Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 15.11.2023

SONITRO – Sorptive Niedertemperaturtrocknung

Quelle: Thomas Bergmann

Datum: 15.11.2023

Ort: Bern

Subventionsgeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW
Technikumstrasse 9
CH – 8401 Winterthur

Karl Barth AG
Unterdorf 27
CH 8421 Dättlikon

Autor/in:

Claudio Koller,	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, kolr@zhaw.ch
Serena Danesi	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, dane@zhaw.ch
Thomas Bergmann,	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, begm@zhaw.ch
Lukas Vontobel,	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, vott@zhaw.ch

BFE-Projektbegleitung:
Carina Alles, Carina.Alles@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502013-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Im Rahmen von SONITRO wurde eine sorptive Niedertemperaturtrocknungsanlage (ca. 1 m^2 Trocknerfläche) entwickelt. Das Arbeitsmittel NaOH zeigt sich im Trocknungsbetrieb als gut handhabbar. Mit der Absorptionstrocknung können die Kräuter zuverlässig bis zur angestrebten Endfeuchte von 12% getrocknet werden. Die mit der Absorptionsanlage getrockneten Kräuter weisen gegenüber konventionell getrockneten Kräutern (Holderhof Produkte AG, 100 – 300 m^2 Trocknungsfläche) keine Qualitätseinbussen auf. Dabei ist eine Energieeinsparung der Absorptionstrocknungsanlage von rund 75% und eine Reduktion der Trocknungsdauer um 50% im Vergleich zu einer konventionellen Trocknungsanlage erreichbar. Der Wärmebedarf für die Regeneration der Lösung kann beispielsweise durch eine Solarthermieanlage gewonnen werden, deren Kollektorfläche etwa 50% der Trocknerfläche beträgt.

Résumé

Dans le cadre de SONITRO, un système de séchage sorptif à basse température (environ 1 m^2 de surface de séchage) a été développé. Le fluide de travail NaOH s'est avéré facile à manipuler dans les opérations de séchage. Avec le séchage par absorption, les herbes peuvent être séchées de manière fiable jusqu'à la teneur en humidité finale souhaitée de 12%. Les herbes séchées avec le système d'absorption n'ont aucune perte de qualité par rapport aux herbes séchées conventionnellement (Holderhof Produkte AG, 100 - 300 m^2 de surface de séchage). Une économie d'énergie du système de séchage par absorption d'environ 75% et une réduction du temps de séchage de 50% par rapport à un système de séchage conventionnel peuvent être obtenues. Les besoins en chaleur pour la régénération de la solution peuvent être obtenus par un système solaire thermique dont la surface des capteurs représente environ 50% de la surface du séchoir.

Summary

As part of SONITRO, a sorptive low-temperature drying system (approx. 1 m^2 drying area) was developed. The NaOH work fluid has proven to be easy to handle in drying operations. With absorption drying, the herbs can be reliably dried up to the desired final moisture content of 12%. The herbs dried with the absorption system do not have any loss of quality compared to conventionally dried herbs (Holderhof Produkte AG, 100 - 300 m^2 drying area). An energy saving of the absorption drying system of around 75% and a reduction of the drying time by 50% compared to a conventional drying system can be achieved. The heat requirement for the regeneration of the solution can be obtained, for example, by a solar thermal system whose collector area is about 50% of the dryer area.

Take-home messages

- Anhand mehrerer Vergleichstrocknungen (Brennnesseln, Apfelminze, Pfefferminze) konnte praktisch nachgewiesen werden, dass mit dem Sorptionstrocknungsverfahren die vorgeschriebene Produktendfeuchte von 12% erreicht und auch unterschritten werden kann. Durch Produktanalysen am ILGI konnte eine gleichwertige bis höhere Produktqualität der sorptionsgetrockneten Kräuter im Vergleich zu Proben aus der konventionellen Trocknung belegt werden.
- Die Trocknungszeit der Vergleichstrocknungen mit dem Sorptionsverfahren betrug, aufgrund der damit erzielbaren höheren Trocknungsrate, weniger als 50% der mit der konventionellen Trocknung benötigten Zeit.
- Durch die Analyse der Energiebilanzen des konventionellen Trocknungsprozesses und der Sorptionstrocknung konnte ein Einsparpotential von 75% am notwendigen Energiebezug aufgezeigt werden.
- Eine grobe Gegenüberstellung der Kosten für die Sorptionstrocknung und der konventionellen Trocknung zeigt, dass der Aufwand für die Sorptionstrocknung etwas niedriger ist.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **3**

Résumé **3**

Summary **3**

Take-home messages **4**

Inhaltsverzeichnis **5**

Abkürzungsverzeichnis **7**

1 Einleitung **10**

1.1 Ausgangslage und Hintergrund 10

1.2 Motivation des Projektes 10

1.3 Projektziele 11

2 Vorgehen und Methode **13**

3 Ergebnisse und Diskussion **20**

3.1 Projektierung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsanlage (AP1) 20

3.1.1 Aufbau Absorber 23

3.2 Vorversuche mit Modellsubstanzen (AP2) 25

3.2.1 Theoretische Grundlagen der Trocknung 25

3.2.2 Beurteilung der Prozesse hinsichtlich der Eignung des Arbeitsmittels 27

3.2.3 Trocknungsversuche 29

3.2.4 Chemische Veränderung am Trocknungsgut 36

3.2.5 Natriumcarbonatumsatz 37

3.2.6 Korrosion 39

3.3 Versuchsbetrieb mit saisonalen Trocknungssubstanzen, Optimierung des Trocknungsprozesses (AP3) 40

3.3.1 Umbau der Trocknungskammer 40

3.3.2 Vergleichstrocknung Holderhof und Sorptive Trocknung 41

3.3.3 Optimierung des Speicherbedarfs für die Natronlauge 51

3.4 Simulation der Trocknungsanlage in Kombination mit einer solar-thermischen Regeneration des Arbeitsmittels und zwischen-geschaltetem Arbeitsmittelspeicher (AP4) 55

3.4.1 Definition von Eingabegrössen, Randbedingungen und Zielvorgaben der Simulation 55

3.4.2 Aufbau der Simulation 57

3.4.3 Optimierung 63

3.4.4 Vergleich mit konventioneller Trocknung 70

3.5 Optimierung des Anlagendesigns, Konstruktion und Aufbau einer optimierten Trocknungsanlage (AP5) 71

3.5.1 Messdatenerfassung und Prozesssteuerung 77

3.6 Betrieb der optimierten Trocknungsanlage mit saisonalen Trocknungssubstanzen (AP6) 83

3.6.1 Vergleichstrocknung Holderhof und optimierte Sorptive Trocknung 83
3.6.2 Optimierung des Betriebsaufwandes 93
4 Schlussfolgerungen und Fazit 96
4.1 Projektierung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsanlage 96
4.2 Vorversuche mit Modellsubstanzen 96
4.3 Versuchsbetrieb mit saisonalen Trocknungssubstanzen 96
4.4 Simulation 96
4.5 Optimierung des Anlagendesigns 96
4.6 Betrieb der optimierten Trocknungsanlage 97
5 Ausblick und zukünftige Umsetzung 98
6 Nationale und internationale Zusammenarbeit 98
7 Kommunikation 98
8 Publikationen 99
9 Literaturverzeichnis 99
10 Anhang 100

Abkürzungsverzeichnis

A	Fläche
a	Annuitätsfaktor
B	Stoffübergangsfläche * Stoffübergangskoeffizient
c	Molanteil
cp	Spezifische Wärmekapazität
GGW	Gleichgewicht
h	Spezifische Enthalpie
k	Spezifische Kosten
K	Kosten
M	Molmasse
m	Masse
$\dot{m}$	Massenstrom
p	Druck
P	Leistung
$\dot{Q}$	Wärmestrom
R	Allg. Gaskonstante
R_{TG}	Stoffübergangswiderstand
T, ϑ	Temperatur
v	Geschwindigkeit
$\dot{V}$	Volumenstrom
W	Arbeit
X	Wasserbeladung
β	Stoffübergangskoeffizient
η	Gütegrad
ξ	Massenanteil
ρ	Dichte
φ	Relative Feuchte
τ	Zeit, Dauer
$\dot{m}^{W}_{TS}$	Trocknungsrate (Dem Trocknungsgut entzogener Massenstrom Wasser bezogen auf die Masse an Trockensubstanz im Trocknungsgut)

Indizes

Symbol	Beschreibung
Δ	Differenz
tiefgestellt:	
a	Jahr
betr.	Betrieb
D	Dampf
diss	dissipativ
El	Elektro
f	feucht
inv.	Investition
K	Kollektor
L	Luft
R	Regeneration
rev	reversibel
Sp.	Speicher
t	trocken
TCF	Thermochemisches Fluid
TG	Trocknungsgut
TK	Trockenkammer
TP	Trocknungsprozess
Tr.	Trockner
TS	Trockensubstanz
W	Wasser
WP	Wärmepumpe
hochgestellt:	
LV	Liquid Vapor
LW	Lösungswechsel
RL	Rücklauf
VL	Vorlauf
W	Wasser

Kennzeichnung von MSR-Stellen nach DIN 19227

Kennbuchstabe	Aufgabengrösse, Funktion
D	Dichte
E	Elektrische Grössen
F	Durchfluss, Durchsatz
L	Niveaustand
M	Feuchte
Q	Qualität
R	Registrierung
T	Temperatur
W	Masse

Abkürzungen und Summenformeln

Abkürzung	Beschreibung
IEFE	Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering
ILGI	Institut für Lebensmittel- und Getränkeinnovation
LW	Lösungswechsel
Na_2CO_3	Natriumcarbonat
$NaHCO_3$	Natriumhydrogencarbonat
NaOH	Natriumhydroxid
rpm	Umdrehungen pro Minute
RWÜ	Regenerativer Wärmeübertrager
TCF	Thermochemisches Fluid
ZHAW	Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Der direkte Energiebedarf der Landwirtschaft in der Schweiz mit ca. 16 PJ/a entspricht lediglich knapp 2 Prozent des gesamten Endenergieverbrauches. Dennoch wird der Schweizer Landwirtschaft in der Energiestrategie 2050 eine bedeutende Rolle zugewiesen, da hier der Anteil erneuerbarer Energiequellen mit momentan knapp 6% (der Europäische Durchschnitt liegt bei 10%) ein entsprechendes Verbesserungspotential aufweist. Ein wesentlicher Beitrag kann dabei durch die Einsparung von fossilen Treib- und Brennstoffen geleistet werden. [1].

Die Nutzung erneuerbarer Energien wird durch deren zeitliche Verfügbarkeit beschränkt. Insbesondere bei saisonal betriebenen Prozessen, die im Chargenbetrieb einen hohen Energiebedarf aufweisen, wie u.a. Trocknungsprozesse in der Landwirtschaft, ist eine wirtschaftliche Nutzung regenerativer Energien mit den verfügbaren Technologien oft nicht möglich.

Es gibt bereits eine Vielzahl von solarbetriebenen Trocknungsverfahren [2], deren Anwendung in Anbetracht der CO2-Problematik im Europäischen Umfeld gefördert werden [3]. Dabei kommen auch Speichertechnologien, wie z.B. Betonspeicher [4] zum Einsatz, um den Anteil der Solarenergienutzung zu erhöhen und den Ausnutzungsgrad der Solaranlagen zu steigern. Wirtschaftliche Hemmnisse liegen jedoch im erheblichen Speichervolumen und Investitionsbedarf.

Viele Landwirtschaftliche Trocknungsprozesse werden aus Gründen der Qualitätssicherung bevorzugt bei niedrigen Temperaturen (z.B. 30 bis 45°C bei Arznei- und Gewürzpflanzen [5]) betrieben. In diesem Temperaturbereich können Absorptionswäscher, mit denen Luft durch hygroskopische Flüssigkeiten (z.B. Salzlösungen oder Laugen) sehr effizient entfeuchtet und simultan erwärmt werden kann, einfach mit einem Trocknungsprozess kombiniert werden. Da der adiabate Absorptionsprozess (Entfeuchtung und simultane Temperaturerhöhung der Luft) quasi als Umkehrprozess der Trocknung (Wasseraufnahme und simultane Temperaturabsenkung) angesehen werden kann, könnte ein Umluftprozess theoretisch energieautark, d.h. ohne Zufuhr zusätzlicher Wärmeenergie betrieben werden. Lediglich die im Absorptionsprozess eingesetzte hygroskopische Flüssigkeit reichert sich durch den Prozess mit Wasser aus dem Trocknungsgut an.

Die Regeneration der hygroskopischen Absorptionsflüssigkeit erfolgt in einem Verdunstungsapparat und benötigt dazu Niedertemperaturwärme von ca. 50°C, welche Abwärmequellen entnommen oder solarthermisch gewonnen werden kann.

1.2 Motivation des Projektes

Ein wesentlicher Vorteil der sorptiven Trockentechnologie besteht darin, dass die für den Trockenprozess benötigte "Antriebsenergie" in der Absorptionsflüssigkeit über beliebig lange Zeiträume gespeichert werden kann. Dies bedeutet, dass der Trockenprozess zeitlich von der Wärmegewinnung entkoppelt ist. Somit können Abwärmequellen und/oder eine Solarthermieanlage das ganze Jahr über für die Regeneration der Absorptionsflüssigkeit genutzt werden. In den Betriebszeiten des Trockners wird dann die gespeicherte "Antriebsenergie" im 24-Stunden-Betrieb genutzt.

Eine schonende Trocknung ist für Lebensmittel, die durch ihr Aroma definiert werden (Tee, Kräuter etc.), essenziell. Die Sorptionsgestützte Trocknungsverfahren bietet eine gleichbleibend hohe Qualität des Produktes und sowohl ökologische als auch ökonomische Potentiale an.

Sorptionsgestützte Trocknungsverfahren für pflanzliche Produkte wurden bereits in verschiedenen Anwendungen, meist in Kombination mit einer solarthermischen Regeneration, untersucht.

Die meisten Veröffentlichungen für sorptive Trocknung beschäftigen sich mit Adsorptionsverfahren, bei denen die Entfeuchtung der Trocknungsluft durch Adsorption des Wasserdampfes an einem Feststoff erfolgt. [15, 16, 17, 18]. Mit Hilfe von Adsorptionsprozessen können zwar wesentlich niedrigere Endfeuchten erreicht werden, als dies mit Absorptionsprozessen möglich ist, jedoch lassen sich die Adsorbentien nicht einfach transportieren (Feststoff). Eine räumliche Trennung von Absorptionsprozess (Trocknung), Speicher und Desorptionsprozess (Regeneration) ist somit nur mit sehr grossem Aufwand realisierbar. Adsorptionstrocknungsverfahren sehen daher meist eine simultane Regeneration des Adsorbens vor.

Der Einsatz flüssiger Absorbentien erlaubt durch die einfache Transportmöglichkeit in Rohrleitungen eine Entkopplung von Speichereinheit (Tank) und Nutzungs- bzw. Regenerationseinheit (Absorber / Desorber). Als Absorbens können verschiedene Salzlösungen, Laugen und auch Säuren eingesetzt werden. In Kombination mit Trocknungsprozessen wurde bisher vorzugsweise mit wässrigen Kalziumchlorid- ($CaCl_2$) sowie Lithiumchloridlösungen (LiCl) gearbeitet. [19, 20, 21, 22] Kalziumchlorid ist aufgrund physikalischer Stoffeigenschaften nur bedingt für Niedertemperaturtrocknungsprozesse einsetzbar und Lithiumchlorid ist physiologisch nicht ganz unbedenklich, was hinderlich für den Einsatz in Zusammenhang mit Lebensmitteln sein könnte.

Eine wirtschaftlich interessante Alternative, die in SONITRO untersucht wird, ist die, bisher nur in geschlossenen Absorptionsprozessen [23, 24] verwendete Natronlauge. Natronlauge wird in vielen Bereichen der Nahrungsmittelindustrie als Reinigungsmittel sowie auch direkt bei der Nahrungsmittelproduktion (Entfernung der Schalen von Obst und Gemüse, Herstellung von Laugengebäck, Lebensmittelzusatzstoff E 524 z.B. bei eingelegten Oliven) eingesetzt und gilt daher als unbedenklicher Stoff bei der Lebensmittelproduktion. Natriumhydroxid ist beim Kontakt mit Luft nicht chemisch stabil und reagiert mit Kohlendioxid zu schwerlöslichem Natriumkarbonat. Dies ist der Grund dafür, dass Natronlauge als Arbeitsmittel für die meisten offenen Absorptionsprozesse nicht geeignet ist, da ein Zusetzen von Wärmeübertragern und Transportleitungen beim Abkühlen nicht verhindert werden kann. Natriumkarbonat (Soda) findet ebenfalls bei der Lebensmittelproduktion Verwendung (z.B. Backtriebmittel) und wird in vielen Industriebereichen benötigt (z.B. Seifeherstellung).

Im Rahmen eines Innosuisse-Innovationsschecks (Gesuch Nr. 34634.1 INNO-EE) wurde am IEFE das Potential der Sorptiven Niedertemperaturtrocknung mit verschiedenen Arbeitsmitteln untersucht. Unter den gegebenen Randbedingungen (Kräutertrocknung bei <45°C, 20% rH) kann mit dem Arbeitsmittel Natronlauge eine Energiespeicherdichte von ca. 1800 MJ/m3 erreicht werden [6]. Als Vergleich, Beton besitzt bei einer Temperaturerhöhung von 40 K lediglich eine Speicherkapazität von ca. 100 MJ/m3. Durch die Nutzung von Hydratisierungsenergie kann mit speziellem CSA-Zement die Speicherkapazität um den Faktor 10 erhöht werden (Ettringit-Speicher [7]). Die Speicherbeladung muss dabei jedoch bei einer Temperatur über 80°C erfolgen, was im Fall einer solarthermischen Wärmeerzeugung mit niedrigen Wirkungsgraden (hohe Wärmeverluste) bzw. teuren Kollektorsystemen (Vakuumkollektoren) verbunden ist.

1.3 Projektziele

Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung und Erprobung einer Sorptiven Niedertemperaturtrocknungsanlage für Kräuter und Gewürzpflanzen im Technikumsmassstab. Dabei soll ein bisher in offenen Sorptionsprozessen nicht gebräuchliches Arbeitsmittel (Natronlauge) verwendet werden. (Im Kapitel 5 des Innosuisse-Berichtes [6] werden die Vorteile und Risiken, die mit dem Einsatz des Arbeitsmittels Natronlauge verbunden sind, diskutiert.) Eine wichtige Fragestellung, die mit den Untersuchungen beantwortet werden soll, ist, ob die Produktqualität (Inhaltstoffe, Geruch und Geschmack) durch das über die Trocknungsluft in indirektem Kontakt stehende Arbeitsmittel des Sorptionsprozesses beeinflusst wird. Laboruntersuchungen von Proben getrockneten Materials gleicher Herkunft, welche einerseits mit einer konventionellen Trocknungsanlage und andererseits mit der Versuchsanlage getrocknet wurden, sollen als Qualitätsnachweis dienen. Werden die gewünschten Ergebnisse (Prozessumsetzung in einer funktionstüchtigen Anlage, positiver Qualitätsnachweis) mit der Versuchsanlage erreicht, soll die Anlagenkonstruktion für die im Testbetrieb ermittelten

Betriebsbedingungen optimiert werden. Dies betrifft insbesondere die Reduzierung des Druckverlustes in der Umluftführung sowie die Vermeidung von Wärmeverlusten durch ein kompaktes Anlagendesign. Untersuchungen an einer, nach dem optimierten Anlagendesign gefertigten Trocknungsanlage, dienen der Ermittlung des realen Energiebedarfs und der Abschätzung des Investitionsaufwandes. Weiterhin können mit dieser Anlage Materialproben getrocknet werden, mit denen die Einhaltung von Qualitätsansprüchen nachgewiesen werden kann, bevor für einen speziellen Anwendungsfall in eine Sorptive Trocknungsanlage investiert wird. Parallel zu den praktischen Untersuchungen soll im Projekt eine Simulation des Gesamtprozesses (inklusive Arbeitsmittelspeicher und beispielhafter solarthermischer Regeneration) für einen Jahresproduktionszyklus aufgestellt werden, um die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu analysieren.

Wesentliche Ergebnisse, die das Forschungsprojekt liefern soll, sind:

- Nachweis der technischen Umsetzung eines Sorptionstrockners mit einem bisher nicht gebräuchlichen Arbeitsmittel in Verbindung mit einem sensiblen Trocknungsgut
- Nachweis der geforderten Produktqualität durch Analysen im Vergleich mit konventionell getrockneten Kräutern
- Optimiertes Anlagendesign, welches für die praktische Umsetzung des Verfahrens eine Konstruktionsvorlage sowie wichtige Betriebsparameter liefert
- Wirtschaftliche Randbedingungen (Investitionsbedarf, Betriebskosten, Platzbedarf) des Gesamtprozesses, Nachweis der Wirtschaftlichkeit und der Umweltverträglichkeit

Das neuartige Trocknungsverfahren erleichtert es, den Energiebedarf für die Entfeuchtung und Erwärmung der Trocknungsluft zu 100% durch Abwärme oder Solarenergie abzudecken, da für den Antrieb des Prozesses ein verlustlos speicherbares Arbeitsmedium eingesetzt wird, welches unabhängig vom Trocknungsprozess zu anderen Zeiten oder auch an einem anderen Ort regeneriert werden kann.

Der Sorptive Trockner ersetzt die in konventionellen Trocknungsanlagen benötigten Wärmeübertrager im Luftkreislauf durch einen Füllkörperwäscher, der aufgrund geringer Strömungsgeschwindigkeiten (0.5 - 1 m/s) nur einen Bruchteil des Druckverlustes von Wärmeübertragern besitzt und wesentlich weniger anfällig auf Verschmutzung durch Partikel in der Trocknungsluft ist. Im Gegensatz zu konventionellen Verfahren ist es nicht notwendig, die Luftführung zur Prozesssteuerung durch Klappen zu steuern, da sich der gewünschte Trocknungsluftzustand allein über die Konzentration und Temperatur der Waschflüssigkeit im Luftwäscher einstellen lässt. Dadurch ist es möglich, den für die Luftumwälzung benötigten Energiebedarf erheblich zu reduzieren.

Beide Effekte führen dazu, dass der Gesamtenergiebedarf um mindestens 50% reduziert, bzw. direkt durch die Nutzung regenerativer Energie oder Abwärme abgedeckt werden kann.

Die Anwendung der Sorptiven Trocknung ist nicht nur auf landwirtschaftliche Anlagen beschränkt, sondern kann auch für viele andere industrielle Trocknungsprozesse genutzt werden (Lackierereien, Lebensmittelindustrie, Baustoffe u. Keramik). Damit vergrössert sich das Einsatzpotential und damit die erzielbare Reduzierung des Bedarfes an fossilen Energieträgern und Elektroenergie erheblich. Trocknungsprozesse haben derzeit etwa einen Anteil von 12 bis 25% am Gesamtenergiebedarf der Industrie. [8] Der Endenergiebedarf der Industrie in der Schweiz betrug 2018 150 PJ. [9] Damit ergibt sich in der Schweiz ein Energieeinsparpotential zwischen 10 und 20 PJ pro Jahr.

Im Forschungsprojekt soll das Verfahren speziell für den Anwendungsfall einer Kräuter- und Gewürzpflanzentrocknung entwickelt werden. Hier liegen besonders hohe Qualitätsanforderungen an das getrocknete Gut vor. Werden diese mit der Trocknungsanlage erreicht, ist dies gleichzeitig auch ein Eignungsnachweis für viele anderen Anwendungen. (Ein weiterer Beweggrund für die Entscheidung zu diesem Anwendungsfall ist die einfache Beschaffbarkeit von Testmaterial für die Trocknungsversuche.)

Sorptive Trocknungsanlagen können in Thermochemische Netzwerke [10] integriert werden. Damit lassen sich bisher nicht wirtschaftlich nutzbarer Abwärmequellen und Flächenreserven für solare Energieerzeugung erschliessen. Auch eine Nutzung negativer Regelenergie bei einem Überangebot

von regenerativ erzeugter Elektroenergie ist möglich, da das Netzwerk mit einem Arbeitsmedium betrieben wird, das eine verlustlose Langzeitspeicherung ermöglicht.

2 Vorgehen und Methode

Im Rahmen des Horizon2020-Projektes H-DisNet (grant agreement No. 695780) werden am IEFE verschiedene Grundlagenuntersuchungen zu Arbeitsstoffen (Stoffdatenbestimmung und Entwicklung von Stoffdatenberechnungsroutinen) für diverse Absorptionsprozesse durchgeführt sowie verschiedene Anlagenkomponenten (z.B. Absorptionswäscher zur Luftkonditionierung) entwickelt und an Demonstrationsanlagen (Abbildung 1 links) praktisch erprobt. [11]

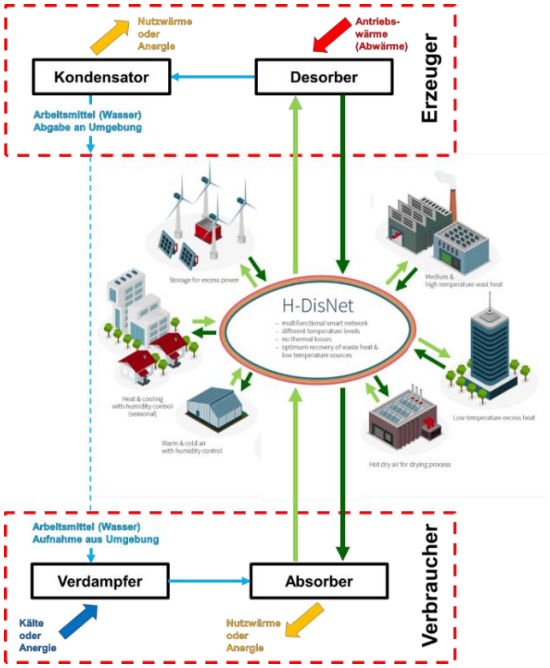

Abbildung 1:sorptive Gewächshausklimatisierung (links) und Thermochemisches Netzwerk

Das Ziel dieser Untersuchungen ist die Entwicklung einer neuartigen Technologie für Energieversorgungsnetze im Niedertemperaturbereich, welche auf Absorptionsprozessen beruht. Bei einem solchen "Thermochemischen Netzwerk" (Abbildung 1 rechts) handelt es sich um die Anwendung einer bekannten Technologie (Absorptionswärmepumpe) in einem neuen Kontext. Dieser sieht die Teilprozesse, welche traditionell als simultan ablaufender Gesamtprozess betrachtet werden, in einer sowohl räumlichen als auch zeitlichen Aufspaltung. In den Vordergrund tritt dabei das flüssige Arbeitsmittel, in dem ein "chemisches Potential" gespeichert ist, welches für die Temperaturänderung von Wärme genutzt werden kann. Dies bedeutet, dass aus Umgebungswärme Nutzwärme oder -kälte generiert werden kann, indem das chemische Potential abgebaut wird. Der wesentliche Vorteil eines solchen "Potentialträgers" im Vergleich mit herkömmlichen Wärmeträgermedien besteht darin, dass das gespeicherte Potential über beliebig lange Zeiträume verlustlos erhalten bleibt. Das Einsatzspektrum Thermochemischer Netzwerke ist sehr gross und umfasst sowohl industrielle Prozesse als auch die Gebäudeklimatisierung.

