

Abschlussbericht

Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellen

Systemverifizierung 700bar ionische Verdichtertechnologie nach SAE J2601

Förderkennzeichen: 03BV125

Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2010 – 31.03.2014

Antragssteller:

Linde AG

Name des Projektleiters:

Harald Kraus

Name des administrativen Ansprechpartners:

Thomas Zorn

Ausführende Stelle / Straße, PLZ Ort:

Geschäftsbereich Linde Gas, Innovationsmanagement IM

Seitnerstrasse 70, 82049 Pullach

Telefon Herr Zorn:

089/7446-2088

E-Mail:

Thomas.Zorn@linde-gas.com

Datum:

25.11.2014

Inhaltsverzeichnis

Inhalt

| | | |
|------|--|----|
| 1 | Ausgangslage | 5 |
| 1.1 | Aufgabenstellung..... | 5 |
| 1.2 | Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde..... | 6 |
| 1.3 | Planung und Ablauf des Vorhabens | 6 |
| 1.4. | Stand der Technik..... | 7 |
| 1.5. | Zusammenarbeit mit anderen Stellen | 9 |
| 2. | Eingehende Darstellung- Projektverlauf | 9 |
| 2.1 | Technisches Konzept: | 9 |
| 2.2 | Aufbau Teststand..... | 10 |
| 2.3 | Hydraulischer Antrieb | 11 |
| 2.4 | Zylinderrohre, Dichtungen, Kolben | 13 |
| 2.5 | Ventile | 15 |
| 2.6 | Materialien | 16 |
| 2.7 | Tieftemperaturtests..... | 19 |
| 2.8 | Stop-and-Go Tests | 19 |
| 2.9 | Schallreduktion | 20 |
| 2.10 | Optimierte 2-Phasenwärmetauscher | 20 |
| 3. | Technische und praktische Verwirklichung des Konzeptes..... | 20 |
| 4 | Patente..... | 21 |
| 5 | Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende..... | 21 |
| 6 | Technische Erfolgsaussichten nach Projektende..... | 21 |

Nomenklatur

- **Programm:** Das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP), koordiniert durch die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH (NOW)
- **H2 Mobility:** Der Verbund mehrerer Industrieunternehmen unter Moderation der NOW GmbH mit dem gemeinsamen Ziel "Aufbau einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur in Deutschland"

Abkürzungen

- **BMVBS:** Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- **NIP:** Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
- **NOW:** Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie
- **PTJ:** Projektträger Jülich
- **SAE:** Society of Automotive Engineers
- **H2:** Wasserstoff
- **LH2:** Flüssiger Wasserstoff (liquid hydrogen)
- **GH2:** Gasförmiger Wasserstoff (compressed hydrogen)
- **CGH2:** Druckgaswasserstoff (compressed gaseous hydrogen)

1 Ausgangslage

Die Automobilindustrie entwickelt Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb, bei denen die Tanks mit gasförmigem Wasserstoff bis zu einem Druck von 700 bar gefüllt werden.

Um Wasserstofffahrzeuge in Deutschland und darüber hinaus zu etablieren ist eine flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen. Im Rahmen des Verbundvorhabens: „Planung zum Aufbau einer flächendeckenden H2 Infrastruktur in Deutschland“ wurde mit der Standardisierung von Wasserstofftankstellen der Grundstein für eine mögliche Infrastruktur gelegt.

Optimierte Lebensdauer und Wartungskosten sind essentielle Bestandteile für CEP / H2 Mobility. Kein Anbieter hat derzeit die nötige, intensive Langzeit-Betriebserfahrung (wenige Betriebsstunden wegen geringer Auslastung der bestehenden Anlagen)

Am Linde Standort Wien besteht die Möglichkeit einen Teststand für 3 Verdichterstationen nebeneinander aufzubauen. Die Vorort ansässige Expertise, die bestehende Gase und H2 Infrastruktur und der vorhandene Platz sind deutliche Vorzüge. Bereits in der Vergangenheit entstanden hier Entwicklungen die Tag für Tag bei der CEP und Weltweit im Einsatz sind. Der von Demo-Vorhaben getrennte Dauertest ist erforderlich um einerseits Technologie verfügbar zu machen für anstehende Pkw Flottenversuche der nahen Zukunft (CEP/H2 Mobility) und andererseits gleichzeitig den entsprechenden Betrieb von vornherein mit einer höheren Tankstellenverfügbarkeit darstellen zu können.

Der Zeitpunkt für dieses Vorhaben ist der richtige. Die Modularisierung, CAPEX und OPEX Vorteile dieses Anlagenkonzeptes bilden die Basis für den gezielten Infrastrukturaufbau der nächsten Jahre (CEP/H2 Mobility). Hierfür ist verlässliche Langzeiterfahrung unerlässlich.

1.1 Aufgabenstellung

Dieses F&E Vorhaben bezieht sich auf das Förderprogramm Nationales Innovationsprogramm für Wasserstoff und Brennstoffzellen (NIP) der Deutschen Bundesregierung.

Das Vorhaben deckt die Ziele des NIP ab:

- Beschleunigung der Marktentwicklung durch gezielte Unterstützung und Förderung der Wasserstoff- und Brennstoffzellenbranchen im mobilen, stationären und portablen Bereich
- Aufbau von Wertschöpfungsketten und Wertschöpfungsanteilen in Deutschland
- Sicherung der Technologieführerschaft und Umsetzung der Technologie in Deutschland

Für den öffentlichen Einsatz von Warmgasverdichtern auf Basis der Ionenverdichtertechnologie ist von Anfang an sehr hohe Dauerfestigkeit gefragt und deshalb soll die Verdichteranlage vorher daraufhin getestet werden. In dieser Weise können zudem Erfahrungen gesammelt werden über Wartungsintervalle und sonstige betriebsrelevante Parameter.

Es werden 3 Stück identische Verdichteranlagen parallel 10.000 Stunden getestet um statistisch belastbare Aussagen über die Systeme treffen zu können.

