INSTITUT FÜR SCHADENSFORSCHUNG
UND SCHADENSVERHÜTUNG ISSV e.V.
an der Helmut-Schmidt – Universität
-Universität der Bundeswehr Hamburg-
D- 22039 Hamburg
Tel.: +49 40 6541 2738

Abschlussbericht

Vorhabenbezeichnung:
Verbundprojekt: MPT- Multiphasenfördersysteme und Anlagentechnik für Kohlenwasserstoffe Offshore und Onshore
Deutsch- Russische Kooperation:
"Nachhaltige Gewinnung und Transport von Kohlenwasserstoffen offshore und onshore"
Teilprojekt: „Korrosions-und Verschleissprozesse in Mehrphasenförderanlagen unter Berücksichtigung besonders aggressiver Fördermedien"

Förderkennzeichen: 03SX226 G
Laufzeit: 01-10-08 bis 31-10-10
Projektleiter: Prof.Dr.-Ing. Hans Hoffmeister

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen der Deutsch-Russischen Forschungskooperation und basierend auf den Ergebnissen des abgeschlossenen MPT Projekts -BMWi- 03SX226 F zu den Verschleißprozessen der Multiphasenförderanlagen im Feld Rütenbrock der Wintershall AG waren die folgenden wissenschaftliche Arbeitsziele gesteckt:

- Ermittlung der Verschleiß-und Korrosionsbeaufschlagung der Komponenten der Förderkette Rütenbrock unter verschärften Bedingungen und Vergleich mit Betriebsdaten.

- Experimentelle Simulation der Einflüsse der Betriebsparameter bei der Förderung besonders aggressiver Medien auf die Korrosion und den Verschleiß.

- Numerische Simulation und Quantifizierung der experimentellen Ergebnisse

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zur Durchführung standen die experimentellen Einrichtungen des ISSV, die Infrastruktur der Helmut Schmidt-Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU), die langjährigen Erfahrungen des ISSV-Personals aus früheren Vorhaben und Industriezusammenarbeit sowie weitere Personalressourcen in Form der Studenten der HSU zur Verfügung.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die werkstofftechnischen Forschungsarbeiten teilten sich auf in die Arbeitspakete:

1. Vor Ort Inspektion und Begutachtung des schadensrelevanten Bauteilverhaltens an den Förderanlagen des Rütenbrockfeldes bei den geplanten verschärften Bedingungen.

2. Laboruntersuchungen an entnommenen Proben der Bauteile, Auswertung von Förderdaten.

3. Experimentelle Schadenssimulation mit Parameterstudien

4. Numerische Schadensmodellierung zur quantitativen Darstellung des Schadensverlaufs unter verschärften Bedingungen.

Der zeitliche Ablauf erfolgte entsprechend der in Bild 1 aufgeführten Planung.

Arbeitspakete/Quartal	08/4	09/1	09/2	09/3	09/4	10/1	10/2	10/3
1: Inspektion, Begutachtung								
2:Laboruntersuchung								
3:Experimentelle Simulation								
4,Numerische Simulation								

Zeitlicher Projektablauf

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

- Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden:

Im Rütenbrockfeld der Wintershall AG eingesetzte Multiphasenpumpen sowie weitere durch die Fa. Bornemann verfügbar gemachte Produktinformationen. Konstruktionspläne, Wartungs- und Instandsetzungsdokumentation der Gasaufbereitungsanlage FA Wintershall Rütenbrock/Haren.

- Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations-und Dokumentationsdienste

Santner,E: „Reibung und Verschleiss von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen-Tribologische Optimierung und Schadensbekämpfung, Band 602, Renningen 2004
H.Kaesche: “Die Korrosion der Metalle“ 3. Auflage Springer Verlag 1990
NACE International/Houston: Veröffentlichungen der Jahrestagungen 2006- 2010
SCOPIUS Science Direct
Datenbank-Infosystem (DBIS) der UB der HSU
AIF-14854 Abschlussbericht 2009

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Verbundprojekts wurden von den Projektpartnern

- MPT e.V. – Expertengruppe
- Leibniz Universität Hannover
- Technische Universität Berlin
- Ruhr Universität Bochum

Informationen und Forschungsergebnisse bereitgestellt. Insbesondere gehören dazu Lagerstättencharakteristken mit Angaben über zu erwartende Medienzusammensetzungen (TU Berlin, Expertengruppe MTP e.V.), Strömungsprofile in pumpentypischen Geometrien

(Leibniz Universität Hannover und mechanische Betriebsbelastungen von Pumpenkomponenten (Ruhruniversität,Bornemann).