Die Projektidee zur Entwicklung eines Sorptiven Niedertemperaturtrockners (Abbildung 2) ist letztendlich aus Überlegungen zu möglichen Anwendungen Thermochemischer Netzwerke hervorgegangen. Im Rahmen eines Innosuisse-Innovationsschecks (Gesuch Nr. 34634.1 INNO-EE) [6] konnte am IEFE eine Prozesssimulation für die Sorptive Niedertemperaturtrocknung sowie für

Vergleichsprozesse nach dem aktuellen Stand der Technik erstellt werden. Diese stützt sich auf Messdaten einer Trocknungsanlage von SwissTea [12] und ermöglichte es, die Eignung verschiedener Arbeitsmittel zu untersuchen. (Abbildung 3) Parallel konnte die Absorberkonstruktion (eine Eigenentwicklung des IEFE), welche im Rahmen des Forschungsprojektes SONITRO für den ersten Versuchsaufbau verwendet werden soll, im Rahmen verschiedener Studentenarbeiten [13] weiterentwickelt sowie deren Betriebscharakteristik für verschiedene Arbeitsstoffe vermessen werden.

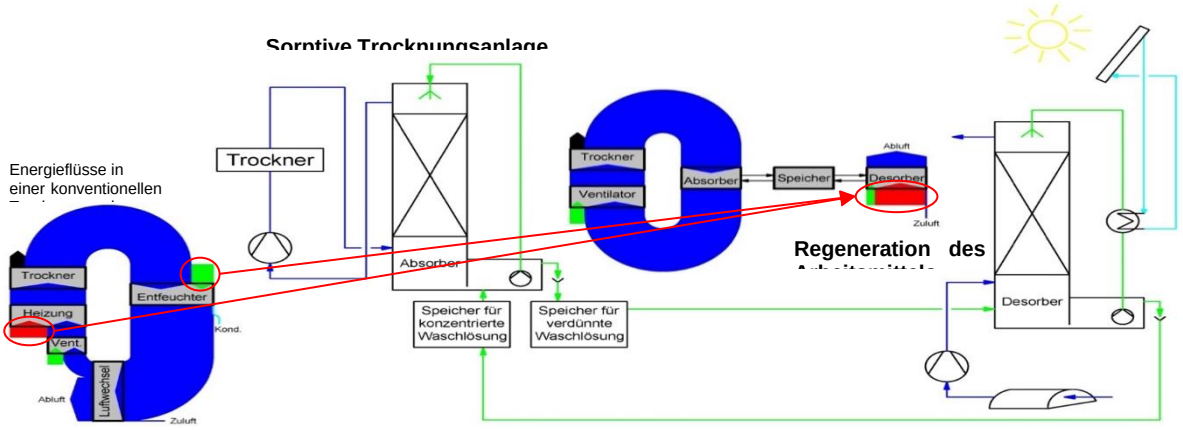

Abbildung 2: Prinzipskizze einer Sorptiven Trocknungsanlage mit Speicher und Regeneration des Arbeitsmittels Vergleich der Energieflüsse mit einer konventionellen Trocknungsanlage (Verschiebung des Energiebedarfes für die Luftentfeuchtung und -erwärmung zum Regenerationsprozess, der dank verlustlosem Speicher sowohl zeitlich als auch örtlich vom Trocknungsprozess entkoppelt ist)

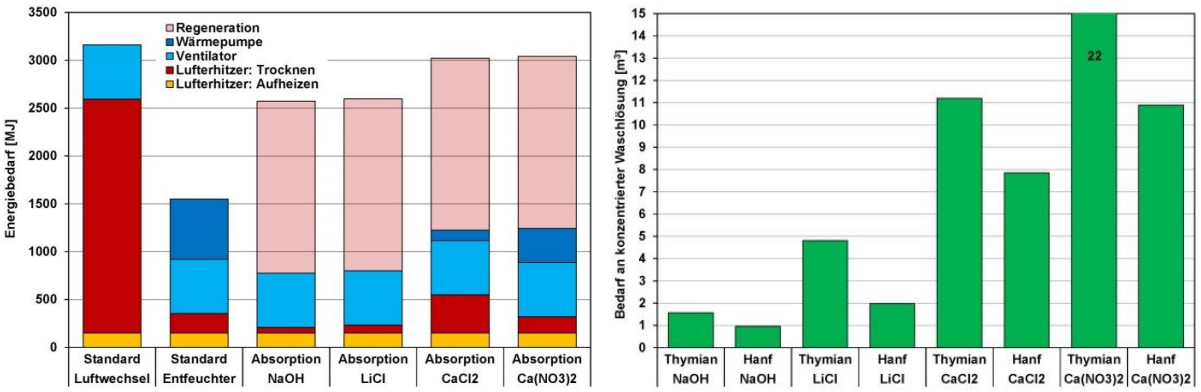

Abbildung 3: Vergleich des Energie- und Arbeitsmittelbedarfes für die sorptive Trocknung mit verschiedenen Arbeitsmitteln [6]

Da bisher noch keine praktischen Erfahrungen über einen sorptionsgestützten Trocknungsprozess mit dem Arbeitsmittel Natronlauge vorliegen, soll zunächst eine Versuchsanlage am Technikum des IEFE aufgebaut werden, mit der die technische Umsetzung des Verfahrens erprobt wird. Für den Versuchsbetrieb kann ein Versuchsstand und ein Absorptionswäscher des IEFE (Abbildung 4 links) genutzt werden, an dem bereits Absorptionsversuche mit diversen Arbeitsmitteln durchgeführt wurden. Mit dem Absorber kann eine Luftmenge von bis zu 250 l/s entfeuchtet werden. Für die Trocknung soll ein Standardtrocknungscontainer der Karl Barth AG mit einem Nutzinhalt von 0.5m^3 (Abbildung 4 rechts) verwendet werden. Absorber und Trockner werden über Luftkanäle mit einem Ventilator und einem Heizregister verbunden. Die Ein- und Austrittszustände (Temperatur, Feuchte und CO2-Konzentration) der Trocknungsluft am Absorber und am Trockner, der Eintrittszustand des Arbeitsmittels (Temperatur und NaOH-Konzentration) sowie die Volumenströme vom Luft- und Arbeitsmittelumlauf werden kontinuierlich aufgezeichnet.

Abbildung 4: links: Absorptionswäscher rechts: Trocknungskammer

Mit dem Versuchsaufbau soll die technische Realisierbarkeit des Trocknungsverfahrens erprobt werden. Der Aufbau der Anlage aus Standardkomponenten bietet den Vorteil, mit vertretbarem Aufwand in kurzer Zeit grundlegende Erkenntnisse über die technische Realisierbarkeit des Verfahrens zu erhalten. Beim Anlagenbetrieb mit Modellsubstanzen (z.B. Grünschnitt) soll insbesondere die Eignung des Arbeitsmittels Natronlauge untersucht werden.

Natriumhydroxid ist beim Kontakt mit Luft nicht chemisch stabil. Durch eine Reaktion, mit dem in der Luft enthaltenen Kohlendioxid, bildet sich Natriumkarbonat. Dieses besitzt bei niedrigen Temperaturen eine sehr geringe Löslichkeit im Wasser, was bei Abkühlungsprozessen zum Ausfällen als Feststoff führt. Dies ist der Grund dafür, dass Natronlauge üblicherweise nicht in offenen Absorptionsprozessen als Arbeitsmittel eingesetzt wird, da ein Zusetzen von Wärmeübertragern und Transportleitungen beim Abkühlen nicht verhindert werden kann. Im vorliegenden Anwendungsfall ist jedoch eine Beeinträchtigung des Prozesses nicht gegeben, da sich die Waschlösung nur im Speicherbehälter sowie partiell im Wäscher (Lufteintritt) abkühlt, was technisch beherrschbar ist. Aufgrund des abgeschlossenen Umluftbetriebes sollten beim Trocknungsprozess nur geringe Mengen an Natriumkarbonat entstehen.

Folgende Fragestellungen sollen mit den ersten Untersuchungen an der Versuchsanlage beantwortet werden:

- Können chemische Veränderung am Trockengut beobachtet werden?
- Welche Menge an Arbeitsmittel wird zu Natriumkarbonat umgesetzt?
- Wie lässt sich das ausfallende Natriumkarbonat effizient aus dem technischen Prozess auskreisen?
- Gibt es Korrosionsprobleme?

Ein Nachteil des Versuchsaufbaus aus Standardkomponenten sind die langen Luftkanäle zwischen den Anlagenkomponenten, welche zu erheblichen Wärme- und Druckverlusten führen. Zur Kompensation des Temperaturverlustes der Luft zwischen Absorptionswäscher und Trockner wird deshalb ein Heizregister eingebaut. Ein praktischer Nachweis der energetischen Effizienz der Anlage ist mit dem Versuchsaufbau der ersten Projektphase somit nicht möglich.

Die Beurteilung des Trocknungsprozesses in Bezug auf die Qualität des getrockneten Produktes ist mit dem Versuchsaufbau jedoch gut möglich. So soll die Anlage in einem zweiten Schritt mit verschiedenen

Kräuter- und Gewürzpflanzen betrieben werden, welche parallel in standardmässigen Trocknungsanlagen getrocknet werden. Chemische Analysen der getrockneten Pflanzen am Institut für Lebensmittel- und Getränkeinnovation (ILGI) der ZHAW in Wädenswil hinsichtlich unerwünschter Inhaltsstoffe und Aromagehalt dienen dem Qualitätsnachweis.

Nicht zuletzt dienen die praktischen Versuche zur Ermittlung optimaler Betriebsparameter und Dimensionierungen der Anlagenkomponenten.

Neben der technischen Realisierbarkeit interessieren den Anwender eines neuartigen Verfahrens die ökonomischen Randbedingungen. Um diese zu ermitteln, soll parallel zu den praktischen Untersuchungen eine Jahressimulation des Gesamtprozesses zur Abschätzung des Aufwandes für die Speicherung und Regeneration der Waschlösung erfolgen. Anhand der Simulationsergebnisse kann der Betrieb des sorptionsgestützten Trocknungsprozesses ökonomisch bewertet werden.

Vorgabeparameter der Simulation sind:

- Standortvorgabe zur Definition von Wetterdaten für die Ertragsabschätzung der solarthermischen Wärmeerzeugung
- Kollektortyp (verschiedene Bauformen von Wasser- und Luftkollektoren) und Flächenausrichtung
- Betriebsdaten für verschiedene Anwendungen (Heubelüftung, Saatguttrocknung, Kräutertrocknung.)

Mit der Computersimulation, welche die Sorptive Trocknungsanlage anhand der am praktischen Versuchsaufbau ermittelten Betriebsdaten realistisch abbildet und mit der wetterabhängigen Vorhersage der Regeneration des Arbeitsmittels verknüpft, kann die, für den Trocknungsprozess notwendige Anlagenperipherie (Flächenbedarf für die Solaranlage und benötigtes Speichervolumen) für verschiedene Anwendungen quantifiziert werden. Auf der Basis dieser Daten lassen sich der Investitionsbedarf sowie die Betriebskosten einer Solaren Niedertemperaturtrocknungsanlage anwendungsspezifisch ermitteln.

Im zweiten Teil des Forschungsprojektes sollen die, während des Testbetriebes der Versuchsanlage, gewonnenen Erkenntnisse (Betriebsparameter, Dimensionierung von Anlagenkomponenten, notwendige Hilfseinrichtungen) in einer optimierten Konstruktion der Sorptiven Trocknungsanlage umgesetzt werden. Im Anlagenprototyp soll vor allem ein kompaktes Anlagendesign mit strömungsoptimierter Luftumwälzung und geringen Wärmeverlusten gegenüber der Umgebung realisiert werden. Dabei ist es wichtig, die einzelnen Anlagenkomponenten (Trocknungskammer, Lüfter und Absorber) optimal aufeinander abzustimmen und eine einfache Betriebshandhabung zu gewährleisten. Eine weitere Herausforderung ist die Entwicklung einer verlässlichen Prozesssteuerung. In dieser Phase des Forschungsprojektes wird der Industriepartner, die Karl Barth AG, das Projekt verstärkt mit seinem praxisbezogenen Know-how unterstützen.

Nach dem Aufbau und der Inbetriebnahme des Prototypen einer Sorptiven Trocknungsanlage am Versuchsstand des IEFE, werden wiederum Trocknungsversuche mit verschiedenen Kräuter- und Gewürzpflanzen durchgeführt, welche parallel in standardmässigen Trocknungsanlagen getrocknet werden. Chemische Analysen der getrockneten Pflanzen am Institut für Lebensmittel- und Getränkeinnovation (ILGI) der ZHAW in Wädenswil hinsichtlich unerwünschter Inhaltsstoffe und Aromagehalt dienen wiederum dem Qualitätsnachweis. Eine kontinuierliche Erfassung des Betriebsaufwandes (Stromverbrauch des Ventilators und weiterer Nebenaggregate, Bedarf an Arbeitslösung, ev. zusätzlicher Bedarf an Heizwärme) ermöglicht den Vergleich mit dem Betriebsaufwand der konventionellen Trocknungsanlage. Damit kann das Energieeinsparpotential der neuartigen Technologie nachgewiesen werden. Die Betriebsdatenaufzeichnung an der Prototypanlage dient weiterhin zur Validierung der Simulation des Gesamtprozesses.

Nach Abschluss des Forschungsprojektes soll die Prototypanlage einerseits für Besichtigungen und Demonstrationen gegenüber Interessenten aus Industrie und Forschung (Betreiber und Hersteller von

Trocknungsanlagen sowie Entwickler von ähnlichen Technologien) und andererseits für die exemplarische Trocknung von Materialproben für interessierte Anwender zum Nachweis von Qualitätsansprüchen genutzt werden.

Parallel zu den Entwicklungsarbeiten am Sorptiven Trockner werden in enger Zusammenarbeit mit dem Industriepartner, der Karl Barth AG, verschiedene landwirtschaftliche Trocknungsanwendungen analysiert. Dazu sollen Betriebsdaten von Trocknungsanlagen recherchiert oder durch eigene Messungen an den Anlagen vor Ort gewonnen werden. Mit Hilfe der Prozesssimulation sollen Projektstudien erstellt und Nachfolgeprojekte vorbereitet werden.

Im Ergebnis des Innosuisse-Innovationsschecks (Gesuch Nr. 34634.1 INNO-EE) hat der Projektpartner Swisstea erklärt, dass er an einer Umsetzung des Verfahrens an seiner Trocknungsanlage interessiert ist, sobald ein verlässlicher, positiver Nachweis hinsichtlich Produktqualität und Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses erbracht werden kann. [14]

Zunehmend sollte auch der Fokus auf Anwendungen ausserhalb der Landwirtschaft (Lackierereien, Lebensmittelindustrie, Baustoffe u. Keramik) erweitert werden.

AP1: Projektierung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsanlage

- Versuchsanlage wird am Technikum des IEFE aufgebaut und betrieben
- Nutzung des Absorptionsversuchsstands und eins Absorptionswäschers (250 l/s Luftdurchsatz) vom IEFE
- Standardtrocknungscontainer der Karl Barth AG mit einem Nutzinhalt von 0.5 m^3
- Kontinuierliche Messung und Aufzeichnung von:
    - Ein- und Austrittszustände (Temperatur, Feuchte und CO_2-Konz.) der Trocknungsluft am Absorber und am Trockner
    - Eintrittszustand des Arbeitsmittels (Temperatur und NaOH-Konzentration)
    - Volumenströme vom Luft- und Arbeitsmittelumlauf

AP2: Vorversuche mit Modellsubstanzen

- Anlagenbetrieb mit Modellsubstanzen (z.B. Grünschnitt)
- Beurteilung des Prozesses hinsichtlich der Eignung des Arbeitsmittels:
    - Können chemische Veränderung am Trockengut beobachtet werden?
    - Welche Menge an Arbeitsmittel wird zu Natriumkarbonat umgesetzt?
    - Wie lässt sich das ausfallende Natriumkarbonat effizient aus dem technischen Prozess auskreisen?
    - Gibt es Korrosionsprobleme?

AP3: Versuchsbetrieb mit saisonalen Trocknungssubstanzen, Optimierung des Trocknungsprozesses

- Testbetrieb mit verschiedenen Kräuter- und Gewürzpflanzen
    - Trocknung von Pflanzen aus einer Ernte parallel in der Versuchsanlage und in einer Standardtrocknungsanlage
    - Chemische Analysen der getrockneten Pflanzen am Institut für Lebensmittel- und Getränkeinnovation (ILGI) der ZHAW in Wädenswil hinsichtlich Aromagehalt (Qualitätsnachweis)
- Ermittlung optimaler Betriebsparameter und Dimensionierungen der Anlagenkomponenten

- Funktionsnachweis des Sorptiven Trocknungsprozesses
- Positive Ergebnisse hinsichtlich der Eignung des Arbeitsmittels:
    - Chemische Stabilität des Arbeitsmittels
    - Korrosionsbeständigkeit der Anlagenkomponenten
    - Funktionierende technische Lösung zum Umgang mit dem Ausfall an Natriumkarbonat
- Positiver Qualitätsnachweis an den getrockneten Pflanzen
- Abschätzung des Energieeinsparpotentials im Vergleich zu konventionellen Trocknungsverfahren

AP4: Simulation der Trocknungsanlage in Kombination mit einer solarthermischen Regeneration des Arbeitsmittels und zwischengeschaltetem Arbeitsmittelspeicher

- Simulation des Gesamtprozesses (inklusive Speicher und solarthermische Regeneration) über eine Jahresperiode
- Festzulegende Randbedingungen für die Simulation:
    - Standortvorgabe zur Definition von Wetterdaten (Meteonorm) für die Ertragsabschätzung der solarthermischen Wärmeerzeugung
    - Kollektortyp (verschiedene Bauformen von Wasser- und Luftkollektoren), Flächenausrichtung und -neigung sowie Betriebstemperatur (ev. abhängig vom Zustand der Aussenluft)
    - Betriebsdaten (Zeit- und Mengenplanung für die gesamte Trocknungskampagne, Trocknungsgutabhängige Vorgaben für die Einstellung von Temperatur und Feuchte der Trocknungsluft - ev. zeitabhängig) für verschiedene Anwendungen (Heubelüftung, Saatguttrocknung, Kräutertrocknung)
- Simulationsergebnis:
    - Flächenbedarf für Solarkollektoren
    - Benötigtes Speichervolumen für das Arbeitsmittel
- Optimierung des Gesamtprozesses:
    - Kollektor (Typ, Flächenausrichtung und -neigung)
    - Betriebsweise (Kollektor- bzw. Heiztemperatur)
- Ökonomische Bewertung des Gesamtprozesses:
    - Anwendungsspezifische Ermittlung von Investitionsbedarf und Betriebskosten
    - Produktionskostenvergleich mit verschiedenen Standardtrocknungsanlagen

AP5: Optimierung des Anlagendesigns, Konstruktion und Aufbau einer optimierten Trocknungsanlage

- Umsetzung der während des Testbetriebes der Versuchsanlage gewonnenen Erkenntnisse (Betriebsparameter, Dimensionierung von Anlagenkomponenten, notwendige Hilfseinrichtungen) in einer optimierten Konstruktion
- Reduzierung hydraulischer Widerstände und Wärmeverluste durch ein kompaktes Anlagendesign mit strömungsoptimierter Luftumwälzung
- Anlagenkomponenten (Trocknungskammer, Lüfter und Absorber) sind optimal aufeinander abzustimmen

- Gewährleistung einer einfachen Handhabung im Anlagenbetrieb
- Kontinuierliche Erfassung des Betriebsaufwandes
    - Stromverbrauch des Ventilators und der Nebenaggregate
    - Bedarf an Arbeitslösung
    - Heizwärmebedarf
- Entwicklung einer Prozesssteuerung

AP6: Betrieb der optimierten Trocknungsanlage mit saisonalen Trocknungssubstanzen

- Testbetrieb mit verschiedenen Kräuter- und Gewürzpflanzen
    - Trocknung von Pflanzen aus einer Ernte parallel in der Versuchsanlage und in einer Standardtrocknungsanlage
    - Chemische Analysen der getrockneten Pflanzen am Institut für Lebensmittel- und Getränkeinnovation (ILGI) der ZHAW in Wädenswil hinsichtlich Aromagehalt (Qualitätsnachweis)
- Ermittlung optimaler Betriebs-, Steuer- und Regelparameter
- Exemplarische Trocknung von Materialproben für interessierte Anwender zum Nachweis von Qualitätsansprüchen
- Vergleich des Betriebsaufwands mit konventionellen Trocknungsanlagen

AP7: Projektleitung, Berichterstellung, Entwicklung von Folgeprojekten

- Sicherstellen eines effizienten und zielorientierten Projektverlaufes
- Enge Zusammenarbeit mit dem Leitungsausschuss
- Anfertigung eines Zwischenberichtes (Milestone) und des Abschlussberichtes
- Öffentlichkeitsarbeit (Veröffentlichungen, Vorträge, Präsentationen, Besichtigung der Anlage)
- Analyse verschiedener landwirtschaftlicher Trocknungsanwendungen (Recherche von Betriebsdaten, Prozesssimulation für eine Sorptive Trocknungsanlage, ökonomische Bewertung), Erstellung von Projektstudien für Nachfolgeprojekte
- Erweiterung des Fokus für Nachfolgeprojekte auf Anwendungen ausserhalb der Landwirtschaft (Lackierereien, Lebensmittelindustrie, Baustoffe u. Keramik)

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Projektierung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsanlage (AP1)

Die am IEFE installierte Trocknungsanlage wurde gem. R&I in der Abbildung 5 geplant und aufgebaut. Mit gezeigtem Aufbau kann neben dem Trocknungsbetrieb durch wenige Handgriffe auch die Desorption betrieben werden. Die Anlage selbst kann in drei Baugruppen eingeteilt werden. Zur Wärmebereitstellung für die Desorption wie auch zur Regelung der Lösungstemperatur während des Trocknungsbetriebs wird ein **Wasserkreislauf** mit integriertem Durchlauferhitzer (DH 1.1, 40kW) eingesetzt, welcher kontinuierlich geregelt wird. Von zentraler Bedeutung ist der **Lösungskreislauf** mit Absorptionswäscher (bis 1000m^3/h Luftdurchsatz), in welchem die Lösung bzgl. Temperatur kontinuierlich durch den Wasserkreislauf auf Temperatur gehalten wird, resp. die Konzentration derer geprüft wird. Die Luft wird durch einen Ventilator vom Absorber zum Trockner im Kreis geführt. Durch den Kontakt mit der Salzlösung im Absorber, gleicht sich Temperatur wie Feuchte dem thermodynamischen Gleichgewicht an wodurch die Luftkonditionen am Wäscheraustritt konstant gehalten werden können. Die Luft durchströmt im **Luftkreislauf** die Trocknungskammer. Innerhalb diesem können bis zu 0.5m^3 Trocknungsgut im Batchbetrieb getrocknet werden.

Bei der Inbetriebnahme der Anlage kam es aufgrund eines Fehlers bei der Temperaturregelung des Heizkreislaufes zu einer Havarie, bei der der Absorber irreparable Schäden durch eine zu hohe Lösungstemperatur (> 90 °C) erlitt. Der Absorber wurde durch einen neuen Apparat ersetzt.

Für die Bilanzierung wird eine kontinuierliche Messaufzeichnung (LabView) eingesetzt. Neben der Messaufzeichnung der Lösung (Wäschereintrittstemperatur, Vorlagentemperatur, Volumenstrom, und Dichte) werden verschiedene Luftwerte aufgezeichnet. Die Lufttemperatur wird in Summe an sechs Positionen aufgezeichnet um allfällige Wärmeeinträge über die Verrohrung, aber auch die Wärmebilanz über den Trockner und den Absorber machen zu können. Ergänz wird die durch die Luftvolumenstrommessung. Innerhalb des Trockners werden zusätzliche Temperaturen in der gleichen Ebene, aber unterschiedlichen Positionen gemessen, um eine Aussage über die Temperaturverteilung machen zu können. Aufgrund der Reaktionsfreudigkeit der Natronlauge mit freiem CO_2 in der Luft, wird die CO_2-Konzentration zur Bilanzierung durch zwei CO_2-Messsonden vor und nach dem Absorber aufgezeichnet. Das Messstellenverzeichnis befindet sich in Tabelle 1.

Die Anlage ist Abbildung 6 fotografiert.

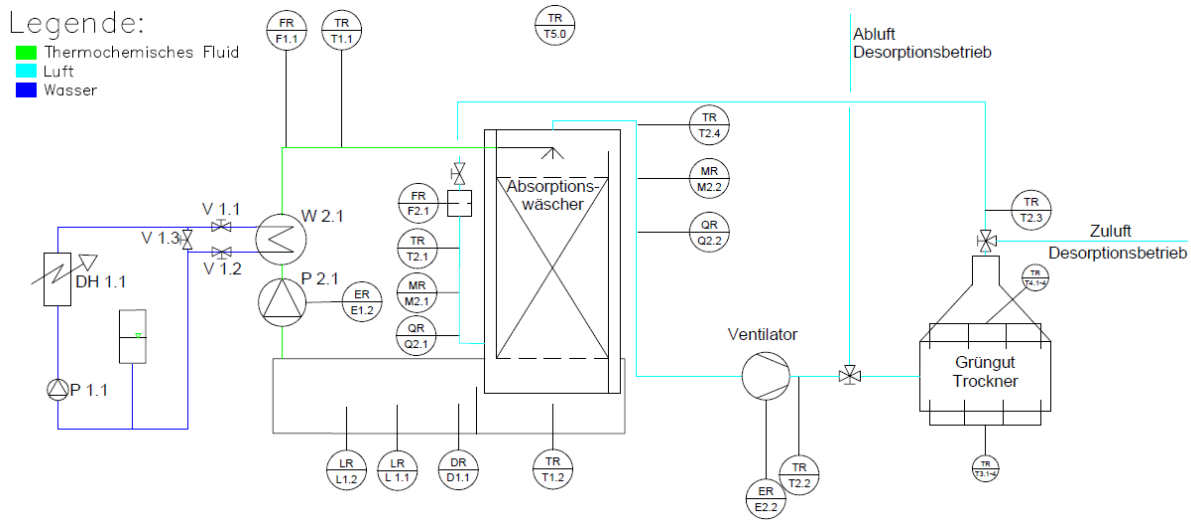

Abbildung 5: R&I Trocknungsanlage

Tabelle 1: Messstellenverzeichnis

L1.1	Lösungsweg	Niveaugeber «Hochstand»	Endress & Hauser, FTW 31/325
L1.2		Niveaugeber «Tiefstandstand»	Endress & Hauser, FTW 31/325
D1.1		Dichtemessung	Endress & Hauser, FML 621
F1.1		Volumenstrom Lösung	ABB, MID, FEP 610
T1.1		Lösungseintrittstemperatur	SAWI PT100, 4-Leiter, Klasse A
T1.2		Lösungsaustrittstemperatur	SAWI PT100, 4-Leiter, Klasse A
E1.2		Elektrische Leistungsaufnahme Pumpe 2.1	Hitachi NES1-015HBE Inverter
Q2.1	Luftweg	CO_2-Messung Absorbereintritt	Vaisala CO_2, ±3.5%
M2.1		Feuchte Absorbereintritt	Jumo Kapazitiv, ±3%rH
F2.1		Luftvolumenstrom	Messdüse, HESCO V-Control 200
T2.1		Lufttemperatur Absorbereintritt	Jumo PT1000, Klasse B
M2.2		Feuchte Absorberaustritt	Jumo Kapazitiv, ±3%rH
Q2.2		CO_2-Messung Absorberaustritt	Vaisala CO_2, ±3.5%
T2.4		Lufttemperatur Absorberaustritt	Jumo PT1000, Klasse B
T2.2		Lufttemperatur vor Trockner	SAWI PT100, 4-Leiter, Klasse A
T2.3		Lufttemperatur nach trockner	SAWI PT100, 4-Leiter, Klasse A
T3.1-T3.4		Luftverteilung unterhalb Trocknungsgut	SAWI PT100, 4-Leiter, Klasse A
T4.1-T4.4		Luftverteilung oberhalb Trocknungsgut	SAWI PT100, 4-Leiter, Klasse A
E2.2		Elektrische Leistungsaufnahme Ventilator	Hitachi NES1-015HBE Inverter
T5.0		Lufttemperatur vor Trockner	SAWI PT100, 4-Leiter, Klasse A

Abbildung 6: Aufbau am Technikum. Links: Absorber mit Steuerkasten. Rechts: Trocknungskammer.

