Studiengang Verfahrenstechnik
Technikum Thermische Verfahrenstechnik
Prof. Dr.-Ing. S. Mall-Gleißle / Dipl.-Ing.(FH) J. Zimmer

Entspannungs-verdampfung





Quellen: energy-mag.com, wemag.com

Inhaltsverzeichnis

1 Zeichen und Symbole....3
2 Hintergrund....3
3 Motivation....3
4 Theorie....4
4.1 Entspannungsverdampfung....4
5 Versuchsaufbau....5
5.1 Die Versuchsanlage....5
5.2 Messwerterfassung....6
6 Versuchsdurchführung....6
7 Auswertung....6
8 Literatur....7
9 R&I-Fließbild der Versuchsanlage EVERDA....8

1 Zeichen und Symbole

Symbol	Größe	Einheit	Indizes	
h	spezifische Enthalpie	J/kg	0	Zustand vor der Expansion
m	Masse	kg	1	Zustand nach der Expansion
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s		
p	Druck	mbar	F	Flash
t	Temperatur	°C	K	Kondensat
t	Zeit	s	$real$	real
$\dot{V}$	Volumenstrom	m³/s	th	theoretisch
x	Dampf-Massenanteil	kg/kg		
β	Realfaktor	-	$'$	siedende Flüssigkeit
ρ	Dichte	kg/m^3	$''$	gesättigter Dampf

2 Hintergrund

Die Versorgung der stetig zunehmenden Weltbevölkerung mit Trinkwasser stellt zukünftig eine große technische Herausforderung dar. In immer größerem Umfang ist es deshalb erforderlich, Meerwasser großtechnisch zu entsalzen. Bisher werden hierzu energieintensive Verfahren angewendet, die mit fossilen Energieträgern betrieben werden. Mit einer Entspannungsverdampfung ist es möglich, Meerwasser bei niedriger Temperatur solarthermisch zu entsalzen. Um diese Verfahren zu untersuchen, wurde am KIT[1] im Rahmen eines vom BMBF[2] geförderten Vorhabens die Technikumsanlage EVERDA[3] aufgebaut und in Betrieb genommen. Detaillierte Angaben hierzu können den Arbeiten von Stengler [1] und Albrecht [2] entnommen werden. Die Anlage steht seit 2015 der Hochschule Offenburg zur Verfügung und wurde im Technikum der Verfahrenstechnik im Rahmen von Laborpraxis II [3] im Sommersemester 2015 in Betrieb genommen. Durch eine Bachelorarbeit von Koch [4] wurde sie um eine Dampfturbine mit Kondensator erweitert. Die Bachelorarbeiten von Bail [5], Schlegel [6] und Reis [7] führten zu einem Umbau der Anlage, die einen kontinuierlichen Betrieb ermöglicht.

3 Motivation

Die Entspannungsverdampfung ist ein Verfahren der Thermischen Stofftrennung. Anhand dieses Prinzips lassen sich thermodynamische Vorgänge bei der Expansion von reinen Flüssigkeiten oder Salzlösungen in das Zweiphasengebiet anschaulich zeigen. Bei Salzlösungen geht bei diesem Vorgang kein Salz in die Dampfphase über. Das entsprechende Kondensat ist frei von Salz. Damit eignet sich das Verfahren zur Entsalzung von Meerwasser, um Trinkwasser zu gewinnen.

Die Versuchsanlage EVERDA V im Technikumsmaßstab ist mit Sensorik und Messtechnik so ausgestattet, dass eine vollständige Stoff- und Energiebilanz im kontinuierlichen Versuchsbetrieb erfolgen kann. Die Eingangsparameter können in weiten Bereichen variiert werden, so dass deren Einfluss auf die abhängigen Prozessgrößen ermittelt werden kann.

