



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

# Diplomarbeit

## Redesign und Automatisierung einer Festbett-Regenerator Versuchsanlage zur Speicherung thermischer Energie

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter Anleitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Heimo Walter

und

Dipl.-Ing Michael Hameter

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Physik

von

Manuel Rasinger

0726855



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

# Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am 7. Februar 2017

Manuel Rasinger

## Kurzfassung

Energiespeicher spielen in der Energiewende und in der nachhaltigen Industrie eine bedeutende Rolle. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde ein bereits vorhandener Festbett-Regenerator des Institutes für Energietechnik und Thermodynamik (IET) überarbeitet. Mit der Versuchsanlage kann das Ein- und Ausspeicherverhalten von thermischer Energie in verschiedenen Festbett-Speicherkonzepten untersucht werden.

Dazu wird Umgebungsluft von einem Gebläse angesaugt und mit einem in der Verrohrung befindlichen Heizregister erhitzt. Die so erhaltene heiße Luft wird durch ein in einem Behälter befindlichen Festbett geblasen, um die Wärme an das Speichermedium abzugeben. Nach dem Durchströmen des Festbett-Speichers, strömt die Luft über eine Abluftverrohrung wieder ins Freie. Um den Speicher wieder zu entladen, wird kalte bzw. etwas vorgeheizte Umgebungsluft in Gegenrichtung durch den Speicher geleitet. Die kalte Luft nimmt die thermische Energie des Speichermediums auf. Die so erwärmte Luft kann in der Industrie für weitere Vorgänge verwendet werden. Bei der hier beschriebenen Versuchsanlage strömt die Luft ebenfalls über die Abluftverrohrung ins Freie.

Die wesentlichen Neuerungen an der Anlage wurden an der Verrohrung und an der Steuerung vorgenommen. Die Verrohrung wurde so geändert, dass der Speicher auch mit warmer Luft entladen werden kann. Weiters wurde eine Bypass-Leitung hinzugefügt, welche am Speicher vorbeiführt, um die Messung bei Vorheiz- und Abkühlphasen möglichst wenig zu beeinflussen. Die Anlagensteuerung wurde von einem manuellen Betrieb auf ein modernes SPS Steuerungssystem umgestellt, um Messungen präziser und sicherer durchführen zu können.

In der Arbeit wurde auch eine Erweiterung des vorhandenen Speichers erarbeitet, welche es ermöglichen soll eine Kombination aus sensiblen und latenten Speichermaterialien testen zu können. Neben der Auslegungsrechnung sind auch Konstruktionspläne für dieses Speicherkonzept in der Arbeit zu finden.

## **Abstract**

Due to the energy revolution and the need for sustainable energy sources, energy storage systems are getting more significant. Therefore an existing fixed bed regenerator from the Institute for Energy Systems and Thermodynamics (IET) has been adapted and improved. With the regenerator energy unit it is possible to investigate the charging and discharging behaviour of thermal heat energy of different fixed bed storage concepts.

For that purpose cold ambient air is sucked in by a blower machine and blown through an air heater. The heat provided from the heater is blown through a fixed bed, stored in a container. There the heat from the hot air, is transferred to the storage medium which in this case is a swell of broken rocks. After the hot air has been blown through the fixed bed, the yet colder air is blown into the environment through an exhaust pipe. To discharge the storage again, cold air is sucked in with the blower-machine and transferred through the fixed bed from the opposite direction through the storage container. After the cold air adopted the heat from the fixed bed, the warm air can be used for further industrial processes. In the case of this testing facility the air is blown into the environment again.

The main improvements on this testing facility, is made on the tubing and the machine control. The tubing has been adapted so that it is also possible to discharge the storage with pre-heated air from the air heater. Furthermore a bypass tube has been installed which bypasses the container. With this improvement the measurements should not be negatively affected in stages where the machine is preheating or cooling down. The unit is now controlled by a modern SPS controlling system from B&R, to achieve more precise results and make the testing facility safer.

Additionally an extension of the storage container has been developed in this thesis. The extension makes it possible to use a combination of sensible and latent storage mediums. Beside the calculations for the storage extension, construction plans can be found in this thesis.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Entwicklung des weltweiten Energiebedarfs . . . . .	1
1.2	Technologien der Energiespeichersysteme . . . . .	3
1.3	Thermische Energiespeichersysteme . . . . .	5
1.4	Ziel und Umfang der Diplomarbeit . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Überarbeitung des bestehenden Anlagenkonzeptes</b>	<b>8</b>
2.1	Überarbeitung der Verrohrung . . . . .	8
2.1.1	R&I-Verfahrensfließschema . . . . .	8
2.1.2	Weitere Verbesserungen am Festbett-Regenerator . . . . .	11
2.2	Behälterkonzept mit Latentmedium-Erweiterung . . . . .	15
2.2.1	R&I-Verfahrensfließschema . . . . .	16
2.2.2	Auslegung PCM-Erweiterung . . . . .	17
2.2.3	Diskussion und Ergebnisse der PCM-Erweiterung . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Anlagenbeschreibung und Aufbau</b>	<b>22</b>
3.1	Hauptabmessungen der Anlage . . . . .	24
3.2	Beschreibung der wichtigsten Anlagenkomponenten . . . . .	25
3.2.1	Gebälse . . . . .	25
3.2.2	Luftheizregister . . . . .	26
3.2.3	Behälter . . . . .	27
3.2.4	Speicherinventar . . . . .	28
3.2.5	Isolierung . . . . .	29
3.2.6	Dichtungen . . . . .	30
3.3	Betriebszustände des Festbett-Regenerators . . . . .	31

3.3.1	Betriebszustand: LADEN . . . . .	31
3.3.2	Betriebszustand: ENTLADEN . . . . .	31
3.3.3	Betriebszustand: BYPASS . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Anlagensteuerung und Messtechnik</b>	<b>33</b>
4.1	Messtechnik . . . . .	33
4.1.1	Kalibrierung der Thermoelemente . . . . .	34
4.1.2	Kalibrierung der Drucksensoren . . . . .	35
4.1.3	Massendurchflusssensor . . . . .	38
4.1.4	Außensensor: Temperatur und Luftfeuchtigkeit . . . . .	40
4.2	Anlagensteuerung . . . . .	41
4.2.1	Aufbau der Steuerung . . . . .	42
4.2.2	Zu steuernde Komponenten . . . . .	45
4.2.3	Hartverdrahtete Anlagen-Sicherheit . . . . .	48
4.3	Steuerungssoftware . . . . .	51
4.3.1	Softwareseitige Sicherheit . . . . .	51
4.3.2	Datenaufzeichnung . . . . .	54
4.3.3	Temperatur-gesteuerter Messungsmodus . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Anlagen Spezifikationen</b>	<b>58</b>
5.1	Druck am Gebläsestutzen . . . . .	58
5.2	Druckabfall an der Festbettschüttung . . . . .	59
5.3	Maximale Vorlauftemperatur am Bypass . . . . .	59
5.4	Vorheizen des Luftheizregister . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Messreihen</b>	<b>62</b>
6.1	Referenzmessung TU290-TO50 . . . . .	63
6.1.1	Massenstrom . . . . .	64

6.1.2	Temperaturverteilung . . . . .	65
6.1.3	Auswertung des eingeschwungenen Zyklus . . . . .	67
6.2	Variation des Massenstromes . . . . .	70
6.2.1	Temperaturverteilung . . . . .	71
6.2.2	Energie und Leistung . . . . .	73
6.2.3	Zusammenfassung und weiterführende Versuche . . . . .	75
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>77</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>78</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>82</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>84</b>
<b>A</b>	<b>R&amp;I Fließschema</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Konstruktionspläne</b>	<b>IV</b>
<b>C</b>	<b>Berechnungen</b>	<b>XII</b>
<b>D</b>	<b>Kalibriertabellen</b>	<b>XXIII</b>
<b>E</b>	<b>Datenblätter</b>	<b>XXVII</b>
<b>F</b>	<b>Programmstruktur</b>	<b>XXXVII</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
B&R	Bernecker + Rainer
CPU	Central Processing Unit
FBR	Festbett-Regenerator
FU	Frequenzumrichter
PCM	Phase Change Material
r.F.	relative Feuchtigkeit
R&I	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TES	Thermische Energiespeicher
TU	Technische Universität

## Formelzeichenverzeichnis

### Lateinische Zeichen

Zeichen	Wert	Einheit	Bedeutung
$A$	-	$m^2$	Fläche
$c_p$	-	$J/(K \cdot kg)$	spezifische Wärmekapazität
$d$	-	mm	Durchmesser
$dl$	-	mm	Längenänderung
$dk$	-	mm	wirksamer Reibungsdurchmesser
$E$	-	Pa	Elastizitätsmodul
$F$	-	N	Kraft
$l$	-	mm	Länge
$M$	-	$N \cdot m$	Drehmoment
$m$	-	kg	Masse
$\dot{m}$	-	kg/h	Massenstrom
$Mol$	-	g/mol	Molmasse
$P$	-	mm	Gewindesteigung
$p_d$	-	Pa	Sättigungsdampfdruck von Wasser in Luft
$P_{entladen}$	-	kW	Leistung vom Heizregister beim Entladevorgang
$P_{laden}$	-	kW	Leistung vom Heizregister beim Ladevorgang
$p$	-	Pa	Druck

(wird fortgesetzt)

Zeichen	Wert	Einheit	Bedeutung
$Q$	-	J	Wärme
$q$	-	mbar·l/s	Leckagerate
$R$	8,3144	J/(mol·K)	Gaskonstante
$R_d$	461,523	J/(mol·K)	Gaskonstante von Wasserdampf
$R_f$	-	J/(mol·K)	Gaskonstante für feuchte Luft
$R_l$	287,058	J/(kg·K)	Gaskonstante der trockenen Luft
$Re$	-	-	Reynolds-Zahl
$T$	-	°C	Temperatur
$t$	-	s	Zeit
$V$	-	m <sup>3</sup>	Volumen
$\dot{V}$	-	m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom

## Griechische Zeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	1/K	thermischer Ausdehnungskoeffizient
$\epsilon$	-	Dehnung
$\zeta$	-	Druckverlustbeiwert
$\eta$	Pa·s	dynamische Viskosität
$\eta_{\text{nutz}}$	-	Nutzungsgrad
$\lambda$	W/m-K	Wärmeleitfähigkeit
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematische Viskosität
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\rho_{\text{LF}}$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte von feuchter Luft
$\sigma$	Pa	Spannung
$\sigma_y$	Pa	Streckgrenze
$\varphi$	%	relative Luftfeuchtigkeit
$\omega$	m/s	Strömungsgeschwindigkeit

# 1 Einleitung

Energie, wie Strom und Wärme, wird sowohl in der Industrie, als auch im öffentlichen und privaten Bereich benötigt. Die Energiebereitstellung muss sich an den variierenden Verbrauch anpassen, um ein stabiles Stromnetz gewährleisten zu können. Durch die Energiewende, dem Übergang von fossilen Energieträgern zu regenerativen Energiequellen, gibt es auch Schwankungen in der Energieproduktion, die sich nicht an den Verbrauch anpassen. Der Einsatz von Energiespeichersystemen kann dieser Problematik entgegenwirken.

## 1.1 Entwicklung des weltweiten Energiebedarfs

Aufgrund der steigenden Bevölkerungszahlen, der technischen Errungenschaften und des höheren Lebensstandards, steigt der Energieverbrauch weltweit immer weiter und schneller an. Wie Abbildung 1.1 veranschaulicht, nimmt dieser vor allem seit 1950 dramatisch zu.

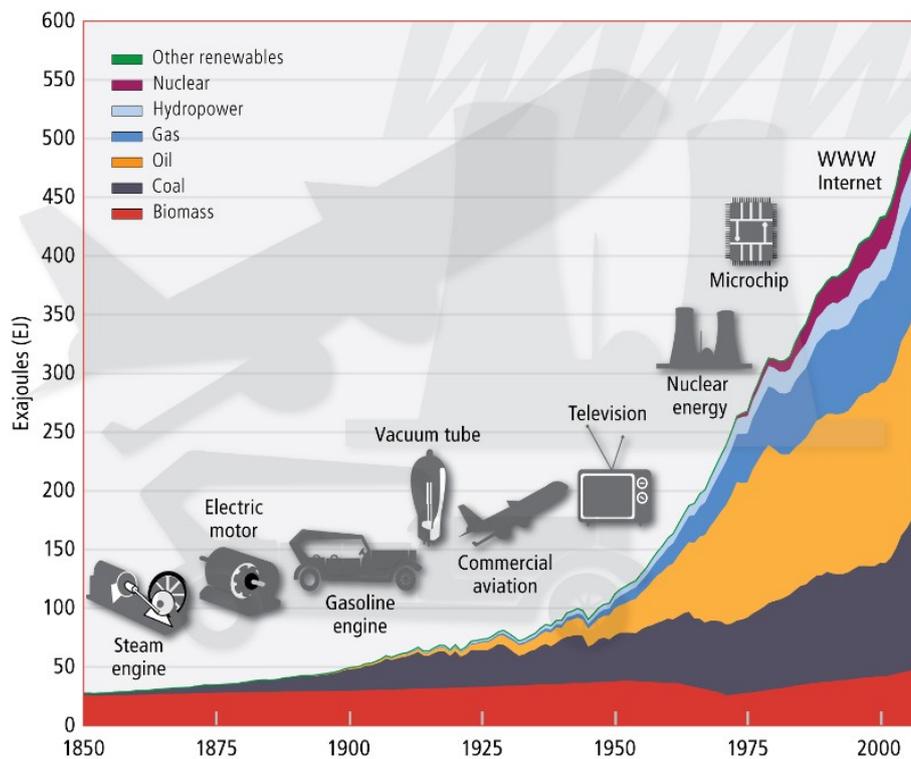


Abb. 1.1: Entwicklung des weltweiten Energiebedarfs (WBGU [1])

Dieser Anstieg lässt sich auf die wachsende Mobilität, die technischen Errungenschaften

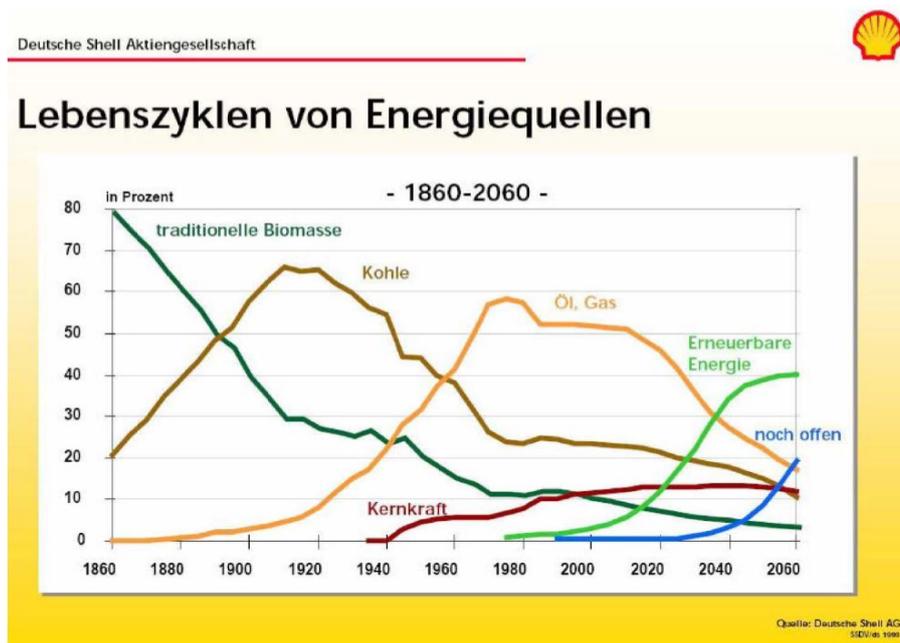


Abb. 1.2: Lebenszyklen von Energiequellen, Quelle: Deutsche Shell AG

sowie die steigende Produktionsmenge von Energieverbrauchern zurückführen. Wie in Abbildung 1.2 zu erkennen ist, basierte die Weltenergieversorgung der vorindustriellen Gesellschaften weitgehend auf erneuerbaren Energieträgern. Die wichtigsten Energieträger zur Bereitstellung von Wärme zu dieser Zeit waren Holz und Dung. Wasserkraft und Windenergie wurden in Mühlen bereits technisch genutzt. Energieträger, wie Erdöl, haben in dieser Zeit kaum eine Rolle gespielt. Anfang des 20. Jahrhunderts deckte Kohle den größten Teil des Energiebedarfs. Nach der Weltwirtschaftskrise stieg der Energieverbrauch sprunghaft an und Energieträger, wie Erdöl und Erdgas, gewannen immer mehr an Bedeutung. Nach dem 2. Weltkrieg begann auch die kommerzielle Nutzung der Kernenergie. Alle nicht regenerativen Energiequellen, wie Erdöl, Erdgas, Kohle und Kernenergie, sind jedoch endlich und müssen früher oder später durch andere Quellen ersetzt werden. Abbildung 1.3 zeigt das Volumen der bekannten Energievorräte sowie das jährlich regenerative Energieangebot. Ein Umstieg auf regenerative Energiequellen ist somit, nicht nur aus Umweltschutzgründen, unvermeidbar (Sterner [2], Kapitel 1). Daraus ergeben sich ganz neue Anforderungen an das bereits vorhandene Energienetz. Mit dem Umstieg auf erneuerbare Energiequellen wird die Energieerzeugung nicht mehr wie bisher in wenigen großen Kraftwerken stattfinden, sondern muss immer mehr dezentralisiert werden, da die regenerativen Quellen nicht überall und zu jedem Zeitpunkt verfügbar sind und in der heutigen modernen Gesellschaft eine unterbrechungsfreie Stromversorgung nicht mehr wegzudenken ist. Regenerative Energiequellen, wie Sonnen- und Windenergie, können aber nicht Energie nach Bedarf liefern. In Phasen

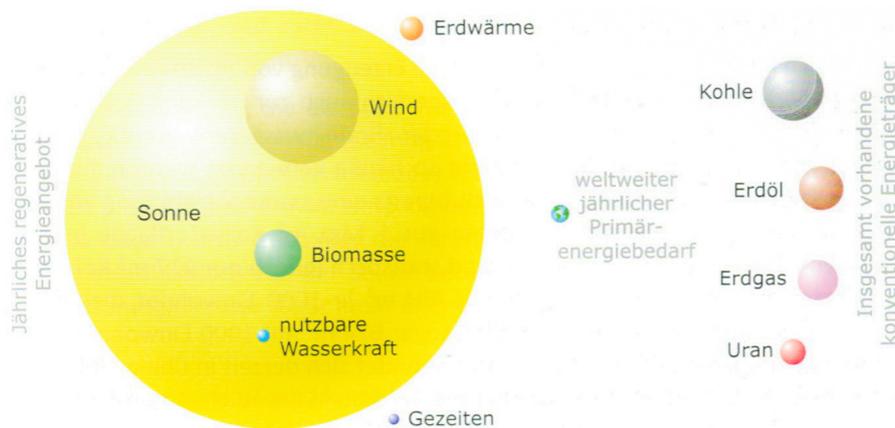


Abb. 1.3: Energiekugeln. Die jährliche Sonneneinstrahlung übertrifft den Energieverbrauch und sämtliche Energiereserven um ein Vielfaches (Quaschnig [3], Kapitel 1)

von Energieüberschuss muss diese gespeichert werden, um bei Energiemangel, wie zum Beispiel in der Nacht, in der keine Sonnenenergie verfügbar ist, die gespeicherte Energie wieder nutzen zu können. Vorhandene Speichersysteme, wie Pumpspeicherkraftwerke, können nicht weiter ausgebaut werden, da sie einerseits von der Topologie und andererseits von der Zustimmung der Bevölkerung abhängig sind. Die Entwicklung von neuen Energiespeichersystemen, die unabhängig von örtlichen Gegebenheiten sind, bekommt somit eine immer größere Bedeutung.

## 1.2 Technologien der Energiespeichersysteme

Ein Energiespeicher ist eine energietechnische Einrichtung, welche die drei folgenden Prozesse beinhaltet: **Einspeichern** (Laden), **Speichern** und **Ausspeichern** (Entladen). (Sterner [2], Kapitel 2)

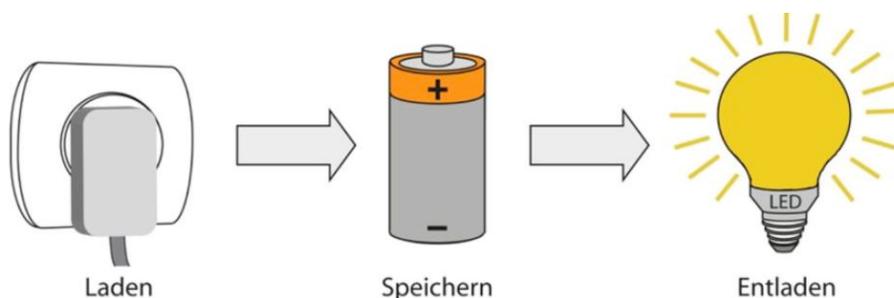


Abb. 1.4: Definition eines Energiespeichers (Sterner [2], Kapitel 2)

Klassifiziert werden Energiespeicher nach der Art der Energie, wie in Tab. 1.1 ersichtlich. Beim Auf- bzw. Entladen wird oft eine abweichende Energieform verwendet. So wird beim Beladen eines Pumpspeicherkraftwerks Strom über eine Pumpe in mechanische Energie umgewandelt und in weiterer Folge als potentielle Energie gespeichert. Beim Entladen wird die potentielle Energie über die Turbine und den Generator wieder in elektrische Energie umgewandelt.

Speicherklasse		Technologie
Chemische Energie	anorganisch	galvanische Zelle, Redox-Flow-Batterie
	organisch	Glykogen, chemische Wasserstoffspeicher
Elektrische Energie		Kondensator, Spule
Thermische Energie		sensible Wärmespeicher, Latentwärmespeicher, Thermochemische Wärmespeicher
Mechanische Energie	potentielle Energie	Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Federenergiespeicher
	kinetische Energie	Schwungmassenspeicher

Tab. 1.1: Klassifizierung der Energiespeichersysteme nach gespeicherter Energieform (Sterner [2], Kapitel 12)

Eine weitere Möglichkeit Energiespeicher zu klassifizieren ist die Einteilung in ihre Eigenschaften und Einsatzgebiete (Tab. 1.2).

physikalisch	energetisch	zeitlich	räumlich	ökonomisch
elektrisch	Leistung	kurzzeit	zentral	Märkte
elektrochemisch / chemisch	Energie	langzeit	dezentral	Kapitalkosten
mechanisch			ortsfest	Betriebskosten
thermisch			mobil	

Tab. 1.2: Klassifizierung der Energiespeichersysteme nach Eigenschaft (Sterner [2], Kapitel 12)

In Abbildung 1.5 ist ein Vergleich verschiedener Speichertechnologien und ihrer Anwendungsbereiche zu sehen. Hier zeigt sich, dass thermische Speicheranlagen für eine mittlere Speicherdauer geeignet sind.

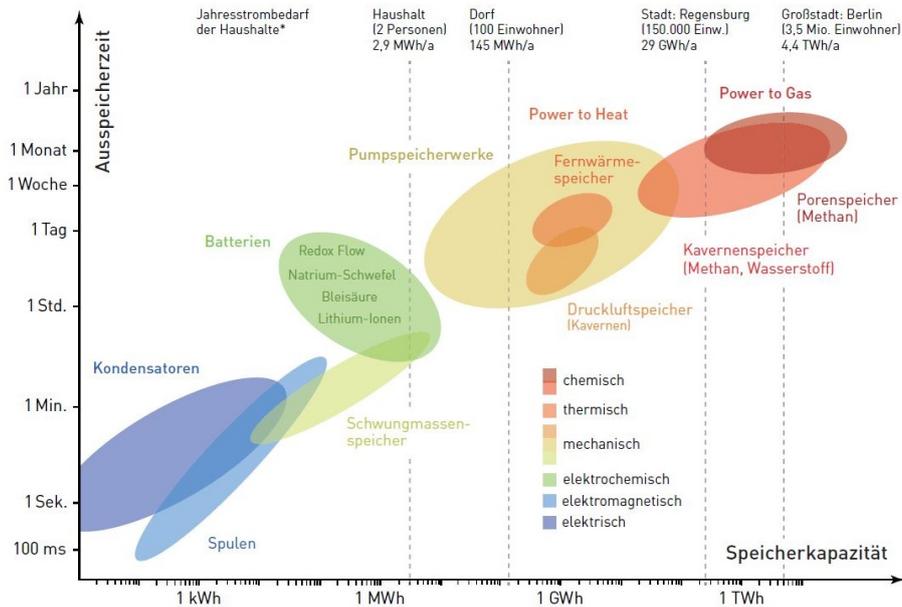


Abb. 1.5: Speicherarten im Vergleich nach Speicherkapazität und Ausspeicherdauer (Sterner [2], Kapitel 12)

### 1.3 Thermische Energiespeichersysteme

Anwendung finden thermische Speichersysteme je nach Anforderung und Technologie zum Beispiel in solarthermischen Kraftwerken, der Stahl- und Glasindustrie, Druckluftspeicherung und als Pufferspeicher in Heizungsanlagen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen drei Arten von Wärmespeichern: (siehe auch Abbildung 1.6)

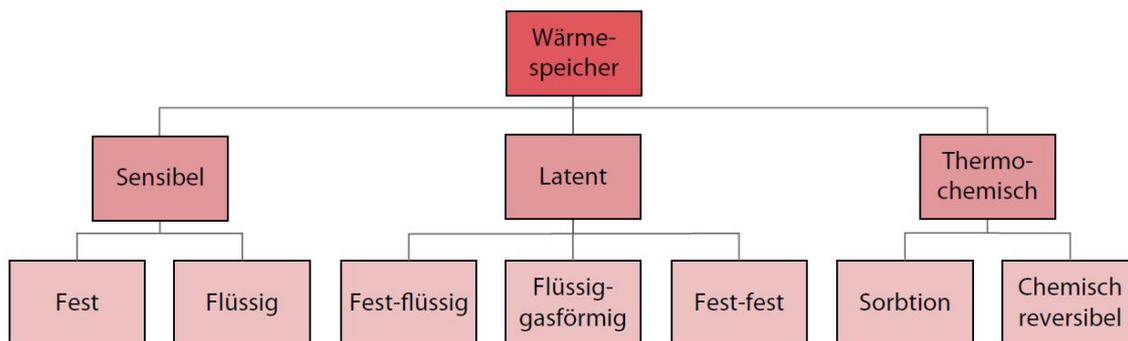


Abb. 1.6: Klassifizierung der thermischen Energiespeicher (Sterner [2], Kapitel 10)

**Sensible Wärmespeicher** verändern beim Laden und Entladen ihre fühlbare Temperatur. Die Energiemenge, die gespeichert werden kann, hängt von der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  des eingesetzten Speichermediums ab (Abbildung 1.7).

**Latente Wärmespeicher** speichern zusätzlich zur sensiblen Wärme auch in den Phasenübergang von sogenannten *Phase Change Materials* (PCM). Meist wird der Phasenübergang fest-flüssig gewählt, da bei diesem Übergang die Volumsänderung unter 10 % liegt und somit das System leichter technisch realisierbar ist (Abbildung 1.7).

**Thermochemische Wärmespeicher** speichern ihre Energie in chemisch reversiblen Reaktionen. Die Reaktionsprodukte werden voneinander getrennt und können somit über eine lange Periode gespeichert werden. Beim Entladen wird die Wärme wieder über eine exotherme Reaktion zurückgewonnen. Hier können sehr hohe Energiedichten erreicht werden.

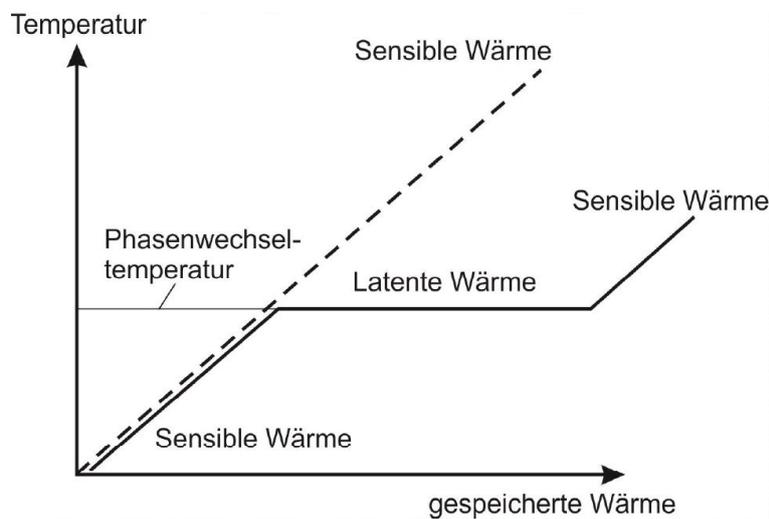


Abb. 1.7: Vgl. sensible und latente Wärmespeicherung. Gespeicherte Wärmemenge in Abhängigkeit von der Temperatur

## 1.4 Ziel und Umfang der Diplomarbeit

Im Zuge dieser Diplomarbeit soll der bestehende Festbett-Regenerator der TU Wien - Institut für Energietechnik und Thermodynamik, welcher im Rahmen der Arbeit von Drochter [4] errichtet wurde, umgebaut und automatisiert werden. Der Regenerator soll wie bisher für eine Betriebstemperatur von über 300 °C ausgelegt sein. Die Komponenten der Anlage müssen somit im thermisch belasteten Bereich wie bisher auf eine Temperatur von mindestens 300 °C ausgelegt sein.

Für die Überarbeitung des Festbett-Regenerators wurden einerseits bekannte Mängel von vorhergehenden Messungen behoben und andererseits Verbesserungen vorgenommen, welche einen flexibleren Betrieb der Anlage erlauben sollen.

Die Anforderungen an die neu gestaltete Versuchsanlage sind in Tabelle 1.3 aufgelistet.

Anforderung	Beschreibung
Warmentladung	Die Verrohrung der Anlage soll so umgestaltet werden, sodass auch eine Entladung des Speichers mit vorgeheizter Luft aus dem Heizregister möglich ist.
Bypass	Eine Bypass-Leitung soll bei Vorheiz- und Abkühlvorgängen ein Beeinflussen der Messung am Speicher verhindern.
Automatisierung	Ein Steuerungssystem mit einer SPS soll einen unbeaufsichtigten Betrieb der Anlage ermöglichen.
PCM-Erweiterung	Auslegung und Konstruktion einer Behältererweiterung, um ein kombiniertes Speicherkonzept von sensiblen und latenten Materialien messen zu können.

Tab. 1.3: Anforderungen an die neue Versuchsanlage

## 2 Überarbeitung des bestehenden Anlagenkonzeptes

Im folgenden Kapitel wird die Planung und Überarbeitung des Festbett-Regenerators vorgestellt. Zum einen wurde ein neues Konzept für die Anlagenverrohrung und zum anderen für den Behälter erstellt, welche hier separat beschrieben werden.

### 2.1 Überarbeitung der Verrohrung

Die zwei Hauptanforderungen (vgl. Tabelle 1.3) an das überarbeitete Anlagenkonzept sind zum einen die Möglichkeit den Speicher mit vorgeheizter Luft, welche im Luftheizregister erwärmt wird, entladen zu können und zum anderen eine Bypass-Leitung, welche es erlaubt, den Luftstrom in der Verrohrung am Speicher vorbeizuführen. Die Bypass-Leitung soll bei Vorheiz- bzw. Abkühlphasen des Heizregisters und der Leitungen den Einfluss auf die Messung im Speicher verringern. Mit den Änderungen an den Rohrleitungen muss auch die vorhandene Messtechnik angepasst und für einen automatisierten Betrieb optimiert werden.

Weiters wurden Mängel an der Anlage behoben, welche während der vorangegangenen Messkampagnen aufgefallen sind. Das waren zum Beispiel lockere Schraubverbindungen bei den Absperrklappen, verkehrt montierte Absperrklappen oder die Verbesserung der Messstrecke für eine genauere Massenstrommessung.

#### 2.1.1 R&I-Verfahrensfließschema

Das R&I-Verfahrensfließschema (Abbildung 2.1) soll einen Überblick über das neue Konzept der Verrohrung und deren Messtechnik geben. Eine größere Ansicht mit Legende ist im Anhang A, Seite II zu finden.

Im Fließschema sind neben den Absperrklappen, welche den Luftstrom steuern, alle verbauten Sensoren und deren Messstellen eingezeichnet. Die Beschreibung des Sensoren sind aus der Legende im Anhang A des Fließschemas zu entnehmen.

Das Ursprüngliche Fließschema, welches von Drochter [4] erstellt wurde, ist in Abbildung 2.2 zu sehen. Bei dem Fließschema sind nicht alle Sensoren eingezeichnet, man kann aber gut die Änderungen an der Verrohrung sehen.



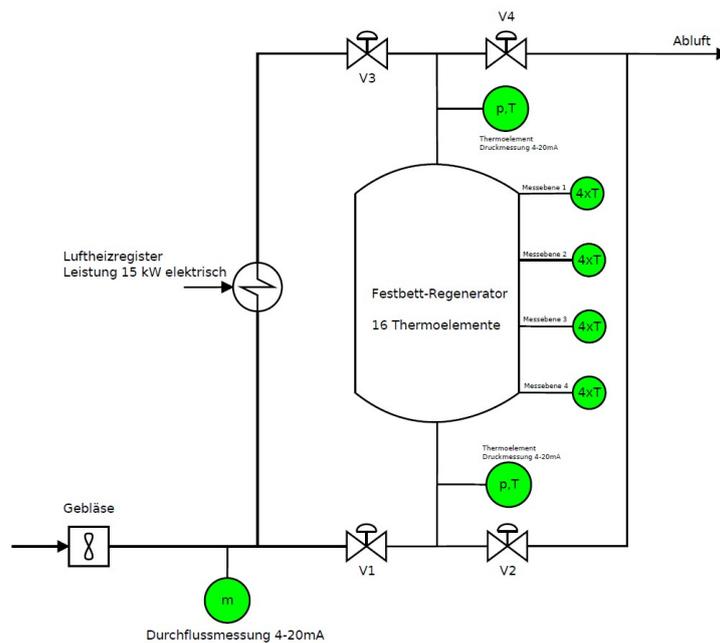


Abb. 2.2: Originales Verfahrensfliesschema. Quelle: Drochter [4] (Detail siehe Anhang A.1, Seite: I)

Änderung	Beschreibung
Warmentladung	Die Verrohrung wurde so abgeändert, dass auch beim Entladen die Luft durch das Luftheizregister strömt.
Bypass-Leitung	Um bei Vorheiz- und Abkühlphasen des Luftheizregisters die Messung der Speichertemperatur möglichst wenig zu beeinflussen, wurde eine Bypass-Leitung hinzugefügt. Zum Absperren dieser Leitung wurde eine Absperrklappe (V5) implementiert.
Verschiebung der Absperrklappen V1 und V3	Die Absperrklappen V1 und V3 wurden in der Verrohrung so versetzt, dass der Abstand zum Vorlauf- bzw. Rücklauffühler (PT02 bzw. PT01) möglichst groß ist. Das soll bei geschlossener Klappenposition eine unerwünschte Beeinflussung der Messung, durch die Wärmeleitung über die Rohrleitungen, verhindern.

Tab. 2.1: Änderungen an der Anlagenverrohrung

Hinzugefügt	R&I	Beschreibung
Außenfühler - Temperatur	TAS	Der Außentemperaturfühler misst die Temperatur der vom Gebläse angesaugten Umgebungsluft.
Außenfühler - relative Luftfeuchtigkeit	phiAS	Der Außenluftfeuchtigkeitsfühler misst die relative Luftfeuchtigkeit der angesaugten Luft.
Relativdrucksensor	p03	Der Relativdrucksensor misst den Druck am Auslassstutzen des Gebläses.
Strömungswächter	p04-p05	Der Strömungswächter misst die Druckdifferenz zwischen Ansaugstutzen und dem Ende der Messstrecke. Bei einem zu geringen Druckabfall über die Messstrecke schaltet der Strömungswächter den Leistungsthyristor stromlos.
Zweiter Temperaturfühler Heizregister	THR2	Zur redundanten Temperaturüberwachung des Heizregisters wurde ein zweiter Temperaturfühler hinzugefügt.
Bypass-Temperaturfühler	PT03	Der Temperaturfühler misst die Lufttemperatur im Bypass-Rohr.

Tab. 2.2: Hinzugefügte Messtechnik am Festbett-Regenerator. Die gelb hinterlegten Sensoren dienen der Sicherheitsüberwachung der Anlage.

### 2.1.2 Weitere Verbesserungen am Festbett-Regenerator

Bei vorangegangenen Messungen am Regenerator, welche von Drochter [4] und Michalka [5] durchgeführt wurden, sind kleinere Mängel an der Anlage aufgefallen, die beim Umbau behoben wurden. Nachfolgend sind die durchgeführten Verbesserungen an der Anlage genauer beschrieben.

**Messstrecke für Massendurchflussmessung:** Um zuverlässige Messergebnisse vom Massenstromsensor zu erhalten, gibt der Hersteller vor, was bei der Montage des Sensors zu beachten ist. Wichtig hierbei ist, dass im Messbereich keine Turbulenzen auftreten.

Um die Turbulenzen im Messbereich möglichst gering zu halten, muss die Länge der Ein- und Auslaufstrecke lang genug dimensioniert sein (Abbildung 2.3). Die Beruhigungsstrecke vor dem Sensor wurde von  $15 \times \text{DN}$  auf ca.  $40 \times \text{DN}$ , was 2 m entspricht, verlängert. Die Länge wurde deshalb so gewählt, da sich vor der Beruhigungsstrecke neben einer Reduzierung auch ein Bogen befindet.

Die Auslaufstrecke vom Massendurchflusssensor wurde ebenfalls mit ca.  $10 \times \text{DN}$ , was 0,5 m entspricht, großzügiger dimensioniert, als vom Hersteller vorgegeben ist.

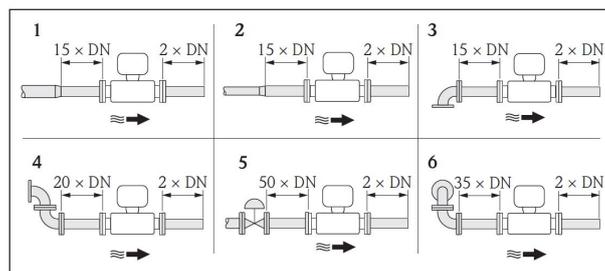


Abb. 2.3: Empfohlene Länge der Ein- und Auslaufstrecke beim Massendurchflusssensor (Quelle: Handbuch t-mass A 150)

Damit keine Turbulenzen an den Flanschverbindungen des Massendurchflusssensors entstehen, müssen diese korrekt durchgeführt sein (Abbildung 2.4). Die Strömung darf nicht durch ins Rohr ragende Schweißnähte oder Dichtungen gestört werden.

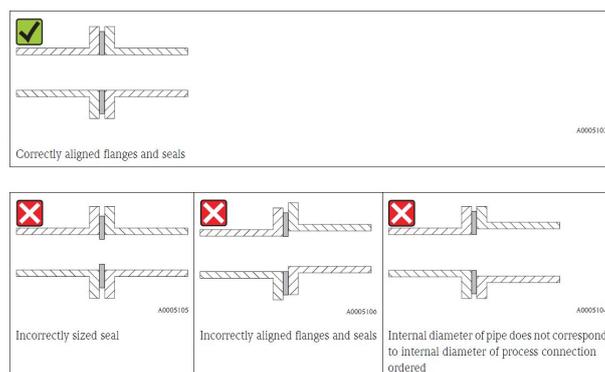


Abb. 2.4: Korrekt ausgeführte Flanschverbindung beim Massendurchflusssensor (Quelle: Handbuch t-mass A 150)

Um das bestmöglich zu erreichen wurden Flansche gefertigt, an denen das Rohr von außen angeschweißt werden kann. Weiters haben die Flansche eine Zentriernut, welche das Verrutschen der Dichtung bei der Montage verhindert (Abbildung 2.5). Der Konstruktionsplan für den Flansch ist im Anhang B, Seite V zu finden.

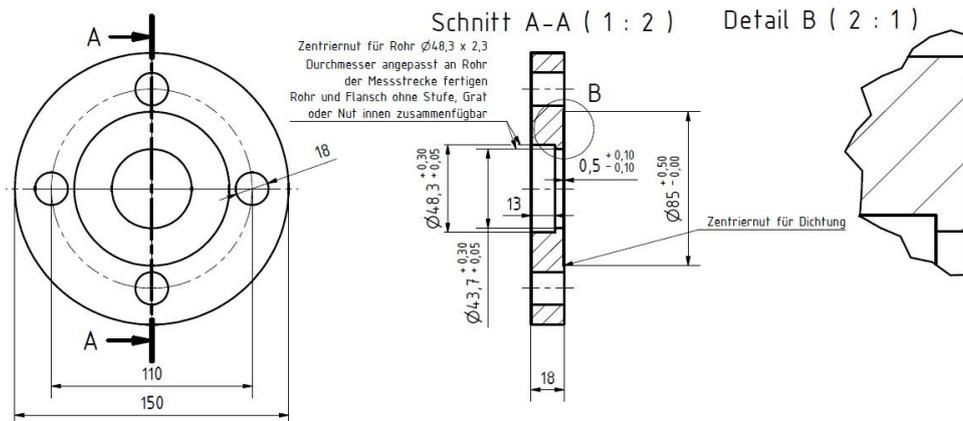


Abb. 2.5: Flansch für die Anbindung an den Massenstromsensor

**Die Schraubverbindungen** am gesamten Festbett-Regenerator vor dem Umbau, wurden mit verzinkten Stahlschrauben der Festigkeitsklasse 8.8 durchgeführt. Bei den Schraubverbindungen, welche sich an thermisch belasteten Stellen befunden haben, hat sich die Zinkschicht gelöst und sie waren dadurch auch teilweise schwieriger zu lösen. Diese wurden durch blanke Stahlschrauben ohne Verzinkung der Festigkeitsklasse 8.8 ersetzt. Sie besitzen eine geringere Beständigkeit gegen Korrosion, auf die aber verzichtet werden kann, da sich die Schraubverbindung an gut isolierten Stellen befinden und damit keine Korrosionsgefahr besteht.

Die Absperrklappen werden mit Schraubverbindungen zwischen zwei Flansche geklemmt (Abbildung 2.6). Da sich die Materialien thermisch unterschiedlich ausdehnen (Tabelle 2.3) und die Anlage großen Temperaturschwankungen von bis zu 300 K ausgesetzt ist, hatten sich die Schraubverbindungen bei den Absperrklappen gelockert.