Zusätzlich zur Trocknungsanlage besteht noch ein Messaufbau zur Feuchtebestimmung des Trocknungsgut, dieser besteht aus einem Elektroofen und einer Präzisionswaage. Eine Probe des Trocknungsgutes wird in eine Schale gegeben und im Ofen das Wasser bei 105 °C ausgetrieben. Mit der Erfassung der Anfangs- und Endmasse lässt sich die Feuchtegrad des Trocknungsgutes bestimmen.

Als Trockensubstanz wird das wasserfreie Trocknungsgut bezeichnet.

Die Wasserbeladung des Trocknungsgutes ist definiert als

$$X_{TG} = \frac{m_W}{m_{TS}} \tag{1}$$

$$m_W = m_{\text{vor Ofen}} - m_{\text{nach Ofen}} \tag{2}$$

$$m_{TS} = m_{\text{nach Ofen}} \tag{3}$$

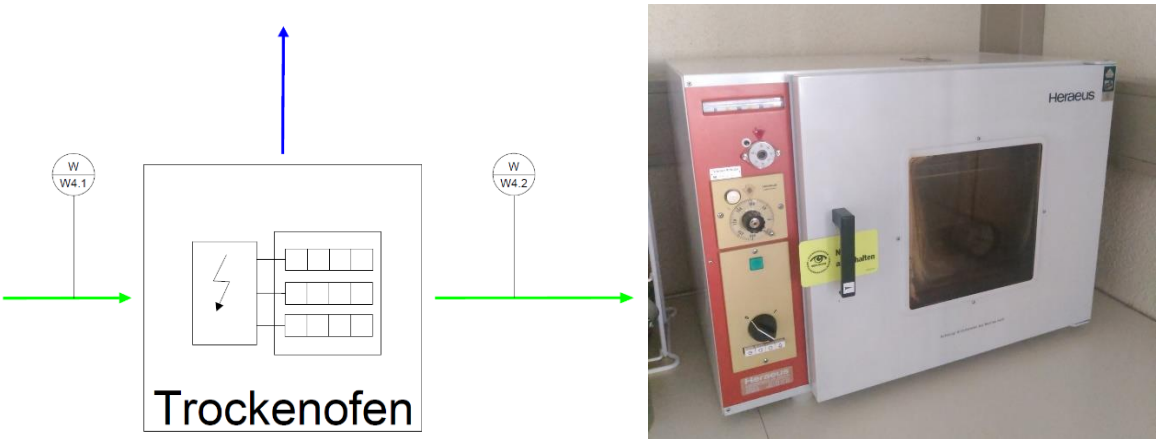

Abbildung 7: links R&I Messaufbau Feuchtebestimmung Trocknungsgut, rechts Trockenofen

3.1.1 Aufbau Absorber

Die Luftkonditionierung erfolgt in Füllkörperwäschern, welche im Unterdruck betrieben werden. Durch einen Saugzugventilator am Wäscheraustritt wird die Luft zunächst von oben über einen seitlichen Kanal in den Wäschersumpf eingeführt, gelangt danach über die Füllkörperschüttung im Gegenstrom zur herabrieselnden Salzlösung in den Wäscherkopf, passiert einen Tropfenabscheider und wird letztendlich über einen seitlichen Kanal wieder nach unten zum Ventilator geführt. (Abbildung 8).

Vom Vorlagebehälter wird die Salzlösung durch eine Tauchkreiselpumpe über einen Plattenwärmeübertrager in den Wäscherkopf gefördert, wo sie durch einen Flüssigkeitsverteiler gleichmässig über die Füllkörper verteilt wird. Die aus der Füllkörperschüttung austretende Lösung wird im Wäschersumpf durch aufschwimmende Füllkörper aufgefangen und fliesst an deren Oberfläche in die Lösungsvorlage. Dadurch wird eine Aerosolbildung im Wäscher vermieden. Der Wäscher steht vollständig im Vorlagebehälter und besitzt am Boden Auslassöffnungen für die Salzlösung. Durch diesen Siphon wird die Luft im Wäscher von der Atmosphäre im Vorlagebehälter getrennt, so dass dieser atmosphärisch offen betrieben werden kann.

Zwischen Wäscher und Lösungsumwälzpumpe befindet sich im Vorlagebehälter eine Trennwand, welche als Überlauf dient. Die Vorlage wird in Wäschersumpf und Pumpenvorlage aufgeteilt. Dadurch wird eine gleichmässige Durchströmung sicherstellt und das Auftreten einer heterogenen Lösungskonzentrationsverteilung wird verhindert.

Alle Lösungsberührenden Teile des Wäschers sind aus Polypropylen oder Polyvinylchlorid gefertigt. Der Wärmeübertrager ist aus Alloy 316.

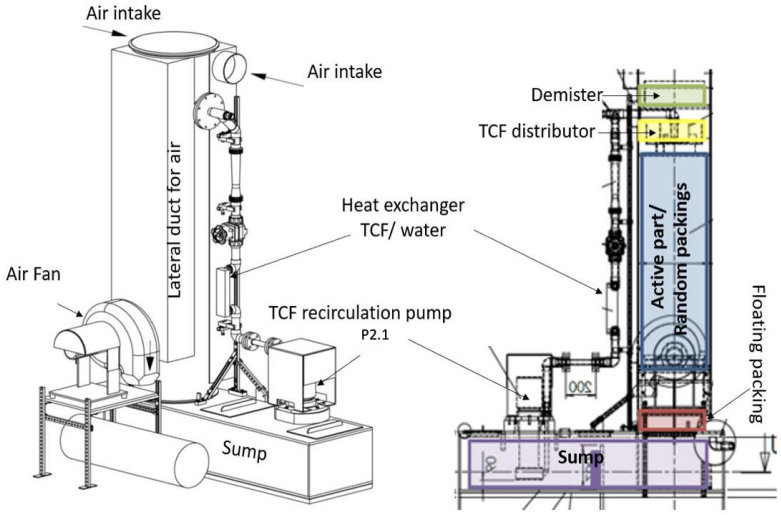

Abbildung 8: Fertigungszeichnung und Prinzipschema des Absorptionswäschers

Wesentliche konstruktive Merkmale und Betriebsdaten:

- Wäscherdurchmesser: 0.5 m
- Lösungsvorlage: 0.4 m^3
- Füllkörperschüttung: Pall-Ring 15, 1.3 m Schütthöhe
- Flüssigkeitsverteiler: Lochbodenverteiler
- Tropfenfänger: Demister aus Drahtgestrick
- Gasleerrohrgeschwindigkeit: 0.5-0.8 m/s
- Berieselungsdichte: 10 - 20 $m^3/(h\ m^2)$

3.2 Vorversuche mit Modellsubstanzen (AP2)

3.2.1 Theoretische Grundlagen der Trocknung

Trocknungsprozess

Die Modellvorstellung der Kräutertrocknung besteht darin, dass zuerst die Oberflächenflüssigkeit verdunstet. In diesem Zeitabschnitt ist ein gleichbleibender Massenstrom Wasser zu erwarten (grüner Abschnitt). Mit dem Antrocknen der Blattoberfläche, nimmt die Wasseroberfläche ab (gelber Bereich), der Massenstrom Wasser sinkt. Sobald das Trocknungsgut einen bestimmten Trocknungsgrad erreicht, nimmt der Wasserdampfdruck über dem Trocknungsgut ab (Abbildung 9), der Massenstrom Wasser geht auf ein Minimum zurück (roter Bereich). Der Trocknungsversuch endet mit dem Erreichen einer Wasserbeladung des Trocknungsgutes von 0.13 kg/kg (12% Restfeuchte im Trocknungsgut).

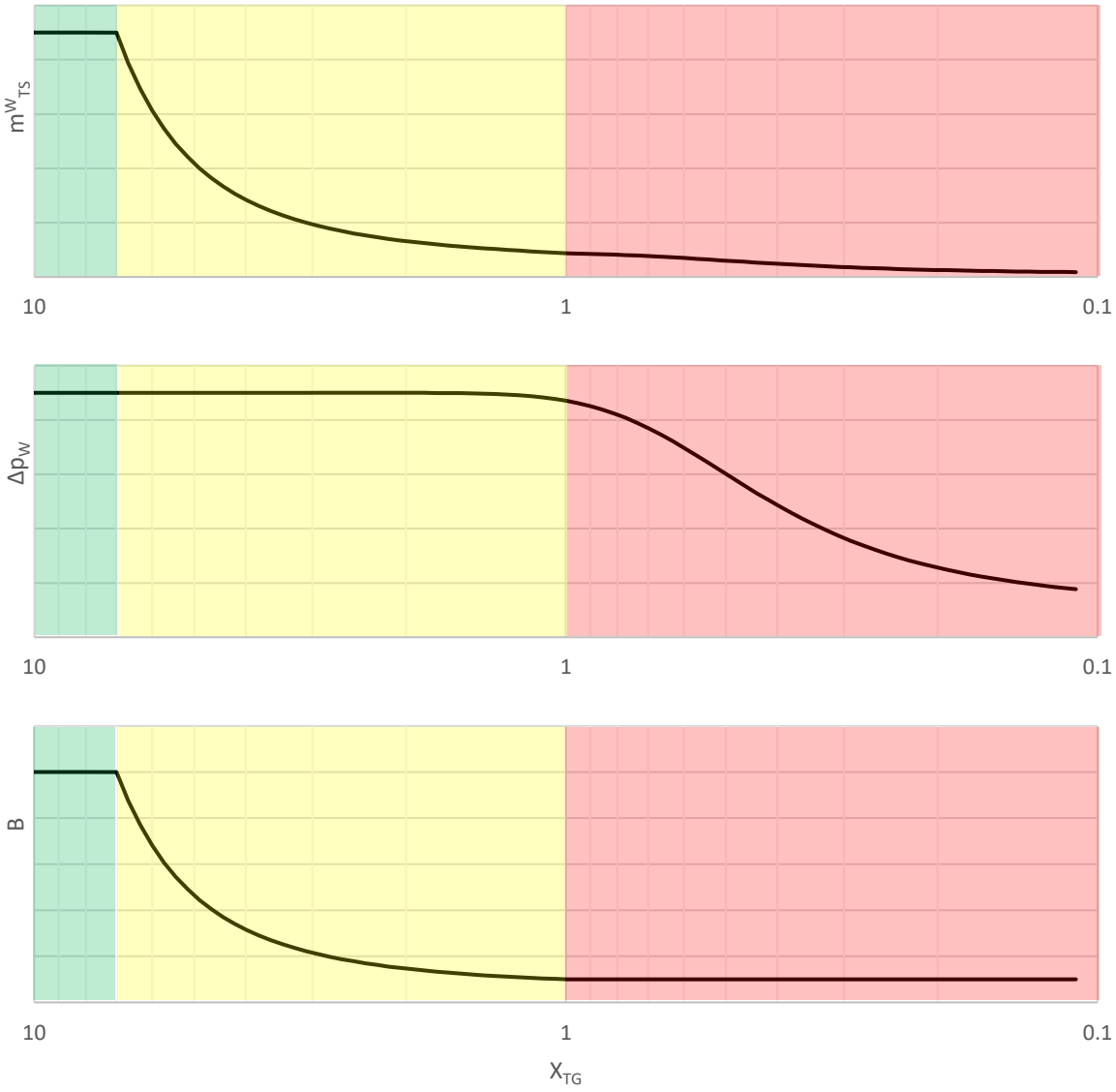

Abbildung 9: Modell Trocknungsprozess

Die Triebkraft ergibt sich aus

$$\Delta p_W = p_W^{LV}(\vartheta_{TG}, X_{TG}) - p_W^{LV}(\vartheta_L) \cdot \varphi_L \quad (4)$$

Wobei gilt:

$$\vartheta_{TG} = \vartheta_L \quad (5)$$

Die Trocknungsrate, entzogenes Wasser pro Zeiteinheit und kg Trockenmasse, wird definiert durch die Triebkraft (abhängig Stoffdaten/Trocknungszustand) und Stoffübergangsfläche A (abhängig Trocknungsverlauf) mal Stoffübergangskoeffizient β.

$$\dot{m}_{TS}^{W} = \Delta p_W \cdot A \cdot \beta = \Delta p_W \cdot B \quad (6)$$

Dampfdruck vom Trocknungsgut

Um die Triebkräfte bestimmen zu können, ist es notwendig den Dampfdruck über dem Trocknungsgut zu kennen. Der Dampfdruck über dem Trocknungsgut hängt von der Temperatur und dem Trocknungszustand der Kräuter ab.

Um die Wasseraktivität der Trocknungsgüter zu bestimmen, wurden Kräuter in verschiedenen Trocknungszuständen mit einem Temperatur- und Feuchtesensor in ein Einmachglas gegeben und während 24 Stunden ruhen gelassen. Der Wasserdampfpartialdruck der Luft und der Wasserdampfdruck über dem Trocknungsgut gleichen sich an. Mit dem Temperatur- und Luftfeuchtewert des Messgeräts lässt sich mit oben aufgeführter Gleichung der Wasseraktivitätswert bestimmen. Messgeräte wie der Wasseraktivitätsmesser HygroPalm von Rotronic messen nach dem gleichen Prinzip.

In Abbildung 10 sind die Messwerte der beiden Messmethoden dargestellt. Kraume [25] beschreibt den Trocknungsprozess in drei Phasen. Zuerst trocknet das Oberflächenwasser, dies ist bis zu einer Wasserbeladung von 1 kg/kg (Restfeuchte 50 %) vorhanden. Zwischen 50 und 10 % Restfeuchte reduziert sich der Gleichgewichtsdruck auf 10 bis 20 % des Dampfdruckes, die Kapillarflüssigkeit verdunstet.

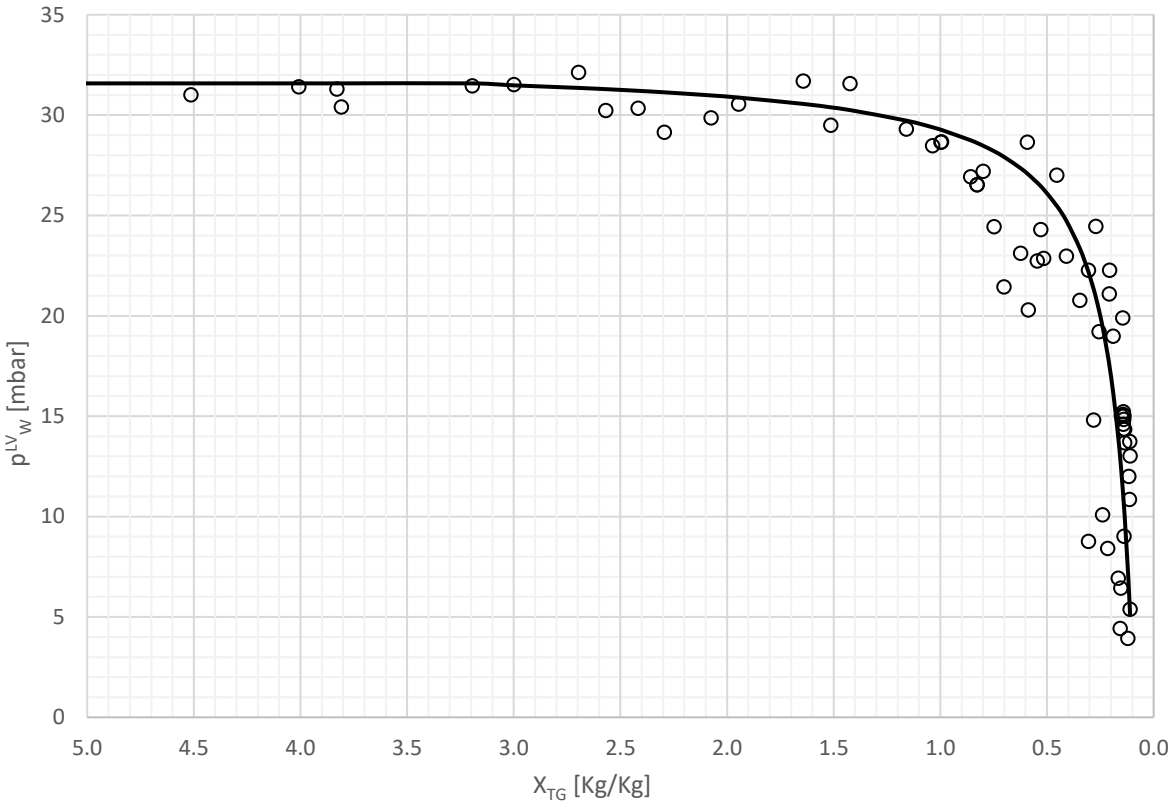

Abbildung 10: Trocknungsisotherme, Brennnessel 25°C

Für die im Kapitel 3.4.2 beschriebene Simulation des Trocknungsprozesses wird anhand der Messdaten eine Ausgleichsfunktion (Gleichungen 7 und 8) zur Beschreibung des Wasserdampfdruckes über dem Trocknungsgut entwickelt. Bis zu einer Wasserbeladung von 3 liegt Oberflächenwasser vor, so dass der Dampfdruck nicht durch osmotische und Kapillarkräfte beeinflusst wird.

$$X_{TG} \geq 3\text{: } \mathrm{p_W^{LV}}(\vartheta, \mathrm{X_{TG}}) = \mathrm{p_W^{LV}}(\vartheta) \tag{7}$$

$$X_{TG} < 3\text{: } \mathrm{p_W^{LV}}(\vartheta, \mathrm{X_{TG}}) = \mathrm{p_W^{LV}}(\vartheta) - \left(3.4 \cdot \mathrm{X_{TG}}^{-0.95} - 1.1\right) \tag{8}$$

3.2.2 Beurteilung der Prozesse hinsichtlich der Eignung des Arbeitsmittels

Grundsätzlich können verschiedenste Salze zur Entfeuchtung der Luft eingesetzt werden. Jedoch hängt die maximal (tiefste) erreichbare Gleichgewichtsfeuchte sehr strakt vom jeweiligen Salz und Temperatur und Konzentration ab. So liegt die Gleichgewichtsfeuchte einer gesättigter Magnesiumchloridlösung bei 20 °C und bei lediglich 35% relativer Feuchte während eine Natriumhydroxidlösung unter gleichen Bedingungen theoretische Gleichgewichtswerte von 5 % relative Feuchte erreicht. Massgebend hierfür sind einerseits die begrenzte, und von Salz zu Salz unterschiedlichen, Löslichkeitsgrenzen, andererseits aber die unterschiedliche Aktivität des Salzes in Wasser. Eine allgemeine Beschreibung der Interaktionsaffinität der Lösungseigenschaften liegt bislang nicht vor. In früheren Projekten wurden verschiedene Salzlösungen untersucht sowie die Vor- und Nachteile einander gegenübergestellt. Für das damalige Projekt H-Disnet kristallisierte sich zum Schluss die Magnesiumchloridlösung als guten Kompromiss heraus. Obwohl die Gleichgewichtsfeuchte derer mit 35% (und damit nur geringem speicherbarem chemischen Potential) vergleichsweise hoch lag, wurde auf Grund physiologischer wie

ökonomischer Aspekte diese Lösung favorisiert. Im Falle der sorptiven Trocknung ist der Einsatz einer thermodynamisch aktiven Lösung unumgänglich. Nur Salzlösungen mit Gleichgewichtsfeuchten um 10% Restfeuchte können die Feuchteanforderungen, welche die Trocknungsgüter mit den geforderten Restfeuchten fordern, erreichen.
In der Tabelle 2 werden einige, bzgl. der Gleichgewichtsfeuchte (φ < 20%), potenziell einsetzbare, Salzlösung aufgelistet.

Tabelle 2: Gleichgewichtsfeuchten gesättigter Salzlösungen bei 20°C

Salz	**Chemische Beschreibung**	**Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C**
Cäsiumfluorid	CsF	3.38 %rH
Lithiumbromid	LiBr	6.61 %rH
Zinkbromid	$ZnBr_2$	7.94 %rH
Kaliumhydroxid	KOH	9.32 %rH
Natriumhydroxid	NaOH	8.91 %rH
Lithiumchlorid	LiCl	11.31 %rH
Calciumbromid	$CaBr_2$	16.50 %rH

In der Abbildung 11 werden die Gleichgewichtsfeuchten einer Natriumhydroxidlösung in Abhängigkeit der Temperatur und der Massenkonzentration dargestellt. Weiter wird die Löslichkeitsgrenze als Funktion der Temperatur in Rot aufgezeichnet. Abbildung 12 zeigt gleiches für die Lithiumchloridlösung. Die im Trocknungsbetrieb erreichbare Mindestfeuchte hängt im Wesentlichen davon ab, bei welcher Temperatur die Lösung gespeichert wird. Vergleicht man beispielsweise die Lagertemperatur bei 0 °C, so kann die Natronlage mit einer Gleichgewichtsfeuchte von 50 % deutlich weniger chemisches Potential aufbauen, als dies das Lithiumchlorid vermag. Steigt die Lagertemperatur aber auf 20 °C, so ist gegenteiliges der Fall. Dieser Umstand zeigt, dass sich ein Stoffgemisch nicht pauschal favorisieren lässt.

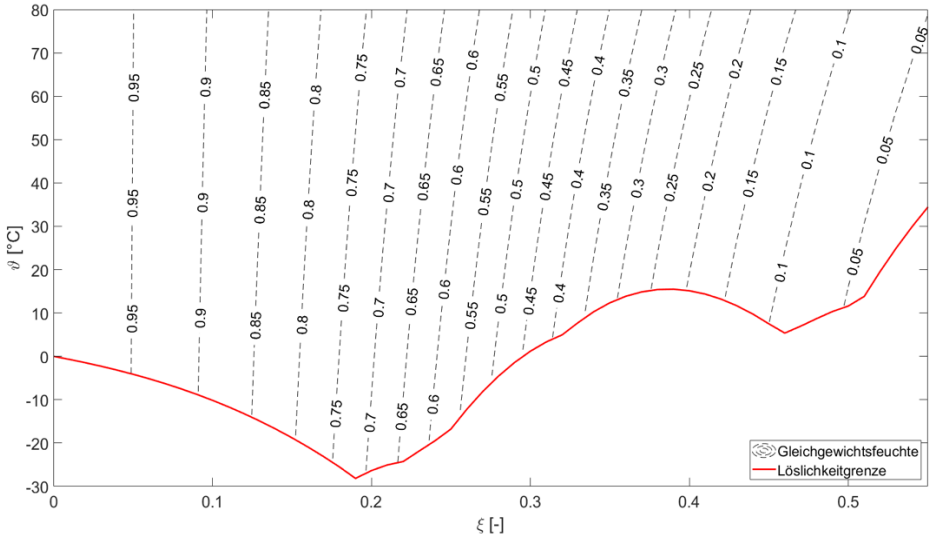

Abbildung 11: Gleichgewichtsfeuchten (relativ, %) einer Natriumhydroxidlösung

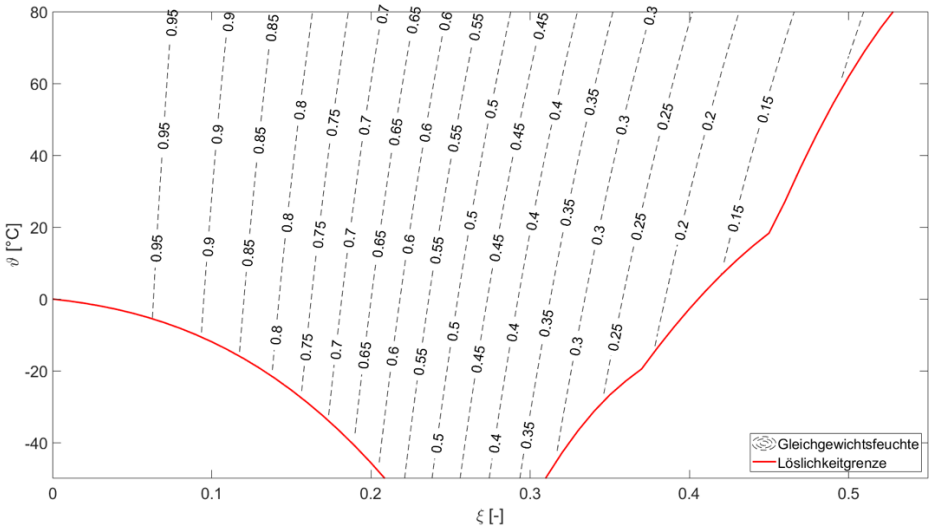

Abbildung 12: Gleichgewichtsfeuchten (relativ, %) einer Lithiumchloridlösung

3.2.3 Trocknungsversuche

Erste Trocknungsersuche konnten im Laufe des Herbstsemesters 2020 mit Textilien, Brennnesseln und Pfefferminze gemacht werden. Vordergründig wurden hierbei die Anlagencharakteristik, die Regel- resp. Steuermöglichkeiten sowie den Natriumcarbonatumsatz (Luftwäscherbetrieb mit NaOH), sowie die grundsätzliche Funktion der sorptiven Trocknung untersucht.

Temperatur und relative Feuchte der Trocknungsluft wurde gemessen.
Durch die relative Feuchte φ ergibt sich die Wasserbeladung der Trocknungsluft aus der idealen Gasgleichung und der Wasserdampfdruckgleichung nach Antoine[1]:

$$X_{tL} = \frac{M_W}{M_{tL}} \cdot \left(\frac{p}{p_W^{LV}(\vartheta) \cdot \varphi} - 1 \right)^{-1} \tag{9}$$

Textilien

Als erster Versuch wurden angefeuchtete Textilien getrocknet. Ziel war es die Funktion des Trockners zu bestätigen.

In Abbildung 13 sind die Temperatur- und Wasserbeladungsverläufe der Trocknungsluft vor und nach dem Trockner dargestellt.

