



Temperaturüberwachung am Spalttopf von Magnetpumpen: Eine Betreiberentscheidung

27. Praktikerkonferenz in Graz, 08.-10.04.2024

BASF SE, Florian Merkel (Fachstelle Pumpen-Servicecenter)
Klaus Union Service GmbH & Co KG, Mike Flinkert (Leiter Service)

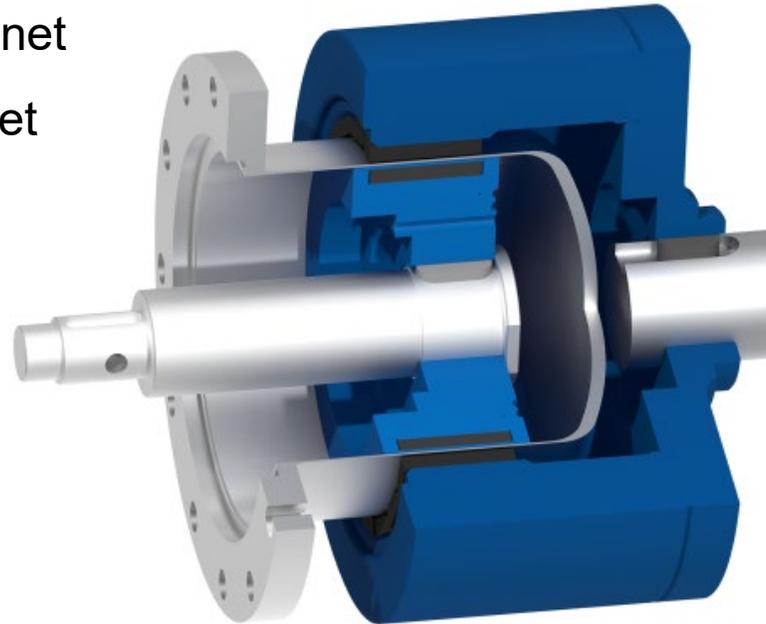
AGENDA

- **Grundlagen und Fakten zur Magnetkupplung**
- **Möglichkeiten zur Messung der Spalttopftemperatur**
- **Anforderungen hinsichtlich Pumpenschutz und Ex-Schutz**
- **Versuche auf Pumpenprüfstand durch BASF SE**
- **Detektierbare Störfälle auf Basis von Versuchsergebnissen**
- **Anwendungsempfehlung aus Betreibersicht**

Aufbau Magnetkupplung und Wärmeentwicklung

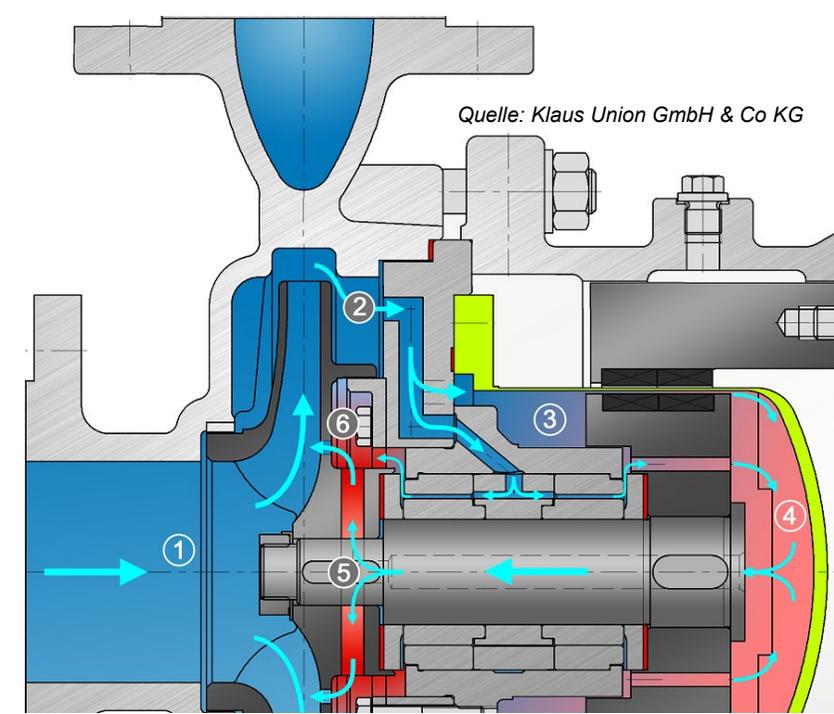
Hauptkomponenten

- Magnettreiber – äußerer Magnet
- Magnetträger – innerer Magnet
- Spalttopf - Trennwand

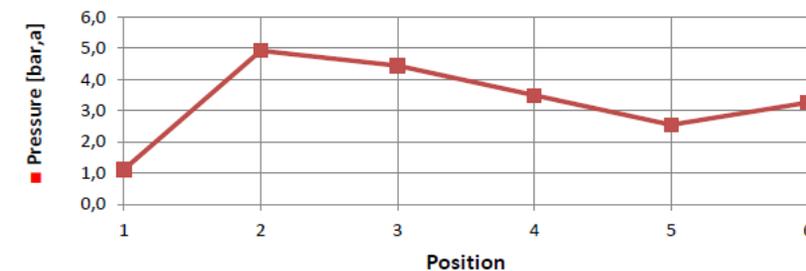
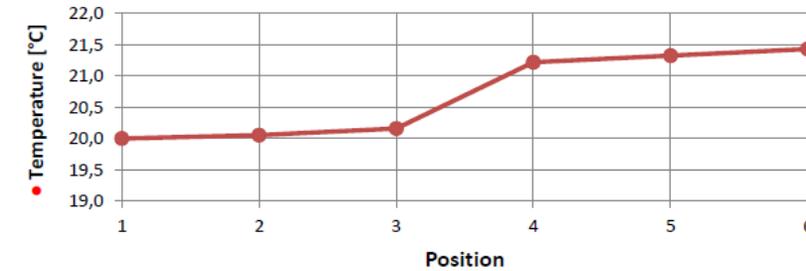


Quelle: Klaus Union GmbH & Co KG

Hinweis:
Spalttopfwerkstoffe mit unendlich hohem spezifischem Widerstand erzeugen keine Wirbelstromverluste!

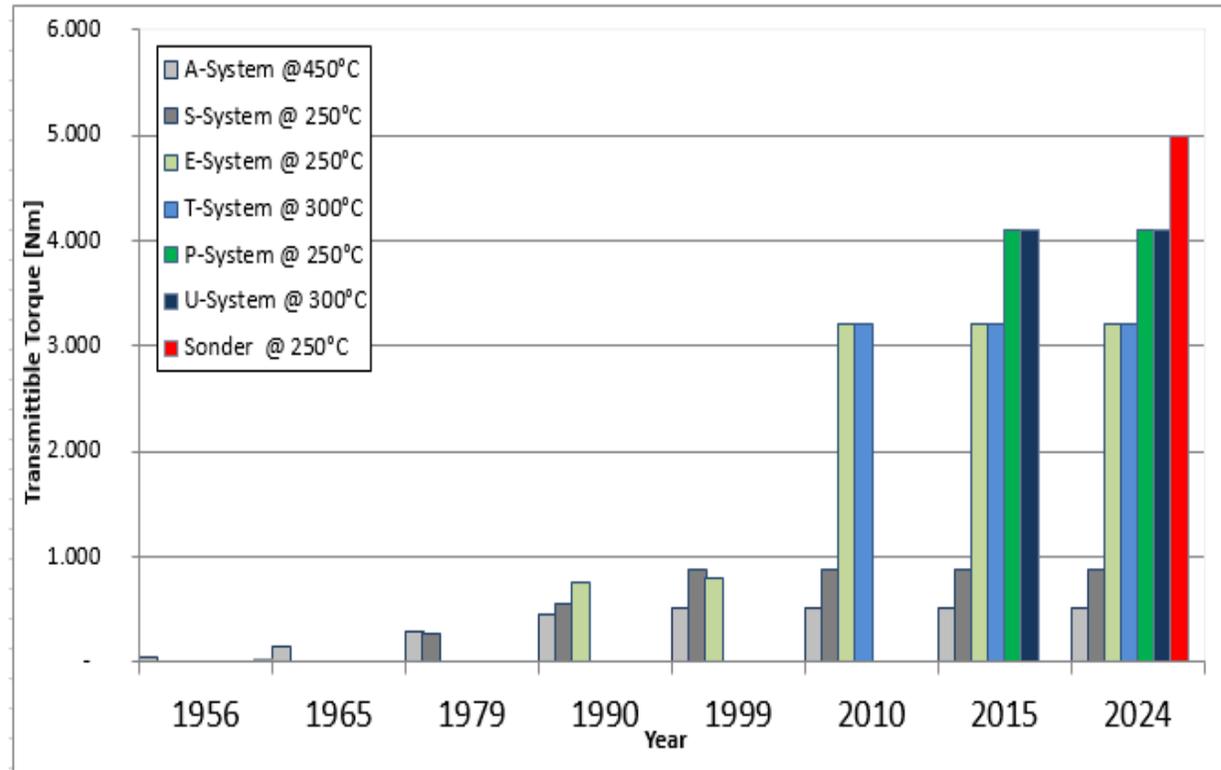


Quelle: Klaus Union GmbH & Co KG



Fakten zur Magnetkupplung

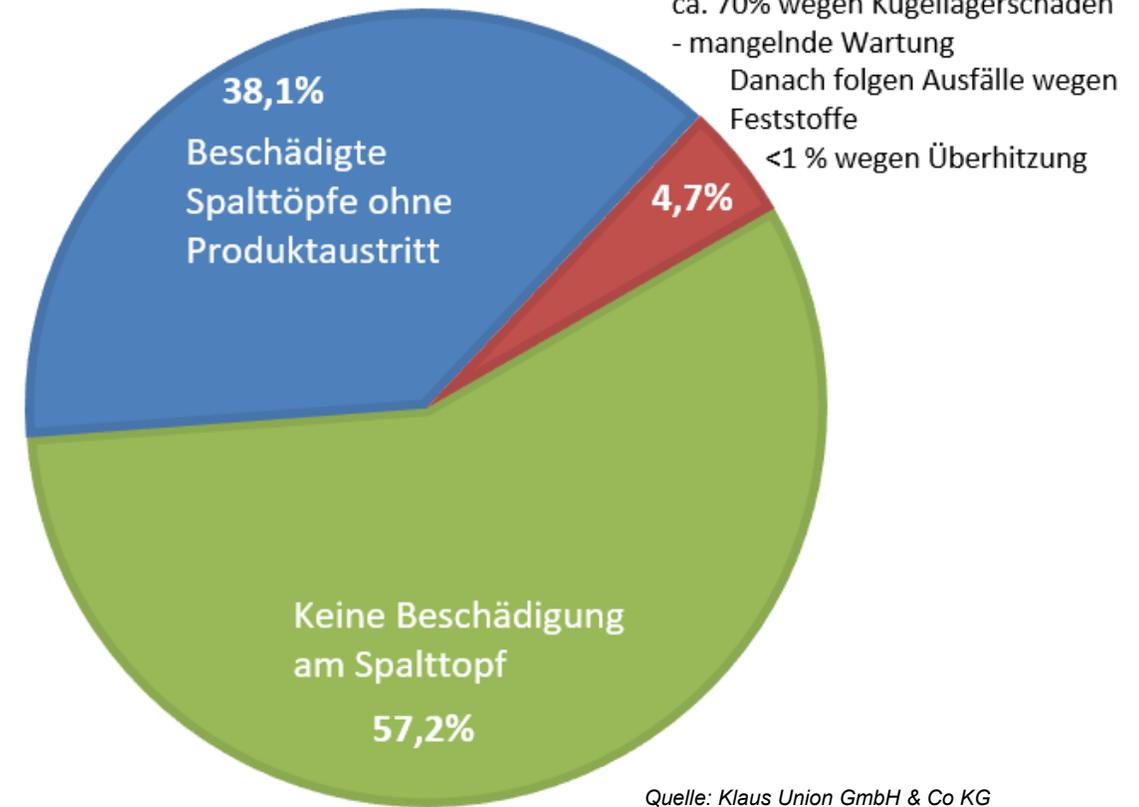
Klaus Union: Entwicklung der Technologie