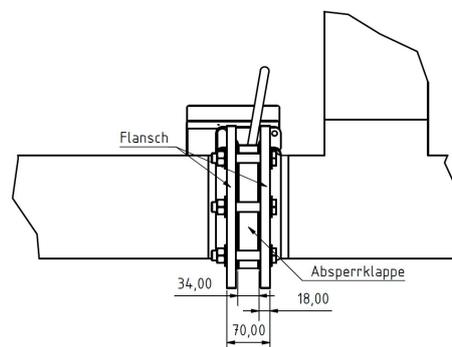


Abb. 2.6: Montierte Absperrklappe mit Schraubverbindungen (ohne Dichtung)

Komponente	Material	$\alpha$ in $10^{-6} \cdot K^{-1}$
Flansch	P235	14,1
Klappe	GG40 alpha	12,5
Dichtung	Graphit	1,9
Dehnschraube	C35(1.1181)	13,9

Tab. 2.3: Thermischer Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  der Komponenten für Klappenmontage

Um ein erneutes Lockern der Verbindungen bei den Absperrklappen zu verhindern, wurde die Verbindung mit Dehnschrauben (Abbildung 2.7, Tabelle 2.4) ersetzt. Diese dehnen sich nur im dünneren Schraubenschaft und nicht im Gewinde, womit sie annähernd die gleiche Vorspannung über die gesamte Zeit behalten.

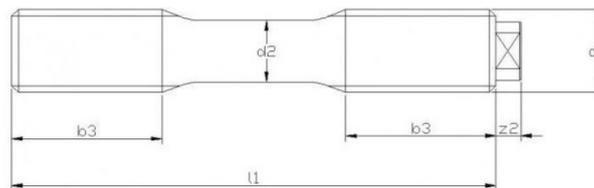


Abb. 2.7: Schraube mit Dehnschaft für Klappenmontage - DIN 2510 Form Z

Gewinde (d1)	d2	d3	b3	z1	l1
M16	12	12	31	2	120

Tab. 2.4: Maßtabelle der verwendeten Dehnschrauben in [mm] - DIN 2510 Form Z

Um eine dichte Verbindung unter Berücksichtigung der maximalen Ausdehnung bei 330 °C der Komponenten zu erhalten, muss die Verbindung mit einem minimalen Drehmoment von **70 Nm** angezogen werden. Um die Schraube nicht zu beschädigen, darf sie jedoch nur mit maximal **111 Nm** angezogen werden. Die Schraubenverbindung mit den Dehnschrauben wurde mit **90 Nm** angezogen. Eine detaillierte Berechnung zum Anzugdrehmoment nach [6] befindet sich im Anhang C, Seite XIII.

**Dichtheitsmessung:** Um bestmögliche Messergebnisse erzielen zu können, muss der Festbett-Regenerator eine möglichst geringe Leckrate aufweisen. Um das zu erreichen, wurden alle Verbindungen und Schweißnähte mit einem Lecksuchspray überprüft und mit entsprechenden Maßnahmen, wie zum Beispiel stärkeren Anziehen der Schrauben,

abgedichtet. Undichte Stellen wies die Anlage noch im Bereich der Behälter-Flanschverbindungen und dem Heizregister auf. Diese Stellen konnten nicht durch Anziehen der Schraubverbindungen gedichtet werden. Da sich diese Stellen an thermisch belasteten Stellen befinden, wurden sie mit einem hochhitzefesten Dichtungskleber (Abbildung 2.8) der Firma *Ufalux* gedichtet.



Abb. 2.8: Ufalux hochhitzeester Dichtungskleber bis ca. 500 °C

Die Leckrate wurde anschließend gemessen und daraus der Massenverlust pro Stunde über die ideale Gasgleichung berechnet (siehe Anhang C, Seite XV). Der Massenverlust von Luft entspricht je nach Anfangsdruck zwischen 20 g/h und 60 g/h, was bei einem Massenstrom von 100 kg/h weniger als 1 % ausmacht und somit als vernachlässigbar klein eingestuft wurde.

## 2.2 Behälterkonzept mit Latentmedium-Erweiterung

Parallel zu den Umbauarbeiten wurde ein Konzept für den Speicherbehälter entwickelt, welches eine Kombination aus sensibler und latenter Speichermasse, erlauben soll. Rippenrohre, gefüllt mit *PCM*, welche sich über dem Festbett befinden, sollen mit nur wenigen Prozent der gesamten Speicherkapazität eine stabilere Entladetemperatur im Bereich der Schmelztemperatur des verwendeten PCMs ermöglichen. Ziel ist es ca. 2 % der gesamten gespeicherten Wärme mit Hilfe von latenter Wärme zu speichern.

Abbildung 2.9 zeigt den schematischen Vergleich von einem Speicherzyklus ohne PCM und wie ein Speicherzyklus mit PCM aussehen könnte. Die nutzbare Wärme beim Entladen des Speichers kann hier um die Zeitspanne  $\Delta t$  verlängert werden. Diese Speicherbauweise hätte den Vorteil, dass durch eine geringe Erhöhung des Speichervolumens die Speicherdichte deutlich erhöht werden kann.

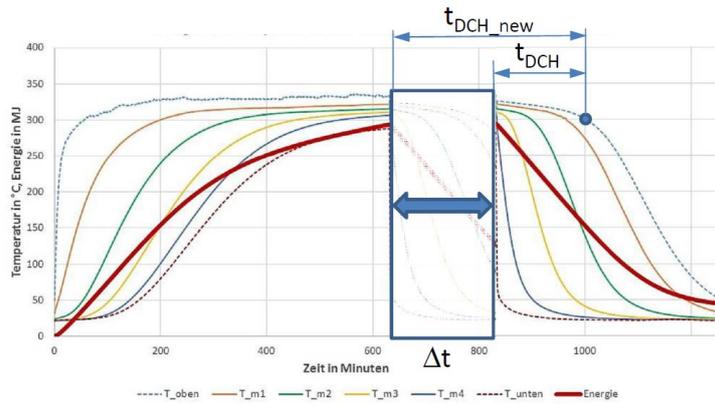


Abb. 2.9: Schematischer Vergleich eines Speicherzyklus mit und ohne PCM. Quelle: Hameter M.

### 2.2.1 R&I-Verfahrensfließschema

Die Verrohrung der Versuchsanlage hat sich beim Speicherkonzept mit der PCM-Erweiterung nicht verändert. Hinzu kommt ein Behälteraufsatz mit Rippenrohren und Sensoren, welche den Druckabfall des Wärmeträgermedium über die Rippenrohre und die Temperatur des Latentmediums messen sollen. Abbildung 2.10 zeigt das R&I-Fließschema vom Speicherkonzept mit PCM-Erweiterung. Eine größere Ansicht des R&I-Fließschema ist im Anhang A, Seite III zu finden.

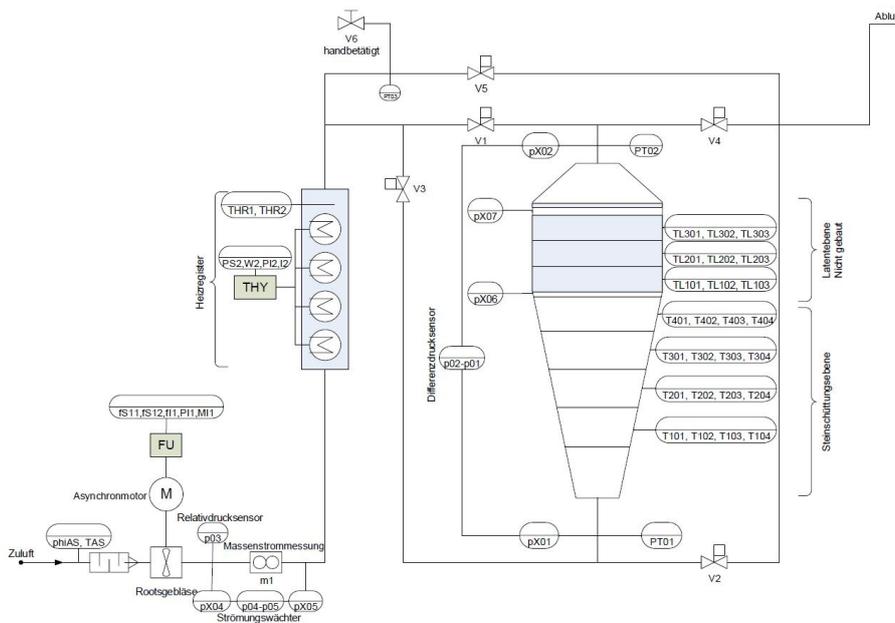


Abb. 2.10: Überarbeitetes Verfahrensfließschema mit Latentaufsatz (Detail siehe Anhang A, Seite III)

### 2.2.2 Auslegung PCM-Erweiterung

Die zylindrische PCM-Erweiterung soll auf den bereits vorhandenen Schüttungsbehälter montiert werden. Abbildung 2.11 zeigt den Vergleich zwischen dem bereits vorhandenen Schüttungsbehälter und dem Entwurf für die PCM-Erweiterung.

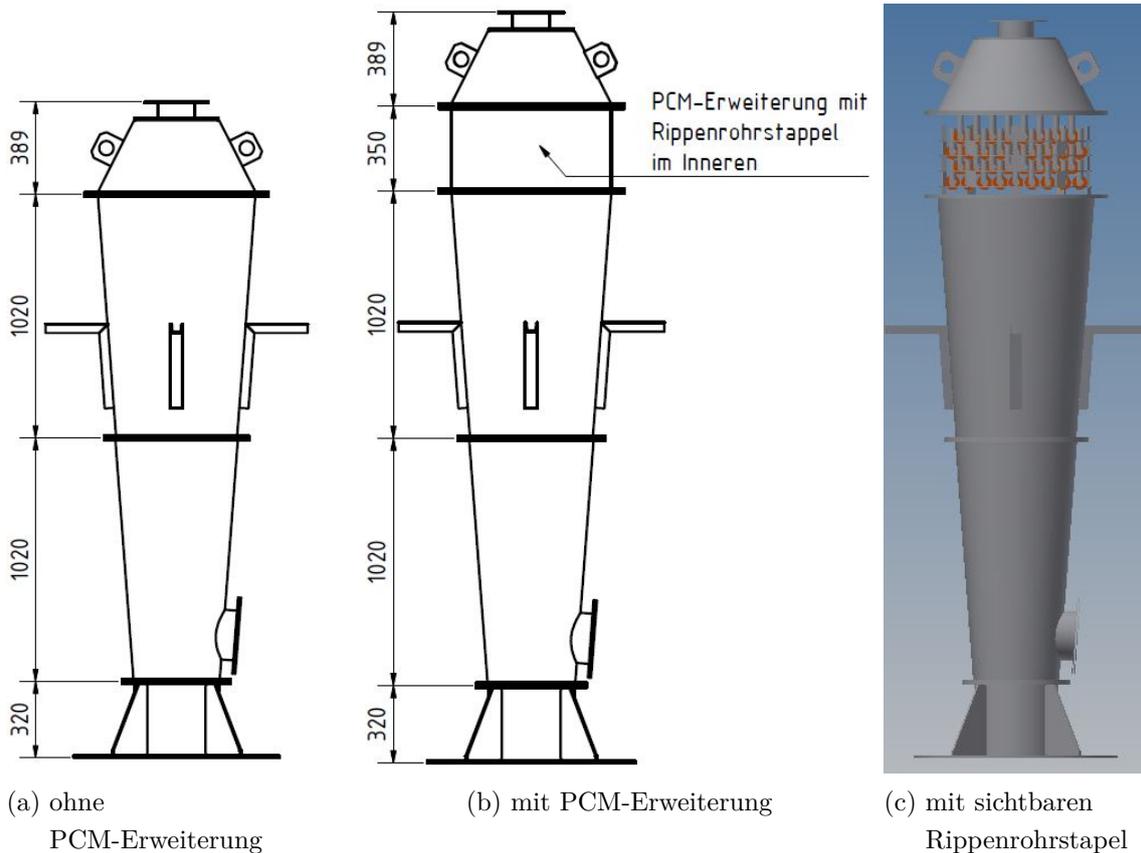


Abb. 2.11: Vergleich der Schüttungsbehälter mit und ohne PCM-Erweiterung

Das PCM-Erweiterungsmodul besteht aus einem zylindrischen Behälter in dem sich ein Rippenrohrbündel befindet. Um zu verhindern, dass sich im Rippenrohrbündel ein Bypasskanal für das Wärmeträgerfluid bildet und es dadurch zu einer schlechteren Wärmeübertragung kommt, sind die Rippenrohre versetzt angeordnet (Abbildung 2.12 und 2.13). Der Aufbau eines einzelnen Rippenrohres kann der Abbildung 2.14 entnommen werden.

Die Firma *Schmöle* bietet Rippenrohre an, welche für die Verwendung dieses Konzeptes in Frage kommen (Anhang E, Seite XXX). Für die Auslegungsrechnung und Konstruktion wurden, um einen möglichst hohen Wärmeübergang zu erreichen, Rohre mit dem größten Rippendurchmesser, die die Firma anbietet, gewählt (Anhang E, Seite XXXII).

Jedes der Rippenrohre kann nur mit einer bestimmten Menge an PCM gefüllt werden, da sich das PCM bei Erwärmung im Rohr ausdehnt. Um die Menge an PCM pro Rohr maximieren zu können, sind kurze, senkrechte und oben verschlossene Rohrstücke am Rippenrohr angebracht. Eine Bohrung kleinen Durchmessers, welche am oberen Ende der senkrechten Rohrstücke angebracht ist, soll dafür sorgen, dass es zu keinem Druckanstieg im Inneren des Rippenrohres, welcher mit dem Phasenwechselmaterial und Luft gefüllt ist, kommt. Die Auslegungsrechnung für das PCM-Modul wurde für das PCM  $NaNO_3$  durchgeführt. Die maximale Füllmenge mit  $NaNO_3$  der einzelnen Rohre kann aus Tabelle 2.5 entnommen werden. Die gesamte Füllmasse an  $NaNO_3$  für eine Rohrebene bzw. das gesamte Bündel (Bündel  $\hat{=}$  2 · Rohrebene 1 + 2 · Rohrebene 2) kann aus der Tabelle 2.6 entnommen werden. Eine detaillierte Ausführung der Berechnung ist im Anhang C, Seite XVI zu finden.

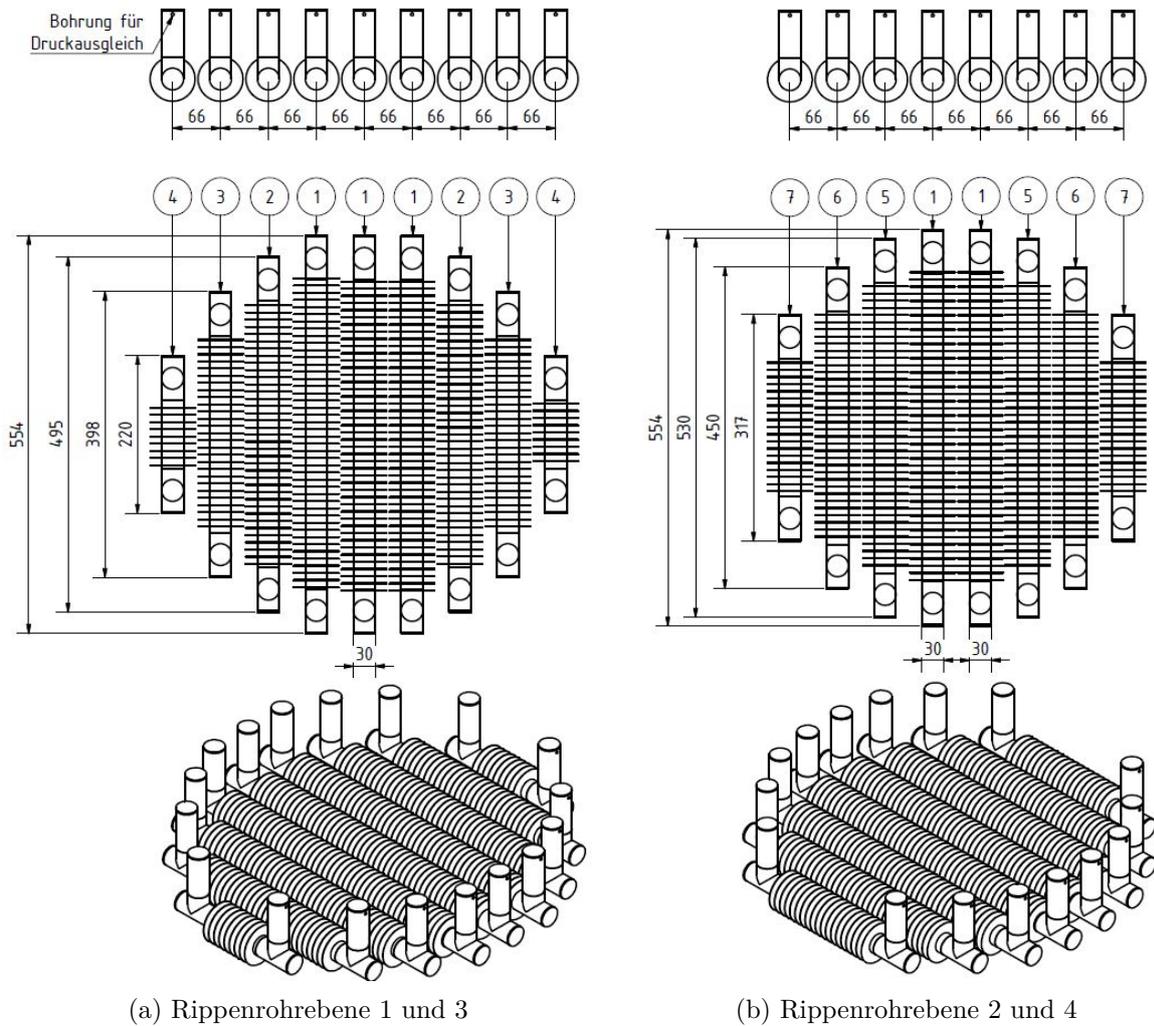


Abb. 2.12: Rippenrohrbündel ohne Halterung

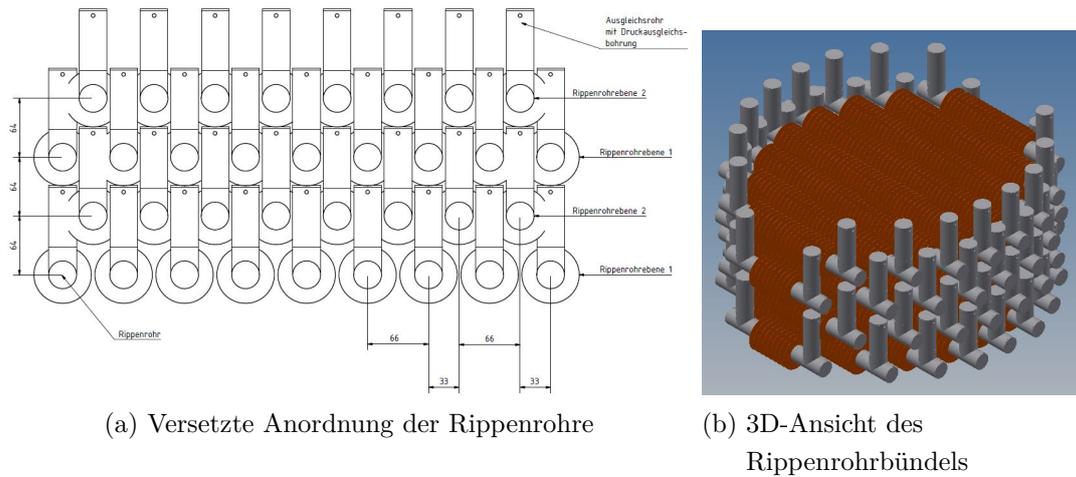


Abb. 2.13: Rippenrohrbündel ohne Halterung

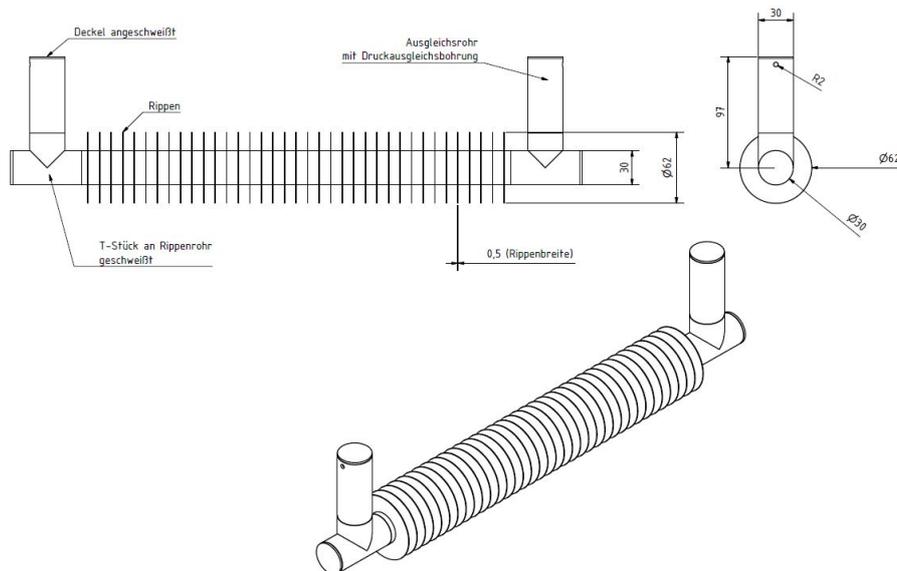


Abb. 2.14: Einzelnes Rippenrohr (Rippenabstand nicht maßstabsgetreu)

Aus Darstellungsgründen wurde die Anzahl der Rippen in den Abbildungen 2.12 bis 2.13 reduziert. Die tatsächliche Rippendichte beträgt 11 Rippen/Zoll. Bei einer Rippenbreite von 0,5 mm entspricht das einem Rippenabstand von 2,31 mm.

Rohr #	Länge [mm]	m <sub>max</sub> [g]
1	554	700
2	495	638
3	398	534
4	220	302
5	530	675
6	450	589
7	317	448

Tab. 2.5: Maximale Füllmasse der Rohre mit  $NaNO_3$

Rohr	m <sub>max</sub> [kg]
Bündel 1	4,38
Bündel 2	4,83
Stapel	18,41

Tab. 2.6: Füllmasse gesamt von Rohrebene und -bündel

### 2.2.3 Diskussion und Ergebnisse der PCM-Erweiterung

**Speicherkapazität:** Die Gesamtspeicherkapazität kann mit der oben beschriebenen Ausführung um ca. 10 % von 227 MJ auf 257 MJ gesteigert werden. Die Berechnung berücksichtigt die sensible gespeicherte Wärme im Behältermaterial und der Schüttung, und die latent gespeicherte Wärme im PCM. Aus Tabelle 2.7 kann der Anteil der Speichermenge im jeweiligen Speicherort entnommen werden. Eine detaillierte Ausführung der Berechnung ist im Anhang C, Seite XVIII zu finden.

Speicherort	Speicherart	Speichermenge [MJ]	% von Gesamtspeichermenge
Behälter	sensibel	51,32	25,2 %
Schüttung	sensibel	139,64	68,5 %
PCM	latent	12,97	6,4 %
GESAMT	sensibel\latent	203,93	100 %

Tab. 2.7: Aufschlüsselung der gespeicherten Wärme

Wie in Tabelle 2.7 ersichtlich ist, beträgt der Anteil an latent gespeicherter Wärme 0,7 % von der Gesamtmenge. Um die gewünschten 2 % zu erreichen, könnte man die Anzahl

der Rohrebenen erhöhen, was zum Nachteil hat, dass mit jeder Rohrebene der Behälter höher wird. Eine weitere Lösung wäre die Rippendimension zu reduzieren, womit eine kompaktere Ausführung möglich wäre.

**Druckverlust:** Der berechnete Druckverlust bei 20 °C und 150 kg/h Massenstrom über dem Rippenrohrbündel liegt bei rund 1 Pa. Bei 300 °C steigt der Druckverlust etwas an, ist aber weiterhin unter 2 Pa. Der gemessene Druckverlust über die Schüttung bei 20 °C und 150 kg/h Massenstrom beträgt hingegen ungefähr 100 Pa.

**Wärmeübergang:** Der berechnete Wärmeübergang für das querangeströmte Rohr-  
bündel liegt bei ca.  $14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Die Berechnung ist nur eine grobe Abschätzung, da für Rippenrohrbündel die Strömungsführung zwischen den Rippen und den Rohrreihen, wie zum Beispiel durch Rauigkeiten verursachte Mikroturbulenzen und die Art und Ausbildung der Anströmung, von Bedeutung ist. Die Berechnung beruht auf experimentellen Daten und Erfahrungswerten und wurde nach [7], Kapitel M1 durchgeführt. Die Ausführung ist im Anhang C, Seite XXI zu finden.

### 3 Anlagenbeschreibung und Aufbau

Der Aufbau der überarbeiteten Versuchsanlage basiert auf der Auslegung und Konstruktion von Drochter [4]. Die wesentlichen Komponenten der Anlage wurden übernommen bzw. wenn nötig, baugleiche hinzugefügt. Hier soll eine Übersicht der wichtigsten Komponenten und Änderungen gegeben werden. Für eine detaillierte Beschreibung der Komponenten wird auf die Diplomarbeit von Drochter [4] bzw. die Bachelorarbeit von Michalka [5] verwiesen.

Die Abbildungen 3.1, 3.2 und 3.3 geben eine Übersicht, zum Zeitpunkt der Verfassung der Arbeit, über den Anlagenaufbau. Zu den in Tabelle 2.1 beschriebenen Änderungen ist am Bypass vor der Klappe V5 eine Abzweigung hinzugekommen, an die über eine Flanschverbindung (EN 1092 - DN150 - PN6) ein externer Versuchsstand angeschlossen werden kann. Bei nicht Verwendung des Anschlusses ist der Ausgang mit einem Blindflansch geschlossen, um einer möglichen Fehlbedienung vorzubeugen.

Am Grundtisch und den Stützen wurden keine Änderungen vorgenommen.

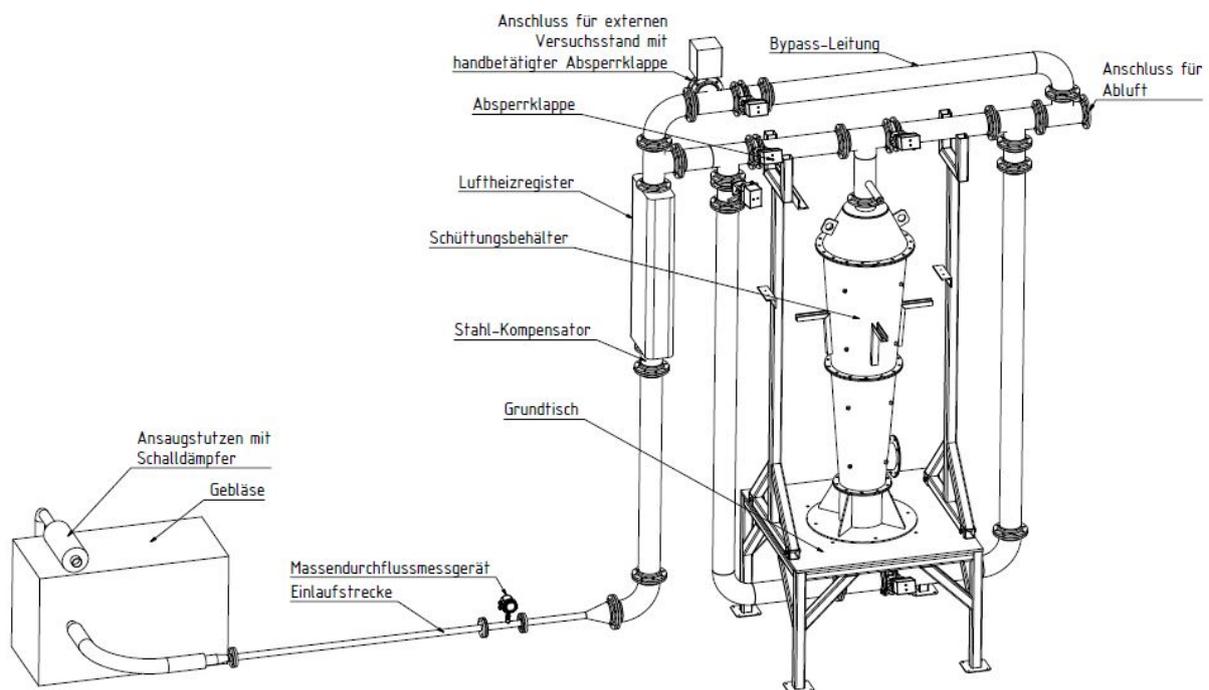


Abb. 3.1: Darstellung der neuen Versuchsanlage ohne Isolierung

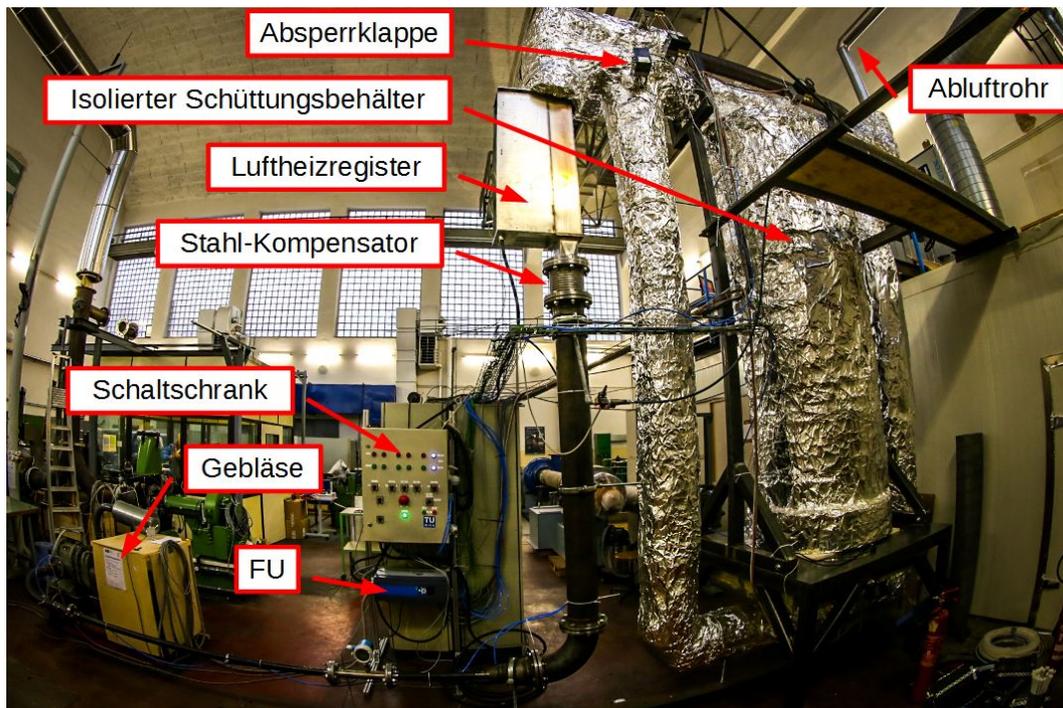


Abb. 3.2: Foto der neuen Versuchsanlage mit Isolierung von vorne

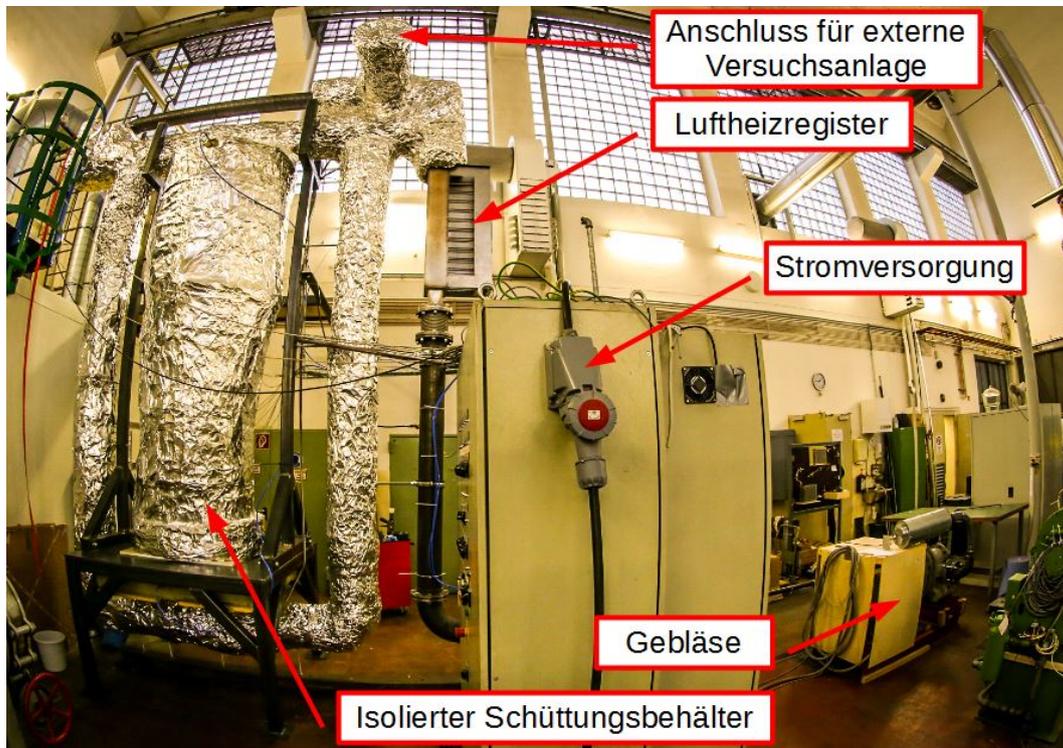


Abb. 3.3: Foto der neuen Versuchsanlage mit Isolierung von hinten

### 3.1 Hauptabmessungen der Anlage

Durch den Anlagenumbau haben sich die Hauptabmessungen der Anlage geändert. Sie können aus der Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 entnommen werden. Der ebenfalls in der Abbildung 3.4 und 3.5 abgebildete Formsteinbehälter wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

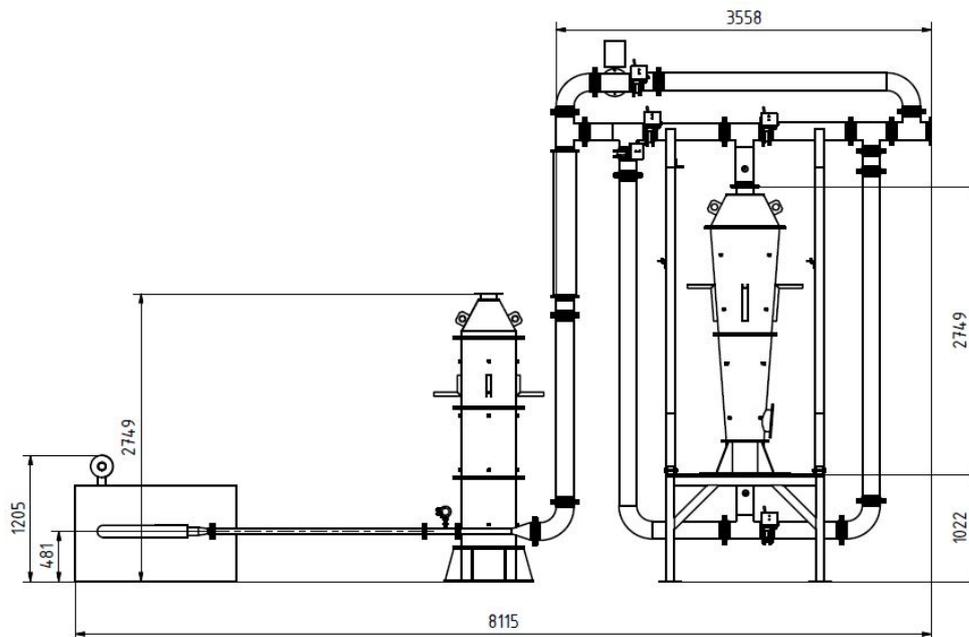


Abb. 3.4: Hauptabmessungen der Versuchsanlage ohne Isolierung und Formsteinbehälter im Hintergrund

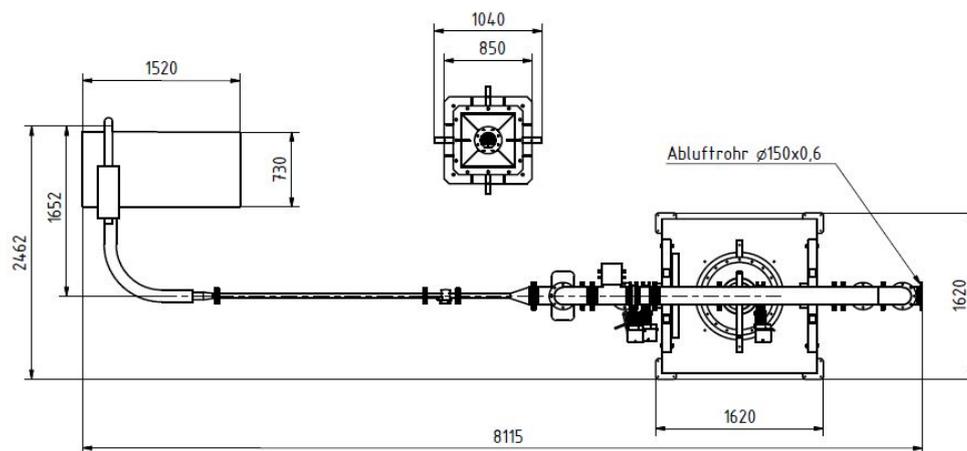


Abb. 3.5: Darstellung der neuen Versuchsanlage ohne Isolierung und Formsteinbehälter im Hintergrund

## 3.2 Beschreibung der wichtigsten Anlagenkomponenten

Nachfolgend werden die wichtigsten Anlagenkomponenten kurz beschrieben. Alle Komponenten sind für einen Systemüberdruck von 0,1 bar und 300 °C ausgelegt.

### 3.2.1 Gebläse

Bei dem verwendeten Gebläse handelt es sich um ein *Aerzen Roots Gebläse* des Baujahr 1941 (Abbildung 3.6).

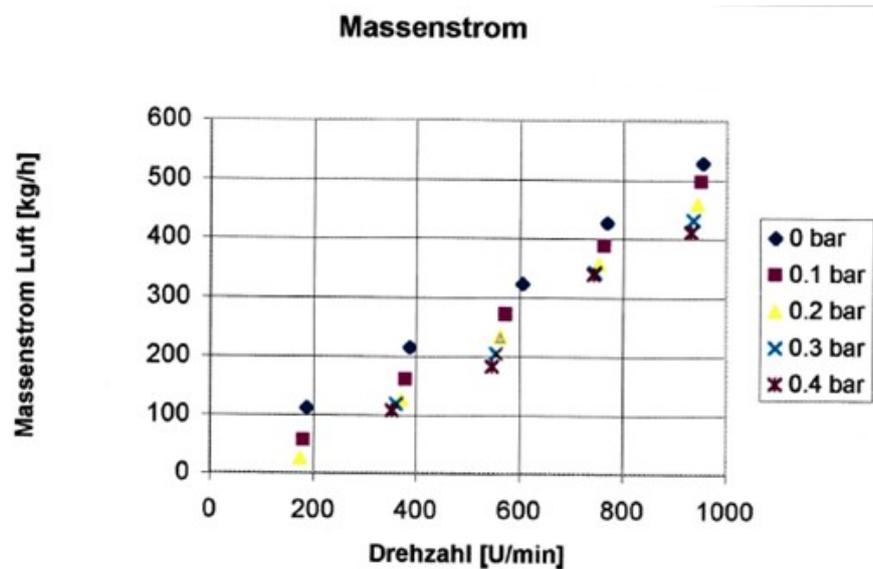
Die Daten des Gebläses können der Tabelle 3.1 bzw. Abbildung 3.7 entnommen werden.



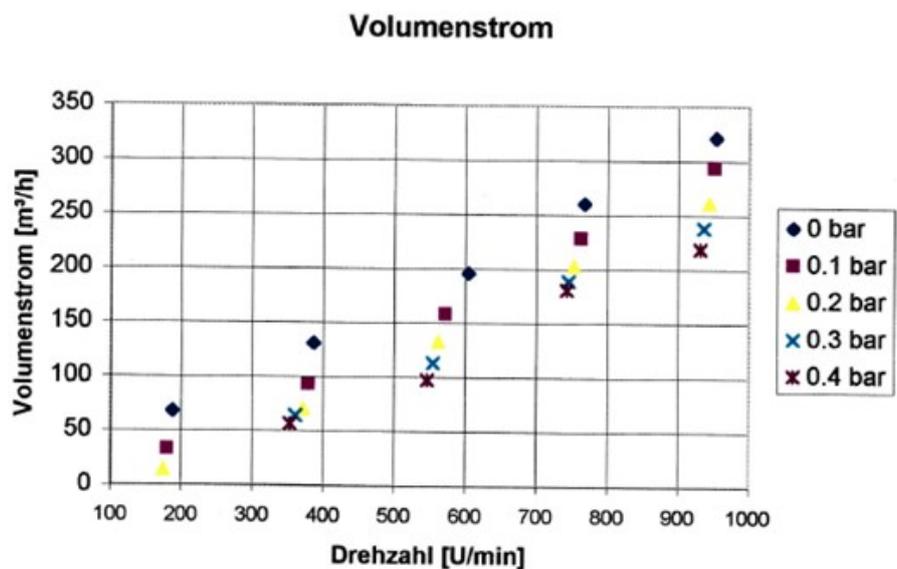
Abb. 3.6: Aerzen Roots Gebläse, Baujahr 1941

Hersteller	Fördermenge	Drehzahl
Aerzener Maschinenfabrik	7 m <sup>3</sup> /min	1450 U/min

Tab. 3.1: Hersteller, Fördermenge und Drehzahl vom Gebläse



(a) Massenstrom



(b) Volumenstrom

Abb. 3.7: Pumpkennfelder Aerzen Roots Gebläse. Quelle: Institut für Energietechnik und Thermodynamik

### 3.2.2 Luftheizregister

Das Luftheizregister erwärmt die geförderte Luftmenge vom Gebläse auf die gewünschte Lade oder bzw. Entladetemperatur.

Die Daten des Luftheizregisters können aus der Tabelle 3.2 entnommen werden.