[1] Siehe Anhang

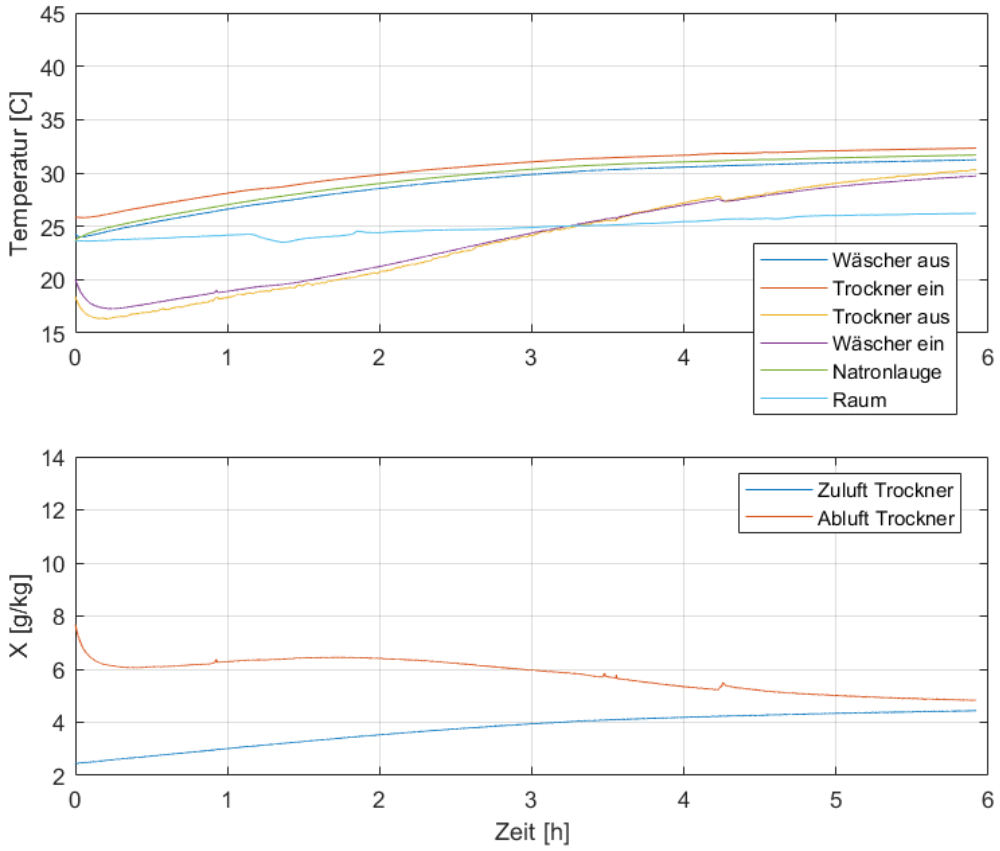

Abbildung 13: Temperatur und Wasserbeladung der Trocknung Textilien

Die Textilien konnten getrocknet werden, die Trocknungsanlage hat sich während des Betriebs langsam aufgeheizt. Dies ist das Ergebnis aus Leistungseintrag des Ventilators und des Wärmeaustauschs mit der Umgebung. Eine Optimierung des Trocknungsprozesses verlangt eine Temperaturstabilisierung.

Brennnesseln

Abbildung 14 zeigt neben den Wasserdampfbeladungen der Trocknungsluft vor und nach dem Trockner (resp. nach und vor dem Wäscher, siehe R&I in Abbildung 5) auch die Wasserbeladung des Trocknungsgutes sowie die Lufteintrittstemperatur in den Trockner. Die Trocknungssolltemperatur lag während des gesamten Versuches bei 40 °C. Die Temperatur lag stets leicht über 40 °C. Innerhalb des sorptiven Trocknungsprozesses wird gleiche Energiemenge, wie sie zur Verdunstung in Trockner aufgewendet wird, im Absorptionsprozess in Form sensibler Wärme frei. Für den Gesamtprozess bedeutet dies – vernachlässigt man die Verlustwärme über die Anlagenhülle - dass nach erstmaligem Aufheizen des Systems keine weitere Energie für den Trocknungsprozess aufgewendet werden muss. Tatsächlich ist es nun so, dass über den Ventilator und die Lösungsmittelpumpe dennoch Wärme produziert wird. Als Konsequenz hiervon erwärmt sich, bei Ausbleiben oder reduzierten Verlustleitung, die Lösung bis hin zu einem Gleichgewicht. Im Falle der Messung V1.1 lag diese bei etwas über 40 °C (Tabelle 3).

Die durch das chemische Potential der Salzlösung reduzierte Gleichgewichtsfeuchte lag über die gesamte Prozessdauer bei konstant 12 %rH und 41 °C. In einem idealen Trocknungsprozess liesse sich die Luft im Trockner bis hin zur Sättigung befeuchten und erreichte damit ihre Kühlgrenztemperatur.

In Messung V1.1 gelang dies nicht. Die aus dem Trockner strömende Luft mit einer Wasserdampfbeladung von anfänglich 10 g/kg_{tL}, resp. gegen Ende des Versuchs von 6.8 g/kg_{tL}, entsprechen einer relativen Feuchte von 38 %rH bei 30 °C, resp. 18 %rH bei 37 °C. Die angestrebten Feuchten von ca. 70 %rH konnten nicht erreicht werden. Eine mögliche Ursache liegt im zu hohen Luftumsatz. Durch die hohen Strömungsgeschwindigkeiten der Luft im Trockner wurde die Verweilzeit drastisch reduziert (im Vergleich zu Folgemessungen halbiert), wodurch sich die Luft nicht erwartungsgemäss befeuchten liess. Zudem lag die Schüttdichte mit 31.3 kg/m^3, zumindest gegen Ende des Versuchs, deutlich zu tief, wodurch die Trocknungsluft beinahe kontaktlos durch das Trocknungsgut strömen konnte. Im Weiteren lässt sich durch den hohen Luftumsatz auch eine mögliche Ursache zur «System-Übertemperatur» finden. Aufgrund des erhöhten Luftvolumenstroms und dem damit einhergehenden erhöhten Druckabfall im Luftkreislauf mussten Ventilatorleistungen von bis zu 1.5 kW in Kauf genommen werden.

Die Befeuchtungsrate der Luft lag zu Beginn des Batchprozesses bei ±4 g/kg. Verglichen mit konventionellen Trocknungsprozessen (±2 g/kg) liegt dieser Wert, obschon die Kühlgrenztemperatur bei weitem nicht erreicht wurde, vergleichsweise hoch. [persönliches Gespräch, Matthias Barth]. Der Versuch wurde nach 8.5 Stunden abgebrochen, weshalb die avisierte Restfeuchte von 12 % nicht erreicht werden konnte.

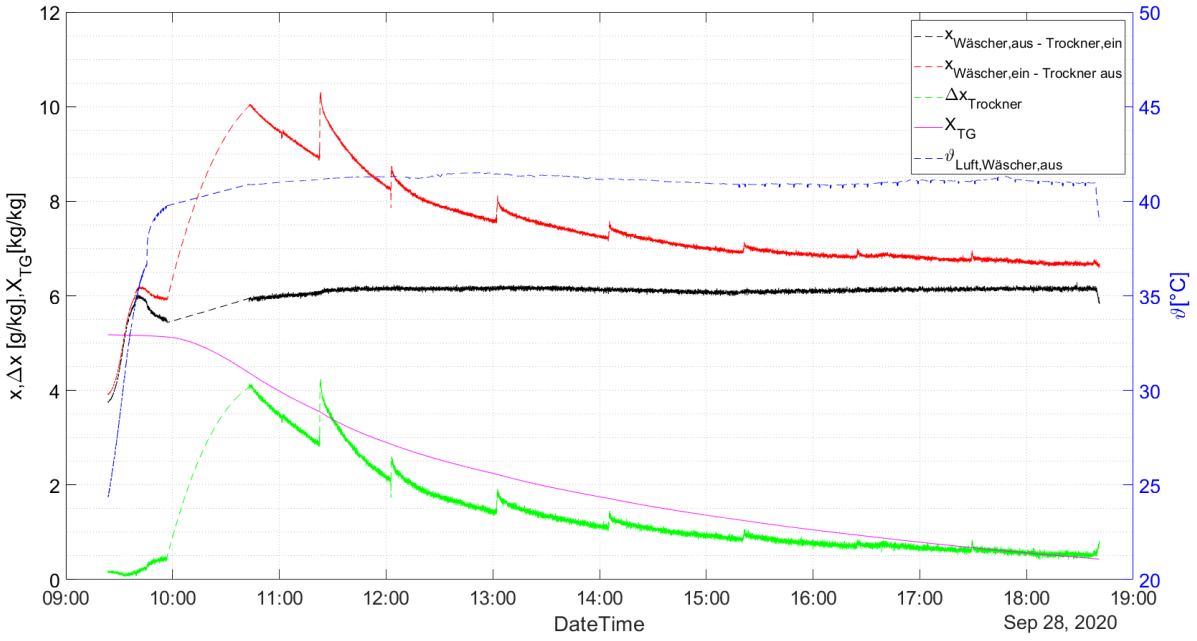

Abbildung 14: Wasserbeladungen der Luft und des Trocknungsgutes während des Versuches V1.1 mit Brennnesseln. Auf der zweiten y-Achse wird die Trocknungslufttemperatur am Trocknereintritt aufgezeichnet.

Weitere Versuche innerhalb der Versuchsreihe «Brennnessel V1.x» wurden durchgeführt. Aufgrund der Erkenntnisse aus dem vorangegangenen Versuch wurden hierbei einige Parameter angepasst. Der zuvor angesprochene Volumenstrom wurde bis zu einer Leerrohrgeschwindigkeit im Trockner von 0.12 m/s reduziert, um unnötige Energieeinträge des Ventilators zu reduzieren und die spezifische Befeuchtung der Trocknungsluft über den Trockner zu erhöhen. Die Schüttdichte wurde verdoppelt und die Prozesstemperatur auf 35 °C abgesenkt.

In der Tabelle 3 werden die Randbedingungen Trocknungsparameter aller bisherigen Trocknungsversuchen einander gegenübergestellt.

Tabelle 3: Randbedingungen / Trocknungsparameter

	V1.1	V1.2	V1.3	V2.1
Trocknungsgut	Brennnessel	Brennnessel	Brennnesseln	Pfefferminze
Schüttdichte [kg/m³]	31.3	62.1	60	43.8
Prozesstemperatur (Ist /Soll) [°C]	41.4 / 40	36.5 / 35	35 / 35	34 / 35
Leerrohrgeschwindigkeit Trockner [m/s]	0.21	0.1	0.1	0.14
Endfeuchte Trocknungsgut [kg/kg]	0.26	0.30	0.13	0.27
Wendeintervall	1 Stunde	90 Minuten	2 Stunden	Kein
Umgebungstemperatur	≈30°C	≈25°C (klimatisiert)	≈25°C (klimatisiert)	≈25°C (klimatisiert)

Abbildung 15 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wasserdampfbeladungen der Trocknungsluft vor und nach dem Trockner, die Wasserbeladung der Trocknungsgutes sowie die Lufttemperatur am Eintritt zum Trockner während der zweiten Brennnesseltrocknung.

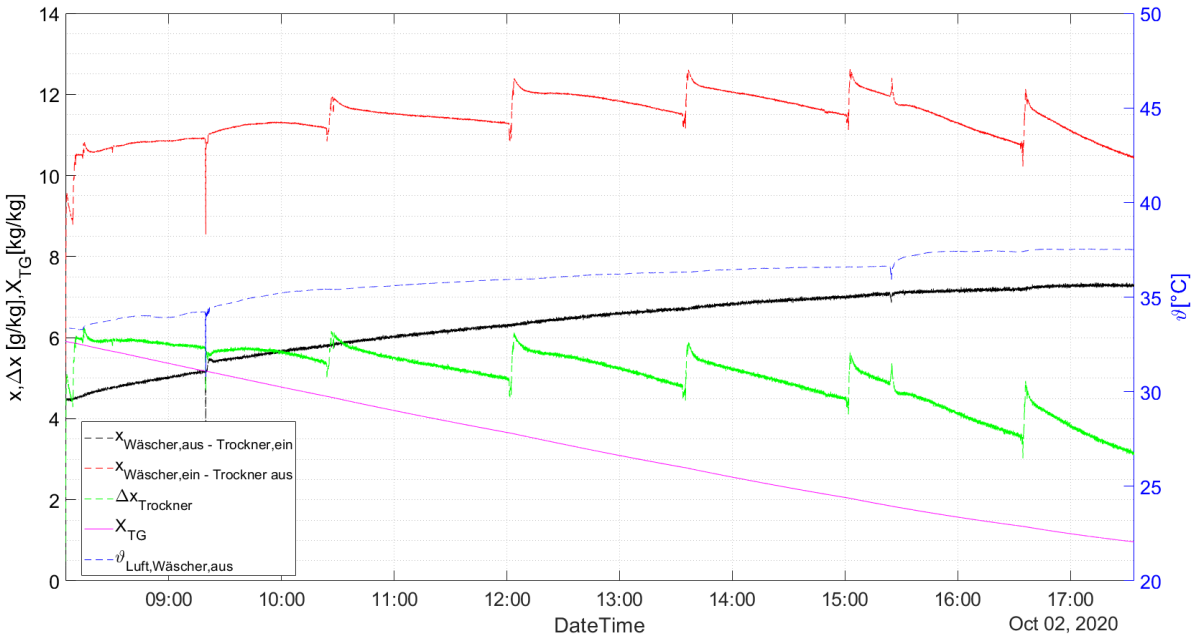

Abbildung 15: Wasserbeladungen der Luft und des Trocknungsgutes während des Versuches V1.2 mit Brennnesseln. Auf der zweiten y-Achse wird die Trocknungslufttemperatur am Trocknereintritt aufgezeichnet.

Die Befeuchtungsrate der Luft konnte durch die Erhöhung der Schüttdicht und gleichzeitiger Reduktion der Leerrohrgeschwindigkeit im Trockner mit 6 g/kg$_{tL}$ deutlich erhöht werden. Die relative Feuchte, der aus dem Trockner strömenden Luft erreichte 77 %rH und lag damit nahe an der Kühlgrenztemperatur. Im Gegensatz zur erstmaligen Trocknung lag die Luftbefeuchtungsrate über den Trockner über die

gesamte Versuchsdauer konstant. Die aus dem Absorber strömende Luft erwärmte sich über die Versuchsdauer von anfänglichen 35 °C auf 37.5 °C. Grund hierzu ist wiederum eine positive Energiebilanz die Trocknungsanlage.

Mit einer Brennnesseltrocknung wird im Anschluss der Trocknungsprozess beschrieben (Theoretische Grundlagen Kapitel 3.2.1). Die in Abbildung 16 dargestellten Messpunkte resultieren aus einer Brennnesseltrocknung (10 – 15 cm lange Stücke, anfänglich mit Wasser benetzt). Dabei wurden 30 kg präparierter Brennnesseln in den auf 35 °C vorgeheizten Trockner gegeben.

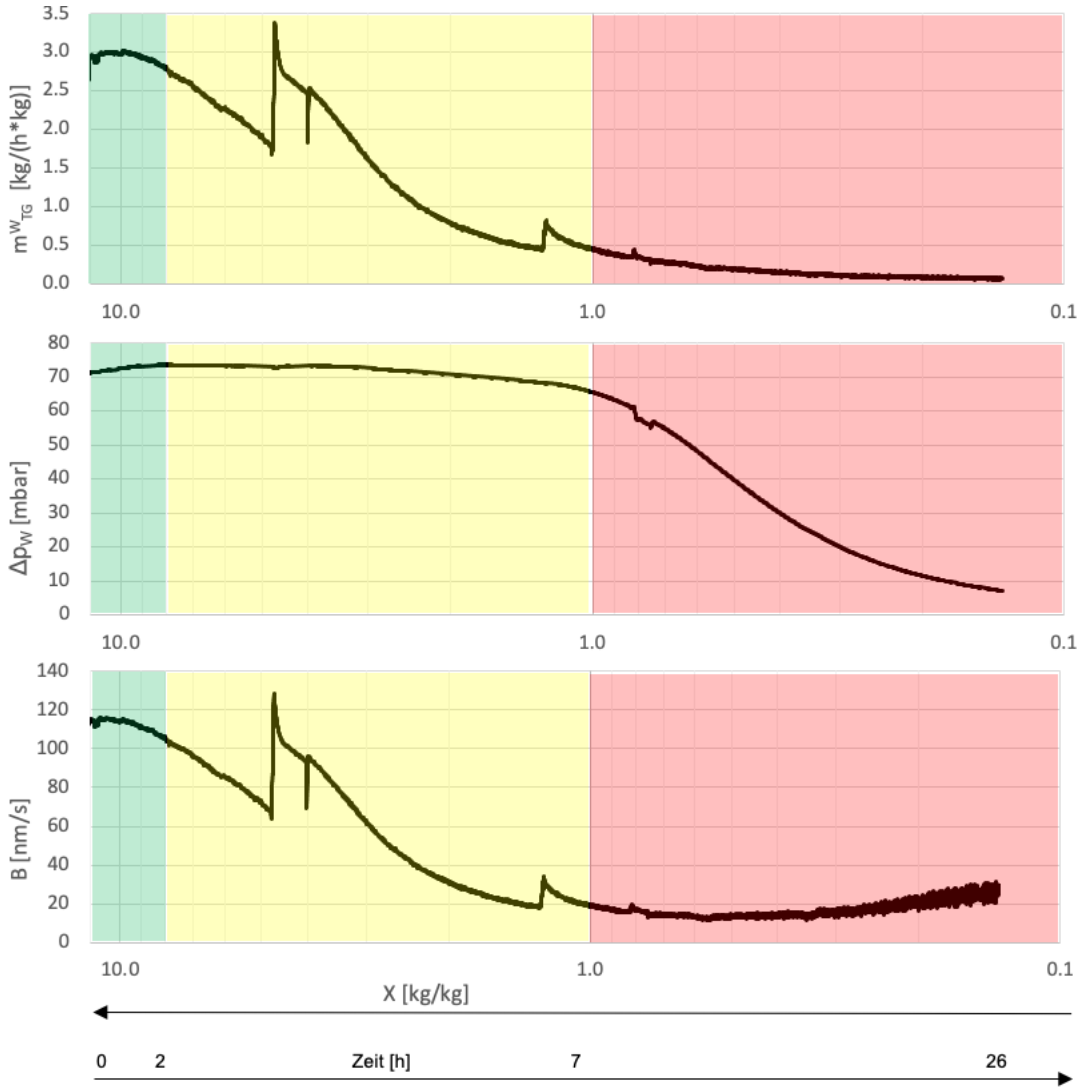

Abbildung 16: Brennnesseltrocknung V1.3

Im realen Trocknungsbetrieb ist die 1. Phase (Grün) mit dem Oberflächenwasser deutlich zu sehen. Nach 2 Stunden beginnt die benetzte Oberfläche abzunehmen, die 2. Phase (Gelb) beginnt. Weitere 5 Stunden später ist die gesamte Oberfläche trocken, der Wasserdampfdruck über dem Trocknungsgut nimmt stark ab, die Endphase (Rot) der Trocknung hat begonnen.
Die Brennnesseltrocknung wurde bei einem Restfeuchtegehalt von 12 % beendet.

Pfefferminze

Im Versuch mit Pfefferminze wurde im Gegensatz zu den vorangegangenen Versuchen auf ein regelmässiges Wenden verzichtet, um so ein Beladungsgradient ausmachen zu können. Die Schüttdichte liegt mit 43.8 kg/m³ in Mitte der beiden vorangegangenen Versuche, wodurch sich der Druckabfall in der Gesamtanlage weiter zu reduzieren und damit potentielle Übertemperaturen – wie sie in den Versuchen zuvor aufgetreten waren – ausschliessen liessen.

Der Trocknungsverlauf in Abbildung 17 zeigt sehr deutlich, dass sich die Befeuchtungsrate über den Trockner mit fortgeschrittener Zeit stark reduziert. Zurückzuführen ist dies auf eine Ungleichverteilung des Trocknungsgutes im Trockner. Weil während der gesamten Versuchsdurchführung auf ständiges Wenden verzichtet wurde, fanden lediglich partielle Trocknungsprozesse im Trockner statt, gleichzeitig fand an anderen Positionen kein Abtrocken statt. Zu erkennen ist dies in der Abbildung 18 und Abbildung 19. Dabei werden einerseits die Loggerpositionen sowie die zeitlichen Verläufe der Logger bzgl. der Wasserdampfbeladung der Luft aufgezeigt. Es zeigt sich, dass wider Erwarten lokale Feuchtigkeitsherde existieren. So zum Beispiel an der Position 2. Dabei zeichnet sich im unteren Bereich des Trockners eine deutlich höhere Luftbeladung ab, als es dies an gleicher Position oberhalb macht. Einzige Erklärung hierfür sind ungleich verteilte Luftströme über das Trocknungsgut.

Die Messung musste nach 17.5 Stunden abgebrochen werden, weshalb die avisierte Restfeuchte von 12.8 % nicht erreicht werden konnte. Grund dafür war ein Softwareausfall.

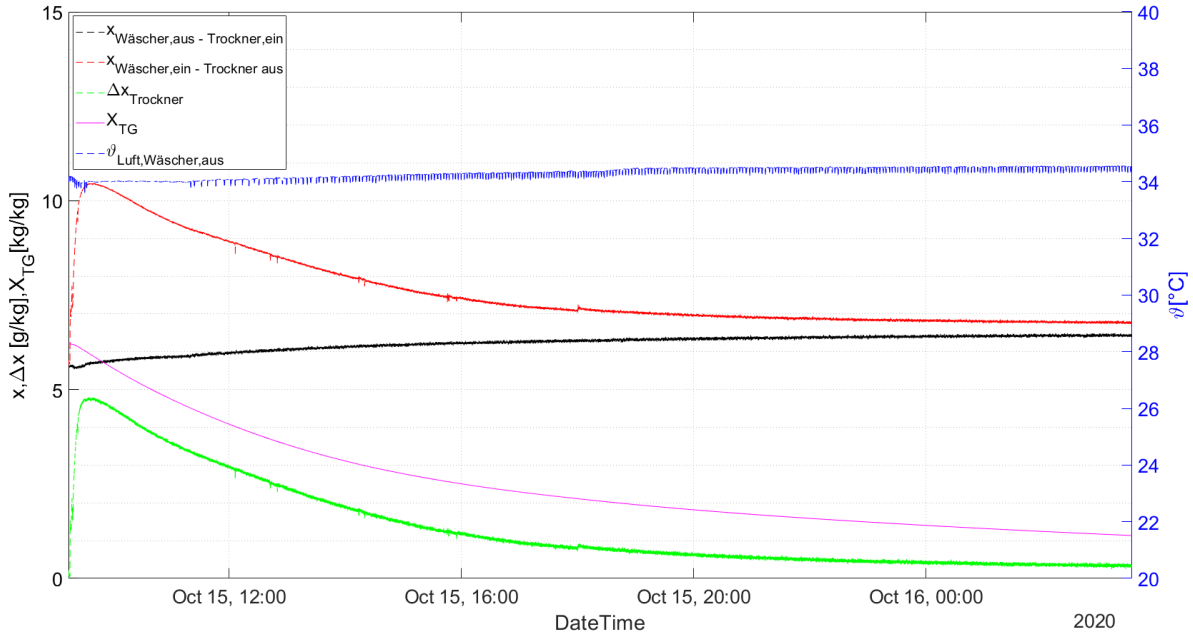

Abbildung 17: Wasserbeladungen der Luft und des Trocknungsgutes während des Versuches V2.1 mit Pfefferminze. Auf der zweiten y-Achse wird die Trocknungslufttemperatur am Trocknereintritt aufgezeichnet.

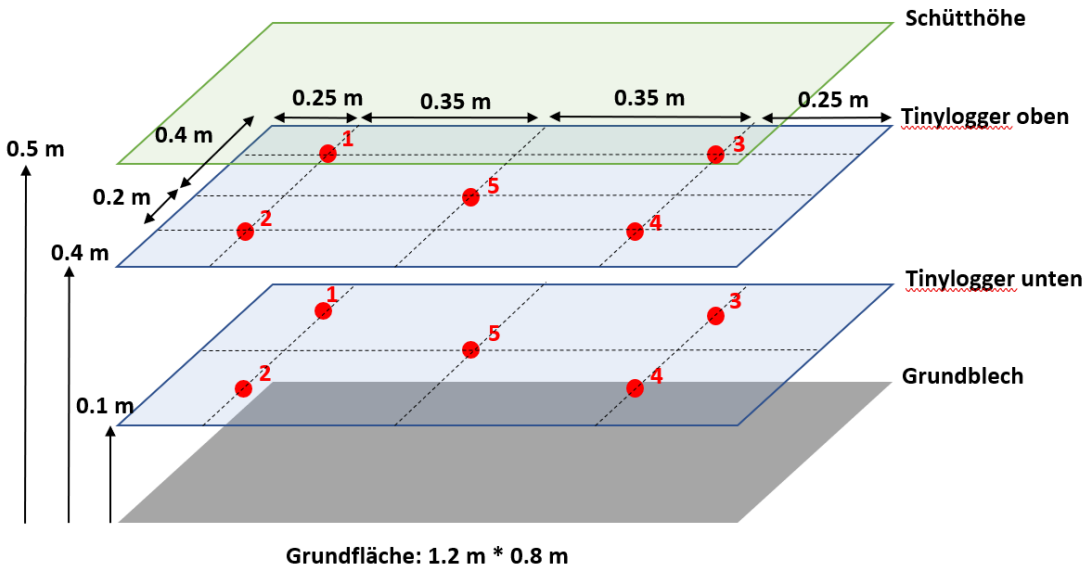

Abbildung 18: Loggerverteilung innerhalb des Trocknungsgutes (Pfefferminze) während des Versuchs 2.1

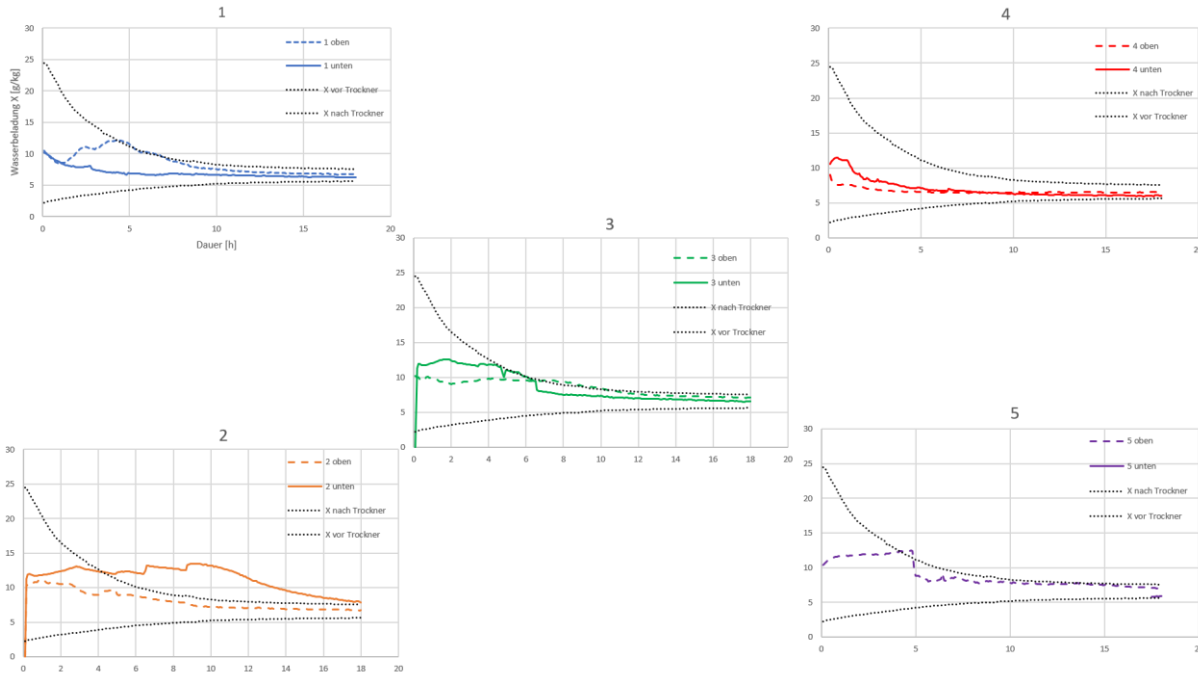

Abbildung 19: Beladungsverlauf innerhalb des Trocknungsgutes während des Versuches V2.1. Die jeweiligen Abbildungen zeigen die Position innerhalb des Trockners als Draufsicht.