II Eingehende Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse

1.1., 1.2. Vor Ort und Labor- Untersuchungen der MP-Förderanlagen und Rohrleitungssystemen.

Die im Rütenbrockfeld installierten MP Förderanlagen wurden mit veränderten Betriebsbedingungen beaufschlagt. Im Berichtszeitraum wurden bei fortlaufender werkstofftechnischer Überwachung zunächst keine anderen als die bisher bekannten Schadensmechanismen identifiziert. Eine im Betrieb havarierte Welle wurde vom ISSV näher auf Schadensursache und –verlauf untersucht und die Ergebnisse der weiteren Auswertung durch die Fa. Bornemann zugeführt.(ISSV 197/2009).

1.3, 1.4 Experimentelle und numerische Schadenssimulation

Nach den ersten theoretischen Untersuchungen des Druckeinflusses auf die Spannungsrisskorrosion lag das Schwergewicht auf der experimentellen Verifikation des für Nickel erstellten numerischen Korrosionsmodells. Dies war erforderlich um die notwendige Aussagesicherheit der Vorhersage risskritischer Bedingungen durch lokale pH-Absenkung, Bild 1, zu erhalten, aber auch, um das experimentelle Prozedere für die demnächst anlaufenden entsprechenden Versuche unter erhöhtem Druck und Temperatur zu verfestigen.

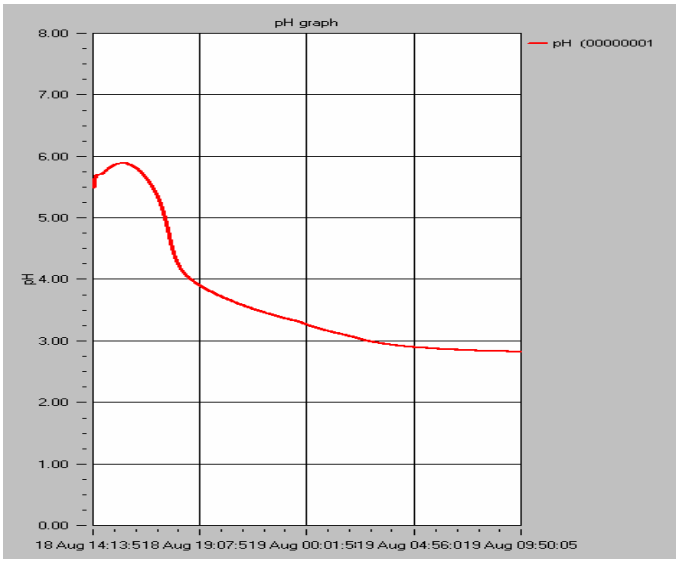

Bild 1: Experimentelle pH-Absenkung von Ni in lokaler Zelle bei pH5,5, 0,0001%Cl, 0,1 bar H2S

Im Ergebnis zeigt Bild 2 die unter verschiedenen Korrosionsbedingungen an Chloriden, Wasserstoff und Schwefelwasserstoff experimentell ermittelten pH-Absenkungszeiten in der 1 ccm Lokalkorrosionszelle im Vergleich zu den errechneten Werten. Die rechnerisch ermittelten Einflüsse der obigen Parameter auf die zur pH-Absenkung um eine Einheit erforderliche Zeit sind damit für Raumtemperatur und Umgebungsdruck ausreichend experimentell abgesichert.

Risskritische Bedingungen ergeben sich aus der Anreicherung von Wasserstoffionen in der lokalen Zelle, die im Anwendungsfall ein Rissspalt oder eine offene Korngrenze der Werkstückoberfläche sein kann.