Quelle: Klaus Union GmbH & Co KG

Anwendungen Klaus Union Magnetpumpen für Ex Zone 1 und 2 >90%

ÜBERSICHT REPARATURAUFTRÄGE ; ZUSTAND DER SPALTTÖPFE

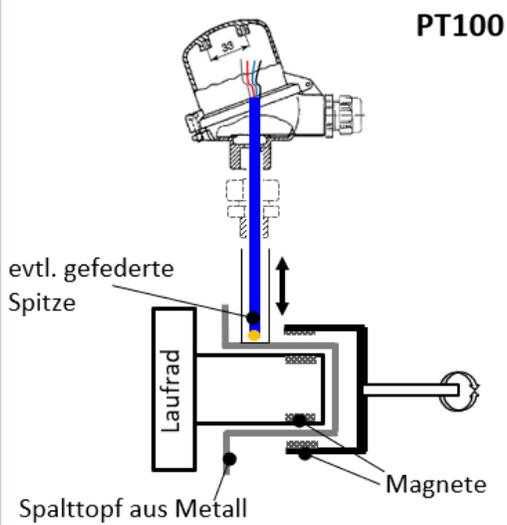
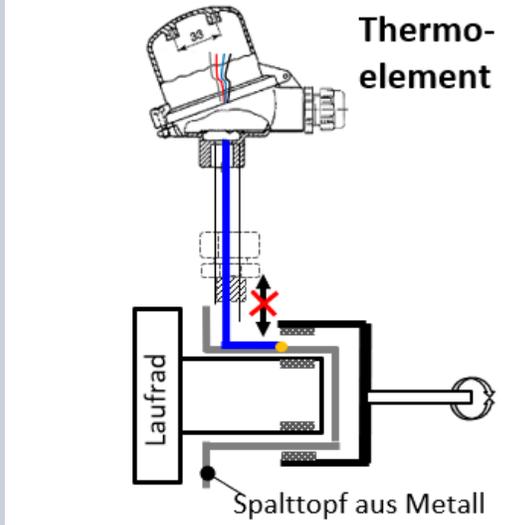


Quelle: Klaus Union GmbH & Co KG

Betreiberperspektive BASF SE:

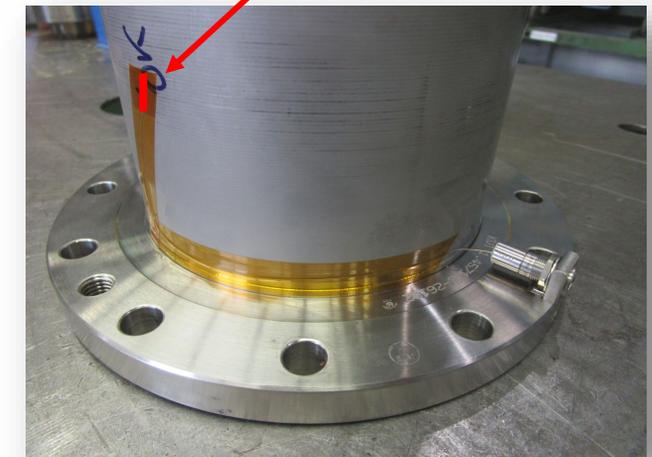
- Immer mehr Magnetkupplungspumpen im Einsatz
- Anzahl Pumpen im EX-Bereich ist größer 90% anzunehmen

Möglichkeiten zur Messung der Spalttopftemperatur

	PT 100	Thermoelement
Messort	<p>Spalttopfoberfläche außerhalb des Magnetfelds</p> 	<p>Spalttopfoberfläche zwischen den Magneten</p> 
Messziel	<p>Überwachung Betriebszustand der Pumpe durch Temperaturveränderung</p> <p><u>Kann</u> konstruktionsbedingt die maximale Oberflächentemperatur am Spalttopf <u>nicht</u> detektieren</p>	<p>Kann konstruktionsbedingt die maximale Oberflächentemperatur am Spalttopf detektieren</p>
Messsysteme	Standardsensoren für Anschlussbohrung	Herstellerspezifische Systeme (Sonderspalttopf mit integrierter Messtechnik)



Messpunkte



Anforderung bei Ausführung mit Sekundärabdichtung: Messung muss druckdicht ausgeführt sein!

Möglichkeiten zur Messung der Spalttopftemperatur

Herstellervorgaben zur Grenzwertermittlung

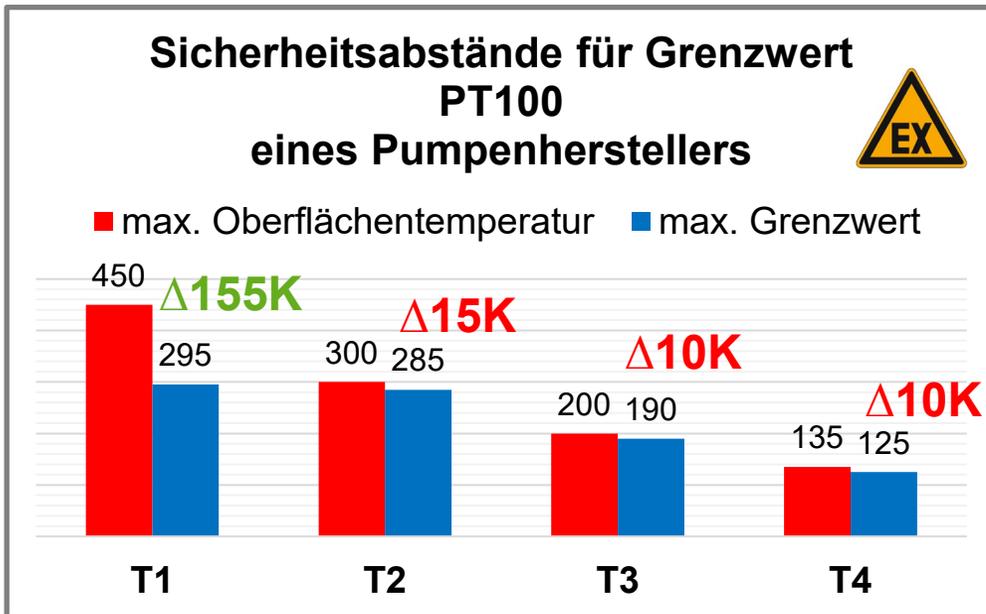
Übliche Angaben diverser Pumpenhersteller:

1. Ausgangswert bei bestimmungsgemäßen Betriebsbedingungen ermitteln
2. Grenzwert für Störfallerkennung z.B. Ausgangswert + 10K

„Umsetzung aufwändig“

...durch z.B.:

- Wechselnde Betriebspunkte
- Schwankende Prozesstemperaturen
- Variable Drehzahlen



→ Daher in Praxis vereinfachte Absicherung nur für Einhaltung „Ex-Schutz“ statt Pumpenschutz

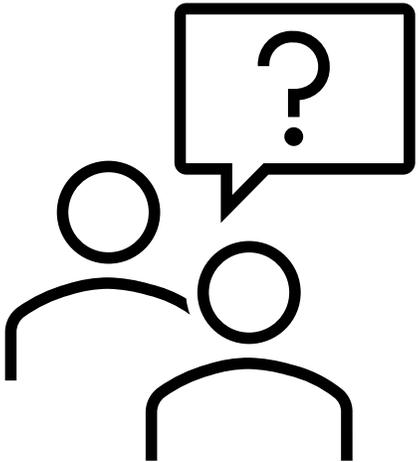
Versuch im Blockkalibrator:
Durch Trägheit des PT100 ergibt sich ΔT zwischen IST zu Messwert bis zu 13 K!

Empfehlung BASF, speziell für Aufstellung in Ex-Zone 1:
Grenzwert bis max. 80% der zul. Oberflächentemperatur einstellen



Anforderungen hinsichtlich Pumpenschutz und Ex-Schutz

Wird
bei Aufstellung
in einer Ex-Zone immer eine
Temperaturüberwachung
gefordert?



Anforderungen hinsichtlich Pumpenschutz und Ex-Schutz (Vorgaben Klaus Union)

*„Wenn der Betreiber sicherstellt, dass die **Pumpe bestimmungsgemäß betrieben wird, ist keine Störung, die zu einer Zündquelle führen könnte, zu erwarten.***

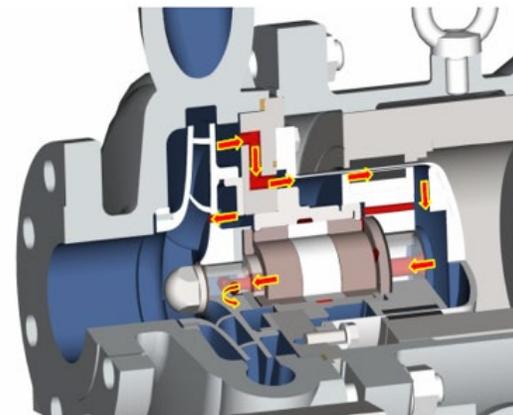
*Die **Pumpe muss nicht zusätzlich überwacht** werden, um die Anforderungen bezüglich des Ex-Schutzes zu erfüllen. Das Konzept zur Einhaltung des bestimmungsgemäßen Betriebs ist abhängig von den individuellen Anlagenbedingungen und sollte daher für jede Pumpenanwendung separat festgelegt werden.“*

Art der Absicherung des bestimmungsgemäßen Betriebs nicht vorgeschrieben!

Empfehlungen zur Absicherung:

- Flüssigkeitsfüllung der Pumpe sicherstellen
- Einhaltung des zulässigen Betriebsbereiches
- Überwachung der Pumpenleistungsaufnahme
- Überwachung der Temperatur am Spalttopf

Teilstromführung Spalttopf



Quelle: Klaus Union GmbH & Co KG

Motivation für Prüfstandversuche BASF SE in Kooperation mit Klaus Union

- **Entscheidungshilfe für Betreiber:**
Wann ist eine zusätzliche Absicherung durch die Spalttopftemperatur sinnvoll?
- **Auswahl und Empfehlung geeigneter Sensoren zur Spalttopftemperaturüberwachung**
- **Simulation von Störfällen und Auswertung der Reaktionszeiten und maximalen Temperaturen**
Vergleich von verschiedenen Sensortypen an gängigen Einbaupositionen am Spalttopf
- **Festlegung der Grenztemperaturen beim Einsatz des Thermoelementes und des PT100 im Hinblick auf den Ex-Schutz**

Versuchsreihe wurde im Rahmen eines Hochschulpraktikums im Zeitraum Okt 2023 – März 2024 durchgeführt.