3.2.4 Chemische Veränderung am Trocknungsgut

Die getrockneten Brennnesseln wurden zerkleinert und mit gekauftem Brennnesseltee verglichen. Dabei wurde die Farbe der Kräuter sowie der pH-Wert und der Geschmack des aufgebrühten Tees verglichen (Abbildung 20). Beide Proben weisen einen pH-Wert von 8 auf. Ebenso konnten die Verkoster keinen geschmacklichen Unterschied feststellen. Die getrockneten Brennnesseln sind heller als die Gekauften.

Abbildung 20: Farb-, Geschmacks- und pH-Wert-Test, links Sorptionsgetrocknet, rechts gekaufter Teebeutel

3.2.5 Natriumcarbonatumsatz

Absorptionsprozesse mit Natronlauge werden normalerweise nicht in offenen Prozessen genutzt, da gasförmiges CO_2 mit den Hydroxid-Ionen in der Lauge reagiert und zu Carbonat-Ionen umgesetzt wird (10). Wie jedoch in Kapitel 2 erläutert, weist die Natronlauge bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften als auch unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten deutliche Vorteile auf, weshalb der geringe Verlust durch die Carbonatbildung in Kauf genommen wird. Durch die Reaktion wird die Natronlauge durch entstehendes Wasser und entzogenes Natriumhydroxid verwässert. Wird die Löslichkeitsgrenze des Natriumcarbonats überschritten, kristallisiert es sich als Hydrat und fällt aus der Lösung aus.

$$CO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O \tag{10}$$

Aus dem stöchiometrischen Reaktionsumsatz ergibt sich ein Umsatz von 1.8 g NaOH pro 1 g CO_2.

Während den Trocknungsprozessen verdünnt sich die Lösung kontinuierlich, weshalb diese zu einem späteren Zeitpunkt regeneriert werden muss. Die Desorptionsprozesse werden in aller Regel durch intensive Wärmezufuhr realisiert. Dabei erwärmt sich die Lösung vergleichsweise stark, wodurch sich auch der Dampfdruck des Wassers in der Lösung stark erhöht. Wird nun Umgebungsluft zum Prozess geführt, resultiert ein Stoffstrom von der Lösung zur Luft – die Luft wird befeuchtet und trägt Wasser aus der Lösung aus. Während solchen Prozessführungen muss das System ständig mit neuer, noch unbeladener Luft gespiesen werden. Weil die Absorption, abhängig vom eingesetzten Absorbens und den entsprechenden Affinitäten, nicht nur die Komponente Wasser betrifft, können während dieser Prozesse ungewünschte Stoffe in die Lösung gelangen. Im Falle der Natronlauge liegt eine ausgeprägte Affinität zum Kohlendioxid vor. Dabei wird das Kohlendioxid aus der Luft absorbiert und reagiert in der Lösung mit Natriumhydroxid zu Natriumcarbonat (Na_2CO_3). Das Natriumcarbonat weist, neben deutlich schlechteren thermodynamischen Eigenschaften hinsichtlich der Dampfdruckverschiebung, auch ungünstige Eigenschaften hinsichtlich der Prozessführung aus. Im Speziellen sind dies die begrenzte Löslichkeit in Wasser und die Neigung zu sehr festen Ablagerungen in Rohrleitungen.

In der Abbildung 21 wird die Messaufzeichnung während des Desorptionsprozesses mit frischer Natronlauge dargestellt. Der Prozess wurde bei Umgebungstemperatur gestartet und während ca. 45 Minuten auf Desorptionstemperatur (65 °C) angehoben. Die eintretende CO_2-Konzentration lag während der gesamten Versuchsdurchführung leicht unter 500 ppm (488 ppm). Die austretende Kohlendioxid-Belastung lag bei 20 ppm. Der Luftvolumenstrom lag bei konstanten 570 m^3/h. Mit Hilfe der Idealgasgleichung und den entsprechenden Grössen bzgl. Temperatur und Volumenstrom kann so

$$\dot{n}_{CO_2,ein} = \frac{p \cdot \dot{V}_{Luft}}{R \cdot T} \cdot c_{CO_2,ein} \tag{11}$$

eine einfache Bilanz bezüglich des absorbierten Kohlendioxids gemacht werden. Gleichung (13) zeigt die aus (11) und (12) resultierende Gleichung hinsichtlich des sich einstellenden Natriumcarbonatumsatzes.

$$\dot{m}_{Na_2CO_3} = M_{Na_2CO_3} \cdot (c_{CO_2,ein} - c_{CO_2,aus}) \cdot \frac{p \cdot \dot{V}}{R \cdot T} \tag{12}$$

Während der Versuchsdurchführung vom 04.12.20 stellte sich während des quasi-stationären Betriebs ein Natriumcarbonatumsatz von 0.28 g/s (≈1.02 kg/h) ein, resp. ein Abbau von Natriumhydroxid von 0.01 g/s (≈0.38 kg/h). Wieviel Natriumcarbonat während der Desorption umgesetzt wird, hängt stark von der Prozessführung, resp. dem Luftvolumenstrom ab.

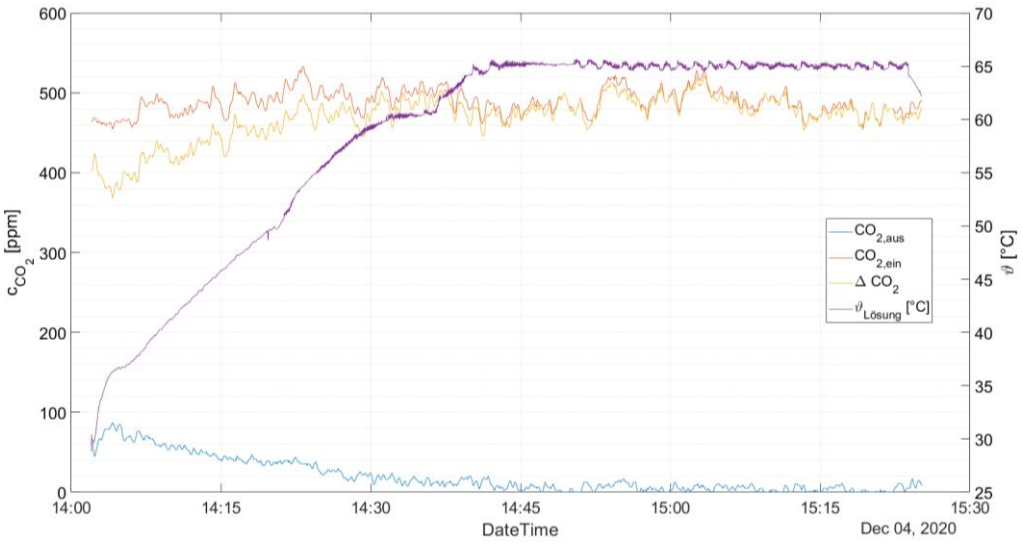

Abbildung 21: Kohlendioxid-Konzentrationen am Absorberein- resp. austritt während des Sorptionsprozesses

Anders läuft die CO_2-Absorption während dem Trocknungsverfahren, da in diesem Fall die Trockenkammer während des Trocknungsversuches nicht geöffnet wird. In der SONITRO-Anlage werden somit 2.5 g CO_2 aus dem eingeschlossenen Luftvolumen von 3 m^3 absorbiert, was einem Verlust von 5 g NaOH entspricht. Das sind 0.002 % des in der Anlage gespeicherten NaOH (450 kg 50%ige Natronlauge).

Aus verfahrenstechnischer Sicht sind die Abtrennmöglichkeiten des Natriumcarbonats von grosser Bedeutung. In der aufkonzentrierten Lösung konnten verschiedene, auskristallisierte, Feststoffe ausgemacht werden (siehe Abbildung 22). Das als Dekahydrat ausfallende Natriumcarbonat besitzt eine geringere Dichte als die Natronlauge und schwimmt auf (Bild rechts). Neben Natriumcarbonat entsteht auch Natriumhydrogencarbonat ($NaHCO_3$), weist eine höhere Dichte als die Lauge auf und tritt als Bodensatz auf. Durch die Dichteunterschiede lassen sich beide Salze mit geringem Aufwand abtrennen. Die Trocknung wie auch die Desorption werden stets als Batch betrieben. Gleichzeitig hierzu kann die schwimmende Phase einfach abgeschöpft werden.

Abbildung 22: Auskristallisierte Feststoffe links) auf der Lösung schwimmend rechts) abgesenkte Phase

3.2.6 Korrosion

Natriumhydroxid ist für seine korrosive Wirkung bekannt. Innerhalb des laufenden Projekts wurden keine Korrosionsschwierigkeiten festgestellt, weder am Wärmeübertrager (Alfa Laval, Alloy 316) noch an den Komponenten der Trocknungsanlage (Verrohrung, Trockner) wurden Korrosionsspuren ausgemacht. Frühere Untersuchungen zur sorptiven Trocknung scheiterten nicht zuletzt an der Unterbindung des Lösungsaustrages. Zur Verhinderung dessen wird im aktuellen Projekt neben der «klassischen» Hürde eines Demisters eine zusätzliche Schüttung Pall-Ringe unterhalb des Absorbers eingesetzt. Dadurch kann die, aus dem Absorber, abfliessende Salzlösung nicht direkt in die darunter liegende Vorlage gelangen, sondern prallt vorerst auf die Pall-Ringe und fliesst dann erst in die Lösung. Weil hierbei die Aerosolbildung stark reduziert/verhindert wird, kann der Austrag feinster Lösungstropfen, in Verbindung mit der niedrigen Leerrohrgeschwindigkeit von etwa 0.5-1 m/s, nahezu ausgeschlossen werden.

3.3 Versuchsbetrieb mit saisonalen Trocknungssubstanzen, Optimierung des Trocknungsprozesses (AP3)

3.3.1 Umbau der Trocknungskammer

Um die Reproduzierbarkeit der Versuche zu verbessern (Kapitel 3.2.3) wurde ein Rührwerkstrockner installiert.

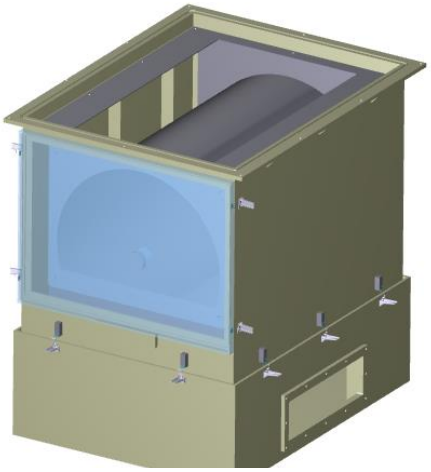

Abbildung 23: Trockenkammer mit Rührwerk

Technische Daten zum Rührwerkstrockner:

- Elektrischer Antrieb: P= 0.12 kW, n=1380 /min,
- Drehzahl Rührwerk: gesteuert durch Frequenzumrichter, 0.5 bis 6 U/min
- Getriebe: mit Übersetzung i=1:100
- Rührwerk: Welle aus S235 mit 3 frei drehbaren, selbstausrichtenden Rührarmen
- Füllvolumen Trockenkammer: 0.39 m^3

Das Rührwerk innerhalb der Trockenkammer besteht aus 3 frei drehbaren Rührarmen, welche in einem Winkel von jeweils 120 ° axial in regelmässigen Abständen auf der Rührwerkswelle angeordnet sind. Die Rührwerksarme sind drehbar gelagert und an 3 Stellen gebogen, damit auch bei reversierendem Rührwerksbetrieb eine gleichmässige Schütthöhe innerhalb der Trockenkammer resultiert und möglichst geringe Scherkräfte im Trockengut auftreten.

Abbildung 24: Rührwerk und Trocknungsgut nach Trocknungsende

Die verbesserte Reproduzierbarkeit der Versuche mit dem Rührwerkstrockner gegenüber dem manuellen Mischen ist anhand von mehreren Trocknungs-versuchen gezeigt worden. Die Schwankung des Restfeuchtegehaltes in Proben aus der Trocknungskammer hat sich durch das Rührwerk von +/-1.6 % auf +/-0.5 % reduziert.

3.3.2 Vergleichstrocknung Holderhof und Sorptive Trocknung

Um die Qualität der getrockneten Kräuter mit konventionell Getrockneten vergleichen zu können, wurden zwei Vergleichstrocknungen durchgeführt. Dazu wurden in der Holderhof-Anlage und der Versuchsanlage der ZHAW (Kapitel 3.1) zeitgleich mit dem gleichen Trocknungsgut Trocknungen durchgeführt.
Geplant war es, drei Trocknungsgüter gleichzeitig bei in beiden Trocknungsanlagen zu trocknen und deren Qualität analysieren zu lassen: Apfelminze, Pfefferminze und Brennnessel. Wegen ihres sehr intensiven Aromas war die Apfelminzetrocknung der Probelauf, um sicherzustellen, dass das Aroma nicht von der Lösung absorbiert wurden und die nächsten Versuche bzw. die Qualität der nächsten Trocknungsgüter beeinträchtigte. Aufgrund von Aerosolbildung im Absorptionswäscher konnte die zweite Vergleichstrocknung, Pfefferminze, nicht im Labor analysiert werden.

Die Messdaten der detaillierter analysierten, dritten Vergleichstrocknungen (Brennnesseln) werden für den Vergleich herangezogen, da diese Trocknungen mit vergleichbarsten Parametern durchgeführt wurden

Begleitungspartner Holderhof Produkte AG
Die Holderhof Produkte AG produziert eine grosse Vielfalt an Bio-Getränken. An ihrem Standort in Ufhofen, 9203 Niederwil werden Kräuter mit zwei Trocknungsanlagen getrocknet. Diese Anlagen nutzen einen geschlossenen Luftkreislauf mit einem Luftentfeuchter des Typs Agrifrigor HT 100 zur Trocknung. Zwischen der hier und der in Kapitel 3.6.1 beschriebenen Vergleichstrocknung wurde die Trocknungsanlage umgestaltet und erweitert. Die neugestalteten Anlagen arbeiten nicht ausschliesslich mit einem geschlossenen Luftkreislauf. Zur Temperaturregelung können neu Frischluftklappen geöffnet werden (siehe Kapitel 3.6.1). Das Teillastverhalten wurde durch neu zwei parallel arbeitende Entfeuchter verbessert. Daraus resultiert eine unterschiedliche Vergleichsbasis bezüglich des Energiebedarfes (Abbildung 30 Kapitel 3.3.2 und Abbildung 69 im Kapitel 3.6.1).
Die Messstellen, die für die Bilanzierung innerhalb des Projektes SONITRO verwendet wurden, sind im einfachen R&I-Schema in Abbildung 25 gezeigt.

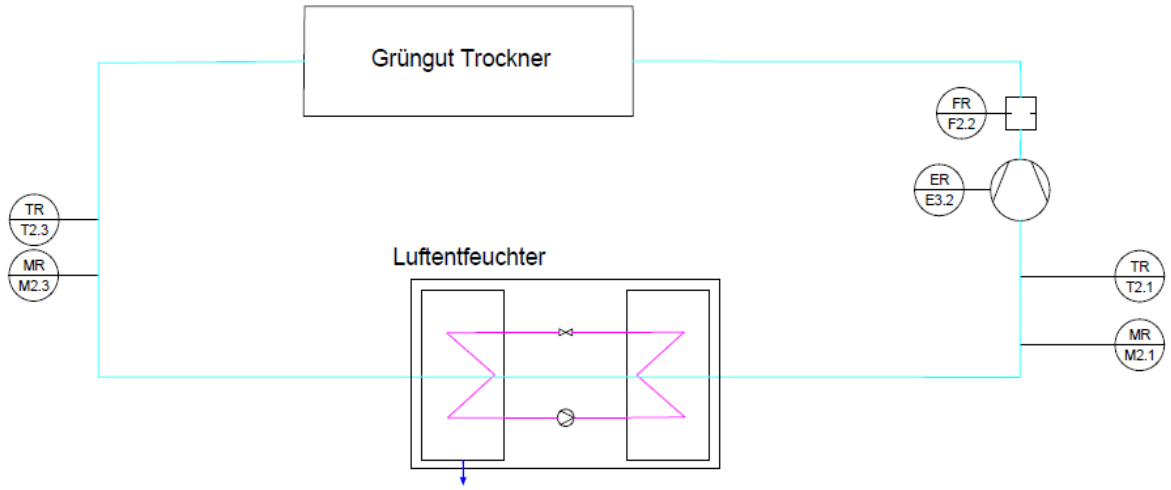

Abbildung 25: R&I Trocknungsanlage Holderhof

Die Eckdaten und Parameter der Trocknungsanlage Holderhof und der Absorptionstrockner sind in der Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Kenngrössen Trocknungsanlagen

Anlagenkenngrössen	**Trocknungsanlage Holderhof**	**Absorptionstrockner**
Fläche Trockner	90 m^2	0.8 m^2
Masse Trocknungsgut	1600 kg	23 kg
Feuchtigkeit Trocknungsgut φ_{Anfang} , φ_{Ende}	75%, 12%	75%, 12%
Volumenstrom Luft	9'000 l/s	110 l/s
Leerrohrgeschwindigkeit Luft in Absorber		0.5 m/s
Volumen Natronlauge		300 l
Volumenstrom Natronlauge		0.6 l/s
Berieselungsdichte in Absorber		11 $m^3/(m^2*h)$
Konzentration Anfang Natronlauge		45%
Konzentration Ende Natronlauge		43%

Vergleich des Trocknungsverlaufes

Die Versuchsanlage wurde dazu mit 23 kg Brennnesseln beladen, diese wurden zu Stücken von maximal 10 cm zerkleinert, um Aufwicklung des Trocknungsgutes am Rührwerk und eine regelmässige Trocknung zu gewährleisten. Die Anlage heizt sich in der Anfangsphase von 25°C Raumtemperatur auf, bis sich bei 30°C ein Gleichgewicht zwischen Wärmeeintrag durch Ventilator und Pumpe sowie den Wärmeverlusten über die Anlagenhülle einstellt (Abbildung 26). Die Luft transportiert anfänglich bis zu 6 g Wasser pro kg Luft (Abbildung 27).
Nach 36 h konnten 5.9 kg Brennnesseln mit einer Restfeuchte von 10.5% entnommen werden.

Die konventionelle Anlage wurde mit 1‘600 kg Brennnesseln beladen, heizte sich von 18°C Umgebungstemperatur bis über 40°C auf (Abbildung 26). Da die Trocknungsanlage in einem unbeheizten, teilweise offenen Gebäude steht, stellt sich kein Gleichgewicht ein. Tagsüber heizt sich die Anlage auf, nachts kühlt sie leicht ab. Die Luft transportiert anfänglich bis zu 2 g Wasser pro kg Luft (Abbildung 27).
Nach 70 h konnten 450 kg Brennnesseln mit einer Restfeuchte von 12.6% entnommen werden.

Die Holderhof-Trocknung weist starke Temperaturschwankungen durch das fehlende Temperaturmanagement und Aussenaufstellung der Anlage auf. Die Absorptionstrocknungsanlage steht in einem Raum mit geringen Temperaturschwankungen, zudem wirkt das Thermochemische Fluid als Thermischer Speicher, der Schwankungen abfedert.

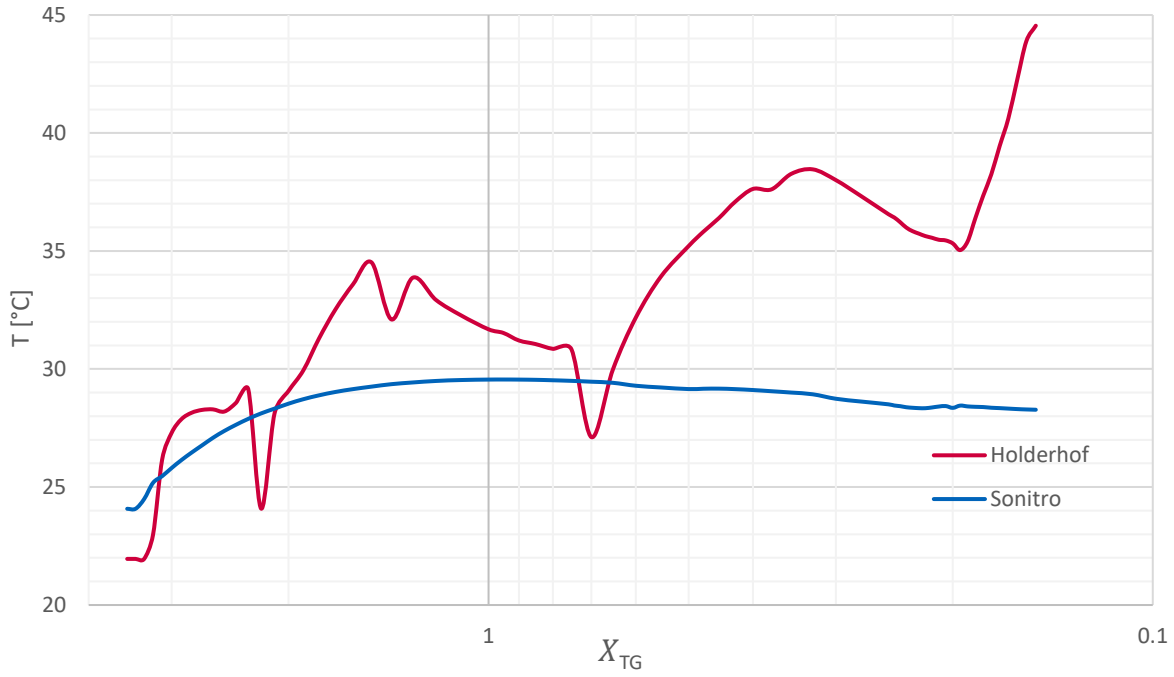

Abbildung 26: Temperaturverlauf Vergleichstrocknung mit Brennnessel bis Erreichung 12.6% Restfeuchte in beiden Anlagen

Die spezifische Trocknungsrate m_{TS}^{W} ergibt sich aus der Veränderung der Wasserbeladung der Trocknungsluft[2] über die Trocknungskammer, dem Massenstrom Trocknungsluft und der Trockensubstanz des Trocknungsgutes.

$$\dot{m}_{tL} = \frac{\dot{V}_{fL} \cdot p}{R \cdot T \cdot \left(\frac{1}{M_L} + \frac{X_L}{M_W}\right)} \quad (13)$$

$$\dot{m}_{TS}^{W} = \frac{\Delta X_L \cdot \dot{m}_{tL}}{m_{TS}} \quad (14)$$

[2] Nach Gleichung (9)

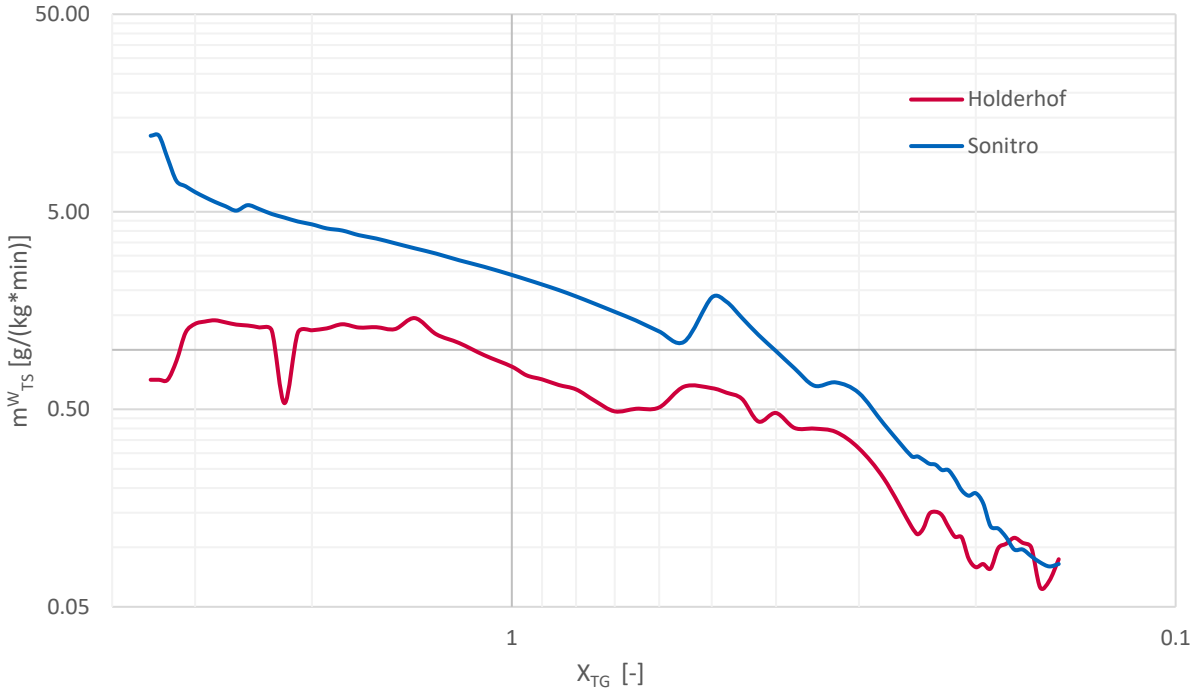

Abbildung 27: Trocknungsrate Vergleichstrocknung mit Brennnessel bis Erreichung 12.6% Restfeuchte in beiden Anlagen

Die Absorptionstrocknung weist bei gleichem Trocknungsluftvolumenstrom eine deutlich höhere Trocknungsrate auf. Lediglich kurz vor Erreichen des gewünschten Trocknungsgrades trocknet die Holderhofanlage mit gleicher Trocknungsrate, dies ist auf die Temperaturerhöhung zurückzuführen.

Qualitätsvergleich

Die getrockneten Brennnesseln und Apfelminze wurden am Institut für Lebensmittel- und Getränkeinnovation der ZHAW in Wädenswil untersucht. Dazu wurden Proben von den frischen Kräutern vor der Trocknung und von den getrockneten Kräutern beider Anlagen entnommen. Die Randbedingungen zur Probenahme und Trocknung sind in Tabelle 5 vermerkt.

Tabelle 5: Randbedingungen der Vergleichstrocknungen

Trocknungsgut	Brennnessel		Apfelminze	
	Holderhof	SONITRO	Holderhof	SONITRO
Erntedatum	22.09.2021	06.10.2021 [1]	20.08.2021	
Dauer bis Trocknungsstart	0 h	3 h	0 h	5 h
Trocknungsdauer	72 h	36 h	100 h	25 h
Trocknungstemperatur	25-45 °C	25-30 °C [2]	25-45 °C	35-40 °C [3]

[1] Eine Störung am Absorber hat Trocknen am gleichen Tag verunmöglicht

[2] Mit kalter Lösung gestartet

[3] Mit vorgeheizter Lösung gestartet

Die Ergebnisse der Untersuchungen am ILGI sind in Tabelle 6 zusammengefasst.
Es wurden die Parameter pH-Wert, Farbe, Gesamtsäure (nur Apfelminze), Trockenmasse und Gesamtpolyphenolgehalt analysiert. Ebenfalls wurden die Proben sensorisch bewertet.
Bei den Apfelminze Proben, konnten kaum pH-Unterschiede zwischen den frischen und getrockneten Proben festgestellt werden. Bei der Brennnessel wurde der pH-Wert in Folge der Trocknung erniedrigt, und interessanterweise konnte bei der SONITRO Probe ein tieferer pH-Wert festgestellt werden. Darüber hinaus hat die pH-Messung bestätigt, dass kein Lösungseintrag in die Trocknungsgüter besteht. Die stark basische Lösung hätte den pH-Wert erhöht.
Ebenfalls konnten auch leichte Unterschiede bei der Trockenmasse der unterschiedlich getrockneten Kräuter festgestellt werden. Dabei wiesen die SONITRO-getrockneten Kräuter jeweils etwas höhere Trockenmasse auf. Bei der Messung des Gesamtpolyphenolgehaltes konnten in den Holderhof getrockneten Kräutern höhere Werte erzielt werden. Diese Tatsache kann unteranderem darauf zurückgeführt werden, dass bei der Erfassung des Gesamtpolyphenolgehaltes Reduktone miterfasst werden, die bei konventioneller Trocknung, die bei höheren Temperaturen stattfindet in höheren Ausmass gebildet werden, als bei der SONITRO-Trocknung.

