

BMU-UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM

**Abschlussbericht
zum Vorhaben:**

Demonstrationsvorhaben "Drehzahlenvariabler Dampfmotor-Generator"
(DrehDaG)
MBc3-001650

Fördernehmer/-in:

Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH

Umweltbereich:

Klimaschutz, Energie, Integrierter Umweltschutz

Laufzeit des Vorhabens:

02.06.2009 bis 31.10.2012

Autoren:

Jörg Ziebertz
Technical Manager Site Cologne
Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH
Geestemünder Straße 26 - 50735 Köln

Till Augustin
Spilling Energie Systeme GmbH
Werftstrasse 5 - 20457 Hamburg

**Gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit**

August 2014

Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen: UBA Akzo Nobel (DB 754)	Vorhaben-Nr.: NKa3-001650 (Mbc3-001650)
Titel des Vorhabens: "Drehzahlenvariabler Dampfmotor-Generator" (DrehDaG)	
Autor(en); Name(n), Vorname(n): Ziebertz, Jörg, Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH Augustin, Till, Spilling Energie Systeme GmbH	Vorhabenbeginn: 02.06.2009 Vorhabenende (Abschlussdatum): 31.10.2012
Fördernehmer/-in (Name, Anschrift): Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH, Werk Köln Geestemünder Straße 26 - 50735 Köln	Veröffentlichungsdatum: 15.08.2014 Seitenzahl: 38 Seiten
Gefördert (aus der Klimaschutzinitiative) ¹ im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	
<p>Kurzfassung: Mit dem Demonstrationsvorhaben „DrehDaG“ implementierte die Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH erstmals und erfolgreich einen drehzahlvariablen Dampfmotor zur Verstromung von Überschussmengen an Dampf im großtechnischen Maßstab. Das Projekt wurde im Zeitraum vom 02.06.2009 bis zum 31.10.2012 durchgeführt und zielte auf die Reduzierung des CO₂-Footprints des Standorts durch die Nutzung von Energie aus Überschussdampf ab. Das Projekt konnte technisch erfolgreich umgesetzt werden, auch wenn aufgrund unvorhergesehener geringerer Produktionsmengen am Standort der wirtschaftliche Erfolg noch aussteht.</p> <p>Derzeit fallen bei den chemischen Produktionsprozessen am Standort Köln durch exotherme Reaktionen große Mengen an Dampf an. Von diesen Dampfmenen mit dem Betriebsdruck von 4 bar_ü können gut 80 % der Jahresmenge durch die Anlagenintegration in einem Stoffkreislauf weiter genutzt werden. Mit ca. 20 % fällt eine Restmenge diskontinuierlich an und wurde ungenutzt in die Atmosphäre abgegeben, da dieser Dampf keiner Verwendung zugeführt werden konnte. Mit dem Motorenkonzept konnte nicht nur die angestrebte Funktionalität implementiert, sondern während der Projektlaufzeit weitere entscheidende Verbesserungen umgesetzt werden.</p> <p>Hierfür wurde ein neuartiges Regelungskonzept erstmals zur Anwendung gebracht, bei dem die beiden grundlegenden Regelungskonzepte der Füllungsregelung und Drehzahlregelung kombiniert werden. Um dies zu ermöglichen, sind darüber hinaus zahlreiche konstruktive Neuerungen des Dampfmotors notwendig geworden, die ihre Einsatzfähigkeit und Belastbarkeit innerhalb des Projektes bewiesen haben. Diese Anpassungen reichen von der Veränderung der Steuerwelle über die Entwicklung eines geeigneten Regelkonzepts bis hin zur Entwicklung eines neuen Sicherheitskonzeptes zum Schutz des Generators. Gerade die Größenordnung der Leistungsklasse stellt für Dampfmotoren mit über 200 kW eine neue Dimension in der drehzahlvariablen Generator-Frequenzrichter-Technik dar.</p>	
Schlagwörter: Stromerzeugung, Verstromung von Überschussdampf ,variable Drehzahl, variable Füllungsregelung, Dampfmotor	
Anzahl der gelieferten Berichte: Papierform: zehnfach Elektronischer Datenträger: 1 USB Stick	Sonstige Medien: Veröffentlichung im Internet; geplant auf der Homepage www.akzonobel.de

Kurzfassung

(1) Beschreibung

Im Werk Köln von Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH sind alle Produktionsanlagen in einem gemeinsamen Kreislauf verbunden, so dass Haupt- wie Nebenprodukte einer Anlage auch als Eingangsprodukte anderer angeschlossener Anlagen genutzt werden. Dies gilt auch für den Energieträger Dampf, der bei den chemischen exothermen Produktionsprozessen anfällt und von Verbrauchern diskontinuierlich entnommen wird. Bis zur Realisierung des Demonstrationsprojektes wurden die nicht im Prozess eingesetzten Dampfmengen (Überschussdampf) energetisch nicht genutzt. Mit dem Projekt „DrehDaG“ sollte dieser in der Größenordnung von 1 t/h bis 7 t/h anfallende Überschussdampf verstromt und so der carbon footprint des Unternehmens gesenkt werden. Dies konnte durch einen innovativen drehzahlvariablen Dampfmotor erreicht werden, der geringe sowie schwankende Dampfmengen zuverlässig und wirtschaftlich verstromt.

Durch den integrierten Dampfkreislauf steht Überschussdampf antizyklisch und in variablen Mengen zur Verstromung zur Verfügung. Gleichzeitig benötigt der Produktionsprozess insgesamt ein Mindestproduktionsvolumen von 180 t pro Tag. Bei geringeren Produktionsmengen fällt kein Überschussdampf an, sondern es muss zusätzlicher Prozessdampf über einen Dampfkessel bereitgestellt werden. Quelle des Dampfes und damit des nach dem Produktionskreislauf verbleibenden Überschussdampfes, der für eine Verstromung zur Verfügung steht, ist Schwefelkohlenstoff als Hauptprodukt des Standorts. Dieses Produkt wird weltweit verkauft und unterliegt daher den konjunkturellen Schwankungen der Weltwirtschaft. So wurde in der Planungsphase des Demonstrationsvorhabens noch mit durchschnittlichen zu verstromenden Mengen von 63.000 Tonnen Überschussdampf pro Jahr gerechnet. Der Realisierungszeitraum fiel jedoch in die Hochzeit der Wirtschafts- und Finanzkrise mit entsprechend geringen Absatz- und Produktionsmengen. Vor diesem Hintergrund standen wesentlich geringere Mengen an Überschussdampf zur Verstromung zur Verfügung als in der ursprünglichen Projektierung und Finanzplanung angenommen. In Folge dessen konnte der innovative Dampfmotor nur eingeschränkt betrieben werden und es verlängerte sich der notwendige Projektzeitraum für die erfolgreiche Demonstration der Funktionsfähigkeit. Erst 2013 konnte mit gut 28.000 t Überschussdampf das bisherige Maximum an verstromtem Dampf erreicht werden.

Das Demonstrationsprojekt sah zur Antragstellung einen Realisierungszeitraum vom 02.06.2009 bis 31.03.2012 vor. Tatsächlich kam es während der Projektdurchführung zu mehreren Verzögerungen, so dass das Vorhaben tatsächlich im Zeitraum 02.06.2009 bis 31.10.2012 durchgeführt wurde. Wesentliche Gründe der Projektverzögerung waren neben zusätzlich definierten Anforderungen an den innovativen Motor vor allem die wirtschaftliche Lage mit den daraus resultierten geringen Dampfmengen, die zeitweise einen Stillstand des Dampfmotors erzwangen. Im Zuge des Probetriebs kam es zudem häufig zu Abschaltungen des Aggregates wegen zu hohem Abdampfdrucks. Ursache hierfür war eine zu geringe Leistung des luftgekühlten Kondensators bei hohen Dampfdurchsätzen. Diese Problematik konnte durch die Inbetriebnahme eines weiteren Kondensators gelöst werden.

Das Demonstrationsprojekt hat die Eignung des innovativen Motorenkonzepts eines drehzahlgesteuerten Dampfmotors mit großem Regelbereich technisch eindrucksvoll bewiesen. Gegenüber der ursprünglichen Planung wurde der Betrieb des Dampfmotors weiter optimiert, indem die Drehmomentkurven bei den unterschiedlichen Drehzahlen aufgenommen und in der Speicherprogrammierten Steuerung (SPS) hinterlegt wurden. Der Dampfmotor kann somit bei der Ist-Drehzahl immer das optimale Drehmoment erzeugen. Der variabel anfallende Überschussdampf konnte so zu einem Großteil verstromt und diese erzeugte Energie im Unternehmen erfolgreich zur Reduzierung des Primärenergiebedarfs eingesetzt werden.

(2) Anwendbarkeit der Technik

Die Leistungsregelung von Dampfmotoren erfolgt nach dem Stand der Technik durch eine sogenannte Füllungsregelung, deren Kernstück eine hydraulisch-mechanisch verstellbare Steuerwelle ist. Mittels dieser wird durch Hubverstellung der Steuerventile die Leistung bei konstanter Motorendrehzahl an die verfügbaren bzw. benötigten Dampfmengen angepasst. Stark schwankende Dampfmengen sind mit diesem Konzept jedoch wirtschaftlich nicht zu verstromen. Da bei Akzo Nobel, wie oftmals in vergleichbaren Betrieben, keine (ausreichenden) Abnehmer für (Niedertemperatur-)Wärme vorhanden sind, war auch der Betrieb der Dampfkraftanlage im Rahmen von KWK nicht möglich.

Ausgangspunkt des innovativen Konzepts ist die Kombination eines Dampfmotors, der mit variabler Drehzahl betrieben wird, mit einem Generator, welcher die erzeugte Leistung über einen Frequenzumrichter in das Netz einspeist. In der ersten Stufe des Konzeptes sollte die Steuerwelle mit festem Hub für die Steuerventile des Motors ausgeführt werden. Die Leistungsregelung und damit die Anpassung an variable Dampfmassenströme erfolgt durch die Verstellung der Motorendrehzahl. Dabei wird ein Asynchrongenerator angetrieben. Die bei variabler Drehzahl erzeugte Leistung wird dabei vom Generator mit variabler Spannung und Frequenz abgegeben. Die Einspeisung in das Betriebsnetz erfolgt über einen Frequenzumrichter. Als Ergebnis der Vorüberlegungen wurde ein Aggregat mit einem Motor ausgewählt, der den überschüssigen Dampf von ca. 4,5 bar_ü (bar Überdruck) auf 0,3 bar_ü entspannt. Die Nenndrehzahl des Motors für Synchrongeneratoren beträgt 1.000 1/min. Die Konstruktion der Motorenregelung, der Generator mit Frequenzumrichter sowie die Steuerung wurden so ausgelegt, dass ein Massenstromregelbereich von ca. 0,8 bis 6,3 t/h für den Betrieb genutzt werden kann. Der Drehzahlregelbereich wurde mit ca. 250 bis 1.050 1/min festgelegt. Im Verlauf des Projekts konnte zudem der Wirkungsgrad der Maschine durch eine lastpunktgesteuerte Kombination von Füllung und Drehzahl weiter optimiert werden. Technologielieferant für den im Demonstrationsvorhaben verwirklichten Dampfmotor-Generator ist das Unternehmen Spilling Energie Systeme GmbH in Hamburg.

Für die betriebliche Praxis von Anlagen zur Verstromung von Überschusdampf (Wärme) erlaubt das neue Generator- und Regelkonzept sowohl die bessere Nutzung von Massenströmen im unteren Betriebsbereich als auch eine gewisse Erweiterung im oberen Lastbereich und somit die Erzeugung einer größeren elektrischen Jahresarbeit bei Anwendungen mit einer großen Schwankungsbreite der Dampfmassenströme. Das Konzept hat sich bewährt und wird als praxis- und marktauglich bewertet. Es kann überall dort technisch und ökonomisch sinnvoll eingesetzt werden, wo große Schwankungsbreiten von Dampfmassenströmen für die Stromerzeugung genutzt werden sollen. Bei derartigen Verhältnissen können die zusätzlichen Investitionskosten der einzusetzenden Frequenzumrichter-Technik durch den vergrößerten Regelbereich und den verbesserten Wirkungsgrad angemessen amortisiert werden.

(3) Wesentliche Vorteile für die Umwelt

Das Demonstrationsvorhaben wurde mit der Maßgabe angegangen, die im Überschusdampf der Produktionsanlagen noch vorhandene Energie am Standort Köln nutzbar zu machen und so den bereits etablierten Stoff- und Energiekreislauf weiter zu schließen. Diese Energie sollte über den innovativen Dampfmotorgenerator in Strom umgewandelt und in das betriebseigene Netz eingespeist werden. Der Bezug von konventionellem Strom über den Stromversorger kann in gleichem Umfang reduziert werden, so dass der hauptsächliche Umwelteffekt über die Einsparung an CO₂ zum Tragen kommt. Im Rahmen der Antragstellung sollten über die Verstromung von 63.000 Tonnen Überschusdampf jährlich gut 2.400 MW Strom erzeugt und auf diese Weise rund 1.500 Tonnen an CO₂ eingespart werden. Aufgrund der tatsächlich zur Verfügung stehenden erheblich geringeren Dampfmengen wurde diese Zielsetzung deutlich unterschritten. Die folgende Tabelle 1 zeigt jahresweise die tatsächlich verstromten Mengen

an Überschussdampf auf und weist die erzeugten Mengen an Strom und die dazugehörigen CO₂-Einsparungen aus. Als weiterer Entlastungseffekt ist die Rückgewinnung des Kondensats ausgewiesen.

Jahr	Dampf gesamt in t	Verstromter Überschussdampf in t	Erzeugte Strommenge in MWh	CO ₂ - Einsparung in t	Kondensat in m ³
2009	33.776	0	0	0	0
2010	39.541	0	0	0	0
2011	32.899	16.435	644	370,90	5.051.704
2012	34.942	23.565	755	434,88	8.809.612
Summe 2009-2012	141.158	40.000	1.399	805,78	13.861.316
2013	36.176	27.887	1.025	590,40	9.743.601
Summe 2009-2013	177.334	67.887	2.424	1.396,18	23.604.917

Tab. 1: Überschussdampf, Stromerzeugung, CO₂-Einsparung und Kondensat-Rückgewinnung im Projektverlauf [Quelle: eigene Darstellung]

Angesichts eines Gesamtstromverbrauchs von 7,4 GWh im Jahr 2012 konnten in diesem Jahr bereits 7,1 % des Gesamtbedarfs über das Projekt CO₂-neutral bereitgestellt werden. Die Gesamtmenge an Überschussdampf wird bei einer künftigen Ausweitung der Produktionsmenge im Zuge einer konjunkturellen Erholung am Standort steigen. Die Ausbeute an Strom aus dem Überschussdampf steigt in Folge dessen stärker als die für die Produktionssteigerung aufzuwendende Energiemenge. Damit wird in Relation die CO₂-neutrale Rückgewinnung von Energie überproportional zum Gesamtverbrauch steigen.

(4) Kostendaten

Die Investitionskosten wurden zu Beginn des Projekts mit gut € 695.000,-- beziffert. Zusätzliche Investitionen, wie ein weiterer Kondensator, ließen die Kosten auf gut € 708.000,-- steigen. Die nachfolgende Tabelle 2 stellt die ursprüngliche Kostenplanung laut Antragstellung und die tatsächlich angefallenen Kosten nebeneinander und weist die Förderung im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms aus.

