegensatz zu [Ish78], [Mir91], [Mil04] kann das geförderte Verfahren mit direkter Suspensionsrückführung damit mit deutlich erhöhtem Feststoffgehalt im Reaktor durchgeführt werden.

Bei [Ish78] wird die Verwendung von faserigem α-HH mit einem Aspekt-Verhältnis von ca. 100 beschrieben, hergestellt in einer Suspension mit 10 M-% Feststoffanteil. Das so erzeugte α-HH wird mit einer Papierfaserpulpe und Additiven gemischt zu Gipsfaserplatten verarbeitet. Bei einem Feststoffgehalt von 10% beträgt der Energiebedarf ca. 2860 kJ/kg alpha-HH (blaue Linie in Bild 3.8) und ist damit um den Faktor 6 höher als bei 50% Feststoffgehalt!

Bei [Mir91] wird der Gips mit einer Holz- oder Papierfaserpulpe gemischt als Suspension zu α-Halbhydrat umgewandelt, anschließend zu Gipsfaserplatten geformt. Diese Suspension weist einen hohen Wasseranteil und damit geringen Feststoffanteil von bevorzugt 5-10 M-% auf.

In einem nachfolgenden Patent [Mil04] wurde das Verfahren so abgewandelt, dass ein L/D-Verhältnis von bevorzugt 10 bis 20, aber maximal 50 für das α-HH eingestellt wird.

In einer Weiterentwicklung des Verfahrens wurde von USG zur Energieeinsparung eine Änderung vorgenommen [Ski08]. Nach diesem Patent wird nur ein Teil der Zellulosefasern zusammen mit dem Gips in der Suspension zu α-HH umgewandelt. Nach der Umwandlung wird diese Suspension aus α-HH und Fasern mit der restlichen Zellulosepulpe vermischt und zu Gipsfaserplatten verarbeitet. Dadurch können nach [Ski08] Feststoffgehalte von ca. 25-28 M-% in der Suspension im Vergleich zu 16-18 M-% Feststoff bei Umwandlung mit allen Fasern realisiert werden. Die Energieeinsparung daraus wird mit 40-50% benannt. Nach weiteren Angaben in diesem Patent wird bei 140 bis 152 °C umgewandelt, wobei 16 bis 22 Minuten als Haltedauer angegeben werden.

Mit dem geförderten Suspensionsverfahren lassen sich durch die Verwendung der Recycli**n**grohstoffe um ca. 20 bis 30 K geringere Temperaturen bei vergleichbaren Reaktionszeiten realisieren. Eine um 20 K geringere Aufheizung bewirkt bei 25%

Feststoff eine Senkung des Energiebedarfs um ca. 300 bis 350 kJ/kg erzeugtes α-HH (Unterschied zwischen grüner und blauer Kurve in Bild 3.8).

Mit den optimierten Bedingungen unter Verwendung der anfallenden Stäube kann sogar ohne Zusatz von REA-Gips mit einem Feststoffanteil von 50 bis maximal 55 M-% produziert werden. Damit liegen trotz der im Staub enthaltenen Fasern deutlich erhöhte Feststoffgehalte gegenüber den genannten Patenten, auch gegenüber den neusten, verbesserten Verfahren, vor [Ski08].
Nach [Ski08] ist mit nadelförmigen Kristallen und Teilaufheizung der Pulpe bestenfalls ein Feststoffanteil von ca. 25-28 M-% möglich.
Nach unseren Ergebnissen sind selbst bei Verwendung von 100% Abfallmix 50 M-% Feststoff machbar, womit etwa 126% Energie für Aufheizung und Umwandlung gegenüber dem genannten Verfahren eingespart werden (siehe Bild 3.8, 35 M-% Feststoffgehalt und 226% Energiebedarf, schwarze Linie).
Durch den deutlich erhöhten Feststoffgehalt und die um ca. 20 K reduzierte Temperatur bei dem geförderten Verfahren ergibt sich damit ein um den Faktor 3 reduzierter Energieverbrauch im Vergleich zum patentierten Verfahren von USG aus dem Jahr 2008 [Ski08].