Der Geruchstest attestiert den Holderhof-Kräutern eine Heu-/Strohnote, die in den absorptionsgetrockneten Kräutern nicht zu finden ist. Es findet sich in den Brennnesseln keine Pfefferminznote, obwohl mit der verwendeten Lösung zuvor eine Pfefferminztrocknung und Desorption durchgeführt wurde. Ebenfalls wurde die Farbe der SONITRO getrockneten Kräuter, insgesamt grüner als die konventionell getrockneten Kräuter bewertet.

Tabelle 6: Analyse der Kräuter

Probenbezeichnung	Apfelminze Frischprobe	Apfelminze Sonitro	Apfelminze Holderhof	Brennnessel Frischprobe Sonitro	Brennnessel Sonitro	Brennnessel Frischprobe Holderhof	Brennnessel Holderhof
Kraut							
Erntedatum	20.08.2021	20.08.2021	20.08.2021	06.10.2021	06.10.2021	22.09.2021	22.09.2021
Datum des Trocknungsende	-	21.08.2021	24.08.2021	-		-	
Trocknungsanlage (ort)	-	SoNiTro (IEFE)	Konventionell (Holderhof)	-	SoNiTro (IEFE)	-	Konventionell (Holderhof)
Menge (g)	300	200					
Zustand	frisch	getrocknet	getrocknet	frisch	getrocknet	frisch	getrocknet
Farbe							
Farbe L*	18.36	46.67	48.42	11.13	43.98	14.11	49.98
Farbe a*	2.9	-4.84	-1.82	-0.42	-6.55	-0.16	-2.35
Farbe b*	10.06	23.42	21.3	5.6	22.7	7.23	22.67
pH-Wert	6.29	6.17	6.28	8.97	7.60	9.16	6.93
Gesamtsäure in g/L nach CS	0.16	1.06	0.78	0	0	0	0
Restfeuchte MC (%)	79.77	11.93	12.75	72.41	8.32	76.00	12.66
Trockenmasse (%)	20.23	88.07	87.25	27.59	91.68	24.00	87.34
Gesamtpolyphenolgehalt							
PP [mg ECA/g] bzgl. Produkt	0.09	0.20	0.42	0.03	0.15	0.05	0.26
PP [mg ECA/g] bzgl. Trockenmasse	0.44	0.23	0.48	0.11	0.16	0.21	0.30
PP [mg ECA/100g] bzgl. Produkt	8.9	20.2	41.8	3.1	15.2	4.6	26.1
PP [mg ECA/100g] bzgl. Trockenmasse	44.0	22.9	47.9	11.2	16.6	19.2	29.9
Sensorik	**4 er Sensorik durchgeführt von chet, panr, jedr, scll am 20.08.21**			**4 er Sensorik durchgeführt von chet, panr, jedr, scll am 13.10.21**			
Aussehen	grün, frisch	grüner als konventionell	heller grün als Sonitro	grün, frisch	grüner als konventionell	grün, frisch	dunkler grün als Sonitro
Geruch	frische Pfefferminze, fruchtig, gras, grün,	minzig frisch, keine Stroh- bzw. Heunote (!)	pfefferminzartig, Stroh- bzw. Heunote	grasig, grün	frisch, citrisch,weniger Heu, frischerer Charakter, leichte terpenische Note, keine Pfefferminznote	minzig, nach Brennessel, grün, grassig	Heu, Stroh, getrochnetes Gras

Energiebilanz

Die Absorptionstrocknung wird durch eine Regeneration mit Wärmepumpe erweitert (Abbildung 28), um die benötigte Energie zur Regeneration (zwecks Vergleichbarkeit mit Holderhof) als elektrische Energie aufbringen zu können. Die Regeneration reduziert die Wasserbeladung des Thermochemischen Fluids durch Aussieden des Wassers bei 155 °C, dies entspricht der Siedetemperatur von 50%-Natronlauge. Dazu wird mittels einer Wärmepumpe dem Thermochemischen Fluid die Verdampfungsenthalpie zugeführt, die dem entstandenen Wasserdampf beim Kondensieren auf der Niederdruckseite der Wärmepumpe entzogen wird.

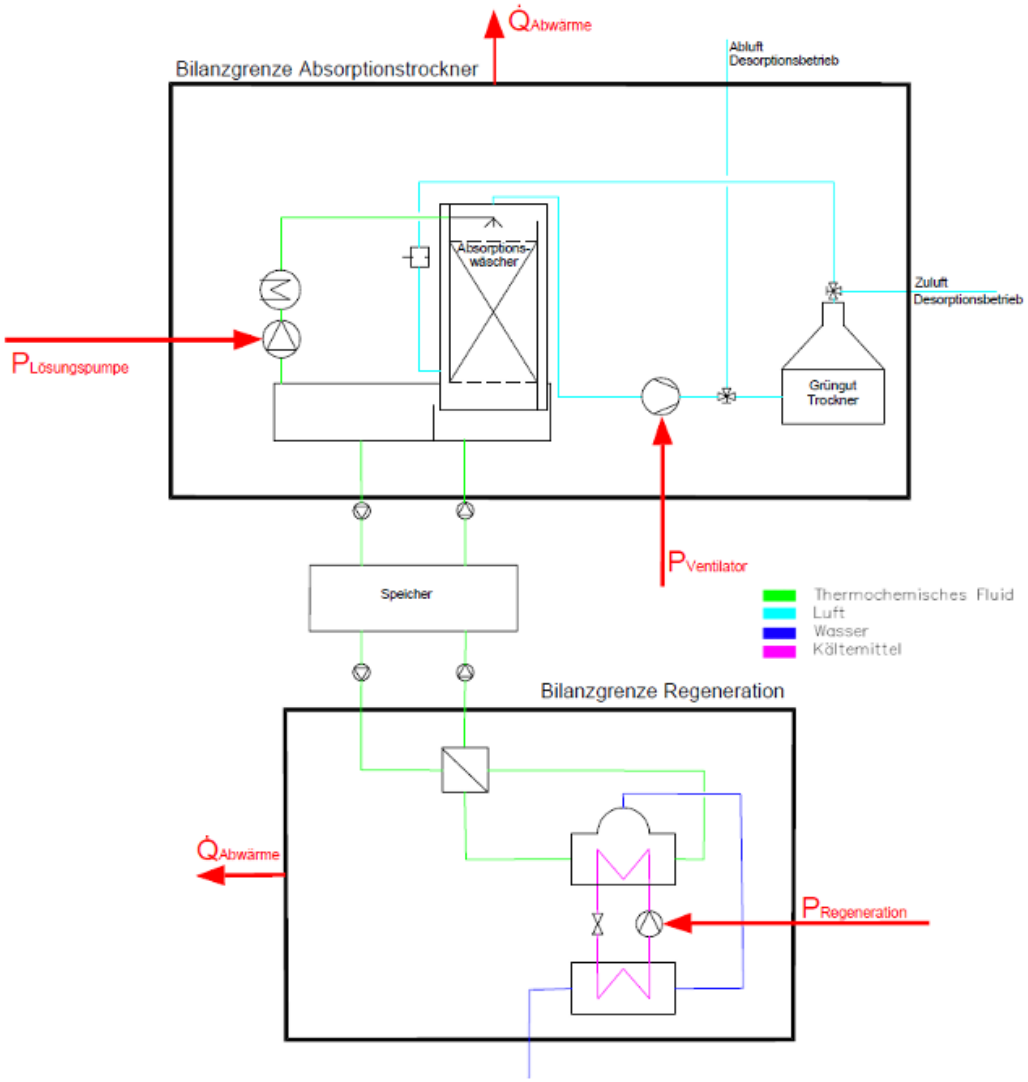

Abbildung 28: Bilanzgrenzen Absorptionstrockner mit Regeneration (Variante Wärmepumpe)

Die benötigte elektrisch Energie für die Regeneration ergibt sich also aus der benötigten Verdampfungsenthalpie des auszutreibenden Wassers geteilt durch den COP der Wärmepumpe.

$$W_{Regeneration} = \frac{h^{LV}_{W,0°C} \cdot m_W}{COP} \quad (15)$$

$$\mathrm{COP} = \left(1 - \frac{\mathrm{T_{kalt}}}{\mathrm{T_{heiss}}}\right)^{-1} \cdot \eta_{\mathrm{WP}} \tag{16}$$

Dabei wird für den Gütegrad η_{WP} ein Wert von 40% [26] angenommen, dies entspricht dem Gütegrad einer handelsüblichen Luft/Wasser-Wärmepumpe. Der ausgetriebene Wasserdampf wird als Kondensationstemperatur unter Normaldruck angenommen.
Die Energiebilanz der Sorptionstrocknung teilt sich nun, wie in Abbildung 28 dargestellt, auf zwei Teilsysteme, die Trocknungsanlage und die Regeneration, auf. Die zum Natronlauge-Transport von und zu Speicher benötigte Arbeit wird nicht berücksichtigt, da diese verhältnismässig klein ist und daher eine untergeordnete Rolle spielt. Für die Trocknungsanlage gilt:

$$\mathrm{W_{Ventilator}} + \mathrm{W_{Pumpe}} = \mathrm{Q_{Abwärme}} \tag{17}$$

Zur Bilanzierung wird die Trocknungsanlage Holderhof in das Gesamtsystem Anlage und das Untersystem Luftentfeuchter aufgeteilt (Abbildung 29). Dies weil es nicht möglich war die aufgenommene Leistung des Luftentfeuchters direkt zu erfassen.
Über die Enthalpieströme in der Trocknungsluft kann diese mit Gleichung (13) ermittelt werden[3], wobei angenommen wurde, dass der Luftentfeuchter adiabat arbeitet.

$$\mathrm{P_{Entfeuchter}} = (\mathrm{h_2} - \mathrm{h_1}) \cdot \dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{tL}} \tag{18}$$

$$h_L = cp_{tL} \cdot \vartheta + X_L \cdot \left(h_{W,0°C}^{LV} + cp_D \cdot \vartheta\right) \tag{19}$$

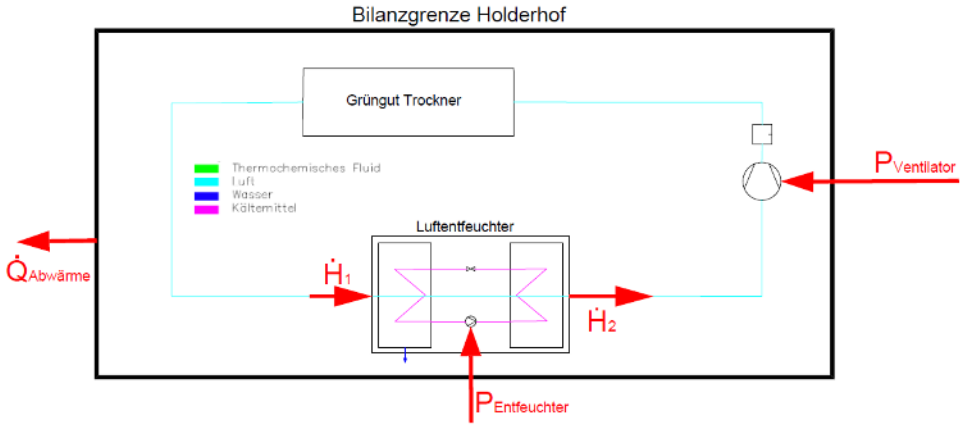

Abbildung 29: Bilanzgrenzen Holderhof Trocknungsanlage

Die Gesamtbilanz der Trocknungsanlage Holderhof gibt sich aus den Integralen der Leistungsaufnahme über die gesamte Trocknungsdauer.

[3] $\dot{m}_{tL}$ nach Gleichung (13), Seite 43

$$W_{Ventilator} + W_{Entfeuchter} = Q_{Abwärme} \quad (20)$$

Für die Brennnessel-Vergleichstrocknung aus Abbildung 26 und Abbildung 27 ergibt sich nach Gleichung WVentilator+$W_{Entfeuchter} = Q_{Abwärme}$ (20) das Sankey-Diagramm in Abbildung 30.

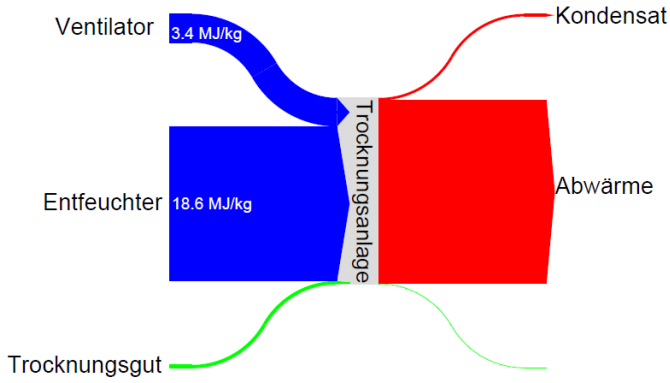

Abbildung 30: Sankey-Diagramm Trocknung Holderhof

Analog dazu ergibt sich für die Absorptionstrocknungsanlage inkl. Regeneration mit gleichem Trocknungsgut Abbildung 31.

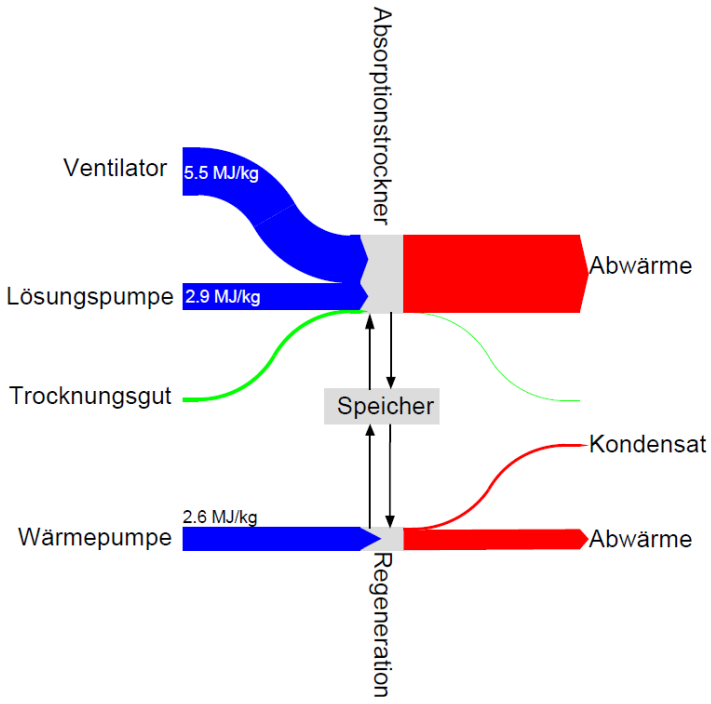

Abbildung 31: Sankey-Diagramm Absorptionstrocknung

Die beiden Sankey-Diagramme zeigen, dass der aktuelle Versuchsaufbau der Absorptionstrocknung knapp die Hälfte an elektrische Energie für eine Trocknung benötigt, wie die Trocknungsanlage des

Holderhofs, obwohl die Anlagenkomponenten nicht optimal ausgelegt sind. Dies ist auf den deutlich geringeren Energieaufwand zur Entfeuchtung der Trocknungsluft zurückzuführen.

Einsparungspotentiale

Der Vergleich der Energiebilanz zeigt, dass die Ventilatorleistung im Verhältnis zur Trockensubstanz an der Absorptionstrocknung deutlich höher ist, obwohl die Trocknung nur halb so lange dauerte wie am Holderhof.
Die erforderliche Leistung wird durch den gemessenen Druckverlust über die Anlagenkomponente und den Volumenstrom Trocknungsluft ermittelt. Die Verluste ergeben sich aus der gemessenen Leistungsaufnahme minus der erforderlichen Leistung über alle Anlagenkomponenten.

$$P_{rev} = \dot{V} \cdot \Delta p \tag{21}$$

$$P_{diss} = P - P_{rev} \tag{22}$$

Durch Druckverlustmessungen bei unterschiedlichen Volumenströmen wurden die Kennlinien der Luftentfeuchtung, Kanäle und Trockenkammer beider Anlagen ermittelt. Somit kann nach Gleichung (21) die erforderliche reversible Leistung und nach Gleichung (22) die Verlustleistung ermittelt werden. Die Druckverluste wurden in den leeren Anlagen über die komplette Anlage und über Absorber bzw. Entfeuchter mittels eine Schrägrohrmanometers des Typs Dwyer Mark II gemessen.

Abbildung 32 zeigt die Bestandteile der benötigten Ventilatorleistungen und die benötigte Pumpenleistung. Beide Ventilatoren erfordern eine ähnliche spezifische Druckänderungsarbeit, der Wirkungsgrad macht den Unterschied im spezifischen Leistungsbedarf zwischen den beiden Anlagen.

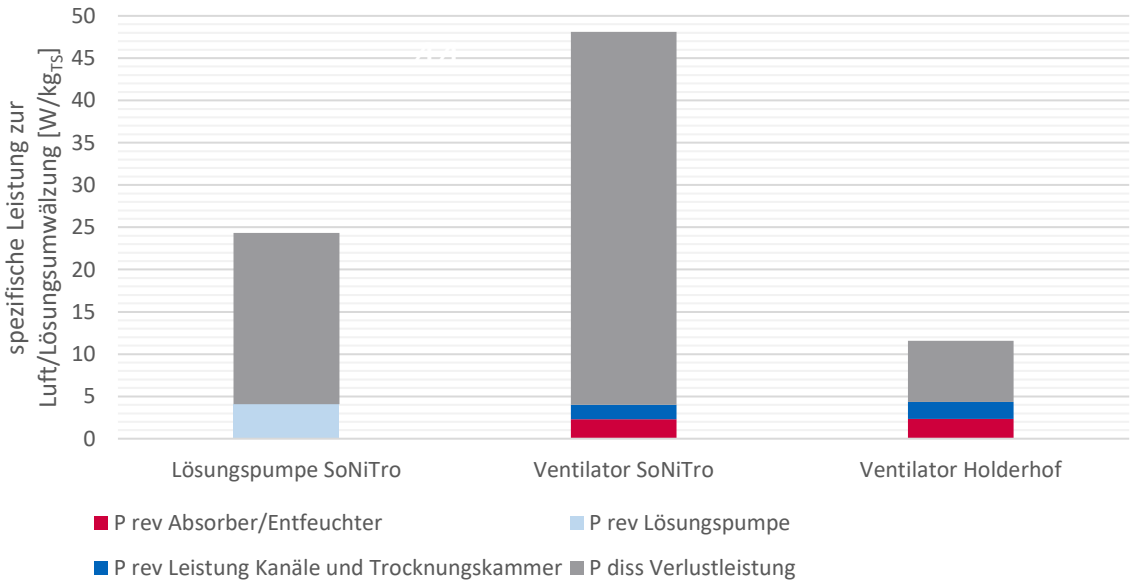

Abbildung 32: Aufteilung Pumpen-/Ventilatorleistung bezogen auf die Masse an Trockensubstanz

Der Ventilator des SONITRO-Absorptionstrockners verfügt im Betrieb einen Wirkungsgrad von 8.3% aus, dies weil der Ventilator aus dem Bestand des IEFE entstammt und nicht auf die Anlage abgestimmt

ist. Eine Erhöhung des Wirkungsgrades auf dasselbe Niveau wie der Holderhof-Ventilator entspräche einer Reduktion von 77% auf 1.2 MJ/kg$_{TS}$.
Ebenso kann der Wirkungsgrad der Lösungspumpe durch eine geeignetere Komponente von aktuell 17% auf einen radialpumpentypischen Wirkungsgrad von 60% [27] angehoben werden. Dies entspräche einer Reduktion um 72% auf 0.8 MJ/kg$_{TS}$ (Abbildung 33).

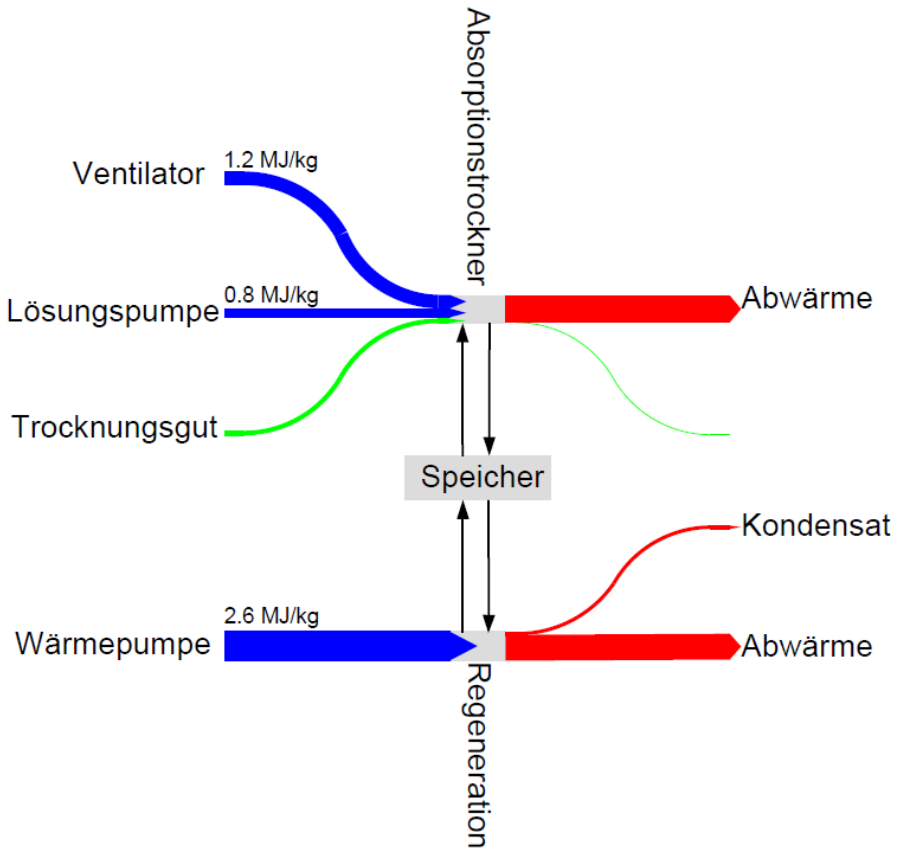

Abbildung 33: Sankey-Diagramm Absorptionstrocknung mit optimierten Anlagenkomponenten

Diese Optimierungen reduzieren den Energiebedarf auf 4.6 MJ/kg$_{TS}$, gegenüber der Trocknungsanlage des Holderhofes ist dies eine Einsparung von 79%.

3.3.3 Optimierung des Speicherbedarfs für die Natronlauge

Die benötigte NaOH-Menge ist direkt abhängig von der Beladungsdifferenz des Trocknungsgut ΔX_{TG} und der angestrebten Beladungsdifferenz des thermochemischen-Fluids ΔX_{TCF}.

$$m_{TCF} = \frac{\Delta X_{TG}}{\Delta X_{TCF}} \tag{23}$$

$$X_{TCF} = \frac{1}{\xi_{TCF}^{NaOH}} - 1 = \frac{m_W}{m_{NaOH}} \tag{24}$$

Ohne Lösungswechsel bei einer Verdünnung von 50% auf 44% werden 25.6 kg Natronlauge benötigt. Die Startkonzentration ergibt sich aus der Löslichkeit von NaOH in Wasser bei 12 °C (übliche Kellertemperatur), die Endkonzentration von 44% ist notwendig, um die angestrebte Endfeuchte des Trocknungsgutes zu erreichen. Dies ist ein Erfahrungswert aus den Trocknungsversuchen.

Um die notwendige NaOH-Menge pro Trocknung zu reduzieren, können verschiedene Lösungskonzentrationen verwendet werden.

Durch die Erweiterung der Absorptionstrocknungsanlage mit Pufferspeicher für verschiedene Lösungskonzentrationen ermöglicht man die mehrfache Verwendung der Natronlauge. Hierzu wird am Anfang des Trocknungsprozesses eine bereits mehrfach verwendete, stark verdünnte Natronlauge verwendet (Abbildung 35). Wie in Abbildung 34 zu sehen ist die Triebkraft reduziert und wird durch den Lösungswechsel in Stufen erhöht, sodass diese während des gesamten Trocknungsprozesses ungefähr gleichbleibt. Die Konzentration und Triebkraft ist dadurch am Ende höher als bei einem Prozess ohne Lösungswechsel. Bezogen auf die Masse an Trockensubstanz wird immer die gleiche Menge NaOH verwendet, dadurch wird eine Beladungsdifferenz von 2kg_W/kg_{NaOH} erreicht. Dies entspricht einer Lösungsverdünnung von 50% auf 25%. Die benötigte NaOH-Lauge reduziert sich auf 3.2 kg.

