

BACHELORTHESIS

zur Erlangung des akademischen Grades **Bachelor of Engineering (B. Eng.)**
des Studienganges Energietechnik mit Schwerpunkt Energiesysteme
an der
Technischen Hochschule Mittelhessen

Projektierung eines Dampfspeichers für ein bestehendes Biomasseheizkraftwerk in Pfaffenhofen

vorgelegt von:

Name: Richard Leonhard Martin Göhler
Matrikelnummer: 5171390
Anschrift: Friedrichstraße 23
61197 Florstadt

vorgelegt am: 9. November 2020

Referent: Prof. Dr.-Ing. Sven Pohl
(Technische Hochschule Mittelhessen)

Korreferent: Dipl.-Ing. (FH) Harry Wilhelm
(Ingenieurbüro Harry Wilhelm)

Sperrvermerk

Die vorliegende Bachelorthesis mit dem Titel

**Projektierung eines Dampfspeichers
für ein bestehendes Biomasseheizkraftwerk in Pfaffenhofen**

beinhaltet interne und vertrauliche Information des Unternehmens:

**Ingenieurbüro Harry Wilhelm
Dresdener Straße 12
35444 Biebental
Inhaber: Dipl.-Ing. (FH) Harry Wilhelm**

Eine Einsicht in diese Bachelorthesis ist nicht gestattet. Ausgenommen davon sind die betreuenden Dozenten sowie die befugten Mitglieder des Prüfungsausschusses. Eine Veröffentlichung und Vervielfältigung der Bachelorthesis -auch in Auszügen- ist nicht gestattet.

Ausnahmen von dieser Regel bedürfen einer Genehmigung des Unternehmens.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig durchgeführt und ausgearbeitet worden ist. Es wurde lediglich auf die angegebene Literatur Bezug genommen.

Ich versichere weiterhin, dass diese Arbeit noch keinem anderen Prüfungsgremium vorgelegen hat.

Gießen, den 9. November 2020

(Leonhard Göhler)

Vorwort

Die Technische Hochschule Ingolstadt untersucht im Rahmen einer Forschungsarbeit die Potentiale der Dampfspeicherung in einem thermischen Gesamtspeicher. Hierbei soll das KomBio-Projekt als modulare Ergänzung an das Biomasseheizkraftwerk Pfaffenhofen an der Ilm gebaut werden. Die notwendigen Anschlüsse an den Wasser-Dampf-Kreislauf werden dabei durch das Biomasseheizkraftwerk zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen der Bearbeitung des Projektes habe ich zahlreiche Kollegen kennengelernt, bei denen ich mich für die Zusammenarbeit und ihre Unterstützung bedanken möchte.

Besonderer Dank gebührt an dieser Stelle Herrn Dipl.-Ing. (FH) Harry Wilhelm für seine Unterstützung und die Möglichkeit meine Abschlussarbeit über dieses spannende Projekt schreiben zu dürfen. Darüber hinaus möchte ich dem gesamten Team des Ingenieurbüros für die enge Zusammenarbeit danken. Großer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Matthias Stark (Promovend der Technischen Hochschule Ingolstadt).

In der vorliegenden Thesis sind die angestellten Berechnungen sowie notwendigen Stoffparameter zu Dampf und Wasser, mithilfe des EXCEL-Add-Ins [Fluid-EXL-Graphics] angefertigt bzw. entnommen worden.

Aufgrund des Projektfortschrittes wurde die Aufgabenstellung und Zielsetzung im Austausch mit dem Auftraggeber präzisiert.

Inhaltsverzeichnis

Sperrvermerk	II
Eidesstattliche Erklärung	III
Vorwort	IV
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungs- / Symbolverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung	2
1.2 Problemstellung	2
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Thermodynamische Grundlagen zu Dampf und Wasser	4
2.2 Energiespeichersysteme	10
2.2.1 Relevanz von Energiespeichern	10
2.2.2 Sensible Wärmespeicher	11
2.2.3 Dampfspeicherung	11
2.3 Regeltechnik im Dampfspeichersystem	14
2.3.1 Stellgröße Dampf	15
2.3.2 Druckregelung	16
2.3.3 Durchflussregelung	16
3 Projektierung des Gesamtspeicherkonzeptes	20
3.1 Integration des Dampfspeichersystems	20
3.2 Speicherkonzept des KomBio-Projektes	22
3.2.1 Feststoffspeicher	24
3.2.2 Dampfspeicher	26
3.3 Beladung des Speichersystems	28
3.4 Entladung des Speichersystems	32
3.5 Inbetriebnahme	38
4 Ausblick / Fazit	39
Literaturverzeichnis	I
0 Anhang	i
0.1 Abbildungen und Berechnungen	i