	Plan in €	Ist in €
Kosten Teilvorhaben		
Planung	120.515	140.447
Engineering und Konstruktion	121.603	130.476
Bauplatzvorbereitung	65.500	46.831
Montage und Einbindung	284.074	312.623
Inbetriebnahme und Nullstart	91.026	67.044
Testphase	3.002	10.500
Evaluation / Feinabstimmung	2.003	0
Demonstrationsphase	6.027	0
Evaluation und Übergabe	1.986	0
Summe	695.736	707.921
<i>davon:</i>		
<i>bewilligte Förderung</i>	<i>208.720</i>	<i>208.720</i>
<i>Eigenmittel</i>	<i>487.016</i>	<i>499.201</i>
<i>entsprechen Mehrkosten</i>		<i>12.185</i>

Tab. 2: geplante und tatsächliche Kosten der Projektdurchführung [Quelle: eigene Darstellung]

Die Betriebs- und Wartungskosten der Anlage belaufen sich erwartungsgemäß auf ca. € 13.000,- pro Jahr. Diesen Anschaffungs- und Betriebskosten stehen die erzielbaren Einsparungen in den Bezugskosten der notwendigen Primärenergie gegenüber, die auf 0,07 €/kWh festgelegt wurden.

Die Investition sollte sich in einem Zeitraum von 5,4 Jahren amortisieren. Diese Erwartungen konnten nicht erfüllt werden. Hierbei spielen weniger die gestiegenen Projektkosten als vielmehr die Einschränkung der Produktionsvolumina und damit des verfügbaren Überschussdampfes die entscheidende Rolle. Bei durchschnittlichen Dampfmengen von 23.500 Tonnen, wie sie in 2012 realisiert wurden, verlängert sich die Amortisationszeit aus heutiger Sicht auf 24 Jahre. Bei steigenden Dampfmengen und / oder steigenden Bezugspreisen für Strom wird sich diese Amortisationsdauer jedoch reduzieren.

Summary

(1) Description

All production facilities at the plant of Akzo Nobel in Cologne form a closed circuit thus enabling the reuse of reaction products or byproducts like steam resulting from exothermic processes as far as possible. Nonetheless, a surplus of steam in the magnitude of 1 - 7 t/h is generated depending on the plant's production volume. To date these amounts had to be blown off due to a lack of possible use. The demonstration project "DrehDaG" aimed successfully to convert this surplus of steam into electrical power and to reduce the carbon footprint of the Cologne site. This could be achieved by implementing an innovative steam engine driven electrical power generator with variable speed control.

A total production minimum of 180 tons per day is needed to provide adequate steam amounts to satisfy the demand of all steam consuming production processes. Subcritical production volumes have to be feed with additional process steam provided via a steam boiler. Above that volume excess steam is available for the intended power generation. Main source for the process steam and globally sold core product of the plant is carbon disulphide. The average production volume in former years has led to the assumption of a 63,000 tons surplus of excess steam as calculation basis during project planning. Regrettably, the sales volumes drop significantly during the execution of "DrehDaG" due to the global financial crisis thus leading not only to extremely lower amounts of excess steam than expected but to a vital extension of the project duration as well. In 2013, a 28,000 tons mark a maximum of excess steam to date.

Intended to be realized between June 2nd, 2009 and March 31st, 2012 the demonstration project actually was carried out between June 2nd, 2009 and October 31st, 2012. Caused by the insufficient amount of excess steam the innovative engine faced extensive periods of shutdown. Additional short-term shutdowns during the initial testing phase occurred due to an unexpected temporary high exhaust steam pressure caused by an insufficient performance of the air-cooled condenser at high vapor flow rates. The installation of a second condenser solved that problem. From a technical point of view the demonstration project has been a full success; the innovative engine concept of a speed-controlled steam engine with its large control range meets all requirements to convert variable arising amounts of excess steam into energy. The operational capability was further optimized establishing torque curves at different rational speeds and programming a variable speed control.

(2) Applicability

State-of-the-art in managing a steam engine's performance is a charge control centered around a hydraulically adjustable steering shaft. Depending on steam load the stroke of the control valve is adjusted holding a constant engine speed. This design is unsuitable for the specific needs at Akzo Nobel's site in Cologne. Establishing a combined heat and power generation was also not an option as the site - like any comparable plant - does not has sufficient demand for the heat produced.

Starting point of the innovative concept is the combination of a steam engine with variable speed control and a frequency converter controlled generator supplying the grid. In a first step the steering shaft was executed with a fixed stroke for the engine's control valve. Adjusting the motor rotation speed enables a favorable performance management over a wide range of different steam loads powering an induction generator. A frequency converter feeds the resulting variable voltage output into the grid. The selected generator reveals the steam pressure from 4.5 bar_g (bar gauge pressure) to 0.3 bar_g. The nominal speed of the synchronous generator is set to 1,000 rpm. Engine management system and frequency converter operated generator as well as the system control were designed to process steam loads in a range of 0.8 - 6.3 t/h. The speed control range covers rotation speeds from 250 rpm up 1,050 rpm. An additional increase of the engine efficiency could be achieved by a load-point-controlled combination of filling level and rotation speed. Technology supplier for the steam engine generator realized in the demonstration project is Spilling Energy Systems GmbH in Hamburg.

This innovative concept stands the tests and provides both a better use of mass flow rates in the lower operating range as well as an extension in the upper load range of the engine. Thus a broader fluctuation range of excess steam can be converted into energy resulting in longer operating times of the new steam engine driven electrical power generator. Its scope of application can be found wherever broad fluctuation ranges of excess steam occur during production processes that shall be used for power generation. Under these operating conditions the enhanced engine efficiency justifies the higher investment costs.

(3) Main environmental benefits and achieved emission levels

Objective of the demonstration project was to convert the former unused excess steam into electrical power and feed it into the plant's own grid thus reducing the carbon footprint of the site. As the volume of externally purchased electricity can be reduced to the same extent the main environmental benefit of the demonstration project has to be seen in the resulting CO₂ savings. Based on an estimated 63,000 tons of excess steam the project expected to save some 1,500 tons CO₂ per year by generating round about 2,4 GW electrical power. The actual savings are well behind schedule due to the former mentioned reasons. Table 1 outlines the realized amounts of total and converted steam per year as well as the corresponding amounts

of electricity generated and CO₂ savings. In addition the amount of condenser water recovered is reported.

year	Total steam in t	excess steam converted in t	electricity generated in MWh	CO ₂ savings in t	Condenser water in m ³
2009	33.776	0	0	0	0
2010	39.541	0	0	0	0
2011	32.899	16.435	644	370,90	5.051.704
2012	34.942	23.565	755	434,88	8.809.612
sum 2009-2012	141.158	40.000	1.399	805,78	13.861.316
2013	36.176	27.887	1.025	590,40	9.743.601
sum 2009-2013	177.334	67.887	2.424	1.396,18	23.604.917

Table 1: Excess steam, power generation, CO₂ savings and condenser water recovered during the project [Source: own figure]

Given a total energy consumption of 7.4 GWh in 2012, a 7.1 % of the plant's energy demand could be provided CO₂-neutral in that specific year. The growth rate of available excess steam exceed the rise of the energy demand cause by expected increases of the plant's production volume thus leading to even higher percentages of CO₂-neutral power consumption compared to the total demand per year.

(4) Economics

The initial investment costs were calculated to a total of round about € 695,000. During the project execution the total cost increased up to € 708,000 due to additional expenditures like a second air-cooled condenser. Table 2 compares the planned costs with actual expenditures and the funding received under the Environmental Innovation program.

	planned costs in €	actual costs in €
Project step		
planning	120,515	140,447
engineering and construction	121,603	130,476
sitepreparation	65,500	46,831
equipment and installation	284,074	312,623
startup	91,026	67,044
test	3,002	10,500
evaluation / fine tuning	2,003	0
demonstration phase	6,027	0
evaluation and surrender	1,986	0
sum total	695,736	707,921
<i>thereof:</i>		
approved funding	208,720	208,720
own resources	487,016	499,201
additional costs		12,185

Table 2: Data regarding investment costs for the variable speed steam engine [Source: own figure]

Operating and maintenance costs sum up to € 13,000 per year, the savings in energy delivering are calculated with 0.07 € / kWh. Based on these figures and a 63,000 tons excess steam the initially expected payback period of the demonstration project was 5.4 years. Given the actual figures and an average amount of 23,500 tons of excess steam per year, the payback period now extended to 24 years. However, increasing amounts of steam and / or increasing purchase prices for electricity will reduce this payback period significantly.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

- 1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens
- 1.2 Ausgangssituation und Stand der Technik

2. Vorhabensumsetzung

- 2.1 Ziel des Vorhabens
- 2.2 Darstellung der technischen Lösung
- 2.3 Darstellung der Umsetzung des Vorhabens
- 2.4 Behördliche Anforderungen

3. Ergebnisse

- 3.1 Bewertung der Vorhabensdurchführung
 - 3.1.1 Akzo Nobel
 - 3.1.2 Spilling
- 3.2 Energiebilanz / Umweltbilanz
- 3.3 Konzeption, Durchführung und Ergebnisse des Messprogramms
- 3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse
- 3.5 Vergleich zum konventionellen Verfahren

4. Empfehlungen

- 4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung
- 4.2 Modellcharakter

5. Zusammenfassung

6. Beispiele zu Messwerten aus dem Messprogramm

7. Abkürzungsverzeichnis

8. Literaturverzeichnis

1. Einleitung

1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens

Das Unternehmen Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH ist Teil des international tätigen Chemiekonzerns Akzo Nobel NV mit Hauptsitz in den Niederlanden. Der Standort Köln ist einer von elf deutschen Chemiestandorten des Unternehmens und beschäftigt rund 80 Mitarbeiter. Die hier hergestellten Produkte werden fast ausschließlich an industrielle Abnehmer verkauft, die sie weiterverarbeiten und zur Herstellung von Konsum- und Industriegütern verwenden: Schwefelkohlenstoff wird zur Herstellung von Viskosefasern, Cellophan, Gummi und Pflanzenschutzmitteln gebraucht. Außerdem setzt Akzo Nobel Schwefelkohlenstoff bei der Produktion von Rhodaniden ein. Natriumhydrogensulfid-Lösungen werden in Kläranlagen zur Schwermetallfällung, zum Gerben von Leder und in der chemischen und pharmazeutischen Industrie als Rohstoff eingesetzt. Rhodanide dienen als Hilfsstoffe für die Herstellung von Fotochemikalien, als Lösemittel bei der Produktion von Polyacrylfasern und als Rohstoff für Pflanzenschutzmittel. Darüber hinaus werden Rhodanide in der pharmazeutischen, kosmetischen und Lebensmittelindustrie eingesetzt.



Abb. 1: Bild des Werksgeländes in Köln [Quelle: Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH]

Alle Produktionsanlagen am Standort sind in einem Kreislauf untereinander verbunden: Haupt- und Nebenprodukte sowie Energieträger, die in einer Anlage anfallen, werden von anderen Anlagen innerhalb des Werkes wieder verwertet. Der hohe Stellenwert von Umweltschutz und Sicherheit im Unternehmen spiegelt sich nicht zuletzt in der Tatsache wider, dass das Werk in Köln bereits seit 1992 nach DIN EN ISO 9002 und seit 1996 nach DIN EN ISO 14001 zertifiziert ist.

Vor diesem Hintergrund und im Bewusstsein seiner Verantwortung für die Umwelt hat Akzo Nobel mit dem hier vorgestellten Projekt „Drehzahlvariabler Dampfmotor-Generator (DrehDaG)“ ein Verfahren getestet und umgesetzt, bisher ungenutzten Prozessdampf energetisch nutzbar zu machen. Das Demonstrationsvorhaben wurde durch Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH in eigener Verantwortung am Standort Köln durchgeführt.

Technologielieferant für den im Demonstrationsvorhaben verwirklichten Dampfmotor-Generator ist das Unternehmen Spilling Energie Systeme GmbH in Hamburg. Das Unternehmen wurde 1890 gegründet und baut seit Beginn des 20. Jahrhunderts Dampfmaschinen bzw. heute mit rund 50 Mitarbeitern moderne Expansionsmotoren im Leistungsbereich zwischen 100 und 1.500 kW, welche zur Entspannung von Dampf und Erdgas eingesetzt werden. Mit dem modularen Expansionsmotor und dessen spezifischen Konstruktion / Funktionsweise ist Spilling derzeit weltweit der einzige Hersteller, der eine entsprechende Technologie professionell in industriellem Standard baut. Neben dem Motoren-Programm baut Spilling Dampfturbinen-Aggregate im Leistungsbereich zwischen 300 und 5.000 kW.

1.2 Ausgangssituation und Stand der Technik

Im Werk Köln von Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH sind alle Produktionsanlagen in einem gemeinsamen Kreislauf verbunden, so dass Haupt- wie Nebenprodukte einer Anlage auch als Eingangsprodukte anderer angeschlossener Anlagen genutzt werden. Abbildung 2 zeigt die Medienströme zwischen den einzelnen Produktionsanlagen auf.

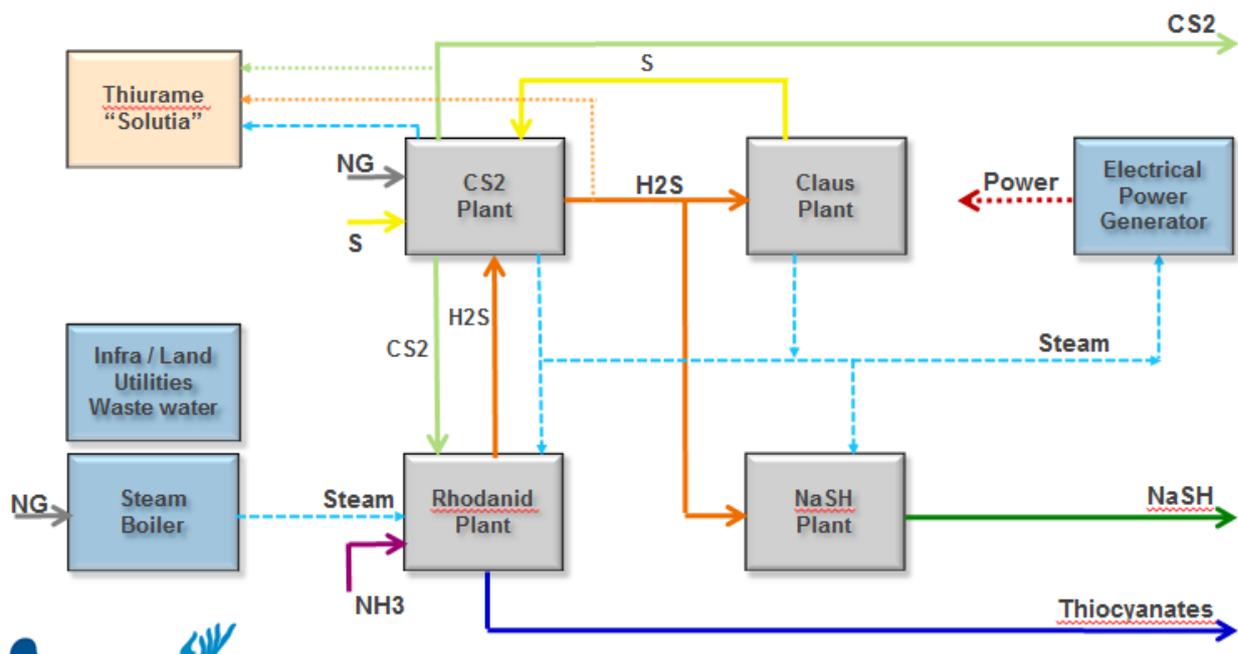


Abb. 2: Medienströme innerhalb der Produktionsanlagen [Quelle: Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH]

Auch der Energieträger Dampf („Steam“ in Abbildung 2) fällt in den einzelnen Prozessen an bzw. wird von ihnen genutzt. So beschicken auf der einen Seite die Dampferzeuger den Kreislauf mit unterschiedlichen Mengen je nach Anfall im Produktionsprozess. Auf der anderen Seite entnehmen die Verbraucher diskontinuierlich Dampf für ihre Produktionserfordernisse. Somit weist die Dampfantnahme zu unterschiedlichen Zeiten Lastspitzen und -senken auf. Da beide Aspekte - Dampffuhr und Dampfantnahme - unabhängig voneinander gesteuert

werden, dienen der Dampfkreislauf und mit ihm die Überschussmenge des Dampfes als Regulator.