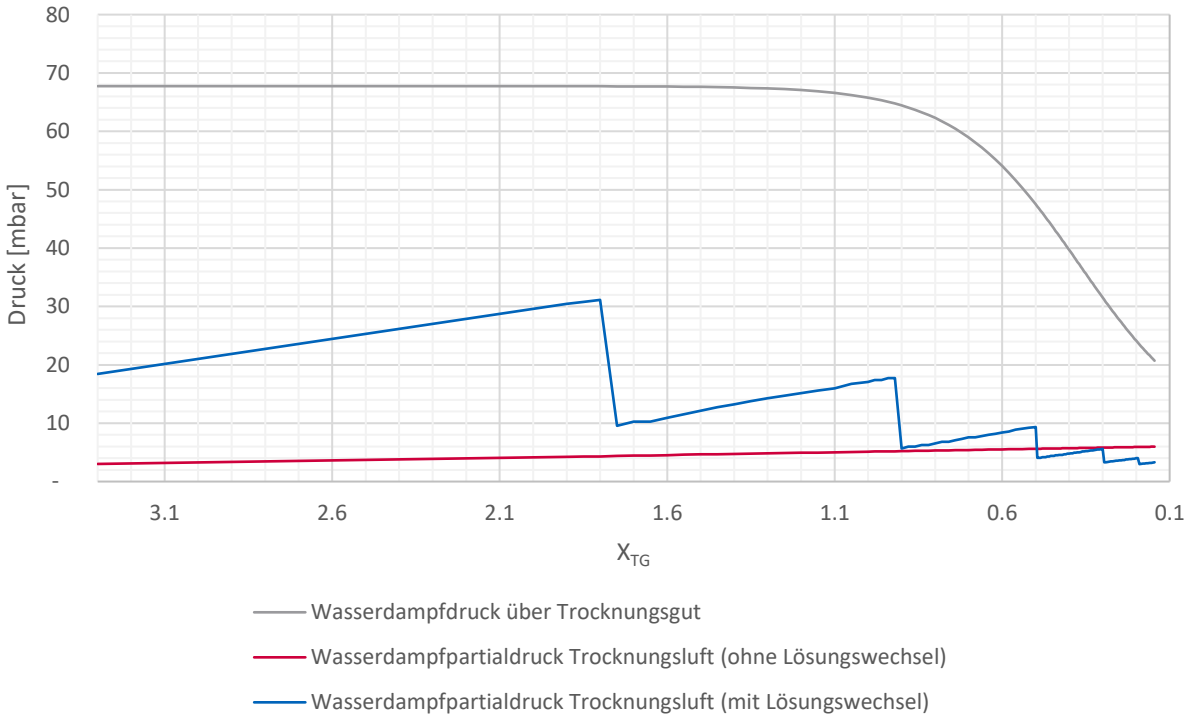

Abbildung 34: Wasserdampfpartialdruck Trocknung ohne/mit Lösungswechsel

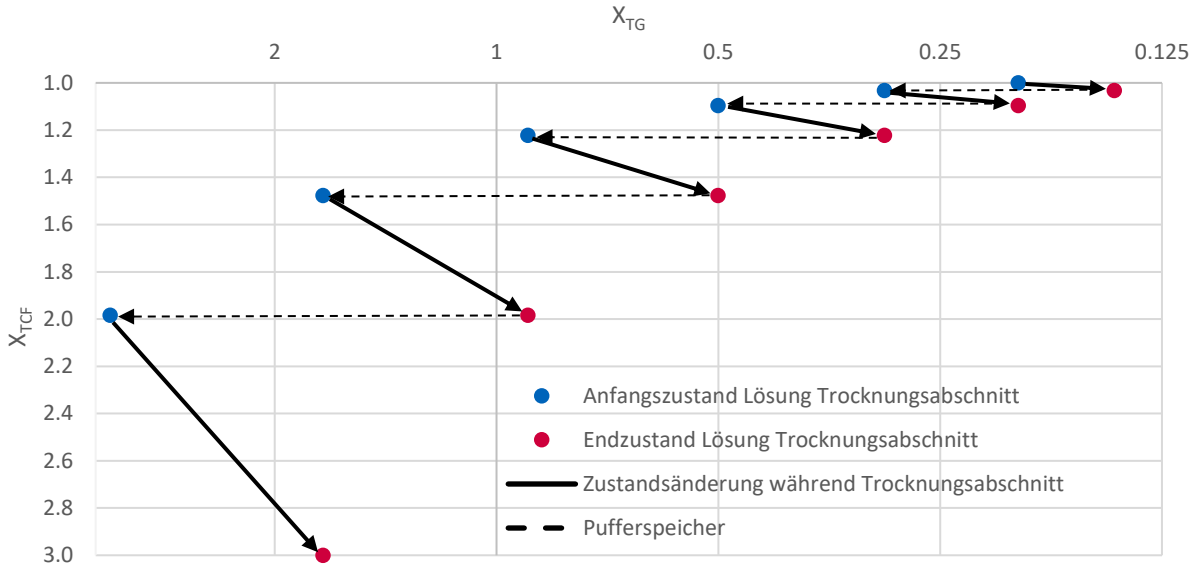

Abbildung 35: Verwendung Natronlauge im Trocknungsprozess mit Lösungswechsel

Die Tabelle 7 zeigt als Beispiel die Konzentration Natronlauge während den einzelnen Trocknungsabschnitten für einen Trocknungsprozess mit einer 6-stufige Lösungswechsel. Trotz der anfänglich geringeren Triebkraft dauert die Trocknung mit Lösungswechsel nicht länger, da die Dauer des Trocknungsprozesses definiert wird durch die Trocknungsrate bei $X_{TG} < 0.5$ kg/kg.

Tabelle 7: Konzentration Natronlauge und spezifische Wasseraufnahme pro kg Trockensubstanz während den einzelnen Trocknungsabschnitten

Stufe	Konzentration Lösung		Wasseraufnahme [kg]	Dauer [h]
	Anfang	Ende		
S6	50%	49%	0.05	3.1
S5	49%	48%	0.10	4.2
S4	48%	45%	0.20	4.2
S3	45%	40%	0.41	3.5
S2	40%	34%	0.81	3.7
S1	34%	25%	1.63	5.8

Abbildung 36 zeigt den spezifischen Volumenbedarf der Zwischenspeicher für ein Trocknungsprozess mit 6-stufigem Lösungswechsel.

Der Trocknungsprozess mit 6-stufigem Lösungswechseln wurde nur als Beispiel verwendet. Ein Kompromiss zwischen einem Prozess ohne oder mit (beliebiger Anzahl an) Lösungswechsel muss von Fall zu Fall geprüft werden.

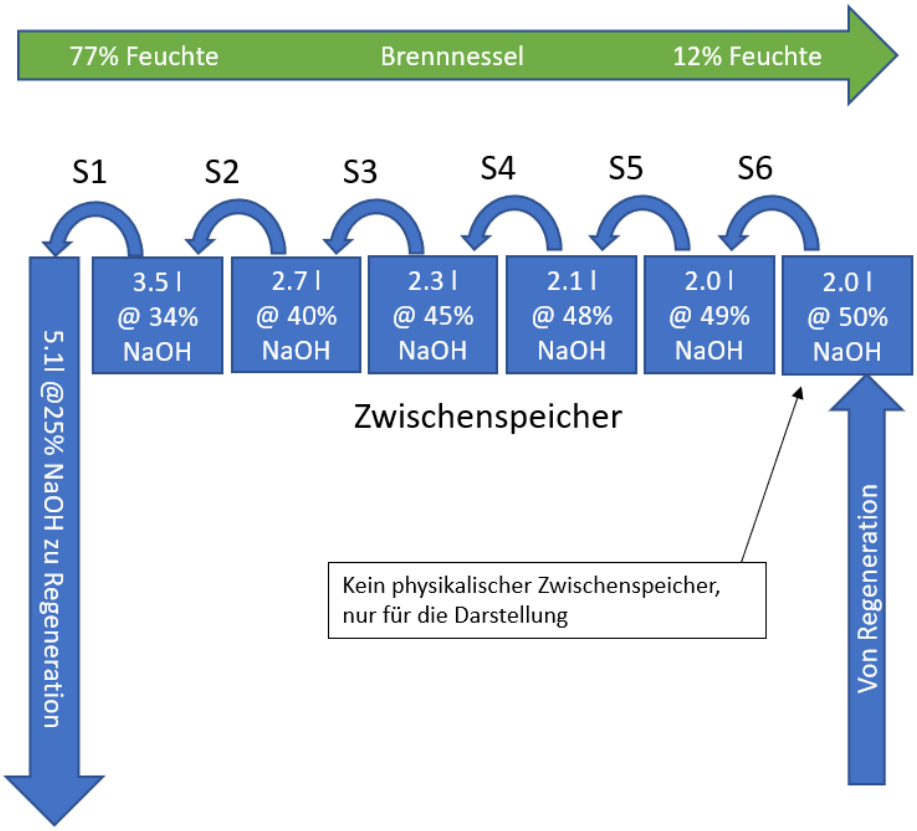

Abbildung 36: spezifische Volumenbedarf pro kg Trockensubstanz während den einzelnen Trocknungsabschnitten

3.4 Simulation der Trocknungsanlage in Kombination mit einer solarthermischen Regeneration des Arbeitsmittels und zwischengeschaltetem Arbeitsmittelspeicher (AP4)

3.4.1 Definition von Eingabegrössen, Randbedingungen und Zielvorgaben der Simulation

Eine Trocknungsanlage mit Solarthermischer Regeneration wurde mit verschiedenen Eingabegrössen simuliert. Diese sind an die Gegebenheiten des Holderhofs angelehnt (Tabelle 8). Ausrichtung (Süden) und Neigung der Solarkollektoren orientiert sich am Dach des Trocknungsgebäudes. Für die Simulation werden Daten (Trocknungscharakteristik) des Trocknungsgutes benötigt, die für Brennnesseln aus eigenen Arbeiten [28, 29] vorliegen. Die Zielfeuchte von 12% ist durch die Lagerbarkeit (Information Matthias Barth, Karl Barth AG) gegeben, die Startfeuchte variiert je nach Erntebedingungen, bei trockenem Wetter am frühen Nachmittag geerntet beträgt die Feuchte ca. 84%.

Tabelle 8: Eingabegrössen

Standort		Flawil
Kollektor	Typ	- Flachkollektor Soltop COBRA AK 2.8V - Vakuum-Röhrenkollektor Soltop T6-DF
	Ausrichtung	Süden
	Neigung	45°
Trocknungskampagne	Trocknungsdaten + Menge	Siehe Abbildung 37
Trocknungsgut	Pflanze	Brennnessel
	Startfeuchte	$\xi_{TG}^{W} = 84\%$ (5.1 kg Wasser / kg Trockensubstanz)
	Zielfeuchte	$\xi_{TG}^{W} = 12\%$ (0.12 kg Wasser / kg Trockensubstanz)
Arbeitsmittel	TCF	NaOH-Lösung
	Vorlaufkonzentration ξ_{TCF}^{VL}	30%-50%
	Rücklaufkonzentration ξ_{TCF}^{RL}	25%-40%

Die für die Simulation verwendeten Wetterdaten beruhen auf normalisierten Daten von Meteonorm für das Jahr 2020 am Standort Flawil. Die für die Kostenrechnung verwendeten spezifischen Investitionskosten für die Flachkollektoranlage beruht auf Angaben vom Energie-Schweiz (BFE) Solarrechner (Tachion-Simulation-Framework, Version 2022) [30] und die der Röhrenkollektoranlage auf Herstellerangaben (Soltop AG). Die spezifischen Kosten der Trocknungsanlage und die Bezugskosten für die Elektroenergie beziehen sich auf Angaben des Projektpartners Holderhof Produkte AG. Die restlichen Grössen (Annuität sowie Kosten für Speicher und Arbeitsmittel) beruhen auf eigenen Abschätzungen.

Tabelle 9: Randbedingungen

Wetterdaten	Temperatur, Globalstrahlung (diffus, direkt)	Meteonorm normalisiert
Kostenrechnung	Annuitätsfaktor a	0.05 a^{-1}
	Trocknungsanlage $k_{Tr.}$ [1]	500 CHF / m^2
	Flachkollektoren k_K [2]	8500 CHF + 820 CHF / m^2
	Vakuum-Röhrenkollektoren k_K [2]	2'000 CHF / m^2
	Speicher $k_{Sp.}$ [3]	100 CHF / m^3
	Natronlauge (50 Ma-% NaOH) k_{TCF}	100 CHF / m^3
	Strom k_{El} [1]	150 CHF / MWh

[1] Holderhof Produkte AG

[2] SOLTOP Schuppisser AG

[3] IBC-Speicher

Als Resultat liefert die Simulation Angaben zur benötigten Anlagengrösse (Kollektorfläche und Speichervolumen), zur Dauer eines Trocknungsprozesses, zum Energieverbrauch sowie zu den zu erwartenden jährlichen Betriebskosten.

Tabelle 10: Zielgrössen

Solarkollektorfläche	A_K
Speichervolumen	$V_{Sp.}$
Dauer eines Trocknungsprozesses	τ_{TP}
Jährlicher Stromverbrauch	W_{El}
Jährliche Betriebskosten	K_a

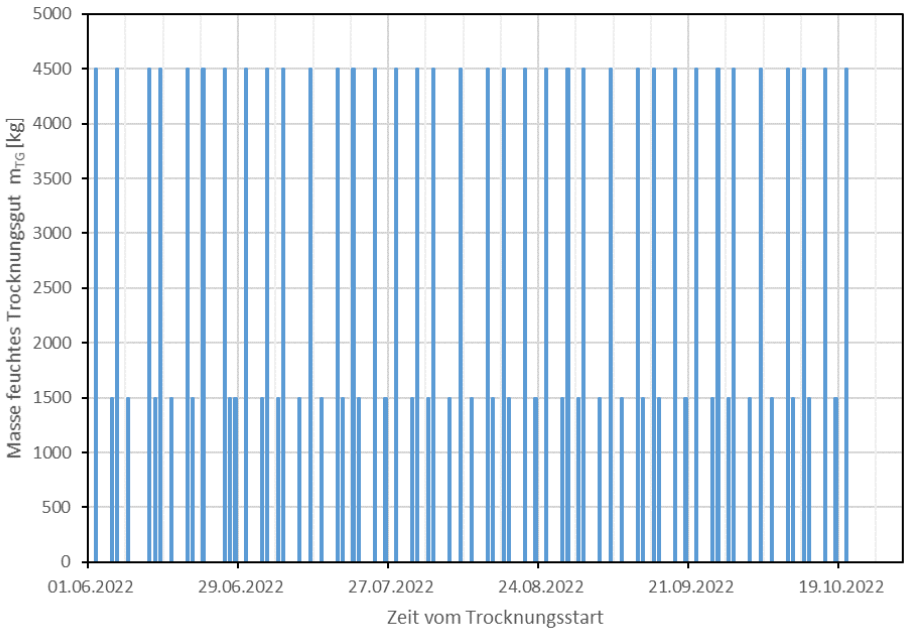

Abbildung 37: Beispielhaftes Trocknungsprogramm Holderhof Produkte AG

Die Abbildung 37 zeigt ein für den Betrieb Holderhof Produkte AG beispielhaftes Trocknungsprogramm (4 Trocknungskammern in 2 verschiedenen Grössen à 100 m^2 und 300 m^2). Ein Trocknungsprozess beginnt immer werktags und dauert 4 Tage. Die durchschnittliche Auslastung der Trocknungskammern beträgt während der Trocknungssaison ca. 50%. Diese durchschnittliche Auslastung ist ein Erfahrungswert, auf den viele Faktoren Einfluss haben: Wetter, Erntezeitpunkt, Be-/Entladedauer der Trocknungskammer, Verfügbarkeit der Erntehelfer. Die genauen Angaben zum Trocknungsprogramm befinden sich in Kapitel 10 Anhang, Tabelle 23.

3.4.2 Aufbau der Simulation

Die Simulation besteht aus 3 Teilsimulationen: Trocknungsprozess, Regeneration und Speichernetzwerk (Abbildung 38).

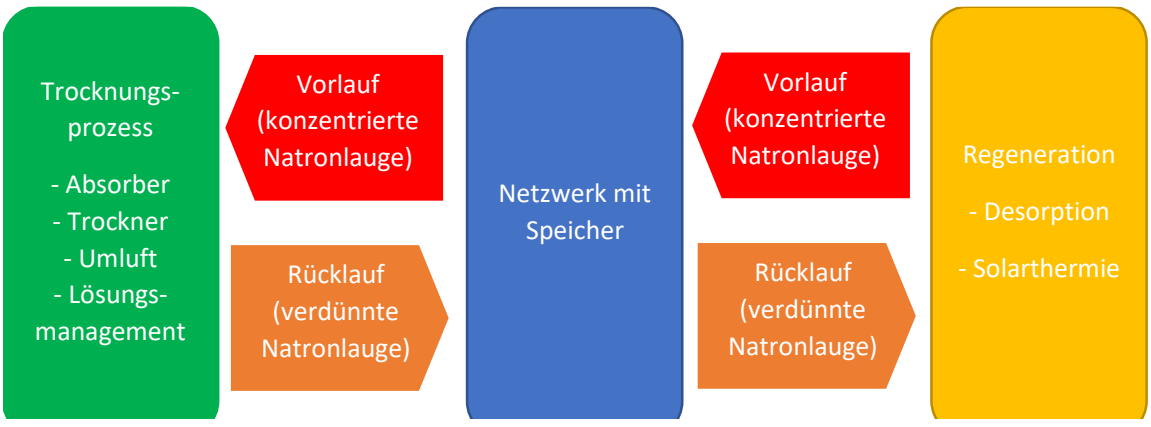

Abbildung 38: Aufbau der Simulation

Im Folgenden werden die Teilsimulationen erläutert.

Trocknungsprozess

Der in der Simulation beschriebene Trocknungsprozess ist in Abbildung 39 ersichtlich. Wie in Kapitel 3.3.3 erläutert, erfolgt die Trocknung mit einem mehrstufigen Batchprozess, in dem die Natronlauge in zunehmender Konzentration dem Trocknungsprozess zugeführt wird. Dadurch wird eine grosse Konzentrationsspreizung zwischen Vor- und Rücklauf der Natronlauge erreicht und das notwendige Speichervolumen reduziert.

Der Wassertransport zwischen Trockengut und Luft in der Trocknungskammer kann durch eine einfache Transportgleichung (Gleichung 25) beschrieben werden.

$$\dot{m}_{TS}^{W} = A \cdot \beta \cdot \Delta p_W = \frac{1}{R_{TG}} \cdot \Delta p_W \quad (25)$$

Die Triebkraft für den Stofftransport (Δp_W) kann anhand des Dampfdruckes vom Wasser im Trocknungsgut ($p_W^{LV}(\vartheta_{TG}, X_{TG})$) und dem Wasserdampfpartialdruck in der Trocknungsluft ($p_W^{LV}(\vartheta_L, \varphi_L)$) beschrieben werden (Gleichung 4, Kapitel 3.2.1).

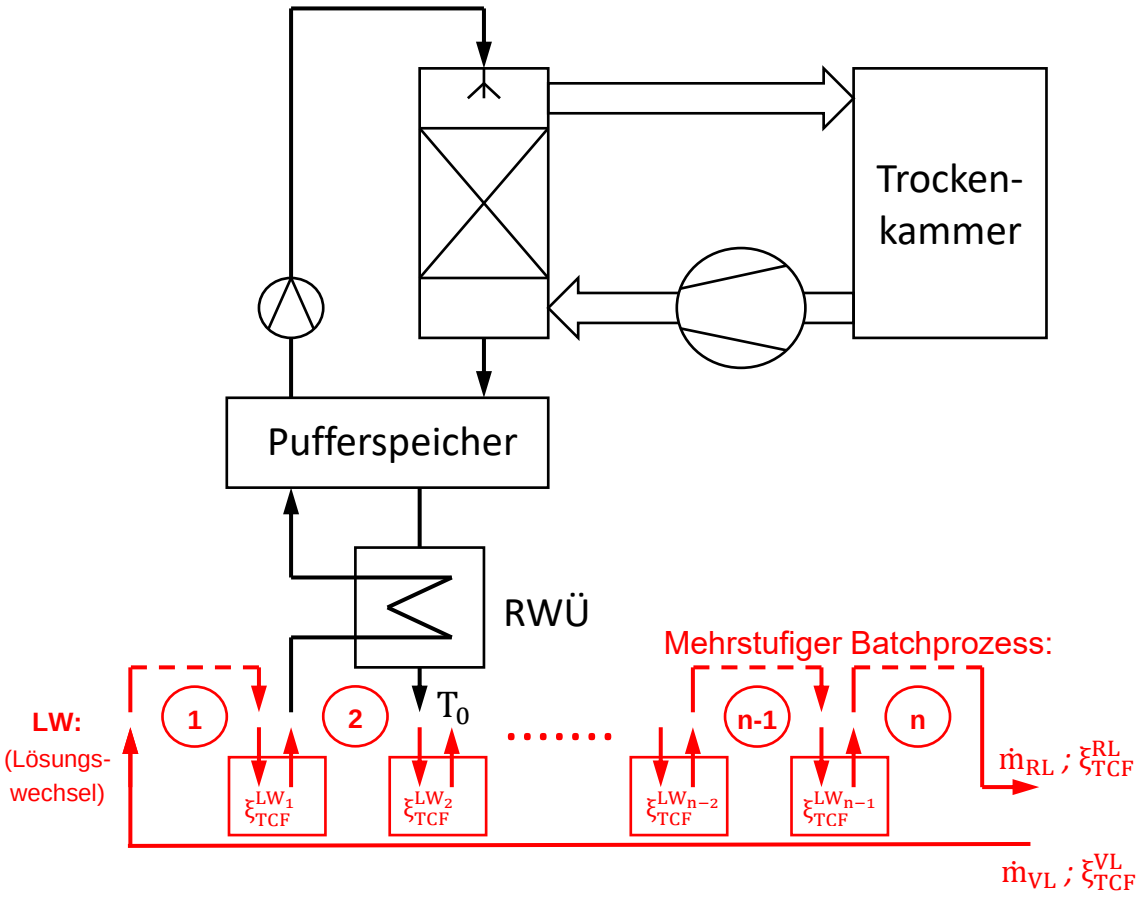

Abbildung 39: Anlagenschema der Sorptionstrocknung mit mehrstufigem Lösungswechsel

Der Stofftransportwiderstand (R_{TG}) wurde anhand verschiedener Trocknungsversuche ermittelt (Abbildung 40) und kann mit Gleichung 26 berechnet werden. Der unterschiedliche Verlauf der aufgeführten Messungen sind auf die Steuerung des Rührwerkes zurückzuführen.

$$R_{TG}(X_{TG}) = 5.42\ m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot {X_{TG}}^{-0.677} \quad (26)$$

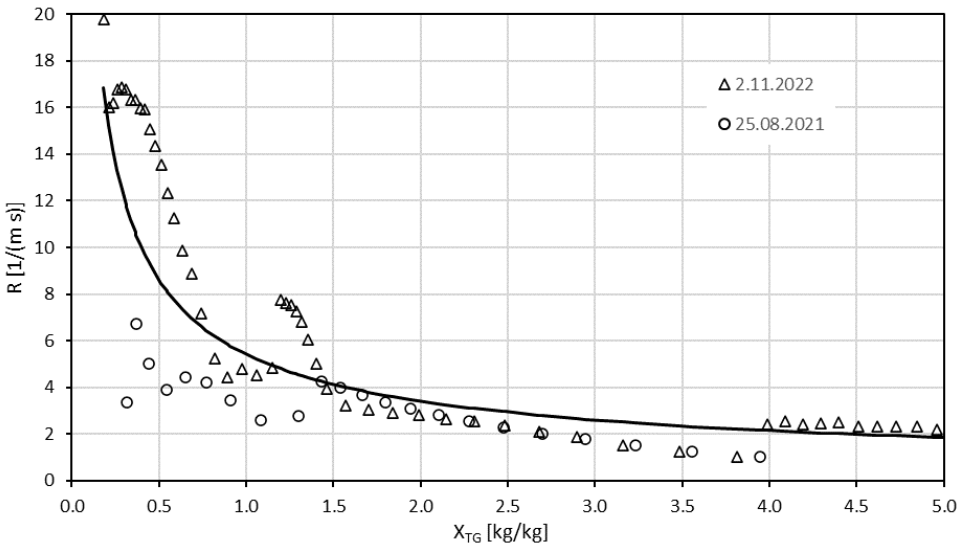

Abbildung 40: Stofftransportwiderstand

Abbildung 41 zeigt den durch die Simulation berechneten Trocknungsverlauf eines nach ökonomischen Gesichtspunkten optimierten Trocknungsprozesses (siehe Kapitel 3.4.3) mit einer Temperaturvorgabe von 35 °C (Empfehlung durch Projektpartner Matthias Barth):
- 2-stufiger Trocknungsprozess (1 Lösungswechsel)
- Vorlaufkonzentration ξ_{TCF}^{VL}: 43.5 %
- Lösungswechselkonzentration ξ_{TCF}^{LW}: 40 %
- Rücklaufkonzentration ξ_{TCF}^{RL}: 31 %
- Temperatur: 35 °C
- Trocknungsgut, Start- und Endfeuchte entsprechend Tabelle 8

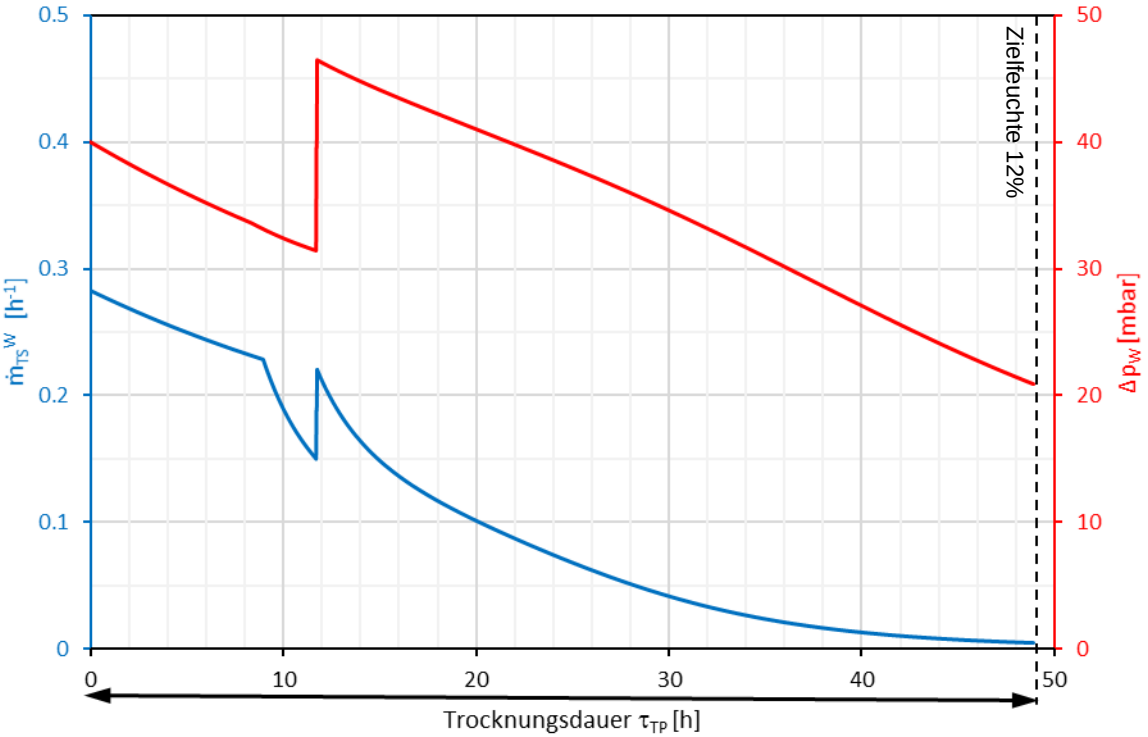

Abbildung 41: Simulierter Trocknungsverlauf

Anhand der Trocknungsdauer τ_{TP} (Abbildung 41) und dem in Kapitel 3.3.2 ermittelten Energiebedarf für Ventilator und Lösungspumpe ($\frac{P_{El}}{m_{TS}} = \frac{2\ MJ}{36\ h}$) lässt sich der Bedarf an elektrischer Energie für einen Trocknungsprozess (W_{El}) berechnen:

$$W_{El} = \frac{P_{El}}{m_{TS}} \cdot \frac{m_{TG}}{1-X_{TS}} \cdot \tau_{TP} \qquad (27)$$