Mit diesem Vorhaben wird es möglich werden die energieeffiziente und prinzipiell zuverlässige Warmgasverdichtung mittels Ionenverdichtertechnologie aus dem Prototypenstadium zur vorkommerziellen Phase zu verhelfen.

Technisches Projektziel

Es sollen belastbare Erkenntnisse zur Standzeit und Wirkungsgrad von diesem Vorhaben zugrundeliegenden Ionenverdichter gewonnen werden. Es handelt sich um ein nach Herstellkosten und Baugröße optimiertes, modulares 700 bar Verdichtersystem mit direktem Antrieb. Gleichzeitig soll die Zuverlässigkeit der Maschinen in diesem Sektor durch den Dauertest gesteigert werden um auf die Anforderungen an einer breiten Wasserstoffinfrastruktur angemessen reagieren zu können.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Aufgrund der zur Antragstellung bestehenden Kompressionstechnologie zur Kompression von Wasserstoff fehlt es an zuverlässigen Verdichtern, die die zukünftig zu erwartenden Massenströme an 700 bar Wasserstoff in Fahrzeugtanks fördert. Die Technologieplattform „Ionischer Verdichter“ ist gut geeignet, die Anforderungen der SAE J 2601 zur Betankung von Wasserstofffahrzeugen einzuhalten.

Das bisherige verdichten mit ionischen Flüssigkeiten wird beibehalten als Erhöhung der Standzeit bzw. Verbesserung der Wärmeabführung im Verdichter. Der Neuheitsgrad besteht darin, das max. Verdichtungsverhältnis von Einzelmaschinen so zu erhöhen, dass eine Maschine allen Anforderungen an ein modernes Versorgungssystem gerecht wird. Die Anlagengröße so weit zu reduzieren, dass sie an bestehenden Infrastrukturpunkten integriert werden kann.

Es werden erstmals Langzeiterfahrungen mit Wasserstoffverdichtung nach SAE J2601 an Sich und Ionen-Verdichtertechnologie im Besonderen gesammelt. Letzteres macht Kosten-Abschätzungen für Infrastrukturimplementierung belastbarer.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Es sollen 3 identische Verdichteranlagen parallel jeweils 10.000 Stunden getestet werden. Die Anlagen werden in bestehender Infrastruktur am Linde Entwicklungsstandort in Wien aufgebaut. Die Auswertung der Ergebnisse wird bei Linde in Pullach überprüft. Die Aktivität in folgende Arbeitspakete (AP) unterteilt:

- **AP 0** Conceptual Design
- **AP 1** Detail Engineering
- **AP 2** Fertigung
- **AP 3** Umbau/Neuaufstellung Prüfequipment
- **AP 4** Aufbau 3 Maschinen

- AP 5 Testbetrieb
- AP 6 Dauerlauf
- AP 7 Datenauswertung, Verifizierung
- AP 8 Tieftemperaturtests
- AP 9 Stop-and-Go Test
- AP 10 Schallreduktion
- AP 11 optimierte 2-Phasenwärmetauscher

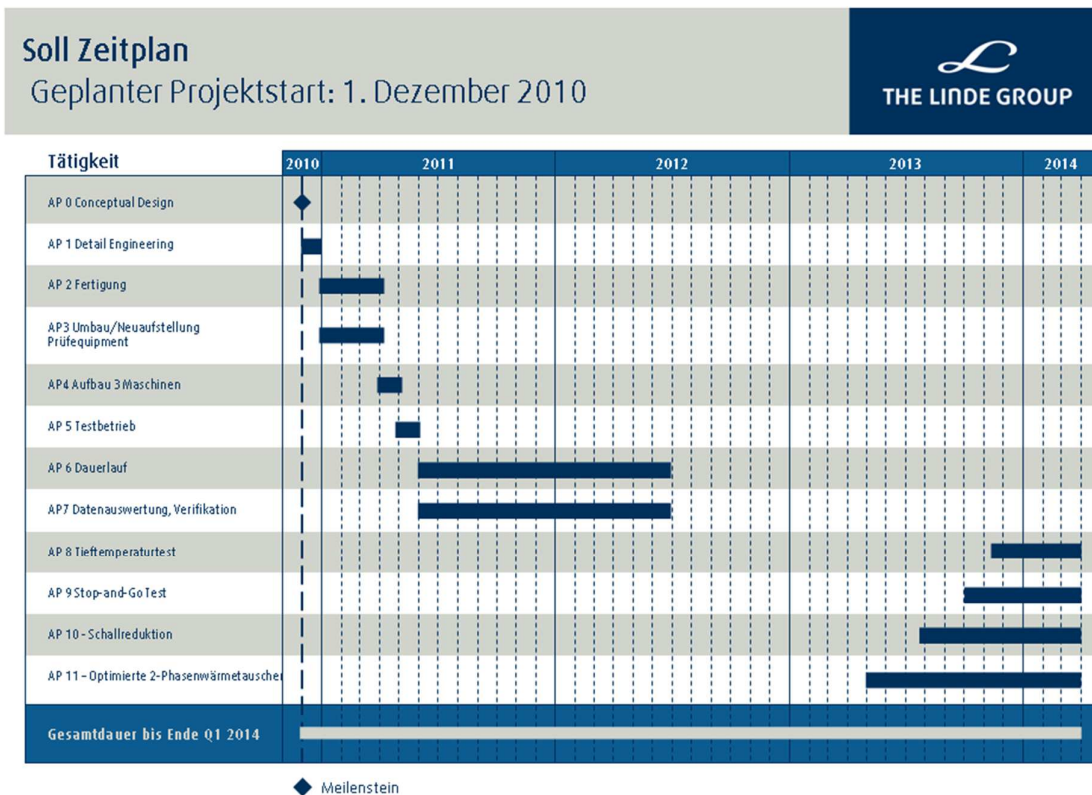


Abb. 1: Plan-Zeitplan

1.4. Stand der Technik

Linde hat seit vielen Jahren Erfahrung und entsprechend viele Patente auf dem Gebiet der Hochdruck-Gastechnik, insbesondere in dem Bereich der Luftgase, Erdgas, Wasserstoff und Helium. In den letzten 15 Jahren wurde die Hochdruckwasserstoff-Speicherung ein bedeutsamer Faktor im Bereich der Wasserstoff-Fahrzeug und -Tankstellentechnik.