<b>Hersteller</b>	Carlo Loysch GmbH
<b>Heizleistung</b>	12 x 1250 W
<b>Spannung</b>	3 x 400 V
<b>Druckverlust</b>	100 Pa
<b>Gehäusematerial</b>	1.4301
<b>Heizkörpermaterial</b>	1.4828
<b>max. zulässige Temperatur</b>	650 °C

Tab. 3.2: Kenndaten für Luftheizregister laut Hersteller

### 3.2.3 Behälter

Der von Drochter [4] konstruierte Schüttungsbehälter besteht aus vier aneinander geschraubten Modulen. Durch die Erwärmung des Behälters mit der Schüttung, vergrößert sich der Durchmesser des Behälters aufgrund der Wärmeausdehnung und somit das gesamte Speichervolumen. Durch die Vergrößerung des Speicherdurchmessers, setzt sich die Schüttung im Behälter. Beim Abkühlen möchte sich der Behälterdurchmesser auf seine ursprüngliche Größe verkleinern, kann dies aber aufgrund der Behinderung durch die Setzung der Schüttung nicht, was zu einem Anstieg der Membranspannung in den Behälterwänden führt. Um dem entgegenzuwirken, ist der Mantel in einer konischen Form mit einer Steigung von 4° ausgeführt.

In Tabelle 3.3 sind die wichtigsten Informationen vom Behälter zusammengefasst. Aus Abbildung 3.8 können die Hauptabmessungen des Behälters entnommen werden.

<b>Material</b>	<b>Leergewicht</b>	<b>Fassungsvolumen</b>	<b>Flanschdimension</b>
P265GH	252 kg	0,4 m <sup>3</sup>	EN 1092 -DN150 -PN6

Tab. 3.3: Material, Leergewicht, Fassungsvermögen und Flanschdimension vom Schüttungsbehälter

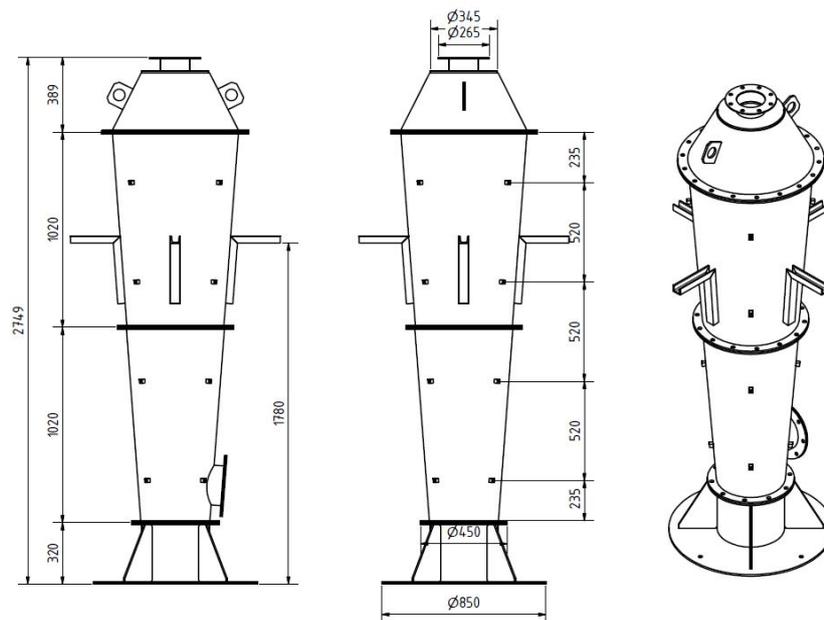


Abb. 3.8: Hauptabmessungen vom Schüttungsbehälter

### 3.2.4 Speicherinventar

Der Behälter ist mit Drainageschotter (Abbildung 3.9) gefüllt. Die Daten des Drainageschotters können der Tabelle 3.4 entnommen werden. Die Schottermasse kann erst beim Tausch des Behälters ermittelt werden, da dies im Vorfeld der Befüllung nicht durchgeführt wurde.

<b>Rohdichte</b>	2500 kg/m <sup>3</sup>
<b>geschätzte Porösität</b>	0,378
<b>Schüttungsdichte aus Porösität</b>	1555 kg/m <sup>3</sup>
<b>berechnete Speichermasse im Behälter</b>	593,7 kg
<b>spezifische Wärmekapazität</b>	840 J/(kg·K)
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	1 W/(m·K)

Tab. 3.4: Daten des Drainageschotters



Abb. 3.9: Drainageschotter im Schüttungsbehälter

### 3.2.5 Isolierung

Um die Wärme über einen längeren Zeitraum speichern zu können, sind die Rohrleitungen und der Behälter mit einer nicht entflammaren Steinwolle (Daten siehe Tabelle 3.5) isoliert. Das Isoliermaterial ist zudem mit 1 mm dicker Aluminiumfolie ummantelt, um auch den Strahlungsverlust möglichst gering zu halten. Die Außentemperatur der Isolierung sollte immer  $<60\text{ °C}$  sein, um das Verbrennungsrisiko für das Laborpersonal zu minimieren. Die Wärmeleitfähigkeit der Steinwolle in Abhängigkeit der Temperatur kann der Abbildung 3.10 entnommen werden. Folgende Isolationsstärken wurden gewählt.

- **Isolierdicke Rohrleitungen:** 100 mm
- **Isolierdicke Schüttungsbehälter:** 200 mm

<b>Hersteller</b>	Knauf Insulation
<b>Bezeichnung</b>	WM 640 GG
<b>Grenztemperatur</b>	640 °C
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	0,085 W/(m·K)
<b>Dicht</b>	80 kg/m <sup>3</sup>

Tab. 3.5: Kenndaten für Isolationsmaterial

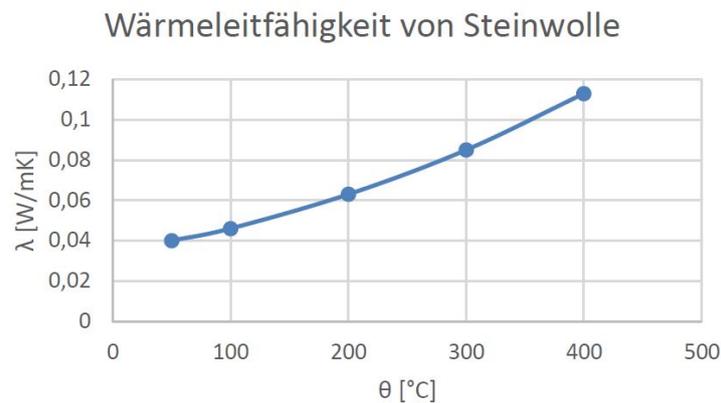


Abb. 3.10: Wärmeleitfähigkeit der Steinwolle in Abhängigkeit der Temperatur. Quelle: Michalka [5]

### 3.2.6 Dichtungen

Alle Flanschverbindungen der Anlage sind mit speziellen Graphitdichtungen der Firma Frenzelit (Tabelle 3.6) gegen das Austreten des Wärmeträgermediums abgedichtet. Im Gegensatz zu herkömmlichen Graphitdichtungen, lassen sich diese auch nach Betriebstemperaturen von über 300 °C beim Aufschrauben der Verbindung vom Flansch lösen. Das ist notwendig, da bei der Anlage die Behälter austauschbar sein müssen.

<b>Hersteller</b>	Frenzelit
<b>Material</b>	novaphit SSTC XP-Technologie
<b>Dicke</b>	2 mm

Tab. 3.6: Daten der Dichtungen

### 3.3 Betriebszustände des Festbett-Regenerators

Die Regelung des Luftstromes für die drei Betriebszustände **LADEN**, **ENTLADEN** und **BYPASS** werden über die fünf verbauten Absperrklappen V1 - V5 gesteuert.

#### 3.3.1 Betriebszustand: LADEN

Beim Betriebszustand LADEN sind die Klappen V1 und V2 geöffnet und die Klappen V3, V4 und V5 geschlossen. Die vom Luftheizregister erwärmte Luft strömt von oben durch den Behälter nach unten und gibt die Wärme an die Schüttung im Behälter ab (Abbildung 3.11).

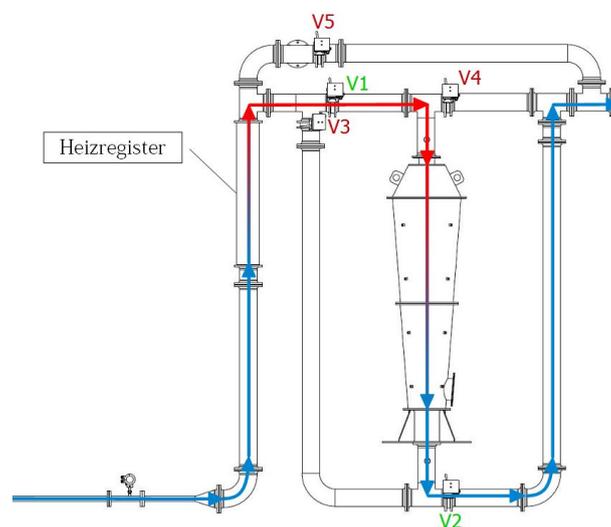


Abb. 3.11: Betriebszustand: LADEN

#### 3.3.2 Betriebszustand: ENTLADEN

Beim Betriebszustand ENTLADEN sind die Klappen V3 und V4 geöffnet und die Klappen V1, V2 und V5 geschlossen. Kühle Luft wird von unten durch den Behälter geleitet, nimmt die Wärmeenergie der Schüttung auf und verlässt den Regenerator durch das offene Ventil V4 (Abbildung 3.12). Der Festbett-Regenerator kann auch mit vorgeheizter Luft vom Heizregister entladen werden.

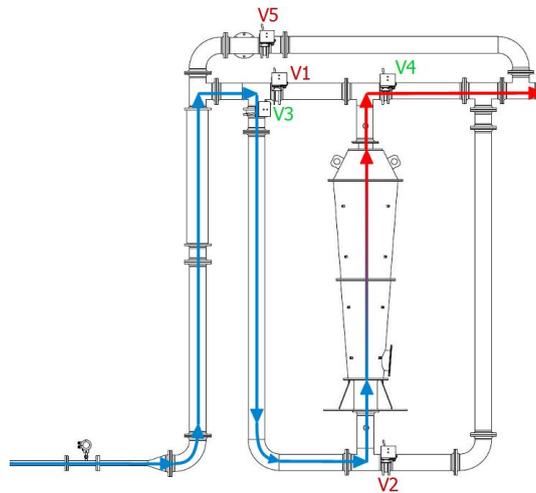


Abb. 3.12: Betriebszustand: ENTLADEN

### 3.3.3 Betriebszustand: BYPASS

Beim Betriebszustand BYPASS sind die Klappen V1, V2, V3 und V4 geschlossen und nur die Klappe V5 ist geöffnet. Die Luft wird hier über die Bypass-Leitung vorbei am Speicherbehälter geleitet, um die Temperaturmessung am beladenen Speicher, nicht zu beeinflussen (Abbildung 3.13). Diesen Zustand benötigt man, wenn das Heizregister und die Rohrleitungen vor dem Laden auf Temperatur gebracht werden müssen, um möglichst mit der definierten Temperatur den Lade- bzw. Speichervorgang starten zu können. Wie beim Vorheizen vor dem Laden, braucht man den Bypasszyklus auch zum Nachkühlen vor dem Entladen des Speichers um den Vorgang mit der vordefinierten Entladetemperatur starten zu können.

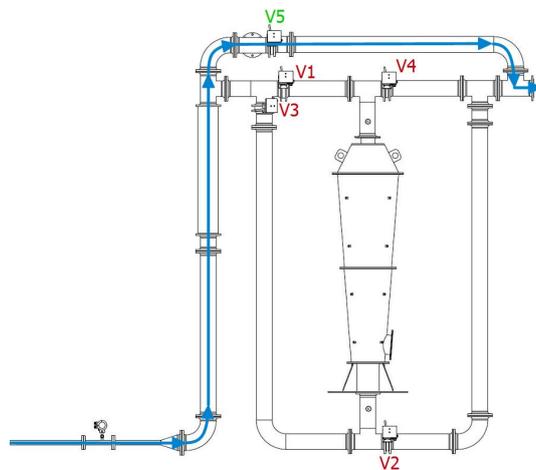


Abb. 3.13: Betriebszustand: BYPASS

## 4 Anlagensteuerung und Messtechnik

Messungen am Festbett-Regenerator sind sehr zeitintensiv und dauern in der Regel mehrere Tage, an denen die Anlage ununterbrochen in Betrieb sein muss. Bei einer manuellen Bedienung muss die Anlage hierbei 24 Stunden am Tag, von einer Person vor Ort überwacht werden.

Wie in Kapitel 1 in Tabelle 1.3 erwähnt, war es Ziel dieser Arbeit den Festbett-Regenerator so zu gestalten, dass ein unbeaufsichtigter Betrieb der Versuchsanlage möglich wird. Die verwendete Steuerungseinheit soll die eingehenden Messsignale verarbeiten und entsprechend reagieren. Im Fehlerfall soll sich die Anlage über ein akustisches Signal bemerkbar machen können. Bevor ein Fehler während der Messung kritisch wird, soll sich die Anlage automatisch abschalten, um zu verhindern, dass die Anlage beschädigt wird.

### 4.1 Messtechnik

In der Prozessautomatisierung werden zur Übertragung von Prozessgrößen Einheitssignale verwendet. Das können Spannungs- oder Stromsignale sein. Stromsignale bieten den Vorteil, dass sie auch bei langen Leitungen störungsfrei übertragen. Bei der Übertragung mittels Stromsignal gibt es zwei Standards: Der Nullpunkt kann entweder bei 0 mA oder bei 4 mA liegen, wobei zweiteres den Vorteil der Drahtbruchüberwachung hat. Beim beschriebenen Festbett-Regenerator wird einheitlich die Stromübertragung von 4 mA bis 20 mA verwendet.

Um aus dem Stromsignal eine physikalische Größe, wie Temperatur oder Druck zu erhalten, wird der Messbereich des Sensors auf die 4 mA bis 20 mA linear skaliert. Hat ein Drucksensor beispielsweise einen Messbereich von -500 Pa bis 500 Pa, bedeutet ein Signal von 4 mA einen physikalischen Messwert von -500 Pa und 20 mA einen Wert von 500 Pa.

Beim Kalibrieren werden Messgrößen des zu überprüfenden Sensors mit der Messgröße eines genaueren Messgerätes verglichen. Die Vergleichswerte bzw. Messabweichungen werden in Kalibriertabellen festgehalten.

Die Messtechnik der Versuchsanlage besteht im Wesentlichen aus einem Massendurchflusssensor und mehreren Thermoelementen und Drucksensoren.

### 4.1.1 Kalibrierung der Thermoelemente

Um die Abweichung der Temperaturfühler bzw. der Messkette zu bestimmen, wurden die Thermoelemente mit einem Kalibrierofen der Firma Jofra kalibriert. Der Aufbau der Kalibrierung ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Die Kalibrierung erfolgte nach der Vergleichsmethode in Temperaturschritten von 25 °C im Temperaturbereich von 50 °C bis 375 °C. Die Kalibrierung wurde mit allen noch nicht kalibrierten Temperatursensoren durchgeführt. Das Ergebnis der Kalibrierung eines PT100 Temperaturfühlers ist in Tabelle 4.1 aufgelistet. In Abbildung 4.2 sind die Kalibrierdaten der Tabelle 4.1 und die lineare Regressionsgerade des PT100 Fühlers in einem Diagramm dargestellt.

Die Kalibrierdaten aller Sensoren sind im Anhang D, Seite XXIV zu finden.



Abb. 4.1: links: Kalibrierofen Jofra 600S mit PT100; rechts: Steuerungscomputer X20 von B&R mit angeschlossenem PT100 Thermofühler

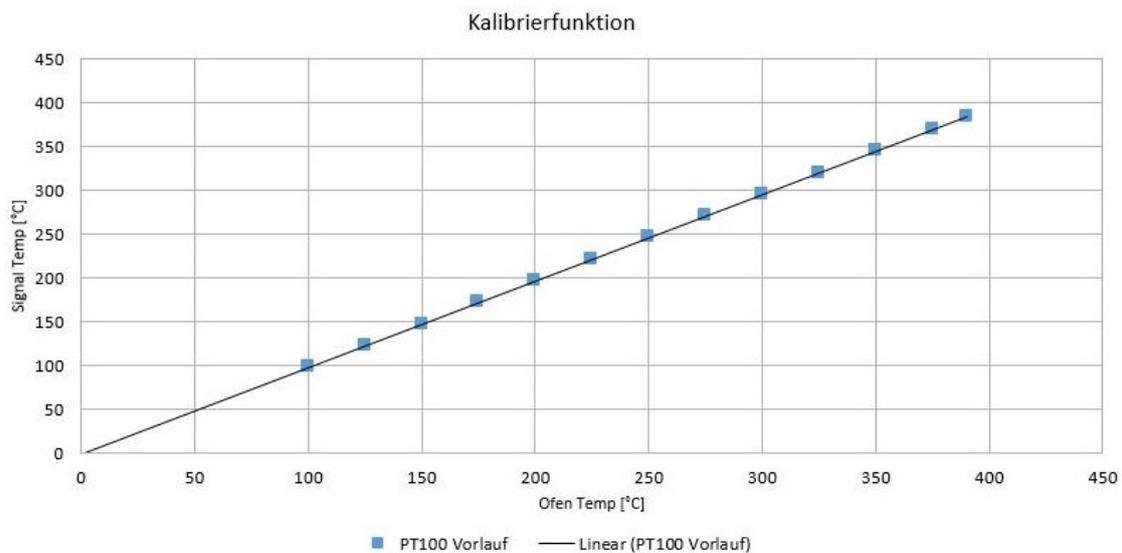


Abb. 4.2: Lineare Regressionsgerade für Vorlauffühler. Daten aus Tabelle 4.1

Kalibrierofen in °C	Messwert in °C	Abweichung in °C
50	49,9	0,1
75	74,3	0,7
100	98,85	1,15
125	124,4	0,6
150	149,26	0,74
175	174,22	0,78
200	199,36	0,64
225	224,62	0,38
250	250,17	-0,17
275	274,92	0,08
300	299,99	0,01
325	324,73	0,27
350	350,19	-0,19
375	374,7	0,3

Tab. 4.1: Kallibriertabelle des PT100 Fühlers am Vorlauf

#### 4.1.2 Kalibrierung der Drucksensoren

Die Kalibrierung der Differenz- bzw. Relativdrucksensoren wurde mit einem Testo 312-4 Differenzdruckmessgerät durchgeführt. Da bei Druckmessungen ein starkes Rauschen auftritt, wurden die Messungen für die Kalibrierung der Sensoren über 10 Sekunden gemittelt.

Der **Differenzdrucksensor** (Abbildung 4.3, R&I (p01-p04)), welcher den Druckabfall an der Schüttung misst, hat einen geringeren Fehler als das Vergleichsgerät Testo 312-4 (vgl. Tabelle 4.2 und 4.3). Eine Kalibrierung ist somit nicht Sinnvoll. Es wurde lediglich verglichen ob der Sensor plausible Messwerte ausgibt (Tabelle 4.4). In Abbildung 4.4 sind die Kalibrierdaten mit einer potentiellen Regressionskurve abgebildet.



(a) Differenzdrucksensor  
*Kalinsky DS1-420*



(b) *Testo 312-4*



(c) *Bürkert  
Typ  
8323*

Abb. 4.3: (a) Differenzdrucksensor *Kalinsky DS1-420*, (b) Vergleichsgerät *Testo 312-4*, (c) Relativdrucksensor *Bürkert Drucktransmitter Typ 8323*

Druckbereich [mbar]	Druckbereich [kPa]	Überbelastbarkeit [mbar]	Linearitätsfehler [±% von EW]	Ansprechzeit [ms]
0 - 5	0 - 0,5	250	0,8	50

Tab. 4.2: Technische Daten des *Kalinsky DS1-420*

Druckbereich [mbar]	Druckbereich [kPa]	Auflösung [Pa]	Linearitätsfehler [±% von EW]
0 - 2	0 - 0,2	1	1

Tab. 4.3: Technische Daten des *Testo 312-4*

Massenstrom [kg/h]	TESTO 312-4 [Pa]	Kalinsky DS1-420	Abweichung [Pa]
85	30,00	29,32	-0,68
100	40,00	40,04	0,04
150	77,00	77,68	0,68
200	129,00	130,20	1,20
250	191,00	191,31	0,31
300	264,00	264,31	0,31
400	439,00	439,68	0,68

Tab. 4.4: Auszug aus der Kalibriertabelle vom Differenzdrucksensor *Kalinsky DS1-420*

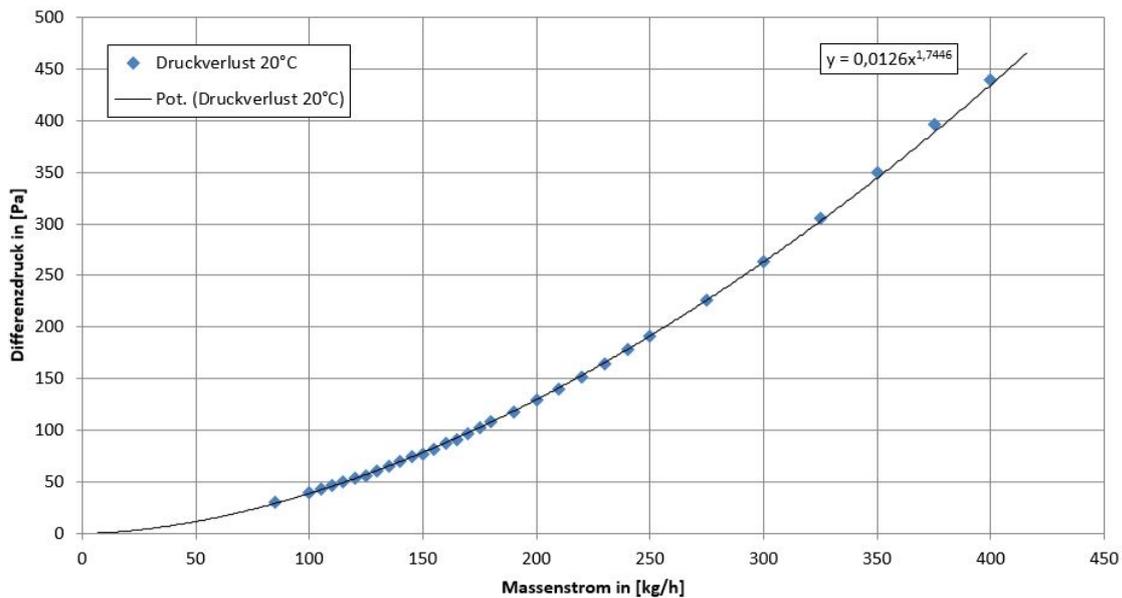


Abb. 4.4: Potentielle Regressionskurve *Kalinsky DS1-420* (Daten aus Tabelle 4.4)

Beim **Relativdrucksensor** (p05), welcher sich am Auslassstutzen des Gebläses befindet, konnte ebenfalls nur eine Vergleichsmessung zur Überprüfung der Plausibilität gemacht werden. Auch dieser Sensor hat eine höhere Genauigkeit als das Vergleichsgerät Testo 312-4 (Tabelle 4.5). Die Kalibrierkurven (Abbildung 4.5) zeigen den Druck am Gebläsestutzen in den drei Betriebsmodi Laden, Entladen und Bypass. Man sieht, dass der Betriebsmodus keinen großen Einfluss auf den Druck am Gebläsestutzen hat. Die schwarze Regressionskurve stellt den Durchschnitt der Regressionskurven der drei Betriebsmodi dar.

Druckbereich [mbar]	Druckbereich [kPa]	Überbelastbarkeit [bar]	Linearitätsfehler [±% von EW]
0 - 100	0 - 10	1	0,5

Tab. 4.5: Technische Daten *Bürkert Drucktransmitter Typ 8323*

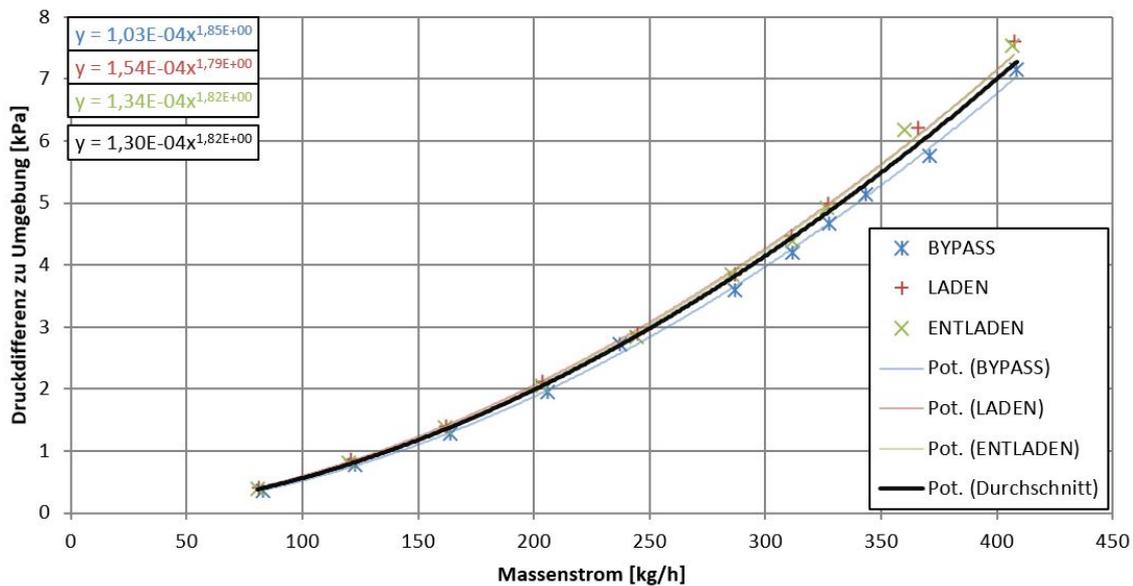


Abb. 4.5: Druck am Gebläsestutzen (p03) bei 20 °C

### 4.1.3 Massendurchflusssensor

Das in der Anlage verbaute Massendurchfluss-Messgerät (Abbildung 4.6) basiert auf dem thermischen Massendurchfluss-Messprinzip. Die physikalischen Grundlagen dazu gehen auf den kanadischen Physiker Louis Vessot King zurück.



Abb. 4.6: t-mass A 150 von Endress & Hauser, Quelle: Endress & Hauser.

Im Inneren von thermischen Durchfluss-Messgeräten befinden sich zwei in das Messrohr hineinragende Temperaturfühler (PT100 Widerstandsthermometer) (Abbildung 4.7). Einer der beiden Temperaturfühler misst die aktuelle Gastemperatur als Referenz unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit. Der zweite Temperaturfühler hingegen wird durch das Zuführen von elektrischer Energie konstant beheizt, so dass sich zwischen den beiden Temperaturfühlern eine vordefinierte Temperaturdifferenz einstellt (z.B. 10°C).

Erfolgt kein Durchfluss, so ändert sich die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Fühlern nicht. Sobald Luft durchströmt, wird dem beheizten Temperaturfühler, durch die vorbeiströmende Luft Wärme entzogen und durch die Strömung abgeführt. Die damit verbundene Abkühlung wird gemessen und durch das Zuführen von zusätzlichem Heizstrom sofort wieder ausgeglichen. Infolgedessen wird die angestrebte Temperaturdifferenz beibehalten. Der erforderliche Heizstrom zur Nachregelung der Temperaturdifferenz ist direkt proportional zur Abkühlung und folglich ein direktes Maß für den Massenstrom in der Rohrleitung. Je größer die Durchflussgeschwindigkeit und damit die zusätzliche Abkühlung des beheizten Temperaturfühlers, desto größer ist auch der erforderliche Heizstrom.

Der Vorteil des thermischen Messprinzips gegenüber anderen Messverfahren ist der geringe Druckverlust durch zwei in die Strömung ragende Temperaturfühler.

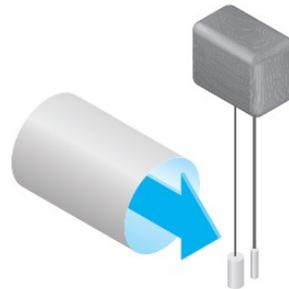


Abb. 4.7: Messprinzipdarstellung des thermischen Massendurchfluss-Messgeräts,  
Quelle: Endress & Hauser.

In der Versuchsanlage ist ein thermisches Massendurchfluss-Messgerät, welches nach dem oben beschriebenen Prinzip arbeitet, der Firma *Endress & Hauser* verbaut. Die zugehörigen technischen Daten können der Tabelle 4.6 entnommen werden.

Bezeichnung	t-mass A 150
Gasart	Luft
Betriebsdruck	1,013 bar
Strombereich	4 - 20 mA
4 mA - Wert	0 kg/h
20 mA - Wert	555 kg/h

Tab. 4.6: Spezifikationsdaten t-mass A150

#### 4.1.4 Außensensor: Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Am Ansaugstutzen des Gebläses ist ein kombinierter Fühler (R&I: phiAS, TAS) angebracht, der die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit (r.F.) der angesaugten Luft misst (Abbildung 4.8). Die technischen Daten können der Tabelle 4.7 bzw. dem Datenblatt im Anhang E, Seite XXVIII entnommen werden.



Abb. 4.8: Temperatur- und Feuchtigkeitsfühler am Ansaugstutzen

Messbereich Feuchte	0 ... 100 % r.F.
Toleranz bei 35 ... 70 % r.F.	± 3 %
Messbereich Temperatur	-30°C ... +70 °C
Genauigkeit	±0,5 °C

Tab. 4.7: Spezifikationsdaten t-mass A150

Da die Dichte  $\rho_{LF}$  und somit auch die spezifische Wärmekapazität  $c_{LF}$  der Luft von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängt, ist es sinnvoll diese bei den Messauswertungen heranzuziehen. Der Zusammenhang, zwischen der Dichte  $\rho_{LF}$  und der Luftfeuchtigkeit  $\varphi_{LF}$ , lässt sich mit den Gleichungen (4.1) und (4.2) beschreiben.

$$\rho_{LF} = \frac{p}{R_f \cdot T} \quad (4.1)$$

$$R_f = \frac{R_1}{1 - \varphi_{LF} \cdot p_d/p \cdot (R_1/R_d)} \quad (4.2)$$

Mit den Gleichungen (4.3) und (4.4) erhält man auf die spezifische Wärmekapazität  $c_{LF}$  der feuchten Luft.

$$m_{LF} = \rho_{LF} \cdot V \quad (4.3)$$

$$c_{\text{LF}} = \frac{\Delta Q}{m_{\text{LF}} \cdot \Delta T} \quad (4.4)$$

## 4.2 Anlagensteuerung

Der Festbett-Regenerator konnte vor der Automatisierung nur manuell betrieben werden. Die zu steuernden Komponenten, Klappen, Heizregister und Gebläse, konnten nur über Schalter welche, direkt am Schaltschrank angebracht waren, bedient werden. Weiters konnte man das Gebläse und Heizregister nicht mit einem gewünschten Massenstrom bzw. bei einer gewünschten Temperatur betreiben. Das Heizregister konnte nur ein- bzw. ausgeschaltet werden. Das Gebläse wurde durch Vorgabe einer fixen Frequenz von einem Frequenzumrichter gesteuert. Dadurch war es schwer möglich, Messungen mit genau definierten Parametern durchzuführen und die Anwesenheit einer eingeschulten Person war aus Sicherheitsgründen für die Dauer der Messung notwendig. Da eine Messung im Regelfall mehrere Tage dauert, musste die Anlage 24 Stunden am Tag über mehrere Tage hinweg überwacht und geschaltet werden.

Die Ziele der Automatisierung sind in Tabelle 4.8 aufgelistet.

Ziel	Beschreibung
automatischer Ablauf einer Messung mit vorgegebenen Parametern	Der Messungsablauf muss auf Basis vom Benutzer eingegebenen Parametern bis zum Ende automatisch geschaltet werden.
technische Sicherheitsüberwachung	Bei Auftreten eines kritischen Fehlers, müssen sich die riskanten Komponenten ausschalten, um einen Schaden zu verhindern.
Umwandlung von Messsignalen in physikalische Einheit und deren Speicherung	Die Stromsignale (4 mA bis 20 mA) der Sensoren müssen unter Berücksichtigung von Kalibrierdaten in ihre physikalische Einheit umgewandelt und gespeichert werden.
Bedienoberfläche	Die Anlage soll mittels einer Visualisierung leicht und intuitiv zu überwachen und bedienen sein.
Fernsteuerung und Überwachung	Die Anlage soll von einem beliebigen PC mit Internetanschluss ferngesteuert und überwacht werden können.

Tab. 4.8: Ziele der Automatisierung

#### 4.2.1 Aufbau der Steuerung

Die Automatisierung ist aufgrund der positiven Erfahrungen am Institut mit einem Industrie SPS System **X20** der Firma *Bernecker und Rainer* (B&R) realisiert worden. Das System ist aufgrund seines modularen Aufbaus sehr flexibel und beliebig erweiterbar. Mit dem X20 System können alle in Tabelle 4.8 genannten Ziele realisiert werden. Die X20 Steuerungseinheit und die für die Steuerung notwendigen Komponenten sind im Schaltschrank verbaut (Abbildung 4.9). Die Hauptaufgabe der X20 ist die Steuerung, Regelung und Überwachung der Anlagenkomponenten. Sie übernimmt aber auch die Messsignalauswertung, unter Berücksichtigung der Kalibrierdaten und die Datenaufzeichnung aller verbauten Sensoren.

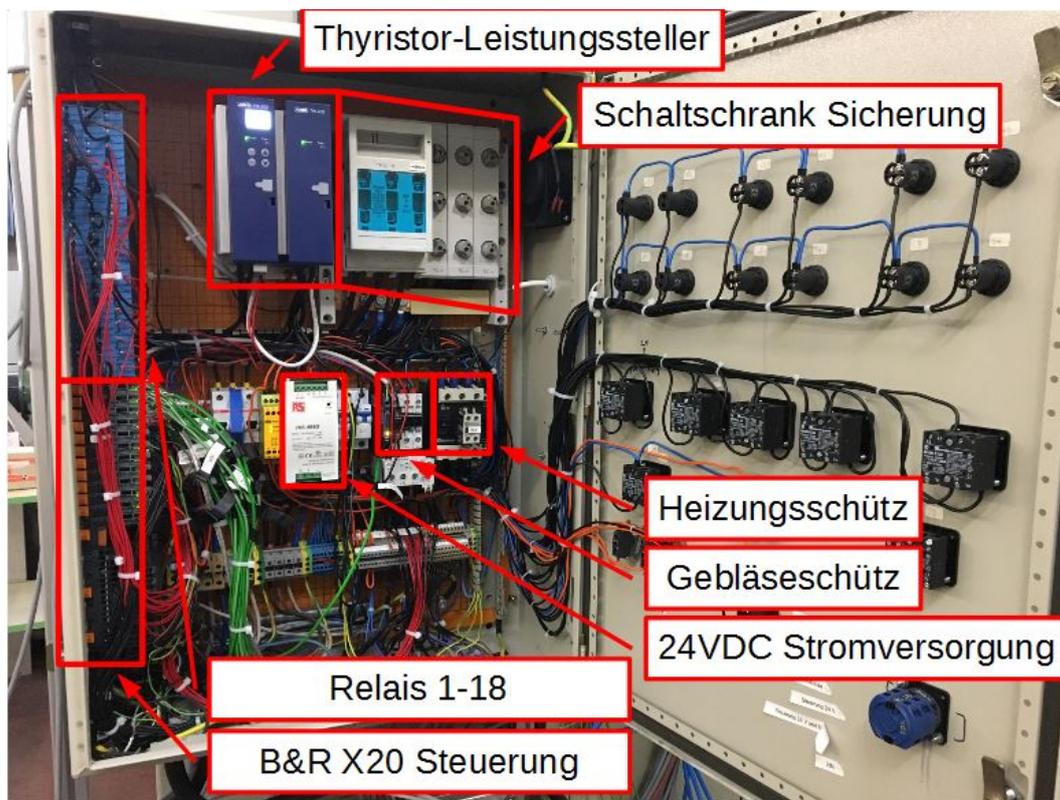


Abb. 4.9: Innenansicht vom Schaltschrank

Abbildung 4.10 zeigt die SPS CPU X20 mit den zur Anwendung kommenden Modulen, welche in Tabelle 4.9 zusammengestellt sind. Die genaue Anschlussliste und Variablenzuordnung der Komponenten und Sensoren ist im Anhang E, Seite XXXV bzw. in der Dokumentationsmappe vom Festbett-Regenerator zu finden.

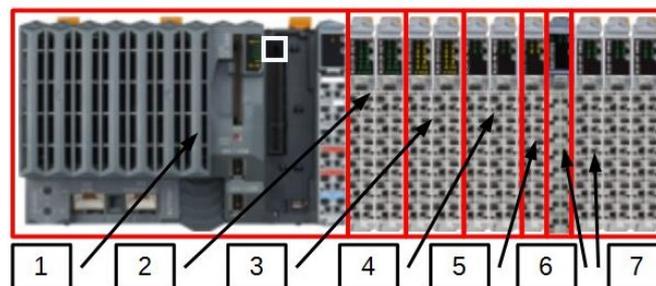


Abb. 4.10: B&R X20 System - Aufbau

#	Bezeichnung	Anzahl Module	Anzahl Anschlüsse/Modul	Funktion
1	X20CP1585	1		CPU der Steuerung
2	X20DI9371	2	12	24 V Digital Input
3	X20DO9322	2	12	24 V Digital Output
4	X20AI4622	2	4	4 mA...20 mA Analog Input
5	X20AO4622	1	4	4 mA...20 mA Analog Output
6	X20ATB312	1	4	Modul für PT100 Temperaturfühler
7	X20AT6402	3	6	Modul für Typ K Thermoelemente

Tab. 4.9: Aufbau der B&R X20 Steuerung für den Festbett-Regenerator

Da die meisten verbauten Komponenten mit 230 VAC betrieben werden, schaltet die X20 über ihre digitalen Ausgänge (#3 in Tabelle 4.9) 24 VDC Relais die 230 VAC. Die Relais sind unmittelbar neben der Steuerung verbaut (Abbildung 4.10). In Tabelle 4.10 ist eine Übersicht der Funktionen der Relais zu finden.

Relais 1	Absperrklappe 1 schließen
Relais 2	Absperrklappe 1 öffnen
Relais 3	Absperrklappe 2 schließen
Relais 4	Absperrklappe 2 öffnen
Relais 5	Absperrklappe 3 schließen
Relais 6	Absperrklappe 3 öffnen
Relais 7	Absperrklappe 4 schließen
Relais 8	Absperrklappe 4 öffnen
Relais 9	Absperrklappe 5 schließen
Relais 10	Absperrklappe 5 öffnen
Relais 11	<b>Gebüseschütz EIN</b>
Relais 12	<b>Heizungsschütz EIN</b>
Relais 13	<b>Übertemperaturüberwachung</b> mit Thermoelementen <b>THR1 &amp; THR2</b>
Relais 14	<b>Gebüseswächer\Mindestmassenstrom</b> mit Differenzdruckwächer p04-p05 an der Beruhigungsstrecke angeschlossen.
Relais 15	<b>Thyristor Leistungssteller FEHLER</b>
Relais 16	<b>Frequenzumrichter FEHLER</b>
Relais 17	<b>Notbelüftung EIN</b>
Relais 18	<b>Alarmsignal, Sirene u. Signallicht</b>

Tab. 4.10: Relaisliste

#### 4.2.2 Zu steuernde Komponenten

Beim vorliegenden Festbett-Regenerator werden fünf Absperrklappen sowie ein Heizregister über einen Thyristor-Leistungssteller und ein Roots-Gebüses über einen Frequenzumrichter geregelt und gesteuert. Die Komponenten werden über 4 mA bis 20 mA Strom- bzw. über 24 V Spannungssignale gesteuert.

**Das Heizregister** wird über einen Thyristor-Leistungssteller der Firma JUMO (Abbildung 4.11) gesteuert. Der Thyristor wird über ein 4 mA bis 20 mA Stromsignal angesteuert und schaltet die Versorgungsspannung auf das Heizregister beziehungsweise sperrt diese. Der Steller arbeitet im Impulsgruppenbetrieb (Abbildung 4.12). Hierbei schaltet die Netzspannung für den Prozentsatz des Reglerstellgrades auf die Last. Bei einem Stellgrad von 60 % (entspricht 13.6 mA) schaltet der Steller drei Netzspannungsvollwellen auf die Last und sperrt zwei Vollwellen.



Abb. 4.11: JUMO TYA-202 Thyristor-Leistungssteller, Quelle: JUMO Bedienungsanleitung

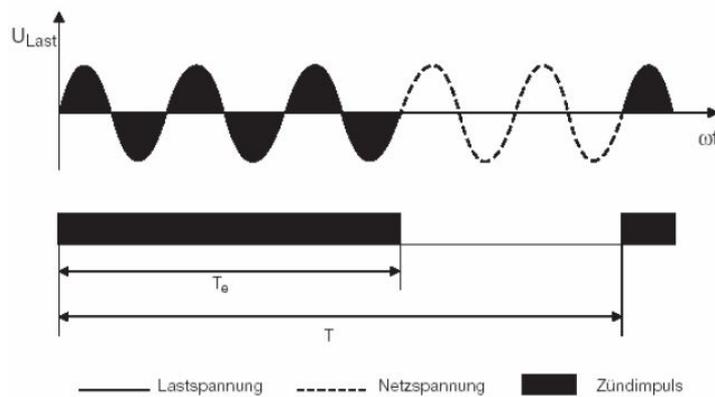
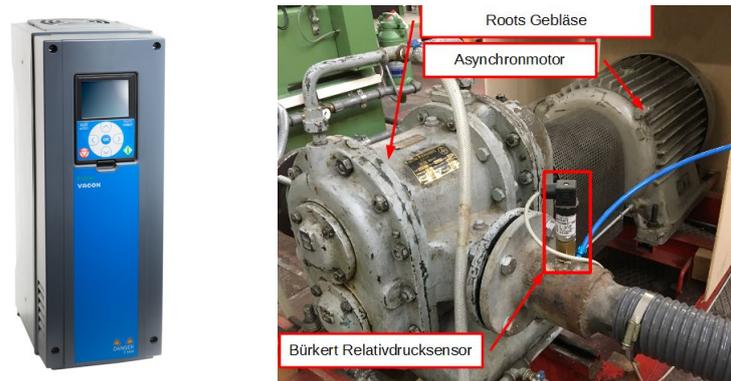


Abb. 4.12: Funktionsweise des Impulsgruppenbetriebes beim Thyristor-Leistungssteller von JUMO. Quelle: JUMO Bedienungsanleitung

**Das Gebläse** wird über einen Frequenzumrichter (FU) der Firma VACON gesteuert (Abbildung 4.13). Über die ausgegebene Frequenz wird die Drehzahl des Asynchronmotors und somit die geförderte Luftmenge bestimmt. Der Zusammenhang zwischen Frequenz und Massenstrom kann der Abbildung 4.14 entnommen werden.