1 Karlsruher Institut für Technologie
2 Bundesministerium für Bildung und Forschung
3 Entspannungsverdampfung

4 Theorie

4.1 Entspannungsverdampfung

Bei der Entspannungsverdampfung, auch Flash-Verdampfung genannt, wird eine unterkühlte Flüssigkeit von einem Druck p_0 auf einen niedrigeren Druck p_1 in einer Drossel adiabat ins Zweiphasengebiet entspannt. Dabei verdampft ein Teil der Flüssigkeit. Es stellt sich ein Phasengleichgewicht zwischen Dampf und Flüssigkeit mit der entsprechenden Sättigungstemperatur ein. Diese ist geringer als die Eintrittstemperatur und ergibt sich aus dem thermodynamischen Gleichgewicht, das sich beim Druck p_1 einstellt. Die beiden Phasen werden in einem Abscheider durch Schwerkraft getrennt, so dass die Flüssigkeit und der Dampf einzeln entnommen werden können. Das Grundprinzip ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Für den stationären Vorgang gelten die Massenbilanz,

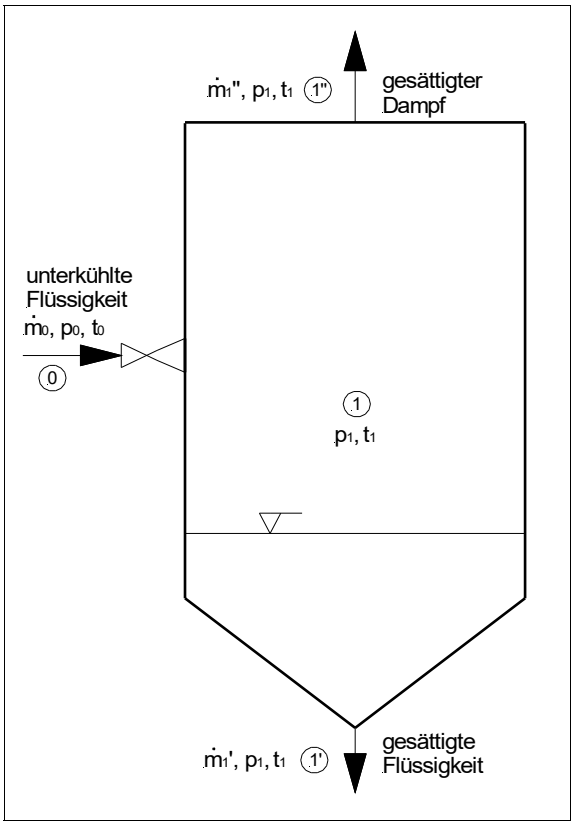


Bild 1: Prinzip der Flash-Verdampfung

$$\dot{m}_0 = \dot{m}_1^{'} + \dot{m}_1^{''} \quad , \tag{1}$$

und die Energiebilanz,

$$\dot{m}_0 \cdot h_0 = \dot{m}_1^{'} \cdot h_1^{'} + \dot{m}_1^{''} \cdot h_1^{''} \quad . \tag{2}$$

Der Dampfanteil ist allgemein definiert als der Massenanteil des gesättigten Dampfes an der Gesammasse aus gesättigtem Dampf und siedender Flüssigkeit. Für den stationären Vorgang gilt analog:

$$x = \frac{\dot{m}^{''}}{\dot{m}^{'} + \dot{m}^{''}} \quad . \tag{3}$$

Für die Entspannungsverdampfung ergibt sich damit für den verlustfreien Vorgang:

$$x_F^{th} = \frac{\dot{m}_1^{''}}{\dot{m}_1^{'} + \dot{m}_1^{''}} = \frac{\dot{m}_1^{''}}{\dot{m}_0} \quad . \tag{4}$$

Der Vorgang der Entspannungsverdampfung ist in Bild 2 im log p, h-Diagramm dargestellt. Die Verknüpfung von Gl. (4) mit Gl. (2) liefert durch Umstellen für den theoretischen Dampfanteil den Zusammenhang

$$x_F^{th} = \frac{h_0 - h_1^{'}}{h_1^{''} - h_1^{'}} \quad , \tag{5}$$

der als Streckenverhältnis aus dem log p, h-Diagramm (Bild 2) mittels Gesetz der abgewandten Hebelarme berechnet werden kann. Der Vorgang der Entspannungsverdampfung ist in der Praxis nicht ideal adiabatisch. Der reale mittlere Dampfanteil während eines Experiments,

$$x_F^{real} = \frac{m_K}{\rho_0 \cdot \int_{t_a}^{t_e} \dot{V}_0 \, dt} \quad , \tag{6}$$

ist deshalb geringer, als der nach Gl. (5) zu ermittelnde. Zur Beurteilung der Abweichung des praktischen Vorgangs vom theoretischen hat Stengler [1] den Realfaktor β mit folgender Definition eingeführt:

$$\beta = \frac{x_F^{real}}{x_F^{th}} \quad . \tag{7}$$

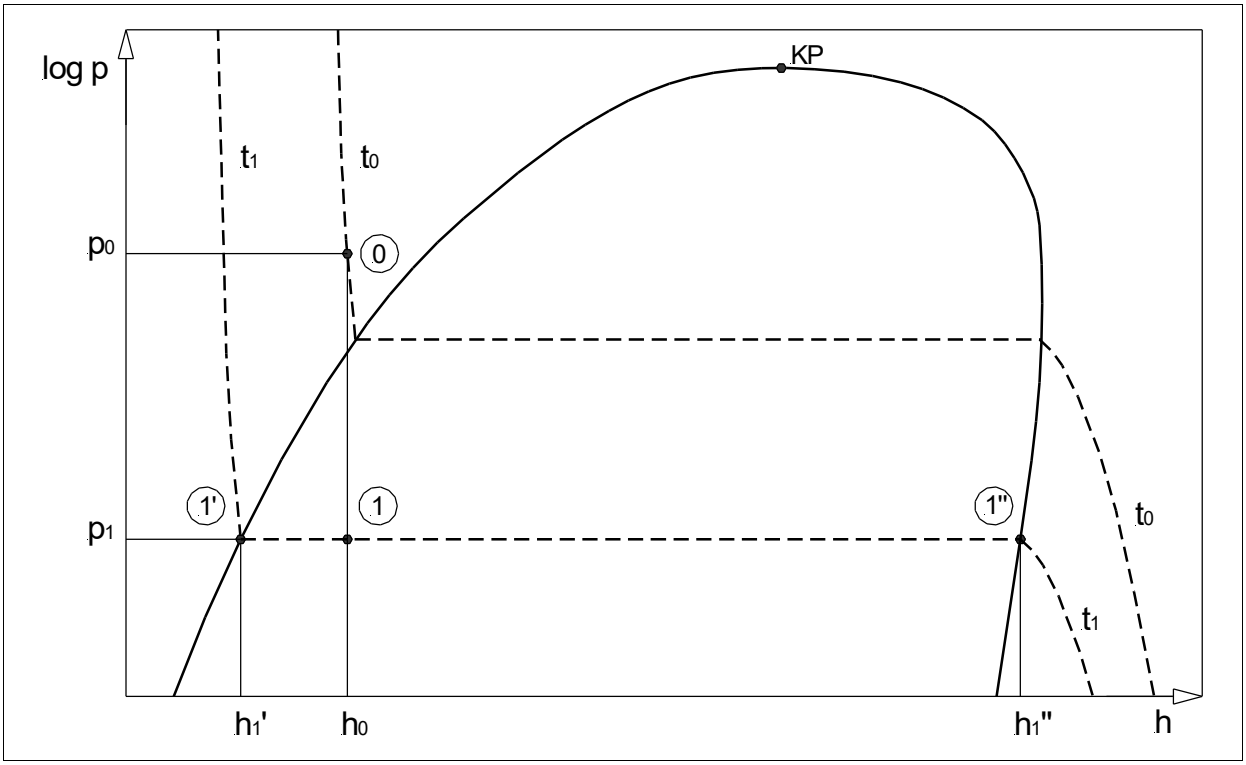


Bild 2: Darstellung der Flash-Verdampfung im log p, h-Diagramm

5 Versuchsaufbau

5.1 Die Versuchsanlage

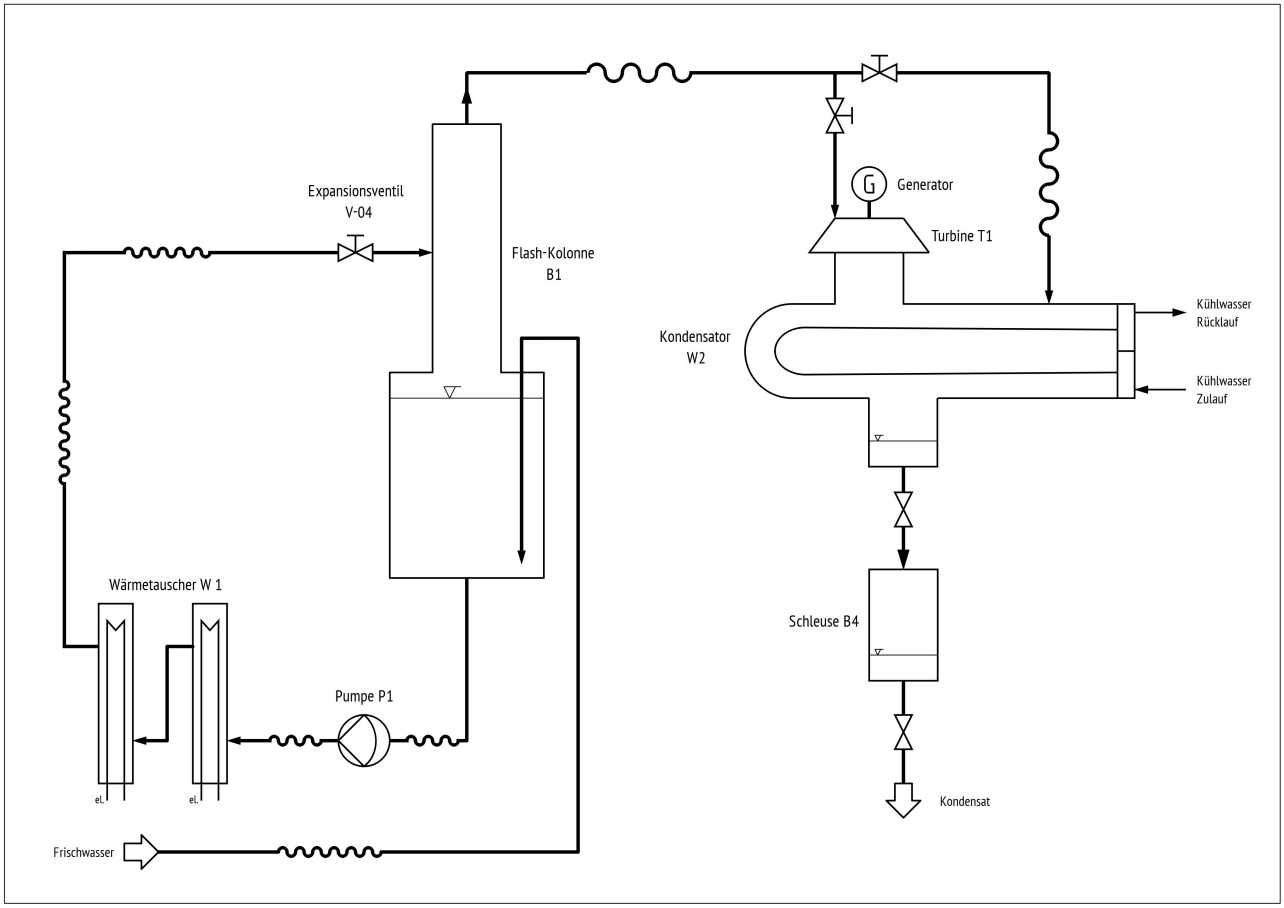


Bild 3: Bild 3: Schema der Versuchsanlage EVERDA V

Bild 3 zeigt das vereinfachte Schema der Versuchsanlage *EVERDA V* im Technikum. Die Anlage ist für kontinuierlichen Betrieb konzipiert und besteht aus vier Modulen: dem Wärmetauscher W1 mit Elektroheizung und Pumpe P1, dem Expansionsventil V-04 mit anschließender Flash-Kolonne B1, der Dampfturbine T1 mit angeschlossenem Kondensator W2 sowie der Kondensat-Entnahme mit der Schleuse B4.

Das Wasser im Sumpf der Kolonne B1 wird mit der Pumpe P1 kontinuierlich durch den Wärmetauscher W1 gefördert und dort mit einer Elektroheizung auf die gewünschte Temperatur vorgewärmt. Ein Regler sorgt dabei für eine konstante Austrittstemperatur. Die Anlage wird ohne Turbine betrieben. Das Ventil V-05 ist geschlossen. Der Dampf wird im Bypass durch Ventil V-06 direkt dem Kondensator W2 zugeführt.

Das im Wärmetauscher W1 vorgewärmte Wasser wird in im Ventil V-04 entspannt, wodurch es spontan teilverdampft. In der anschließenden Flash-Kolonne B1 erfolgt eine Phasentrennung. Die Flüssigkeit sammelt sich unten in der Kolonne, während der Dampf oben entweicht und dem Kondensator W2 zugeleitet wird, in dem er durch Wärmeabfuhr ans Kühlwasser verflüssigt wird. Das Kondensat sammelt sich unten im Kondensator und wird durch die automatische Schleusen-Steuerung periodisch nach außen gepumpt. Mit Hilfe einer Füllstandsmessung im Sumpf der Flash-Kolonne B1 erfolgt periodisch eine Frischwasserzufuhr, um die entnommenen Kondensatmenge zu kompensieren.