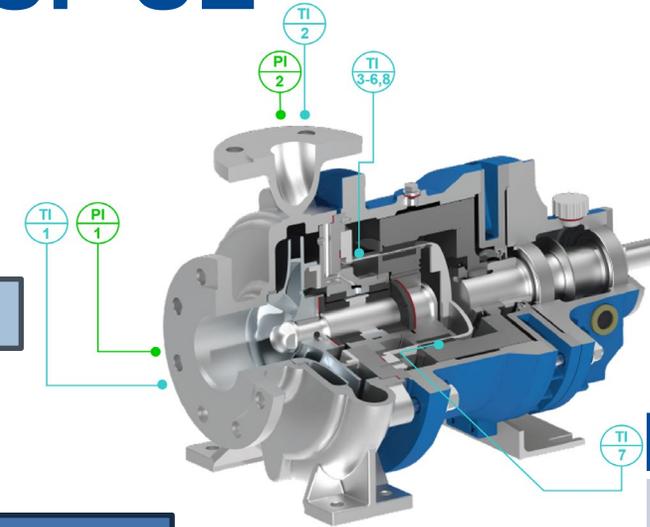
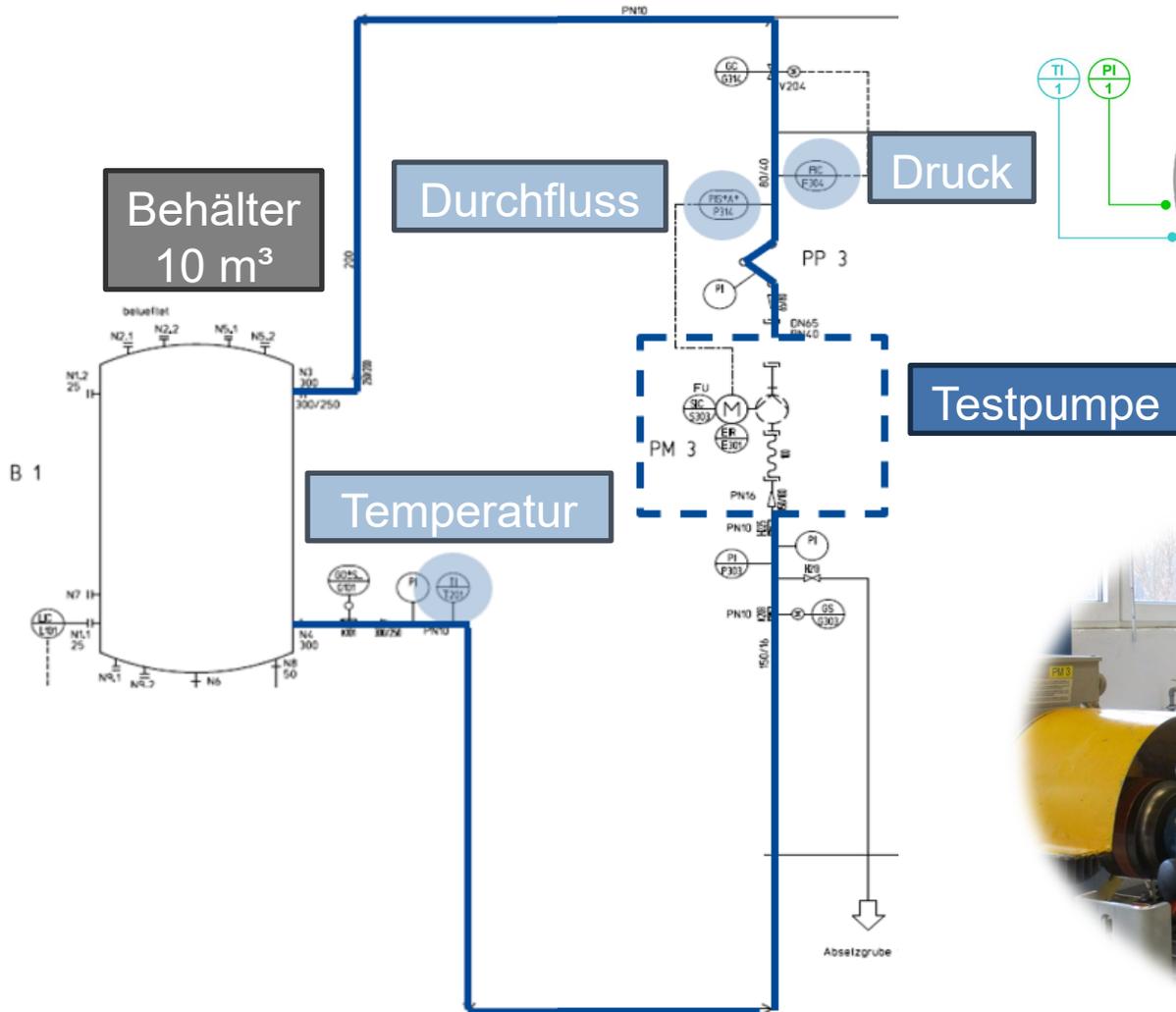
Vielen Dank an Frau Aileen Strack!

(Hochschule Darmstadt, Fachbereich Chemie- und Biotechnologie)



Prüfstandversuche BASF SE

Prüfstand



Quelle: Klaus Union GmbH & Co KG



Pumpendaten

Hersteller: Klaus Union

Pumpentyp: SLM NVN 065-040-200

Drehzahl: 2900 1/min

Laufreddurchmesser: 210 mm

Betriebspunkt Q_{opt}

32 m³/h bei H= 55 m und P= 8,5 kW

Magnetsystem	13E02	13E04
Übertragbare Leistung	10 kW	20 kW
Verlustleistung Pv	1 kW	2 kW

Spalttopfvarianten

Hastelloy 2.4610

Keramik ZrO₂

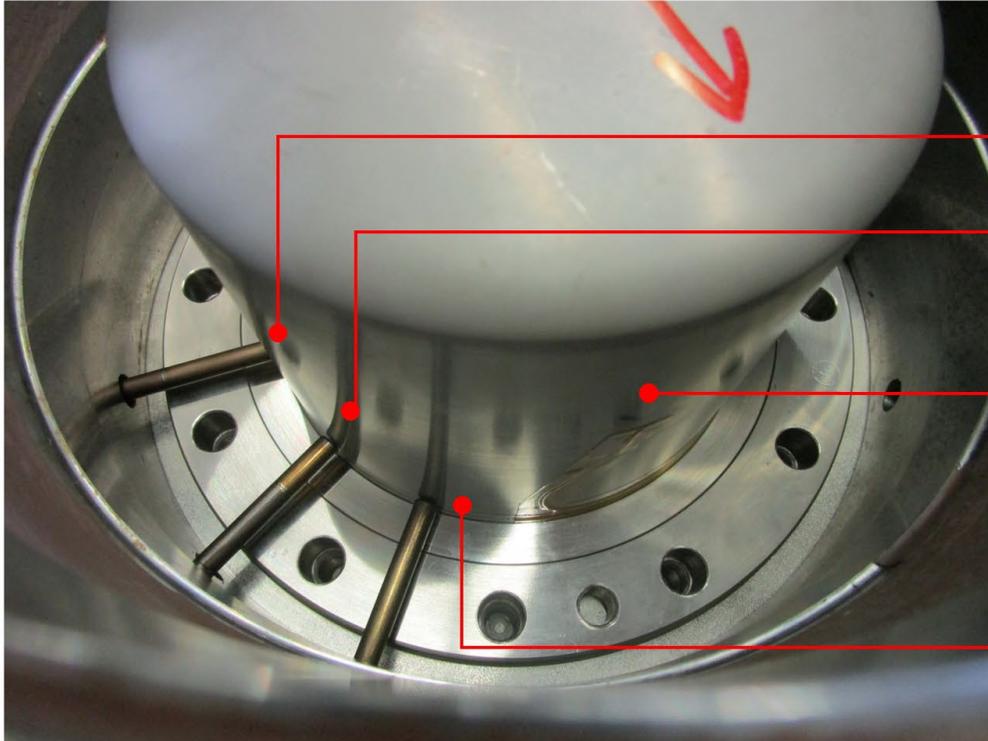
Gleitlagermaterial

Wolframcarbide/Kohle

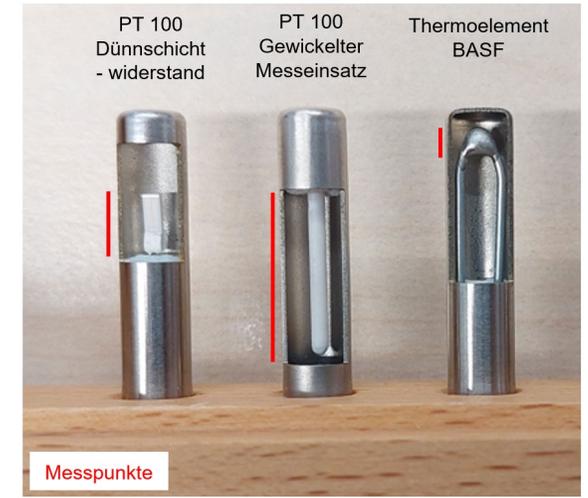
Prüfstandversuche BASF SE

Welche Sensoren wurden getestet?

Einbau innerhalb/außerhalb des Magnetfeldes:



- 
 Temperaturmessung Spalttopf
 PT 100 BASF ø 6 mm, gewickelter Messeinsatz, mit gefederter Verschraubung. Messspitze gegen Mantel isoliert.
- 
 Temperaturmessung Spalttopf
 PT 100 BASF ø 6 mm, Dünnschichtwiderstand, mit gefederter Verschraubung. Messspitze gegen Mantel isoliert.
- 
 Temperaturmessung Spalttopf
 PT 100 Klaus Union (Dittmer) ø 8/ 4,4 mm, Dünnschichtwiderstand, mit befederter Balg. Messspitze gegen Mantel isoliert.
- 
 Temperaturmessung Spalttopf
 Thermoelement Klaus Union TPX- System ø 0,25 mm, NiCr-Ni (Typ K)
- 
 Temperaturmessung Spalttopf
 Thermoelement BASF ø 6 mm, NiCr-Ni (Typ K), mit gefederter Verschraubung. Messspitze gegen Mantel isoliert.
- 
 Temperaturmessung Spalttopf
 Thermoelement BASF ø 6 mm, NiCr-Ni (Typ K), mit gefederter Verschraubung. Messspitze mit Mantel verschweißst.

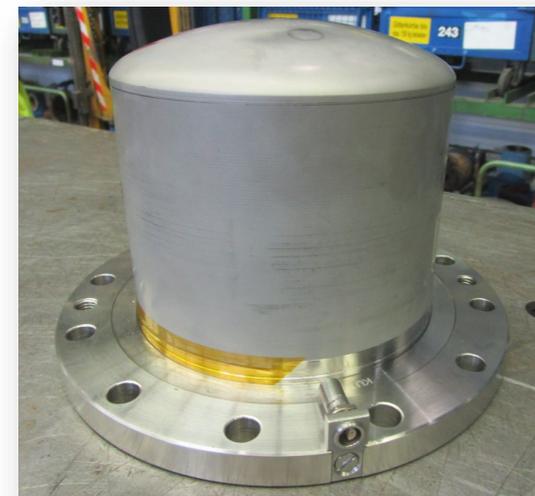


Prüfstandversuche BASF SE

Simulierte Störfälle

Messungen	Metallischer Spalttopf (2.4610)		Nicht-metallischer Spalttopf (ZrO ₂)
	Magnet 13E02	Magnet 13E04	Magnet 13E02
Bestimmungsgemäßer Betrieb	X	X	X
Unterschreiten der Mindestfördermenge	X	X	X
Betrieb mit geschlossener Druckseite	X	X	X
Verstopfen der Kühlkanäle	X	X	X
Partieller Trockenlauf		X	
Abreißen der Magnetkupplung	X	X	
Trockenlauf	X		

Nicht vorgestellte Versuchsergebnisse finden sich im Anhang



Prüfstandversuche BASF SE

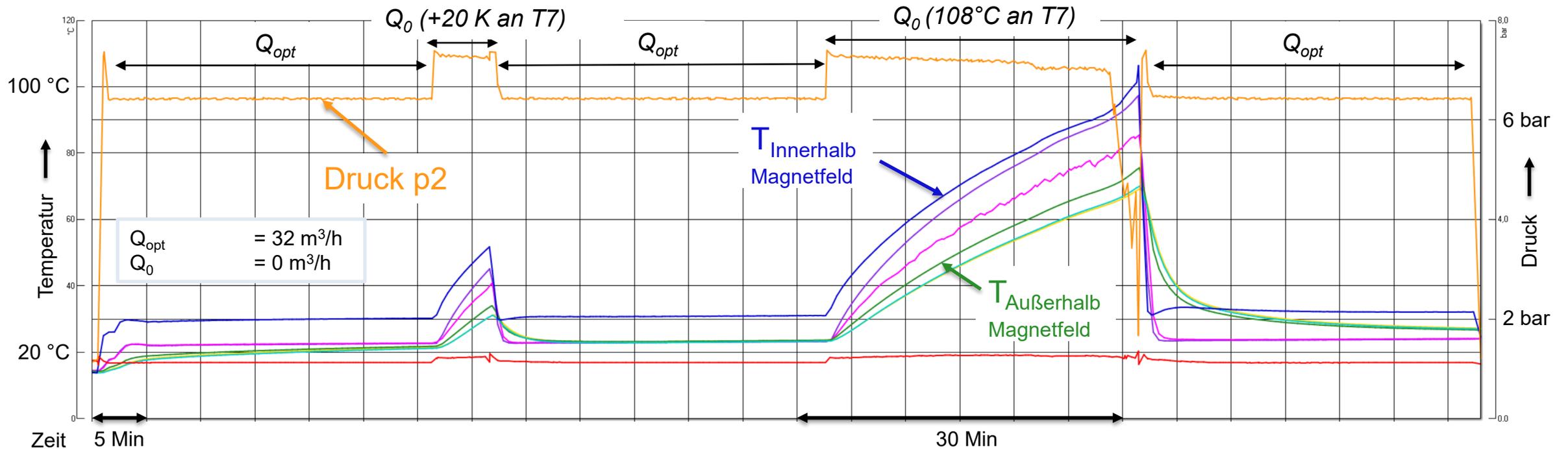
Betrieb mit geschlossener Druckseite: $Q_0 = 0 \text{ m}^3/\text{h}$

Fazit:

- ΔT durch alle Sensoren detektierbar
- Alle Sensoren haben vergleichbare Ansprechzeiten
- T_{max} limitiert auf Siedetemperatur H_2O (Druck im Spalttopf)
Voraussetzung: Spalttopf noch mit Flüssigkeit gefüllt!