Der FU ist so eingestellt, dass er eine Frequenz von 0 Hz bis 50 Hz ausgeben kann, um im Falle einer Fehlbedienung die Anlage nicht zu beschädigen.



(a) Frequenzumrichter VACON 100 (b) Ärzten Roots Gebläse

Abb. 4.13: Frequenzumrichter und Gebläse

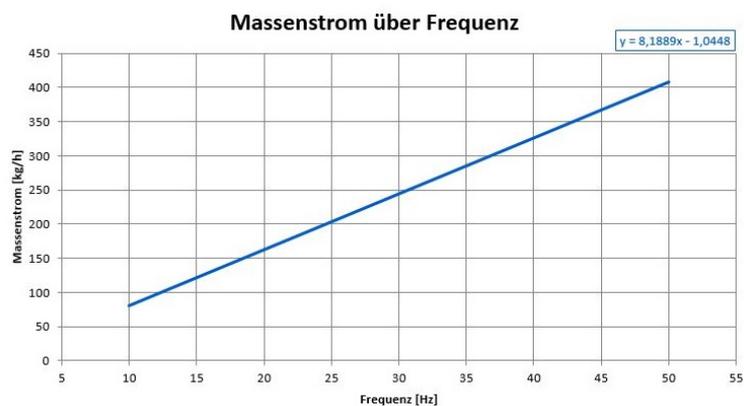


Abb. 4.14: Massenstrom in Abhängigkeit von der Frequenz

**Die Absperrklappen** der Firma AGS (Abbildung 4.15) werden für die Steuerung der Luftströmung im Festbett-Regenerator benötigt. Sie werden durch die Digital-Ausgänge der B&R gesteuert und geben bei Erreichen der gewünschten Stellung ein digitales Signal an die Steuerung zurück.



Abb. 4.15: AGS Stellantriebe Absperrklappe, Quelle: AGS

### 4.2.3 Hartverdrahtete Anlagen-Sicherheit

Über eine hartverdrahtete Serienschaltung von 24 VDC Relais mit 2 Wechslerkontakten wird ein unzulässiger Betrieb des Heizregisters verhindert. Im Störfall wird der über 230 AC angesteuerte Heizungsschutz stromlos geschaltet. Gleichzeitig wird jedes hartverdrahtete Signal über einen zweiten potentialfreien Kontakt zur SPS geführt. Die hartverdrahtete Sicherheit soll im Betrieb nur zur Anwendung kommen, wenn die softwareseitige Überwachung aufgrund eines Absturzes der X20 versagt. Die softwareseitige Sicherheitskette ist in Kapitel 4.3.1 zusammengefasst.

Der **Heizungsschutz** wird über Relais 12 über die SPS geschaltet. Um das Heizregister vor einem unzulässigen Betrieb zu schützen, kann das Heizregister nur betrieben werden, wenn Relais 13 (Übertemperaturüberwachung), Relais 14 (Gebläsewächter, Abbildung 4.17), Relais 16 (Frequenzumrichter Fehler) und die Verriegelung über den Hilfskontakt Motorschutz, den Betrieb freigeben (Tabelle 4.11).

Relais 13	<b>Übertemperaturüberwachung</b> mit zwei Thermoelmenten direkt am Heizregister. Am potentialfreiem Kontakt des galvanisch getrennten Wandlers für Heizelemente schaltet das Relais 13 bei <b>THR1 &gt; 582 °C</b> . Öffnerkontakt 21-22 schaltet den <b>Heizungsschutz stromlos</b> . Der galvanisch getrennte Wandler wandelt das Signal von THR1 gleichzeitig in ein analoges 4 mA-20 mA Signal (0-700 °C), welches zur gleichzeitigen Überwachung an die SPS weitergeleitet wird.
Relais 14	<b>Strömungswächter\Mindestmassenstrom</b> mit Differenzdruckwächter (R&I: p04-p05) an Beruhigungsstrecke. Der potentialfreie Kontakt des Differenzdruckwächters betätigt den Schließerkontakt 21-24 des Relais 14 erst ab Erreichen des Mindestdifferenzdrucks von <b>p04-p05 &gt; 735 Pa</b> und schaltet den Heizungsschutz erst ab diesem Zeitpunkt frei. Die Schaltschwelle von <b>p04-p05 &gt; 735 Pa</b> wurde auf einen unterbrechungsfreien Mindestmassenstrom von <b>ṁ = 125 kg/h</b> eingestellt. Ab ca. <b>ṁ = 120 kg/h</b> schaltet der Differenzdruckwächter den <b>Heizungsschutz stromlos</b> . Die maximal mögliche Temperatur an den Heizelementen THR1 und THR2 ist in Abbildung 4.16 ersichtlich. Max. Temperatur <b>THR1 = 480 °C</b> , <b>THR2 = 420 °C</b> bei <b>ṁ = 125 kg/h</b> . <b>Max. Temperaturangabe von Hersteller Carlo Loysch 650 °C</b> .

Tab. 4.11: Sicherheitskette Heizregister

Das Heizregister schaltet sich durch die hartverdrahtete Sicherheitskette bei einem zu

geringen Massenstrom über den Strömungswächter (Abbildung 4.17) stromlos. Der geringste zulässige Massenstrom für den Betrieb des Heizregisters liegt bei 125 kg/h. Die Temperatur des Heizregisters (THR) bleibt auch nach längerem Betrieb mit dem kleinsten zulässigen Massenstrom unter 480 °C (Abb. 4.16). Die Steuerung schaltet das Heizregister bei **THR1** > 540 °C bzw. **THR2** > 500 °C stromlos. Für einen fehlerfreien Messungsbetrieb ist ein Massenstrom von mindestens 130 kg/h zu empfehlen. Durch Schwankungen des Massenstroms und somit Unterschreitung der 125 kg/h, schaltet sich das Heizregister stromlos und würde die Messung unbrauchbar machen.

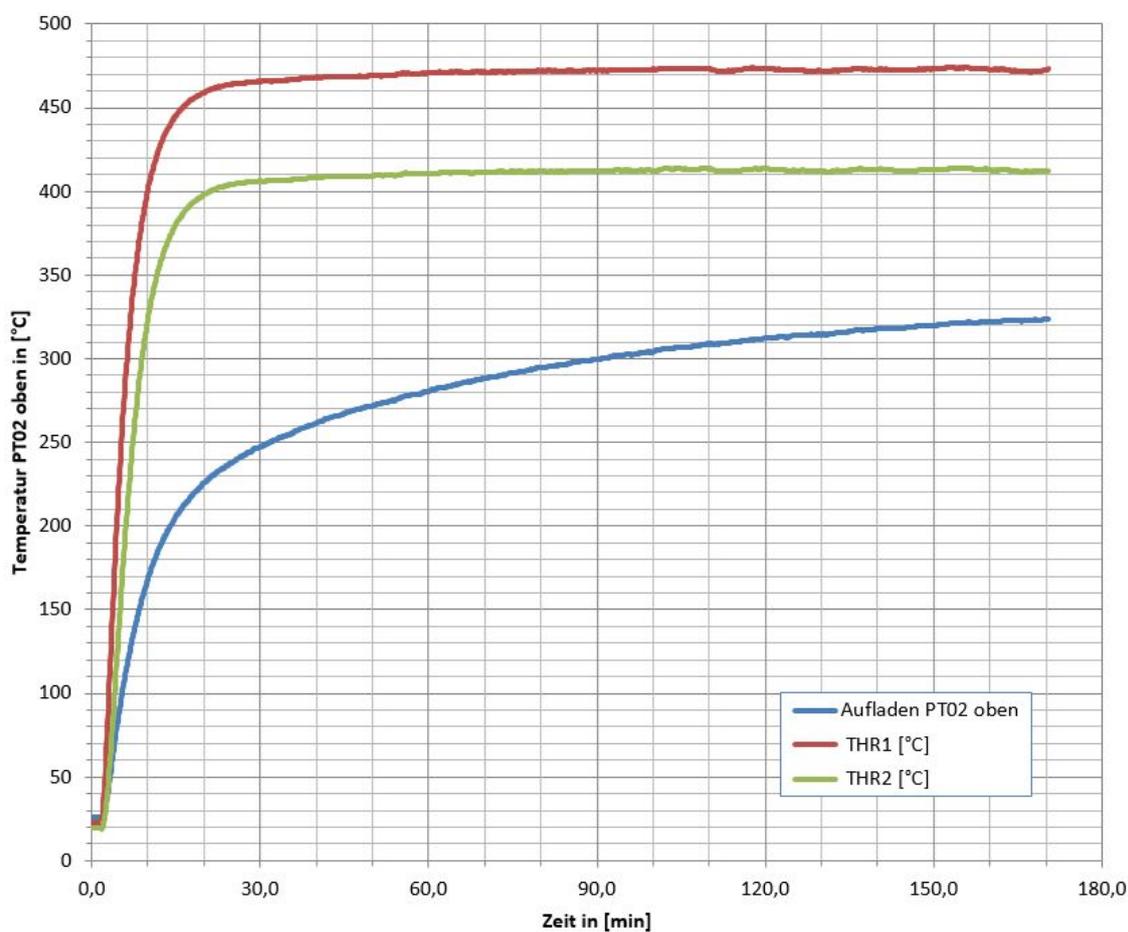


Abb. 4.16: Maximale Vorlauf- und Heizregistertemperatur bei mindest zulässigem Massenstrom von 125 kg/h



Abb. 4.17: Strömungswächter

Die **Notbelüftung** zur Kühlung der Heizelemente mittels Druckluft wird über Relais 17 von der SPS eingeschaltet. Bei Ausfall des Gebläses oder einem Stromausfall, wird die Druckluftkühlung automatisch aktiviert. Gleichzeitig kann jederzeit über einen Hand-schalter am Schaltkasten die Notbelüftung zur Kühlung der Heizelemente manuell eingeschaltet werden.

Bei Ausfall des Gebläses bei 100 % Heizleistung kühlt die Druckluft das Heizregister innerhalb von 15 Minuten auf 150 °C ab (Abbildung 4.18). Das Überschwingen der Kurven beim Ausfall der Gebläses lässt sich dadurch erklären, dass die Druckluftkühlung erst einsetzt, wenn der Massenstrom auf unter 100 kg/h sinkt. Bis zum Unterschreiten dieser Grenze heizt das Luftheizregister mit der Restwärme nach, bleibt jedoch deutlich unter dem oberen Grenzwert von 650 °C.

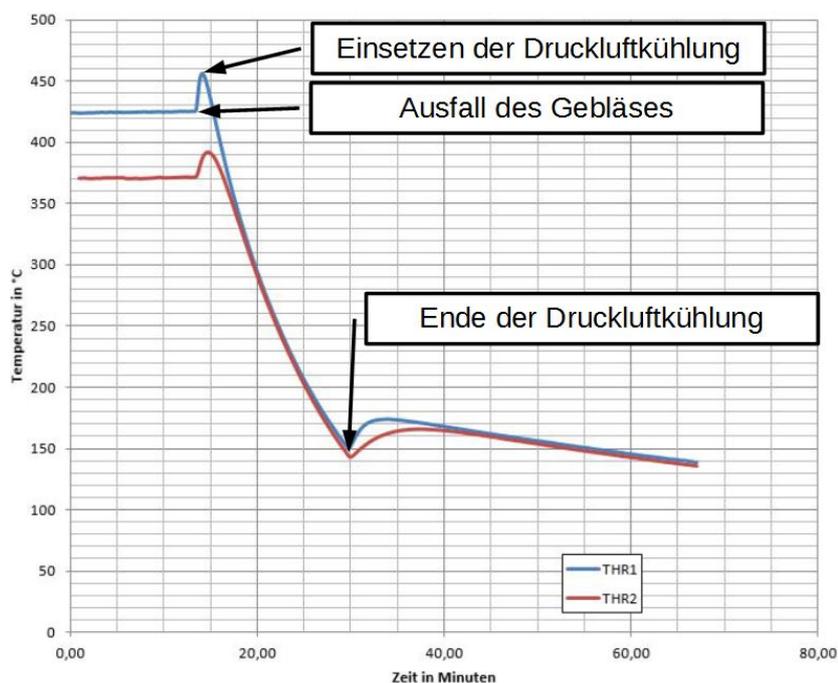


Abb. 4.18: Druckluftkühlung nach Gebläseausfall bei 100 % Heizleistung

### NOT AUS

Zum sofortigen Abschalten der Versuchsanlage befinden sich insgesamt drei Not-Aus-Schalter in der Nähe der Anlage. Durch betätigen einer der Not-Aus Taster werden die Leistungskomponenten, das Gebläse mit dem Frequenzumrichter sowie das Heizregister über den Gebläse-Motorschütz bzw. den Heizregisterschütz stromlos gemacht. Die Notbelüftung des Heizregister setzt automatisch über die Hallendruckluft im stromlosen Fall des federrückstellenden 2/2 Wegeventils ein. Das passiert im Falle eines Not-Aus oder eines Stromausfalls.

Um die Anlage **nach einem NOT AUS** wieder betreiben zu können, müssen zuerst alle Not-Aus-Schalter entriegelt werden. Anschließend muss die Anlage über die grüne Betriebstaste am Schaltschrank wieder quittiert werden. Leuchtet die grüne Betriebslampe, ist der Regenerator betriebsbereit.

### 4.3 Steuerungssoftware

Das Programm für die Steuerung wurde im *strukturierten Text* mit der von der Firma B&R eignen Entwicklungsumgebung **Automation Studio V 4.2.6.110** erstellt. Das Steuerungsprogramm ist in Modulen bzw. Funktionen aufgeteilt, um es bei Bedarf leicht erweitern zu können.

#### 4.3.1 Softwareseitige Sicherheit

Jedes sicherheitsrelevante hartverdrahte Signal wird über einen zweiten potentialfreien Kontakt zur SPS geführt. Dabei ist die Anbindung so ausgeführt, dass 24 VDC für den normalen Betriebszustand und 0 VDC für den Störfall stehen.

Um bei einer kurzzeitigen Sensorstörung keine falsche Störungsmeldung zu erzeugen und in weiterer Folge die Anlage unnötigerweise außer Betrieb zu nehmen, werden einige Fehler über einen Timer erfasst. Die Störungen müssen für eine vordefinierte Zeitspanne andauern, um Folgemaßnahmen auszulösen.

Das Auftreten einer Warnung oder einer Störung, welche ein Not-Aus verursacht, wird mit einer 90 dB Hupe und einem roten Blinklicht am Schaltschrank signalisiert. Im Falle einer Warnung ertönt die Hupe auf- und abschwelldend, während im Störfall, welcher von der SPS erfasst wird, die Hupe im Dauerton ertönt.

Die Störfälle, welche von der X20 Steuerung zu einem Fehler oder Not-Aus führen, sind in der nachfolgenden Tabelle 4.12 zusammengefasst. Die Verzögerung gibt hier an, wie

lange der Fehler andauern muss, bevor es zu einem Warnsignal bzw. Not-Aus kommt.

Sicherheitsfunktion	Beschreibung	Verzögerung
Übertemperatur Heizregister	<p><b>THR1 &gt; 540 °C</b>  <b>THR2 &gt; 500 °C</b>  <b>hardverdrahtet THR1 &gt; 580 °C</b>                      max. Temperatur Heizregister am Heizelement 650 °C laut Hersteller                      Ist eine der beiden Thermofühler THR1 oder THR2 für 5 s über der festgelegten Grenztemperatur von 540 °C bzw. 500 °C wird der Heizungsschutz über Relais 12 ausgeschaltet.</p>	5 s SPS NOT AUS
Differenzdruck	Fällt die Freigabe für den Mindestmassenstrom (120 kg/h) über den Differenzdruckwächter (<735 Pa), so wird die Leistung des Thyristorstellers über den Analogausgang der SPS auf 0 % gestellt. Die Heizung wird somit ausgeschaltet.	5 s SPS Not-Aus
Überdruck nach Gebläse, Maximaldruck in Anlage	<p><b>p03 &gt; 9000 Pa</b>                      Stellt sich direkt am Ausgang des Gebläses p03 ein Überdruck über 9000 Pa ein, so wird der Heizungsschutz über Relais 12 und der Gebläseschutz über Relais 11 ausgeschaltet.</p>	5 s SPS NOT AUS
Frequenzumrichter Fehler	Beim Auftreten eines Fehlers angezeigt vom Frequenzumrichter wird die Anlage unverzüglich in NOT AUS Position gebracht, die Heizung und das Gebläse werden abgeschaltet.	0 s SPS NOT AUS
Massenstromfehler	Liegt der Sollwert des Massenstroms außerhalb des Normbereichs des aktuell anliegenden Frequenzwerts, so wird nach 30 s ein Warnsignal ausgegeben und nach 3 min ein NOT AUS Signal ausgegeben und die Heizung sowie das Gebläse werden stromlos geschaltet. Der Normbereich ist mit $m = (f \cdot 8,2365 - 2,5777) \pm 10\%$ definiert.	30 s Warnsignal 3 min SPS Not-Aus

<p>Thyristorfehler Lastbruch</p>	<p>Kommt es während dem Betrieb zu einem Lastbruch, so meldet die Lastbruchüberwachung des Thyristorstellers einen Fehler an die B&amp;R SPS die das Heizregister unverzüglich über den Heizungsschutz stromlos schaltet. Einstellungen am Thyristorsteller 8 % Lastfehler, Unterstromüberwachung, U<sup>2</sup>-Regelung</p>	<p>0 s SPS NOT AUS</p>
<p>Thyristorfehler Leistungsfehler</p>	<p>Zusätzlich zur Lastbruchüberwachung über den Thyristorsteller wird über den vom Thyristorsteller zurückgegebenen analogen Leistungswert kontinuierlich Soll- und Ist-Leistung des Luftheizregisters von der SPS erfasst. Sollte es zu einer Abweichung von 6 % des aktuell eingestellten Soll-Leistungswertes für länger als 25 s kommen, wird das Heizregister über den Leistungsschutz stromlos geschaltet. Mit dieser Funktion kann auch eine Laständerung die während dem Stillstand der SPS auftritt, überwacht und an den Benutzer weitergegeben werden.</p>	<p>25 s SPS NOT AUS</p>
<p>Strömungsweg unterbrochen</p>	<p>Werden während dem laufenden Betrieb im Wartungsmodus eine oder mehrere Klappen so angesteuert, dass kein freier Strömungsweg vorhanden ist, so wird die Heizung über den Heizungsschutz und das Gebläse über den Motorschutz stromlos geschaltet. Im Automatikmodus ist eine Fehlbedingung über die Software ausgeschlossen.</p>	<p>0 s Gebläse AUS → HR AUS</p>

Klappenfehler - Endlage nicht erreicht	Wird beim Umschalten einer Klappe die Klappenendposition innerhalb von 45 s nicht erreicht, so wird nach einer weiteren Verzögerung von 1 s eine Warnung ausgegeben. Nach 5 min geht die Anlage in NOT AUS, Gebläse und Heizung werden über die Leistungsschütze abgeschaltet.	1 s Warnsignal 5min SPS NOT AUS
Notbelüftung	Fällt der Massenstrom unter $\dot{m} < 110$ kg/h und die Heizelemente sind heißer als $THR1 = THR2 > 200$ °C dann wird automatisch die Notbelüftung eingeschaltet und die Heizelemente werden bis auf $THR1$ und $THR2 < 150$ °C mittels Druckluft abgekühlt.	0 s

Tab. 4.12: SPS Sicherheitsüberwachung

Im Falle einer Störung wechselt die Visualisierung des Versuchsablaufs am PC auf die Anlagenüberwachungsansicht, auf der die Art des Fehlers angezeigt wird. Um die Anlage wieder in Betrieb nehmen zu können, muss die Fehlerursache behoben werden, bevor man über den Button *SPS Fehlerquittierung* den Fehler zurücksetzen und den Regenerator wieder betreiben kann.

### 4.3.2 Datenaufzeichnung

Ziel der Datenaufzeichnung ist es, in einem bestimmten Zeitintervall alle wichtigen Messgrößen in einer Datenbank oder Datei abzuspeichern. Die Daten müssen in einem universellen Format vorliegen, sodass die Auswertung mit einem beliebigen Programm vorgenommen werden kann.

Bei dieser Versuchsanlage werden die Daten in einem vom Benutzer vorgegebenen Zeitintervall direkt auf eine CompactFlash Karte, die sich in der X20 befindet, gespeichert. Die Daten werden in einer sogenannten *csv (Comma-separated values)* Datei abgelegt. Beim Umrechnen der Messsignale in ihre physikalische Größe werden auch die Kalibrierdaten berücksichtigt. Da bei allen Sensoren ein linearer Zusammenhang zwischen

Messsignal und physikalischer Größe besteht, wurde unter Berücksichtigung der Kalibrierdaten die Methode der linearen Regression gewählt.

Die Zeit zwischen zwei Aufzeichnungspunkten beträgt mindesten 4 Sekunden, da es sonst zu einer Überschreitung der Zykluszeit kommt. Bei aufgezeichneten Messgrößen wird das arithmetische Mittel zwischen zwei Aufzeichnungspunkten gespeichert. Die Steuerungseinheit fragt alle 100 ms das Messsignal aller Sensoren ab. Bei einem Aufzeichnungsintervall von 4 Sekunden mittelt das Programm somit über 40 Messdaten pro Sensor.

### 4.3.3 Temperatur-gesteuerter Messungsmodus

Über das Hauptmenü der Visualisierung gelangt man in den temperaturgesteuerten Messungsmodus. Dieser Modus erlaubt es eine Messung unbeaufsichtigt durchzuführen. Eine Messung wird hier durch folgende Parameter bestimmt: **Messungsbezeichnung**, **Anzahl der Zyklen**, **Massenstrom**, **Lade Temperatur**, **Entlade-Temperatur**, **Aufladen bis PT01**, **Ladung halten**, **Entladen bis PT02**, **Nach letztem Zyklus** und **Maximale Vorheizzeit der Ladetemperatur** (siehe Abbildung 4.19).

Im Anhang F, Seite XXXVII befindet sich zum bessere Verständnis ein detailliertes Ablaufschema des Programmes.

Messungsmodus - Temperaturgesteuert					Startseite
Messungsbezeichnung	Anzahl der Zyklen	Massenstrom	Lade Temperatur	Entlade Temperatur	
Messung03	5	145.00 kg/h	300.0 °C	60.0 °C	
Parameter ändern	Aufladen bis PT01	Ladung halten	Entladen bis PT02	Messung starten	
Zeit für Änderung: 60 s	240.0 °C	30 min	200.0 °C		
Nach letztem Zyklus	Max. Vorheizzeit d. Ladetemp				
Beenden	30 min				

Abb. 4.19: Einstellungen für den temperaturgesteuerten Messungsmodus

- **Messbezeichnung:** Name der Messung. Es wird automatisch eine Datei mit dem eingegebenen Namen und dem aktuellem Datum auf dem Speicher der B&R generiert. Bsp.: „*Test\_D#2016-11-08.csv*“. Für eine fehlerfreie Datenaufzeichnung ist zu beachten, dass keine Datei mit derselben Messbezeichnung bereits auf der Steuerung vorhanden sein sollte.
- **Anzahl der Zyklen:** Bestimmt die Anzahl der Zyklen, die in dieser Messung durchgeführt werden sollen. Ein Zyklus entspricht einmal Aufladen und Entladen des Speichers.

- **Massenstrom:** Mit dem hier angegebenen Massenstrom in kg/h wird der gesamte Versuch gefahren. Der kleinste Massenstrom mit dem ein Versuch gefahren werden kann liegt hier bei ca. 130 kg/h, da das Heizregister bei einem Massenstrom von unter 125 kg/h nicht verwendet werden kann.
- **Lade Temperatur:** Temperatur des Wärmeträgermediums in °C mit der der Regenerator geladen wird. Zu beachten ist hier die maximale Ladetemperatur in Abhängigkeit vom Massenstrom. Wenn die Ladetemperatur zu hoch eingestellt ist, heizt das Heizregister durchgehend mit 100 % Leistung.
- **Entlade Temperatur:** Temperatur des Wärmeträgermediums in °C mit der der Regenerator entladen wird. Ist die Entladetemperatur kleiner als die Raumtemperatur (Fühler beim Ansaugstutzen) schaltet das Programm das Heizregister nicht ein und entlädt den Behälter mit der Raumtemperatur.
- **Aufladen bis PT01:** Gibt die Ladetiefe in °C an. Dabei wird der Speicher so lange geladen, bis der Fühler PT01 über die hier angegebene Temperatur steigt.
- **Ladung halten:** Zeit in Minuten zwischen dem Lade- und Entladevorgang des Speichers in der der Speicher nicht durchströmt wird. Nach Ablauf dieser Zeit wird der Speicher entladen.
- **Entladen bis PT02:** Gibt die Entladetiefe in °C an. Der Speicher wird so lange vom Wärmeträgermedium mit der vorgegebenen Entladetemperatur durchströmt, bis der Sensor unter die hier angegebene Temperatur sinkt.
- **Nach letztem Zyklus:**
  1. Beenden: Die Messung wird nach dem Entladen des letzten Zyklus beendet.
  2. Aufladen und Temperatur halten: Nach dem Entladen des letzten Zyklus wird der Speicher wieder aufgeladen. Nach Erreichen der Ladung wird der Regenerator ordnungsgemäß ausgeschaltet. Die Datenaufzeichnung läuft hier weiter bis die Messung durch den Benutzer gestoppt wird.
- **Maximale Vorheizzeit der Ladetemperatur:** Zeit in Minuten die maximal über den Bypass vorgeheizt werden soll. Ist die hier angegebene Zeit verstrichen, schaltet der Regenerator automatisch auf Laden-unabhängig davon, ob die Ladetemperatur erreicht wurde. Wird die Ladetemperatur vor dem Verstreichen der Zeit erreicht, beginnt der Regenerator sofort mit dem Ladevorgang.
- **Messung starten:** Startet den Messvorgang mit den eingegebenen Parametern. Die Eingabefelder werden während der Messung gesperrt, um ein versehentliches

Ändern zu verhindern.

- **Parameter ändern:** Mit dieser Schaltfläche können während einer Messung die Eingabefelder für die Parameter freigeschaltet und geändert werden. Die Änderung wird in der laufenden Messung sofort übernommen. Die Eingabefelder sperren sich automatisch nach 15 s wieder.

## 5 Anlagen Spezifikationen

Vor Inbetriebnahme des Festbett-Regenerators wurden einige Probemessungen durchgeführt, um die Dynamik der Anlage besser kennen zu lernen. Die aus diesen Probemessungen gewonnenen Daten können für die Planung zukünftiger Messungen herangezogen werden.

### 5.1 Druck am Gebläsestutzen

Um die Anlage nicht zu beschädigen, darf diese nicht mit einem zu hohen Überdruck betrieben werden. Der zulässige Überdruck ist durch die Absperrklappen beschränkt und liegt laut Hersteller bei 500 mbar ( $\cong 50$  kPa). Im fehlerfreien Fall besteht keine Gefahr, dass die Obergrenze überschritten wird (siehe Abbildung 5.1). Die Abbildung 5.1 zeigt den Druck am Stutzen bei den drei Betriebsarten LADEN, ENTLADEN und BYPASS. Wird der Regenerator im Bypass betrieben, herrscht ein minimal größerer Überdruck am Stutzen. Der Unterschied ist jedoch für den sicheren Betrieb von keiner Bedeutung. Zudem wird der Druck am Stutzen von der SPS überwacht und schaltet das Gebläse bei Überschreiten des höchstzulässigen Drucks selbstständig aus.

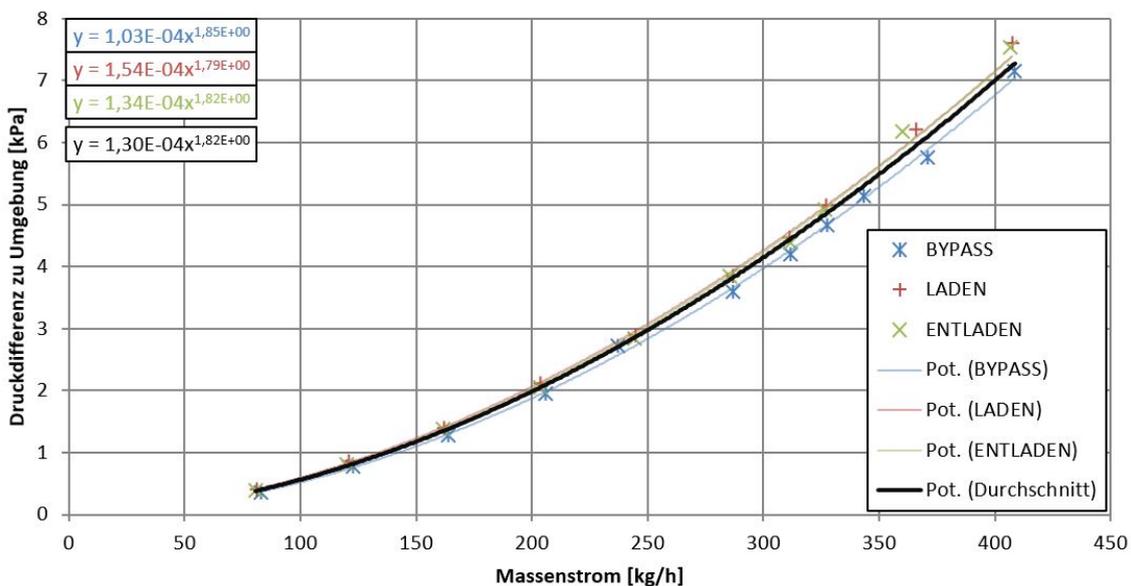


Abb. 5.1: Druck am Gebläsestutzen (p03) bei 20 °C mit potentieller Regressionskurve

## 5.2 Druckabfall an der Festbettschüttung

Ein wichtiges Ergebnis der Messungen ist der Druckabfall an der Schüttung im Speicher, welcher vom *Kalinsky* Differenzdrucksensor (Abbildung 4.3) gemessen wird. Der Druckabfall hängt nicht nur von der verwendeten Schüttung ab, sondern auch von ihrer Temperatur. Mit steigender Temperatur des Festbettes, nimmt auch der Druckabfall zu. Abbildung 5.2 zeigt den Druckabfall beim Laden bzw. Entladen in Abhängigkeit des Massenstromes bei einer Schüttungstemperatur von 20 °C. Die Kurve für den Druckabfall bei 300 °C wurde aus Erfahrungswerten der Messungen, welche während der Arbeit von Michalka [5] und Drochter [4] entstanden sind, gebildet und ist ca. um den Faktor 2,5 größer als bei entladenen Zustand (Abbildung 5.2).

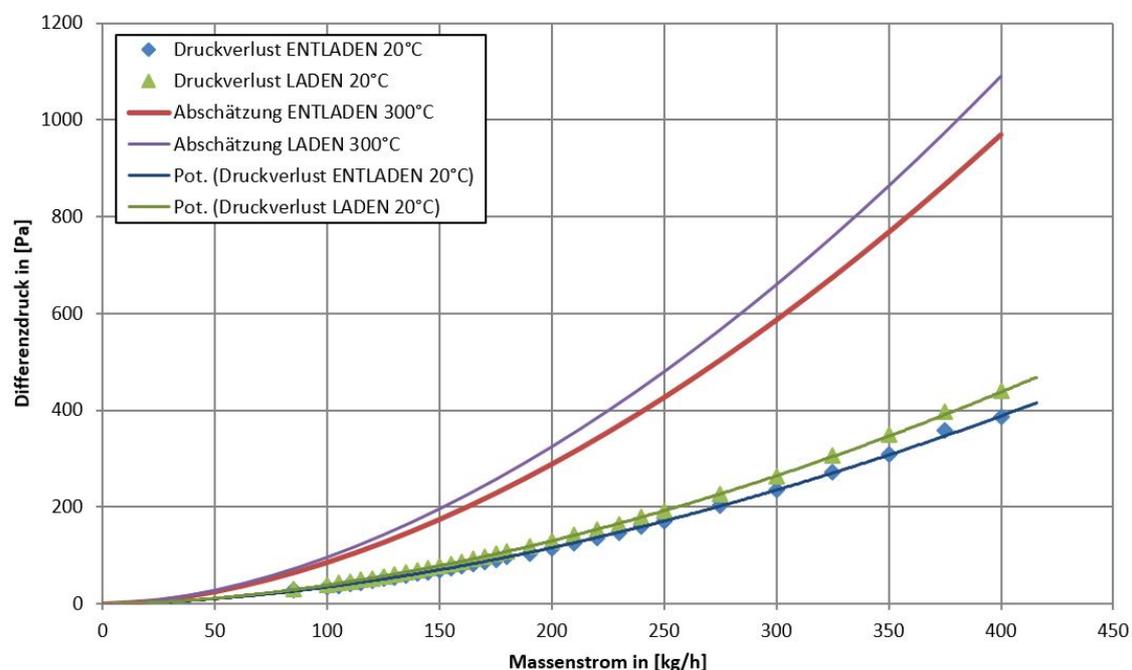


Abb. 5.2: Druckabfall (p04-p05) am Festbett bei 20°C mit geschätzten Werten bei 300°C

## 5.3 Maximale Vorlauftemperatur am Bypass

Die Temperaturen die beim Laden bzw. Entladen des Speichers erreicht werden können, hängen stark vom eingesetzten Massenstrom ab. Die Kennlinien in diesem Kapitel sollen ein Gefühl für diesen Zusammenhang geben und das transiente Verhalten beim Aufheizen bzw. Abkühlen zeigen, das zu erwarten ist.

Um bessere Messergebnisse erzielen zu können, wird vor dem Ladevorgang das Heizregister über den Bypass vorgeheizt. Die Temperatur im Bypass wird vom Thermofühler PT03 gemessen. Da die Leistung des Heizregisters begrenzt ist, steigt die Temperatur nach einer bestimmtem Zeit nicht mehr an. Diese hängt primär vom Massenstrom ab, kann aber auch von Faktoren wie Ansaugtemperatur und Luftfeuchtigkeit, beeinflusst werden. Abbildung 5.3 zeigt die maximal erreichbare Vorlauftemperatur in Abhängigkeit vom Massenstrom des Wärmeüberträgermediums.

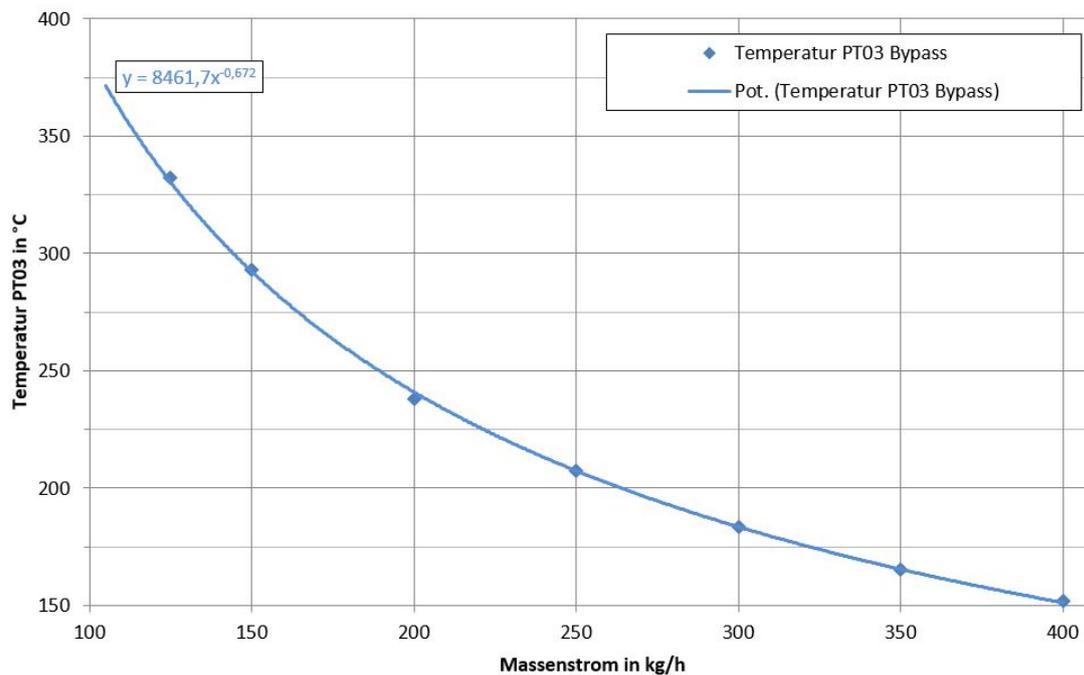


Abb. 5.3: Maximale Vorlauftemperatur (PT03) in Abhängigkeit vom Massenstrom bei 100 % Heizleistung

## 5.4 Vorheizen des Luftheizregister

Ziel des Vorheizens ist es, einen möglichst steilen Temperaturgradienten am Vorlauffühler PT02 am Begin des Lade- und Entladevorganges zu erreichen.

Abbildung 5.4 veranschaulicht den Unterschied der Vorlauftemperatur des Wärmeüberträgermediums mit bzw. ohne Vorheizphase. Die grüne Kurve zeigt die Vorlauftemperatur ohne vorherigem Vorheizen. Die blaue Kurve zeigt die erreichte Vorheiztemperatur am Bypass mit anschließendem Umschalten auf Laden. Beim Vorheizen des Luftheizregister über den Bypass wird nach 4 Minuten eine Temperatur von 200 °C erreicht, ohne Vorheizen hingegen werden 200 °C erst nach 14,5 Minuten erreicht.

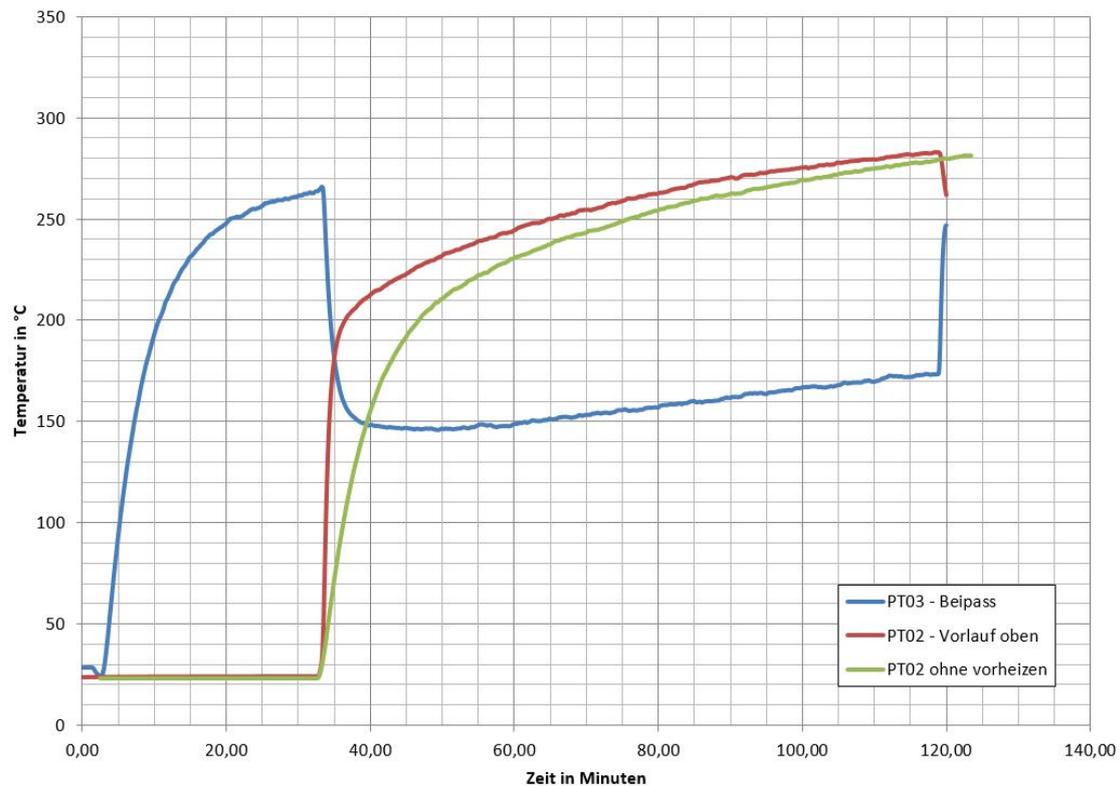


Abb. 5.4: Vergleich Vorlauftemperatur (PT02) mit und ohne Vorheizen über den Bypass bei 145 kg/h

Wie der Abbildung 5.4 entnommen werden kann, gegenüber der ursprünglichen Wärmeträgerfluidführung, mit einer Vorheizphase ein wesentlich steilerer Temperaturgradient am Vorlauffühler erreicht werden. Das wird benötigt um möglichst schnell die gewünschte Ladetemperatur am Vorlauffühler zu erreichen.

## 6 Messreihen

Nach den Spezifikationsversuchen wurden Langzeitversuche mit dem überarbeiteten Festbett-Regenerator durchgeführt. Mit dem ersten Langzeitversuch, der noch vom anwesenden Personal überwacht wurde, wurde die Anlage auf Langzeitbetriebssicherheit überprüft. Fehler im Messungsablauf wurden dokumentiert und vor der erneuten Inbetriebnahme im Programmcode ausgebessert, um eine Langzeitversuchstauglichkeit gewährleisten zu können.

Der erste Langzeitversuch wurden mit annähernd den selben Parametern wie der Langzeitversuch von Drochter [4] geplant, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Bei den Langzeitversuchen von Drochter [4] konnte keine konstante Vorlauftemperaturen und Massenströme realisiert werden, da die ursprüngliche Anlage ohne Regelung betrieben wurde.

In Tabelle 6.1 sind die Parameter, welche eine Messung definieren und am Anfang jeder Messungsbeschreibung angegeben werden, beschrieben. Ein Zyklus besteht aus einem vollständigen Lade- und Entladevorgang.

Alle Messungen wurden mit dem in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Speicherinventar durchgeführt. Für weitere Messauswertungen wird auf die zur Zeit der Fertigstellung dieser Arbeit noch in Bearbeitung befindliche Bachelorarbeit von Mascherbauer P. [8] verwiesen.