0.2	VBA-Berechnungsprogramme	iii
0.2.1	Berechnungsprogramm zur Bestimmung des minimalen Wärmeverlusts in Abhängigkeit der Wandstärke der Isolierung	iii
0.2.2	Berechnungsprogramm zur Bestimmung der Wandstärke der Isolierung bei gegebener Temperatur	iv
0.3	Besichtigung des BMHKWs Pfaffenhofen an der Ilm	v
0.4	Mögliches Gesamtschema	viii

Abbildungsverzeichnis

1.1	Dampferzeugung und Dampfabnahme mit periodischen Schwankungen	3
2.1	Qualitatives T-s-Diagramm	5
2.2	Unterschied siedendes Wasser und Dampf	6
2.3	Relevanz von Speichern	11
2.4	Speichertemperatur in Abhängigkeit des Speicherdruckes	12
2.5	Einfacher Regelkreis	15
2.6	Schematische Darstellung einer Druckregelung	16
2.7	Schematische Darstellung einer Durchflussregelung	16
3.1	Integration eines Speichersystems in den WDK eines BMHKW	20
3.2	Beladung Feststoffspeicher	25
3.3	Entladung Feststoffspeicher	25
3.4	Schematische Darstellung des Dampfspeichers	27
3.5	Beladung des Speichersystems	28
3.6	Entladung des Speichersystems	32
3.7	Wärmeverlust bei unterschiedlichen Isolierungswandstärken	35
3.8	Veränderlicher Sollwert zur stufenweisen Entladung	37
3.9	Verzögertes Ausgangssignal zur stufenlosen Entladung	37
3.10	Vorwärmung des Speichersystems	38
4.1	Variation der Dampfentnahme zur Beladung eines Speichersystems	40
0.1	Durchmesseränderung zylindrischer Bauteile	i
0.2	Darstellung Einheitskreis	ii
0.3	BMHKW Pfaffenhofen an der Ilm	v
0.4	Möglicher Aufstellungsort des KomBio-Projektes	v
0.5	Frischdampfauskopplung für den Beladungsfall	vi
0.6	Leistungsname der Frischdampfauskopplung	vi
0.7	Anschlüsse für den Container in dem das Gesamtspeicherkonzept realisiert werden soll; Schnittstelle des BMHKWs	vii
0.8	Mögliche Entnahme des Warmwassers für die Vorwärmung	vii
0.9	Thermisches Gesamtspeicherkonzept KomBio-Projekt	viii

Tabellenverzeichnis

2.1	Volumina von 1 <i>kg</i> Wasser bei unterschiedlichen Parametern	6
2.2	Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Fluide (vgl. [10])	9
2.3	Einheitsbedingungen des k_V -Wertes	18
3.1	zulässige Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Dampfdart	23
3.2	Physikalische Eigenschaften von Beton (vgl. [10])	26
3.3	Betriebsparameter des Dampfspeichers vollgeladen	29
3.4	Parameter der Volumenstrommessung im Beladungsfall	31
3.5	Startparameter der Entladung des Dampfspeichers	33
3.6	Startparameter der Entladung des Dampfspeichers	33
3.7	Parameter der Volumenstrommessung im Entladungsfall	34
3.8	Berechnungsvorgaben zur Bestimmung des minimalen Wärmeverlustes bei unterschiedlichen Isolierungstärken (vgl. [8, 10])	35

Abkürzungs- / Symbolverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
BMHKW	Biomasseheizkraftwerk
WDK	Wasser-Dampf-Kreislauf
FS	Feststoffspeicher
DS	Dampfspeicher

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m^2
B	Entnahmerate	$kg/(h \ m^2)$
C	Widerstandszahl	
cp	spezifische Wärmekapazität von Stoffe	$kJ/(kg \ K)$
d	Durchmesser	m
\bar{d}	logarithmischer Mittelwert Durchmesser	m
E	Energieeintrag bzw. -austrag in das System	kJ
H	innere Energie des Zwei-Phasen-Gebietes	kJ
h	spezifische Enthalpie	kJ/kg
h	Höhe	m
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2 \ K)$
l	Länge	m
L	charakteristisches Längenmaß	m
m	Masse	kg
ND	Nachdampfanteil	kg_{Wasser}/kg_{Dampf}
p	Druck	bar
Q	Wärmeenergie	kJ, kWh
\dot{Q}	Wärmeleistung	W
q_m	Massenstrom	kg/h

q_V	Volumenstrom	m^3/h
r	Radius	m
s	Wandstärke unterschiedlicher Materialien	m
t	Temperatur	$^{\circ}C$
T	Temperatur	K
v	spezifisches Volumen	m^3/kg
V	Volumen	m^3
w	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
x	Dampfgehalt	kJ/kg
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2 K)$
β	Befüllungsgrad	
γ	Winkel	$^{\circ}$
Δ	Differenz	
Λ	Widerstandsbeiwert	
λ	Wärmeleitwiderstand unterschiedlicher Materialien	$W/(m K)$
ρ	Dichte von Stoffen	kg/m^3
τ	Zeit	s, min