Linde hat in einer Vielzahl von Projekten eindrucksvoll Kompetenz auf dem Gebiet Wasserstoff als Energieträger bewiesen. Zum Teil in gemeinsamer Arbeit mit Partnern aus der Automobilindustrie und

der Energiewirtschaft wurden neue Maßstäbe auf dem Gebiet der Wasserstoffbetankung gesetzt. Linde ist Pionier der 700 bar Betankungstechnologie.

Vor Projektstart waren Ionenverdichter mit direktem Antrieb bis zu einem Druck von 500 bar im Demoeinsatz. Diese Verdichter benötigen einen erhöhten Eingangsdruck und können Wasserstoff bis max. 500 bar verdichten. Eine direkte Verdichtung auf 700 bar (875 bar) war mit dem Stand der Technik 2010 nicht möglich.

Ionenverdichter mit einem Ausgangsdruck von 700 bar (875 bar) sind zurzeit nur in Kombination mit einem Druckumsetzer realisierbar. Dieser Druckumsetzer wird hydraulisch angetrieben und erfordert ein hohes Maß an Automation (Wegmesssystem, Hydraulikantrieb). Zusätzlich bedeuten diese Umsetzer eine Kostenzunahme des Systems. Gleichzeitig benötigen sie im Vergleich zu den Ionenverdichtersystemen wesentlich mehr Service, welches den Wartungsaufwand der Ionenverdichter wiederum verschlechtert.

Der Antrieb eines herkömmlichen Ionenverdichters erfolgt über ein Getriebe. Dieses unterliegt wie alle anderen Bauteile im Verdichterraum den geltenden Ex – Bestimmungen. Damit verbunden ist dieses Bauteil ein nicht unerheblicher Kosten- / Baugrößenfaktor im Gesamtsystem. Könnte diese relativ kostenintensive Energieumwandlung einfacher gestaltet und in den Ionenverdichter integriert werden, so würden daraus weitere Vorteile für das Gesamtsystem gewonnen werden.

Die Eingangsdrukanhebung wird zurzeit mit einem ionischen Schraubenverdichter realisiert. Diese bringt den Wasserstoff auf ein Druckniveau, das der Ionenverdichter für die Erreichung der Förderleistung / gewünschten Ausgangsdruck benötigt. Der Schraubenverdichter ist ein kostbares Bauteil, welches wiederum zusätzliche Wartung erfordert. Wird diese erste Stufe direkt in den Ionenverdichter integriert, so würden sich die Kosten, Baugröße aber auch die Zuverlässigkeit verbessern.

Die derzeitigen Hauptabmessungen, Einzelstück-Herstellkosten und der ungewisse Serviceaufwand für Ionenverdichter der herkömmlichen Bauweise sind dem geplanten Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur (siehe Kapitel 4) und die damit einhergehenden Kostenziele nicht gewachsen. In diesem Vorhaben wird der Ionenverdichter mit direktem Antrieb (Wegfall des Vorverdichters) und höherem Verdichtungsverhältnis 700bar (875bar) erprobt.

Die reduzierte Baugröße begründet sich vor allem darin, dass bisherige maximale Verdichtersfrequenzen soweit erhöht wurden bis die Grenzen der Physik erreicht worden sind.

Die bisherigen Grenzen der Technik bildeten die maßgebliche Einschränkung der Einsatzfähigkeit. Die neue Maschine besteht nicht aus Standardkomponenten, die für den Einsatz in Ionenverdichter adaptiert wurden, sondern bedient sich spezieller, für diese Technologie entwickelten Subsystemen. Diese Systeme wurden speziell für diese Anwendung „Tankstelle“ entwickelt. Die Dauerfestigkeit und Leistungsfähigkeit soll in diesem Vorhaben untersucht werden.

Neuheitsgrad:

Das Verdichten mit ionischen Flüssigkeiten wird beibehalten um die Standzeit zu erhöhen bzw. die Wärmeabführung im Verdichter zu verbessern. Der Neuheitsgrad besteht darin, das max. Verdichtungsverhältnis von Einzelmaschinen so zu erhöhen, dass eine Maschine allen Anforderungen

an ein modernes Versorgungssystem gerecht wird. Die Anlagengröße so weit zu reduzieren, dass sie an bestehenden Infrastrukturpunkten integriert werden kann.

Es werden erstmals Langzeiterfahrungen mit Wasserstoffverdichtung nach SAE J2601 an Sich und Ionenverdichtertechnologie im Besonderen gesammelt. Letzteres macht Kosten-Abschätzungen für Infrastrukturimplementierung belastbarer.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Da bei diesem Projekt weitgehend auf internes Firmen Know How zurückgegriffen wurde, bestand die Zusammenarbeit mit anderen Stellen im Wesentlichen aus der Optimierung der zugelieferten Bauteile.

2. Eingehende Darstellung- Projektverlauf

2.1 Technisches Konzept:

Abbildung 2 zeigt den Aufbau und die wesentlichen Leistungsparameter des Prüflings. Von dieser Verdichtereinheit werden drei Stück in unmittelbarer Nähe zu einander aufgebaut und im 24 Stunden Dauerlauf jeweils 10.000 Stunden getestet.