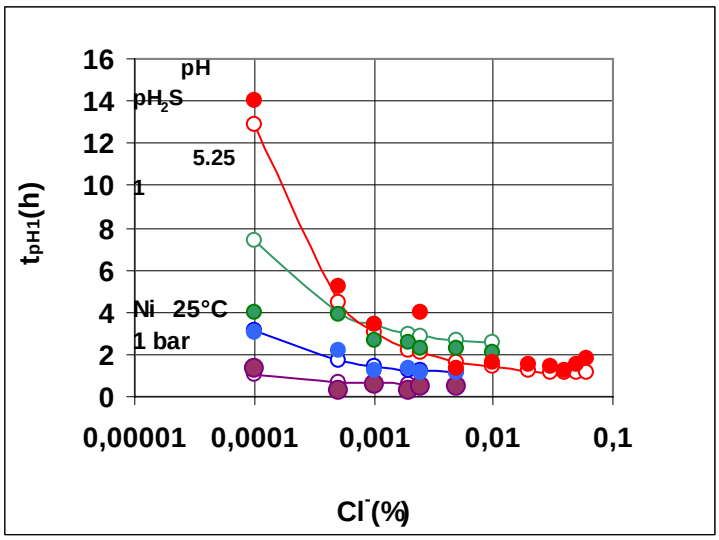

Bild 2: Berechneter und experimentell ermittelter Einfluss von Chlorid auf die pH-Absenkung von Nickel in einer lokalen Zelle bei verschiedenen pH- und Schwefelwasserstoffwerten.

Die Wirkung der Wasserstoffanreicherung auf das Rissverhalten von Nickel als vorläufigem Modellwerkstoff wurde im Projektzeittraum durch fortlaufende SSRT-Untersuchungen verifiziert. Die dabei ermittelte risskritische Ladungsdichte der Wasserstoffabscheidung dient nunmehr in den numerischen Rechnungen als Kriterium für die Risseinleitung bei lokaler anodischer Ansäuerung. Für den pH-Wert 5 ist in Bild 3 der Einfluss des Schwefelwasserstoffs und der Chloride auf die risskritische Entladungszeit numerisch bestimmt worden. Für die praktische Anwendung bedeutsam ist, dass nach Ablauf dieser Zeit das wasserstoffinduzierte Risswachstum eines Bauteils unter den aus dem SSRT ermittelten mechanischen Beanspruchungen bei den jeweiligen Korrosionsbedingungen einsetzt. Für die Beurteilung des korrosiven Einflusses von Lagerstättenmedien ist in Bild 3 von besonderer Bedeutung dass bei bestimmten Chlorid/H2S- Verhältnissen keine Ansäuerung mit Einstellung risskritischer Bedingungen erfolgt und die Übergänge zu den risskritischen Medien deutlich zu definieren sind.

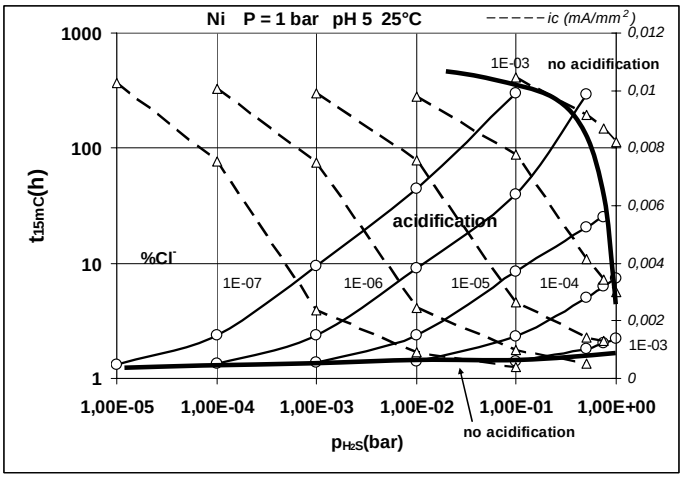

Bild 3: Risskritische Wasserstoffbeladungsdichten bei pH5 für Nickel

Die Vorversuche zur Ermittlung geeigneter SSRT-Versuchsbedingungen bei höheren Temperaturen und Drucken im Hochdruck/Hochtemperaturautoklav, Bild 4 wurden abgeschlossen. Erste Ergebnisse, Bild 5 zeigen die Temperaturabhängigkeit der Bruchdehnung von reinem Nickel bis zu 250°C unter Einwirkung von katodisch abgeschiedenem Wasserstoff. Die erforderlichen Versuchszeiten reichen dabei bis zu einem Monat pro Versuch einschliesslich der Aufheiz-und Abkühlzeiten. Die bislang erhaltenen Daten erlauben jedoch bereits eine überschlagsmässige Anpassung des weiterentwickelten und experimentell verifizierten Rechenmodells zur Vorhersage von Bruchzeiten für höhere Temperaturen.