1 Einleitung

Die letzten Jahre haben gezeigt, dass sich eine allmähliche Klimaveränderung abzeichnet. Aufgrund internationaler Bestrebungen die emittierten Treibhausgase drastisch zu reduzieren und die damit einhergehende Veränderung des Klimas aufzuhalten bzw. zu verlangsamen, haben sich 2015 im Pariser Abkommen 197 souveräne Staaten geeinigt, eine globale Treibhausgasneutralität zu erreichen. Die von 180 Staaten ratifizierte Vereinbarung verfolgt drei längerfristige Ziele. Neben der Treibhausgasneutralität soll die zukünftige Anpassung der Mitgliedsstaaten an den Klimawandel gestärkt sowie Finanzmittelflüsse mit Klimazielen vereinbar gemacht werden. Die globale Erderwärmung soll auf deutlich unter zwei Grad Celsius im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter beschränkt werden. Um den Forderungen im Abkommen von Paris gerecht zu werden, hat Deutschland den Klimaschutzplan 2050 eingeführt und will bis zum Jahr 2050 treibhausgasneutral sein (vgl. [1]). Das enorme Treibhauspotential von Kohlenstoffdioxid wird als Ursache für die Erderwärmung angeführt (vgl. [2]).

Vor allem der Energiesektor hat in den vergangenen Jahrhunderten sehr stark auf fossile Energieträger, wie Steinkohle, Braunkohle und Erdgas gesetzt. Fossile Energieträger wurden und werden weiterhin zunehmend durch Regenerative ersetzt.

Bei der Verbrennung von kohlenwasserstoffhaltigen Verbindungen entsteht neben anderen Schadstoffen, wie NO_x , SO_x und CO insbesondere CO_2 . Es werden jahrtausendealte organische Verbindungen umgesetzt, sodass sich immer mehr Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre anreichert.

In Biomasseheizkraftwerken (BMHKW) wird Biomasse verbrannt. Dieser Brennstoff besteht aus unterschiedlichen organischen Verbindungen. Der in der Biomasse gebundene Kohlenstoff wird bei vollkommener Verbrennung gänzlich zu Kohlenstoffdioxid oxidiert. Demnach emittiert ein BMHKW, ähnlich wie konventionelle Heizkraftwerke, die mit fossilen Energieträger betrieben werden, auch Kohlenstoffdioxid. Jedoch wird dieser bei der Verbrennung entstehende Kohlenstoffdioxid aus Biomasse in anderer Biomasse wieder gebunden, sodass ein kohlenstoffdioxidneutraler Kreislauf entsteht.

Ein großer Nachteil, der auch lange Zeit den Ausbau von regenerativen Energien verzögert hat, ist deren Volatilität. So sind die regenerativen Energieträgern vor allem an das Klima bzw. Wetter gebunden. Eine nachfragegerechte Energieversorgung durch regenerative Energien ist somit nicht realisierbar. Mit Hilfe verschiedener Speichertechnologien kann die im Überschuss von Sonne oder Wind generierte Energie gepuffert werden, sodass bei Energiebedarf die Versorgung über Speicher gedeckt werden kann.

Im Zuge der Umwandlung des Energiesektors nehmen Speicher eine immer zentralere Rolle ein. Je nach Anwendungsfall gibt es optimierte Speicherverfahren, um die bei der Ein- und Ausspeicherung entstehenden Verluste zu minimieren.

Speichersysteme können einen wichtigen Beitrag leisten, die vorhandenen Ressourcen energetisch optimal zu wandeln und zu nutzen. Hierbei kann das regionale und zeitliche Energiedargebot durch die Speicherung angepasst werden.

Die technologische Betrachtung der Dampfspeicherung wurde bereits zu Beginn des ver-

gangenen Jahrhunderts vorgenommen (vgl. [3]). Dampfspeicher wurden dabei eingesetzt um wertvolle Ressourcen, wie Brennstoffe, einzusparen und die Ressourceneffizienz zu steigern.

Die Herausforderung der Flexibilisierung der Energieversorgung und der technologisch, ökologisch und ökonomisch sinnvollen Nutzung von Ressourcen ist in unserer Zeit von besonderer Relevanz.

1.1 Aufgabenstellung

Mit der Arbeit "Projektierung eines Dampfspeichers für ein bestehendes Biomasseheizkraftwerk in Pfaffenhofen" sollen Überlegungen zur Erarbeitung eines Speicherkonzeptes angestellt werden, welches die Integration eines Dampfspeichersystems in ein Biomasseheizkraftwerk ermöglicht. Ziel des Projektes ist es einen modellhaften Dampfspeicher zu realisieren, der das Potenzial der Dampfspeicherung aufzeigen soll.