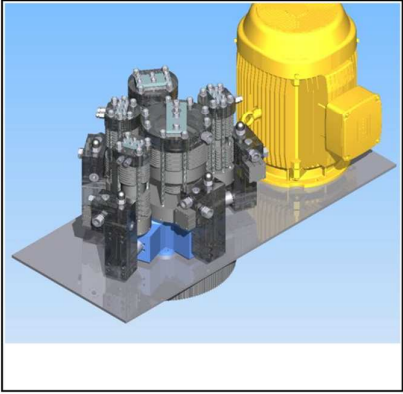
| Technisches Konzept | THE LINDE GROUP <i>Linde</i> |
|--|---|
| <p>5 Zylinder Ionische Verdichtereinheit für 700 bar</p>  | <p>Leistungsmerkmale</p> <p>Technische Parameter:</p> <ul style="list-style-type: none">• 5 Stufen Verdichtung• Verdichtungsverhältnis: 1 : 2,825• Durchsatz: 410 Nm³ H₂/h• Min. Einlass Druck : 5 bar_a• Max. Auslass Druck: 1.000 bar_a• Leistungsaufnahme bei 5 bar_a Einlass: 75 kW• Frequenz: 5,8 Hz |

Abb.2: Konzept einer 5 Zylinder Ionischen Verdichtereinheit inkl. technische Parameter

2.2 Aufbau Teststand

Als erstes mussten die technischen und lokalen Voraussetzungen geschaffen werden, um 3 Stück Ionenverdichter parallel testen zu können. Abbildung 3 zeigt die Schaffung der baulichen Voraussetzungen für dieses Vorhaben. Darüber hinaus wurde im Januar 2011 ein Prototyp der Teststation gebaut und erste Testläufe durchgeführt. Nach Abschluss dieser Phase wurden die notwendige Infrastruktur sowie die Verdichtereinheiten aufgebaut (Abbildung 4).



Abb.3: Teststand in Bau (links) und nach Fertigstellung (rechts)



Abb.4: zwei fertig installierte Verdichter und eine Einheit in Arbeit (links äußerste Prüfbox)

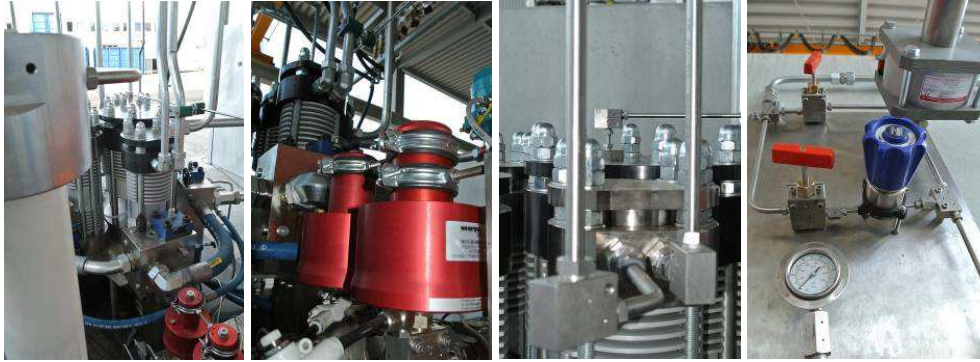


Abb.5: Details Teststand

2.3 Hydraulischer Antrieb

Nach ersten Tests und mehreren Modifikationen des Hydraulischen Antriebs (Zulieferteil, ‚blau‘ in Abb.2) durch den Hersteller verliefen die weiteren Testläufe vielversprechend, bis eine Drehzahl von 280 U/min überschritten wurde. Die Hydraulikeinheit nahm bei höheren Drehzahlen Schaden und wurde zur Untersuchung zurück zum Hersteller geschickt, der eine weitere Änderung durchführte.

Die neue Antriebseinheit wurde im ersten Verdichter am neuen Teststand verbaut und erfolgreich getestet. Die Maschine lief stabil mit 300 U/min und damit wurden alle zwischenzeitlichen konstruktiven Änderungen bestätigt.

Nach Anhebung der Drehzahl auf die Nenndrehzahl von 350 U/min konnte allerdings kein zufrieden stellender, stabiler (messtechnisch erfasster) Betrieb bei Höchstdrehzahl erzielt werden. Nach Analyse und Auswertung des vorhandenen Datenmaterials, wurde eine konstruktive Limitation im Hydraulikbereich identifiziert.

Auf Basis interner Analysen und Lieferantenworkshops, wurden in der Konstruktion des ‚Hydrauliksteuerblocks‘ größere Querschnitte realisiert. Die alten, unterdimensionierten Steuerblöcke wurden ausgetauscht und nach der Feinabstimmungsphase konnte ein Testlauf mit 350 U/min (5,83 Hz) erfolgreich absolviert werden. Abbildung 5 zeigt die Druckverläufe einer Stufe vor und nach dem Tausch der Hydrauliksteuerblöcke.