Variable	Beschreibung
Zyklen	Anzahl der Zyklen die gefahren werden
$\dot{m}$ [kg/h]	Massenstrom in kg/h mit der die Messung durchgeführt wird.
$T_{\text{laden}}$ [°C]	Temperatur in °C mit der der Speicher geladen wird.
$T_{\text{entladen}}$ [°C]	Temperatur in °C mit der der Speicher entladen wird.
$T_{\text{unten}}$ [°C]	Maximale Luftaustrittstemperatur in °C am unten angebrachten Rücklauffühler PT01 bis zu der der Speicher geladen wird. $T_{\text{unten}}$ dient gleichzeitig als Maß für die Ladetiefe.
$T_{\text{oben}}$ [°C]	Maximale Luftaustrittstemperatur in °C am oben angebrachten Rücklauffühler PT02 bis zu der der Speicher entladen wird. $T_{\text{oben}}$ dient gleichzeitig als Maß für die Entladetiefe.

Tab. 6.1: Parameter, die eine Messung definieren

## 6.1 Referenzmessung TU290-TO50

Die hier beschriebene Messung dient zum Vergleich der Messung, die bereits von Droch-ter [4] durchgeführt wurde. Die Messung mit der Bezeichnung TU290-TO50 wurde gewählt, da gemäß der Erfahrungswerte von der Originalanlage und der zur Verfügung stehenden Heizleistung, dabei die maximale Temperaturdifferenz der Luftaustrittstemperatur über einen kompletten Zyklus bei gleichzeitig akzeptabler Zyklusdauer erreicht wurde. Somit steht diese Messung für ein vollständiges Laden und Entladen mit maximal erreichbaren Schüttungstemperaturen. Die Parameter, die zum Beginn der Messung eingestellt wurden, können aus Tabelle 6.2 entnommen werden. Die Parameter wurden nach dem ersten Zyklus an die Dynamik der Versuchsanlage angepasst. Details können dem Kapitel 6.1.2 entnommen werden.

Variable	geplante Parameter	realisierte Parameter
Zyklen	4	4
$\dot{m}$ [kg/h]	146,4 kg/h	146,4 kg/h
$T_{\text{laden}}$ [°C]	330 °C	330 °C (ca. 310 °C erreicht)
$T_{\text{entladen}}$ [°C]	0 °C (Raumtemperatur)	0 °C (Raumtemperatur)
$T_{\text{unten}}$ [°C]	290 °C	265 °C
$T_{\text{oben}}$ [°C]	50 °C	50 °C

Tab. 6.2: Parameter für Referenzmessung

### 6.1.1 Massenstrom

Da der Massenstrom  $\dot{m}$  bei der Messung von Drochter [4] noch nicht geregelt werden konnte, wurde für die Referenzmessung der Mittelwert vom Massenstrom über die gesamte Langzeitmessung von Drochter gewählt. Abbildung 6.1 zeigt den gemessenen Massenstrom über die gesamte Versuchsdauer, die von Drochter durchgeführt wurde.

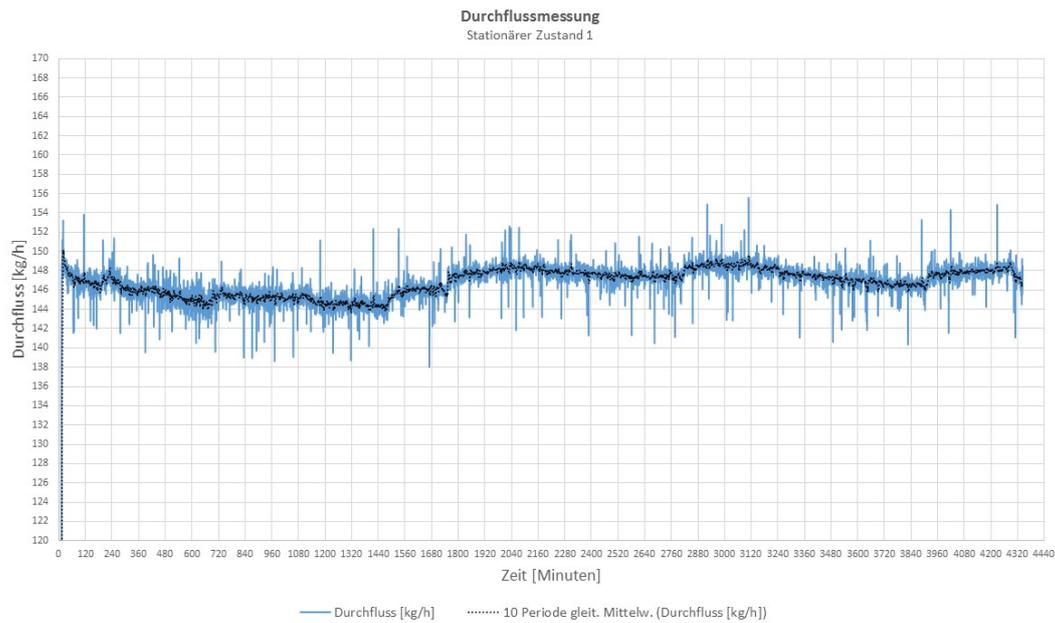


Abb. 6.1: Gemessener Massendurchfluss während der Referenzmessung von Drochter [4]

Abbildung 6.2 zeigt den Verlauf der Massenstrommessung, welche im Zuge dieser Arbeit ermittelt wurde. Durch die Möglichkeit, den Massenstrom regeln zu können, kann jetzt ein wesentlich stabilerer Massenstrom generiert werden. In Abbildung 6.2 sind jene Phasen, in denen das Heizregister mit einem höheren Massenstrom abgekühlt wurde nicht abgebildet, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

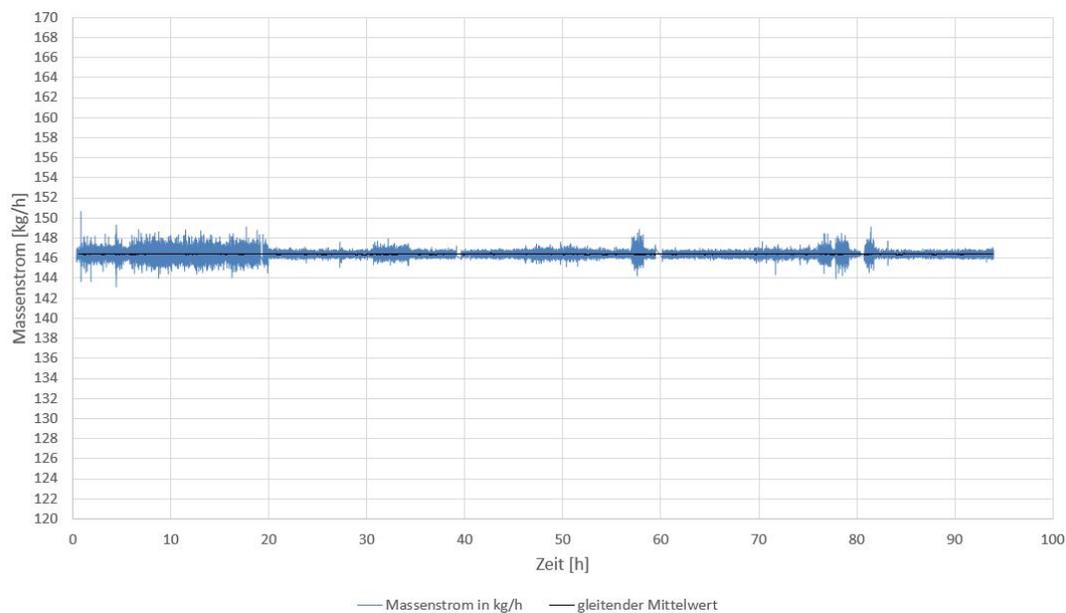


Abb. 6.2: Gemessener Massendurchfluss während der Referenzmessung im Zuge dieser Arbeit.

### 6.1.2 Temperaturverteilung

In Abbildung 6.3 sind die Temperaturverläufe der Messung aus [4] zu sehen. Die Temperaturverläufe der Referenzmessung, die im Zuge dieser Arbeit gemacht wurden, können der Abbildung 6.4 entnommen werden.

Beim ersten Laden der Referenzmessung (Abbildung 6.4) konnte die gewünschte Ladetiefe von  $T_{\text{unten}} = 290 \text{ °C}$  nach einer Ladezeit von fast 20 Stunden nicht erreicht werden. Um die Zyklen fortsetzen zu können wurde die Ladetiefe im ersten Zyklus auf  $T_{\text{unten}} = 265 \text{ °C}$  herabgesetzt. Warum die gewünschte Ladetiefe nicht erreicht werden konnte, ist noch nicht restlos geklärt. Eine Vermutung ist, dass eine nicht vernachlässigbare Wärmemenge über Wärmeleitung in der Bypass-Verrohrung verloren geht. Die Vermutung wird dadurch bestärkt, dass die Ladetemperatur  $T_{\text{laden}}$  nicht über  $310 \text{ °C}$  steigt. Bei der Messung von Drochter liegt diese hingegen bei  $330 \text{ °C}$ . Ein weiteres Indiz für den hohen Wärmeverlust über die Bypass-Leitung ist der Fakt, dass die Temperatur im Bypass im Ladevorgang auf  $220 \text{ °C}$  (Abbildung 6.5) steigt, obwohl diese beim Laden nicht durchströmt wird. Da die Bypass-Leitung kurz nach dem Temperaturfühler (PT03) nicht mehr isoliert ist, kann die Wärme dort ungehindert entweichen. Des Weiteren wurde die Rohrleitungslänge aufgrund des Umbaus bis zum Eintritt in den Speicher sowie um die Rohre der Bypassleitung erhöht. Somit wurde die Fläche zur Umgebung direkt nach dem Heizregister drastisch erhöht, wodurch trotz Isolierung mehr Wärme verloren geht.

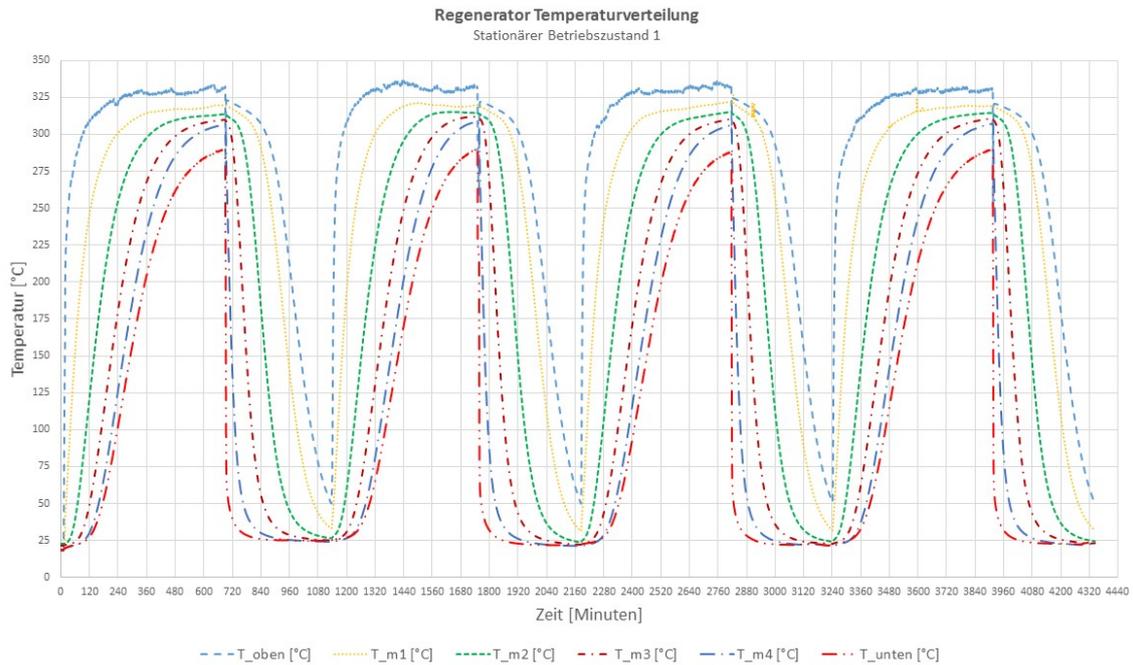


Abb. 6.3: Temperaturverlauf bei der Messung von Drochter. Quelle: Drochter [4]

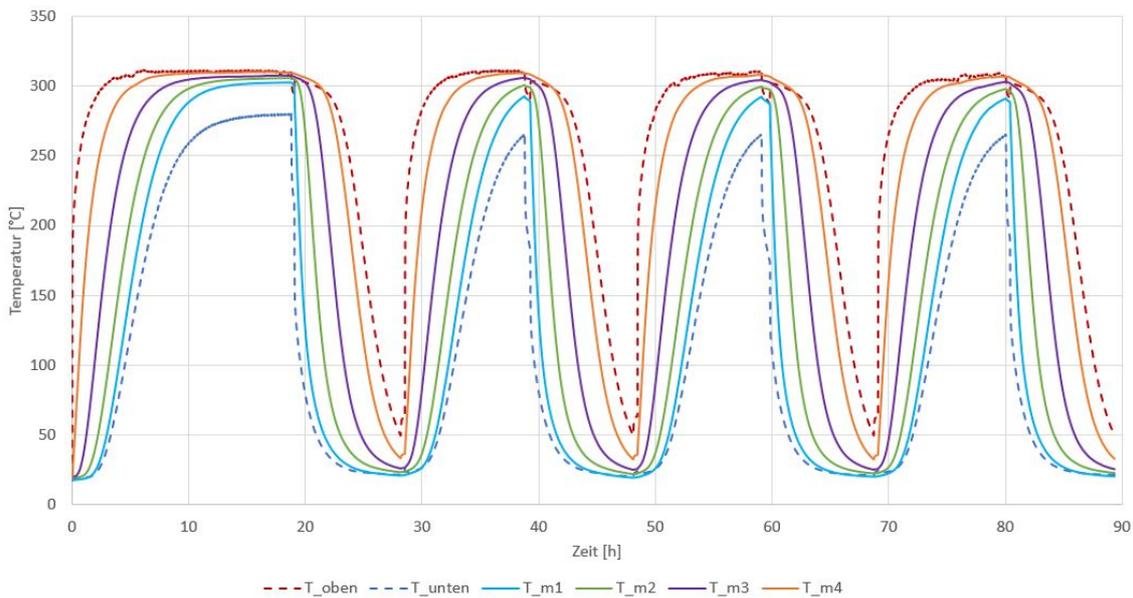


Abb. 6.4: Temperaturverlauf der Referenzmessung

Um die Vermutung zweifelsfrei bestätigen zu können, sollte bei der nächsten Überarbeitung des Festbett-Regenerators die Bypass-Verrohrung ebenfalls isoliert werden und eine weitere Referenzmessung durchgeführt werden. Zusätzlich könnte die Isolierdicke zumindest kurz nach dem Heizregister im Bypass und bis zum Speichereintritt erhöht

werden.

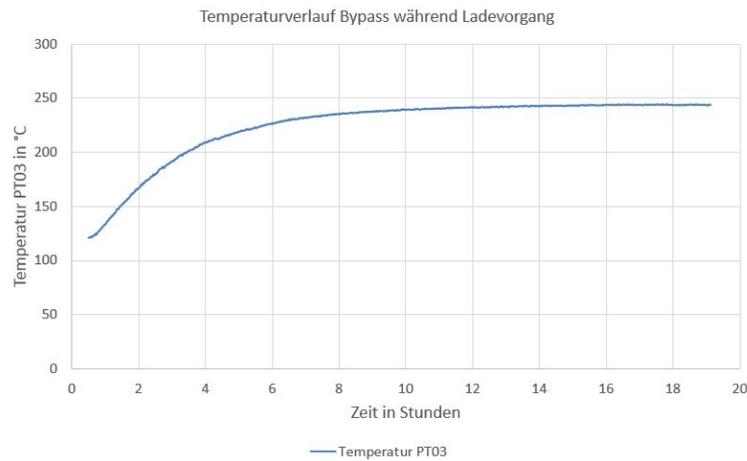


Abb. 6.5: Temperaturverlauf der nicht durchströmten Bypass-Leitung während eines Ladevorganges

### 6.1.3 Auswertung des eingeschwungenen Zyklus

Abbildung 6.6 zeigt den Temperaturverlauf des letzten eingeschwungenen Zyklus der Messung. Die schwarzen senkrechten Linien markieren das Ende des Laden bzw. den Anfang des Entladens. Im Bereich zwischen den schwarzen Linien wird das Heizregister über die Bypass-Leitung abgekühlt und der Speicher nicht durchströmt. In Tabelle 6.3 sind die Zeitspannen für das Laden und Entladen aller vier Zyklen angegeben. Ein Vergleich zeigt, dass der eingeschwungene Zustand des Speichers nach zwei Zyklen erreicht ist. Bei der Referenzmessung hat sich der eingeschwungene Zustand erst nach drei Zyklen eingestellt, da die Parameter nach dem ersten Zyklus geändert wurden.

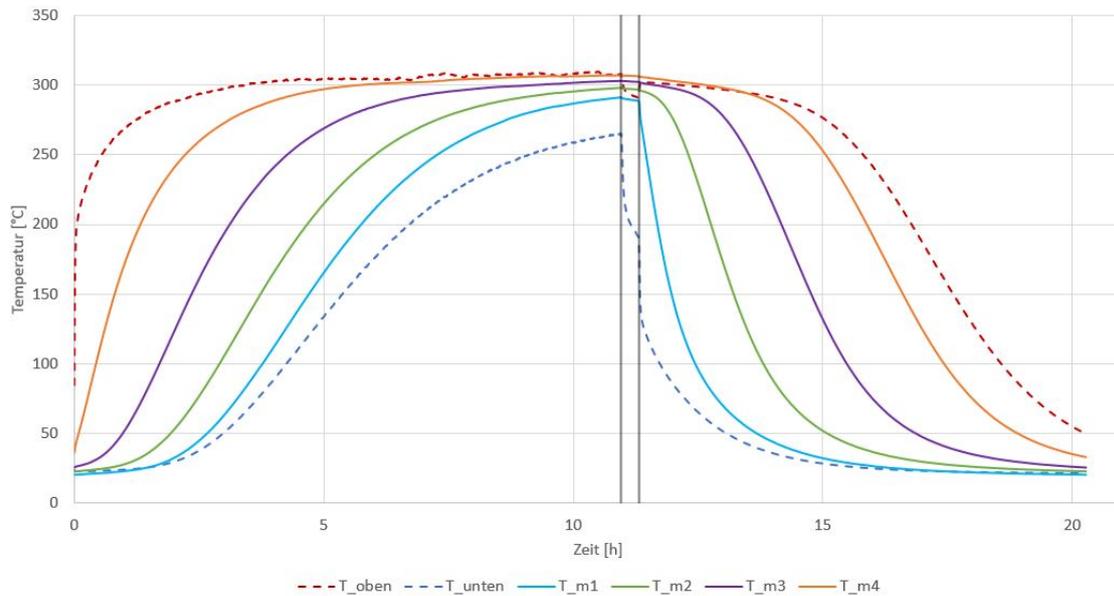


Abb. 6.6: Temperaturverlauf des stationären Zustandes

Zyklus	Ladezeit [hh:mm]	Entladezeit [hh:mm]
1	18:46	09:06
2	10:15	08:49
3	10:38	08:54
4	10:57	08:57

Tab. 6.3: Füllmasse gesamt von Rohrebene und -bündel

Die Energie und die Leistung der eingeschwungenen Zyklen der Messung von Drochter und der Referenzmessung sind in den Abbildungen 6.7 bzw. 6.8 dargestellt. Die nutzbare Energie liegt in der Referenzmessung bei 64,87 kWh. Bei der Messung die von Drochter [4] durchgeführt wurde, lag die nutzbare Energie bei 69,32 kWh. Dieser Unterschied lässt sich mit der nicht erreichten Ladetiefe bei der Referenzmessung erklären.

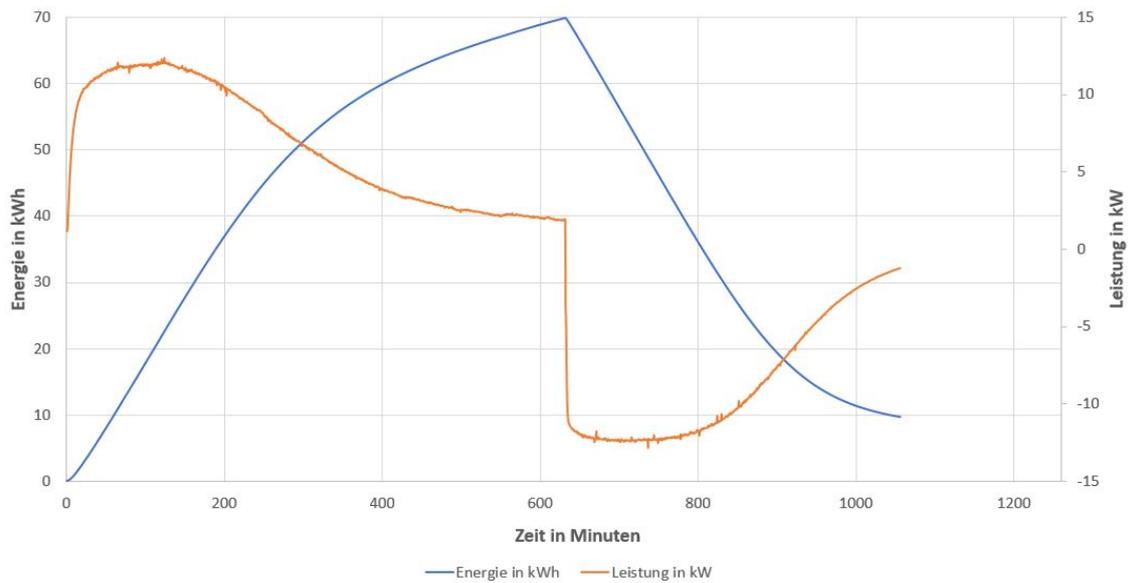


Abb. 6.7: Leistung und Energie des eingeschwungenen Zyklus - Messung Drochter, Quelle: Michalke [5]

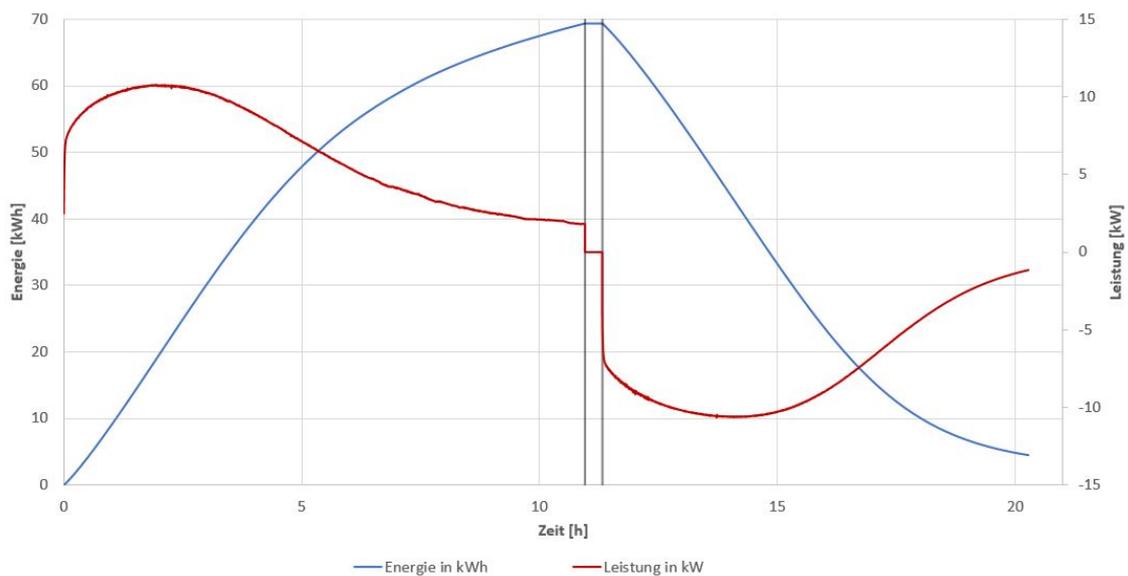


Abb. 6.8: Leistung und Energie des eingeschwungenen Zyklus - Referenzmessung

Der Druckabfall über die Schüttung im Behälter ist in Abbildung 6.9 dargestellt. Aufgrund der Temperaturerhöhung in der Schüttung während des Ladevorgangs nimmt gleichzeitig die Dichte der durchströmenden Luft über den Strömungsweg durch die Schüttung ab. Mit der geringeren Dichte der Luft steigt bei gleichzeitig konstantem Massenstrom die Strömungsgeschwindigkeit. Somit steigt der Druckabfall über das Festbett

beim Laden von 82 Pa auf 182 Pa und fällt beim Entladen von 118 Pa auf 69 Pa. Aufgrund der konischen Form des Behälters ist der Druckabfall beim Laden beim selben Ladezustand und Massenstrom im Allgemeinen höher. Beim Umschaltvorgang wurde ein Druckabfall von 17 Pa gemessen, obwohl der Behälter nicht durchströmt wurde. Das lässt sich durch die Temperaturverteilung im Behälter erklären, welche zu einer natürlichen Konvektionsströmung im Behälter führt.

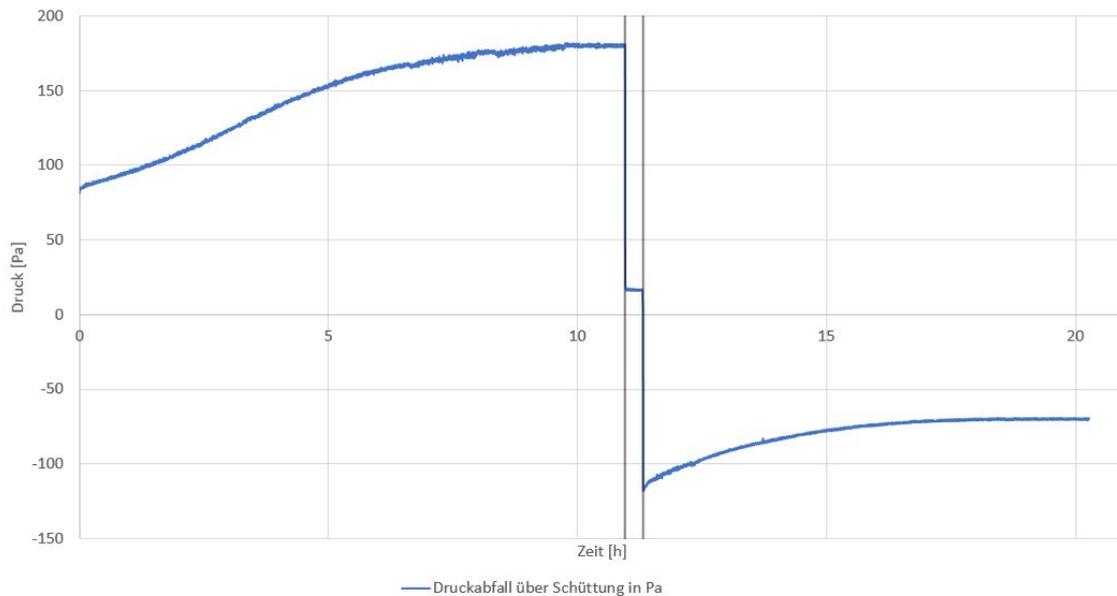


Abb. 6.9: Druckabfall über die Schüttung des eingeschwungenen Zyklus - Referenzmessung

## 6.2 Variation des Massenstromes

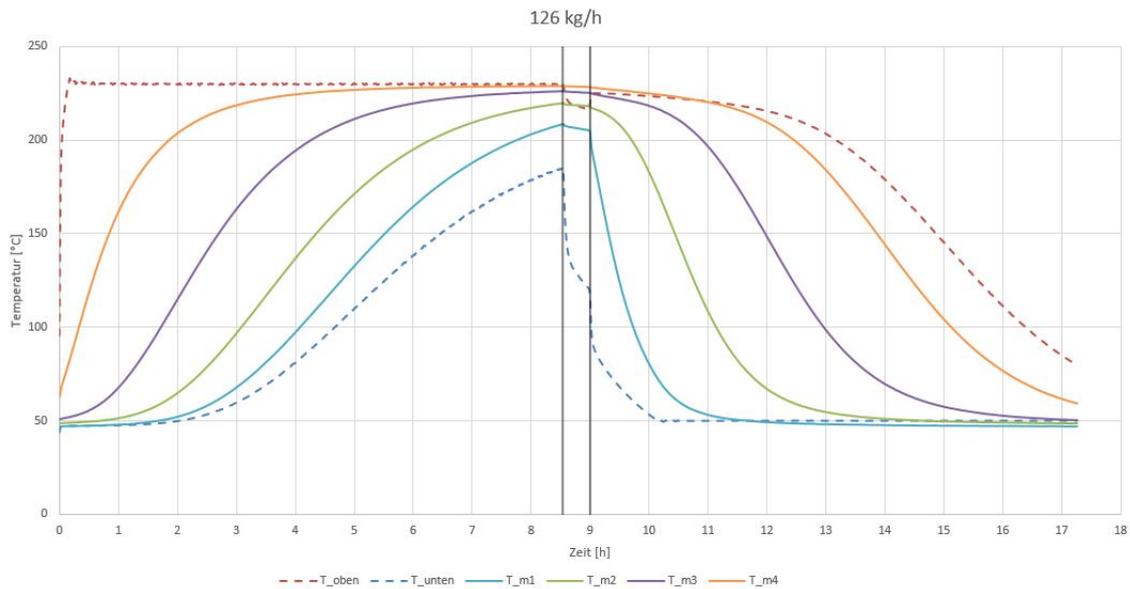
In einer weiteren Versuchsreihe wurden vier unterschiedliche Massenstrom-Varianten getestet. Die Parameter der Messung können der Tabelle 6.4 entnommen werden.

Variable	Wert
Zyklen	3
$\dot{m}$ [kg/h]	126, 150, 175, 200
$T_{\text{laden}}$ [°C]	230
$T_{\text{entladen}}$ [°C]	50
$T_{\text{unten}}$ [°C]	185
$T_{\text{oben}}$ [°C]	80

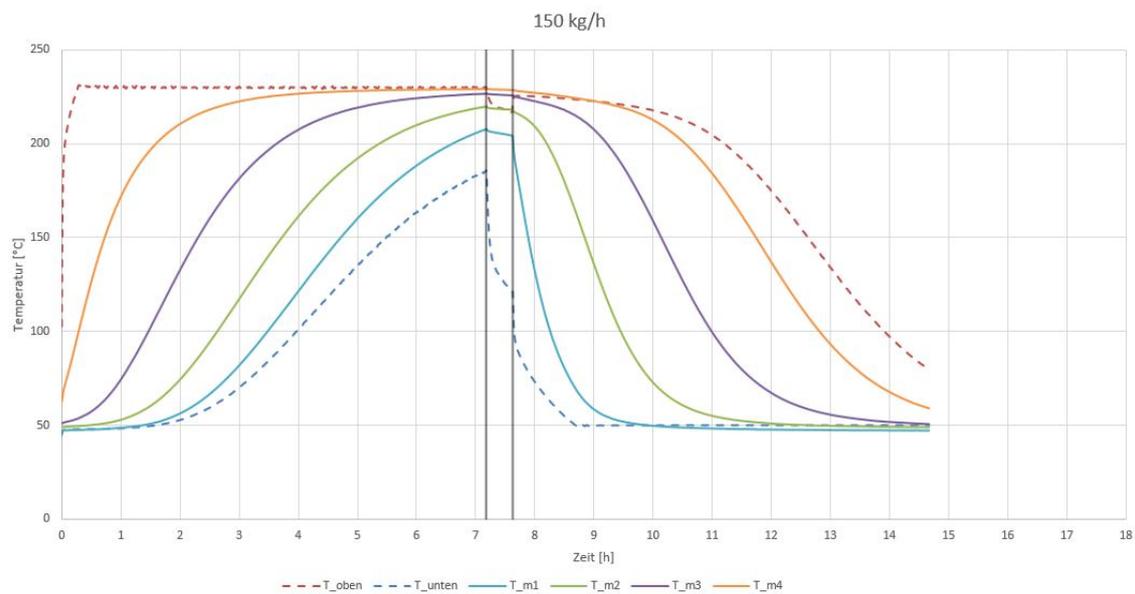
Tab. 6.4: Parameter für Referenzmessung

### 6.2.1 Temperaturverteilung

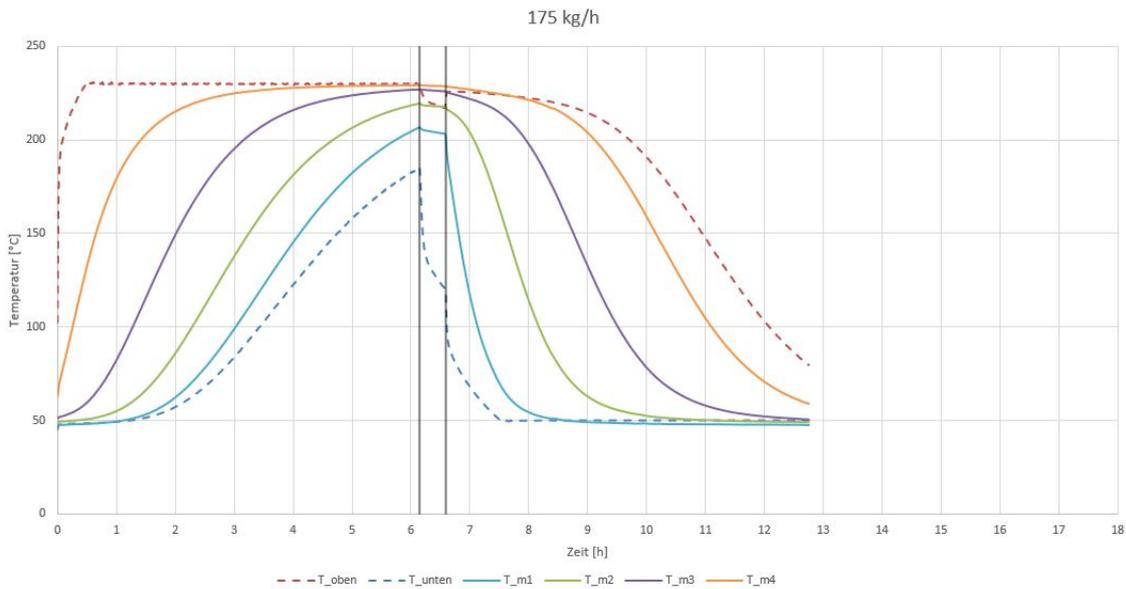
Für die Auswertung wurde für alle vier Messungen der dritte Zyklus herangezogen, welcher dem eingeschwungenen Zustand der Temperaturverteilung im Behälter entspricht. Die Temperaturverteilung des eingeschwungenen Zustandes ist in Abbildung 6.10 (a)-(d) dargestellt.



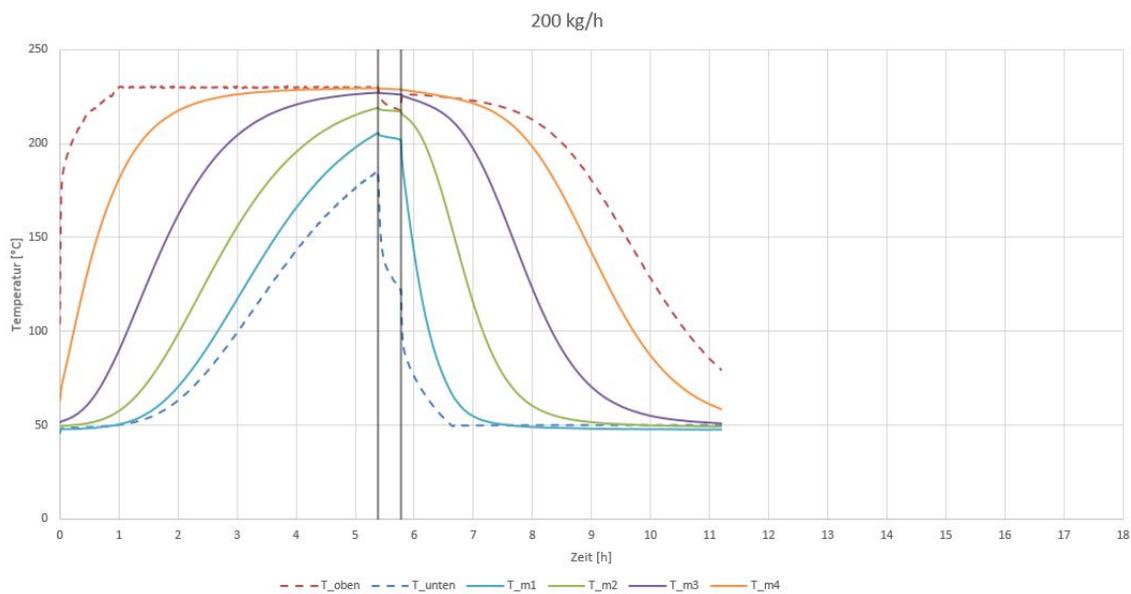
(a) Massenstrom: 126 kg/h



(b) Massenstrom: 150 kg/h



(c) Massenstrom: 175 kg/h



(d) Massenstrom: 200 kg/h

Abb. 6.10: Temperaturverlauf des eingeschwungenen Zyklus bei unterschiedlichen Massenströmen

Wie in Tabelle 6.5 bzw. Abbildung 6.11 zu erkennen ist, verkürzt sich die Lade- und Entladezeit mit steigendem Massenstrom. Aufgrund der begrenzten Heizleistung des Heizregisters von 15 kW verlängert sich die Zeitdauer zum Erreichen der Ladelufttemperatur  $T_{\text{luden}}=T_{\text{oben}}=230\text{ °C}$  mit steigendem Massenstrom. Dies muss unbedingt beim Vergleich der Messdaten dieser Versuchsreihe berücksichtigt werden. In den Abbildungen

6.10 (a)-(d) ist klar ersichtlich, dass mit steigendem Massenstrom der Temperaturgradient in den einzelnen Schüttungsebenen ansteigt.

Lade-/Entladezeit	Massenstrom			
	126 kg/h	150 kg/h	175 kg/h	200 kg/h
Ladezeit in [h:mm]	8:34	7:12	6:10	5:25
Entladezeit in [h:mm]	8:18	7:05	6:11	5:27

Tab. 6.5: Lade- und Entladezeiten des Speichers bei verschiedenen Massenströmen

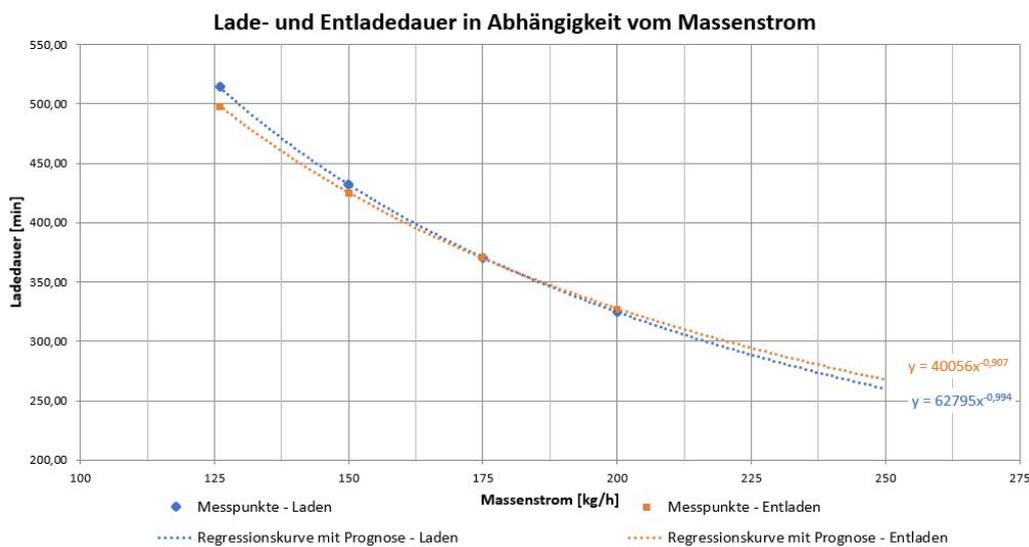


Abb. 6.11: Ladezeit in Abhängigkeit vom Massenstrom

### 6.2.2 Energie und Leistung

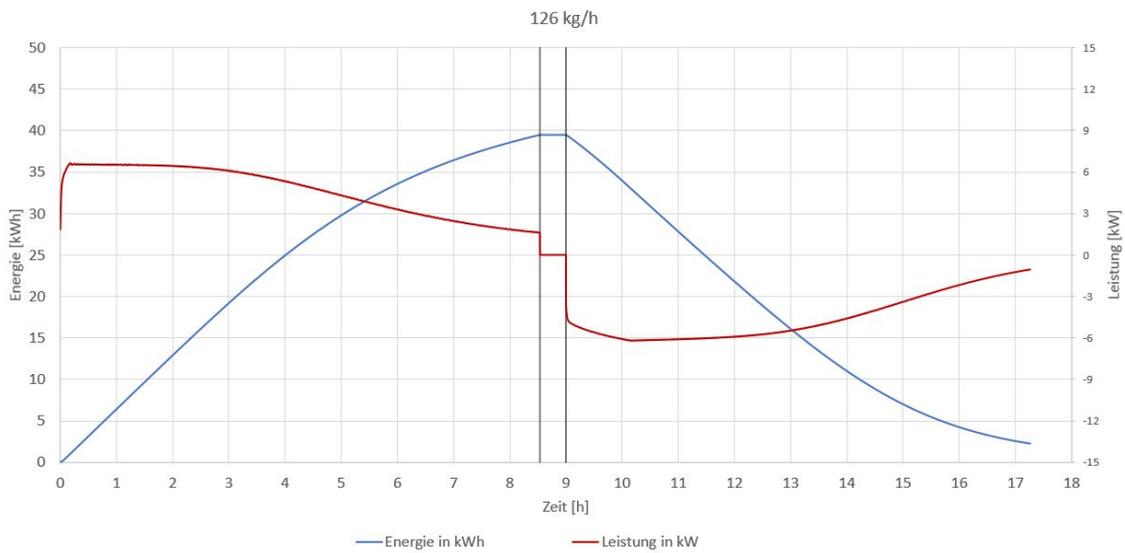
Der Leistungs- bzw. Energieverlauf des eingeschwungenen Zustandes ist in Abbildung 6.12 (a)-(d) dargestellt. Wie zu erwarten war, steigt mit dem höheren Massenstrom auch die übertragene Leistung, was schlussendlich zu der zuvor erwähnten kürzeren Lade- und Entladezeit führt.