Bild 4: Hochdruck/temperatur SSRT-Autoklav

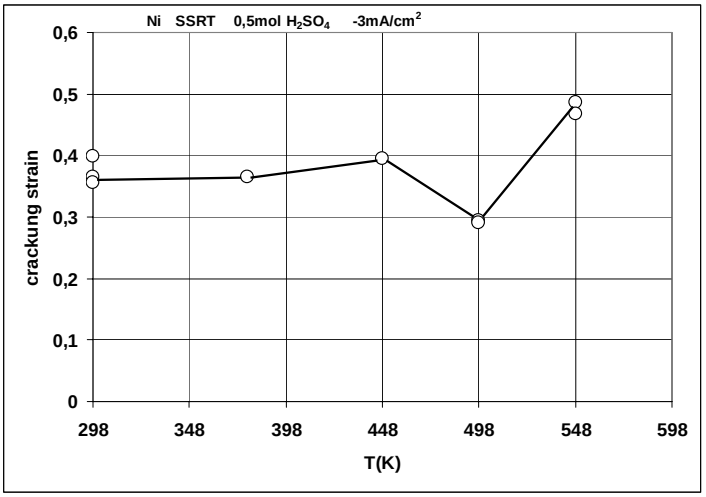

Bild 5: Einfluss der Temperatur auf die Bruchdehnung von Nickel bei katodischer Wasserstoffbeladung

Für 25°C , 5 bar und Rein-Nickel zeigt Bild 5 die errechneten Grenzwerte von pH und p_{H2S} für eine Bruchzeit von 4500 h bei verschiedenen Chloridgehalten des Modellformationswassers. Die angenommene globale Spannung lag bei 100 MPa.

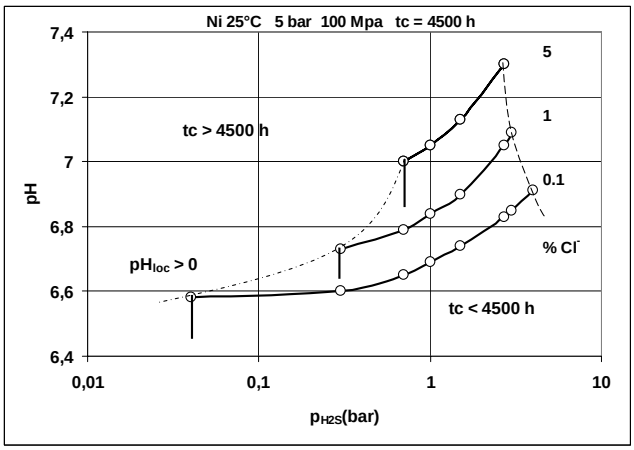

Bild 5: Grenzwerte von pH und p_{H2S} für Ni bei 100MPa und 5 bar

Aus Bild 6 geht die Abnahme der Bruchzeit mit zunehmender globaler Spannung hervor, wenn unterschiedliche gefügeabhängige interkristalline Rissbreiten Wc angenommen werden. Mit zunehmender Spannung steigt dabei der Anteil der wasserstoffinduzierten und durch anodische Ansäuerung bedingten Risslänge $C_{H.}$ Die dazu erforderlichen wasserstoffabhängigen Bruchdehnungen wurden in den bereits früher angeführten SSRT Versuchen ermittelt.

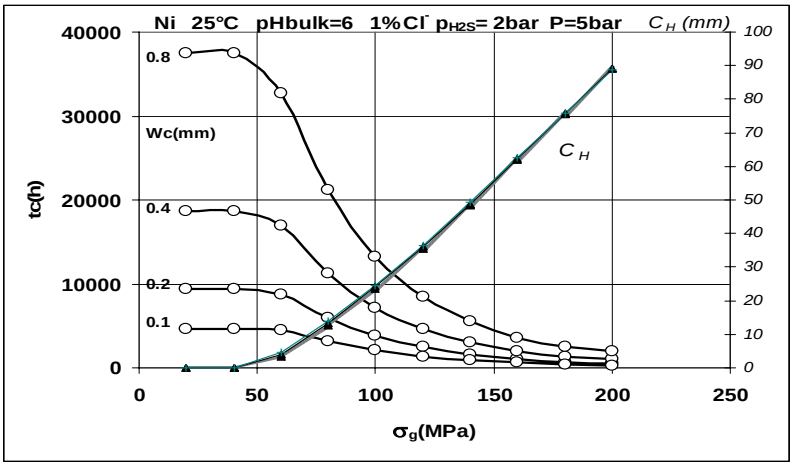

Bild 5: Einfluss der globalen Spannung auf die Bruchzeiten von Nickel sowie Anteil des wasserstoffinduzierten Rissfortschritts am Gesamtriss von 150 mm Längel