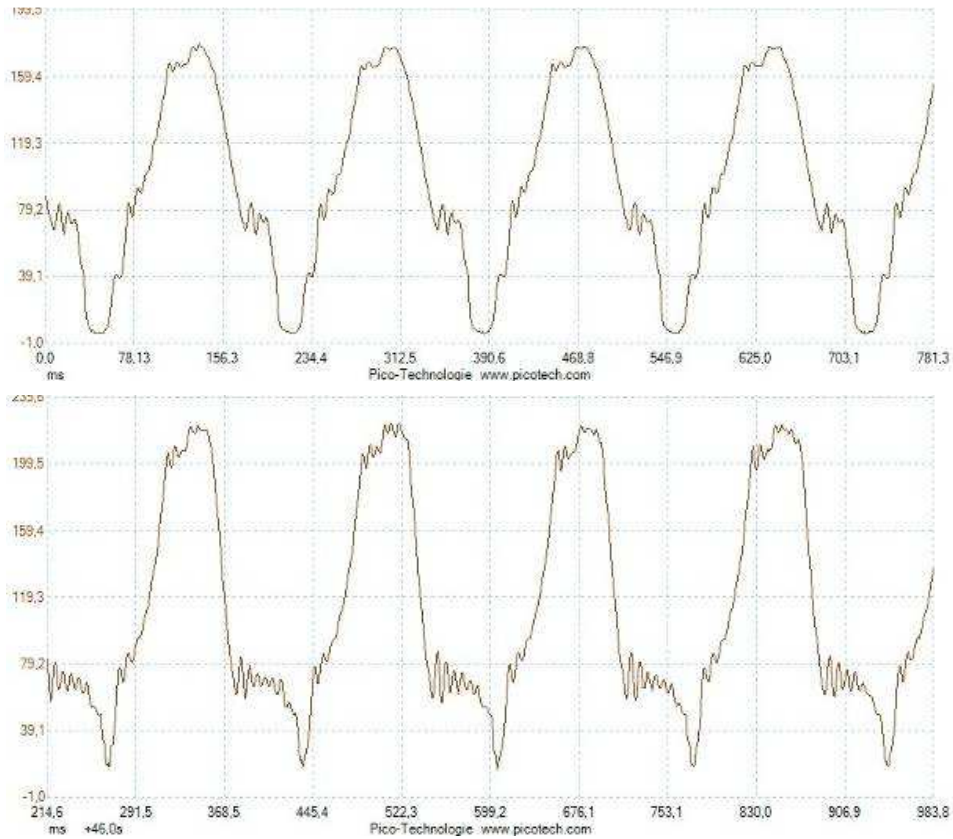


Abb.6: Hydraulikdruck Stufe 1, oben: dynamisches Problem (verringerte Förderleistung), unten: Normal-/Sollzustand

Nach 1290 Betriebsstunden kam es bei Testanlage 1 zu einem Schaden des Hydraulischen Antriebs. Bei Anlage 2 trat bei der Hydraulikantriebseinheit (Radialkolbenmaschine) nach 1000 Betriebsstunden ein Lagerschaden auf und ein weiterer nach zusätzlichen 1200 Betriebsstunden, wie in Abbildung 7 ersichtlich.

Beim ersten Schaden war noch unklar, ob Fremdkörper im Gehäuse der Radialkolbenmaschine in Verbindung mit der waagrechten Einbauweise und den nicht gedichteten Lagern den Schaden verursacht hatten. Eine Unterdimensionierung/Überlastung der Lager wurde zunächst außer Acht gelassen, da laut Hersteller die Lebenszeit um einen Faktor 10 höher liegen sollte. Nach dem zweiten Schaden wurden alle gesammelten Daten analysiert (z.B. wurden Betriebsdruckkurven zu Lagerkraftdiagrammen umgewandelt), wobei auch hier seitens Linde aufgrund von Berechnungen eine deutlich höhere Lagerlebensdauer erwartet wird. Die Radialkolbenmaschine wurde zum Hersteller zur weiteren Analyse gesandt.

Um auf die geringe Lebensdauer zu reagieren, wurde unmittelbar auf eine höherwertigere Lagertypen gleicher Abmaße bei neu ausgelieferten Radialkolbenmaschinen umgestellt.



Abb.7: Lager Radialkolbenmaschine

Die Lager der hydraulischen Antriebseinheit nahmen wider Erwarten bei Verdichter 3 nach weiteren 1700 und bei Verdichter 2 nach ca. 3500 Stunden Schaden. Deshalb wurde diesbezüglich mit einem renommierten Lagerhersteller und unserem Lieferanten erneut ein Workshop abgehalten. Die Empfehlung des Lagerherstellers, die Lager größer zu dimensionieren, bedarf größerer, konstruktiver Änderungen am Gehäuse der Radialkolbenmaschine und befindet sich derzeit, in enger Kooperation mit unserem Lieferanten, in der Umsetzungsphase.

2.4 Zylinderrohre, Dichtungen, Kolben

Anlage 3 wurde nach ~ 100 Betriebsstunden mit Gaszylinderrohren mit leicht geänderter Oberfläche (Behandlungsverfahren) für alle 5 Stufen ausgestattet, wobei dies nicht zum Erfolg führte. Nach 150 Betriebsstunden mussten die Zylinderrohre aller Stufen gewechselt werden und es wurde eine neue Testreihe an Zylinderrohren verbaut, die nun eine Alternativbeschichtung besaßen. Für die Stufen 1 bis 3 wurden die Erwartungen bis zum heutigen Stand voll erfüllt, wobei Stufe 4 im akzeptablen Bereich und Stufe 5 außerhalb der Erwartungen lag. Bei der 5ten Stufe kam es in kurzen Abständen zu großen Verschleißerscheinungen.

Es wurden weitere Workshops mit Lieferanten abgehalten, wobei eine wiederholte Änderung in der Zylinderrohrbeschichtung angestoßen und umgesetzt wurde.

Darüber hinaus wurden modifizierte Gas- und Hydraulikkolben verbaut, die einerseits eine leichtere Wartung und andererseits durch bereits gesammelte Informationen eine höhere Dichtungslebensdauer ermöglichen sollten. Unmittelbar positiv wirkte sich die Änderung auf die ersten 4 Verdichterstufen aus, da nun die Minimalstandzeit der Dichtungen und der Zylinderrohre erfüllt bzw. übertroffen wurde. Für die fünfte Stufe wurde eine Standzeiterhöhung der Zylinderrohre erzielt, jedoch wurde entgegen der Erwartung die Dichtungsstandzeit verringert, was wiederum eine andere Dichtungsgeometrie notwendig machte.

Nach ~ 900 Betriebsstunden wurde bei Anlage 3 als Weiterentwicklung eine Durchmesseränderung der 5ten Stufe durchgeführt, wodurch eine bessere thermische Symmetrie zwischen den gesamten 5 Stufen und eine zunehmend gleichmäßige Belastung an der hydraulischen Antriebseinheit erzielt wurde. Anlage 2 wurde vorerst mit dem alten Zylinderdurchmesser betrieben, um später eine Aussage über die neuen Beschichtungen treffen zu können.