Die nutzbare Energie und der Nutzungsgrad des Speichers steigt mit Erhöhung des Massenstromes leicht an. Die kann mit den geringeren thermischen Verlusten aufgrund der kürzeren Zykluszeit erklärt werden. Wobei sich der Nutzungsgrad  $\eta_{\text{nutz}}$  nach Gl. (6.1) berechnet.

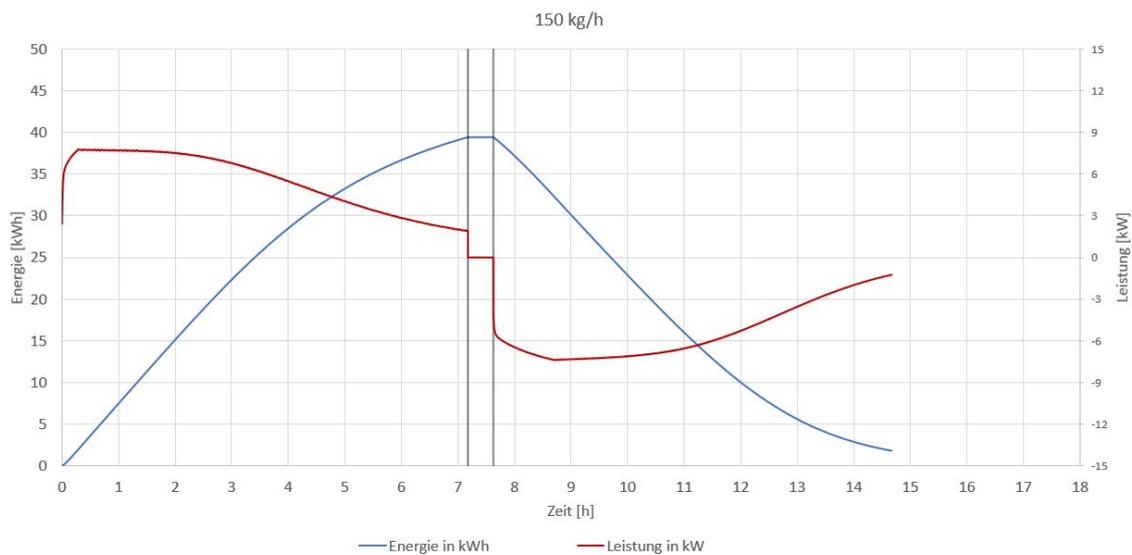
$$\eta_{\text{nutz}} = \frac{E_{\text{ab}}}{E_{\text{nutz}}} \quad (6.1)$$

Beschreibung	Massenstrom			
	126 kg/h	150 kg/h	175 kg/h	200 kg/h
eingespeicherte Energie $E_{ab}$ [kWh]	39,48	39,42	39,31	38,75
nutzbare Energie $E_{nutz}$ [kWh]	37,22	37,59	38,41	38,53
$P_{ein\ max}$ [kW]	6,65	7,78	9,03	10,20
$P_{aus\ max}$ [kW]	6,22	7,31	8,65	38,53
Nutzungsgrad $\eta_{nutz}$	0,94	0,95	0,97	9,89

Tab. 6.6: Leistung und Energie in Abhängigkeit vom Massenstrom



(a) Massenstrom: 126 kg/h



(b) Massenstrom: 150 kg/h

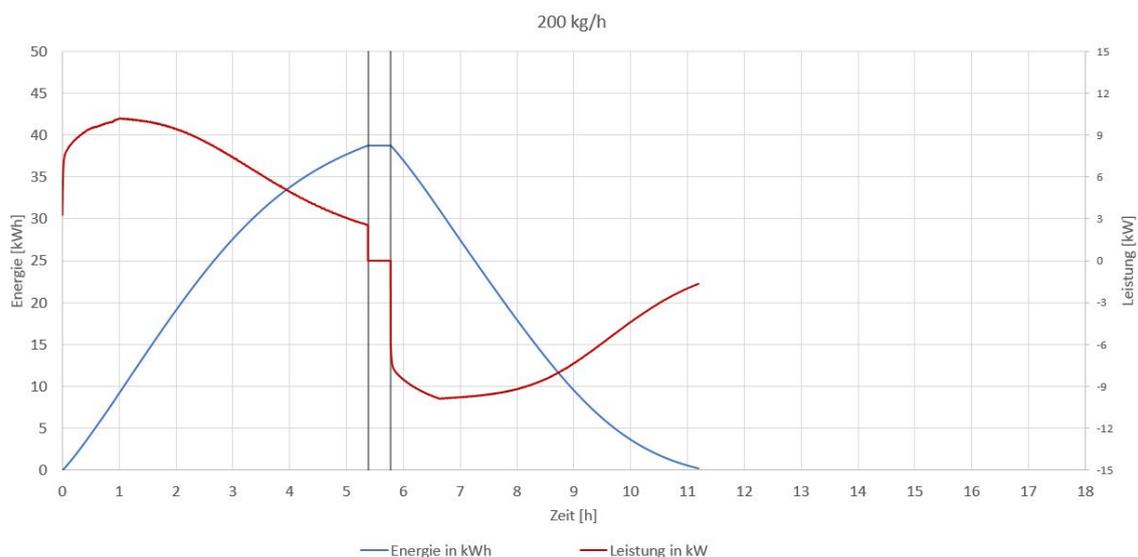
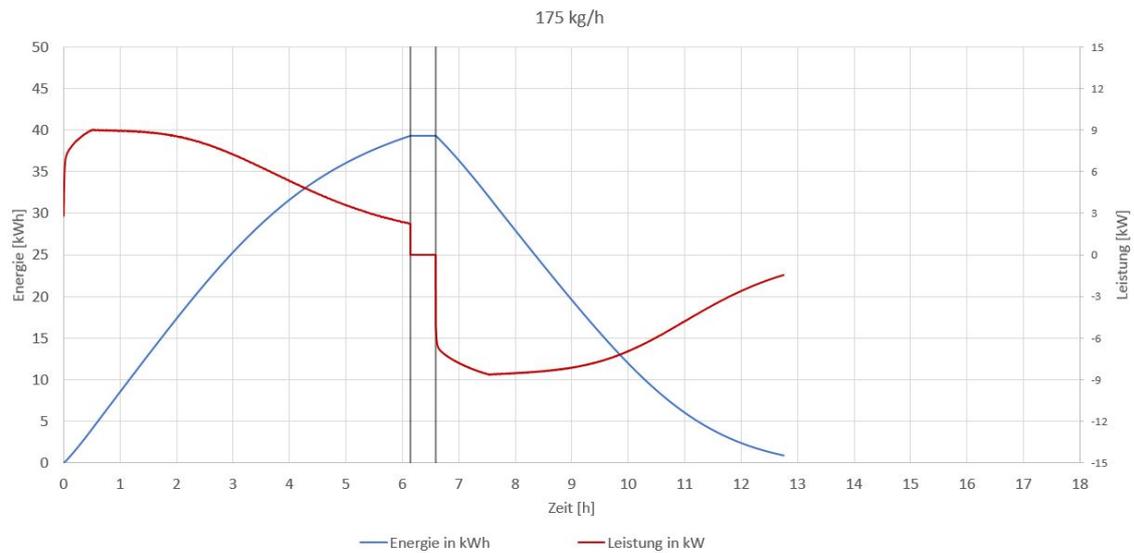


Abb. 6.12: Energie und Leistung bei unterschiedlichen Massenströmen

### 6.2.3 Zusammenfassung und weiterführende Versuche

Zusammenfassend kann man sagen, dass eine Erhöhung des Massenstroms sinnvoll erscheint. Bei einem höheren Massenstrom verkürzen sich nicht nur die Lade- und Entladezeiten, es kann auch der Nutzungsgrad des Speichers erhöht werden. Nur die eingespeicherte Energiemenge verringert sich bei höheren Massenströmen geringfügig.

Als weiterführender Versuch wäre eine Variation des Massenstroms bei gleichbleibender

Heizleistung des Heizregisters interessant. Dies hätte zur Folge, dass mit einem höheren Massenstrom die Vorlauftemperatur sinkt. Die Versuchsparameter müssten so abgestimmt sein, dass bei allen Massenströmen die Ladetiefe erreicht werden kann. Mögliche Versuchsparameter für einen solchen Versuch sind der Tabelle 6.7 zu entnehmen. Die Wahl der Parameter ist hier auf den hier beschriebenen Variations-Versuch angelehnt und soll eine Vergleichbarkeit ermöglichen.

Zyklen	3
$\dot{m}$ [kg/h]	126, 150, 175, 200
$P_{\text{laden}}$ [kW]	10
$P_{\text{entladen}}$ [kW]	1
$T_{\text{unten}}$ [°C]	185
$T_{\text{oben}}$ [°C]	80

Tab. 6.7: Weiterführende Variations-Versuch

Die Ladeleistung des Heizregisters  $P_{\text{laden}}$  von 10 kW entspricht der aufgerundeten Durchschnittsladeleistung vom in diesem Kapitel beschriebenen Versuch bei einem Massenstrom von 200 kg/h. Die Entladeleistung  $P_{\text{entladen}}$  entspricht der abgerundeten Durchschnittsentladeleistung bei 126 kg/h.

Für diesen Versuch muss jedoch zuvor die Steuerungssoftware angepasst werden, um ein Heizen mit konstanter Leistung des Heizregisters zu ermöglichen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde der von Drochter [4] errichtete Festbett-Regenerator überarbeitet und erweitert. Durch die Überarbeitung der Verrohrung ist es jetzt möglich, den Speicher, mit der vom Luftheizregister erwärmten Luft, zu entladen. Durch die hinzugefügte Bypass-Leitung können zudem genauere Messungen durchgeführt werden, da während der Vorheiz- und Abkühlphasen keine Wärme aus den obersten Schichten des Speichers abgeführt wird.

Durch die Automatisierung mit einer SPS-Steuerung können jetzt Messabläufe automatisiert durchgeführt und über die Fernwartung überwacht werden. Auch die Anlagensicherheit konnte durch den Einsatz der Steuerung wesentlich erhöht werden, wodurch auch keine dauerhafte Anwesenheit von Personal im Anlagenbereich notwendig ist.

Mit dem neuen Stand der Anlage ist es jetzt möglich, weitere Schüttungen bzw. Speicherkonzepte zu messen. Hier sei der in der Diplomarbeit von Drochter [4] konstruierte, bereits gefertigte Formsteinbehälter erwähnt, der in dieser Arbeit nicht behandelt wurde. Dieser kann in einer späteren Messungen, nach der Übersiedelung des Festbett-Regenerators in das neue Labor, behandelt werden. Für eine vollständige Messauswertung des Schüttungsbehälters mit Drainageschotter als Speichermedium mit der überarbeiteten Anlage, muss auf Folgearbeiten am Institut für Energietechnik und Thermodynamik verwiesen werden.

Weiters wurde in dieser Arbeit ein Konzept für die Anlage erarbeitet, mit dem man den bestehenden Speicher mit PCM erweitern kann, um eine Kombination aus sensibler und latenter Speichermasse testen zu können.

Für nachfolgende Arbeiten am Festbett-Regenerator sind zum Schluss noch Verbesserungsvorschläge zusammengefasst.

- Vollständige Isolierung der Bypass-Leitung um den Wärmeverlust bei Ladevorgängen zu minimieren.
- Verbesserung der Isolierung zwischen Speicherbehälter und Tischkonstruktion.
- Anpassung der Steuerungssoftware um ein Heizen mit konstanter Leistung zu ermöglichen.
- Anpassung der Steuerungssoftware um den Zyklus über die Dauer des Lade- bzw. Entladevorganges definieren zu können.

## Literatur

- [1] WBGU. *Welt im Wandel - Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation*. 2011.
- [2] M. Sterner. *Energiespeicher - Bedarf, Technologie, Integration*. Springer Vieweg, 2014.
- [3] V. Quaschnig. *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2015.
- [4] P. Drochter. *Auslegung, Konstruktion und Errichtung eines Festbettregenerators*. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2016.
- [5] A. Michalka. *Experimentelle Untersuchungen zum dynamischen Verhalten eines Festbettregenerators*. Bachelorarbeit, Technische Universität Wien, 2016.
- [6] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch, and J. Voßiek. *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [7] VDI Gesellschaft. *VDI-Wärmeatlas* -. Springer Berlin Heidelberg, Wiesbaden, 11. Aufl. edition, 2013.
- [8] P. Mascherbauer. *Bachelorarbeit am Institut für Energietechnik und Thermodynamik*. Technische Universität Wien, 2017.

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Entwicklung des weltweiten Energiebedarfs (WBGU [1]) . . . . .	1
1.2	Lebenszyklen von Energiequellen, Quelle: Deutsche Shell AG . . . . .	2
1.3	Energiekugeln. Die jährliche Sonneneinstrahlung übertrifft den Energieverbrauch und sämtliche Energiereserven um ein Vielfaches (Quaschnig [3], Kapitel 1) . . . . .	3
1.4	Definition eines Energiespeichers (Sterner [2], Kapitel 2) . . . . .	3
1.5	Speicherarten im Vergleich nach Speicherkapazität und Ausspeicherdauer (Sterner [2], Kapitel 12) . . . . .	5
1.6	Klassifizierung der thermischen Energiespeicher (Sterner [2], Kapitel 10) .	5
1.7	Vgl. sensible und latente Wärmespeicherung. Gespeicherte Wärmemenge in Abhängigkeit von der Temperatur . . . . .	6
2.1	Überarbeitetes Verfahrensflißschema (Detail siehe Anhang A, Seite: II) .	9
2.2	Originales Verfahrensflißschema. Quelle: Drochter [4] (Detail siehe Anhang A.1, Seite: I) . . . . .	10
2.3	Empfohlene Länge der Ein- und Auslaufstrecke beim Massendurchflusssensor (Quelle: Handbuch t-mass A 150) . . . . .	12
2.4	Korrekt ausgeführte Flanschverbindung beim Massenstromsensor (Quelle: Handbuch t-mass A 150) . . . . .	12
2.5	Flansch für die Anbindung an den Massenstromsensor . . . . .	13
2.6	Montierte Absperrklappe mit Schraubverbindungen (ohne Dichtung) . . .	13
2.7	Schraube mit Dehnschaft für Klappenmontage - DIN 2510 Form Z . . . .	14
2.8	Ulfalux hochhitzeester Dichtungskleber bis ca. 500 °C . . . . .	15
2.9	Schematischer Vergleich eines Speicherzyklus mit und ohne PCM. Quelle: Hameter M. . . . .	16
2.10	Überarbeitetes Verfahrensflißschema mit Latentaufsatz (Detail siehe Anhang A, Seite III) . . . . .	16
2.11	Vergleich der Schüttungsbehälter mit und ohne PCM-Erweiterung . . . .	17
2.12	Rippenrohrbündel ohne Halterung . . . . .	18

2.13	Rippenrohrbündel ohne Halterung . . . . .	19
2.14	Einzelnes Rippenrohr (Rippenabstand nicht maßstabsgetreu) . . . . .	19
3.1	Darstellung der neuen Versuchsanlage ohne Isolierung . . . . .	22
3.2	Foto der neuen Versuchsanlage mit Isolierung von vorne . . . . .	23
3.3	Foto der neuen Versuchsanlage mit Isolierung von hinten . . . . .	23
3.4	Hauptabmessungen der Versuchsanlage ohne Isolierung und Formsteinbehälter im Hintergrund . . . . .	24
3.5	Darstellung der neuen Versuchsanlage ohne Isolierung und Formsteinbehälter im Hintergrund . . . . .	24
3.6	Aerzen Roots Gebläse, Baujahr 1941 . . . . .	25
3.7	Pumpkennfelder Aerzen Roots Gebläse. Quelle: Institut für Energietechnik und Thermodynamik . . . . .	26
3.8	Hauptabmessungen vom Schüttungsbehälter . . . . .	28
3.9	Drainageschotter im Schüttungsbehälter . . . . .	29
3.10	Wärmeleitfähigkeit der Steinwolle in Abhängigkeit der Temperatur. Quelle: Michalka [5] . . . . .	30
3.11	Betriebszustand: LADEN . . . . .	31
3.12	Betriebszustand: ENTLADEN . . . . .	32
3.13	Betriebszustand: BYPASS . . . . .	32
4.1	links: Kalibrierofen Jofra 600S mit PT100; rechts: Steuerungscomputer X20 von B&R mit angeschlossenem PT100 Thermofühler . . . . .	34
4.2	Lineare Regressionsgerade für Vorlauffühler. Daten aus Tabelle 4.1 . . . . .	34
4.3	(a) Differenzdrucksensor <i>Kalinsky DS1-420</i> , (b) Vergleichsgerät <i>Testo 312-4</i> , (c) Relativdrucksensor <i>Bürkert Drucktransmitter Typ 8323</i> . . . . .	36
4.4	Potentielle Regressionskurve <i>Kalinsky DS1-420</i> (Daten aus Tabelle 4.4) . . . . .	37
4.5	Druck am Gebläsestutzen (p03) bei 20 °C . . . . .	38
4.6	t-mass A 150 von Endress & Hauser, Quelle: Endress & Hauser. . . . .	38
4.7	Messprinzipdarstellung des thermischen Massendurchfluss-Messgeräts, Quelle: Endress & Hauser. . . . .	39

4.8	Temperatur- und Feuchtigkeitsfühler am Ansaugstutzen . . . . .	40
4.9	Innenansicht vom Schaltschrank . . . . .	43
4.10	B&R X20 System - Aufbau . . . . .	43
4.11	JUMO TYA-202 Thyristor-Leistungssteller, Quelle: JUMO Bedienungs- anleitung . . . . .	46
4.12	Funktionsweise des Impulsgruppenbetriebes beim Thyristor-Leistungssteller von JUMO. Quelle: JUMO Bedienungsanleitung . . . . .	46
4.13	Frequenzumrichter und Gebläse . . . . .	47
4.14	Massenstrom in Abhängigkeit von der Frequenz . . . . .	47
4.15	<i>AGS Stellantriebe</i> Absperrklappe, Quelle: AGS . . . . .	47
4.16	Maximale Vorlauf- und Heizregistertemperatur bei mindest zulässigem Massenstrom von 125 kg/h . . . . .	49
4.17	Strömungswächter . . . . .	50
4.18	Druckluftkühlung nach Gebläseausfall bei 100 % Heizleistung . . . . .	50
4.19	Einstellungen für den temperaturgesteuerten Messungsmodus . . . . .	55
5.1	Druck am Gebläsestutzen (p03) bei 20 °C mit potentieller Regressionskurve	58
5.2	Druckabfall (p04-p05) am Festbett bei 20°C mit geschätzten Werten bei 300°C . . . . .	59
5.3	Maximale Vorlauftemperatur (PT03) in Abhängigkeit vom Massenstrom bei 100 % Heizleistung . . . . .	60
5.4	Vergleich Vorlauftemperatur (PT02) mit und ohne Vorheizen über den Bypass bei 145 kg/h . . . . .	61
6.1	Gemessener Massendurchfluss während der Referenzmessung von Droch- ter [4] . . . . .	64
6.2	Gemessener Massendurchfluss während der Referenzmessung im Zuge die- ser Arbeit. . . . .	65
6.3	Temperaturverlauf bei der Messung von Drochter. Quelle: Drochter [4] .	66
6.4	Temperaturverlauf der Referenzmessung . . . . .	66

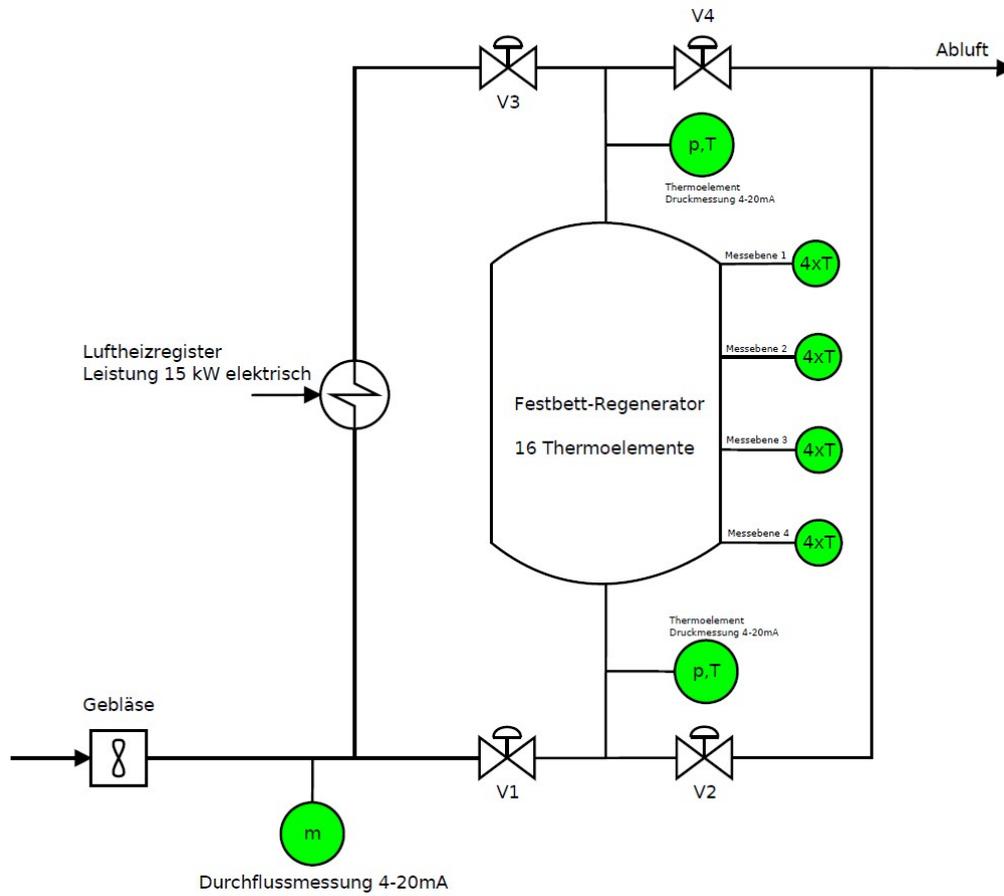
6.5	Temperaturverlauf der nicht durchströmten Bypass-Leitung während eines Ladevorganges . . . . .	67
6.6	Temperaturverlauf des stationären Zustandes . . . . .	68
6.7	Leistung und Energie des eingeschwungenen Zyklus - Messung Drochter, Quelle: Michalke [5] . . . . .	69
6.8	Leistung und Energie des eingeschwungenen Zyklus - Referenzmessung .	69
6.9	Druckabfall über die Schüttung des eingeschwungenen Zyklus - Referenzmessung . . . . .	70
6.10	Temperaturverlauf des eingeschwungenen Zyklus bei unterschiedlichen Massenströmen . . . . .	72
6.11	Ladezeit in Abhängigkeit vom Massenstrom . . . . .	73
6.12	Energie und Leistung bei unterschiedlichen Massenströmen . . . . .	75
A.1	Verfahrensfließschema der ursprünglichen Anlage (Drochter [4], Kapitel 2)	I
A.2	Überarbeitetes Verfahrensfließschema . . . . .	II
A.3	Überarbeitetes Verfahrensfließschema mit Latentaufsatz . . . . .	III
B.1	Flansch für Messstrecke . . . . .	V

## Tabellenverzeichnis

1.1	Klassifizierung der Energiespeichersysteme nach gespeicherter Energieform (Sterner [2], Kapitel 12) . . . . .	4
1.2	Klassifizierung der Energiespeichersysteme nach Eigenschaft (Sterner [2], Kapitel 12) . . . . .	4
1.3	Anforderungen an die neue Versuchsanlage . . . . .	7
2.1	Änderungen an der Anlagenverrohrung . . . . .	10
2.2	Hinzugefügte Messtechnik am Festbett-Regenerator. . . . .	11
2.3	Thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha$ der Komponenten für Klappenmontage . . . . .	14
2.4	Maßtabelle der verwendeten Dehnschrauben in [mm] - DIN 2510 Form Z	14
2.5	Maximale Füllmasse der Rohre mit $NaNO_3$ . . . . .	20
2.6	Füllmasse gesamt von Rohrebene und -bündel . . . . .	20
2.7	Aufschlüsselung der gespeicherten Wärme . . . . .	20
3.1	Hersteller, Fördermenge und Drehzahl vom Gebläse . . . . .	25
3.2	Kenndaten für Luftheizregister laut Hersteller . . . . .	27
3.3	Material, Leergewicht, Fassungsvermögen und Flanschdimension vom Schüttungsbehälter . . . . .	27
3.4	Daten des Drainageschotters . . . . .	28
3.5	Kenndaten für Isolationsmaterial . . . . .	29
3.6	Daten der Dichtungen . . . . .	30
4.1	Kalibriertabelle des PT100 Fühlers am Vorlauf . . . . .	35
4.2	Technische Daten des <i>Kalinsky DS1-420</i> . . . . .	36
4.3	Technische Daten des <i>Testo 312-4</i> . . . . .	36
4.4	Auszug aus der Kalibriertabelle vom Differenzdrucksensor <i>Kalinsky DS1-420</i> . . . . .	36
4.5	Technische Daten <i>Bürkert Drucktransmitter Typ 8323</i> . . . . .	37
4.6	Spezifikationsdaten t-mass A150 . . . . .	39

4.7	Spezifikationsdaten t-mass A150 . . . . .	40
4.8	Ziele der Automatisierung . . . . .	42
4.9	Aufbau der B&R X20 Steuerung für den Festbett-Regenerator . . . . .	44
4.10	Relaisliste . . . . .	45
4.11	Sicherheitskette Heizregister . . . . .	48
4.12	SPS Sicherheitsüberwachung . . . . .	54
6.1	Parameter, die eine Messung definieren . . . . .	62
6.2	Parameter für Referenzmessung . . . . .	63
6.3	Füllmasse gesamt von Rohrebene und -bündel . . . . .	68
6.4	Parameter für Referenzmessung . . . . .	70
6.5	Lade- und Entladezeiten des Speichers bei verschiedenen Massenströmen	73
6.6	Leistung und Energie in Abhängigkeit vom Massenstrom . . . . .	74
6.7	Weiterführende Variations-Versuch . . . . .	76

## A R&I Fließschema



Verfahrensfliesschema der ursprünglichen Anlage (Drochter [4], Kapitel 2)]

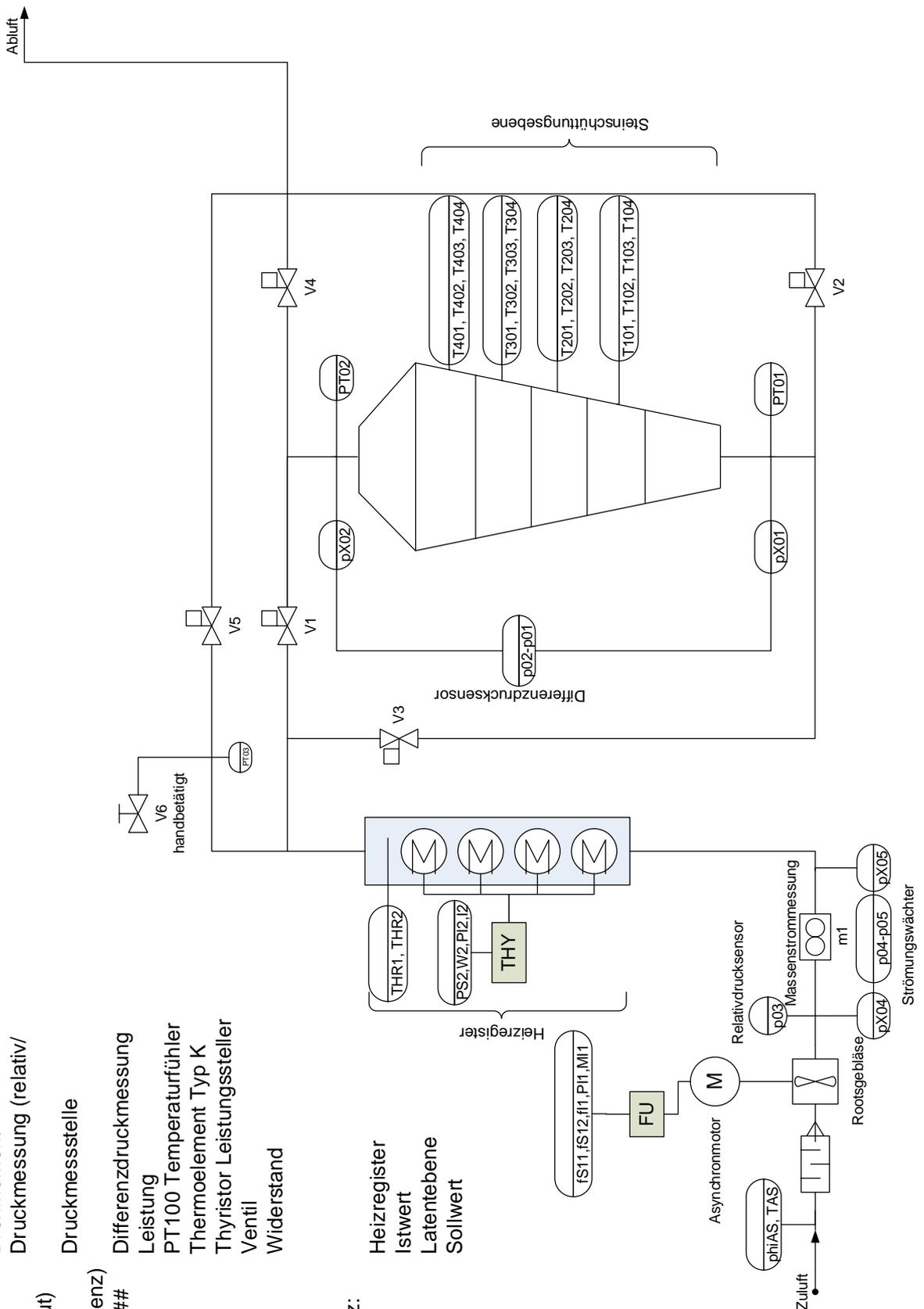
# R&I FESTBETT-REGENERATOR

## Variablen:

- f Frequenz
- FU Frequenzumrichter
- I Strom
- m Massenstrommessung
- M Drehmoment
- p Druckmessung (relativ/absolut)
- pX Druckmesstelle
- (Differenz)
- p##-p## Differenzdruckmessung
- P Leistung
- PT PT100 Temperaturfühler
- T Thermoelement Typ K
- THY Thyristor Leistungssteller
- V Ventil
- W Widerstand

## Zusatz:

- HR Heizregister
- I Istwert
- L Latentebene
- S Sollwert



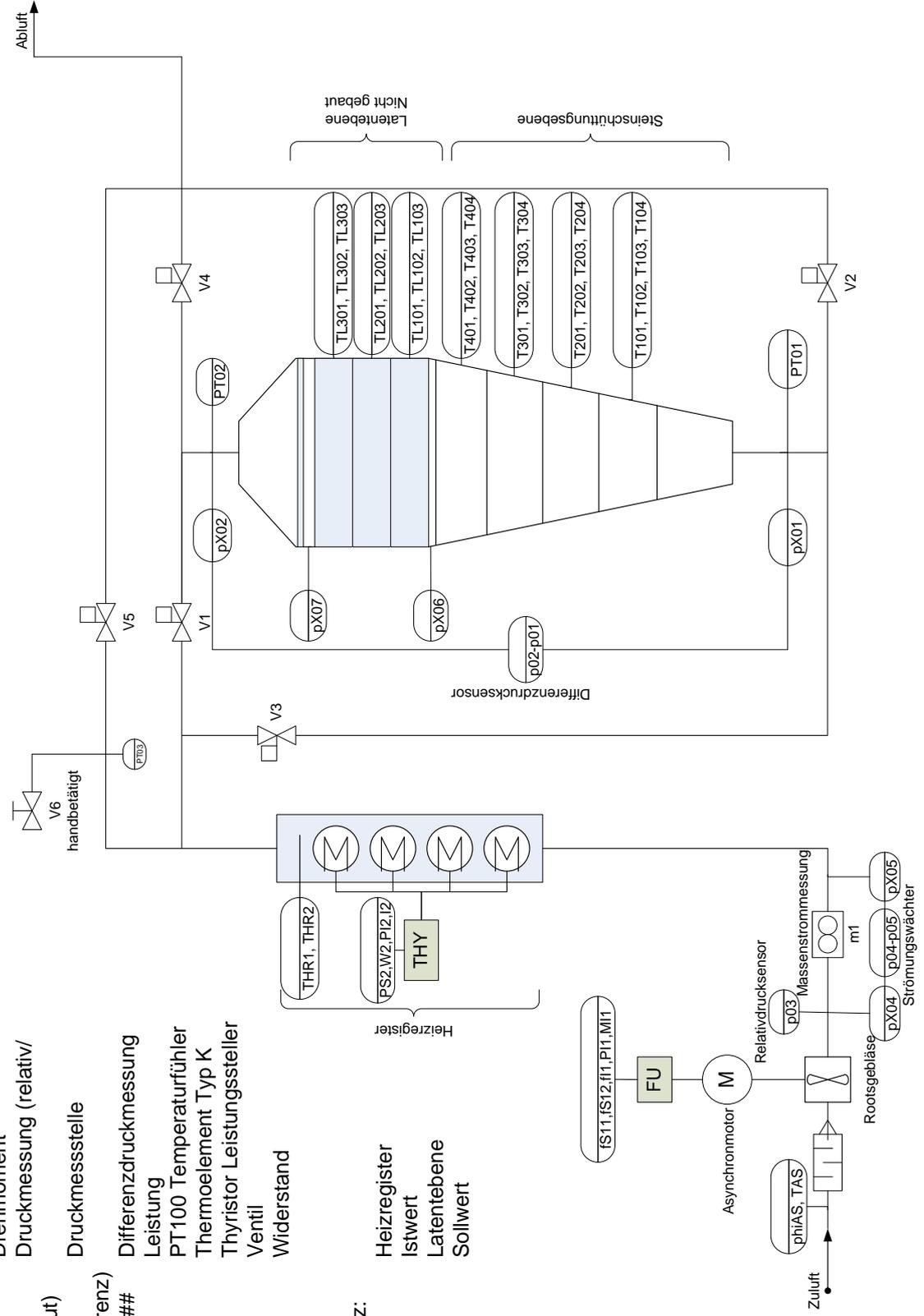
**Variablen:**

- f Frequenz
- FU Frequenzumrichter
- I Strom
- m Massenstrommessung
- M Drehmoment
- p Druckmessung (relativ/absolut)
- pX Druckmessstelle
- (Differenz)
- p##-p## Differenzdruckmessung
- P Leistung
- PT PT100 Temperaturfühler
- T Thermoelement Typ K
- THY Thyristor Leistungssteller
- V Ventil
- W Widerstand

**Zusatz:**

- HR Heizregister
- I Istwert
- L Latentebene
- S Sollwert

# R&I FESTBETT-REGENERATOR MIT LATENT-ERWEITERUNG

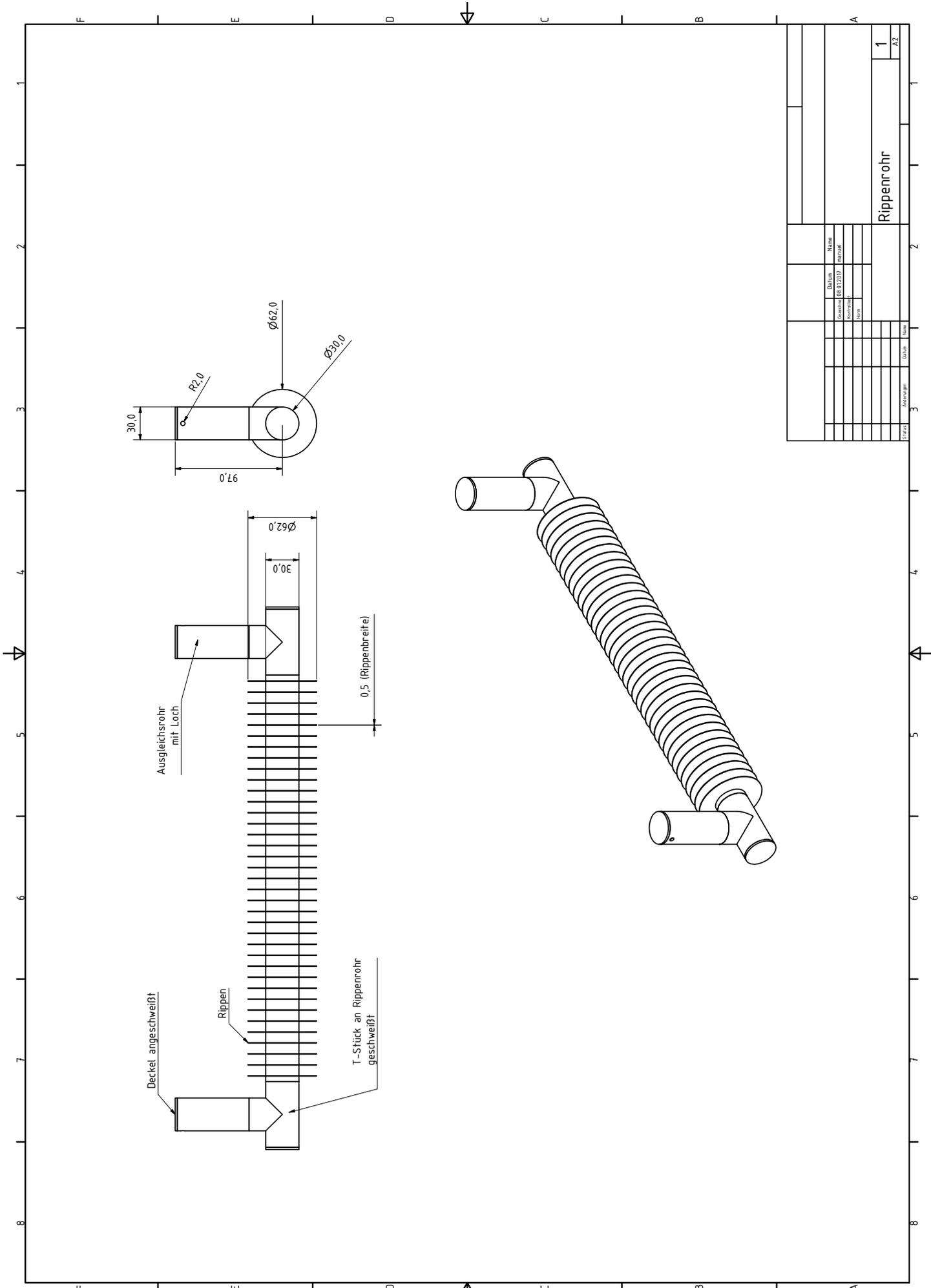


## **B Konstruktionspläne**









Name		Datum		Blatt		Zusammenfassung		Anmerkungen	
Rippenrohr		1		AZ					







## C Berechnungen

Berechnung nach:

[6] Roloff/Matek Maschinenelemente; 21. Auflage; Kapitel 8

## DEFINITIONEN

$l_{Klappe} := 34 \text{ mm}$	Breite der Klappe die zwischen die Flansche geklemmt wird
$l_{Dichtung} := 2 \text{ mm}$	Breite der verwendeten Graphitdichtungen
$l_{Flansch} := 18.5 \text{ mm}$	Breite von einem Flansch
$n_{Dichtungen} := 2$	Anzahl der berücksichtigten Dichtungen
$n_{Flansche} := 2$	Anzahl der berücksichtigten Flansche
$\alpha_{Klappe} := \frac{12.5}{10^6} \frac{1}{K}$	Ausdehnungskoeffizient Stellklappe (GG40 alpha)
$\alpha_{Flansch} := \frac{14.1}{10^6} \frac{1}{K}$	Ausdehnungskoeffizient Flansch (P235)
$\alpha_{Dichtung} := \frac{1.9}{10^6} \frac{1}{K}$	Ausdehnungskoeffizient Dichtung (Graphit)
$\alpha_{Dehnschraube} := \frac{13.9}{10^6} \frac{1}{K}$	Ausdehnungskoeffizient Dehnschraube (C35E (1.1181))
$T_{min} := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$	Ausgangstemperatur
$T_{max} := 300 \text{ } ^\circ\text{C}$	Betriebstemperatur

## DEHNSCHRAUBE

$d_{Schaft} := 12 \text{ mm}$	Schaftdurchmesser von Dehnschraube
$\sigma_y := 380 \frac{N}{mm^2}$	Streckgrenze der Dehnschraube
$E_{Schraube} := 210000 \frac{N}{mm^2}$	Elastizitätsmodul der Schraube
$A_{Schraube} := \frac{d_{Schaft}^2}{4} \cdot \pi = 113.097 \text{ mm}^2$	Querschnittsfläche der Schraube
$P := 2 \text{ mm}$	Gewindesteigung
$d_2 := 14.701 \text{ mm}$	Flankendurchmesser des Gewindes
$dk_{halbe} := 0.65 \cdot 16 \text{ mm}$	Wirksamer Reibungsdurchmesser Schraubenkopf

$$Fv_{max} := \sigma_y \cdot A_{Schraube} = (4.298 \cdot 10^4) \text{ N} \quad \text{Max. Kraft auf Schraube}$$

## DICHTUNGEN

$p_{press\_min} := 40 \frac{N}{mm^2}$	Minimaler Anpressdruck Dichtung
$A_{Dichtung} := 3857 \text{ mm}^2$	Fläche der Dichtung

$$F_{Dichtung\_ges} := p_{press\_min} \cdot A_{Dichtung} = (1.543 \cdot 10^5) \text{ N}$$

$$F_{Schraubenverbindung} := \frac{F_{Dichtung\_ges}}{8} = (1.929 \cdot 10^4) \text{ N} \quad \text{Minimale Vorspannkraft von einer Schraube}$$

Berechnung nach:

[6] Roloff/Matek Maschinenelemente; 21. Auflage; Kapitel 8

**BERECHNUNG LÄNGENÄNDERUNG**

Berücksichtigte Länge der Dehnschraube bei der Ausdehnung

$$l_{\text{Dehnschraube}} := l_{\text{Klappe}} + l_{\text{Dichtung}} \cdot n_{\text{Dichtungen}} + l_{\text{Flansch}} \cdot n_{\text{Flansche}} = 75 \text{ mm}$$