Ausgehend von betrieblich ermittelten Korrosionsmechanismen und Schadensbildern wurden im Berichtszeitraum die den örtlichen anodischen Wasserstoff liefernden Spaltkorrosionsvorgänge an MP-Bauteilen mit synthetischem und realen Geoformationswasser experimentell nachgebildet. Hierzu diente insbesondere die die Spaltkorrosion an rotierenden Bauteilen simulierende und neu entwickelte elektrochemische Versuchzelle in Bild 6. Sie gestattet Untersuchungen mit frei wählbaren elektrochemischen Bedingungen, Strömungsgeschwindigkeiten, Medienzusammensetzungen und Temperaturen.

Bild 6: Spaltkorrosionsmesszelle

Beispielsweise wurde der in Bild 7 bei 25°C mit zunehmendem Erdölanteil abnehmende galvanische Korrosionsstrom zwischen den beiden Werkstoffen 1.4462 und 1.4542 ermittelt.

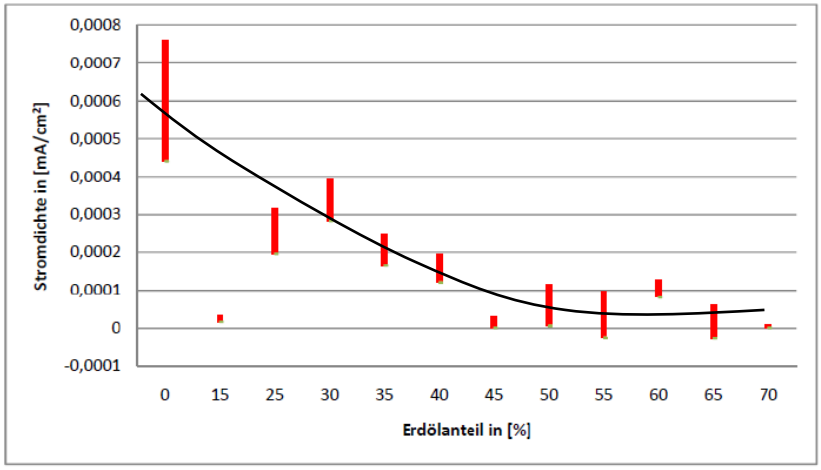

Bild 7: Einfluss des Erdölanteils im Formationswasser auf die Spaltkorrosion bei 1.4542 in Kontakt mit 1.4462 bei 25°C

In Bild 8 ergibt sich für 70°C ein deutlich höherer Korrosionsstrom bei gleichzeitig geringerer Inhibitionswirkung des Erdöls.

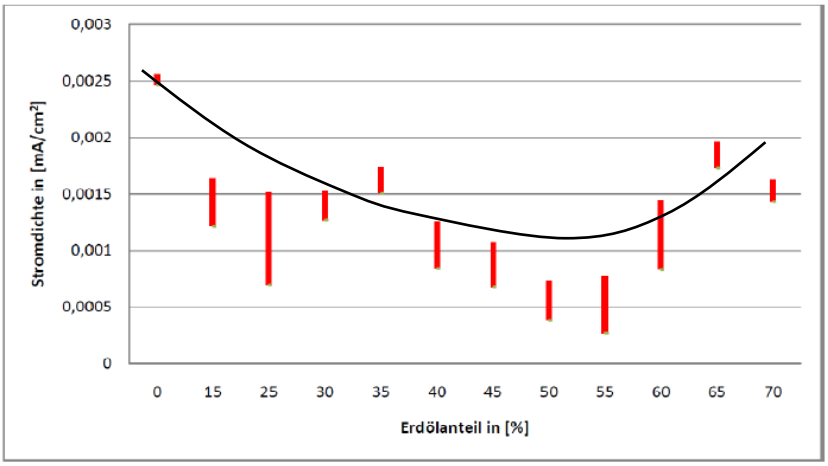

Bild 8: Einfluss des Erdölanteils im Formationswasser auf die Spaltkorrosion bei 1.4542 in Kontakt mit 1.4462 bei 70°C

Die zeitlichen Aufschreibungen der temperaturabhängigen Korrosionsströme in Bild 9 demonstrieren die betrieblichen Überwachungsmöglichkeiten des Korrosionsverhaltens in Multiphasentransportsystemen.