- T1 [°C] Temperatur saugseitige Leitung PT 100
- T2 [°C] Temperatur druckseitige Leitung PT 100
- T3 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 gewickelt
- T4 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 Dünnschicht
- T5 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement
- T7 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement TPX
- p1 [bar] Druck saugseitige Leitung
- p2 [bar] Druck druckseitige Leitung

Sensorposition	T_{max} [°C]	ΔT	Zeit für $\Delta T +5 \text{ K}$	Zeit für $\Delta T +10 \text{ K}$
Außerhalb MF	75	52 K	4,5 Min.	7 Min.
Innerhalb MF	108	77 K	2 Min.	3,5 Min.



Spalttopf: 2.4610 / Magnet: 13E04

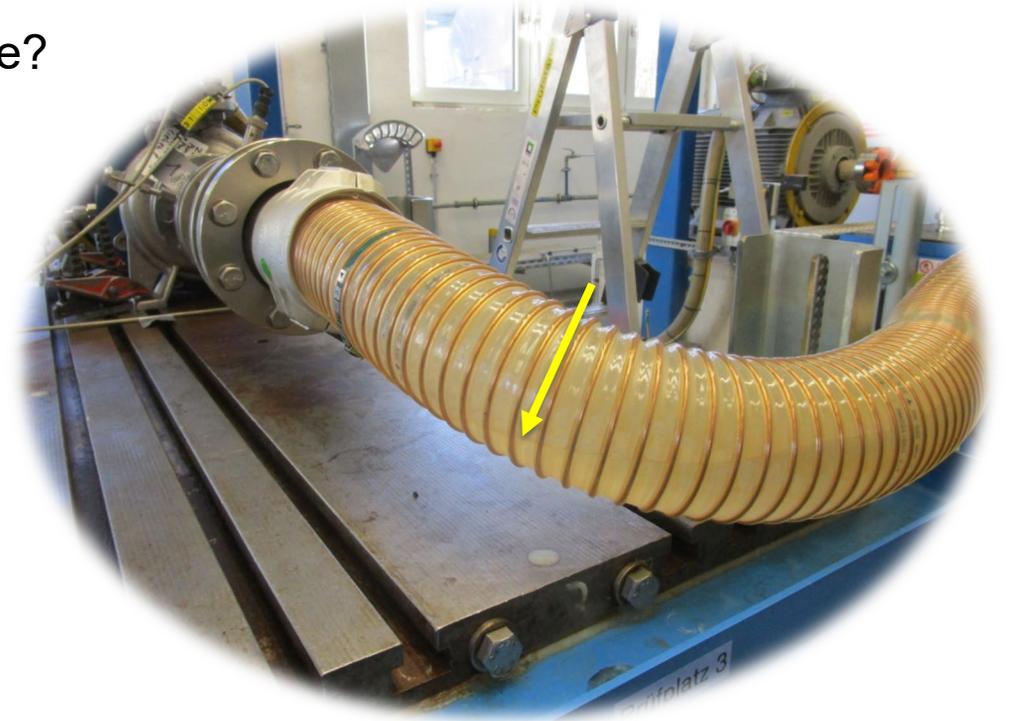
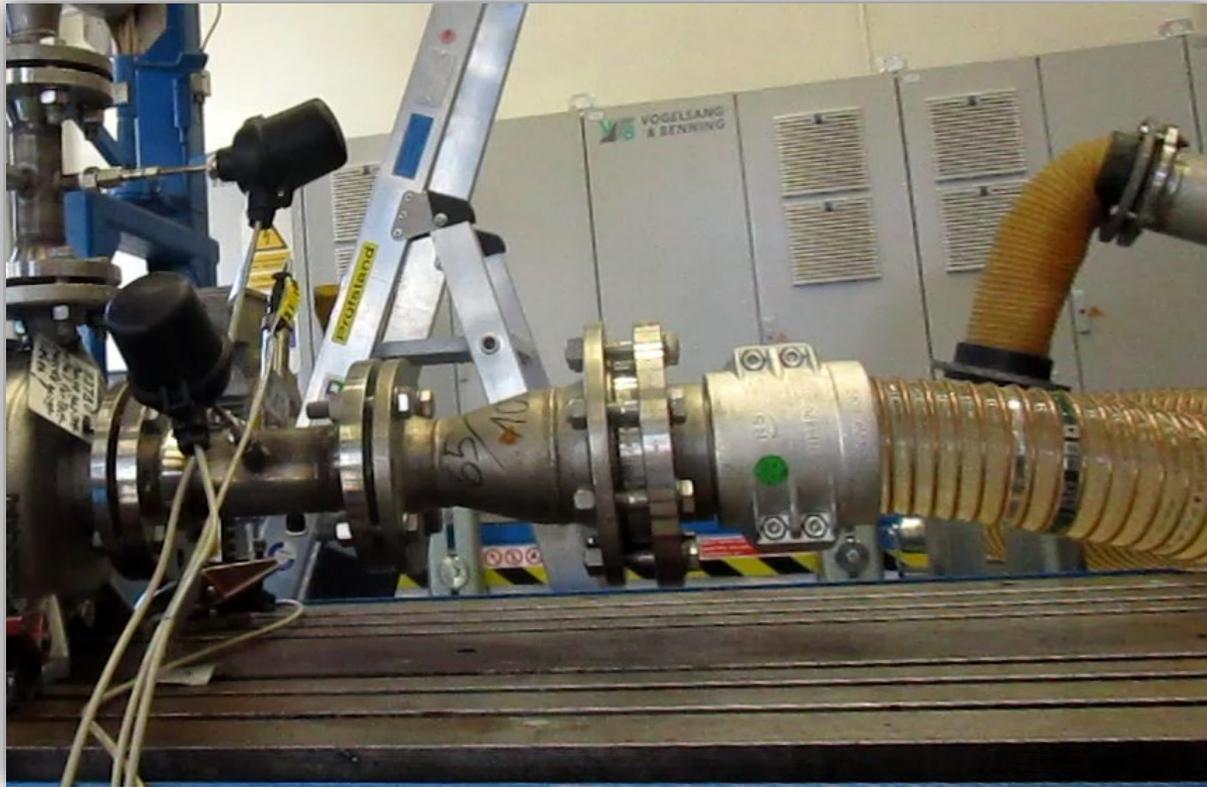


Prüfstandversuche BASF SE

Betrieb mit geschlossener Druckseite: $Q_0 = 0 \text{ m}^3/\text{h} > 30 \text{ Min.}$

Fragestellung:

- Was passiert bei Weiterbetrieb gegen geschlossene Druckseite?



Daten zur Pumpe:

- Leistungseintrag ca. 6 kW
($P_0 = 4 \text{ kW} + \text{Magnetverluste } 2 \text{ kW}$)
- Füllvolumen Pumpe 1,8 l + Rohrleitungen

Spalttopf: 2.4610 / Magnet: 13E04

Prüfstandversuche BASF SE

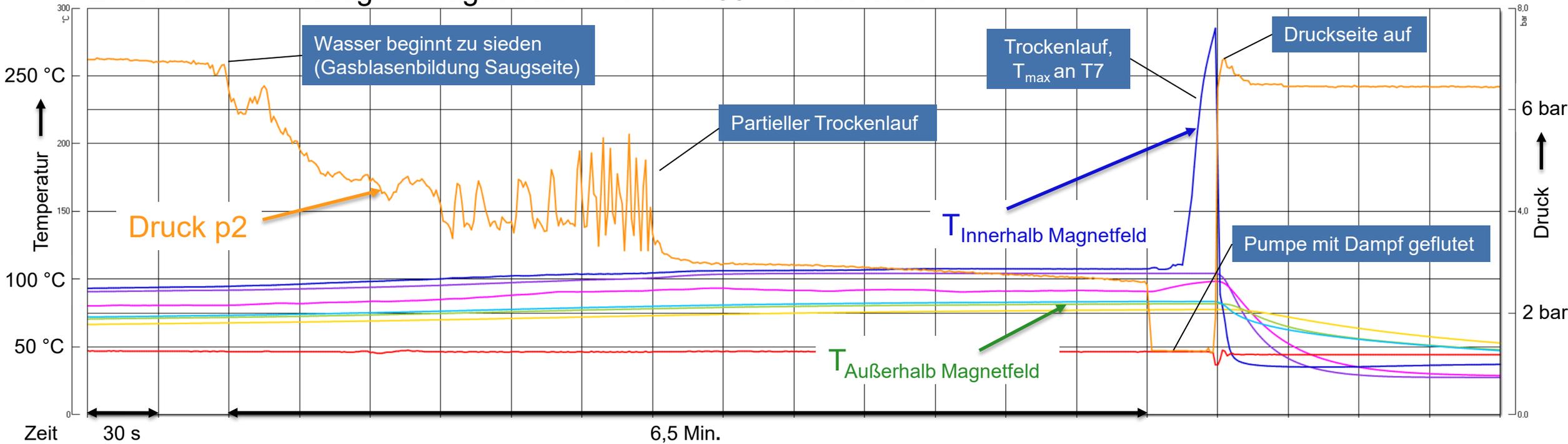
Betrieb mit geschlossener Druckseite: $Q_0 = 0 \text{ m}^3/\text{h} > 30 \text{ Min.}$

- T1 [°C] Temperatur saugseitige Leitung PT 100
- T2 [°C] Temperatur druckseitige Leitung PT 100
- T3 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 gewickelt
- T4 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 Dünnschicht
- T5 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement
- T7 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement TPX
- p1 [bar] Druck saugseitige Leitung
- p2 [bar] Druck druckseitige Leitung

Fazit:

- Längerer Betrieb bei Q_0 kann je nach Betriebsbedingung zum Trockenlauf innerhalb der Pumpe führen (*Verdampfung innerhalb Pumpe in Abhängigkeit zu Saugdruck, Dampfdruck & Energieeintrag*)
- Erheblicher T-Anstieg im Magnetfeld durch PT100 nicht detektierbar