Die Arbeit soll die relevanten Prozesswege und Prozesszustände von Dampf und Wasser rund um das Dampfspeichersystem beleuchten. Hierbei werden Variationen der Beladung und der Entladung betrachtet. Auch soll im Rahmen der Projektierung anhand vorhandener Literatur und Quellen die Auslegung notwendiger Armaturen, Leitungsdurchführungen, Regelung sowie der Sicherheitstechnik und des Wärmeübertragers im Feststoffspeicher vorgenommen werden. Zudem erfolgt eine Festlegung des Messverfahrens sowie eine Konzeptionierung der Messtechnik für die Messgrößen Durchfluss, Druck und Temperatur.

Am Ende der Ausarbeitung soll neben der Dimensionierung des Speichers ein entsprechendes Inbetriebnahmekonzept vorliegen.

1.2 Problemstellung

Eine bedarfsgerechte Energiebereitstellung für Industrie- und Haushaltsabnehmer lässt sich, wie bereits in der Einleitung beschrieben, nicht mit regenerativer Energie realisieren. Es gibt verschiedene Möglichkeiten diese zeitliche Diskrepanz zwischen Energiewandlung und -nutzung durch die Verwendung von Speichern zu beseitigen oder zu verringern. Ein großes Problem von BMHKW ist die fehlende zeitliche Flexibilität der Anlage, um schnell Energie bereitzustellen. Dadurch entstehen enorme Energieverluste, die ökonomische und ökologische Folgen haben. BMHKW haben eine höhere Verfügbarkeit (ca. 8.200 h/a) im Gegensatz zu anderen regenerativen Energieträgern wie Sonne, Wind und Wasser, die auf lokale Bedingungen angewiesen sind. So ist die Energiewandlung durch Biomasse nicht an das Wetter bzw. Klima gebunden und kann bei Windstille, Bewölkung und nachts Energie bereitstellen.

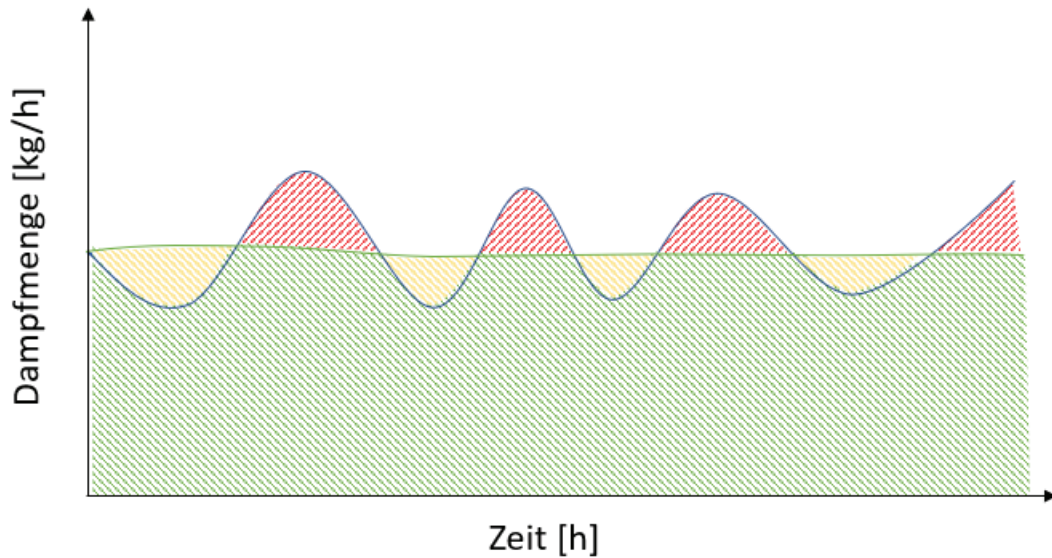


Abbildung 1.1: Dampferzeugung und Dampfabnahme mit periodischen Schwankungen

Die Abbildung 1.1 zeigt einen periodisch schwankenden Dampfbedarf (blaue Linie) sowie die Dampferzeugung (grüne Linie) in Abhängigkeit der Zeit. Die grün markierte Fläche verdeutlicht, welcher Bedarf durch den erzeugten Dampf gedeckt werden kann. Die rot und orange markierten Flächen zeigen in welchen Zeiten eine Unterdeckung bzw. Überkapazität vorliegt. In Zeiten der Überkapazität kann ein Dampfspeicher beladen werden, welcher in Zeiten der Unterdeckung die gespeicherte Energie wieder in das System abgeben kann (vgl. [4]).