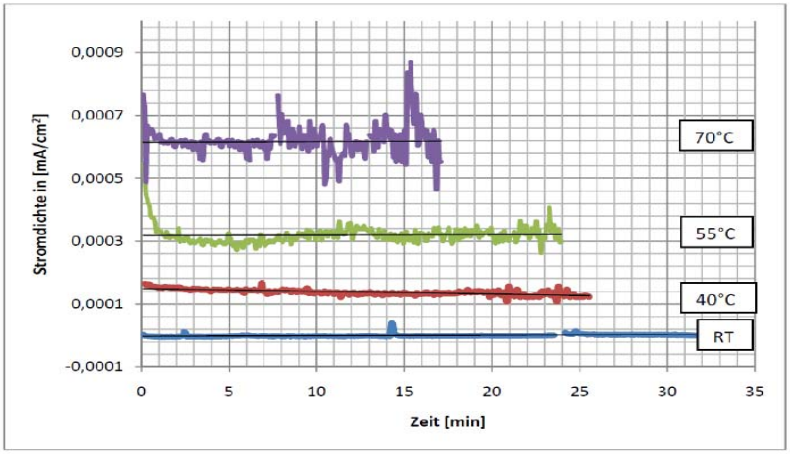

Bild 9: Abbildung 4-25 1.4542 und 1.4462 im ZRA- Betrieb bei 0% Erdölanteil

Beide Darstellungen zeigen auch den inzwischen erreichten Stand der experimentellen Simulation korrosionsrelevanter Betriebszustände des Multiphasentransports. Gemeinsam mit der numerischen Simulation bildet sie die Grundlage für die Entwicklung von angepassten Sensoren zur Fernüberwachung der Korrosion und Absicherung des gefahrlosen Medientransports in verschiedensten Multiphasentransportsystemen.

2. Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse

Die Untersuchungen führen zu der Erkenntnis, dass die bruchrelevanten Prozesse der Spannungsrisskorrosion durch vorlaufende anodische lokale Korrosionsprozesse gesteuert werden. Der dabei freigesetzte Wasserstoff führt zur Reduktion der lokalen Werkstoffzähigkeit und damit zu beschleunigtem Rissfortschritt eines ursprünglich anodisch erzeugten Risses. Beide Mechanismen müssen sowohl bei der Auswahl geeigneter Werkstoffe als auch bei der Beurteilung schadensrelevanter Betriebsbedingungen beachtet werden. Beispielsweise sind Werkstoffe für hohe korrosive Beanspruchung sowohl mit einem hohen Korrosionswiderstand gegen anodische Lokalkorrosion (Cr, Mo), Co) als auch mit einem hohen Widerstand gegen wasserstoffinduzierten Rissfortschritt durch ausreichende Zähigkeit auszustatten.

Für das Projekts der Deutsch-Russischen Kooperation wird damit für die Hersteller von Multiphasentransportanlagen die Basis zur Weiterentwicklung geeigneter Werkstoffe für den Einsatz auch in den hochaggressiven Medien z.B. der sibirischen und kasachischen als auch der arktischen Gasfelder bereitet.

Die im Verlauf des Projekts entwickelten experimentellen und numerischen Methoden zur Schadenssimulation ermöglichen zukünftige parametrische vorab Studien zur Werkstoffauswahl anhand von Lagerstättendaten der Fördermedien und der übrigen zu erwartenden Betriebsparameter.

3. Fortschritte auf dem Projektgebiet bei anderen Stellen.

Wie bereits im Abschlussbericht zu MPT1,Förderkennzeichen 03SX226 F erwähnt, liegt mit dem Forschungsbericht Nr.278 des Forschungskuratoriums Maschinenbau „Korrosionsbedingte Maschinenbauteilfestigkeit“ (Heft 303, 2009) eine auf bekannten Literaturstellen basierende Auswertung zum Einfluss korrosionsbedingter Schäden auf Schwingfestigkeiten von Maschinenbauteilen vor.. Für die Förderung hochaggressiver Medien in Multiphasentransportanlagen und einer hohen Schadenssicherheit des Betriebes in extremen Umgebungen sind diese Unterlagen vorläufig nicht ausreichend. Es muss dabei vielmehr je nach den besonderen Bedingungen der Lagerstätte und der Umgebung ein Verfahren zur Werkstoffauswahl auf wissenschaftlich gesicherter Basis angewendet werden.