Die überschüssige Dampfmenge fällt damit nicht nur antizyklisch und in variablen Mengen an, sondern benötigt auch ein Mindestvolumen in der Produktion von 180 t pro Tag. Unterhalb dieser Produktionsmenge am Standort Köln fällt kein Überschusdampf an, sondern es muss zusätzlicher Prozessdampf über einen Dampfkessel (vgl. „steam boiler“ in Abbildung 2) bereitgestellt werden. Quelle des Überschusdampfes ist die Produktion von Schwefelkohlenstoff, so dass dessen Produktionsvolumen letztlich die Verfügbarkeit von Überschusdampf bestimmt.

Somit wird der prinzipielle Vorteil eines integrierten Dampfkreislaufs zu einer großen Herausforderung für die Produktion von elektrischer Energie. Die theoretisch zur Verstromung bereit stehende Menge an Dampf weist Extrema auf: Je nach Dampferzeugung und -entnahme stehen zu einem beliebigen Zeitpunkt Mengen zwischen einer und bis zu sieben Tonnen Dampf zur Verstromung zur Verfügung. Bei entsprechend geringer Anlagenauslastung fällt dieser Wert sogar auf null.

Diese im Werk Köln der Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH (kurz „Akzo Nobel“) anfallende Abwärmen in Form von Überschusdampf bei ca. 4 bis 5 bar fallen folglich mit sehr großer Mengenvarianz an. Dabei können bei größter Produktionsauslastung bis zu elf Tonnen Dampf pro Stunde anfallen. In den Kreislauf der Wiederverwendung des Kondensates können aber maximal 8 t/h einbezogen werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt für die Jahre 2008 (Projektplanung) bis 2012 (Ende des Demonstrationsvorhabens) sowie 2013 (nachrichtlich) eine Übersicht der Energieverbräuche, um den Anfall der Dampfmenen und späteren Dampfnutzung im Verhältnis zum Gesamtenergieverbrauch aufzuzeigen.

Jahr	Stromverbrauch (GWh)	Erdgasverbrauch (Mio. Nm³)	davon Dampferzeugung (Mio. Nm³)	Prozesswärmeerzeugung mit Rückgewinnung (Mio. Nm³)
2008	11,9	16,0	0,8	15,1
2009	10,0	13,6	1,4	12,2
2010	9,2	16,4	0,7	15,6
2011	7,1	15,7	0,7	14,7
2012	7,4	15,2	0,6	14,2
2013	8,3	16,5	1,0	14,7

Tab. 1: Gesamtenergieverbrauch am Standort Köln [Quelle: eigene Darstellung]

Bis zur Realisierung des Demonstrationsprojektes wurde dieser Überschusdampf in einem luftgekühlten Kondensator niedergeschlagen und energetisch nicht genutzt. Da die angegebenen Dampfmenen unterjährlich diskontinuierlich anfallen, schied eine Nutzung konventioneller Maschinenteknik zur Verstromung aus. Die zur Verfügung stehenden Dampfmaschinen hätten die vergleichsweise kleinen Dampfmenen nicht nutzen können und entsprechend häufig abgeschaltet werden müssen.

Denn nach dem Stand der Technik erfolgt die Leistungsregelung des Dampfmaschinen standardmäßig durch eine Füllungsregelung, deren Kernstück eine hydraulisch-mechanisch verstell-

bare Steuerwelle ist. Mittels dieser wird durch Hubverstellung der Steuerventile (Kolbenschieber) die Leistung bei konstanter Motorendrehzahl an die verfügbaren bzw. benötigten Dampfmen gen angepasst. Der vom Motor angetriebene Synchron generator ist dabei direkt mit dem elektrischen Netz gekoppelt. Mit dieser Art der Regelung hat der Motor üblicherweise bereits einen Massenstrom-Regelbereich von ca. 1:3 bis 1:4. Bei den bei Akzo Nobel gegebenen Druckverhältnissen beträgt dieser jedoch nur ca. 1:3,2, so dass ein effizienter Einsatz solcher Motoren nicht gegeben ist.

Der Dampf ein- und -auslass in die Arbeitsräume der Dampf motorenzylinder wird über Ventile - sog. Steuerschieber - gesteuert. Die Steuerschieber werden jeweils über eine Schieberstange und ein Pleul von der Steuerwelle angetrieben. Die Steuerwelle ihrerseits wird von der Kurbelwelle angetrieben. Die Steuerzeiten der Steuerschieber (Öffnen und Schließen) und damit die Füllung der Zylinder (in Folge: die Dampfentnahme und die Leistungsabgabe) werden durch Verdrehen der Laufexzenter auf den festen Exzenter n der Reglerwelle beeinflusst. Das Verdrehen der Laufexzenter geschieht durch eine verzahnte Welle, die „Koppelstange“, die in eine Innenverzahnung in den Laufexzenter n greift. Die Koppelstange ist drehbar in der Reglerwelle gelagert. In ihrer Winkellage wird sie von einem Fliehkraftregler gestellt und gehalten. Im Fliehkraftregler wirken folgende Kräfte:

- Reibung in Richtung mehr Füllung;
- Fliehkraft in Richtung weniger Füllung;
- Federn in Richtung mehr Füllung;
- Hydraulikkolben zumeist in Richtung mehr Füllung oder „Magnetbremse“ in Richtung mehr Füllung.

Fliehkraft und Federkraft werden so abgestimmt, dass die Maschine im Leerlauf knapp unter der Synchron drehzahl des Generators läuft. Bei konventioneller hydraulischer Regelung kann im Betrieb durch Verändern des Öldrucks die Drehzahl verändert werden, nach dem Synchronisieren verändert sich - bei konstanter Drehzahl - die Füllung. Die Hydraulikkolben rotieren mit dem Fliehkraftregler, das Öl wird durch einen Schleifring zugeführt. Der Öldruck wird von einem Druckstellglied gesteuert, welches elektronisch von der speicherprogrammierten Steuerung (SPS) angesteuert wird. Bei bisheriger „elektrischer“ Regelung bremst eine Magnetbremse an der Koppelstange. Dieses Moment bewirkt eine Verdrehung gegen die Laufrichtung, was zu einer Erhöhung der Füllung / Leistung führt. Das Moment der Magnetbremse wird elektronisch von der SPS angesteuert.

Diese Technik weist einige Nachteile auf, die dem Einsatz derartiger Lösungen für die Nutzung der bei Akzo Nobel anfallenden Überschussdampfmen gen entgegenstehen: Magnetbremse und Hydraulik in üblicher Bauart können nur die Drehzahl / Leistung erhöhen. Um bei einer Drehzahl von 250 1/min im Leerlauf fahren zu können, müssten sehr schwere Fliehgewichte zum Einsatz kommen. Ergänzend oder alternativ könnten Federn zum Einsatz kommen, die voll ausgelenkt, jedoch nur wenig Spannkraft gegen die Fliehgewichte aufbringen. Bei voller Drehzahl von 1.050 1/min wiederum müsste die Magnetbremse oder die Hydraulik zusammen mit diesen „schwachen“ Federn gegen die quadratisch angestiegene Fliehkraft ankommen. Dies würde erheblich höhere Stellkräfte fordern als beide Systeme bisher bieten.

Die hydraulische Ansteuerung bietet jedoch die Möglichkeit „andersherum“ zu wirken: Fliehgewichte und Federn werden auf eine Leerlaufdrehzahl über der maximalen Arbeitsdrehzahl abgestimmt; die Hydraulik wirkt gegen die Federn in Richtung weniger Drehzahl / Leistung. Auch in dieser Konfiguration ist der im Projekt zu realisierende große Regelbereich von 250 1/min bis 1.050 1/min nicht darstellbar. Realisierbar wäre ein Bereich von 250 1/min bis 700 1/min. Um dies zu erreichen, wäre jedoch schon eine Verdopplung des normalerweise realisierten Öldrucks notwendig. Eine weitere Erhöhung ist nicht ohne weiteres möglich. Die Kolbenflächen der Stellzylinder können ebenfalls baulich nicht vergrößert werden.

2. Vorhabensumsetzung

2.1 Ziel des Vorhabens

Angesichts der in wirtschaftlich befriedigenden Zeiten anfallenden Überschussdampfmengen war diese Situation nicht befriedigend. Einerseits mussten erhebliche Energiemengen für den Betrieb bezogen werden, andererseits wurden mit dem ungenutzten Überschussdampf große Mengen an Energie in die Umwelt abgelassen. Zukünftig sollten sie jedoch für die Eigenstromerzeugung und für die Reduktion des Fremdstrombezuges genutzt werden, um somit eine Verbesserung der Energie- und CO₂-Bilanz des Werkes zu erzielen. Denn bei dem gegebenen Druck- / Temperaturniveau des Dampfes gab es keine ausreichende thermische Nutzung. Die im Dampf noch vorhandene Energie konnte also allein für die Stromerzeugung mittels einer Expansionsmaschine nutzbar gemacht werden. Die Tabelle 2 zeigt die angefallenen Mengen an potenziell nutzbarem bzw. im Verlauf des Demonstrationsvorhabens (2009 - 2013) genutztem Überschussdampf in Relation zur jährlich erzeugten Dampfmenge auf. Die hier angegebenen Mengen der Jahre 2007 und 2008 waren ursprünglicher Anlass des Demonstrationsvorhabens, die später realisierten geringeren Mengen sind Ausfluss der Produktionsdrosselung im Zuge der Wirtschaftskrise.

Jahr	Überschussdampf / verstromter Dampf in t	Dampfüberschuss in t pro Jahr	Strom- erzeugung in MW
2007	57.000	57.000	-
2008	65.000	45.514	-
2009	33.776	31.582	-
2010	39.541	41.820	-
2011	32.899	16.435	644
2012	34.942	23.565	755
2013	36.176	27.887	1.025

Tab. 2: gemessene Mengen von Dampferzeugung und Dampfüberschuss [Quelle: eigene Darstellung]

Der Ansatz von Akzo Nobel war es, nicht primär eine Eigenstromerzeugung zu bauen, sondern vorhandene thermische Überschussenergie sinnvoll zu nutzen, wobei in diesem das Produkt Strom erzeugt wird. Obwohl nur ein kleiner Teil der im Dampf gebundenen Energie für die Stromerzeugung genutzt werden kann, wird dieser Strom ohne CO₂-Emission erzeugt, da für die Erzeugung des Dampfes keinerlei fossiler Energieträger zusätzlich verbrannt wird. D. h. für die Stromerzeugung fallen auch keine Brennstoffkosten an. Dies ist typisch in industriellen Anlagen, in denen Prozessabwärme für die Verstromung genutzt wird. Da bei Akzo Nobel wie oftmals in vergleichbaren Betrieben keine (ausreichenden) Abnehmer für (Nieder-temperatur-)Wärme vorhanden sind, war auch der Betrieb der Dampfkraftanlage im Rahmen von KWK nicht möglich.

Daher wurde von Akzo Nobel an Spilling Energie Systeme GmbH (kurz „Spilling“) die Aufgabenstellung herangetragen, eine tragfähige Lösung zu finden. Sie sollte eine unmittelbare Stromerzeugung aus dem Überschussdampf ermöglichen und dabei einen größeren Regelbereich als üblich mit der von Akzo Nobel und Spilling als sinnvoll definierten Maschinenbaugröße zu realisieren. Spilling hatte in der Vergangenheit bereits Überlegungen zu diesem Thema angestellt und schlug Akzo Nobel vor, für deren Aufgabenstellung einen

Prototyp eines Dampfmotor-Aggregates mit variabler Drehzahl einzusetzen. Dieser Motor sollte zudem einen größeren Regelbereich abdecken, um die anfallenden Dampfmengen effektiv verstromen zu können.

Bei entsprechendem Projekterfolg stünde somit eine Maschinentechnik zur Verfügung, welche gegenüber der bisherigen Technologie eine nochmals verbesserte Ausnutzung von variablen Dampfmengen zur Stromerzeugung ermöglicht. Dieses gilt sowohl für Anlagen zur Verstromung von Überschusdampf als auch für Anlagen mit schwankenden Abdampfmengen. Im Verlauf des Projekts wurde zudem der Wirkungsgrad der Maschine durch eine lastpunktgesteuerte Kombination von Füllung und Drehzahl weiter optimiert.

Damit gehören zu den zentralen Zielsetzungen und zugleich Erfolgskriterien:

- die effiziente Verstromung variabler Dampfmengen und hierfür
- eine Steigerung des Wirkungsgrades im unteren Lastbereich;
- eine Ausweitung des effektiv nutzbaren Lastbereichs im Hinblick auf den Dampfdurchsatz;
- eine Ausweitung der Drehzahlbandbreite auf einen Bereich von 25 - 105 %;
- ausreichende Robustheit des Aggregats zum Einsatz im Dauerbetrieb und hierfür
- eine Verringerung des Verschleißes im Teillastbetrieb und damit eine Erhöhung der Bauteilstandzeit im Zylinderbereich.

2.2 Darstellung der technischen Lösung

Konzept: Drehzahlvariables Dampfmotor-Generator-Aggregat

Ausgangspunkt bei dem neuen Konzept ist die Kombination eines mit variabler Drehzahl betriebenen Dampfmotors mit einem Generator, welcher die erzeugte Leistung über einen Frequenzumrichter in das Netz einspeist. In der ersten Stufe des Konzeptes sollte die Steuerwelle mit festem Hub für die Steuerventile des Motors ausgeführt werden. Die Leistungsregelung und damit die Anpassung an variable Dampfmassenströme erfolgt bei diesem Konzept durch die Verstellung der Motordrehzahl. Auf diese Weise kann bspw. ein Asynchrongenerator angetrieben werden. Die bei variabler Drehzahl erzeugte Leistung wird dabei vom Generator mit variabler Spannung und Frequenz abgegeben. Die Einspeisung in das Betriebsnetz erfolgt über einen Frequenzumrichter (FU). Mit dieser Kombination wäre bereits eine Erhöhung des Regelbereichs auf ca. 1:4,2 bei gleichzeitiger Verbesserung des Schwachlastwirkungsgrades möglich gewesen.