Das vollständige R&I-Fließbild ist auf Seite 8 dargestellt. Dort sind alle Armaturen und Messstellen verzeichnet, die für den Betrieb der Anlage und die Bilanzierung der Versuche erforderlich sind.

5.2 Messwerterfassung

Im Prozess werden Temperaturen, Drücke und Volumenströme gemessen. Die Messstellen gehen aus dem R&I-Fließbild (Seite 8) hervor. Die zur Bilanzierung des Prozesses notwendigen Größen werden von Sensoren gemessen. Deren analoge Ausgangssignale werden mit einer Messwerterfassung *Keysight 34970A* kontinuierlich erfasst und digital über eine Schnittstelle an einen PC übertragen, wo mit einer LabVIEW-Anwendung die Visualisierung, Aufzeichnung und Speicherung der Daten erfolgen. Die Daten können als Tabelle zur Auswertung weiterverarbeitet werden.

6 Versuchsdurchführung

Führen Sie die Versuche für unterschiedliche Temperaturen t_0 (TIC 03) und Volumenströme (FIR 02) nach Vorgaben des Laborpersonals durch.

Die Versuche werden entsprechend der separaten Checkliste durchgeführt. Gehen Sie die einzelnen Punkte zuerst "trocken" durch, d.h. ohne die Schritte an der Anlage umzusetzen. Gleichen Sie die Punkte mit dem Fließbild (Seite 8) ab, um die Abläufe zu verstehen. Beginnen Sie erst mit den Versuchen, wenn Sie das Ablaufschema vollständig verstanden haben. Haken Sie jeden durchgeführten Schritt in der Checkliste ab. Das Kondensat wird während des Versuchs in einen Eimer geleitet. Die entnommene Menge wird durch Wiegen bestimmt.

7 Auswertung

Bilanzieren Sie mit Hilfe der Gleichungen aus Kapitel 4.1 die einzelnen Versuche. Ermitteln Sie dabei die notwendigen thermodynamischen Größen von Dampf und Flüssigkeit mit Hilfe der *International Steam Tables* [8] oder eines geeigneten Rechenprogramms, das nach IAPWS[4]-IF97 rechnet. Zeichnen Sie die Entspannungsvorgänge in das *log p,h*-Diagramm ein. Stellen Sie die Ergebnisse in Abhängigkeit der variierten Eingangsparameter grafisch dar.

4 IAPWS: International Association for the Properties of Water and Steam

8 Literatur

[1] Stengler, J. *Untersuchungen zur Konzeption und* Auslegung *eines Entspannungsverdampfers für ein Niedertemperatur-Solarkraftwerk*
Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik, KIT, Karlsruhe, 2014

[2] Albrecht, A. *Experimentelle Untersuchung zur Entspannungsverdampfung von Wasser an einer Technikumsanlage*
Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik, KIT, Karlsruhe, 2014

[3] Beck, L. et al. *Meerwasserentsalzung*
Laborpraxis II
Hochschule Offenburg, 2015

[4] Koch, J. *Erweiterung einer Meerwasserentsalzungsanlage durch eine Dampfturbine mit Kondensator und deren Inbetriebnahme*
Bachelorarbeit
Hochschule Offenburg, 2020