4. Veröffentlichungen

1. **H.Hoffmeister:** ”Environmentally induced failure of a Nickel based ball valve plating and modelling the corrosion effects on pure nickel of H_2S, chlorides, pH and pressure” NACE Corrosion Atlanta,GA, USA, 2009 Paper 09351
2. **O.Klein, H.Hoffmeister:** ”Erosion-corrosion wear resistance of chromium-Nickel Steel in a multiphase environment under controlled potentials“” NACE Corrosion Atlanta, GA, USA, 2009 Paper 09481

3. **O. Klein, H. Hoffmeister, A. Glafey:** “Erosioncorrosion Testing of Materials for the Use as Screw Materials in Twin Screw Multiphase Pumps used by the Oil and Gas Production Industry”, 14th Multiphase Production Technology Conference, Cannes, Frankreich, 2009,
4. **O. Klein, H. Hoffmeister:** “Corrosion and Erosioncorrosion Wear Resistance of rotating components mades from USN S43100 (1.4057) Steel under Controlled Potentials”, NACE Corrosion, San Antonio, TX, USA, 2010, Paper 10381
5. **H. Hoffmeister, O. Klein:** “Corrosion Management in Multiphase Process Equipement”, Evolving Multiphase Boosting Technology Conference, paper, 14p., Hannover, Deutschland, 2010, invited paper
6. **H.Hoffmeister: “**Modeling the Effects of Local Anodic Acidification on Stress Corrosion Cracking of Nickel” Eurocorr 2010, Moskau

III Erfolgskontrollbericht

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Es sind Erkenntnisse und Methoden für die Werkstoffoptimierung bei überwiegend mittelständischen Herstellern von Multiphasentransportsystemen zur Förderung von Hydrocarbonen mit hochaggressiven Begleitmedien entwickelt worden.

2. Wissenschaftlich-Technisches Ergebnis, erreichte Nebenergebnisse und gesammelte Erfahrungen

Die wissenschaftlichen Ergebnisse haben zu einem vertieften Verständnis der Schadensmechanismen an Multiphasentransportsystemen geführt. Experimentelle und numerische Methoden zur Beschreibung von Schadensabläufen und zu deren Vermeidung wurden weiter entwickelt.

Aufgrund der gemeinsam gewonnene Erkenntnis, muss die Werkstoffauswahl für Multiphasentransportsysteme unter den extremen Bedingungen entlegener russischer Reservoire auf wissenschaftlich gesicherter Basis erfolgen, da die in der Literatur bislang verfügbaren Unterlagen dazu nicht ausreichen.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

Erfindungen : Keine

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**:** Für Hersteller von Multiphasentransportsystemen sind mit dem Vorhaben die Voraussetzungen für eine abgesicherte Werkstoffauswahl bei gleichzeitiger Beurteilung der Medieneigenschaften von unterschiedlichen Lagerstätten geschaffen worden. Die Konkurrenzfähigkeit dieser mittelständischen Industrie ist damit erhöht worden.

Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten: Die gewonnenen Erkenntnisse über Riss auslösende korrosive Schadensmechanismen werden zur Vermeidung unnötiger Schadensfälle führen Sie sind auch für weitere technische Anwendungen bedeutsam. Entsprechende Arbeiten könnten hierzu insbesondere im Bereich der Sicherheit von kerntechnischen Anlagen durchgeführt werden.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit : Die Entwicklung der Multiphasentransporttechnik bei der Öl/Gasgewinnung schreitet augenblicklich rasch voran.

Verantwortlich dafür sind u.a. die absehbare Erschöpfung bislang ausgebeuteter Reservoire bis hin zu den mit konventionellen Methoden förderbaren Mengen. Mit der erforderlichen zunehmenden Anpassung der Multiphasenfördersysteme an spezielle Reservoirbedingungen müssen die Werkstoffe für die Systemkomponenten ebenfalls angepasst und optimiert werden. Hierzu wurden im Vorhaben entscheidende Unterlagen und Arbeitsmethoden bereitgestellt.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben: Keine

5. Präsentationsmöglichkeiten: Die Ergebnisse wurden auf verschiedenen Konferenzen referiert, siehe Liste der Veröffentlichungen

6. Einhaltung der Ausgaben-und Zeitplanung: Ausgaben-und Zeitplanung wurden eingehalten.

Hamburg, den 27.10.2010

(H.Hoffmeister)