Sensorposition	T_{\max} [°C]
Außerhalb MF	83
Innerhalb MF	285



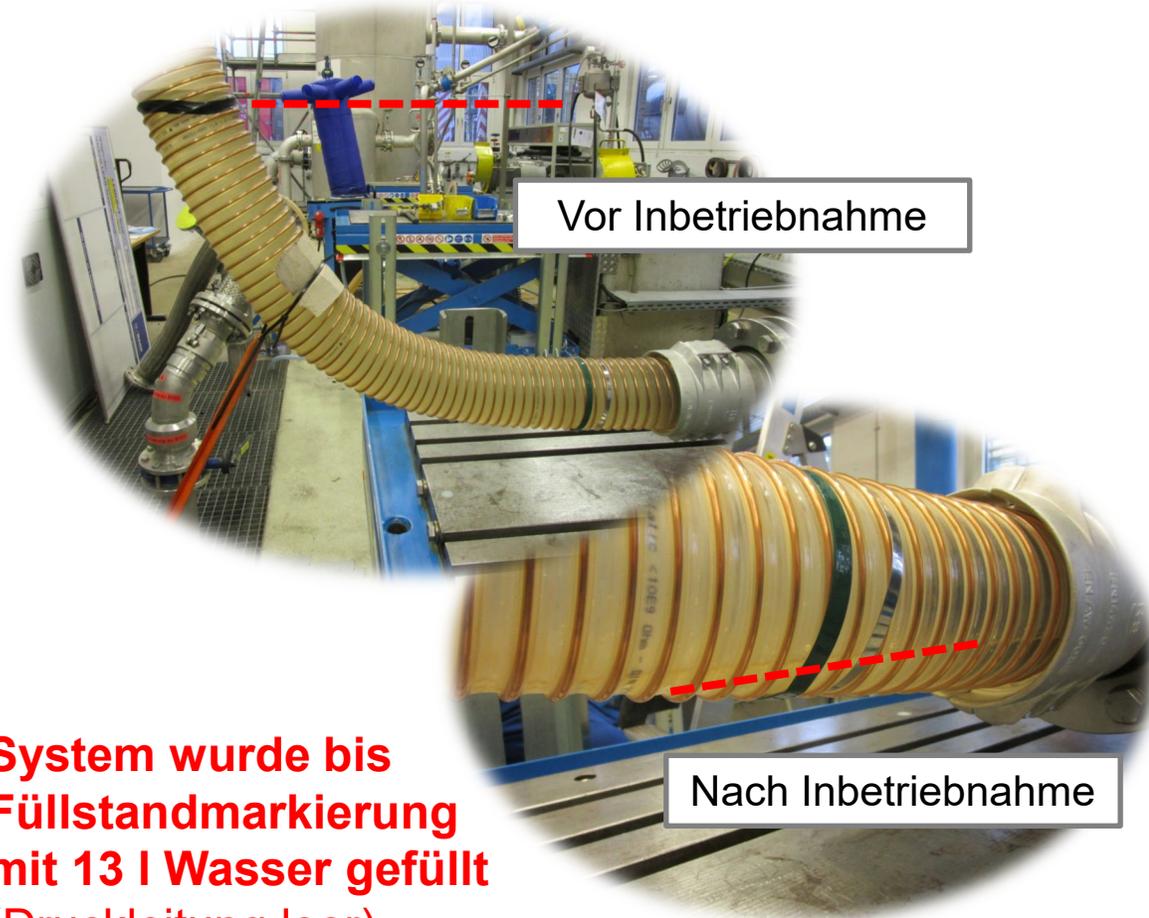
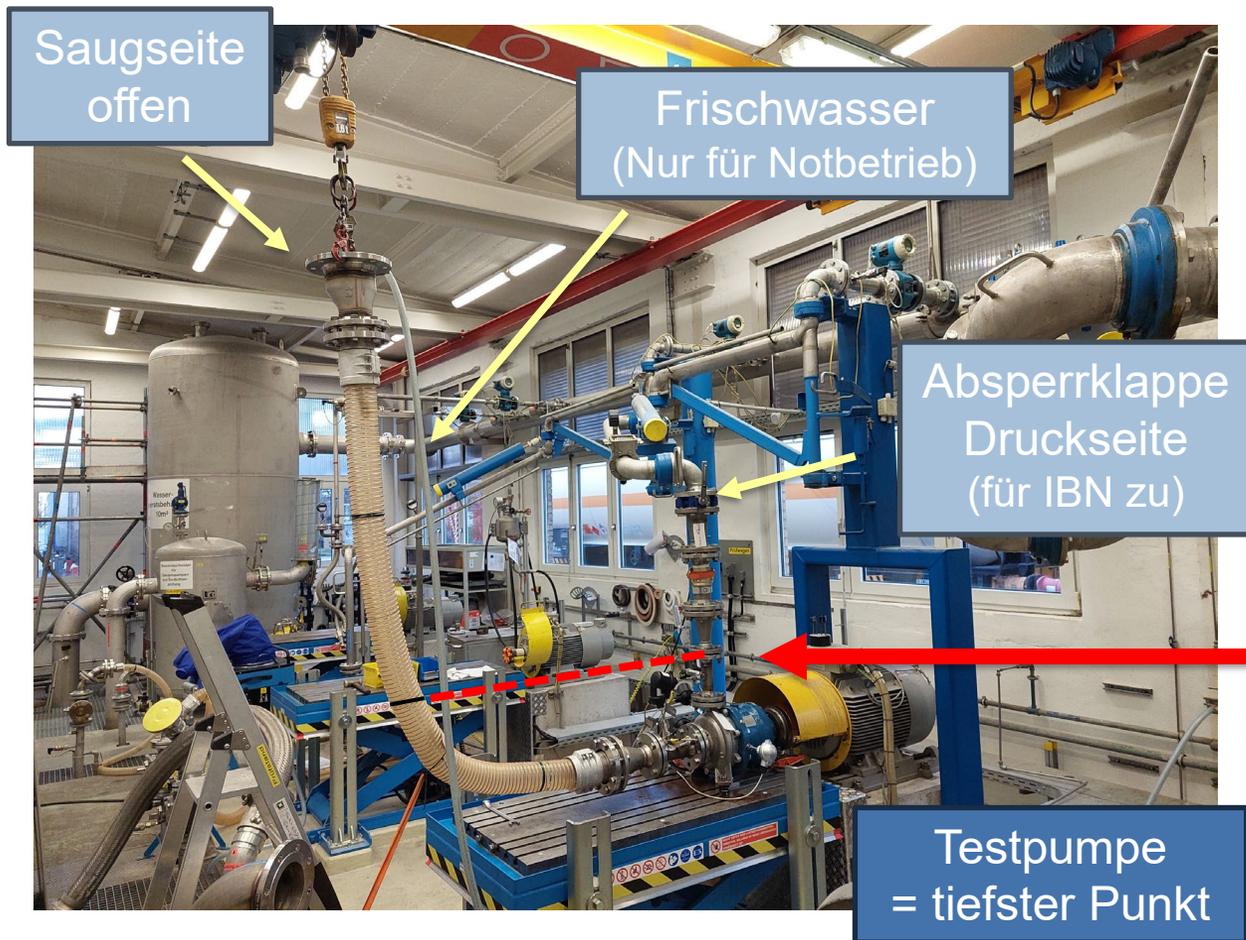
Spalttopf: 2.4610 / Magnet: 13E04



Prüfstandversuche BASF SE

Partieller Trockenlauf: Saugstromabriss

Wie erfolgt die Simulation?



System wurde bis Füllstandmarkierung mit 13 l Wasser gefüllt (Druckleitung leer)

Prüfstandversuche BASF SE

Partieller Trockenlauf: 8 Std. Betrieb nach Saugstromabriss

Videoaufnahmen:

Öffnen der Druckseite



Beharrungszustand



Auslaufen der Pumpe



Spalttopf: 2.4610 / Magnet: 13E04

Prüfstandversuche BASF SE

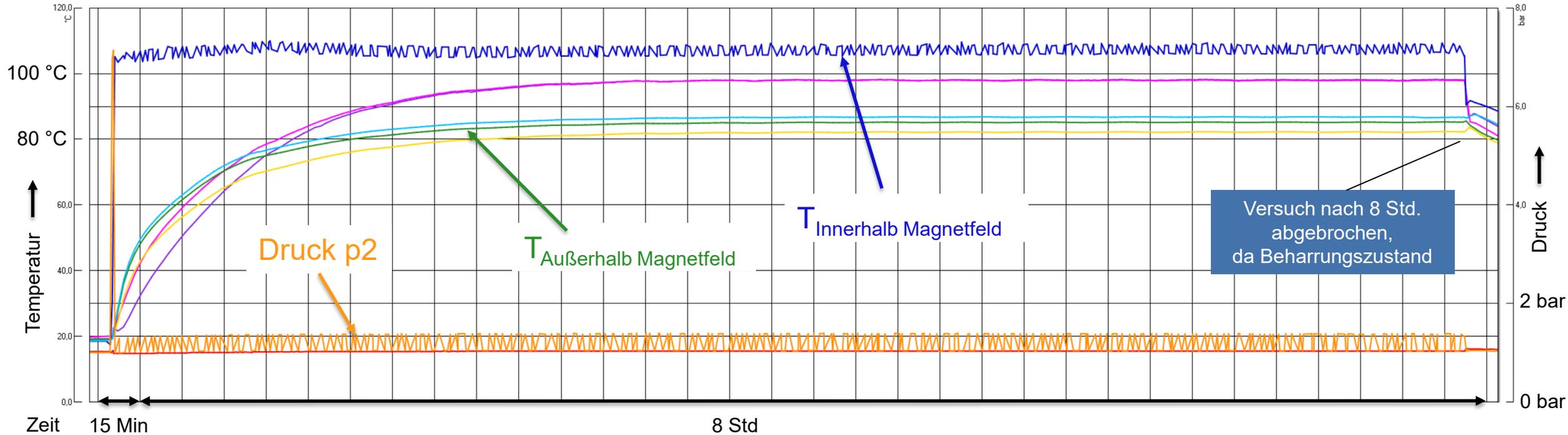
Partieller Trockenlauf: 8 Std. Betrieb nach Saugstromabriss

- T1 [°C] Temperatur saugseitige Leitung PT 100
- T2 [°C] Temperatur druckseitige Leitung PT 100
- T3 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 gewickelt
- T4 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 Dünnschicht
- T7 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement TPX
- T8 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement
- p1 [bar] Druck saugseitige Leitung
- p2 [bar] Druck druckseitige Leitung

Fazit:

- Verbleibende Flüssigkeitssäule auf Druckseite
- Pulsation der Leistungsaufnahme sowie Δp
- T_{max} schwankend 105-109 °C, korreliert zu Pulsation Δp
- ΔT durch alle Sensoren schnell detektierbar

Sensorposition	T_{max} [°C]	ΔT	Zeit für $\Delta T +5 K$	Zeit für $\Delta T +10 K$
Außerhalb MF	85	66 K	2 Min	3 Min
Innerhalb MF	109	90 K	44 s	55 s



Spalttopf: 2.4610 / Magnet: 13E04

Prüfstandversuche BASF SE

Partieller Trockenlauf Nr. 2: Betrieb nach Saugstromabriss

Fazit:

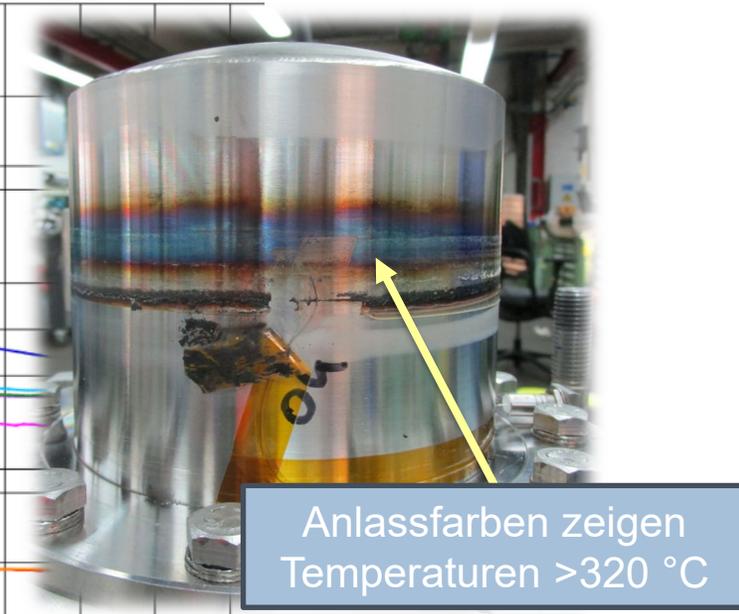
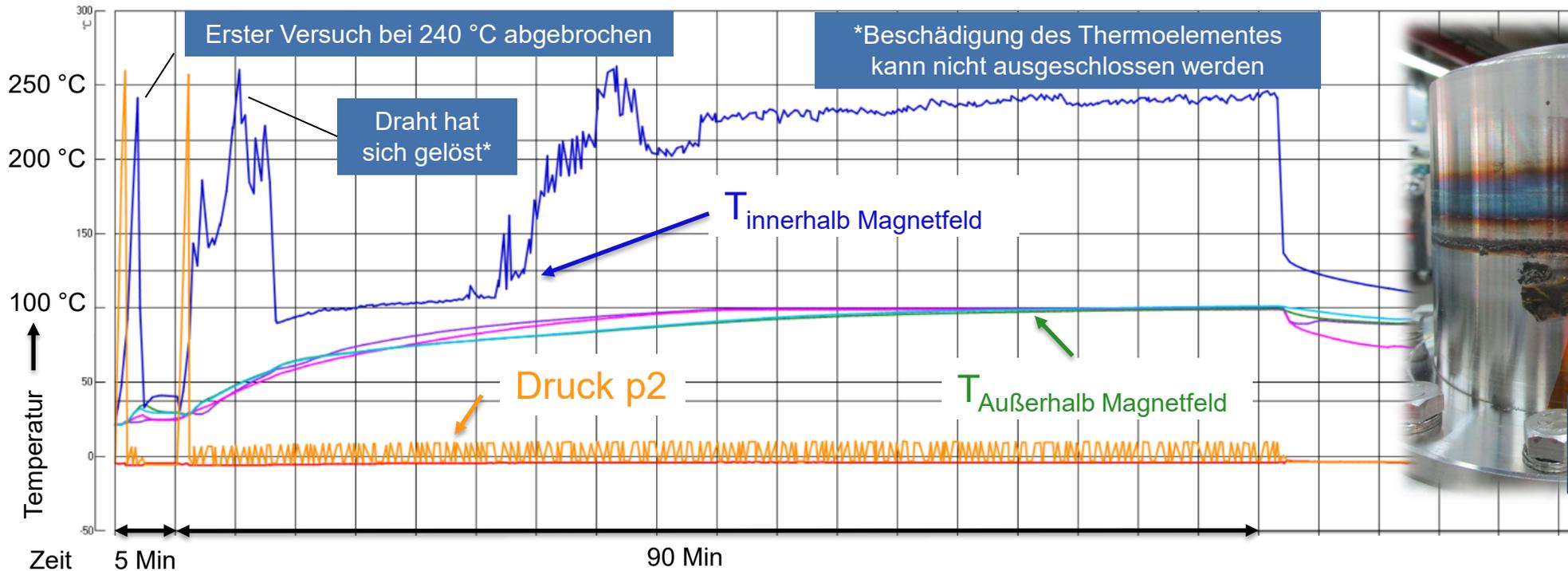
Höherer Energieeintrag + identische Simulation erzeugt...