Längenänderung der Klappe

$$dl_{\text{Klappe}} := l_{\text{Klappe}} \cdot \alpha_{\text{Klappe}} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) = 0.117 \text{ mm}$$

Längenänderung der n\_Dichtungen

$$dl_{\text{Dichtungen}} := n_{\text{Dichtungen}} \cdot l_{\text{Dichtung}} \cdot \alpha_{\text{Dichtung}} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) = 0.002 \text{ mm}$$

Längenänderung von n\_Flansche

$$dl_{\text{Flansche}} := n_{\text{Flansche}} \cdot l_{\text{Flansch}} \cdot \alpha_{\text{Flansch}} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) = 0.143 \text{ mm}$$

Gesamtlängenänderung

$$dl_{\text{Gesamtaenderung}} := dl_{\text{Klappe}} + dl_{\text{Dichtungen}} + dl_{\text{Flansche}} = 0.262 \text{ mm}$$

Längenänderung Dehnschraube

$$dl_{\text{Dehnschraube}} := l_{\text{Dehnschraube}} \cdot \alpha_{\text{Dehnschraube}} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) = 0.287 \text{ mm}$$

Differenz der Längenänderung

$$dl_{\text{Differenz}} := dl_{\text{Dehnschraube}} - dl_{\text{Gesamtaenderung}} = 0.024 \text{ mm}$$

**BERECHNUNG DER KRAFT (HOOKESCHES GESETZ)**

$$\varepsilon := \frac{dl_{\text{Differenz}}}{l_{\text{Dehnschraube}}} = 3.234 \cdot 10^{-4} \quad \text{Dehnung der Schraube}$$

$$\sigma := E_{\text{Schraube}} \cdot \varepsilon = 67.914 \text{ MPa} \quad \text{Spannung der Schraube}$$

$$F_{\text{Verlust}} := \sigma \cdot A_{\text{Schraube}} = (7.681 \cdot 10^3) \text{ N} \quad \text{Kraft die ausgeglichen werden muss}$$

**BERECHNUNG DES BENÖTIGTEN ANZIEHMOMENTS**

Minimale Vorspannkraft von Schraube

$$Fv_{\text{min}} := F_{\text{Schraubenverbindung}} + F_{\text{Verlust}} = (2.697 \cdot 10^4) \text{ N}$$

Minimales Anziehmoment mit dem die Schrauben angezogen werden müssen

$$M_{\text{min}} := Fv_{\text{min}} \cdot (0.159 \cdot P + 0.12 \cdot (0.577 \cdot d_2 + dk_{\text{halbe}})) = 69.677 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Maximales Anziehmoment mit dem die Schrauben angezogen werden müssen

$$M_{\text{max}} := Fv_{\text{max}} \cdot (0.159 \cdot P + 0.12 \cdot (0.577 \cdot d_2 + dk_{\text{halbe}})) = 111.048 \text{ N} \cdot \text{m}$$

**DEFINITIONEN**

$hPa := 100 Pa$       $g := gm$       $mbar := 100 Pa$

$V := 0.8 m^3$      Füllvolumen der gesamten Anlage (~17.5m Rohr, Behälter <1m<sup>3</sup>, Porosität der Steinschüttung 0.42)

$Mol := 29 \frac{g}{mol}$      Molmasse von trockener Luft (trocken ~29g/mol; feucht ~18g/mol)

$T := 22 °C$      Lufttemperatur

**Messdauer von 5 Minuten**

$p_i := 40 hPa$      Gemessener Druck im Behälter zum Zeitpunkt t=0  
 $p_e := 35 hPa$      Gemessener Druck im Behälter zum Zeitpunkt t=5min  
 $t := 5 min$

$m_i := \frac{(p_i \cdot V)}{\left(\frac{R}{Mol} \cdot T\right)} = 0.038 kg$      Luftmasse im Behälter zum Zeitpunkt t=0 (ideale Gasgleichung)

$m_e := \frac{(p_e \cdot V)}{\left(\frac{R}{Mol} \cdot T\right)} = 0.033 kg$      Luftmasse im Behälter zum Zeitpunkt t=5min (ideale Gasgleichung)

**Masseverlust bei Dichtheitsprobe**

$m_{diff} := m_i - m_e = 4.727 g$      Verlorene Luftmass in t=5min

$m_h := \frac{m_{diff}}{t} \cdot hr = 56.723 g$      Hochrechnung auf t=60min

$q := \frac{((p_i - p_e) \cdot V)}{t} = 13.333 mbar \cdot \frac{L}{s}$      Leckagerate

**Messdauer von 1 Stunde**

$p_i := 40 hPa$      Gemessener Druck im Behälter zum Zeitpunkt t=0  
 $p_e := 10 hPa$      Gemessener Druck im Behälter zum Zeitpunkt t=60min  
 $t := 60 min$

$m_i := \frac{(p_i \cdot V)}{\left(\frac{R}{Mol} \cdot T\right)} = 0.038 kg$      Luftmasse im Behälter zum Zeitpunkt t=0 (ideale Gasgleichung)

$m_e := \frac{(p_e \cdot V)}{\left(\frac{R}{Mol} \cdot T\right)} = 0.009 kg$      Luftmasse im Behälter zum Zeitpunkt t=60min (ideale Gasgleichung)

**Masseverlust bei Dichtheitsprobe**

$m_{diff} := m_i - m_e = 28.362 g$      Verlorene Luftmass in t=60min

$q := \frac{((p_i - p_e) \cdot V)}{t} = 6.667 mbar \cdot \frac{L}{s}$      Leckagerate

## DEFINITIONEN

$$g := gm$$

$$\rho_{min} := 1859 \frac{kg}{m^3} \quad \text{Die kleinste Dichte, somit die größte Volumsausdehnung (1859kg/m}^3 \text{ bei 643K)}$$

## VOLUMINA

## T-Stück

$$d_T := 26 \text{ mm} \quad \text{Innendurchmesser vom T-Stück und dem Steigrohr}$$

$$h_T := 63 \text{ mm} \quad \text{Länge des Steigrohres bis 1cm unterhalb dem Druckausgleichloches}$$

$$l_T := 60 \text{ mm} \quad \text{Länge des T-Stückes}$$

$$V_T := \frac{d_T^2}{4} \cdot \pi \cdot (h_T + l_T) = 65.3 \text{ cm}^3 \quad \text{Volumen T-Stück}$$

## Rippenrohre

$$d_{RR} := 27 \text{ mm} \quad \text{Innendurchmesser Rippenrohre}$$

## Rippenrohre Ebene 1

$$l_1 := 430 \text{ mm} \quad \text{Länge des 1. Rippenrohres in der Ebene 1}$$

$$V_1 := \frac{d_{RR}^2}{4} \pi \cdot l_1 = 246.2 \text{ cm}^3 \quad \text{Volumen des 1. Rippenrohres in der 1. Ebene}$$

$$m_{1\_max} := (V_1 + 2 \cdot V_T) \cdot \rho_{min} = 700.5 \text{ g} \quad \text{Maximale Masse die befüllt werden darf damit das Latentmedium nicht aufgrund der Ausdehnung ausläuft}$$

$$l_1 := 430 \text{ mm} \quad \text{Länge des 2. Rippenrohres in der Ebene 1}$$

$$V_1 := \frac{d_{RR}^2}{4} \pi \cdot l_1 = 246.2 \text{ cm}^3 \quad \text{Volumen des 2. Rippenrohres in der 1. Ebene}$$

$$m_{1\_max} := (V_1 + 2 \cdot V_T) \cdot \rho_{min} = 700.5 \text{ g}$$

$$l_2 := 371 \text{ mm} \quad \text{Länge des 3. Rippenrohres in der Ebene 1}$$

$$V_2 := \frac{d_{RR}^2}{4} \pi \cdot l_2 = 212.42 \text{ cm}^3 \quad \text{Volumen des 3. Rippenrohres in der 1. Ebene}$$

$$m_{2\_max} := (V_2 + 2 \cdot V_T) \cdot \rho_{min} = 637.7 \text{ g}$$

$$l_3 := 274 \text{ mm} \quad \text{Länge des 4. Rippenrohres in der Ebene 1}$$

$$V_3 := \frac{d_{RR}^2}{4} \pi \cdot l_3 = 156.88 \text{ cm}^3 \quad \text{Volumen des 4. Rippenrohres in der 1. Ebene}$$

$$m_{3\_max} := (V_3 + 2 \cdot V_T) \cdot \rho_{min} = 534.4 \text{ g}$$

$$l_4 := 56 \text{ mm} \quad \text{Länge des 5. Rippenrohres in der Ebene 1}$$

$$V_4 := \frac{d_{RR}^2}{4} \pi \cdot l_4 = 32.06 \text{ cm}^3 \quad \text{Volumen des 5. Rippenrohres in der 1. Ebene}$$

$$m_{4\_max} := (V_4 + 2 \cdot V_T) \cdot \rho_{min} = 302.4 \text{ g}$$

#### Masse Latentmedium für 1. Ebene

$$m_{Ebene1} := m_{1\_max} + 2 \cdot m_{1\_max} + 2 \cdot m_{3\_max} + 2 \cdot m_{4\_max} + 2 \cdot m_{4\_max} = 4.38 \text{ kg}$$

Maximale Masse von Latentedium in Ebene 1 in allen 9 Rohren

#### Rippenrohre Ebene 2

$$l_1 := 430 \text{ mm} \quad \text{Länge des 1. Rippenrohres in der Ebene 2}$$

$$V_1 := \frac{d_{RR}^2}{4} \pi \cdot l_1 = 246.2 \text{ cm}^3 \quad \text{Volumen des 1. Rippenrohres in der 2. Ebene}$$

$$m_{1\_max} := (V_1 + 2 \cdot V_T) \cdot \rho_{min} = 700.5 \text{ g}$$

$$l_5 := 406 \text{ mm} \quad \text{Länge des 2. Rippenrohres in der Ebene 2}$$

$$V_5 := \frac{d_{RR}^2}{4} \pi \cdot l_5 = 232.46 \text{ cm}^3 \quad \text{Volumen des 2. Rippenrohres in der 2. Ebene}$$

$$m_{5\_max} := (V_5 + 2 \cdot V_T) \cdot \rho_{min} = 674.9 \text{ g}$$

$$l_6 := 326 \text{ mm} \quad \text{Länge des 3. Rippenrohres in der Ebene 2}$$

$$V_6 := \frac{d_{RR}^2}{4} \pi \cdot l_6 = 186.65 \text{ cm}^3 \quad \text{Volumen des 3. Rippenrohres in der 2. Ebene}$$

$$m_{6\_max} := (V_6 + 2 \cdot V_T) \cdot \rho_{min} = 589.8 \text{ g}$$

$$l_7 := 193 \text{ mm} \quad \text{Länge des 4. Rippenrohres in der Ebene 2}$$

$$V_7 := \frac{d_{RR}^2}{4} \pi \cdot l_7 = 110.5 \text{ cm}^3 \quad \text{Volumen des 4. Rippenrohres in der 2. Ebene}$$

$$m_{7\_max} := (V_7 + 2 \cdot V_T) \cdot \rho_{min} = 448.2 \text{ g}$$

#### Masse Latentmedium für 2. Ebene

$$m_{Ebene2} := 2 \cdot m_{1\_max} + 2 \cdot m_{5\_max} + 2 \cdot m_{6\_max} + 2 \cdot m_{7\_max} = 4.83 \text{ kg}$$

Maximale Masse von Latentedium in Ebene 2 in allen 8 Rohren

#### Masse Latentmedium für 4 Ebenen (2\*Ebene 1 + 2\*Ebene 2)

$$m_{4Ebenen} := 2 \cdot m_{Ebene1} + 2 \cdot m_{Ebene2} = 18.41 \text{ kg}$$

## DEFINITIONEN

$$kJ := 1000 J \quad dm^3 := L$$

$$MJ := 1000000 J$$

$d_i := 30 \text{ mm}$	Innendurchmesser vom Rippenrohr
$\rho_{LM} := 2200 \frac{kg}{m^3}$	Dichte Latentmedium
$\rho_{Bh} := 7900 \frac{kg}{m^3}$	Dichte Behältermaterial
$\rho_{RR} := 8000 \frac{kg}{m^3}$	Dichte Rippenrohr
$\rho_{Rippen} := 27000 \frac{kg}{m^3}$	Dichte Rippen
$\rho_{rein} := 2500 \frac{kg}{m^3}$	Reindichte des Schüttungsmaterial
$c_{Bh} := 500 \frac{J}{(K \cdot kg)}$	Wärmekapazität vom Behältermaterial
$c_{RR} := 500 \frac{J}{(K \cdot kg)}$	Wärmekapazität vom Rippenrohrmaterial
$c_{Rippen} := 900 \frac{J}{(K \cdot kg)}$	Wärmekapazität vom Rippenmaterial
$c_{Sch} := 840 \frac{J}{(K \cdot kg)}$	Wärmekapazität vom Schüttungsmaterial
$T_1 := 20 \text{ } ^\circ C$	Temperatur "Entladen"
$T_2 := 300 \text{ } ^\circ C$	Temperatur "Geladen"
$V_{Sch} := 0.3818 \text{ m}^3$	Verfügbares Volumen für Schüttung
$\rho_{sch} := \rho_{rein} \cdot (1 - 0.378) = (1.555 \cdot 10^3) \frac{kg}{m^3}$	Schüttungsdichte mit Porösität <b>0,378</b>

## BEHÄLTER Material

$V_{Teil1} := 8874796 \text{ mm}^3$	Behälter Materialvolumen (NICHT Füllvolumen!!!) (unten)
$V_{Teil2} := 7649384 \text{ mm}^3$	
$V_{Teil3} := 10904857 \text{ mm}^3$	
$V_{Teil4} := 4455969 \text{ mm}^3$	oben
$V_{LA} := 5843094 \text{ mm}^3$	Latentaufsatz
$V_{Halter} := 348544 \cdot 4 \text{ mm}^3$	Ringhalterung von Rippenrohre (4 Stück)

Gesamtmasse vom Behälter ohne PCM-Modul

$$m_{Bh} := \rho_{Bh} \cdot (V_{Teil1} + V_{Teil2} + V_{Teil3} + V_{Teil4}) = 251.9 \text{ kg}$$

Gesamtmasse vom Behälter mit PCM-Modul

$$m_{BhLa} := \rho_{Bh} \cdot (V_{Teil1} + V_{Teil2} + V_{Teil3} + V_{Teil4} + V_{LA} + V_{Halter}) = 309.1 \text{ kg}$$

Gespeicherte Wärme im Behältermaterial ohne PCM-Modul

$$Q_{Bh} := m_{Bh} \cdot c_{Bh} \cdot (T_2 - T_1) = 35.3 \text{ MJ}$$

Gespeicherte Wärme im Behältermaterial mit PCM-Modul ohne Rippenrohre

$$Q_{BhLa} := m_{BhLa} \cdot c_{Bh} \cdot (T_2 - T_1) = 43.3 \text{ MJ}$$

**Rippenrohre**

$$V_{RR} := 1472499 \text{ mm}^3$$

Volumen des Rippenrohrmaterials (ohne Rippen)

$$V_{TS} := 26929 \cdot 68 \text{ mm}^3$$

Volumen der TStücke (68 Stück)

Gesamtmasse von Rippenrohre

$$m_{RR} := \rho_{RR} \cdot (V_{RR} + V_{TS}) = 26.4 \text{ kg}$$

Gespeicherte Wärme in Rippenrohr-Material

$$Q_{RR} := m_{RR} \cdot c_{RR} \cdot (T_2 - T_1) = 3.7 \text{ MJ}$$

$$V_{Rippen} := 639833.09 \text{ mm}^3 \quad \text{Volumen des Rippenmaterials}$$

Gesamtmasse von Rippenrohre

$$m_{Rippen} := \rho_{Rippen} \cdot V_{Rippen} = 17.3 \text{ kg}$$

Gespeicherte Wärme in den Rippen

$$Q_{Rippen} := m_{Rippen} \cdot c_{Rippen} \cdot (T_2 - T_1) = 4.353 \text{ MJ}$$

**Ergebnis Behälter mit PCM-Modul, ohne PCM und ohne Schüttung**

$$Q_{MLa} := Q_{BhLa} + Q_{RR} + Q_{Rippen} = 51.323 \text{ MJ}$$

**Steinschüttung**

Masse von Schüttung

$$m_{Sch} := \rho_{sch} \cdot V_{Sch} = 593.699 \text{ kg}$$

Gespeicherte Wärme im Behältermaterial

$$Q_{Sch} := m_{Sch} \cdot c_{Sch} \cdot (T_2 - T_1) = 139.638 \text{ MJ}$$

**Latentmedium**

Masse von PCM

$$m_{PCM} := 19.775 \text{ kg}$$

Gespeicherte Wärme im Latentmedium (MATLAB File HeatCap\_gesamt)

$$Q_{PCM} := 12.973 \text{ MJ}$$

**Ergebnisse ohne PCM-Modul (Behälter ohne PCM-Erweiterung + Schüttung)**

$$Q_{GES \text{ Bh Sch}} := Q_{Bh} + Q_{Sch} = 174.903 \text{ MJ}$$

**Ergebnisse mit PCM-Modul (Behälter + PCM-Modul + Schüttung + PCM)**

$$Q_{GES} := Q_{MLa} + Q_{Sch} + Q_{PCM} = 203.934 \text{ MJ} \quad \text{gesamte Speicherkapazität}$$

$$pro_{sensibel} := \frac{100}{Q_{GES}} \cdot (Q_{MLa} + Q_{Sch}) = 93.639 \quad \text{Sensibler Speicheranteil}$$

$$pro_{PCM} := \frac{100}{Q_{GES}} \cdot (Q_{PCM}) = 6.361 \quad \text{Latenter Speicheranteil}$$

$$pro_{Schüttung} := \frac{100}{Q_{GES}} \cdot (Q_{Sch}) = 68.472 \quad \text{Speicheranteil in Schüttung}$$

$$pro_{Behälter} := \frac{100}{Q_{GES}} \cdot (Q_{MLa}) = 25.166 \quad \text{Speicheranteil in Behälter}$$

# Druckverlust Rippenrohrbündel

1 von 1

Berechnung nach:

[7] VDI Wärmeatlas 2013 - Kapitel L1

## DEFINITIONEN

$$mbar := 100 Pa$$

$$\rho := 0.6072 \frac{kg}{m^3} \quad \text{Luftdichte (0,6072 bei 300°C; 1,2041 bei 20°C)}$$

$$\eta := 29.86 \cdot 10^{-6} Pa \cdot s \quad \text{dynamische Viskosität Luft (29,86 bei 300°C; 18,43 bei 20°C)}$$

$$\nu := \frac{\eta}{\rho} = (4.918 \cdot 10^{-5}) \frac{m^2}{s} \quad \text{kinematische Viskosität Luft}$$

$$\dot{m} := 150 \frac{kg}{hr} \quad \text{Massenstrom}$$

$$Vs := \frac{\dot{m}}{\rho} = 247.036 \frac{m^3}{hr} \quad \text{Umrechnung Massenstrom -> Volumenstrom}$$

$$p_1 := 7.72 mbar \quad \text{Eingangsdruck}$$

$$d_a := 33 mm \quad \text{Rippenrohr Außendurchmesser} \quad L := 220 mm \quad \text{Rohrlänge}$$

$$d_r := 62 mm \quad \text{Rippenrohr Rippenrohrdurchmesser}$$

$$b_r := 0.5 mm \quad \text{Rippendicke}$$

$$tbr_{zoll} := 11 \quad \text{Rippenanzahl pro Zoll}$$

$$n_R := 4 \quad \text{Anzahl der Rohrreihen}$$

$$n_q := 9 \quad \text{Anzahl der Rohre pro Reihe}$$

$$s_1 := 66 mm \quad \text{Querteilung}$$

$$s_2 := 64 mm \quad \text{Längsteilung}$$

$$d := 575 mm \quad \text{Durchmesser vom durchströmten Querschnitt}$$

## BERECHNUNGEN

$$tbr_m := \left( \frac{25.4 mm}{tbr_{zoll}} \right) = 2.309 mm \quad \text{Rippenteilung (L/Rippe)}$$

$$hbr := \left( \frac{d_r - d_a}{2} \right) = 14.5 mm \quad \text{Rippenhöhe}$$

$$F := L \cdot s_1 \cdot n_q \cdot \left( 1 - \left( \frac{d_a}{s_1} + \frac{(2 \cdot b_r \cdot hbr)}{tbr_m \cdot s_1} \right) \right) = 0.053 m^2 \quad \text{engster Querschnitt}$$

$$w_e := \frac{\dot{m}}{F \cdot \rho} = 1.297 \frac{m}{s} \quad \text{Geschwindigkeit im engsten Querschnitt}$$

$$Re := \frac{(w_e \cdot d_a)}{\nu} = 870.369 \quad \text{Reynolds-Zahl}$$

$$\zeta := \frac{1.41}{Re^{0.125}} = 0.605 \quad \text{Druckverlustbeiwert}$$

## Druckabfall $\Delta p$ gesamt

$$\Delta p := \zeta \cdot n_R \cdot \frac{(\rho \cdot w_e^2)}{2} = 1.236 Pa$$

# Wärmeübergang Rippenrohrbündel

1 von 2

Berechnung nach:

[7] VDI Wärmeatlas 2013 - Kapitel M1

## DEFINITIONEN

$mbar := 100 Pa$

$$\rho := 1.2041 \frac{kg}{m^3} \quad \text{Luftdichte (0,6072 bei 300°C; 1,2041 bei 20°C)}$$

$$\eta := 18.43 \cdot 10^{-6} Pa \cdot s \quad \text{dynamische Viskosität Luft (29,86 bei 300°C; 18,43 bei 20°C)}$$

$$a := 20 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \quad \text{Temperaturleitfähigkeit (20 bei 20°C)}$$

$$\lambda := 0.026 \frac{W}{(m \cdot K)} \quad \text{Wärmeleitfähigkeit (0.026 bei 20°C)}$$

$$\nu := \frac{\eta}{\rho} = (1.531 \cdot 10^{-5}) \frac{m^2}{s} \quad \text{kinematische Viskosität Luft}$$

$$\dot{m} := 150 \frac{kg}{hr} \quad \text{Massenstrom}$$

$$Vs := \frac{\dot{m}}{\rho} = 124.574 \frac{m^3}{hr} \quad \text{Umrechnung Massenstrom -> Volumenstrom}$$

$$p_1 := 7.72 mbar \quad \text{Eingangsdruck}$$

$$d_a := 33 mm \quad \text{Rippenrohr Außendurchmesser} \quad L := 220 mm \quad \text{Rohrlänge}$$

$$d_r := 62 mm \quad \text{Rippenrohr Rippenrohrdurchmesser}$$

$$b_r := 0.5 mm \quad \text{Rippendicke}$$

$$tbr_{zoll} := 11 \quad \text{Rippenanzahl pro Zoll}$$

$$n_R := 4 \quad \text{Anzahl der Rohrreihen}$$

$$n_q := 9 \quad \text{Anzahl der Rohre pro Reihe}$$

$$s_1 := 66 mm \quad \text{Querteilung}$$

$$s_2 := 64 mm \quad \text{Längsteilung}$$

$$d := 575 mm \quad \text{Durchmesser vom durchströmten Querschnitt}$$

## BERECHNUNGEN

$$t_R := \left( \frac{25.4 mm}{tbr_{zoll}} \right) = 2.3 mm \quad \text{Rippenteilung (L/Rippe)}$$

$$h := \left( \frac{(d_r - d_a)}{2} \right) = 14.5 mm \quad \text{Rippenhöhe}$$

$$A_{verh} := 1 + 2 \cdot \frac{(h \cdot (h + d_a + b_r))}{t_R \cdot d_a} = 19.27 \quad \text{Flächenverhältnis der berippten Oberfläche zur Oberfläche des Grundkörpers}$$

$$F := L \cdot s_1 \cdot n_q \cdot \left( 1 - \left( \frac{d_a}{s_1} + \frac{(2 \cdot b_r \cdot h)}{t_R \cdot s_1} \right) \right) = 0.053 m^2 \quad \text{engster Querschnitt}$$

$$w_e := \frac{\dot{m}}{F \cdot \rho} = 0.654 \frac{m}{s} \quad \text{Geschwindigkeit im engsten Querschnitt}$$

$$Re := \frac{(w_e \cdot d_a)}{\nu} = 1.41 \cdot 10^3 \quad \text{Reynolds-Zahl}$$

# Wärmeübergang Rippenrohrbündel

2 von 2

Berechnung nach:

[7] VDI Wärmeatlas 2013 - Kapitel M1

$$Pr := \frac{\nu}{a} = 0.765 \quad \text{Prandtl-Zahl}$$

$$Nu := 0.4 \cdot Re^{0.6} \cdot (A_{verh})^{-0.15} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = 18.204 \quad \text{Nußelt-Zahl}$$

## Wärmeübergang

$$\alpha_R := \frac{(Nu \cdot \lambda)}{d_a} = 14.343 \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$$

## D Kalibriertabellen

PT 100 Bypass	
Ofen °C	B&R °C
50	49,22
75	73,48
100	97,85
125	122,27
150	146,83
175	172,45
200	196,5
225	221,45
250	246,5
275	271
300	295,83
325	320,35
350	345,35
375	369,6
390	384,22
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-0,7463	0,9878

PT 100 oben	
Ofen °C	B&R °C
50	49,9
75	74,3
100	98,85
125	124,4
150	149,26
175	174,22
200	199,36
225	224,62
250	250,17
275	274,92
300	299,99
325	324,73
350	350,19
375	374,7
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-0,9291	1,0027

PT 100 unten	
Ofen °C	B&R °C
50	50,03
75	74,49
100	98,99
125	124,65
150	149,57
175	174,48
200	199,59
225	225
250	250,4
275	275,34
300	300,17
325	325,12
350	350,36
375	375,11
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-0,7590	1,0031

Thermoelement 101	
Ofen °C	B&R °C
50	49,12
75	73,71
100	98,68
125	125,31
150	150,47
175	175,75
200	200,65
225	225,49
250	251,11
275	275,18
300	299,96
325	324,63
350	350,03
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-0,6880	1,0035

Thermoelement 102	
Ofen °C	B&R °C
50	49,28
75	73,94
100	98,66
125	123,55
150	149,6
175	174,53
200	199,35
225	224,21
250	249,46
275	274,26
300	299,56
325	324,05
350	348,68
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-0,9276	1,0005

Thermoelement 103	
Ofen °C	B&R °C
50	49,11
75	73,94
100	98,43
125	123,84
150	149,14
175	174,44
200	199,07
225	224,13
250	248,99
275	274,11
300	299,08
325	324
350	348,56
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-1,0035	1,0000

Thermoelement 104	
Ofen °C	B&R °C
50	49,11
75	73,89
100	98,54
125	123,84
150	148,75
175	174,86
200	199,15
225	224,32
250	249,29
275	274,46
300	298,85
325	323,72
350	348,83
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-1,0019	1,0002

Thermoelement 201	
Ofen °C	B&R °C
50	49,18
75	74
100	98,16
125	123,37
150	149,49
175	174,82
200	198,99
225	224,27
250	249,06
275	273,86
300	298,78
325	323,11
350	348,63
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-0,8695	0,9989

Thermoelement 202	
Ofen °C	B&R °C
50	49,17
75	73,78
100	98,13
125	123,4
150	148,73
175	174,06
200	198,97
225	224,37
250	249,04
275	274,1
300	298,92
325	323,68
350	348,64
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-1,2649	1,0006

Thermoelement 203	
50	49,09
75	73,6
100	98,24
125	124,88
150	148,73
175	174,08
200	198,86
225	223,88
250	248,56
275	274,03
300	299,07
325	323,73
350	348,52
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-1,0214	0,9994

Thermoelement 204	
50	49,13
75	73,53
100	98
125	124,11
150	148,87
175	174,56
200	198,78
225	224,05
250	248,91
275	274,28
300	298,68
325	323,91
350	348,64
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-1,1966	1,0004

Thermoelement 301	
50	48,92
75	73,12
100	98,27
125	123,16
150	148,78
175	174,03
200	199,13
225	224,11
250	249,04
275	274,1
300	299,01
325	323,32
350	348,03
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-1,3958	1,0004

Thermoelement 302	
50	48,95
75	73,05
100	98,09
125	123,11
150	148,41
175	174,07
200	199,19
225	224,45
250	249,05
275	274,07
300	298,88
325	323,21
350	348,05
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-1,4763	1,0007

Thermoelement 303	
50	48,64
75	73,15
100	98,1
125	123,26
150	148,56
175	174,05
200	199
225	224,45
250	248,66
275	274,13
300	298,65
325	323,2
350	347,41
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-1,3659	0,9996

Thermoelement 304	
50	48,64
75	73
100	98,08
125	123,04
150	148,75
175	174,34
200	199,07
225	224,07
250	248,84
275	274,06
300	298,31
325	323
350	347,73
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-1,3979	0,9997

Thermoelement 401	
50	48,8
75	72,81
100	98,03
125	122,9
150	149,01
175	174,1
200	199,17
225	224
250	248,65
275	274,12
300	298,56
325	323,04
350	347,91
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-1,4877	1,0002

Thermoelement 402	
50	48,55
75	73
100	98,08
125	122,78
150	148,66
175	173,66
200	199
225	223,75
250	248,43
275	273,94
325	323,13
350	348,1
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-1,6900	1,0006

Thermoelement 403	
50	48,63
75	73,06
100	98,15
125	122,99
150	148,73
175	174,07
200	199,14
225	224,18
250	248,65
275	273,91
300	298,32
325	323,58
350	348,05
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-1,5365	1,0006

Thermoelement 404	
50	49,74
75	73,25
100	98,02
125	123,07
150	148,9
175	174,26
200	199,04
225	224,25
250	249,23
275	274,29
300	298,03
325	323,55
350	347,41
<b>a (y-Achsenabschnitt)</b>	<b>b (Steigung)</b>
-0,9473	0,9982

## **E Datenblätter**

## Beschreibung

Unser Außenfeuchte- und Temperatursensor mit aktivem Ausgang dient der Erfassung der Feuchte und der Temperatur im Außenbereich. Der verbaute Feuchtetransmitter sorgt dafür das Messsignal in ein Normsignal von wahlweise 0-10V oder 4-20mA umzuwandeln. Einsatz finden unser Feuchte- und Temperaturfühler in nicht aggressiver, staubfreier Umgebung, in der Kälte-, Klima- und Reinraumtechnik oder als Außenfeuchtesensor. Unsere

Außenfeuchtefühler sind mit einem 2-Fach Dip-Schalter ausgestattet, dies bietet die Möglichkeit neben der relativen Feuchte auch die absolute Feuchte, sowie den Taupunkt zu auszugeben. Diese Feuchtetransmitter sind für eine exakte Erfassung der Temperatur und der Feuchte bestimmt, hierfür wird ein digitaler, langzeitstabiler Sensor als Messelement verwendet. Gerne beraten wir Sie auch telefonisch über passende Einsatzgebiete, unsere Service-Hotline erreichen Sie unter **+49771/897508-0**. Hergestellt werden unsere Feuchtesensoren ausschließlich in Deutschland und verdienen daher das Prädikat "Made in Germany".



## Technische Daten

Sensorelement Feuchte	kapazitiver Sensor
Messbereich Feuchte	0 ... 100% r.F.
Ausgang Feuchte	0 ... 10V oder 4 ... 20mA
Toleranz bei 35 ... 70% r.F.	+/- 3%
Temperaturdrift	kompensiert
Messbereich Temperatur	-30°C ... +70°C
Ausgang Temperatur	0 ... 10V oder 4 ... 20mA
Genauigkeit	+/- 0,5K
Spannungsversorgung	24 V AC/DC
Anschlussklemme	0,75mm Durchmesser
Gehäuse	Werkstoff: PA6 15% GK; Farbe: RAL9010
Schutzart	IP65 (Gehäuse)

www.sensorshop24.de

otom Group GmbH  
Niederwiesen 7  
78199 Bräunlingen

Tel. 0771/897508 - 0  
Fax 0771/897508 - 10  
www.sensorshop24.de

Stand: 2014, Änderungen vorbehalten und können jederzeit ohne Ankündigung durchgeführt werden!

## Montagehinweise

Kanaltemperaturfühler:

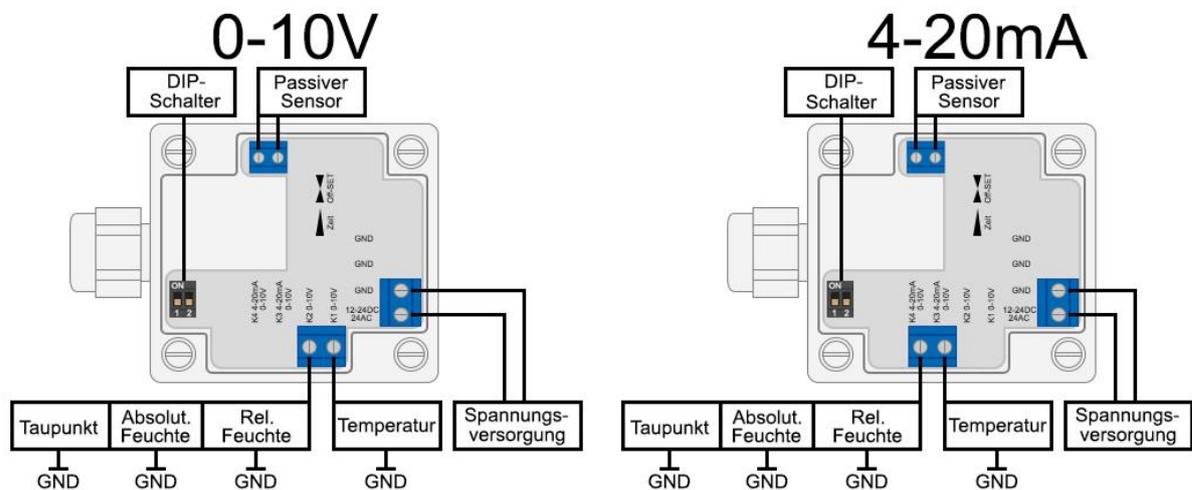
Der Fühler wird mittels Schrauben direkt an der Wand befestigt.

**HINWEIS:**



Der Einbau und die Montage dürfen nur durch eine ausgebildete Elektrofachkraft erfolgen. Die Fühler dürfen nicht in Verbindung mit Geräten verwendet werden, die bei Mensch, Tier und Sachanlagen direkt oder indirekt zu lebens- oder gesundheitssichernden Maßnahmen dienen oder durch deren Betrieb Gefahr für Mensch, Tier und Sachanlagen entstehen können.

## Elektrischer Anschluss



## DIP-Schalter



Relative Feuchte (0-100%):  
DIP 1 = Off  
DIP 2 = Off



Absolute Feuchte (0-30g/m<sup>3</sup>):  
DIP 1 = Off  
DIP 2 = On



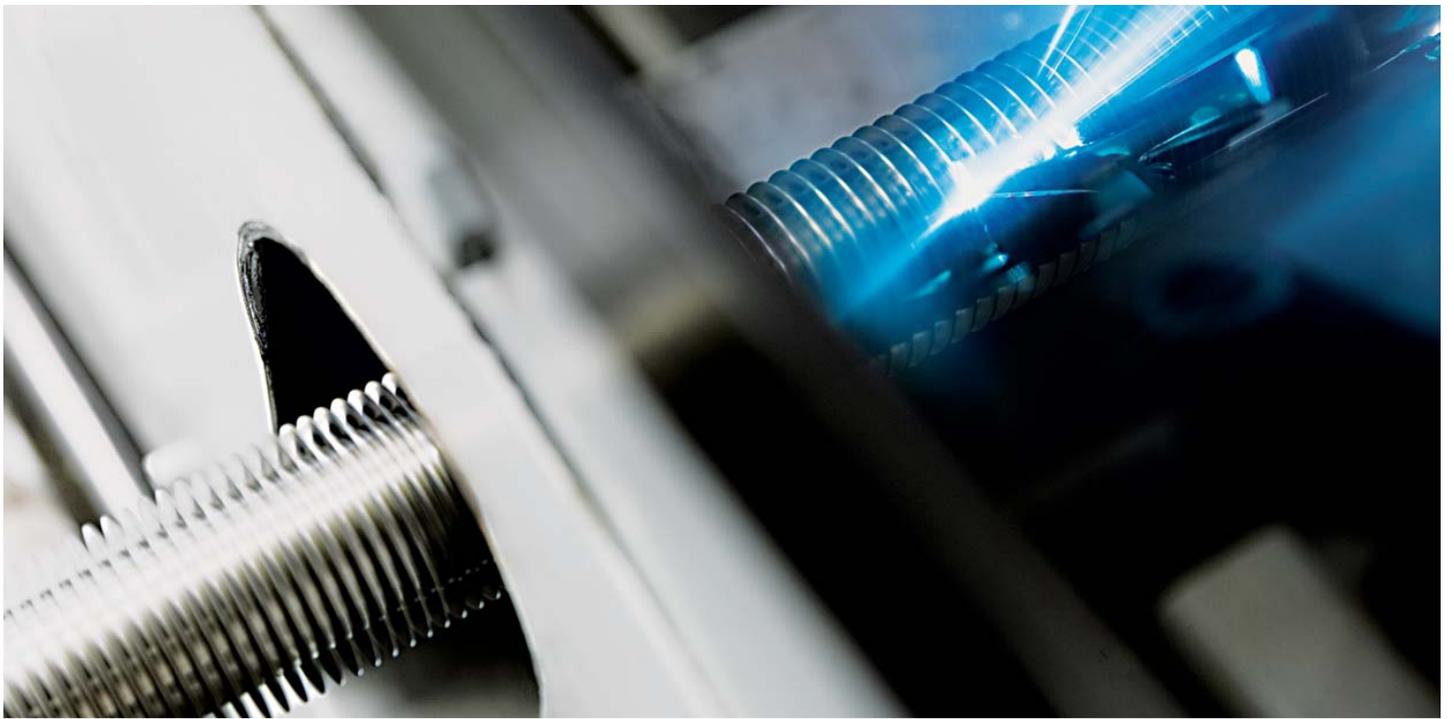
Taupunkt (-50°C bis 100°C):  
DIP 1 = On  
DIP 2 = Off

www.sensorshop24.de

otom Group GmbH  
Niederwiesen 7  
78199 Bräunlingen

Tel. 0771/897508 - 0  
Fax 0771/897508 - 10  
www.sensorshop24.de

Stand: 2014, Änderungen vorbehalten und können jederzeit ohne Ankündigung durchgeführt werden!



## Process Description

Schmöle Laserfin® tubes are manufactured by helically winding strip onto tubes.

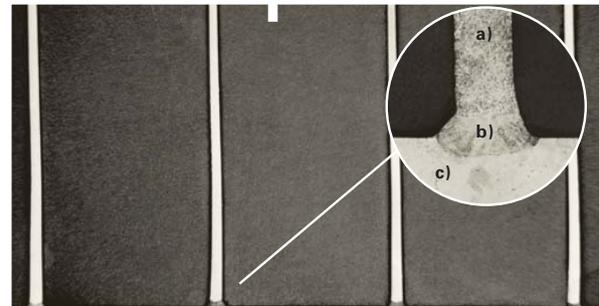
The heat transfer fins are attached to the surface of tubing in a unique\* laser process within a protected atmosphere. This method produces high quality finned tubes in a process which is proprietary to Schmöle and is constantly being improved upon.

Fin and tube material can be selected according to specific design requirements.

The small heat-affected zone in connection with thin weld seams avoid any deformation of the material. This results in a high stability of shape and a great accuracy of size of the welded finned tube.

The use of Laser technique for the welding of finned tubes offers a number of advantages.