In weiterer Folge wurde bei den Hochdruckzylinderrohren eine weitere Beschichtung getestet, jedoch war diese bereits nach 100 Betriebsstunden vollständig verschlissen, wie in Abbildung 9 ersichtlich. Weitere Zylinder wurden ohne Zusatzbeschichtungen (jedoch in gehärteter Ausführung) getestet, da jegliche harte Schicht eventuell zum schnelleren Verschleiß führt, sobald diese abplatzt oder abgerieben wird und in weiterer Folge Fremdkörper darstellt.

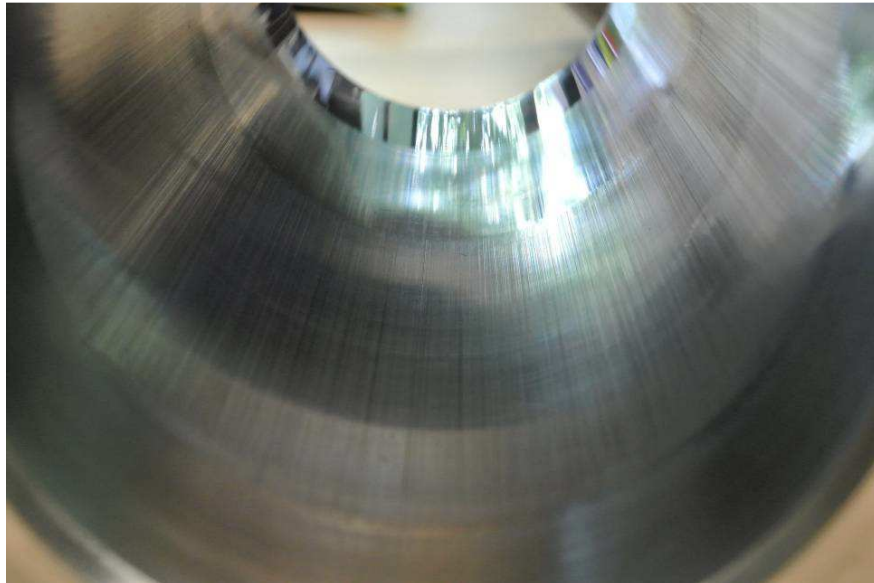


Abb.9: Verschleiß bei Testbeschichtung

Beim zweiten Verdichter wurden nach ~ 3200 Betriebsstunden mehrere Komponenten geändert. Die 5. Verdichterstufe bekam ein neues, robusteres Dichtungskonzept, welches durch ihren Erfolg (Standzeit wurde drastisch erhöht) auf die andere laufende Maschine sowie auf weitere Stufen ausgedehnt wurde. Zusätzlich wurde, da die Speichereinheiten in der Verdichterstation für Kunden nun bei einem höheren Druck betrieben werden können, der maximale Ausgangsdruck von 750 auf 900 bar angehoben, um den Verschleiß bei den erhöhten Anforderungen betrachten zu können.

Die Zylinderrohre der Stufen 1 bis 3 erfüllen nun mehr als deutlich und Stufe 4 und 5 ausreichend die Mindestanforderung an die Standzeit.

Nichtsdestoweniger befinden sich derzeit zwei weitere, vielversprechende Zylinderrohrmaterial-Oberflächenbearbeitungs-Dichtungskombinationen im Dauertest. Es wurden die bisher verbrauchten Zylinderrohre zum Aufarbeiten geschickt und mit einer weiteren Beschichtungsmethode in Kombination mit einem Härteverfahren versehen, um eine weitere Standzeiterhöhung erzielen zu können. Die derzeit erzielten, hohen Standzeiten verursachen allerdings auch längere Wartezeiten auf die Ergebnisse.

2.5 Ventile

Nach ~ 700 Betriebsstunden wurden beim Verdichter 3 modifizierte Ventile verbaut, um die vermehrt auftretenden nicht akzeptablen Federbrüche zu unterbinden. Dieser Umbau verlief vorerst erfolgreich. Allerdings traten weitere Federbrüche bei den Lade- und Entladeventilen der 2. Verdichterstufe auf, wobei schon bei der nachfolgenden Federversion ein zufrieden stellendes Ergebnis erreicht wurde.

Nach Analyse des Federnherstellers kam es bei den Ventildedern zu Resonanzbrüchen, die schon nach kurzer Betriebszeit (<50Std) ersichtlich werden und zu Biegebrüchen, die z.B. durch exzentrische Belastung entstehen können (zeitlich nicht einschränkbar). Durch Fertigungstoleranzen wurden einzelne Federn (im Normalbetrieb des Verdichters) im schädlichen Eigenresonanzbereich angeregt und zerstört. Außerdem ließ die bestehende Ventilkonstruktion ein gewisses Kippen der Feder zu.

Zwei signifikante Entwicklungsphasen führten im Ventilbereich zu neuen Versionen, die einerseits eine andere Eigenfrequenz der Federn vorsieht und versuchsweise geführte Ventilstößel, die eine zentrische Belastung der Federn zur Folge haben, jedoch auch dadurch in Biegebelastung der Ventilstößelführung resultieren (die es vorher nicht gab).

Ventile der nächsten Generation wiesen bereits eine deutlich höhere Standzeit der Ventildedern auf, jedoch brachen die Ventilstößel an der Führung deutlich vor der geforderten Standzeit, wie in Abbildung 10 ersichtlich. Daraus resultierte der Ansatz Leichtbau-Ventilstößelbecher zu verbauen, um die Federbelastung symmetrischer zu gestalten.



Abb.10: Ventilstößelbruch Stufe 2

Ein weiterer Grund für den Bau einer neuen Ventilgeneration waren die immer wieder auftretenden Brüche der Kunststoffplatten. Ein Workshop mit einem renomierten Ventilhersteller und mehreren unserer Kunststofflieferanten ergab die robustere Bauweise als einzig praktikable sowie preiswerte Lösung, da die Materialhomogenität von Kunststoffen nicht garantiert werden kann.