(= nahezu atmosphärische Druckbedingungen innerhalb Pumpe)

- Lokale Verdampfung innerhalb Magnetfelds
- Extremer Temperaturanstieg an Spalttopfoberfläche

- T1 [°C] Temperatur saugseitige Leitung PT 100
- T2 [°C] Temperatur druckseitige Leitung PT 100
- T4 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 Dünnschicht
- T7 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement TPX
- T8 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement
- p1 [bar] Druck saugseitige Leitung
- p2 [bar] Druck druckseitige Leitung

Sensorposition	T _{max} [°C]	ΔT	Zeit für ΔT +5 K	Zeit für ΔT +10 K
Außerhalb MF	100	70 K	43 s	69 s
Innerhalb MF	>320	>280 K	3 s	4 s



Sonder-Spalttopf: 2.4610 / Magnet: 13E04 = 5 kW Magnetverlustleistung



Prüfstandversuche BASF SE

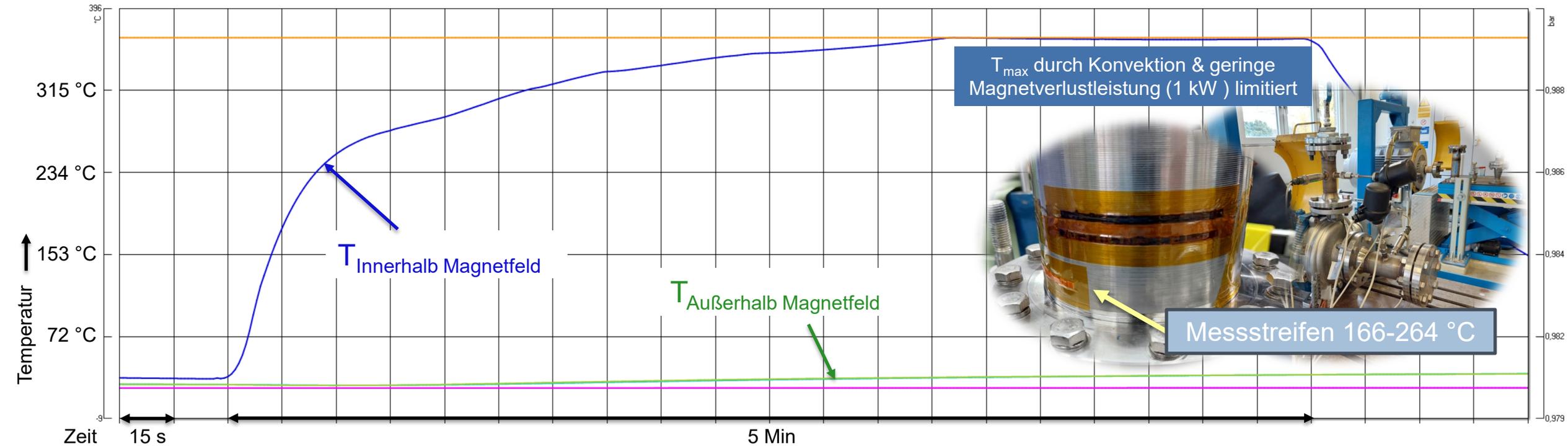
Trockenlauf: Pumpe, trocken, mit 1 kW Verlustleistung

Fazit:

- Extremer Temperaturanstieg an Spalttopfoberfläche
- Störfall nur im Zentrum der Magnete detektierbar
- IST-Temperatur außerhalb Magnetfeld $\ll 166 \text{ }^\circ\text{C}$

- T1 [°C] Temperatur saugseitige Leitung PT 100
- T2 [°C] Temperatur druckseitige Leitung PT 100
- T5 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement
- T6 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 Dünnschicht
- T7 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement
- p2 [bar] Druck druckseitige Leitung

Sensorposition	T Start	T nach 10 s	T nach 30 s	T nach 5 Min
Außerhalb MF	24,1 °C	24,0 °C	23,5 °C	34 °C
Innerhalb MF	32 °C	132 °C	252 °C	363 °C



Spalttopf: 2.4610 / Magnet: 13E02

Detektierbare Störfälle – Fazit BASF SE

Fehlzustände	Standardisierte Überwachungskonzepte <i>Immer einzusetzen!</i> z.B. durch...	Zusätzlich detektierbar durch...		
		metallischer Spalttopf		nicht-metallischer Spalttopf
		PT 100 (außerhalb MF)	Thermoelement (innerhalb MF)	PT100 (außerhalb MF)
Betrieb mit geschlossener Druckseite	Durchfluss / (Druck)	✓	✓	✓
Unterschreiten der Mindestfördermenge	Durchfluss	✓ > 2 kW Magnetverlust	✓	✓ > 2 kW Magnetverlust
Partieller Trockenlauf (Strömungsabriss Saugseite)	Füllstand / Druck / Durchfluss	✓	✓	✓
Trockenlauf (ohne Flüssigkeitsfüllung)	Füllstand	✗	✓	✗
Verstopfen der Kühlkanäle (z.B. durch Fremdkörper)	nicht möglich	✓ > 2 kW Magnetverlust	✓	✗
Abreißen der Magnetkupplung	Durchfluss / Druck / Motorleistung	✓	✓	✗

Anwendungsempfehlungen aus Betreibersicht

Anwendung	Empfohlene Messprinzipien	Überwachungsziel
Bei Aufstellung in Ex-Zone 1	PT100*	Ex-Schutz
Bei Fördermedien, die zum Verstopfen der Kühlkanäle neigen (bei Aufstellung innerhalb und außerhalb Ex-Zone) <i>Bsp.: polymerisierende oder feststoffbeladene Medien oder Schmelzen</i>	PT100*	Anlagensicherheit und/oder Ex-Schutz
Wenn partieller Trockenlauf nicht auszuschließen ist (Bei Aufstellung in Ex-Zone) <i>Bsp.: Restentleerung / Saugstromabriss</i>	Thermoelement	Ex-Schutz
Sicherstellung der max. Oberflächentemperatur bei Betriebstemperaturen im Grenzbereich der Temperaturklasse	Thermoelement	Ex-Schutz
Thermolabile Stoffe (bei Aufstellung innerhalb und außerhalb Ex-Zone)	Einzelfallbetrachtung	Anlagensicherheit und/oder Ex-Schutz

*Hinweis zur funktionalen Sicherheit:

- PT100 wird bevorzugt, da standardisiert und SIL2 einfach möglich
- Thermoelement für Überwachung zwar geeignet, jedoch nur mit FMEA als PLT-Sicherheitseinrichtung zugelassen.
(Kurzschluss nicht detektierbar! Keine regelmäßige Prüfung möglich. Nur Plausibilisierung im eingebauten Zustand)

Fazit / Nebenerkenntnisse BASF SE

- Zustand der Pumpe, insbesondere Gleitlagerung, nach kompletter Versuchsreihe in sehr gutem Zustand
*Hinweis: Auf Versuchsfeld „optimale Bedingungen“.
In Anlage spielen u.a. Medieneigenschaften, hydraulische Kräfte, Betriebsweise und Laufzeit eine Rolle*
- Solange Verdampfung im Spalttopf ausgeschlossen werden kann, sind Oberflächentemperaturen im Störfall begrenzt und Fehlzustände zuverlässig detektierbar
- Worst case: Trockenlauf der Pumpe
→ Muss zuverlässig abgesichert werden
→ Vor allem bei Anwendungen im Ex-Bereich
→ Besonderer Fokus auf Grenzfälle: „Restentleerung“ oder „Evakuieren Saugleitung“ (Tankentladungen)



An Kohle-Buchsen und
Wolframcarbid-Hülsen
kein Verschleiß messbar!

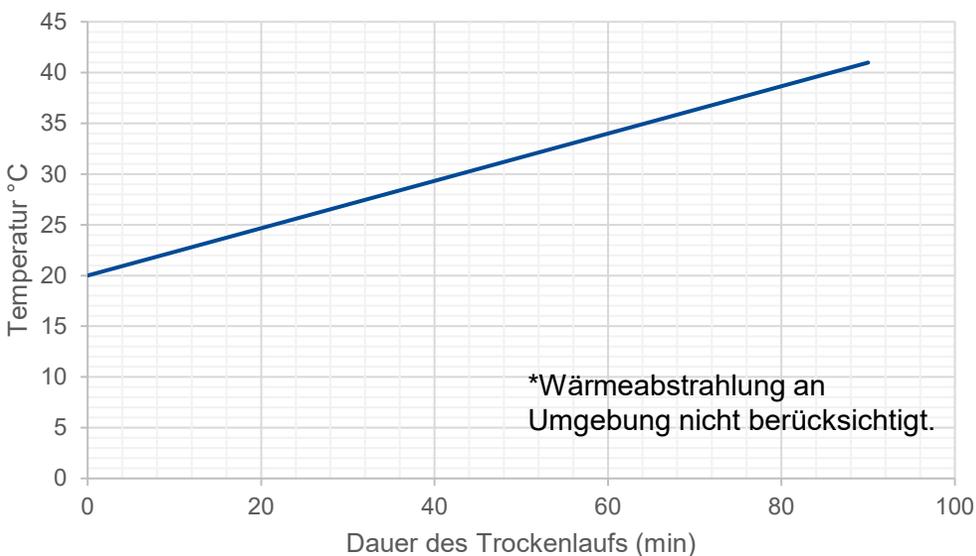
Problemstellung Trockenlauf: Lösung Klaus Union

LÖSUNG:

Durch die Nutzung der „RTZ-Ausführung“ wird auch bei einem Strömungsabbriss auf der Saugseite die Schmierung und Kühlung der Gleitlager durch das Flüssigkeitsreservoir innerhalb des Spalttopfes für einen längeren Zeitraum sichergestellt.

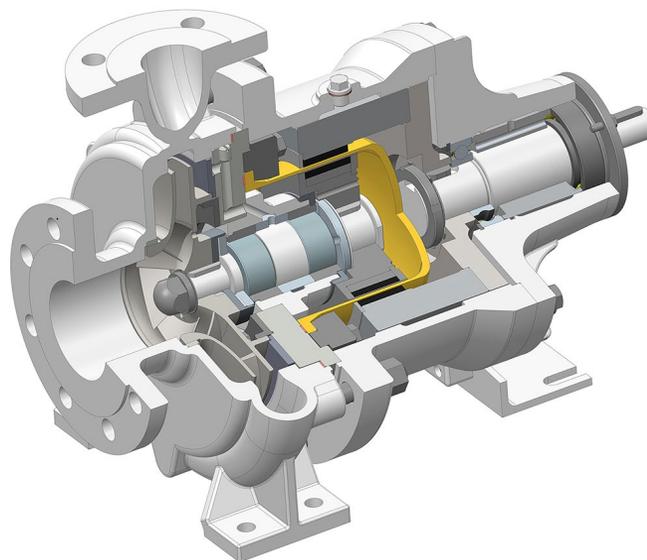
Die mögliche Trockenlaufzeit der Pumpe wird in Abhängigkeit der zulässigen Oberflächentemperaturerhöhung des Spalttopfes mit semiempirischen Verfahren unter Berücksichtigung der Fördermedieneigenschaften berechnet.