Um eine weitere Erhöhung des Regelbereiches zu erzielen, wurde nach Vergleich der Varianten beschlossen, die „konventionelle“ Füllungsregelung mit dem drehzahlvariablen FU-Betrieb zu kombinieren. Diese Lösung erlaubt neben der Optimierung des Betriebsbereichs (ca. 1:8) zusätzlich eine Optimierung des Motorenwirkungsgrades durch zielgerichtete Kombination der beiden Regelverfahren. Somit ergaben sich für die Auslegung und Konstruktion des Dampfmotoren-Aggregates folgende wesentliche Aufgaben:

- Auswahl, Konfiguration und Abstimmung einer Generator- / Frequenzumrichter-Kombination für die vorgesehene Aufgabenstellung in Verbindung mit einem Dampfmotor;
- Konstruktion und Herstellung einer Motorenregelung, welche die Aufgaben der kombinierten Füllungs- und Drehzahlregelung für die Stromerzeugung realisiert.

Eine dritte signifikante Aufgabe wurde im Laufe des Projektes ergänzt:

- Entwicklung einer Steuerung / eines Programms, welches unter Wirkungsgradgesichtspunkten die Kombination von Füllungs- und Drehzahlregelung im Betrieb der Maschine optimiert.

Maschinentechnik:

Als Ergebnis der skizzierten Vorüberlegungen wurde ein Aggregat mit einem Motor des Typs 2KoH12 TS ausgewählt, der den überschüssigen Dampf von ca. 4,5 bar Überdruck ($\text{bar}_{\bar{u}}$) auf 0,3 $\text{bar}_{\bar{u}}$ entspannen soll. Die Nenndrehzahl des Motors für Synchrongeneratoren beträgt 1.000 Umdrehungen pro Minute (1/min). Die Konstruktion von Motorenregelung, Generator mit Frequenzumrichter sowie Steuerung waren so zu gestalten, dass ein Massenstromregelbereich von ca. 0,8 bis 6,3 t/h dargestellt werden kann. Der Drehzahlregelbereich wurde mit ca. 250 bis 1.050 1/min festgelegt. Als Auslegungsdaten des Aggregates wurden folgende Parameter definiert:

Frischdampf vor Anfahrgruppe:	4,5 $\text{bar}_{\bar{u}}$, Sattdampf, trocken
Dampfmotor-Eintritt (HD-Dampfverteiler):	4,0 $\text{bar}_{\bar{u}}$, Sattdampf, trocken
Dampfmotor-Austritt:	0,3 $\text{bar}_{\bar{u}}$
Dampfdurchsatz bei 1.000 1/min:	6,0 t/h
Kupplungsleistung bei 1.000 1/min:	226 kW
Leistungsabgabe an das Netz:	208 kW_{el} (Ausgang FU) bei 1.000 1/min
Netzspannung / -frequenz:	400 V / 50 Hz
Typenleistung Generator:	250 kW
Typenleistung Frequenzumrichter:	320 kVA

Bei dem eingesetzten Motor handelt es sich um eine doppeltwirkende Maschine in Kreuzkopfausführung mit Schiebersteuerung. Die Hauptkonstruktionsdaten des Motors sind:

Nenndrehzahl:	1.000 1/min
Zylinderzahl:	2
Expansionsstufen:	1
Kolbenhub:	126 mm
Kolbendurchmesser:	410 mm

Generator / Frequenzumrichter:

Der Generator sollte ohne Getriebe mit dem Dampfmotor direkt gekoppelt werden und die erzeugte elektrische Leistung in das Werksnetz (400 V / 50 Hz) eingespeist werden. Bezüglich des Generator-Konzeptes wurden zwei Varianten untersucht:

- Permanentmagnet-Synchron-Generator mit Frequenzumrichter;
- Asynchron-Generator mit Frequenzumrichter.

Am Ende des Variantenvergleichs wurde entschieden, dem System B (Asynchron-Generator mit einem Frequenzumrichter der Firma ABB) den Vorzug zu geben, um hier Zeitaufwand, Kosten und Projektrisiken möglichst gering zu halten. Wesentliche Gründe hierfür waren:

- bereits vorhandene (positive) Erfahrung mit dem Typ des gewählten Frequenzumrichters bei motorischen Antrieben;
- geringere Investitionskosten beim Generator;
- ein in Leistung und Drehzahl passender Permanentmagnet-Generator hätte noch ausgelegt / entwickelt werden müssen. Als Asynchron-Generator konnte (nahezu) eine Standardmaschine eingesetzt werden.

Dampfmotor (Regelung / Steuerung):

Um die Restriktionen der konventionellen Füllungsregelung zu umgehen, wurde der Leerlauf, in welchem sich Flieh- und Federkraft ausgleichen, in etwa in die Mitte des Stellbereiches der Reglerwelle gelegt. Von hier aus wird in beide Richtungen (mehr bzw. weniger Füllung) gearbeitet. Die innere Steuerung (Steuerzeiten der Schieber) bleibt ebenso wie die Reglerwelle und der Laufexzenter unverändert. Bei den Koppelstangen wurde an einem Wellenende das Endstück modifiziert. Im Fliehkraftregler wirken nun folgende Kräfte:

- Reibung in Richtung mehr Füllung;
- Fliehkraft in Richtung weniger Füllung;
- Federn in Richtung mehr Füllung;
- neu: elektrischer Antrieb auf der Koppelstange, der in zwei Richtungen (mehr bzw. weniger Füllung) arbeitet. Hierzu muss der Antrieb bremsen und treiben können.

Als Stellantrieb wurde ein Asynchronmotor gewählt. Er ist an der Bedienseite der Maschine angebracht und wirkt auf die Koppelstange. Das Brems- oder Treibmoment wird von einem kleinen Frequenzwandler gesteuert, welcher elektronisch von der Maschinen-SPS angesteuert wird. Zwecks Kostenoptimierung teilen sich der große Frequenzwandler des Generators und der kleine Frequenzwandler des Stellantriebes einen gemeinsamen Gleichstrom-Zwischenkreis. Die notwendige Stellenergie, die gut 1 % der maximalen Leistung beträgt, geht bei diesem Konzept nicht verloren: Ist der Stellmotor im Bremsbetrieb, arbeitet er generatorisch und speist in den Frequenzrichter ein. Ist er im Treibbetrieb, findet sich die mechanische Leistung an der Kupplung wieder.

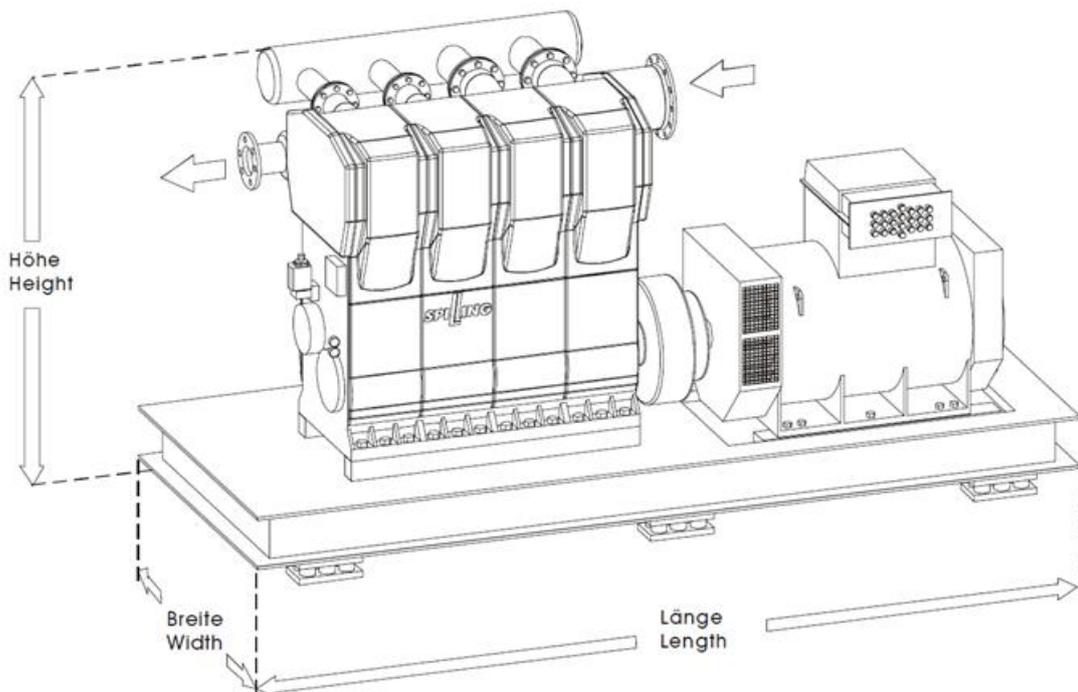


Abb. 3: technische Zeichnung von Dampfmotor mit Generator auf Fundamentplatte [Quelle: Spilling Energie Systeme GmbH]

Mit den genannten Maßnahmen konnte der projektierte Regelbereich für die Anlage der Fa. Akzo Nobel von 1:3,2 auf 1:7,9 erweitert und damit nahezu verdoppelt werden. Das Dampfmotor-Generator-Aggregat wurde entsprechend der konstruktiven Änderungen gefertigt und an Akzo Nobel ausgeliefert. Wie bei „konventionellen“ Dampfmotor-Aggregaten wurden Motor

und Generator auf einem gemeinsamen Grundrahmen installiert. Abbildung 3 zeigt eine technische Zeichnung des realisierten Aggregats.

2.3 Darstellung der Umsetzung des Vorhabens

Das Demonstrationsprojekt sah zur Antragstellung einen Realisierungszeitraum vom 02.06.2012 bis 31.03.2012 vor und wurde letztlich bis zum 31.10.2012 verlängert (vgl. Abbildung 4). Der am 23.12.2008 eingereichte Antrag zur Förderung eines drehzahlvariablen Dampfmotor-Generators zur Verstromung wurde durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit mit Zuwendungsbescheid vom 17.06.2009 gefördert.

Projekt: DrehDaG

Nr.	Sep 09	Okt 09	Nov 09	Dez 09	Jan 10	Feb 10	März 10	Apr 10	Mai 10	Jun 10	Jul 10	Aug 10	Sep 10	Okt 10	Nov 10	Dez 10	Jan 11	Feb 11	März 11	Apr 11	Mai 11	Jun 11	Jul 11	Aug 11	Sep 11	Okt 11	Nov 11	Dez 11	Jan 12	Feb 12	März 12	Apr 12	Mai 12	Jun 12	Jul 12	Aug 12	Sep 12	Okt 12	
1. Planung																																							
2. Engineering und Konstruktion																																							
3. Bauplatzvorbereitung																																							
4. Montage & Einbindung																																							
5. Inbetriebnahme & Nullstart																																							
6. Testphase mit var. Dampflasten																																							
7. Evaluation und Feinabstimmung																																							
8. Demonstrationsphase mit laufender Messung																																							
9. Evaluation, Übergabe in den regulären Betrieb																																							

Abb. 4: Terminplan des Projektes „Drehzahlvariabler Dampfmotor-Generator“ [Quelle: Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH]

Während der Projektlaufzeit kam es zu mehreren Verzögerungen, die zu einer Verlängerung der Gesamtdauer des Projektes bis zum 31.10.2012 erforderlich machten. Ein entsprechender Antrag wurde gestellt und von der KfW genehmigt. Grund für die Verzögerungen waren zum einen zusätzliche Anforderungen im Engineering, ein zusätzlich notwendiger Einbau eines Kondensators sowie während der Demonstrationsphase geringer als veranschlagt und notwendig zur Verfügung stehende Überschussdampfmenen. Der folgende chronologische Überblick über den Projektablauf zeigt die zentralen Meilensteine auf, bevor die technische Umsetzung im Detail beschrieben wird.

Chronologischer Projektablauf mit Meilensteine:

- 06.11.2009 Internes Projektmeeting Akzo Nobel FC GmbH & Co. KG Köln
- 02.12.2009 Projektmeeting mit Fa. Spilling in Köln (Vergabeverhandlung)
- 04.12.2009 Ausarbeitung und schriftliche Auftragsvergabe an Fa. Spilling
- 20.01.2010 Kick-Off-Meeting in Köln mit Fa. Spilling
- 19.05.2010 Projektgespräch in Köln mit Fa. Spilling
- 02.07.2010 Geplanter Liefertermin, der jedoch von Fa. Spilling nicht eingehalten werden konnte (Verzögerung durch Lieferverzug der Vorlieferanten)

-
- 22.07.2010 Internes Projektmeeting Akzo Nobel FC GmbH & Co. KG Köln
- 19.08.2010 Testlauf bei Fa. Spilling (von Fa. Spilling)
- 01.09.2010 - Anlieferung und Montage des Aggregates am Aufstellungsort
- Beginn der Rohrleitungsarbeiten sowie der Elektromontage
- 11.11.2010 Kontrolle der Montage- und Installationstätigkeiten
- 15.11.2010
- 24.11.2010 Eigene Montagetätigkeit durch Fa. Spilling und Vorbereitung für den ersten Test
- 25.11.2010
- 01.12.2010 Erste Testläufe und Analyse der auftretenden Probleme
- 02.12.2010 - Festlegung der weiteren Vorgehensweise mit Fa. Spilling
- Bis Januar 2011 keine weiteren Tests
- 31.01.2011 Änderungen der Abdampfführung wurden ausgeführt
- 16.04.2011 Schulung der Mitarbeiter und Start des 72-Stunden-Probelaufes
- 21.04.2011 Probelauf bestanden und Start der Demonstrationsphase mit laufender Messung
- 25.10.2011 Während der Demonstration wurde die Synchronisation zwischen dem Frequenzumrichter und dem Dampfmotor optimiert. Der Motor erreichte noch nicht seine maximale Leistung, da die geregelte Füllungsgradregelung mittels Frequenzumrichter noch nicht in Betrieb war. Es lagen auch noch keine Erkenntnisse vor, ob der gesamte Dampf in den nachgeschalteten Luftkühlern kondensiert werden konnte. Die Demonstrationsphase musste verlängert werden und ein entsprechender Antrag bei der KfW wurde gestellt.
- 12.04.2012 Aufgrund der vorgehend beschriebenen Schwierigkeiten wurde die Demonstrationsphase verlängert. In der Zwischenzeit konnte mit Unterstützung der Herstellerfirma des Frequenzumrichters, Fa. ABB, zusammen mit der Fa. Spilling die Füllungsgradregelung in Betrieb genommen werden. Im Januar und Februar musste die Demonstrationsphase unterbrochen werden, da kein Dampf zur Verfügung stand.
- Im März und April 2012 wurden weitere Optimierungsmaßnahmen durchgeführt:
- Erweiterung der Abdampfwärmetauscher;
 - Kennfelderfassung des Dampfmotors;
 - Erweiterung der Softwaresteuerung durch Fa. Spilling;
 - Automation der Motorsteuerung in Abhängigkeit zur vorhandenen Dampfmenge.
- 18.04.2012 Inbetriebnahme des zusätzlichen Abdampfwärmetauschers
- 01.05.2012
- 24.07.2012 - Aufnahme des Drehmomentenkennfeldes durch die Fa. Spilling
- Interne Optimierungen am Abdampfsystem sind soweit positiv verlaufen, so dass der Dampfmotor seine vereinbarten Leistungen erbringt und max. 250 kW Strom produziert

- Die Erkenntnisse von Spilling bzgl. des Drehmomentenkennfeldes wurden zusammen mit einer Bachelorthesis von Herrn Henry Korn mit dem Titel „Leistungsoptimierung an modernen Dampfmotoren“ ausgewertet und in die speicherprogrammierbare Steuerung programmiert

13.07.2012 Während der Versuchsfahrten des Wirkungsgrades kam der Dampfmotor ins Pendeln. Dabei wurde das Polygon der angetriebenen Koppelstange abgeschert. Die Antriebsnabe wurde mit einer 10,5-mm-Bohrung als Sollbruchstelle versehen.