Aufgrund schlechter tribologischer Eigenschaften und der Wasserstoffversprödung von Titan scheidet dieses als bereits getestetes Ventilstößelmaterial aus.

Die Auswertung der ersten Langzeittests der neuen Ventilgeneration in Kombination mit den optimierten Ventulfedern resultierte in einer geringfügigen konstruktiven Änderung der Ventile. Diese befindet sich derzeit in der Umsetzungsphase, um die Standzeiten noch weiter zu erhöhen.

2.6 Materialien

Bei Verdichter 1 kam es nach 107 Vollastbetriebsstunden zu einer Beschädigung des Aluminiumzylinderkopfes der dritten Verdichterstufe durch welchen weitere Teile (Kolben, Zylinderrohr, Lade-/Entladeventile) der 3ten Stufe in Mitleidenschaft gezogen wurden. In Abbildung 11 sind die Schäden an Zylinderkopf, Kolben und Ventil deutlich zu erkennen.

Nach einer Analyse der Auslegungsdaten mit den realen Betriebsdaten und einer detaillierten Nachrechnung des Zylinderkopfes wurde die Schadensursache identifiziert und entsprechende konstruktive Änderungen ergriffen.



Abb. 11: Dauerfestigkeitsbruch Stufe 3

Nach ~ 1200 Betriebsstunden (Verdichter 2) bzw. ~ 600 Betriebsstunden (Verdichter3) wurde ein neues Betriebsmittel (ionische Flüssigkeit) in den Anlagen erprobt. Dieses sollte laut Hersteller allgemein

bessere chemische und tribologische Eigenschaften (Alterung und Schmierung) besitzen und vor allem weniger korrosiv bei Umgebungsbedingungen (Luftsauerstoff und -feuchtigkeit) sein. Erste chemische und tribologische Untersuchungen bescheinigten dem neuen Betriebsmittel durchgängig bessere Eigenschaften (Verschleiß, Korrosivität, Wasseraufnahme, etc.).

Es gab jedoch im Test in den Anlagen ein Phänomen, welches nicht im Labor nachvollziehbar ist: Das Betriebsmittel erstarrte bei Umgebungstemperaturen unter +5°C in der Maschine, wie in Abbildung 12 ersichtlich. Nach Veränderung von unterschiedlichen Betriebsparametern (Beimengung von Additiven, Filtrierfeinheiten, Mischungsverhältnisse neuer mit alter Flüssigkeit) wurde leider keine Besserung erzielt. In Laborversuchen konnte dieses Verhalten nicht nachgestellt werden. Bei gestiegenen Umgebungstemperaturen trat das Problem nicht mehr auf, wobei die Entscheidung getroffen wurde, die neue Betriebsflüssigkeit in einer Maschine weiterhin bis zum nächsten Winter zu testen, um eine Langzeitbeurteilung treffen zu können.

Im darauffolgenden Winter zeigte die neue ionische Flüssigkeit keine Kristallisationsneigung. Dies kann laut Hersteller in Chargenunterschieden begründet liegen. Da tatsächlich im betreffenden Winter eine andere Charge für den Teststand verwendet wurde, würde dies die Aussage des Herstellers unterstreichen.



Abb. 12: Kristallisation nicht geeigneter ionischer Flüssigkeit

Beim Kreislauf der ionischen Flüssigkeit wurde nochmals die Filtrationsstufe geändert, wobei in Kombination mit der oben erwähnten 2. Generation der Kolben eine erhöhte Lebensdauer bzw. damit verlängerte Standzeit der Filterelemente realisiert wurde. Die feinere Filtrierung hat einen positiven Einfluss auf die Standzeit der Zylinderlaufflächen. Nachdem hier aber das Zusammenspiel zwischen Dichtung (Härte, Material), Zylinderlauffläche (Härte, Oberfläche, Beschichtung), Betriebsmittel

(Schmier- und Kühlfähigkeit) und Abrieb Einfluss auf die jeweilige Standzeit hat und sehr komplex ist, kann dies erst nach längerer Laufzeit, chemischer Analysen und Variation der eingesetzten Komponenten beurteilt werden.

Nach ~ 4500 Betriebsstunden (Anlage 2) und ~ 3700 Betriebsstunden (Anlage 3) ist ein neues Problem aufgetreten. Eine Aluminiumkorrosion, die offensichtlich unter hohen Temperaturen ($>150^{\circ}\text{C}$) in Kombination mit der ionischen Flüssigkeit auftritt. Diese tritt speziell bei den Zylinderköpfen der Stufen 2 und 3 im Bereich der Gasentladeventile auf (Abbildung 13). Da hier nur das Bauteilgewicht die Entscheidung für Aluminium war, wurde hier konstruktiv auf Stahl (wie bei Stufe 4 und 5) umgestellt, um das Problem in den Griff zu bekommen. Der Zylinderkopf der ersten Stufe wurde etwas später ebenfalls aus Stahl gefertigt und verbaut, da auch hier Spuren von Korrosion vorgefunden wurden. Nun bestehen alle Zylinderköpfe aus Stahl und das Korrosionsproblem, das erst durch diesen Langzeittest erkannt wurde, ist somit nachhaltig behoben.



Abb. 13: Korrosion Zylinderkopf Stufe 3

2.7 Tieftemperaturtests

Um den Tieftemperaturtest umsetzen zu können, wurde entschieden, die Verdichtereinheit 1 in eine komplette Verdichterstation unserer Produktion zu verbauen, wie in Abbildung 14 ersichtlich. Die Kühlung des angesaugten Gases auf $\sim -35^{\circ}\text{C}$ simuliert die Flüssiggasversorgung des Verdichters über einen Verdampfer.