Berechnete Wärmeentwicklung* im RTZ System



Sicherheitsvorteil:

Max. Oberflächentemp. limitiert auf Siedetemperatur
AUCH BEI TROCKENLAUF



Testergebnis nach 1Std Trockenlauf
– mit Wasser im Vorfeld gefüllt.
Fazit:
Gleitlagerung muss benetzt sein!

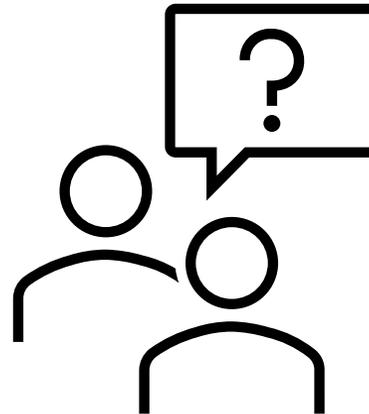
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt

Mike Flinkert

m.flinkert@klaus-union.com

Klaus Union Service GmbH & Co KG



Kontakt

Florian Merkel

florian.a.merkel@basf.com

BASF SE, Ludwigshafen



We create chemistry

Anhang

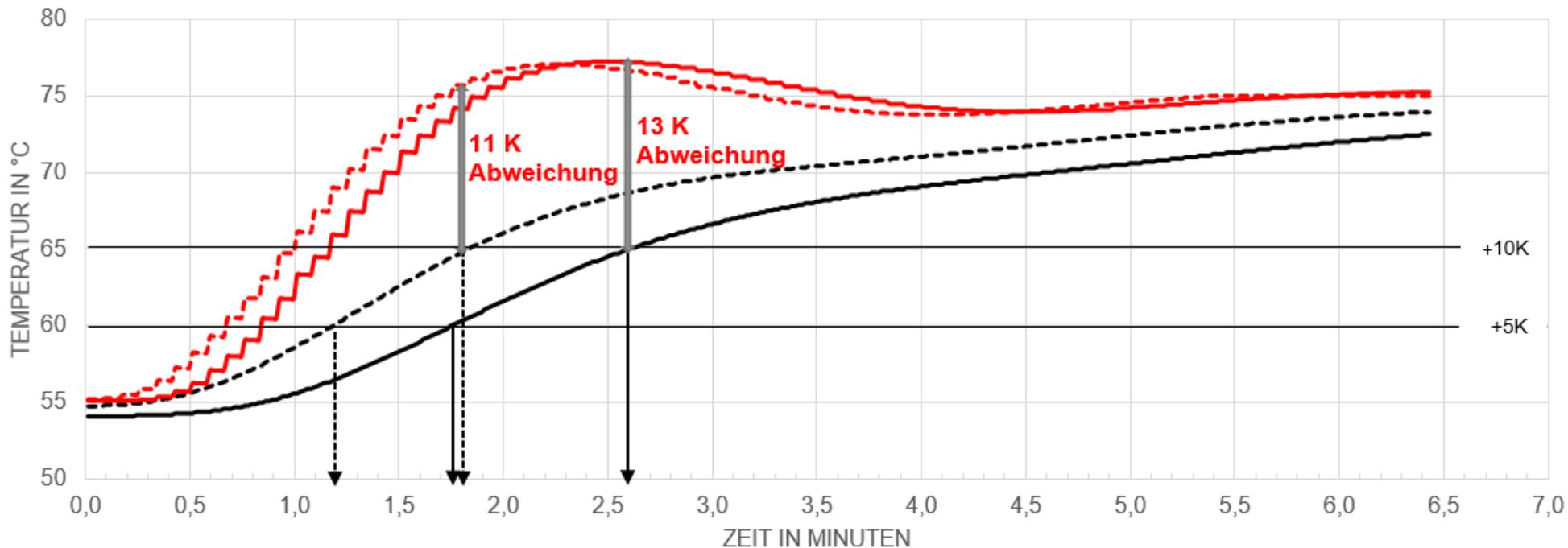
Möglichkeiten zur Messung der Spalttopf­temperatur

Verzögerungszeit PT100: Versuch im Blockkalibrator

PT100 MIT/OHNE SCHUTZROHR: DELTA T 20K

(AUF REFERENZTEMPERATUR 55°C REDUZIERT,
VERSUCHSTEMPERATUR OHNE SCHUTZROHR 75...95°)

— PT100 mit Schutzrohr - - - - - PT100 ohne Schutzrohr
— IST Temperatur (Versuch mit Schutzrohr) - - - - - IST Temperatur (Versuch ohne Schutzrohr)



Prüfling

Design:
Schutzrohr:
Spitze:

Beschichtung:
Wärmeleitpaste:
Messeinsatz:
Sensor:
Transmitter:
Parameter:

Pumpenmessung mit gef. Ver.
Sonderanfertigung
 Φ -innen = 3,05-3,1 mm
 Φ -außen = 6 mm
ohne
ohne
PT100
Drahtgewickelt / \varnothing 3 mm
ABB TTH300
Dämpfung = 0 s
Messbereich = 0...100 °C



Prüfstandversuche BASF SE

Zul. Betriebsbereich & Unterschreiten Q_{min}

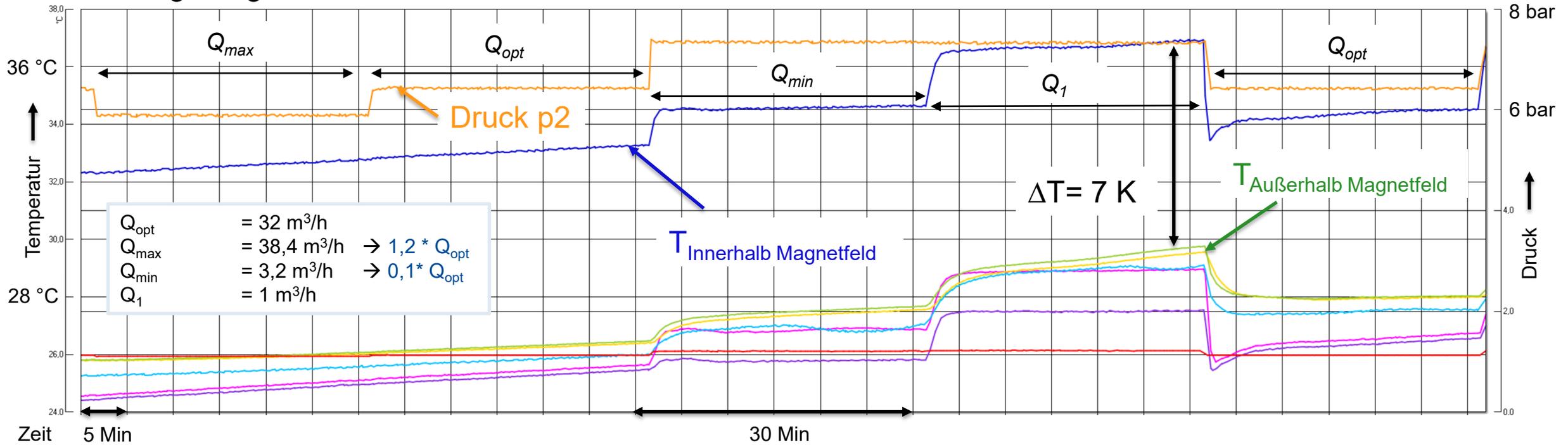
- T1 [°C] Temperatur saugseitige Leitung PT 100
- T2 [°C] Temperatur druckseitige Leitung PT 100
- T3 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 gewickelt
- T6 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 Dünnschicht
- T7 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement TPX
- T8 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement
- p1 [bar] Druck saugseitige Leitung
- p2 [bar] Druck druckseitige Leitung

Fazit:

Bei Unterschreiten Q_{min} ... (siehe Tab.)

- an allen Sensoren geringes & vergleichbares ΔT (< praxisnaher Alarmgrenze)
- Verzögerungszeit PT100 ca. 20 Min

Sensorposition	ΔT	Bereich [°C]	Zeit für ΔT
Außerhalb MF	2,2 K	27,5 – 29,7	22 Min.
Innerhalb MF	2,3 K	34,6 – 36,9	1 Min.



Spalttopf: 2.4610 / Magnet: 13E04



Prüfstandversuche BASF SE

Verstopfen der Kühlkanäle

Wie erfolgt die Simulation?

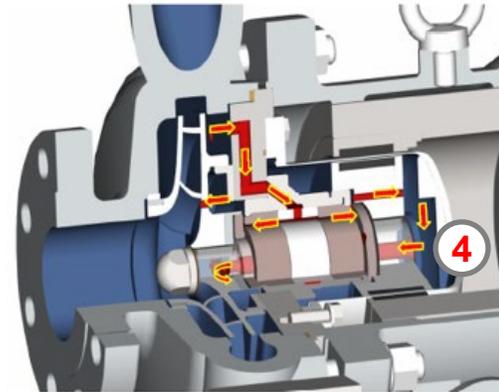
Schritt 1:

- Verschließen des Kühlkanals ④
- Temperaturen bei Betriebspunkt Q_{opt} vergleichen

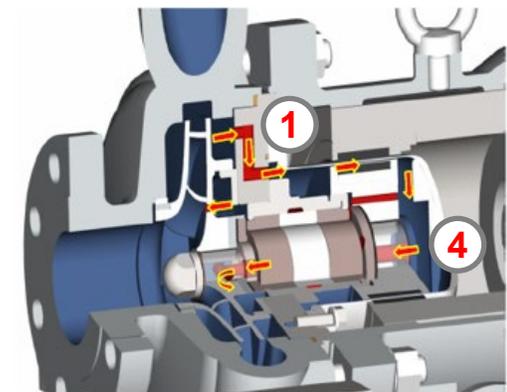
Schritt 2:

- Verschließen der Kühlkanäle ① (zu ca. 85%), ③ und ④
- Temperaturen bei Betriebspunkt Q_{opt} vergleichen

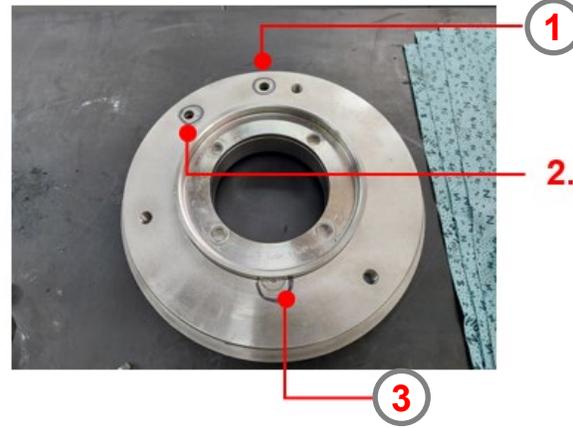
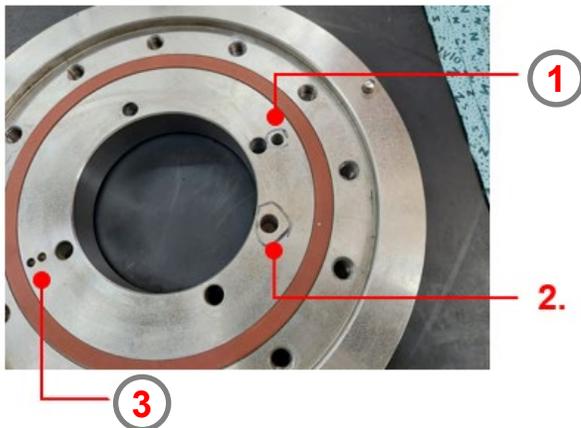
Teilstromführung Gleitlagerung



Teilstromführung Spalttopf



Quelle: Klaus Union GmbH & Co KG



Übersicht Kühlkanäle

- 1 Teilstromführung Spalttopf
- 3 Entleerungsbohrungen
- 4 Teilstromführung Pumpenwelle
- 2 Teilstromführung Gleitlagerung
(bleibt immer offen)