13.08.2012

- 17.08.2012 8.000-h-Wartung am Dampfmotor durchgeführt. Es wurden alle geplanten Arbeiten ausgeführt und keine außergewöhnlichen Befunde festgestellt. Abschluss der Demonstrationsphase.

01.09.2012

- 30.09.2012 Die Übergabe in den Regelbetrieb wurde durchgeführt, dokumentiert und abgeschlossen

14.05.2013

- 17.05.2013 Der Dampfmotor hat an Leistung verloren. Bei der Inspektion stellte sich heraus, dass die Kolbenringe gebrochen waren. Die Kolbenbuchsen, die Laufspuren aufwiesen, wurden gewechselt.

21.05.2013

- 22.05.2013 Der Dampfmotor stand in Störung. Bei der Umschaltung auf Kennfeld „Steuerung“ hat sich der Frequenzrichter der Hubverstellung abgeschaltet. Nachdem alle Fehler aus dem Fehlerspeicher gelöscht waren, lief alles wieder problemlos.

Technischer Projektablauf:

Der Dampfmotor wurde in dem Gebäude der Vollentsalzung auf einer freien Fläche auf der 8-Meter-Bühne neu installiert. Die Aufstellung in einem Produktionsgebäude von Akzo Nobel erfolgte elastisch mittels Federelementen zwischen Aggregate-Grundrahmen und der Tragkonstruktion des Gebäudes. Hierfür musste die Statik neu berechnet werden. Das Fundament des Dampfmotors wurde zusätzlich mit Stahlträgern ausgerüstet, damit die Lasten besser verteilt werden konnten. Auf dieser Ebene wurde das Aggregat in das vorhandene 4-bar-Zu- und -Abdampfsystem eingebunden. Im folgenden Anlagenschaubild ist der Dampfmotor als Stromerzeuger bezeichnet (vgl. Abbildung 5).

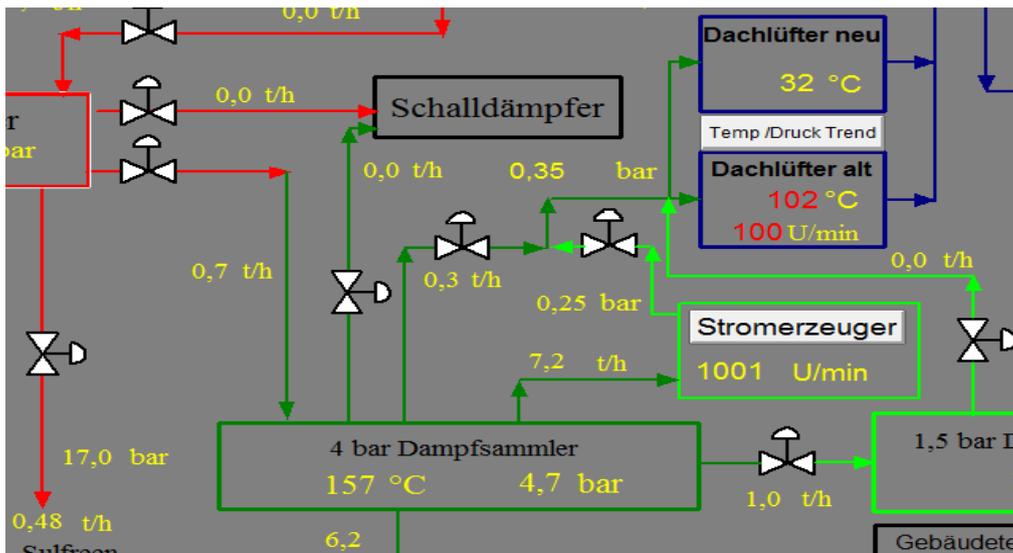


Abb. 5: Anlagenschaubild in Teilansicht der 4-bar-Dampfverteilung mit Stromerzeuger im Werk Akzo Nobel Köln [Quelle: Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH]

Der Dampfmotor wurde parallel zu dem vorhandenen 4-bar-Reduzierventil eingebaut. Damit wird gewährleistet, dass beim Betrieb des Dampfmotors auch Teilmengen abgeleitet werden und bei einem Stillstand des Dampfmotors das Dampfnetz weiter sicher betrieben werden kann. Der bereits vorhandene luftgekühlte Kondensator wurde auf einen Betrieb mit einem Abdampfdruck von ca. 0,3 bar_ü umgestellt. Abbildung 6 zeigt die Aufstellung des Motors im Anlagenbestand.



Abb. 6: Aufstellung des Dampfmotors im vorhandenen Gebäude [Quelle: Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH]

Vorläufige Inbetriebnahme:

Zunächst wurde die Maschine nur mit Drehzahlregelung in Betrieb genommen und einige Zeit so betrieben. Der Stellantrieb war nicht aktiv. Der mechanische Anschlag war auf 55 mm Schieberhub gesetzt. Harte Federn sorgten dafür, dass der Schieberhub auch bei hohen Drehzahlen am Anschlag lief. Die Drehzahl war auf 950 1/min begrenzt. Die Maschine konnte so bei Dampfmengen zwischen ca. 1,2 t/h und 4,5 t/h mit reiner Drehzahlregelung arbeiten.

Inbetriebnahme des Stellantriebes:

Prüfung der prinzipiellen Funktionsfähigkeit der Ansteuerung: Die Maschine wurde mit 600 1/min betrieben; ein ABB-Techniker brachte handgesteuert ein treibendes Moment auf die Koppelstange, der Schieberhub ging herunter. Bis hinunter auf 300 1/min konnte der Schieberhub beeinflusst werden. Prinzipiell ist die Ansteuerung also möglich.

Anpassung der Federn:

Weichere Federn wurden eingesetzt, da mit den ursprünglichen harten Federn das Drehmoment des Servomotors bei 250 1/min nicht reichte, um den Schieberhub nach unten zu verstellen. Dieses Ergebnis fiel erwartungsgemäß aus, denn die harten Federn wurden während der vorläufigen Inbetriebnahme ohne Betrieb des Servomotors gewählt, um immer fest am Anschlag zu hängen.

Die Maschine konnte durch manuelle Sollwertvorgabe des Drehmomentes (am Spilling-Steuerschrank) über den im unteren Durchsatzregelbereich gefahren werden. Der obere Regelbereich konnte auch angefahren werden, jedoch pendelte die Maschine bei hoher Drehzahl. Die Konfiguration der Reglerfedern wurde verändert, um weiterhin Niedriglast ansteuern zu können: Die Maschine konnte nun mit manueller Sollwertvorgabe über den gesamten Regelbereich gefahren werden:

- Untere Durchsatzgrenze: 0,8 t/h;
- Obere Durchsatzgrenze: 6,0 t/h.

Übergang in den Automatikbetrieb:

Da mit den eingestellten Umrichterparametern und den gewählten Federn von Hand der gesamte Regelbereich abgefahren werden konnte, wurde die mechanische Füllbegrenzung entfernt. Anpassungen von Parametrierungen und Verstellungen müssten in Folge dessen vorgenommen werden, damit im Anfahrbetrieb die maximal zulässigen Drehmomente und damit die maximal zulässigen Ströme des Frequenzumrichters nicht überschritten wurden.

Während des automatischen Anfahrvorganges erfolgt die Dampfversorgung über ein kleineres „Anfahrventil“. Nach dem automatischen Öffnen des Hauptzudampfventils bei einer Drehzahl von 250 1/min gehen der Generator und der Stellantrieb vom gesteuerten Anfahrbetrieb in den geregelten Dauerbetrieb über. Regelgröße ist nun der Zudampfdruck: Das Aggregat soll immer so viel Dampf durchsetzen, wie als Überschuss aus dem Prozess der Anlage zur Verfügung gestellt wird. Dabei wird mittels Drehzahl des Aggregates der Dampfdurchsatz geregelt, der Stellantrieb hält das Generatormoment. Die Parameter beider Regelkreise wurden so abgestimmt, dass der Drehmomentregler (Stellantrieb) auch dann sein Drehmoment hält, wenn der andere Regler Drehzahländerungen verursacht. Dies ist deshalb anspruchsvoll, da sich das nötige Moment des Stellmotors ändert, sobald sich die Fliehkraft verändert. Zudem wird bei hohen Drehzahlen ein größerer Schieberhub benötigt, um ein gleiches Drehmoment zu fahren.

Das Drehmoment wurde zunächst auf 90 % des maximal zulässigen Drehmomentes eingestellt. Damit war es möglich, volle Leistung mit 950 1/min zu fahren. Die letztendliche Festlegung des Drehmomentwertes in Abhängigkeit von der Drehzahl wurde im späteren Projektverlauf in Leistungsfahrten ermittelt.

Einschränkungen durch begrenzte Kondensatorkapazität:

Im Zuge des Probetriebs kam es häufig zu Abschaltungen des Aggregates wegen zu hohem Abdampfdrucks. Ursache hierfür war eine zu geringe Leistung des luftgekühlten Kondensators bei hohen Dampfdurchsätzen. Seitens Akzo Nobel wurden entsprechende Maßnahmen geplant, um die Kondensationsleistung zu verbessern. Um bis zu deren Umsetzung die Maschine störungsunempfindlich betreiben zu können, wurden schrittweise Drehzahlgrenze und Drehmomentwerte herunter gestellt. Die Maschine wurde bis dahin mit max. 800 1/min, Drehmoment 65 %, betrieben.

Erhöhung der Kondensatorleistung:

Anfang 2012 wurde durch Akzo Nobel ein zusätzlicher luftgekühlter Kondensator in Betrieb genommen. Damit wurde es möglich, größere Dampfmengen über den Motor zu fahren. Da sowohl der Dampfmotor (bzw. dessen Maximalfüllung) und der Generator Leistungsreserven hatten, konnte das Aggregat nun mit bis zu 7,3 t Dampf in der Stunde fahren und liefert eine Leistung von 250 kW_{el}. Damit konnte die erwartete Motorleistung übertroffen werden, die auf eine Dampfmenge von 6,3 t/h bei Leistung von 219 kW_{el} ausgelegt war.

Kennfelder fahren, Optimierung, Bachelorthesis:

Nachdem die erhöhte Kondensatorleistung einen uneingeschränkten Betrieb des Dampfmotor-Aggregates erlaubte, konnte nun weitgehend frei gewählt werden, ob ein jeweiliger Dampfdurchsatz mit tendenziell hoher Drehzahl oder mit hohem Drehmoment gefahren wird.

Es wurde eine Reihe von Leistungsfahrten durchgeführt, welche ein Kennfeld liefern. Diese Versuche und die daraus folgende optimierte „dynamische Regelung“ wurden im Zuge der Bachelorthesis von Herrn Korn an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg¹ erarbeitet. Diese Arbeit ist jedoch von der Firma Spilling als Betreuer in Absprache mit der Hochschule als vertraulich eingestuft. Mittels der dynamischen Regelung wurde eine weitere Verbesserung der Leistungen im Teillastbetrieb zwischen 8 bis 15 kW gegenüber dem Betrieb mit festem Drehmoment erzielt. Bereits vor der Nutzung der „dynamischen Regelung“ wurde bei Leistungsfahrten nachgewiesen, dass die prognostizierten elektrischen Leistungen bei den zugehörigen Dampfdurchsätzen erreicht oder übertroffen wurden. Die im Projektverlauf erzielten Verbesserungen können anhand des Leistungsdiagramms in Abbildung 7 aufgezeigt werden.

¹ Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (Hrsg.): Bachelorthesis Henry Korn: Leistungsoptimierung an modernen Dampfmotoren, Hamburg: 2012

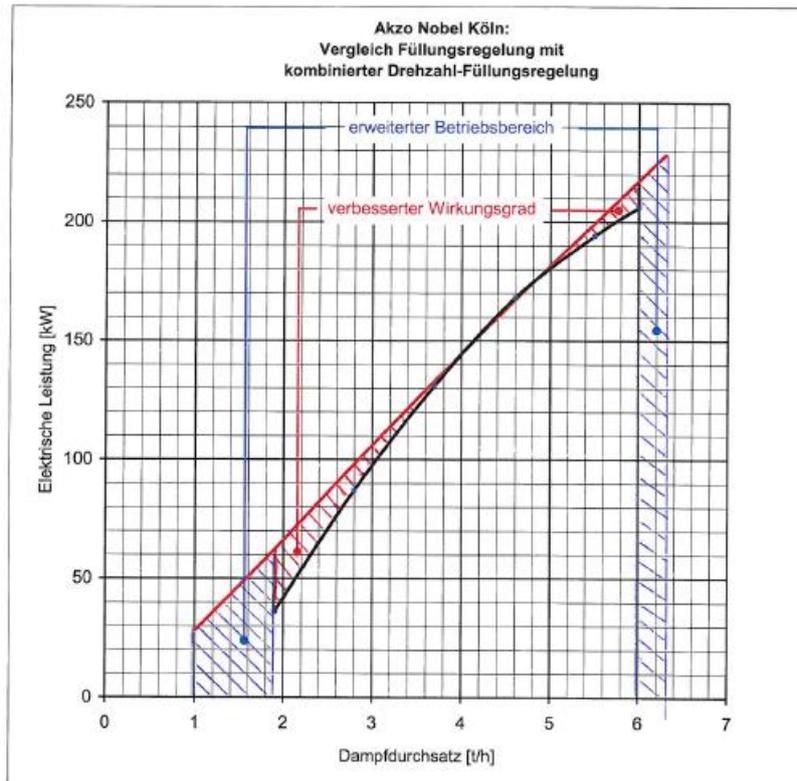


Abb. 7: Leistungsdiagramm der elektrischen Leistung als Funktion des Dampfdurchsatzes [Quelle: Spilling Energie Systeme GmbH]

Dabei repräsentiert die schwarze Kurve die Leistung bei Drehzahlregelung ohne zusätzliche Wirkungsgradoptimierung. Durch die im Projektverlauf hinzugenommene Optimierung durch die Kombination von Füllstandsregelung und Drehzahlregelung (vgl. Aufgabenstellung 3, S. 16) konnte der Wirkungsgrad erheblich gesteigert werden (rot schraffierte Fläche). Der Wirkungsgrad gegenüber der normalen Füllungsregelung wurde je nach Lastpunkt (bezogen auf reine Füllungsregelung) zwischen 0 % und ca. 70 % verbessert. Bei Vollast um ca. 5 %, im mittleren Bereich (etwa 3,5 bis 5,5 t/h) um ca. 0 % und bei Min.-Last (1,9 t/h) um ca. 70 %. Gleichzeitig war es möglich, den Regelbereich auszuweiten, so dass der Dampfgenerator auch bei höheren oder geringeren Durchsatzmengen an Dampf Strom erzeugen kann. Diese Ausweitung ist mit der blauen Schraffierung gekennzeichnet. Der Regelbereich nach unten wurde um 15 % vergrößert, nach oben um 5 %. Die gesamte Regelbereichserweiterung beläuft sich damit auf insgesamt 20 %. Bezogen auf den nominellen Dampfdurchsatz der Füllungsregelung wurde damit ein Regelbereich von 1 t/h : 6,3 t/h, also von 17 % bis 105 %, erreicht.