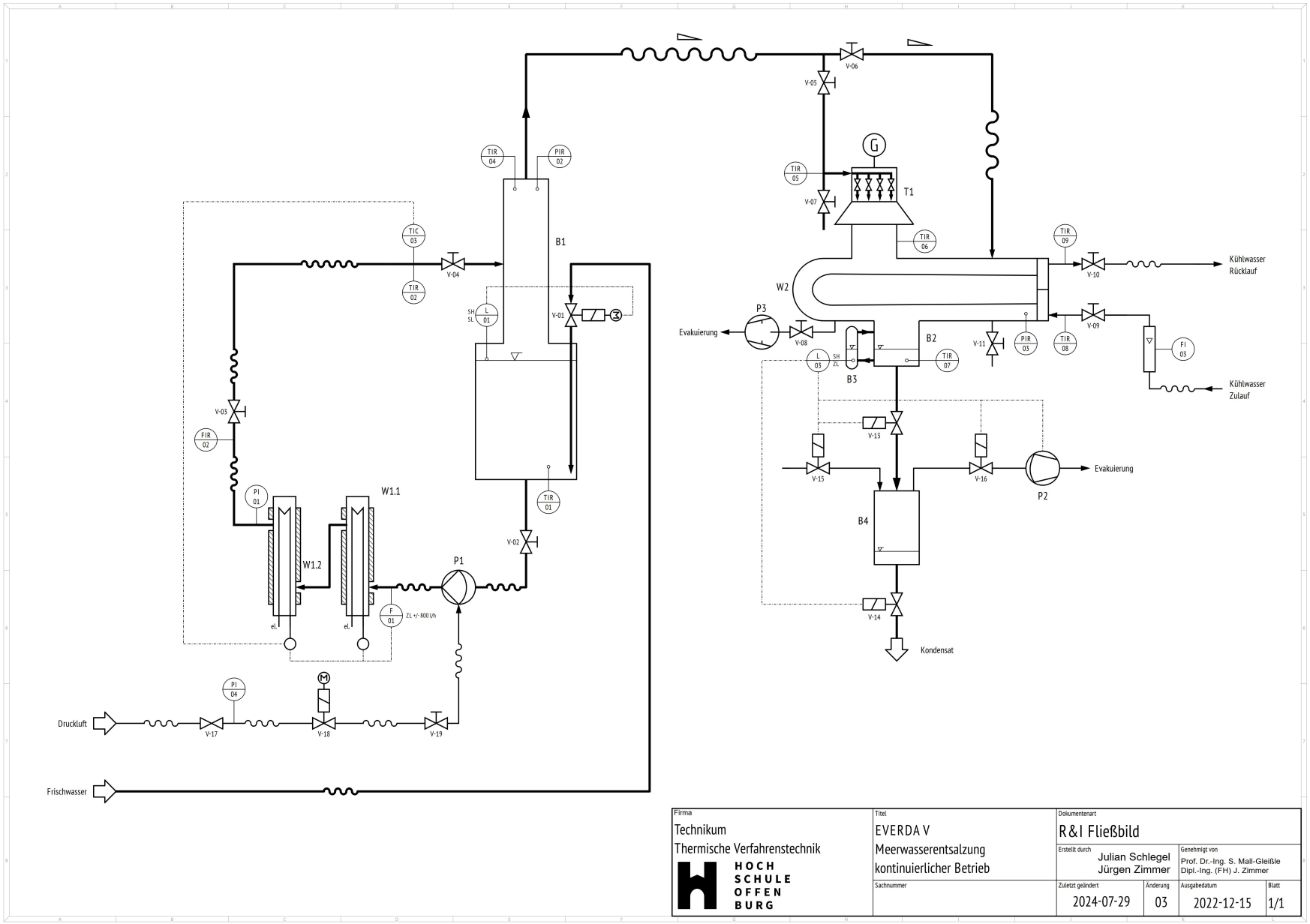
[5] Bail, A. M. *Umstellung der Entsalzungsanlage EVERDA im Technikum der HSO von Batch- auf kontinuierlichen Betrieb*
Bachelorarbeit
Hochschule Offenburg, 2022

[6] Schlegel, J. *Planung, Bau und Inbetriebnahme einer Anlage zur Entspannungsverdampfung im Technikums-Maßstab*
Bachelorarbeit
Hochschule Offenburg, 2023

[7] Reis, A. *Optimierung des kontinuierlichen Betriebs einer Entspannungsverdampfungsanlage für den Prozess mit Turbine*
Bachelorarbeit
Hochschule Offenburg, 2024

[8] Wagner, W.
Kretzschmar, H-J. *International Steam Tables*
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008

9 R&I-Fließbild der Versuchsanlage EVERDA V



Firma	Titel	Dokumentenart			
Technikum Thermische Verfahrenstechnik HOCH SCHULE OFFEN BURG	EVERDA V Meerwasserentsalzung kontinuierlicher Betrieb	R&I Fließbild			
		Erstellt durch Julian Schlegel Jürgen Zimmer		Genehmigt von Prof. Dr.-Ing. S. Mall-Gleißle Dipl.-Ing. (FH) J. Zimmer	
	Sachnummer	Zuletzt geändert 2024-07-29	Änderung 03	Ausgabedatum 2022-12-15	Blatt 1/1