Prüfstandversuche BASF SE

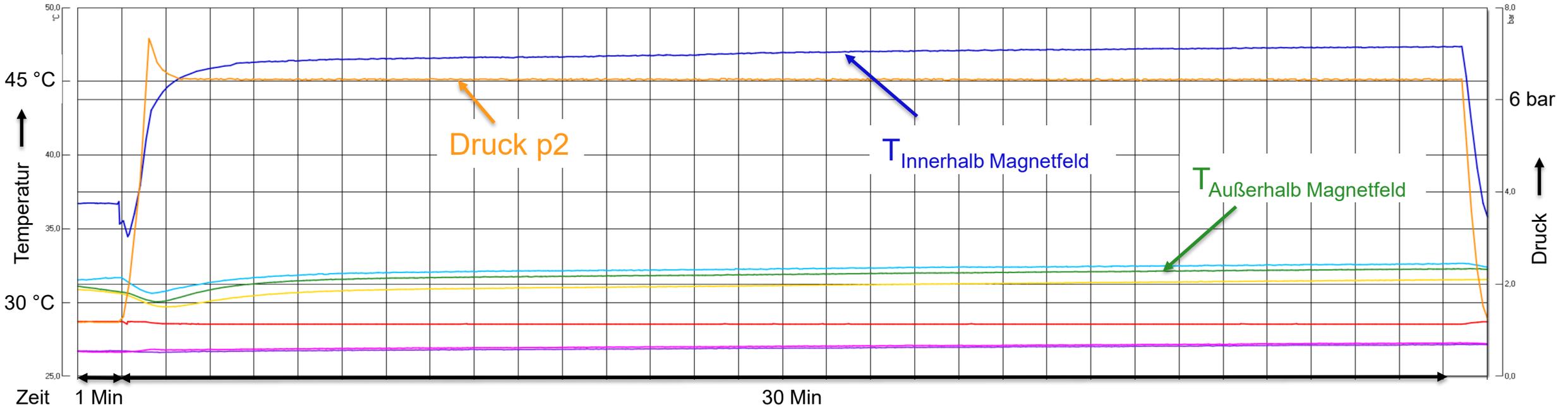
Verstopfen der Kühlkanäle: 30 Min. Betrieb bei Q_{opt}

Fazit:

- Wärmeeintrag in Abhängigkeit zu Magnetgröße
- Alarmgrenze $\Delta T > 5K$ erst bei größerem Magnet 13E04 und nur bei komplett verstopften Bohrungen (1/3/4) erreicht.
(Diagramm unten)

- T1 [°C] Temperatur saugseitige Leitung PT 100
- T2 [°C] Temperatur druckseitige Leitung PT 100
- T3 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 gewickelt
- T4 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 Dünnschicht
- T7 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement TPX
- T8 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement
- p1 [bar] Druck saugseitige Leitung
- p2 [bar] Druck druckseitige Leitung

Sensorposition	Vergleich (offen/geschlossen)	
	ΔT Schritt 1	ΔT Schritt 2
Außerhalb MF	3 K	5 K
Innerhalb MF	6,5 K	12,7 K



Spalttopf: 2.4610 / Magnet: 13E04

Prüfstandversuche BASF SE

Magnetabriss: Laufrad blockiert, Pumpe vor IBN gespült

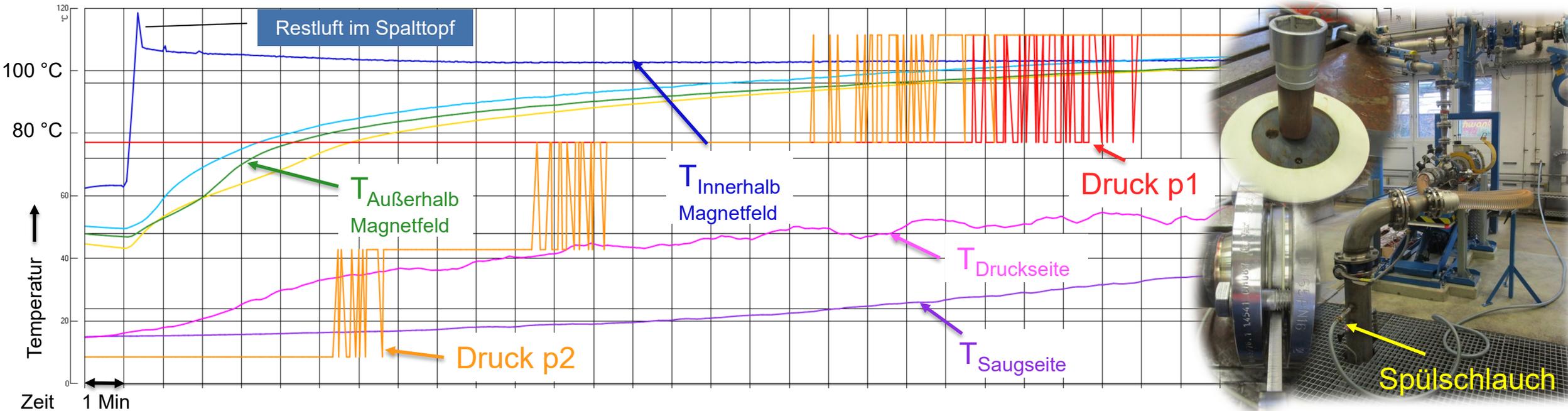
- T1 [°C] Temperatur saugseitige Leitung PT 100
- T2 [°C] Temperatur druckseitige Leitung PT 100
- T3 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 gewickelt
- T4 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 Dünnschicht
- T7 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement TPX
- T8 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement
- p1 [bar] Druck saugseitige Leitung
- p2 [bar] Druck druckseitige Leitung

Fazit:

- ΔT & T_{max} durch alle Sensoren detektiert (=Siedetemperatur, wenn entlüftet)
- Wärmeleitfähigkeit Wasser entscheidend: Im Versuch keine Zirkulation innerhalb Pumpe!

Sensorposition	T_{max} [°C]	ΔT^*	Zeit für $\Delta T +5 K$	Zeit für $\Delta T +10 K$
Außerhalb MF	105	60 K	51 s	90 s
Innerhalb MF	104	40 K	7 s	8 s

* Im System noch Restwärme, daher unterschiedliche Ausgangswerte. Magnetabriss wurde in mehreren Messreihen wiederholt.



Spalttopf: 2.4610 / Magnet: 13E04



Prüfstandversuche BASF SE

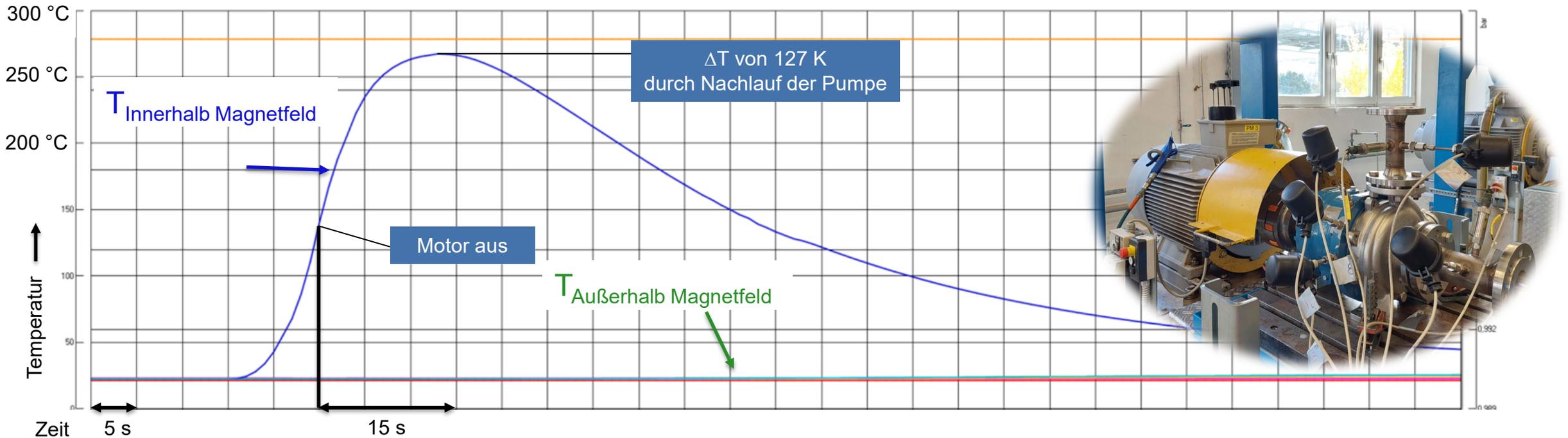
Trockenlauf Nr. 2: Pumpe, trocken, mit 2 kW Verlustleistung

Fazit:

- Hohe Temperaturentwicklung noch beim Auslaufen der Pumpe (Motor bei T7 = 140 °C ausgeschaltet)
- Trotz Abschaltung Temperaturanstieg an Spalttopfoberfläche bis 267 K

- T1 [°C] Temperatur saugseitige Leitung PT 100
- T2 [°C] Temperatur druckseitige Leitung PT 100
- T5 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement
- T6 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 Dünnschicht
- T7 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement
- p2 [bar] Druck druckseitige Leitung

Sensorposition	T Start	T nach 10 s	T nach 23 s
Außerhalb MF	22,6 °C	22,6 °C	22,7 °C
Innerhalb MF	22,3 °C	140 °C	267 °C



Spalttopf: 2.4610 / Magnet: 13E04

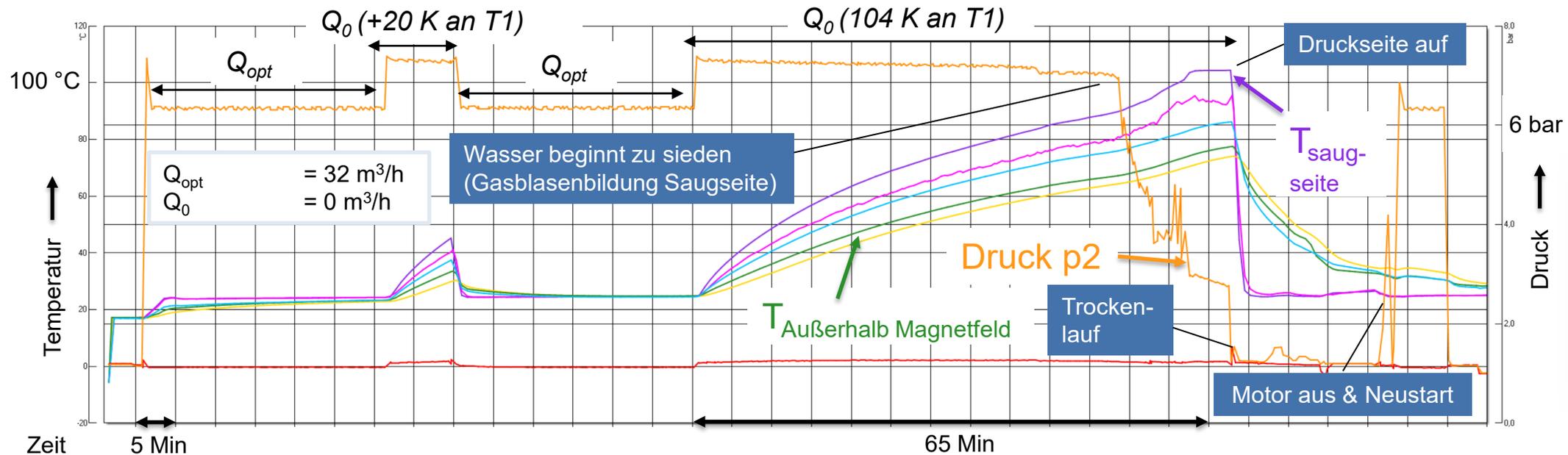
Prüfstandversuche BASF SE

Fazit zu Versuchen mit nicht-metallischem Spalttopf

Fazit:

- Wegfall der Teilstromkühlung durch „Magnetabriss“ oder „Verstopfen der Kühlkanäle“ ist aufgrund der nicht vorhandenen Verlustleistung **nicht detektierbar**
- Unzulässige Erwärmung der Pumpe durch „Unterschreiten der Mindestmenge“ oder „Betrieb gegen geschlossene Druckseite“ **kann mittels PT100 zeitverzögert erkannt werden**
- Sicherheitsvorteil: Maximale Oberflächentemperaturen limitiert auf Siedetemperatur (auch bei Trockenlauf!)

- T1 [°C] Temperatur saugseitige Leitung PT 100
- T2 [°C] Temperatur druckseitige Leitung PT 100
- T3 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 gewickelt
- T4 [°C] Temperatur Spalttopf PT 100 Dünnschicht
- T8 [°C] Temperatur Spalttopf Thermoelement
- p1 [bar] Druck saugseitige Leitung
- p2 [bar] Druck druckseitige Leitung



Spalttopf: ZrO₂ / Magnet: 13E02 / Betrieb gegen geschlossene Druckseite Q₀