Diese zusätzliche Optimierung führt unmittelbar zu höheren Mengen an erzeugtem Strom. Für eine Abschätzung, welchen Effekt die Optimierung von Regelbereich und Wirkungsgrad hat, wurde eine Simulation auf Basis eines variablen jährlichen Dampfmassenstromes vorgenommen: Der Dampfstrom verteilt sich annahmegemäß linear (gleichmäßig) zwischen 500 kg/h bis 7.000 kg/h über 8.000 Betriebsstunden. Mit der Füllungsregelung würden dabei rechnerisch rund 950 MWh/a erzeugt werden können, mit kombinierter Regelung rund 1.075 MWh/a. D. h. bei der hier angenommenen gleichmäßigen Verteilung der verfügbaren Dampfmenen kann die elektrische Jahresarbeit (Ausbeute) um ca. 13 % gesteigert werden.

2.4 Behördliche Anforderungen

Behördliche Anforderungen waren im Rahmen des Projektes nicht zu beachten.

3. Ergebnisse

3.1 Bewertung der Vorhabensdurchführung

3.1.1 Akzo Nobel

Aus Sicht von Akzo Nobel ist das Projekt in seiner Grundidee zur Nutzung von Überschussdampfmengen als Erfolg zu bewerten. Die Erwartungen in die Leistung des Dampfmotor-Generators wurden nicht nur erfüllt, sondern aus technischer Sicht übertroffen. Aus wirtschaftlicher Sicht konnte der angestrebte Nutzen bisher jedoch nicht erreicht werden. Dies liegt zum einen an zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht vorhergesehenen Zusatzkosten in Höhe von € 12.185,-, die das Projekt während seiner Durchführung auslöste. Zum anderen kam es während der Projektdauer zu einem signifikanten Rückgang der für eine Verstromung zur Verfügung stehenden Mengen an Überschussdampf.

So zeigte sich in der Demonstrationsphase, dass der schon vorhandene Wärmetauscher für den atmosphärischen Dampf zu klein dimensioniert war. Höhere Dampfdrücke waren in der bisherigen Anlagenkonfiguration unproblematisch; eine Druckmessung am Wärmetauscher war unnötig und daher nicht installiert. Der neu implementierte Dampfmotor hat jedoch zu seiner Absicherung eine Abdampfdruckmessung, die zwischen 0,3 bar_ü und 1,0 bar_ü liegt. Sollten die Werte unterschritten oder überschritten werden, so schaltet sich der Dampfmotor ab. Wie der Testbetrieb zeigte, wurden derartige Werte regelmäßig erreicht, so dass es zu vergleichsweise häufigen Abschaltungen des Motors kam. Dies war für das gewünschte Projektziel nicht hinnehmbar.



Abb. 8: alter Wärmetauscher im Hintergrund, zusätzlich installierter im Vordergrund [Quelle: Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH]

Für einen konstanten Dauerbetrieb im Auslegungsbereich bis zu 6,3 t/h Dampf musste daher der Dampfdruck reduziert und verstetigt werden. Hierzu musste ein zusätzliches Regelventil in

die Abdampfleitung eingebaut und ein zweiter Wärmetauscher installiert werden. Dies führte zu ungeplanten Mehrkosten in Höhe von € 12.000,--.

Mit Beginn der Projektumsetzung verschlechterte sich zudem das ökonomische Umfeld für Akzo Nobel Köln drastisch und in einem nicht erwarteten Ausmaß. Einbrechende Kundenaufträge führten zu einer erheblichen Reduzierung der Produktion am Standort, die unmittelbar einen Rückgang der Überschussdampfmengen zur Folge hatten. Anstelle der geplanten gut 63.000 Tonnen Überschussdampf fielen im Jahr 2012 lediglich 34.942 Tonnen an, von denen 23.565 Tonnen verstromt wurden. Zeitweise musste sogar Dampf für die Produktion erzeugt werden, so dass kein Überschussdampf zur Verstromung bereit stand. Damit musste nicht nur die Demonstrationsphase des Projektes verlängert werden, sondern konnten auch die erwarteten Einsparungen im Energiebezug nicht realisiert werden.

3.1.2 Spilling

Aus Sicht des Technologielieferanten Spilling stellten sich im Projektverlauf im Wesentlichen drei Aspekte als problematisch heraus:

- Anpassung der Ansteuerung des Reglerwellen-Stellmotors aus dem FU, um einen funktionsgerechten Betrieb zu erzielen. Hier war erheblicher Aufwand erforderlich, bis hin zu Eingriffen in die interne Logik der FU-Steuerung.
- Optimierung der verschiedenen Regelungen, um ein Pendeln der Maschine zu verhindern. Da die Zudampfdruckregelung des Motors nicht nur auf die Drehzahl, sondern bei der kombinierten „dynamischen Regelung“ auf die Füllungsverstellung wirkt, waren im Zuge der Versuchsfahrten die Drehzahl- und Momentenregelung des Frequenzumrichters so zu verändern, dass deren Wechselwirkungen nicht zum Aufschwingen bzw. zum Pendeln führen.
- In diesem Zusammenhang wurden auch nachträglich mechanische Änderungen des Systems Stellmotor / Steuerwelle vorgenommen.

Mit ihrer Lösung konnte das Projekt jedoch besser umgesetzt werden, als in der Planung angenommen. Die zugesicherten Parameter wurden nicht nur eingehalten, sondern in einigen Fällen sogar übertroffen. Alle in der Zielsetzung aufgeführten Erfolgskriterien konnten erreicht werden:

- ✓ Die effiziente Verstromung variabler Dampfmengen und hierfür
- ✓ eine Steigerung des Wirkungsgrades lastabhängig bis zu 70 %;
- ✓ eine Ausweitung des effektiv nutzbaren Lastbereichs im Hinblick auf den Dampfdurchsatz;
- ✓ eine Ausweitung des Regelbereichs um 15 % nach unten und 5 % im oberen Bereich;
- ✓ ausreichende Robustheit des Aggregats zum Einsatz im Dauerbetrieb und hierfür
- ✓ eine Verringerung des Verschleißes im Teillastbetrieb und damit eine Erhöhung der Bauteilstandzeit im Zylinderbereich.

Zusammenfassend und in Gegenüberstellung zur vergleichbaren konventionellen Lösung sind die wesentlichen Ergebnisse in der untenstehenden Tabelle 3 dargestellt. Dabei werden die geplanten und realisierten Daten ausgewiesen.

		Aggregat, konventionell	Projekt, geplant	Projekt, realisiert
Regelungskonzept	Einheit	n = konst. M = var.	n = var. M = var.	n = var., M = var., "dyn."
Maximale Leistung	kW _{el}	208	219	250
Maximaler Dampfdurchsatz	t/h	6,0	6,3	7,3
Regelbereich Dampfdurchsatz	t/h	1,9 bis 6,0	0,8 bis 6,3	0,8 bis 7,3
Regelbereich Dampfdurchsatz	%	1:3,2	1:7,9	1:9,1
Drehzahlregelbereich	1/min	1.000, konstant	250 - 1.050	250 - 1.050

Tab. 3: Umsetzungsergebnisse der Regelkonzepte [Quelle: eigene Darstellung]

3.2 Energiebilanz / Umweltbilanz

Das Demonstrationsvorhaben wurde mit der Maßgabe angegangen, ungenutzte Energie aus Überschusdampf der Produktionsanlagen am Standort Köln nutzbar zu machen und so den bereits etablierten Stoff- und Energiekreislauf weiter zu schließen. Diese Energie sollte über den innovativen Dampfmotorgenerator in Strom umgewandelt und in das betriebseigene Netz eingespeist werden. In dem Umfang, in dem der Strom eingespeist werden kann, kann Akzo Nobel seinen konventionellen Strombezug bei seinem Versorger reduzieren und somit die korrespondierende Menge an CO₂ einsparen. Die anschließende Tabelle 4 zeigt nochmals die zum Antragszeitpunkt erwarteten Umwelteffekte pro Jahr auf.

	Primärenergie in MW	CO ₂ in t	Wasser in m ³
Stromgewinnung	2.400	1.500	-
Kondensat-Rückgewinnung	1.300	670	16.000
Summe	3.700	2.170	16.000

Tab. 4: jährliche erwartete Rückgewinnung an Energie und Vermeidung von CO₂ zum Antragszeitpunkt [Quelle: eigene Darstellung]

Bereits vor Start des Demonstrationsvorhabens führte Akzo Nobel den Überschusdampf über einen Kondensator (Wärmetauscher) und verwendete das Kondensat für die Dampferzeugung wieder. Im Verlauf der Projektrealisierung wurde ein zusätzlicher Wärmetauscher installiert, um Sicherheitabschaltungen des Dampfmotors aufgrund zu hoher Dampfdrücke zu vermeiden. Mit diesem weiteren Wärmetauscher kann zusätzliches Kondensat zurückgewonnen und der Dampferzeugung wieder zugeführt werden. Dieser zusätzliche Umwelteffekt war zum Projektstart nicht intendiert.

Laufend erhoben werden jedoch die Mengen an Überschusdampf an ihren Messstellen wie in Tabelle 5 im Jahr 2012 exemplarisch ausgewiesen.

Tag	Beschreibung	Datum Zählerstand		Menge 2012
		31.12.2011	31.12.2012	
C91FQ201	Dampf zum Dampfmotor	16.435	40.000	23.565 t
C91FQ112	Dampf zum Dampfblüfer	216.431	227.808	11.777 t
Summe Dampfüberschuss 4 bar				34.942 t
Abgegebene Leistung Dampfmotor 2012:				755.093 kWh

Tab. 5: Überschusdampfmengen ausgewiesen nach Aufnahmepunkten im Jahr 2012 [Quelle: eigene Darstellung]

Im Jahr 2012 konnten 23.565 Tonnen an Überschussdampf dem Dampfmotor zugeführt (vgl. Tabelle 5 Zeile 1) und damit 755.093 kWh Strom erzeugt werden. Dabei konnte der Dampfmotor an 212 Tagen in Betrieb genommen werden. Bei einer theoretischen Verfügbarkeit von 355 Tagen, wie sie durch die normale Betriebsführung am Standort Köln gegeben ist, konnte in ihrem Jahr lediglich eine 60-%ige Betriebsauslastung des Motors erzielt werden. Die Mengen an Überschussdampf, die während der Stillstandszeiten des Motors anfielen (11.777 t, siehe Zeile 2 der Tabelle 5), wurden direkt über den Dampf Lüfter zur Kondensation geleitet.

Im Ergebnis sind damit Auslastung des Motors und erzeugte Strommengen aus den bereits genannten Gründen - im Wesentlichen der erheblich geringeren Überschussmengen an Dampf - weit hinter den Erwartungen zurückgeblieben. Tabelle 6 zeigt den Verlauf der zur Verfügung stehenden Menge an Überschussdampf während des Projektzeitraums auf. Dabei werden sowohl die monatlichen Werte als auch die gesamten Jahreswerte als Zwischensumme ausgewiesen.

Monat / Jahr	Überschussdampf gesamt in t	Überschussdampf am Dampfmotor zur Verstromung in t
Jan. 09	332	0
Feb. 09	2.648	0
Mrz. 09	2.827	0
Apr. 09	931	0
Mai 09	3.930	0
Jun. 09	3.898	0
Jul. 09	3.901	0
Aug. 09	1.622	0
Sep. 09	2.336	0
Okt. 09	3.693	0
Nov. 09	4.691	0
Dez. 09	2.967	0
Summe 2009	33.776	0
Jan. 10	3.479	0
Feb. 10	4.353	0
Mrz. 10	4.579	0
Apr. 10	4.064	0
Mai 10	3.489	0
Jun. 10	3.750	0
Jul. 10	4.839	0
Aug. 10	4.645	0
Sep. 10	3.514	0

Monat / Jahr	Überschussdampf gesamt in t	Überschussdampf am Dampfmotor zur Verstromung in t
Okt. 10	1.868	0
Nov. 10	272	0
Dez. 10	689	0
Summe 2010	39.541	0
Jan. 11	2.477	0
Feb. 11	4.308	0
Mrz. 11	3.492	0
Apr. 11	747	0
Mai 11	360	0
Jun. 11	3.355	3.052
Jul. 11	3.985	3.064
Aug. 11	3.891	2.309
Sep. 11	2.292	1.965
Okt. 11	3.031	2.632
Nov. 11	2.647	1.707
Dez. 11	2.314	1.706
Summe 2011	32.899	16.435
Jan. 12	3.666	1.294
Feb. 12	1.132	22
Mrz. 12	1.487	994
Apr. 12	2.095	1.659
Mai 12	3.315	2.676
Jun. 12	4.856	2.798
Jul. 12	3.025	2.401
Aug. 12	3.681	3.187
Sep. 12	5.425	3.937
Okt. 12	3.019	2.329
Nov. 12	1.231	482
Dez. 12	2.010	1.786
Summe 2012	34.942	23.565
Jan. 13	1.837	1.073

Monat / Jahr	Überschussdampf gesamt in t	Überschussdampf am Dampfmotor zur Verstromung in t
Feb. 13	2.600	2.239
Mrz. 13	5.141	4.342
Apr. 13	7.719	4.003
Mai 13	1.790	1.645
Jun. 13	2.402	2.115
Jul. 13	1.608	1.188
Aug. 13	2.207	1.945
Sep. 13	5.172	4.267
Okt. 13	3.314	3.125
Nov. 13	1.026	679
Dez. 13	1.360	1.266
Summe 2013	36.176	27.887

Tab. 6: angefallene Mengen an Überschussdampf im Projektzeitraum [Quelle:eigene Darstellung]

Aufgrund von Schwankungen in der Dampfmenge und bei Stillständen des Dampfmotors konnten nicht alle Mengen des angefallenen Überschussdampfes über den neuen Dampfmotor verstromt werden. Die folgende Tabelle 7 stellt jahresweise die absoluten Mengen an Überschussdampf und die tatsächlich verstromten Mengen an Überschussdampf gegenüber. Ergänzt wird die Tabelle um den Ausweis der erzeugten Mengen an Strom und die aus dieser Stromgewinnung resultierenden CO₂-Einsparungen. Da die Strommengen alternativ über den Stromversorger eingekauft würden, wurde zur Ermittlung der CO₂-Einsparung das CO₂-Equivalent des deutschen Strommixes in Höhe von 576 g/kWh zugrunde gelegt.