Die Auswertungen der ersten Tests zeigten lediglich eine Beeinflussung des Ladeventils der ersten Verdichterstufe, welches bezüglich der geänderten Bedingungen leicht modifiziert wurde. Obgleich die Mindestanforderung an die Standzeit erfüllt bzw. sogar überschritten wurde, werden erst weitere Tests die Langzeiteffekte der Kaltgasversorgung zeigen.



Abb.14: Verdichter 1 verbaut in Gesamtanlage

2.8 Stop-and-Go Tests

Der stop'n'go Test wurde bei Anlage 2 durchgeführt. Hier wurde ein radikales Programm für eine steile Temperaturrampe gewählt, bei der im Anfahrprozess sogar die Verdichterkühlung ausgesetzt wird. Beim Dichtungskonzept wurde die thermische Grenze überschritten und es kam zu "Fließschäden", wodurch ersichtlich wurde, dass es in diesem Bereich keine großen Reserven gibt. Außerdem hat die hohe Temperatur zu einem früheren Ausfall der Kunststoffventile geführt, da hier ebenfalls die Einsatztemperatur überschritten wurde.

Die Aufgabenstellung dieses Tests, ob es zu metallischen Berührungen zwischen bewegten Teilen kommt, wurde bereits erfüllt, da es keine Berührungen gab.

Um dem erhöhten Verschleiß der Dichtungen und Ventile entgegen zu wirken, wurde in der Startprozedur die Verdichterkühlung wieder aktiviert. Zusätzlich wird nun das Verhalten der ionischen Flüssigkeit beobachtet, da hier der größte Einfluss aufgrund großer Temperaturgradienten zu erwarten ist.

2.9 Schallreduktion

Ein weiterer Zusatztest, die Schallreduktion des Verdichters, brachte vorerst nur einen geringen Erfolg. Diese aktive Dämpfung, verursacht durch eine Zusatzkomponente, die als Dämpfungsblock bezeichnet wird und bei einem "Trigger" eine kurzzeitige Zuspeisung auslöst, hat für sich genommen funktioniert, im Gesamtsystem jedoch nicht die gewünschte Schallreduktion erbracht.

Somit wurde in weiterer Folge eine vergleichsweise einfachere, direkte Hochdruckzuspeisung getestet, die das Schall verursachende Aufschlagen der Kolben in der unteren Endlage zur oberen Endlage verschiebt und dort deutlich leiser erwartet wird. Dies wird auch als passive Dämpfung betitelt, ohne steuerungstechnische Maßnahmen.

Diese passive Dämpfung führte nicht nur zum erwünschten Ergebnis, sondern ermöglicht, eine korrekte Feinjustierung vorausgesetzt, auch eine geringfügige Erhöhung der Förderleistung der Anlage.

2.10 Optimierte 2-Phasenwärmetauscher

Im Bereich der Zusatztests wurden als erstes neue Wärmetauscher erfolgreich konstruiert, gebaut und zugelassen. Diese können nun mehr Wärme bei gleicher Wärmetauscherabmaße übertragen, um einerseits der nun höheren Förderleistung und andererseits der im Allgemeinen immer sinnvollen Effizienzsteigerung Rechnung zu tragen.

3. Technische und praktische Verwirklichung des Konzeptes

Die zahlreichen Optimierungsprozesse während des Dauertests, wie z.B. die Optimierung des Hydraulischen Antriebs, der Ventile, der Wärmetauscher oder der Zylinderrohre und Dichtungen wurden bereits in mehreren Anlagen in Deutschland umgesetzt. So befinden sich z.B. in Berlin und Hamburg bereits Verdichter dieses Typs erfolgreich in Betrieb.

Im Folgenden flossen die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich verwendeter Materialien wie z.B. das Auftreten von Aluminiumkorrosion bei den Zylinderköpfen oder die Kristallisation des getesteten Betriebsmediums in die weitere Umsetzung dieses Verdichter Konzeptes ein bzw. stehen als nachrüstbare Ersatzteile für bestehende Anlagen zur Verfügung. Der nächste Schritt, der sich bei Linde ATZ derzeit in der Umsetzungsphase befindet, ist der Aufbau einer Kleinserienfertigung basierend auf dem vorliegenden Konzept und der Erkenntnisse, die bei diesem Dauertest gewonnen werden konnten.

4 Patente

Im Berichtszeitraum wurden keine vorhabensbezogenen Patente angemeldet.

5 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Aufgrund der deutlich steigenden Anzahl von Veröffentlichungen und Nachfragen für den Aufbau von Betankungsinfrastruktur in Deutschland ist die Bedeutung von zuverlässiger und belastbarer Technologie weiter gestiegen. Ferner sind für diese entwickelte Technologie Länder wie USA und Japan wichtige, potentielle Exportmärkte. Die Erschließung dieser Märkte wird durch die Weiterentwicklung der Verdichtertechnologie wesentlich erleichtert, führt sie doch zu einem technologischen Vorsprung (Technologieführerschaft) bei Linde. Die zu erwartenden Verbesserungen werden die Betankungstechnologie einen Schritt weiter in Richtung Marktreife bringen.

Wie gehabt, werden Weiterentwicklungen in den aktuellen Demonstrationsanlagen sofort übernommen und umgesetzt. Eine Abwärtskompatibilität ist in der Regel gegeben. Dieser Multiplikatoreffekt sichert vor allem die Verbreitung der Ergebnisse im Markt – und erhöht nicht zuletzt auch die Reichweite des hier beschriebenen Fördervorhabens weit über das Projekt hinaus.

6 Technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die technischen Erfolgsaussichten des Verdichtungssystems sind aufgrund der Energieeffizienz, des reduzierten Verschleißes und der außerordentlichen Eigenschaften bei der Verdichtung von Warmgas daher unverändert gut.

Wie in Punkt 3 bereits erläutert, haben die Optimierungsprozesse während des Dauertests bereits sowohl zum Einsatz optimierter Komponenten in diversen Anlagen als auch zur Fertigung dieses Verdichterkonzeptes in Kleinserie geführt.