Weitere Unterschiede zum Stand der Technik und Besonderheiten:
Die Anlagen nach dem Stand der Technik produzieren überwiegend kontinuierlich. Bei diesen Anlagen ist nach An- und Abfahren ein entsprechender Zeitraum erforderlich, bis ein gleichmäßiges Produkt vorliegt. Eine Veränderung des Durchsatzes hat bei den kontinuierlichen Anlagen immer einen Einfluss auf die erzeugte Qualität.
Daher ist das kontinuierliche Verfahren für eine in die Produktion integrierte α-HH Anlage nicht optimal, da störungs- und produktbedingt immer wieder mit schwankenden Verbräuchen des erzeugten α-HH und damit einem reduzierten Durchsatz oder mit An- und Abfahrvorgängen zu rechnen ist.

4 Literatur

[BVG12] Qualitätsanforderungen an Gips aus Recyclinganlagen vom Bundesverband der Gipsindustrie e. V. Stand: April 2012

[Fth10] Vollzug der Kali-Haldenrichtlinie vom Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz, Schreiben vom 26.10.2010

[Ish78] Patent DE 2823550 (30.05.1978): Gipsformteile und Verfahren zu deren Herstellung. Ishida, Yamada, Nagoya, Hideki, Ama, Aichi. Nippon Hartboard. Priorität: JP 63756-77 (30.05.1977)

[Mil04] Patent US 2005/0161853 A1 (28.6.2004): Process for production of Gypsum/Fiber Board. Miller, Yosick. USG

[Mir91] Patent US 5320677 A (15.10.1991): Improved process for production of gypsum/fiber board, Mirza, Baig. USG

[Pei07] PE-International GmbH, „Datenprojekt Grunddatensätze Gips und Gipsprodukte im Netzwerk Lebenszyklusdaten“ Projektbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung , Hrsg. Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse – Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme, August 2007

[Ski08] Patent PCT/US2008/087458 (18.12.2008): Low fiber calcinations process for making gypsum fiber board, Skinner, Lange, Blackburn. USG

5 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung		Volltext
α-HH		Calciumsulfat-Alpha Halbhydrat
ß-HH		Calciumsulfat-Beta Halbhydrat
bar Ü		Überdruck gemessen in bar
BET-Oberfläche		Spezifische Oberfläche der Festkörper berechnet aus der Stickstoff-Adsorptionsisotherme nach Brunauer, Emmet und Teller
BSA		Bernsteinsäureanhydrit
CIP		Cleaning in place
DH		Calciumsulfat-Dihydrat
FGH		Fasergehalt
GKP		Gipskartonplatte
HH		Calciumsulfat-Halbhydrat
KW		Kristallwasser
L/D		Länge zu Durchmesser
REA-Gips		Rauchgas-Entschwefelungs-Anlagen Gips
USG		United States Gypsum Company
X_{50}		Korngröße bei 50 Volumen% Durchgang
Win CC		Windows control center: PC-basiertes Prozessvisual-isierungssytem der Firma Siemens