Jahr	Dampf gesamt in t	Verstromter Überschussdampf in t	Erzeugte Strommenge in MWh	CO ₂ - Einsparung in t	Kondensat in m ³
2010	39.541	0	0	0	0
2011	32.899	16.435	644	370,90	5.051.704
2012	34.942	23.565	755	434,88	8.809.612
2013	36.176	27.887	1.025	590,40	9.743.601
Summe	143.588	67.887	2.424	1.396,18	23.604.917

Tab. 7: Überschussdampf, Stromerzeugung, CO₂-Einsparung und Wassereingang im Projektverlauf [Quelle: eigene Darstellung]

Im letzten Projektjahr 2012 konnten mit 23.565 Tonnen rund 37,4 % der ursprünglich geplanten Menge von 63.000 t Überschussdampf verstromt werden, 2013 erreichte dieser Wert immerhin gut 44,2 %. Dementsprechend blieben auch die erreichten CO₂-Einsparungen hinter den Erwartungen zurück: Als Zielwert der CO₂-Einsparungen durch Verstromung waren in der Projektplanung 1.500 t angestrebt. 2012 wurden hiervon rund 29 % der geplanten Ein-

sparungen erzielt, im Jahr 2013 verbesserte sich dieser Wert auf gut 39,4 %. Auch wenn durch die bisher erreichten Einsparungen die gesetzten Ziele nicht erreichen werden konnten, ist Akzo Nobel zuversichtlich über die Lebensdauer des Dampfmotors, erhebliche Strommengen und damit CO₂-Einsparungen erzielen zu können. Die tatsächlich anfallenden Werte sind dann unmittelbar abhängig vom weiteren Verlauf der Produktionsauslastung am Standort Köln.

Angesichts eines Gesamtstromverbrauchs von 7,4 GWh im Jahr 2012² konnten damit gut 7,1 % des Gesamtbedarfs über das Projekt CO₂-neutral bereitgestellt werden. Abhängig von der konjunkturellen Entwicklung wird die Produktionsmenge am Standort Köln künftig wieder ausgeweitet werden. Die Gesamtmenge an verfügbarem Überschussdampf wird dann ebenfalls zunehmen. Die Ausbeute an Strom aus dem Überschussdampf steigt dabei stärker als die für die Produktionssteigerung aufzuwendende Energiemenge. Damit wird in Relation die CO₂-neutrale Rückgewinnung von Energie überproportional zum Gesamtverbrauch steigen. Dies zeigt bereits der deutliche Zuwachs an Einsparungspotenzial im Vergleich von 2012 zu 2013.

3.3 Konzeption, Durchführung und Ergebnisse des Messprogramms

Der prinzipielle Erfolg des Projekts besteht in der tatsächlichen Verstromung von Überschussdampfmengen und ihre Einspeisung in das betriebsinterne Netz. Die Ermittlung der verifizierenden Parameter konnte über einfache Messungen und Berechnungen erfolgen. Diese sind im Wesentlichen:

Dampfdurchsatz (t/h):	Dampfmengenmessung Akzo Nobel, vor Motor
Elektrische Leistung (kW _{el}):	Netzseitiger Ausgang des Frequenzumrichters
Drehzahl:	Messung durch Frequenzumrichter
Drehmoment:	Berechnung durch Frequenzumrichter
Druck vor und nach Motor:	Druckmessumformer an Dampfmotor

Die am Dampfmotor von der SPS der Dampfmotoren-Steuerung gemessenen Daten wurden während der Messreihen sekundlich ausgelesen und auf einem PC gespeichert. Beispielhafte Messergebnisse finden sich als Auszug der jeweiligen Datei im Anhang.

3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Das Unternehmen Akzo Nobel ging bei Projektstart davon aus, dass die Verstromung der bisher ungenutzten Mengen an Überschussdampf trotz der mit einem Demonstrationsvorhaben verbundenen Unsicherheit langfristig wirtschaftlich tragfähig sei. Unter Berücksichtigung der ursprünglich angesetzten Projektkosten in Höhe von € 695.736,-- und einer zur Verfügung stehenden Dampfmenge von 63.000 Tonnen/Jahr wurde eine Amortisationsdauer von 5,4 Jahren errechnet. Schon während der Projektlaufzeit wurde rasch deutlich, dass diese Amortisationszeit deutlich überschritten werden würde. Im Wesentlichen haben dazu zwei Faktoren beigetragen: Zum einen ging die zur Verstromung zur Verfügung stehende Dampfmenge im Zug der einsetzenden Wirtschaftskrise erheblich zurück und kehrte bis zum Jahr 2013 nicht auf ihr ursprüngliches Niveau zurück. Zum anderen erhöhten sich die für eine erfolgreiche Projektumsetzung notwendigen Kosten im Durchführungszeitraum erheblich und lagen letztlich bei € 707.921,--. Die nachfolgende Tabelle 8 stellt die ursprüngliche Kostenplanung laut Antragstellung und die tatsächlich angefallenen Kosten nebeneinander.

² Umweltbericht 2013 der Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH

Teilvorhaben	geplante Kosten in €	tatsächliche Kosten in €
Planung	120.515	140.447
Engineering und Konstruktion	121.603	130.476
Bauplatzvorbereitung	65.500	46.831
Montage und Einbindung	284.074	312.623
Inbetriebnahme und Nullstart	91.026	67.044
Testphase	3.002	10.500
Evaluation / Feinabstimmung	2.003	0
Demophase	6.027	0
Evaluation und Übergabe	1.986	0
Summe	695.736	707.921

Tab. 8: geplante und tatsächliche Kosten der Projektdurchführung [Quelle: eigene Darstellung]

Wann das Projekt tatsächlich amortisiert sein wird, ist derzeit nur unter Vorbehalt zu ermitteln. Im Rahmen der ursprünglichen Amortisationsrechnung wurde von den damals beantragten Projektkosten in Höhe von € 695.736,- ausgegangen, die Abschreibungskosten wurden auf Basis der Nettoinvestitionskosten (Anschaffungskosten abzüglich der Fördersumme) gemäß AfA über 10 Jahre verteilt. Ab dem 4. Jahr wurden zudem Betriebs- und Wartungskosten i. H. v. jährlich € 13.350,- berücksichtigt. Die ursprünglich erwarteten und in der Amortisationsrechnung angesetzten Einsparungen ergaben sich aus den damals veranschlagten Bezugskosten für Strom und den verstromten Mengen an Überschussdampf mit einer im Projektverlauf jährlich steigenden Verfügbarkeit des Dampfmotors von anfänglich 40 % (im Jahr 2010), 70 % (geplant für 2011) und erwarteten 100 % ab dem Jahr 2012.

	Jahr	Einsparung	Anschaffungs- auszahlung abzgl. Förderung	Abschreibung auf Nettoinvestition und Betriebskosten	Summe aller Zahlungen
1	2009	0	- 86.104	0	- 86.104
2	2010	28.921	- 395.653	- 16.234	- 469.070
3	2011	151.835	- 5.258	- 48.702	- 371.195
4	2012	216.907	0	- 62.052	- 216.340
5	2013	216.907	0	- 62.052	- 61.485
6	2014	216.907	0	- 62.052	93.370

Tab. 9: Amortisationserwartung zum Zeitpunkt der Antragstellung [Quelle: eigene Darstellung]

Letztendlich konnten die in der ursprünglichen Amortisationsrechnung unterstellten Ergebnisse nicht erreicht werden. So betrug die maximale Auslastung des Dampfmotors im Jahr 2012 gerade einmal 60 % gegenüber ursprünglich veranschlagten 100 %. Für eine vergleichende Amortisationsbetrachtung aus heutiger Sicht wurde die ursprüngliche Systematik beibehalten und auf die aktuelle Situation übertragen: Dies gilt für die Anschaffungskosten und Abschreibungsbeträge sowie für den Ansatz der Betriebs- und Wartungskosten erst ab dem Jahr 2014. Die Einsparungen resultieren aus der Stromerzeugung und wurden bis einschließlich 2012 auf die tatsächlich erreichten Werte bei einem Bezugspreis von 0,07 €/kWh ermittelt. Für die Folgejahre wird der Wert von 2012 als Mittelwert herangezogen, um Schwankungen bei der Produktionsmenge und damit der möglichen Erzeugung von Strom aus Überschussdampf auszugleichen.

	Jahr	Einsparung	Anschaffungs- auszahlung abzgl. Förderung	Abschreibung auf Nettoinvestition und Betriebskosten	Summe aller Zahlungen
1	2009	0	- 130.058,00	0	- 130.058,00
2	2010	0	- 436.910,83	0	- 566.968,83
3	2011	28.459,00	- 104.272,00	- 4.160,00	- 646.941,83
4	2012	70.540,00	- 36.682,73	- 49.920,00	- 663.004,56
5	2013	70.540,00	0	- 63.426,00	- 655.890,56
6	2014	70.540,00	0	- 63.270,00	- 648.620,56
7	2015	70.540,00	0	- 63.270,00	- 641.350,56
8	2016	70.540,00	0	- 63.270,00	- 634.080,56
9	2017	70.540,00	0	- 63.270,00	- 626.810,56
10	2018	70.540,00	0	- 63.270,00	- 619.540,56
11	2019	70.540,00	0	- 63.270,00	- 612.270,56
12	2020	70.540,00	0	- 63.270,00	- 605.000,56
13	2021	70.540,00	0	- 59.110,00	- 593.570,56
14	2022	70.540,00	0	- 13.350,00	- 536.380,56
15	2023	70.540,00	0	- 13.350,00	- 479.190,56
16	2024	70.540,00	0	- 13.350,00	- 422.000,56
17	2025	70.540,00	0	- 13.350,00	- 364.810,56
18	2026	70.540,00	0	- 13.350,00	- 307.620,56
19	2027	70.540,00	0	- 13.350,00	- 250.430,56
20	2028	70.540,00	0	- 13.350,00	- 193.240,56
21	2029	70.540,00	0	- 13.350,00	- 136.050,56
22	2030	70.540,00	0	- 13.350,00	- 78.860,56
23	2031	70.540,00	0	- 13.350,00	- 21.670,56
24	2032	70.540,00	0	- 13.350,00	35.519,44

Tab. 10: Amortisationserwartung bei unveränderter Menge an Überschussdampf [Quelle: eigene Darstellung]

Anhand dieser Zahlen ist derzeit von einer Amortisationsdauer von 24 Jahren auszugehen. Akzo Nobel ist zuversichtlich, dass diese Amortisationsdauer als worst-case-Szenario gelten kann. Mit zunehmender Erholung der Weltwirtschaft und damit Steigerung der Produktion am Standort könnte die Amortisationsdauer verkürzt werden.

3.5 Vergleich zum konventionellen Verfahren

Beim konventionellen Verfahren werden Durchsatz und Leistung bei konstanter Drehzahl durch Verstellung der Füllung (Hub der Steuerschieber) verstellt. Die Leistung wird also durch Variation des Drehmoments verändert. Die Stromerzeugung erfolgt mittels eines Synchron-Generators, der direkt am 400-V-Netz arbeitet.

Bei einer reinen Drehzahlregelung werden bei konstanter und großer Füllung - also konstantem Drehmoment - der Durchsatz und die abgegebene Leistung variiert. Die Einspeisung der elektrischen Leistung erfolgt über einen Frequenzumrichter, da aufgrund der variablen Drehzahl eine variable Frequenz durch den Asynchron-Generator erzeugt wird.

Die Kombination beider Regelprinzipien, wie sie in diesem Vorhaben umgesetzt ist, erlaubt die Verstellung von Drehzahl und Füllung. Dies ermöglicht eine erhebliche Vergrößerung des Regelbereiches:

- große Füllung + hohe Drehzahl für maximalen Durchsatz;
- kleine Füllung + kleine Drehzahl für geringen Durchsatz.

Zudem erlaubt die Kombination beider Verfahren die Optimierung des Wirkungsgrades durch die sogenannte dynamische Regelung unterhalb des maximalen Lastpunktes.

Die Vorteile einer kombinierten Drehzahl- / Füllungsregelung von Dampfmotoren hinsichtlich des Betriebsbereichs und der Leistungsausbeute werden durch die Daten in der Tabelle 3 unter Punkt 3.1.2 eindrucksvoll dokumentiert.

Für die betriebliche Praxis von Anlagen zur Verstromung von Überschussdampf (Wärme) erlaubt das neue Generator- und Regelkonzept sowohl die bessere Nutzung von Massenströmen im unteren Betriebsbereich als auch eine gewisse Erweiterung im oberen Lastbereich und somit die Erzeugung einer größeren elektrischen Jahresarbeit bei Anwendungen mit einer großen Schwankungsbreite der Dampfmassenströme.

Im Vergleich zu Motoren mit fester Drehzahl sinken im Teillastbetrieb mit variabler Drehzahl auch die Geschwindigkeiten von Kolben und Steuerschiebern. Dies führt zu einer Reduktion des Verschleißes von Kolben sowie Schieberingen und somit auch zu einer Reduktion der Betriebskosten aufgrund längerer Bauteilstandzeiten.

Die Hardware-Mehrkosten des neuen Konzeptes mit variabler Drehzahl und variabler Füllung gegenüber der konventionellen Ausführung mit fester Drehzahl liegen in einer Bandbreite zwischen 8 und 10 %. Die Amortisationsdauer dieser Mehrinvestition hängt vom Lastgang des Dampfdurchsatzes jedes einzelnen Projektes ab.

4. Empfehlungen

4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

In der Rückschau ist hauptsächlich die Änderung der Füllungsregelung mit Stellmotor und dessen Ansteuerung über den Haupt-Frequenzumrichter als kritischer Teil des Projektes zu benennen, der aber erfolgreich bewältigt werden konnte. Die anfangs zu geringe Kondensationsleistung ist eher als „normales“ anlagentechnisches Problem zu sehen, das zwar den Betrieb mit großen Dampfmenen erst später ermöglichte, aber kein die Realisierung des Projektes gefährdendes Hemmnis darstellte.

Das Konzept hat sich prinzipiell bewährt und wird als praxis- und marktauglich bewertet. Die im Zuge des Projektes gewonnenen Erfahrungen versetzten das Unternehmen Spilling in die Lage, mit und teils auch ohne Modifikationen vergleichbare Aggregate am Markt anzubieten: Aufgrund der verfügbaren Frequenzumrichtertechnik kann das bei Akzo Nobel realisierte Konzept der kombinierten Drehzahl- und Füllungsregelung prinzipiell bei allen Spilling-Dampfmotoren der Baureihen 12 und 14 realisiert werden. Für Motoren mit ein bis drei Zylindern kann das Konzept nahezu 1:1 angewendet werden. Bei Motoren mit größerer Zylinderzahl (vier bis sechs) sind weitere konstruktive Anpassungen des Reglerwellen-antriebs erforderlich. Bei diesen Motoren sind zwei Stellmotoren notwendig, um die erforderlichen Stellkräfte sicher in die Reglerwelle einzubringen.

Für Akzo Nobel hat sich im Rahmen der Praxiseinführung ein funktionsfähiger innovativer Dampfmotor realisieren und erfolgreich in den Produktionskreislauf implementieren lassen. Er ist wie gewünscht in großen und variablen Lastbereichen einsetzbar und kann auch schnelle Lastveränderungen abfedern. Gleichzeitig ist im Projektverlauf deutlich geworden, dass die Abdampfseite des Prozesses einen erheblichen Einfluss auf den Projekterfolg hat, obgleich sie bis dahin keiner weiteren Beachtung bedurfte. Da es bei zu hohem Abdampfdruck zu Leistungsverlusten und Abschaltungen des Motors kam, mussten Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Diese führten wie beschrieben zu Projektverzögerungen und Kostensteigerungen. Durch die vom Technologiegeber vorgenommene Ausweitung des Projekts im Rahmen der automatisierten Steuerung konnte Akzo Nobel eine zusätzliche Leistungssteigerung des Aggregats realisieren. Der Motor scheint zudem robust und wartungsarm zu sein, soweit es

der bisherige Dauerbetrieb zeigt. Bei möglichen künftigen Installationen an Standorten von Akzo Nobel wird vor diesem Hintergrund der Abdampfseite von Beginn der Projektplanung an die notwendige Aufmerksamkeit gewidmet werden.