\* Patent applied for



Laserfin®-Finned Tube (Code-Nr. 5 50 25)

**The figure shows cross sections of Laser-welded finned tubes.**

a) Fin                      b) Weldseam                      c) Tube wall

**Tube wall thickness**     $s$     =    **1.5 mm**

**Fin thickness**             $\delta_R$     =    **0.4 mm**

**Fin height**                 $h_R$     =    **12.5 mm**

**Fin pitch**                  $m$      =    **5.0 fins/inch**

**The enlarged figure shows in particular the ratio of dimensions between tube wall thickness, fin thickness and heat-affected zone having a depth of 0.2 mm only.**

## Feature

## Benefit

100% welding between fin and tube without using filler material	Avoidance of gap corrosion → Longer lifetime
	Easy to clean and sterilize → Laserfin meets the requirements: - food & beverage - pharmaceutical industry
No impurity of the weld seam, as the Laser-welding is carried out under a protective atmosphere	Optimal heat transfer, reduced material → Smaller footprint of heat exchangers → Reduced investment costs
Different materials for fin and tube	Matching the challenges of your process → Reduced downtime → Reduced O&M costs → Reduced investment costs
Uncomplicated bending and coiling of the finned tube	Tubes can be bended in the finned section → Quick and easy to process → Reduced bypass flow
No material deformation due to a small heat affected zone and thin weld seam, only slight microstructural change in tube and fin	Tubes are nearly unaffected by the welding process → Small tube walls are possible → Reduced footprint and weight of heat exchangers → Less complications fabrication
More than 10,000,000 Laserfin® tubes and more than 200,000 Laserfin® finned tube coils produced to date	→ Proven design

## Material combinations

Tube	Strip
Stainless Steel	Stainless Steel
Stainless Steel	Aluminium
Stainless Steel	Copper
Carbon Steel	Carbon Steel
Carbon Steel	Aluminium
Cu-Ni-Alloy	Copper
Cu-Ni-Alloy	Aluminium
Titanium	Titanium
Titanium	Copper

## Dimensions

- **Tube outside diameter** 8.0 – 84.0 mm
- **Fin outside diameter** 15.0 – 125.0 mm
- **Fin pitch** 5 – 13 fin/inch
- **Fin height** 5.0 – 17.0 mm
- **Fin thickness** 0.4 – 1.0 mm
- **Maximum tube lengths** 12.0 m

## Forms of supply

- In straight lengths up to 12.0 m
- With unfinned tube ends
- With unfinned intermediate sections
- In bent form, helical coils or meander



Laserfin® tubes [ 7 ]

# Standard dimensions and materials

Following dimensions and materials (steel and aluminum) are available from stock and can be combined:

Tube	8x0.75mm	15x1.2mm	18x1.5mm	20x1.2mm	25x1.5mm	30x1.5mm
Material	Material	Material	Material	Material	Material	Material
1.4404 (TP 316L)	1.4404 (TP 316L)	1.4404 (TP 316L)	1.4571 (TP 316Ti)	1.4404 (TP 316L)	1.4301 (TP 304)	1.4301 (TP 304)
Material	Material	15x1.0mm		20x1.5mm	1.4404 1.4404 316L/	
1.4404 1.4571 1.4571	(TP 316L)	(TP 316L)		(TP 316Ti)	(TP 316Ti)	
<b>Strip</b>						
<b>5x0.5mm</b>						
Material	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1.4301 / 1.4404 / 1.4521						
<b>5x0.6mm</b>						
Material	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1.4404						
<b>6x0.5mm</b>						
Material	-	✓	✓	✓	✓	✓
1.4404						
<b>8x0.5mm</b>						
Material	-	✓	✓	✓	✓	✓
Al 99.5						
<b>9x0.4mm</b>						
Material	-	-	✓	✓	✓	✓
1.4404						
<b>9x0.6mm</b>						
Material	-	✓	✓	✓	✓	✓
1.4404						
<b>10x0.4mm</b>						
Material	-	-	✓	✓	✓	✓
1.4571						
<b>10x0.8mm</b>						
Material	-	✓	✓	✓	✓	✓
Al 99.5						
<b>12.5x0.4mm</b>						
Material	-	-	-	-	✓	✓
1.4301 / 1.4571						
<b>12.5x0.5mm</b>						
Material	-	-	-	✓	✓	✓
1.4521 / Al 99.5						
<b>16x0.5mm</b>						
Material	-	-	-	-	✓	✓

Laserfin® tubes can among others be manufactured in following dimensions:

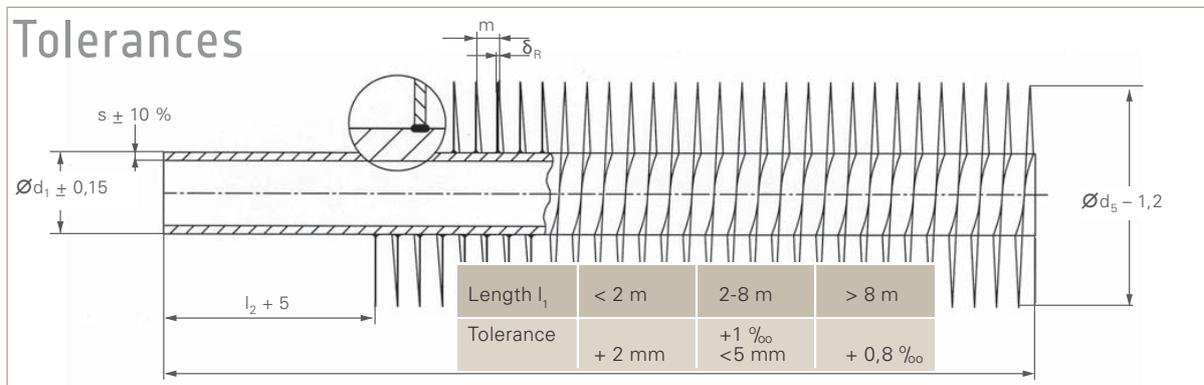
Schmöle Code No.	Base tube		Finned tube								
	Outside	Wall thickness	Outside diameter	Fin height	Mean fin thickness	Fin pitch		Inside sectional area	Specific external surface	Surface area ratio	approximate weight** G
	$d_1$ [mm]	$s$ [mm]	$d_s$ [mm]	$h_R$ [mm]	$\bar{\sigma}_R$ [mm]	$m$ [fins/inch]	$m$ [mm]	$A_{qi}$ [cm <sup>2</sup> ]	$A_s$ [m <sup>2</sup> /m]	$A_s/A_i$ [-]	total [kg/m]
5 25 15	15.0	1.2	25.0	5.0	0.5	5	5.08	1.25	0.17	4.5	0.66
7 25 15	15.0	1.2	25.0	5.0	0.5	7	3.63	1.25	0.23	5.8	0.76
9 25 15	15.0	1.2	25.0	5.0	0.5	9	2.82	1.25	0.28	7.5	0.86
5 40 20	20.0	1.5	40.0	10.0	0.4	5	5.08	2.27	0.44	8.3	1.27
7 40 20	20.0	1.5	40.0	10.0	0.4	7	3.63	2.27	0.60	11.1	1.51
9 40 20	20.0	1.5	40.0	10.0	0.4	9	2.82	2.27	0.74	14.0	1.74
11 40 20	20.0	1.5	40.0	10.0	0.4	11	2.31	2.27	0.90	16.8	2.00
5 45 25	25.0	1.5	45.0	10.0	0.4	5	5.08	3.80	0.52	7.5	1.56
7 45 25	25.0	1.5	45.0	10.0	0.4	7	3.63	3.80	0.70	10.1	1.83
9 45 25	25.0	1.5	45.0	10.0	0.4	9	2.82	3.80	0.87	12.7	2.11
11 45 25	25.0	1.5	45.0	10.0	0.4	11	2.31	3.80	1.05	15.2	2.40
5 50 25	25.0	1.5	50.0	12.5	0.4	5	5.08	3.80	0.67	9.7	1.79
7 50 25	25.0	1.5	50.0	12.5	0.4	7	3.63	3.80	0.91	13.1	2.16
9 50 25*	25.0	1.5	50.0	12.5	0.4	9	2.82	3.80	1.14	16.5	2.52
11 50 25	25.0	1.5	50.0	12.5	0.4	11	2.31	3.80	1.38	19.4	2.92
5 55 30	30.0	1.8	55.0	12.5	0.4	5	5.08	5.47	0.76	9.2	2.30
7 55 30	30.0	1.8	55.0	12.5	0.4	7	3.63	5.47	1.03	12.4	2.71
9 55 30	30.0	1.8	55.0	12.5	0.4	9	2.82	5.47	1.30	15.2	2.96
11 55 30	30.0	1.8	55.0	12.5	0.4	11	2.31	5.47	1.57	18.4	3.38

\* The possibility of finning with certain strip materials has to be verified in the individual case

\*\* = 7.9 kg/dm<sup>3</sup>

### Tube codification

Schmöle-Code No.	5	40	20
	Fin pitch 5 fins / inch	Fin outside diameter 40 mm	Tube outside diameter 20 mm



## Heat transfer

The heat transfer function  $Nu/Pr^{0.333}$ , referred to the outer heat transfer coefficient  $\alpha_a$  for forced gas flow through Laserfin® finned tube bundles with staggered tube arrangement, can be determined according to *graph 1* and *equation 4*.

The curve in *graph 1* corresponds to the following equation for Laserfin® tubes having a tube outside diameter of 20 mm, a fin outside diameter of 40 mm and a fin thickness of 0.4 mm:

$$Nu/Pr^{0.333} = 1.013 Re^{0.382} \quad [-] \quad (1)$$

The outer heat transfer coefficient  $\alpha_a$  for air as function of the Reynolds number can be taken directly from *graph 2*.

The flow velocity  $v_e$  is referred to the smallest flow cross section  $f_e$  in the Laserfin® finned tube bundle.

The influence of the fin efficiency  $\eta_R$  on the outer heat transfer coefficient  $\alpha_a$  is already considered in the *graphs 1* and *2* and in the *equations 1* to *6*.

## Radiation coefficient

The influence of the heat radiation on the heat transfer has not been taken into account in the outer heat transfer coefficient  $\alpha_a$ . As shown in *graph 3* the heat radiation is insignificant for gas temperatures below 100°C, however it is not negligible at bigger temperature differences. In this case the radiation coefficient  $\alpha_s$  may be added to the outer heat transfer coefficient  $\alpha_a$ .

## Pressure drop

The pressure  $\Delta p$  for cross flow of gases through Laserfin® finned tube bundles with staggered tube arrangement is calculated according to the following *equation*:

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_e^2 \cdot n \quad [\text{Pa}]$$

The resistance coefficient  $\zeta$ , may be taken from *graph 4*.

## Fin efficiency

*Graph 5* shows the fin efficiency  $\eta$  of stainless steel being a function of the outer heat transfer coefficient  $\alpha_a$  with

the fin thickness  $\delta_R$  as parameter.

From *graph 5* it follows that for an operating point  $\alpha_a = 60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  halving the fin thickness from 0.8 to 0.4 mm reduces the fin efficiency  $\eta_R$  by only 17%.

The utilization of the material savings possible with Laserfin® Finned Tubes, e.g. using a fin thickness of 0.4 mm, will result in a considerably more favourable price/performance ratio compared with traditionally welded finned tubes having fin thicknesses of 0.8 mm or more.

### Nomenclature

$A_o$ [m <sup>2</sup> ]	External surface
$A_i$ [m <sup>2</sup> ]	Internal surface
$A_{qi}$ [m <sup>2</sup> ]	Inside sectional area
$a$ [m <sup>2</sup> /s]	Thermal diffusivity $a = \lambda / (c_p \cdot \rho)$
$c_p$ [kJ/(kgK)]	Specific heat (Constant pressure)
$d_1$ [mm]	Tube outside diameter
$f_e$ [cm <sup>2</sup> ]	Smallest flow cross section
$h_R$ [mm]	Fin height
$m$ [fins/inch; mm]	Fin pitch
$n$ [-]	Number of tube rows
$s$ [mm]	Tube wall thickness
$t$ [s]	Point of time of the temperature march
$v_e$ [m/s]	Flow velocity in the smallest cross section
$\alpha_a$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	Outer heat transfer coefficient
$\alpha_s$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	Heat transfer coefficient (Radiation)
$\delta_r$ [mm]	Fin thickness
$\Delta_p$ [Pa]	Pressure drop
$\zeta$ [-]	Resistance coefficient
$\eta$ [-]	Fin efficiency
$\vartheta_g$ [°C]	Gas temperature
$\vartheta_r$ [°C]	Tube temperature
$\vartheta_w$ [°C]	Water temperature
$\lambda$ [W/(mK)]	Thermal conductivity
$\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	Kinematic viscosity
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Density

# REGNERATOR ANSCHLUSSLISTE

relevante Positionen für hartverdrahtete Sicherheitskette

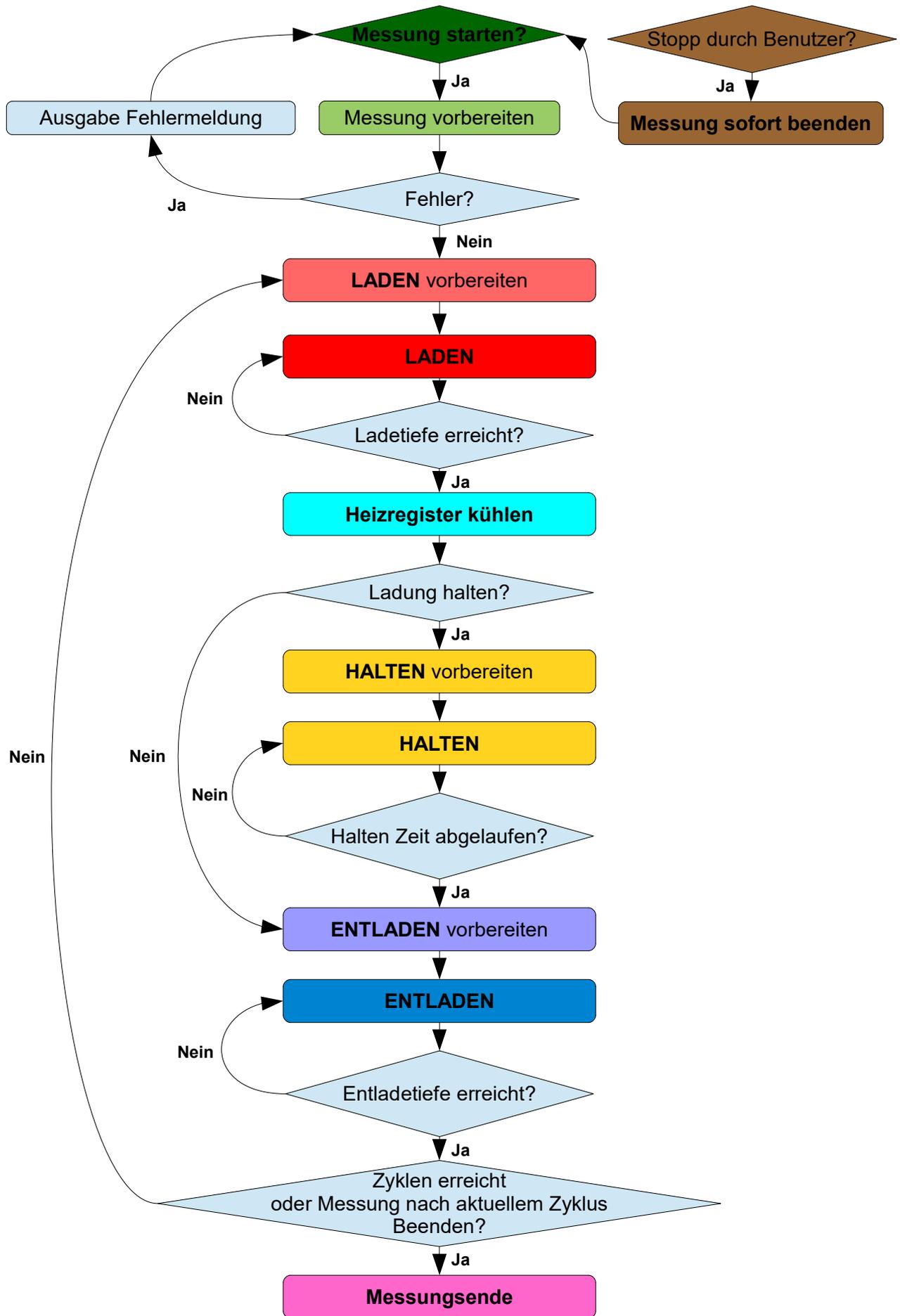
IO Nr	Karte	Input	Stück	Sensor/Aktor	Output/Input Typ	Messbereich	Schnittstelle	Input/Karte	Stück	INPUTS	INPUTS	INPUTS	frei	Variable Name
									Karten	vorh.	belegt			
<b>DIGITALER INPUT</b>														
1	1	1	1	1	DI	offen - 1	Digitaler Input							gdi_klappes1_offen
2	1	2	1	1	DI	geschlossen - 1	Digitaler Input							gdi_klappes2_zu
3	1	3	1	1	DI	offen - 1	Digitaler Input							gdi_klappes2_offen
4	1	4	1	1	DI	geschlossen - 1	Digitaler Input							gdi_klappes3_zu
5	1	5	1	1	DI	offen - 1	Digitaler Input							gdi_klappes3_offen
6	1	6	1	1	DI	geschlossen - 1	Digitaler Input							gdi_klappes3_zu
7	1	7	1	1	DI	offen - 1	Digitaler Input							gdi_klappes4_offen
8	1	8	1	1	DI	geschlossen - 1	Digitaler Input							gdi_klappes4_zu
9	1	9	1	1	DI	offen - 1	Digitaler Input							gdi_klappes5_offen
10	1	10	1	1	DI	geschlossen - 1	Digitaler Input							gdi_klappes5_zu
11	1	11	1	1	DI	RUN - 1	Digitaler Input							gdi_FU_run
12	1	12	1	1	DI	FAULT - 0	Digitaler Input							gdi_FU_fehler
13	2	1	1	1	DI	NOT-AUS-0	Digitaler Input							gdi_notaus
14	2	2	1	1	DI	Mindestdruckabfall erreicht - 1	Digitaler Input							gdi_druckwaechter
15	2	3	1	1	DI	FAULT - 0	Digitaler Input							gdi_Thyristor_fehler
<b>15 Digitaler Output</b>														
<b>DIGITALER OUTPUT</b>														
1	1	1	1	1	DO	offen - 1	Digitaler Output							gdo_k1_auf
2	1	2	1	1	DO	schließen - 1	Digitaler Output							gdo_k1_zu
3	1	3	1	1	DO	offen - 1	Digitaler Output							gdo_k2_auf
4	1	4	1	1	DO	schließen - 1	Digitaler Output							gdo_k2_zu
5	1	5	1	1	DO	offen - 1	Digitaler Output							gdo_k3_auf
6	1	6	1	1	DO	schließen - 1	Digitaler Output							gdo_k3_zu
7	1	7	1	1	DO	offen - 1	Digitaler Output							gdo_k4_auf
8	1	8	1	1	DO	schließen - 1	Digitaler Output							gdo_k4_zu
9	1	9	1	1	DO	offen - 1	Digitaler Output							gdo_k5_auf
10	1	10	1	1	DO	schließen - 1	Digitaler Output							gdo_k5_zu
11	1	11	1	1	DO	Gebäse EIN - 1	Digitaler Output							gdo_FU_on
12	1	12	1	1	DO	Heizen EIN - 1	Digitaler Output							gdo_Heizregister_on
13	2	1	1	1	DO	Start vorwärts - 1	Digitaler Output							gdo_FU_RUN
14	2	2	1	1	DO	Start rückwärts - 1	Digitaler Output							
15	2	3	1	1	DO	Externer Fehler - 1	Digitaler Output							
16	2	4	1	1	DO	Frequenzwahl	Digitaler Output			0	1	0	1	
17	2	5	1	1	DO	Frequenzwahl	Digitaler Output			0	0	1	1	
18	2	6	1	1	DO	Fehlerquittierung - 1	Digitaler Output			Analog eingang 1	Fest frequenz 1	Fest frequenz 2	3	
19	2	7	1	1	DO	Zündimpulsverriegelung - 1	Digitaler Output							
20	2	8	1	1	DO	Blatringang 1	Digitaler Output							
21	2	9	1	1	DO	Blatringang 2	Digitaler Output							
22	2	10	1	1	DO	Nobelblüfung Druckluftnetz	Digitaler Output							gdo_NOT_Druckluft
23	2	11	1	1	DO	Alarmsignal	Digitaler Output							gdo_ALARM
<b>23 Digitaler Output</b>														

## REGNERATOR ANSCHLUSSLISTE

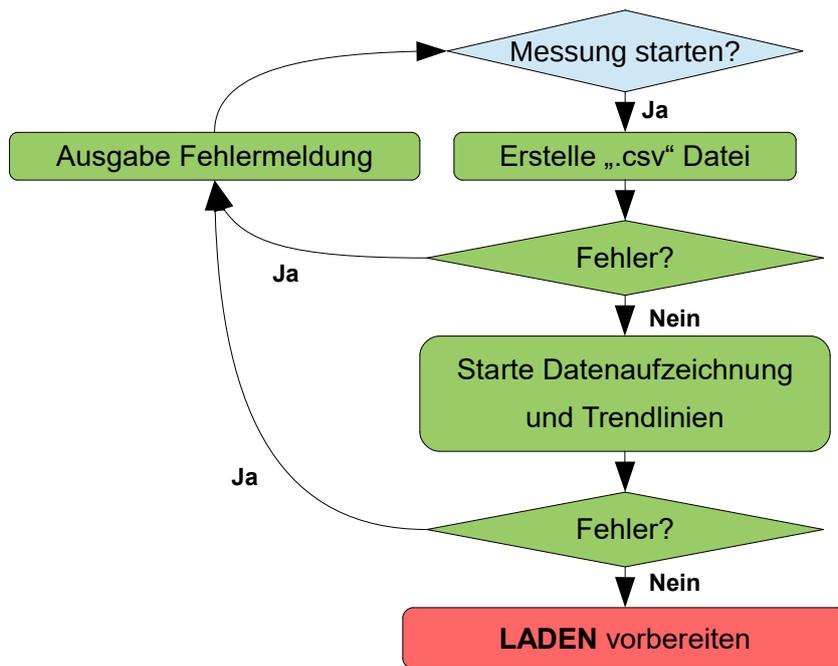
relevante Positionen für hartverdrahtete Sicherheitskette

IO Nr.	Karte	Input	Stück	Sensor/Aktor	Output/Input Typ	Messbereich	Schnittstelle	Input/Karte	Stück	INPUTS	INPUTS	INPUTS	INPUTS	Variable
									Karten	vorh.	belegt	frei		name
<b>ANALOGER INPUT</b>														
1	1	1	1	1	Frequenzumrichter	AI...4-20mA	IST- Frequenz/ Leistung/ Drehmoment Umrichter	Analoger Input	4	2	8	0		ga_FU_Frequenz
2	1	2	1	1	Thyristor Leistungssteller TYA 202	AI...4-20mA	Lastwiderstand/ Leistung/ Außenleiterstrom	Analoger Input	4	2	8	0		ga_heizung_leistungssteller
3	1	3	1	1	Durchflusssensor - Massenstrommessung	AI...4-20mA	0...555kg/h	Analoger Input	4	2	8	0		ga_m1
4	1	4	1	1	Relativdrucksensor	AI...4-20mA	0...0.1bar	Analoger Input	4	2	8	0		ga_p03
5	2	1	1	1	Thermoelement - Signalwandlerkarte	AI...4-20mA	EINSTELLEN!	Analoger Input	4	2	8	0		ga_heizung_T1
6	2	2	1	1	Feuchtesensor - Luftansaugung	AI...4-20mA	0 ...100°C	Analoger Input	4	2	8	0		ga_t_Zuluft
7	2	3	1	1	Temperatursensor - Luftansaugung	AI...4-20mA	-30°C ...+70°C	Analoger Input	4	2	8	0		ga_x_feuchte_Zuluft
8	2	4	1	1	Differenzdrucksensor	AI...4-20mA	-500Pa...+500Pa	Analoger Input	4	2	8	0		ga_dp_p0102
<b>8 Analogger Input</b>														
<b>ANALOGER OUTPUT</b>														
1	1	1	1	1	Frequenzumrichter	AO...4-20mA	Frequenz-Sollwert 1	Analoger Output	4	1	4	3	1	gao_FU_Frequenz
2	1	2	1	1	Frequenzumrichter	AO...4-20mA	Frequenz-Sollwert 2	Analoger Output	4	1	4	3	1	gao_heizung_leistungssteller
3	1	3	1	1	Thyristor Leistungssteller TYA 202	AO...4-20mA	0-100% Heizleistung	Analoger Output	4	1	4	3	1	
<b>3 Analogger Output</b>														
<b>PT100</b>														
1	1	1	1	1	PT100 4-Leiter	PT100 4-Leiter	-50...400°C	Widerstandstemperaturmessung	4	1	4	3	1	gab_PT1_unten
2	1	2	1	1	PT100 4-Leiter	PT100 4-Leiter	-50...400 C	Widerstandstemperaturmessung	4	1	4	3	1	gab_PT2_oben
3	1	3	1	1	PT100 4-Leiter	PT100 4-Leiter	-50...400 C	Widerstandstemperaturmessung	4	1	4	3	1	gab_PT3_bypass
<b>3 PT100</b>														
<b>Thermoelemente</b>														
1	1	1	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T101
2	1	2	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T102
3	1	3	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T103
4	1	4	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T104
5	1	5	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T201
6	1	6	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T202
7	2	1	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T203
8	2	2	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T204
9	2	3	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T301
10	2	4	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T302
11	2	5	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T303
12	2	6	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T304
13	3	1	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T401
14	3	2	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T402
15	3	3	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T403
16	3	4	1	1	Einschraub - Thermoelement	K	-200...600°C	Thermoelement	4	1	4	3	1	gat_T404
17	3	5	1	1	Mantelthermoelement	K	unbekannt	Thermoelement / 4...20mA	6	3	18	17	1	gat_heizung_T1
			0	0	Thermoelement	K	-220°C...1150°C	Thermoelement	6	3	18	17	1	gat_heizung_T2
<b>17 Thermoelement</b>														

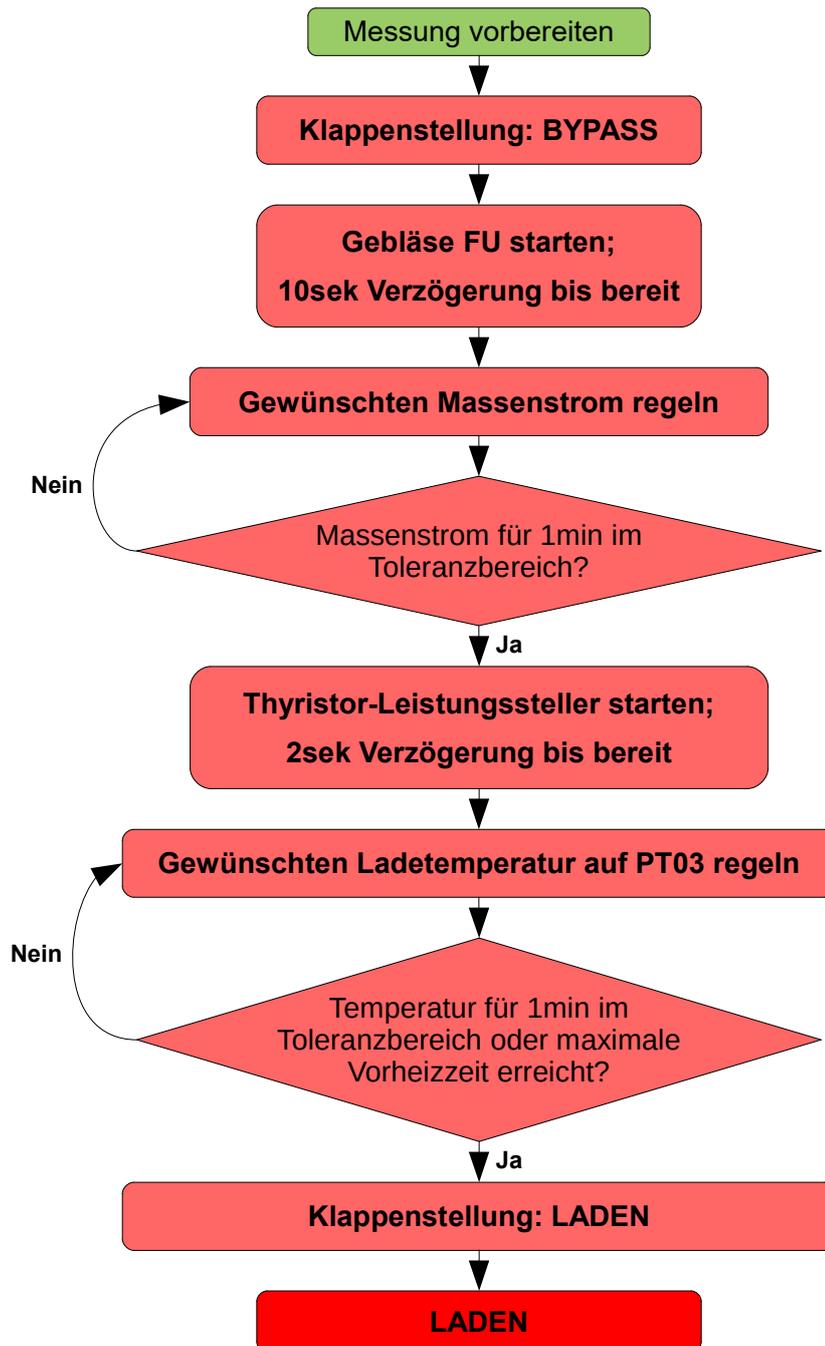
## F Programmstruktur



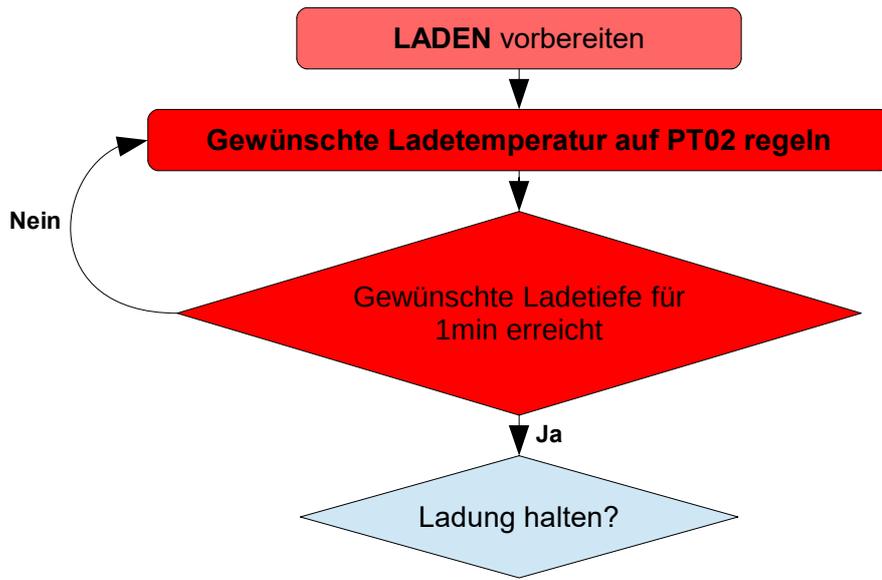
# Messung vorbereiten



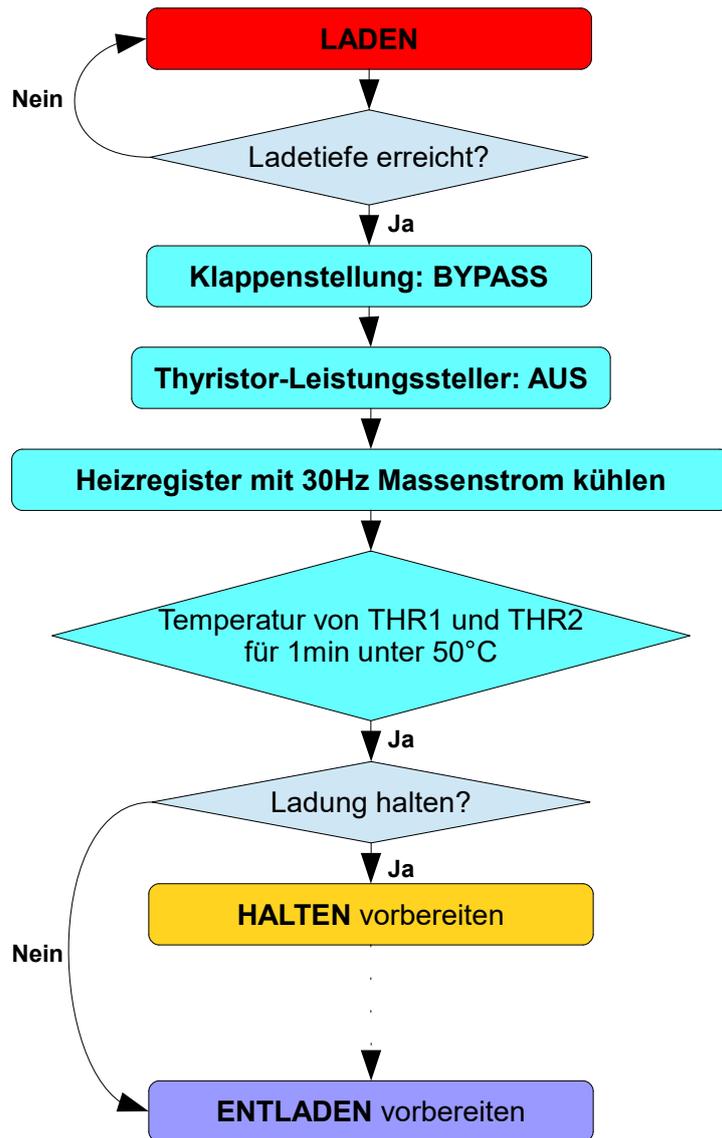
# Laden vorbereiten



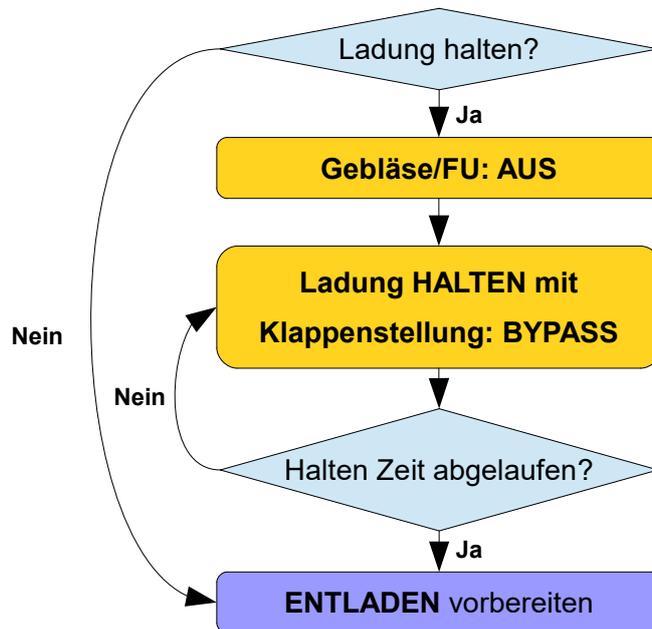
# Laden



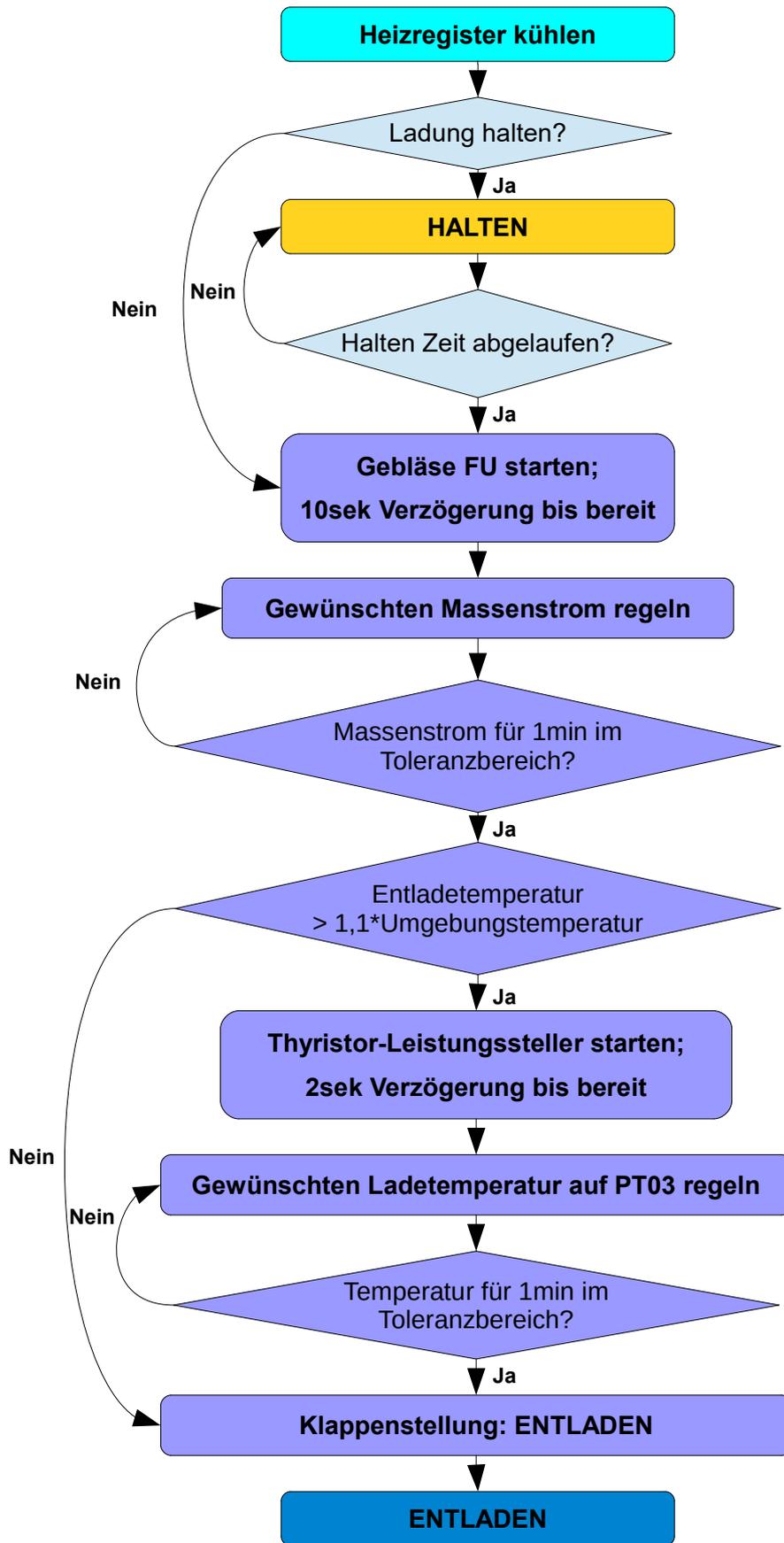
# Nachkühlen



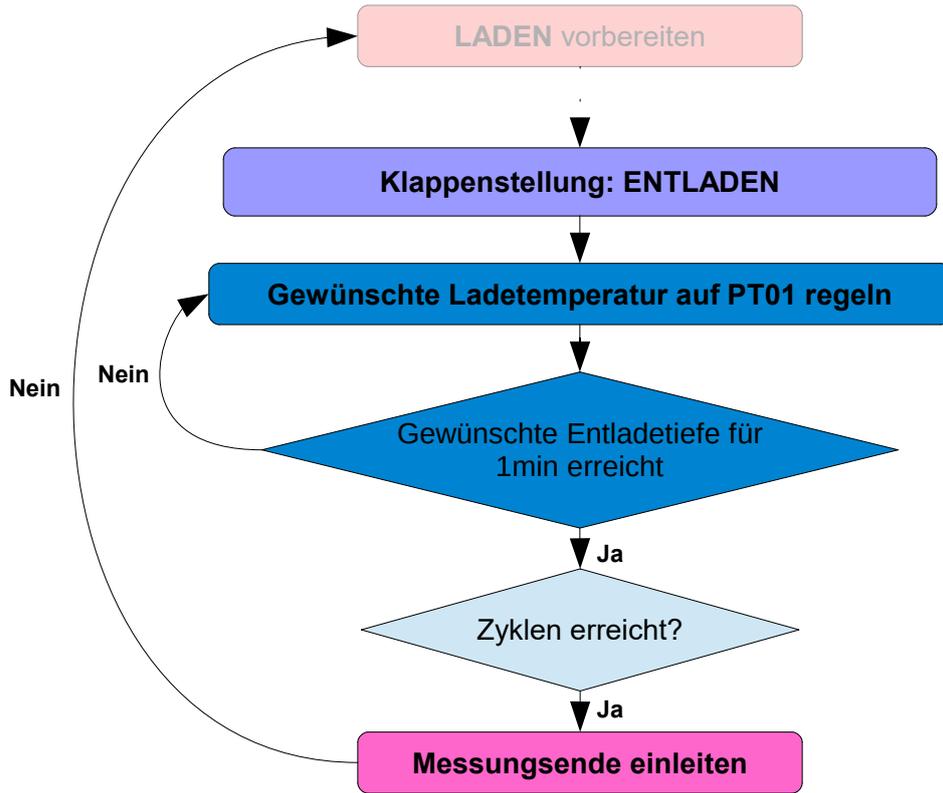
# Ladung HALTEN



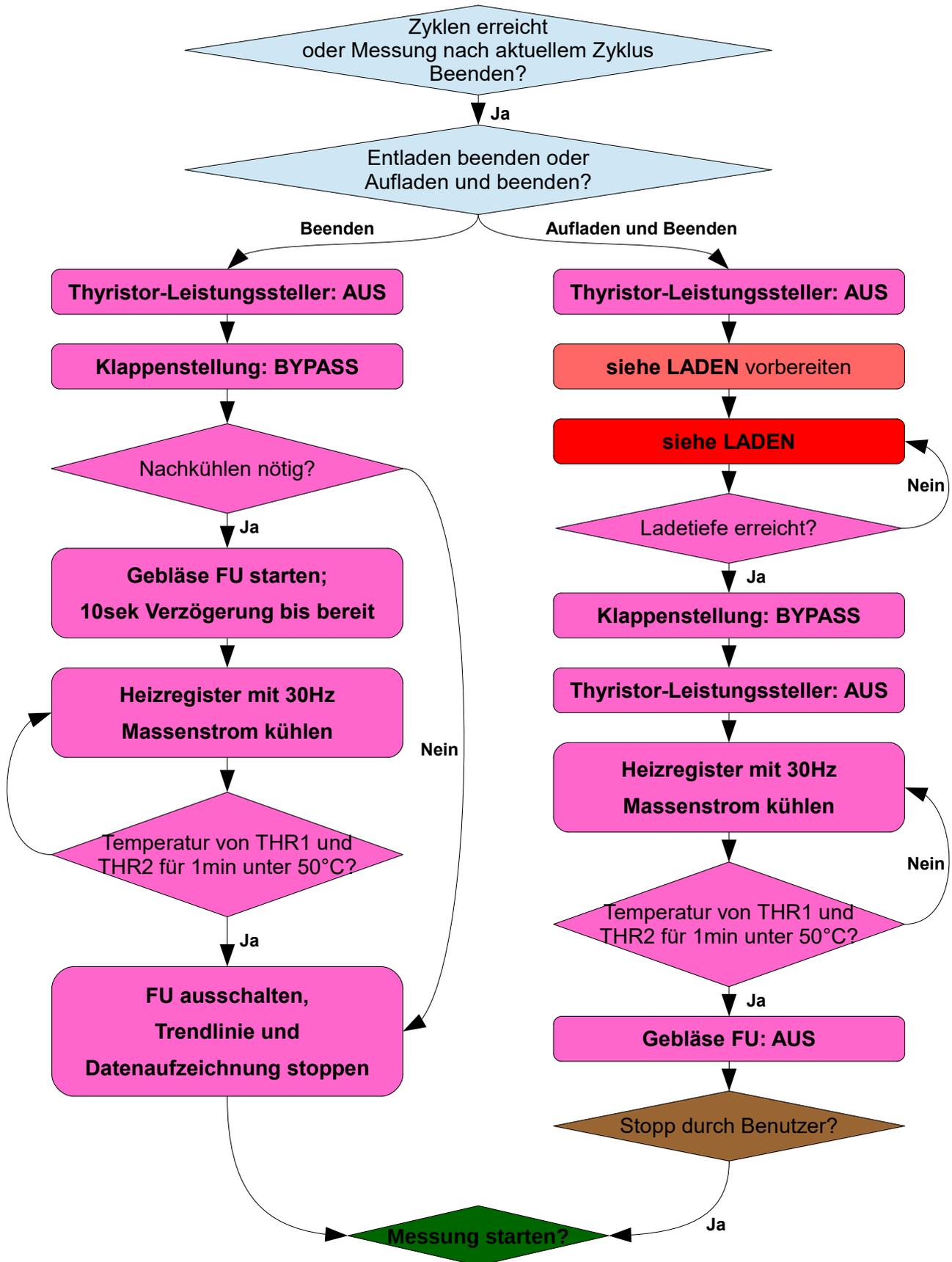
# ENTLADEN vorbereiten



# ENTLADEN



# Messungsende



# Messungsende