6 Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1: Produktionsstandort in Dettelbach
Bild 1.2: Ablaufschema der Gipsfaserplattenproduktion
Bild 2.1: Verfahrensschema für die Umwandlung von Gipsfaserabfällen im Suspensionsverfahren
Bild 2.2: Schema zur Abwärmenutzung
Bild 2.3: Schema für Ringleitung an Behälter 3
Bild 2.4: Zeit- und Temperaturverlauf für Rührbehälter 1
Bild 2.5: Visualisierung und Bedienoberfläche für Rührbehälter 1 (Ansetzbehälter)
Bild 2.6: Gesamtansicht der Alpha-Anlage mit Prozesswasserbehälter und Umpumpleitung für die Versorgung der Nassmischer
Bild 2.7: Isometrieansicht der Anlage
Bild 2.8: Seitenansicht der Anlage
Bild 2.9: Draufsicht auf die Rührbehälter 1, 2 und 3
Bild 2.10: Rührbehälter 1, 2 und 3 (Behälterunterteile mit Isolierung und Pumpen)
Bild 2.11: Rührbehälter 1, 2 und 3 (Behälterdeckel mit Isolierung)
Bild 2.12: Rührbehälter 5 mit Zuführschnecke
Bild 2.13: Ausschleusung von Gipsstaub mit Gebläse und Durchblaseschleuse
Bild 2.14: Empfangsbehälter für Gipsstaub als Puffer für die Befüllung von Rührbehälter 1
Bild 2.15: Visualisierung und Bedienoberfläche für die Prozesswasservorwärmung
Bild 2.16: Schichtenspeicher mit Verrohrung und Umwälzpumpen
Bild 2.17: Brauchwasserbehälter mit Abzugs- und Umwälzpumpe
Bild 2.18: Abgaswärmetauscher nach Dampfkessel
Bild 2.19: Brüdenkühlung mit Gebläse und Wärmetauscher
Bild 2.20: Dampfeinspeisung mit Druckbegrenzungsventil
Bild 2.21: Dampfverteiler mit Hand- und Automatikventilen
Bild 2.22: Druckerhöhungsstation für Reinigungswasser
Bild 2.23: Reinigungslanze (Erprobung Prototyp)
Bild 2.24: Behälter mit Pumpe und Krählwerk für die Aufnahme von Fehlchargen und Reinigungswasser
Bild 2.25: Montage Stahlbau über drei Ebenen (+/- 0 m, + 4,5 m, + 8,5 m)
Bild 2.26: Stabilisierung der Geschoßdecke durch Zusatzfundamente und –stützen im Kellerraum
Bild 2.27: Anlieferung Rührbehälter auf Spezialfahrzeug
Bild 2.28: Einheben von Rührbehälter 3 durch die Dachöffnung

Bild 2.29: Positionierung von Rührbehälter 3 im Stahlbau
Bild 3.1: Trendverlauf eines Batches in Behälter 1
Bild 3.2: Trendverlauf eines Batches in Behälter 2
Bild 3.3: Trendverlauf zur Verarbeitung eines Batches in Behälter 3 (mit zweimaliger Nachfüllung aus Behälter 2)
Bild 3.4: Stündliche Mittelwerte der elektrischen Wirkenergie der Haupteinspeisung der Recyclinganlage im Zeitraum 24.3.15, 5:00 Uhr bis 26.3.15, 14:00 Uhr
Bild 3.5: "screen shot" der Haupteinspeisung der Recyclinganlage am 11.2.15 um 9:20 Uhr
Bild 3.6: "screen shot" der Haupteinspeisung der Recyclinganlage am 11.2.15 um 11:55
Bild 3.7: Mikroskopische Durchlicht-Aufnahme einer nach Umwandlung zu α-HH getrockneten und filtrierten Gipsfaserstaub-Suspension
Bild 3.8: Energiebedarf für Aufheizung und Umwandlung der Suspension abhängig vom Feststoffanteil für drei unterschiedliche Temperaturdifferenzen zum Kochen der Suspension

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Verfahrensvergleich Gipsabfallrecycling zu α-HH mit direkter Rückführung in die Produktion im Vergleich zum Stand der Technik (Standard Suspensionsverfahren zur Herstellung von α-HH)
Tabelle 2.2: Technische Daten der Behälter
Tabelle 3.1: Stoff- und Energiebilanz in Rührbehälter 1
Tabelle 3.2: Stoff- und Energiebilanz in Rührbehälter 2
Tabelle 3.3: Berechnung der Wirtschaftlichkeit bei 7.200 Produktionsstunden pro Jahr mit zusätzlichen Personalkosten für die Bedienung
Tabelle 3.4: Berechnung der Wirtschaftlichkeit bei 7.200 Produktionsstunden pro Jahr ohne zusätzliche Personalkosten für die Bedienung