4.2 Modellcharakter

Die signifikante Erweiterung des Regelbereiches von Dampfmaschinen durch die kombinierte Drehzahlfüllungsregelung in Verbindung mit entsprechenden Generator-Frequenzumrichter-sätzen kann überall dort technisch und ökonomisch sinnvoll eingesetzt werden, wo große Schwankungsbreiten von Dampfmassenströmen für die Stromerzeugung genutzt werden sollen. Bei derartigen Verhältnissen können die zusätzlichen Investitionskosten der einzusetzenden Frequenzumrichter-Technik durch den vergrößerten Regelbereich und den verbesserten Wirkungsgrad angemessen amortisiert werden.

Nach dem erfolgreichen Abschluss der Versuchsreihen in 2013 wird Spilling bei entsprechenden Projekten in vergleichbarer Konfiguration wie bei Akzo Nobel anbieten und hat dies für ein erstes Projekt bereits getan. Dabei handelt es sich zunächst um Motoren mit bis zu drei Zylindern. Die Realisierung steht jedoch noch aus. Wie unter 4.1 beschrieben, ist eine Realisierung des Konzeptes aufgrund der Erfahrungen auch mit größeren Motoren möglich. Die entsprechende Umrichtertechnik steht hierfür zur Verfügung, jedoch sind hier konstruktive Änderungen des Reglerwellenantriebs notwendig. Derartige Anpassungen werden mit Vorliegen von entsprechenden Anfragen vorgenommen.

Grundsätzlich konnte Akzo Nobel Köln im Rahmen der Projektumsetzung eine Reihe wertvoller Erfahrungen sammeln, die nicht zuletzt auch Auswirkungen auf weitere Optimierungen der Bestandsanlagen hatten, wie sie mit der Installation einer weiteren Wärmepumpe umgesetzt wurden.

Das Projekt sollte nicht zuletzt als Modell für die internationalen Standorte des Konzerns dienen, um dort im Erfolgsfall ebenfalls zur Reduzierung des Energieverbrauchs und carbon footprints beizutragen. Wegen der Verzögerungen im Projekt und der wirtschaftlichen Einbrüche konnte das geförderte Vorhaben bisher seinen konzernweiten Modellcharakter noch nicht zeigen. Dies wird sich in den nächsten Monaten ändern, wenn nicht zuletzt dieser Abschlussbericht als Vorlage für die interne Kommunikation des Vorhabens genutzt werden wird.

5. Zusammenfassung

Das Projekt „DrehDaG“ wurde am 17.06.2009 gestartet und konnte am 31.10.2012 nach Abschluss der geplanten Demonstrationsphase abgeschlossen werden. Verbunden mit dem Projekt waren hohe Erwartungen an die potenziellen Mengen verstrombaren Überschussdampfes aus dem Produktionsprozess von Akzo Nobel am Standort Köln gestellt worden. Anstatt ungenutzt in die Atmosphäre zu entweichen, sollte die enthaltene Energie nutzbar und der carbon footprint des Unternehmens gesenkt werden. Das Projekt ist offiziell abgeschlossen und konnte seine technisch gesetzten Ziele voll und ganz erfüllen.

Die Projektkosten haben sich gegenüber der Ausgangsplanung jedoch aufgrund auftretender technischer Schwierigkeiten erhöht und die Projektausführung modifiziert. So musste ein zusätzlicher Kondensator (Wärmetauscher) installiert werden, um Druckspitzen des Überschussdampfes aus den Anlagen abzufedern. Diese hatten zu Abschaltungen des drehzahlvariablen Dampfmaschinen geführt.

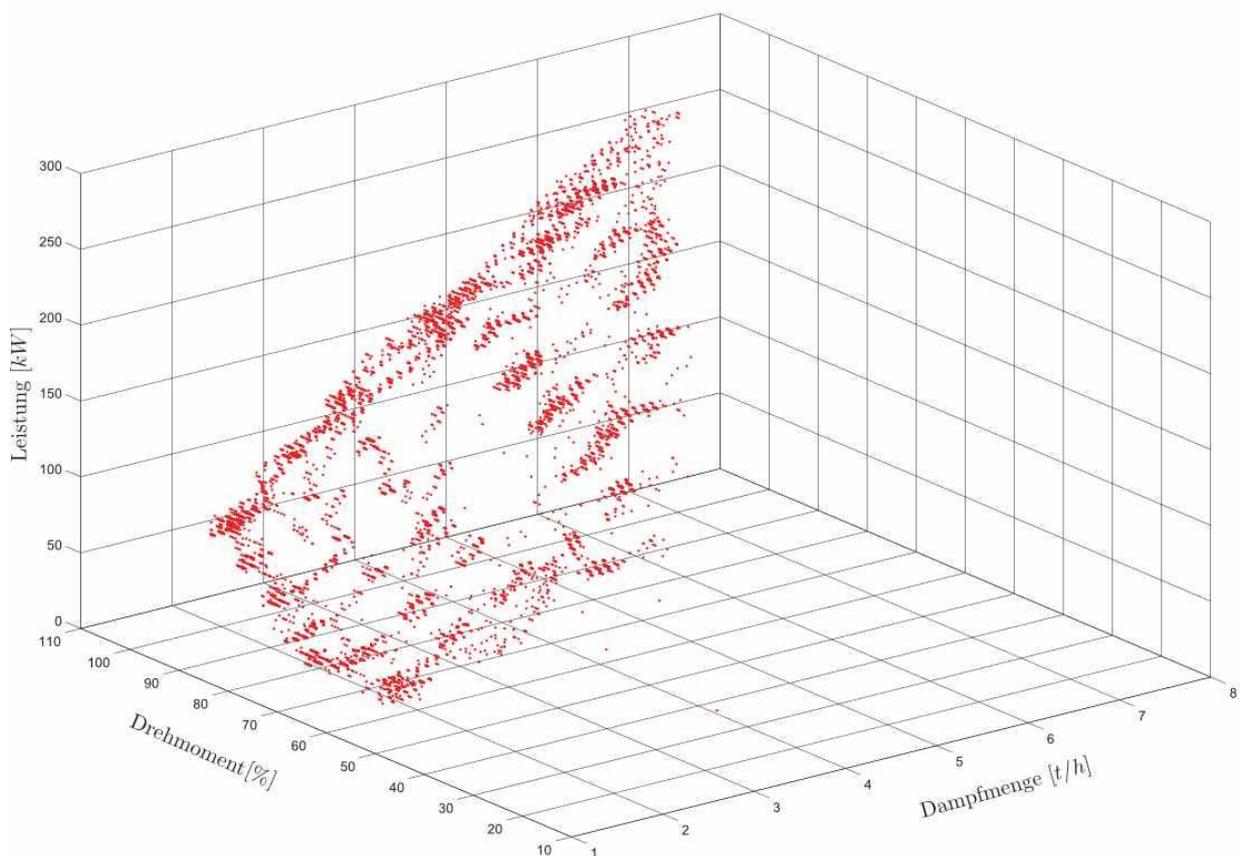
Technisch erfolgreich konnten im Projekt dennoch nicht die ursprünglich erwarteten Mengen an Überschussdampf verstromt werden. Neben den technischen Problemen während der Umsetzung war hier vor allem die verringerte Gesamtproduktion am Standort im Zuge der

Wirtschaftskrise ursächlich: Die Produktion von Schwefelkohlenstoff als Quelle des Überschusdampfes wurde ab 2010 erheblich reduziert. Dies führt zu erheblich geringen Strommengen und durch die gleichzeitig erhöhten Projektkosten zu weit längeren Amortisationszeiten als erhofft.

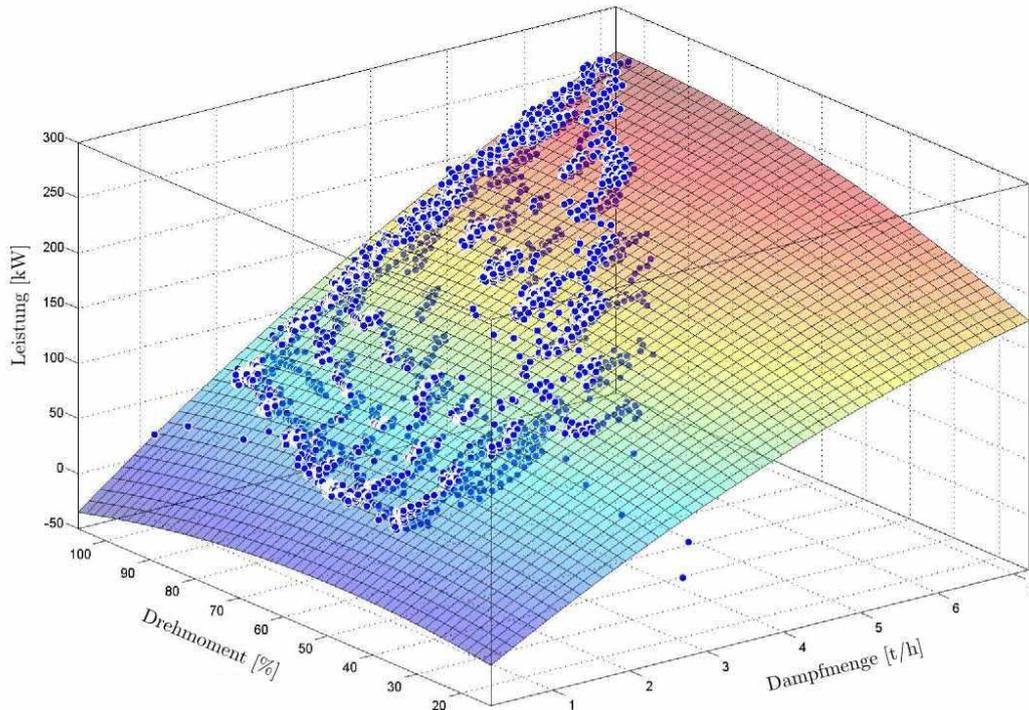
Realisiert werden konnten im Förderzeitraum 2009 bis 2012 die Verstromung von 40.000 t an Überschusdampf und damit eine Strommenge von 1.399 MWh erzeugt werden. Dies führte zu einer Einsparung von 805,78 t CO₂. Darüber hinaus konnten 13.861.316 m³ Kondensat zurück-gewonnen werden. Es wurden in diesem Zeitraum 141.158 t Dampf erzeugt.

6. Beispiele zu Messwerten aus dem Messprogramm

Messwerte der erzeugten Leistung (P) als Funktion von Drehmoment (M in %) und Dampfdurchsatz (m in t/h)

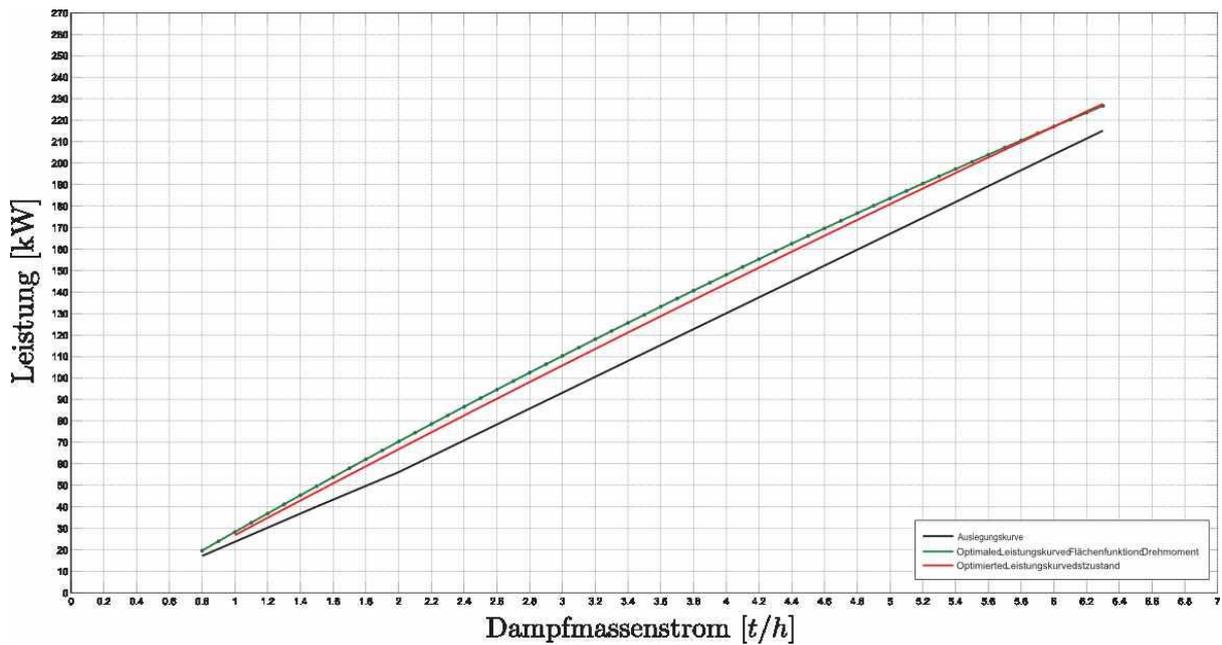


Regressionsfläche aus Messdaten der erzeugte Leistung (P) als Funktion von Drehmoment (M in %) und Dampfdurchsatz (m in t/h)



Leistungsdiagramm der elektrischen Leistung (P in KW) als Funktion des Dampfdurchsatzes (m in t/h)

- Schwarz: Vergleich von Sollkurve
- Grün: Optimierte rechnerische Idealkurve
- Rot: Optimierte Ist-Kurve



Die Sollkurve (schwarz) stellt die Verhältnisse bei Drehzahlregelung ohne zusätzliche Wirkungsgradoptimierung dar, wie diese ursprünglich mit dem Konzept realisiert werden sollte. Mittels der später ergänzten Optimierung durch die intelligente Kombination von Füllungsregelung mit Drehzahlregelung wurde der Wirkungsgrad gesteigert: Ist-Kurve (rot). Die grüne Kurve stellt das theoretische Optimum dieser kombinierten Regelung dar.

7. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
1/min	Umdrehungen pro Minute
Abb.	Abbildung
bar _ü	bar Überdruck
bzgl.	bezüglich
dyn.	dynamisch
Fa.	Firma
FU	Frequenzumrichter
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
h	Stunde
Hz	Hertz
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
konst.	konstant
kVA	Kilo-Volt-Ampere
kW	Kilowatt
kW _{el}	Kilowatt elektrisch
M	Mega
mm	Millimeter
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
n	Newton (Masseinheit der Kraft)
NV	Naamloze Vennootschapp (niederländische Unternehmensform; entspricht der AG)
SPS	Speicherprogrammierte Steuerung
t	Tonne
t/h	Tonne(n) pro Stunde
Tab.	Tabelle
V	Volt
var.	variabel
vgl.	Vergleich

8. Literaturverzeichnis

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (Hrsg.): Bachelorthesis Henry Korn: Leistungsoptimierung an modernen Dampfmotoren, Hamburg: 2012

Umweltbericht 2013 der Akzo Nobel Functional Chemicals GmbH