Regeneration

Der Prozess der Regeneration ist in Abbildung 42 dargestellt. Der Betriebsdruck (p_R) von Desorber und Kondensator wird durch die Wärmeabgabe ($\dot{Q}_0$) bei Umgebungstemperatur (ϑ_A) bestimmt. Die Temperaturdifferenz im Wärmeübertrager beträgt $\Delta T = 5K$. (Gleichung 28)

$$p_R = p_W^{LV}(\vartheta_A + \Delta T) \tag{28}$$

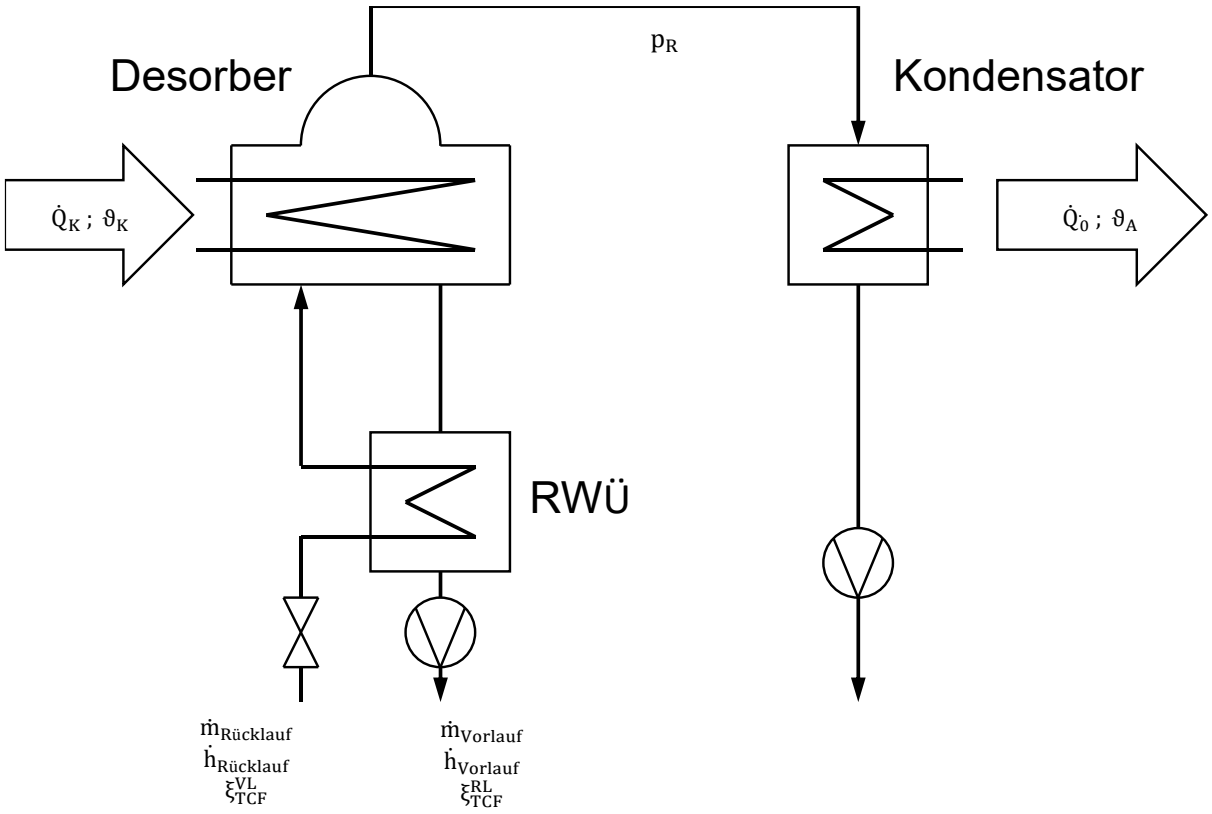

Abbildung 42: Anlagenschema der Regeneration

Für die Regeneration kommen verschiedene erneuerbare Wärmequellen in Frage. In dieser Beispielrechnung wird die für den Austreibungsprozess benötigte Energie ($\dot{Q}_K$) durch eine Solarthermieanlage bereitgestellt. Die Berechnung des spezifischen Wärmeertrages $\dot{q}_K$ der Solarthermieanlage (bezogen auf die Kollektorfläche A_K) erfolgt nach dem Ansatz Klucher [31], anhand der Wetterdaten, der Kollektordaten, der Ausrichtung der Kollektoren und der Kollektortemperatur. Die Kollektortemperatur ist gleich der Siedetemperatur der konzentrierten Lösung beim Betriebsdruck p_R.
Die benötigte Kollektorfläche A_K ergibt sich aus der für die Trocknungskampagne in einem Jahr benötigte Lösungsmenge, welche durch die Jahressimulation des Trockners (Abbildung 41) unter Vorgabe des Trocknungsprogramms (Abbildung 37) ermittelt werden kann.
Menge an regenerierter Natronlauge ($\dot{m}_{TCF}^{VL}$) kann anhand der Massen- und Energiebilanz ermittelt werden (Gleichungen 29 bis 30).

$$\dot{m}_W = \dot{m}_{TCF}^{RL} - \dot{m}_{TCF}^{VL} \tag{29}$$

$$\dot{m}_W = \left(1 - \xi_{TCF}^{RL}\right) \cdot \dot{m}_{TCF}^{RL} = \left(1 - \xi_{TCF}^{VL}\right) \cdot \dot{m}_{TCF}^{VL} \tag{30}$$

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_{TCF}^{VL} \cdot h_{TCF}^{VL} - \dot{m}_{TCF}^{RL} \cdot h_{TCF}^{RL} + \dot{m}_W \cdot h_W \tag{31}$$

Der Rekuperator wird in der Simulation mit einer minimalen Triebkraft von $\Delta T = 5K$ berechnet. Wärmeverluste im Desorber, Kondensator und Rekuperator werden nicht berücksichtigt.
Abbildung 43 zeigt die mit der Simulation berechnete Regenerationsleistung über eine Jahresperiode. Auffallend ist die recht gleichmässig über den Jahresverlauf verteilte Regenerationsmenge. Dies resultiert aus der durch den Prozess gekoppelten Austreiber- und Umgebungstemperatur.

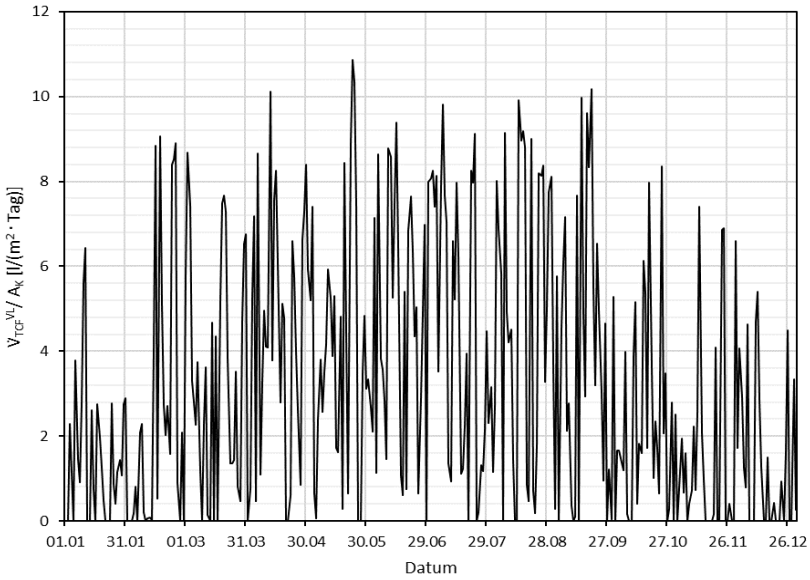

Abbildung 43: Auf die Kollektorfläche bezogener Volumenstrom regenerierter (konzentrierter) Lösung pro Tag

Netzwerk mit Speicher

Das Netzwerk wird durch eine Speichersimulation über eine Jahresperiode beschrieben. Lösungsverluste treten nicht auf. Die Speicherbehälter werden je nach Bedarf mit konzentrierter (Vorlauf) oder verdünnter Lösung (Rücklauf) befüllt. Abbildung 44 zeigt die mit dem Simulationsprogramm berechnete Speicherbeladung über eine Jahresperiode.

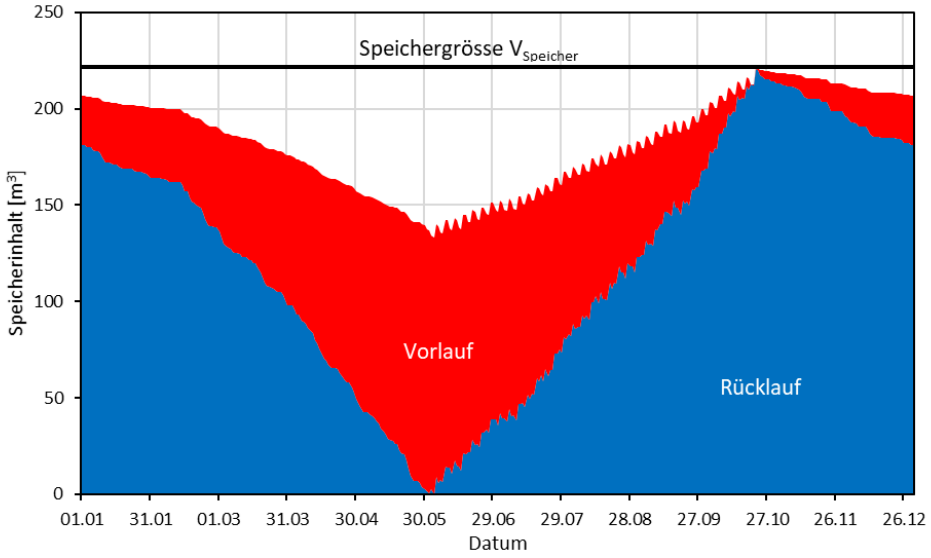

Abbildung 44: Speicherbeladung

3.4.3 Optimierung

Mit der Simulation ist es nun möglich die Auswirkung einer Veränderung der Auslegungsparameter, wie der Anzahl der Lösungswechsel, der Vorlauf- und Rücklaufkonzentration sowie der Wahl des Kollektortyps, auf den Investitionsaufwand (benötigte Kollektorfläche, Grösse des Speicherbehälters und Ausnutzungsgrad des Trockners bzw. benötigte Zeit für einen Trocknungsprozess) und den Betriebsaufwand (Energiebedarf) zu ermitteln. So kann anhand einer einfachen Optimierung der Jahresbetriebskosten (betrachtet werden hierbei nur die, durch die Auslegungsgrössen beeinflussten Kosten für die Investitionsumlage und den Anlagenbetrieb) ein optimales Anlagendesign (Festlegung von Vor- und Rücklaufkonzentration sowie die optimale Konzentration für den Lösungswechsel) entwickelt werden. Die Optimierung erfolgt jeweils für eine Auslegungsgrösse entsprechend der nachfolgend beschriebenen Vorgehensweise. Für die Ermittlung aller Parameter wurden die Einzelschritte in einem iterativen Vorgehen kombiniert.

Optimierung des Lösungswechsels

Betrachtet man zunächst einen Lösungswechsel, so ergibt sich die Abhängigkeit der Trocknungszeit von der Lösungswechselkonzentration bei einer vorgegebenen Vor- und Rücklaufkonzentration der Natronlauge entsprechend Abbildung 45. Bei einer Vorlaufkonzentration von $\xi_{\mathrm{TCF}}^{\mathrm{VL}} = 43.5\%$ und einer Rücklaufkonzentration von $\xi_{\mathrm{TCF}}^{\mathrm{RL}} = 31\%$ liegt die optimale Konzentration für den Lösungswechsel bei $\xi_{\mathrm{TCF}}^{\mathrm{LW}} = 40\%$. Die Trocknungsdauer reduziert sich durch den Lösungswechsel um $\Delta\tau_{TP} = 12.5\ h$.

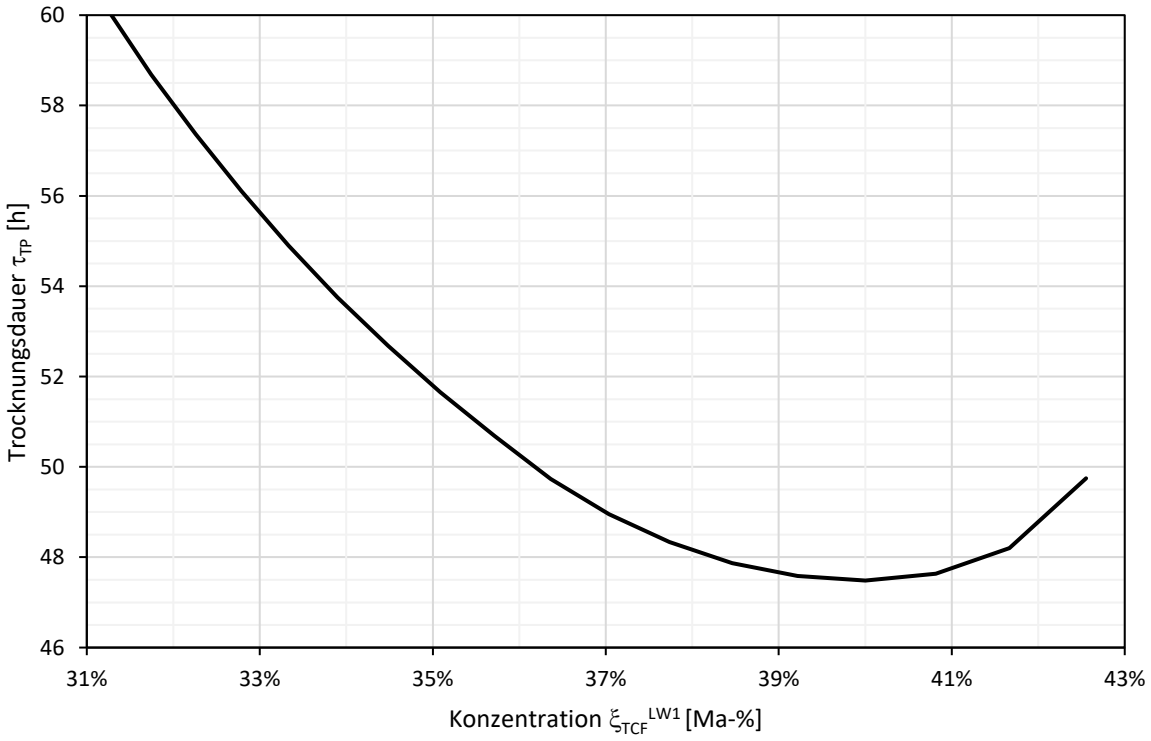

Abbildung 45: Trocknungsdauer in Abhängigkeit der Lösungswechselkonzentration (Prozess mit einem Lösungswechsel, $\xi_{\mathrm{TCF}}^{\mathrm{VL}}$ = 43.5%, $\xi_{\mathrm{TCF}}^{\mathrm{RL}}$ = 31%, ϑ = 35°C)

Abbildung 46 zeigt die optimalen Lösungswechselkonzentrationen bei Prozessen mit einem, zwei und drei Lösungswechseln und die damit erreichten Trocknungszeiten. Im Gegensatz zur

Trocknungszeitreduzierung bei einem Lösungswechsel von 21% ergeben sich durch zusätzliche Lösungswechsel nur noch geringe Zeitreduktionen (2 Lösungswechsel: 3%, 3 Lösungswechsel: 1%). Abbildung 47 zeigt die Abhängigkeit der Trocknungsdauer von der Anzahl optimierter Lösungswechsel.

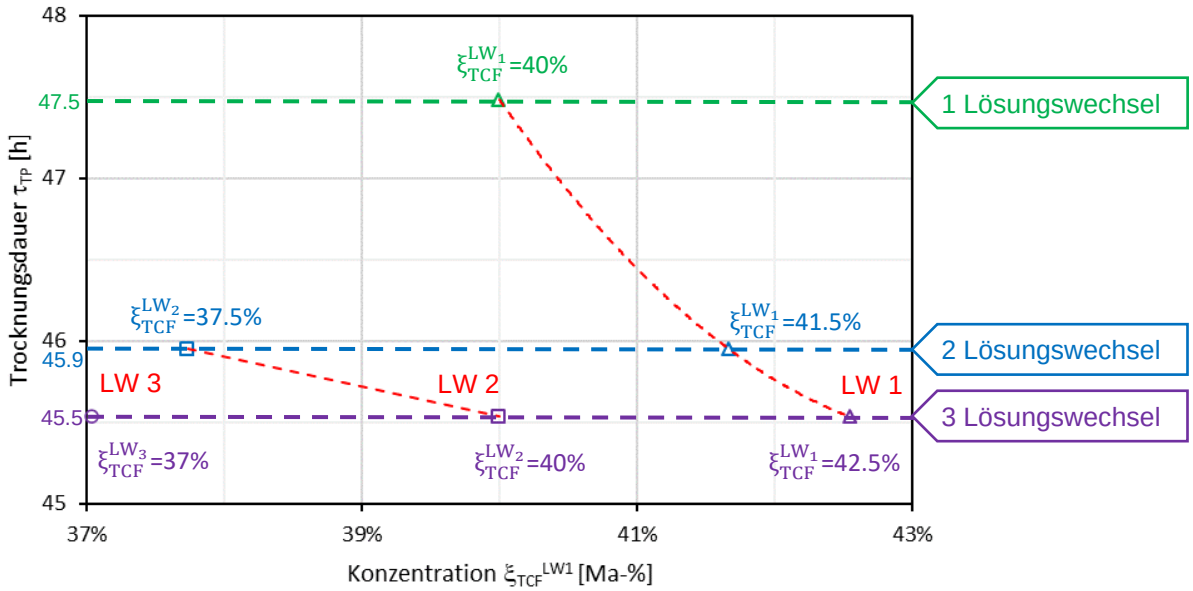

Abbildung 46: Trocknungsdauer bei optimierten Lösungswechselkonzentrationen für Trocknungsprozesse mit 1 bis 3 Lösungswechseln (ξ_{TCF}^{VL}= 43.5%, ξ_{TCF}^{RL}RL = 31%, ϑ = 35°C)

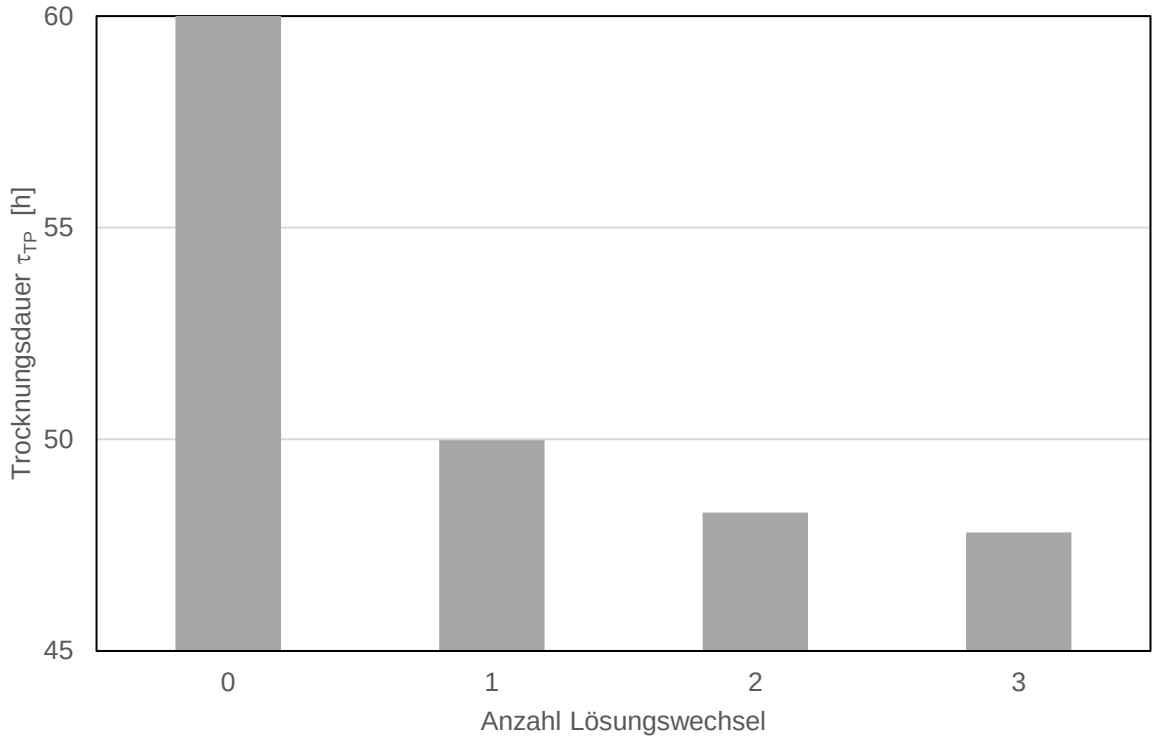

Abbildung 47: Trocknungsdauer in Abhängigkeit der Anzahl Lösungswechsel ($\xi_{TCF}^{VL} = 43.5\%$, $\xi_{TCF}^{VL} = 31\%$, ϑ = 35°C)

Aufgrund der sehr geringen Verringerung der Trocknungsdauer bei mehrstufigen Prozessen erscheint der Aufwand nicht als lohnenswert. Im optimierten Trocknungskonzept wird daher nur ein Lösungswechsel vorgesehen. Die Konzentration des Lösungswechsels kann anhand des Simulationsmodelles für gegebene Randbedingungen ($\xi_{TCF}^{VL} = 43.5\%$, $\xi_{TCF}^{VL} = 31\%$, ϑ = 35°C) ermittelt werden (Abbildung 45).

Optimierung der Vorlaufkonzentration

Der Einfluss der Veränderung der Vorlaufkonzentration auf die Zielgrössen Trocknungsdauer, Kollektorfläche und Speichervolumen ist in Abbildung 48 ersichtlich. Mit steigender Vorlaufkonzentration reduziert sich die Trocknungsdauer sowie der Speichervolumenbedarf. Jedoch steigt die benötigte Kollektorfläche aufgrund der konzentrationsabhängigen Regenerationstemperatur ebenfalls mit zunehmender Vorlaufkonzentration an. Die Randbedingungen der im Diagramm aufgeführten Funktionen sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Randbedingungen der Vorlaufoptimierung

Vorlaufkonzentration	32 – 50%
Rücklaufkonzentration	31%
Anzahl Lösungswechsel	1
Trocknungstemperatur	35°C

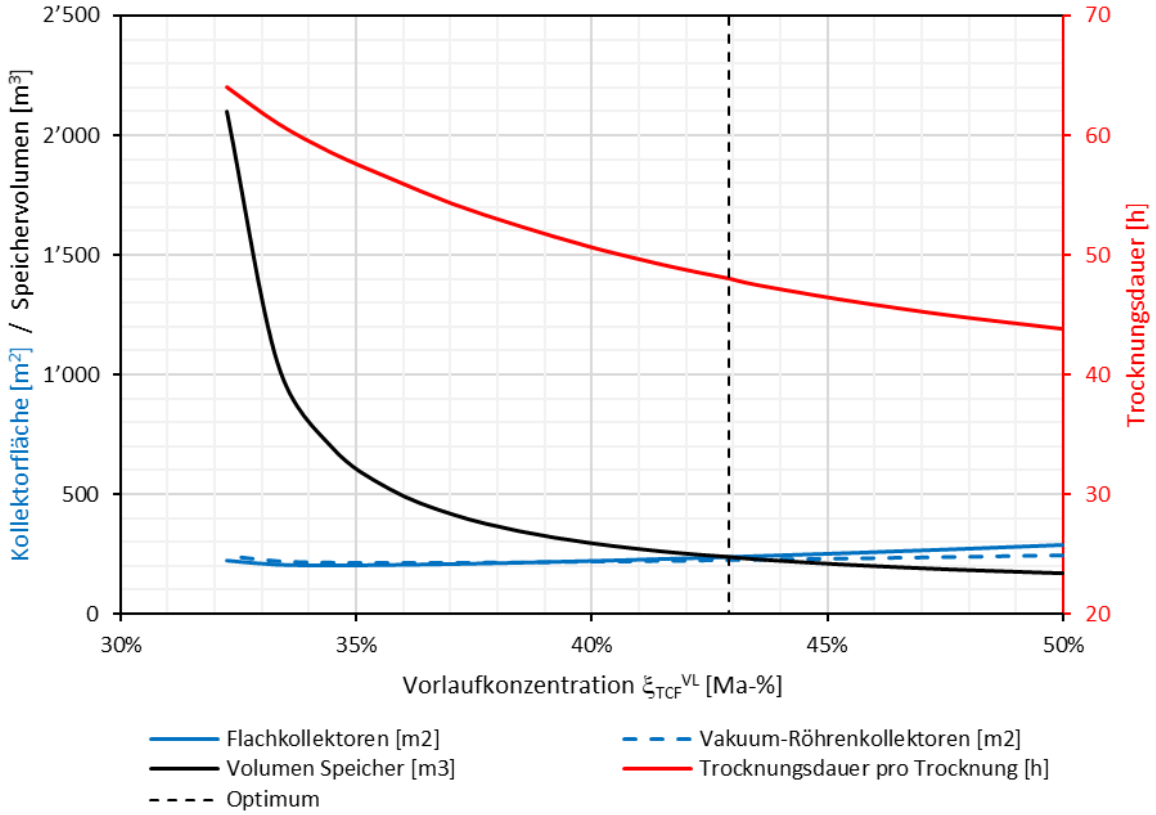

Abbildung 48: Kollektorflächen- und Speichervolumenbedarf sowie Trocknungsdauer in Abhängigkeit von der Vorlaufkonzentration

Die optimale Vorlaufkonzentration wird anhand einer Kostenoptimierung ermittelt. Für den Betrieb der Anlage ergeben sich pro Jahr folgende Gesamtkosten $K_{ges.}$, welche sich aus den Kosten für die Investition $K_{inv.}$ und Kosten für den Anlagenbetrieb $K_{betr.}$ zusammensetzen.

$$K_{ges.} = a \cdot K_{inv.} + K_{betr.} \quad (32)$$

Die Investitionskosten für die Sorptionstrocknungsanlage ergibt sich aus den Kosten des Trockners (in Abhängigkeit von der benötigten Trocknerfläche $A_{Tr.}$, den Kosten der Solarthermieanlage (bestimmt durch die notwendige Kollektorfläche A_K, den Kosten der Speicherbehälter (bestimmt durch das notwendige Speichervolumen $V_{Sp.}$ und den Kosten für das TCF.

$$K_{inv.} = A_{Tr.} \cdot k_{Tr.} + A_K \cdot k_K + V_{Sp.} \cdot k_{Sp.} + V_{TCF} \cdot k_{TCF} \quad (33)$$

Die in der Simulation verwendeten Spezifischen Kosten ($k_{Tr.}$, k_K, $k_{Sp.}$ und k_{TCF}) sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Die benötigte Trocknerfläche $A_{Tr.}$ ist abhängig vom Trocknungsprogramm (Abbildung 37) und der Trocknungsdauer. Kann die Trocknungsdauer durch das Sorptionsverfahren um mindestens einen Tag reduziert werden, verringert sich dadurch die benötigte Trocknerfläche um 25%, da die Trocknungsdauer auf dem Holderhof 4 Tage beträgt. Diese Reduktion der benötigten Trocknerfläche wird im Kostenmodell berücksichtigt. Dies ist in Abbildung 49 und Abbildung 51 am Sprung im Funktionsverlauf der Jahreskosten der Trocknerfläche ersichtlich.
Die zur Regeneration erforderliche Kollektorfläche A_K wird durch die Simulation des Regenerationsprozesses bestimmt. Das benötigte TCF-Volumen V_{TCF} kann anhand der durch die

Speichersimulation (Abbildung 44) ermittelten Speichergrösse $V_{Sp.}$ und der Konzentration der verdünnten Lösung ξ_{TCF}^{RL} berechnet werden (Gleichung 34).

$$V_{TCF} = \frac{V_{Sp.} \cdot \rho(\xi_{TCF}^{RL}, T_0) \cdot \xi_{TCF}^{RL}}{\rho(\xi_{TCF}=50\%, T_0) \cdot 0.5} \quad (34)$$

Als Betriebskosten werden im Simulationsmodell nur die Kosten für die benötigte elektrische Energie (konventionelle Trocknung: Ventilator und Entfeuchter / Sorptionstrockner: Ventilator und Lösungspumpe) berücksichtigt (Gleichung 35).

$$K_{betr.} = W_{El} \cdot k_{El} \quad (35)$$

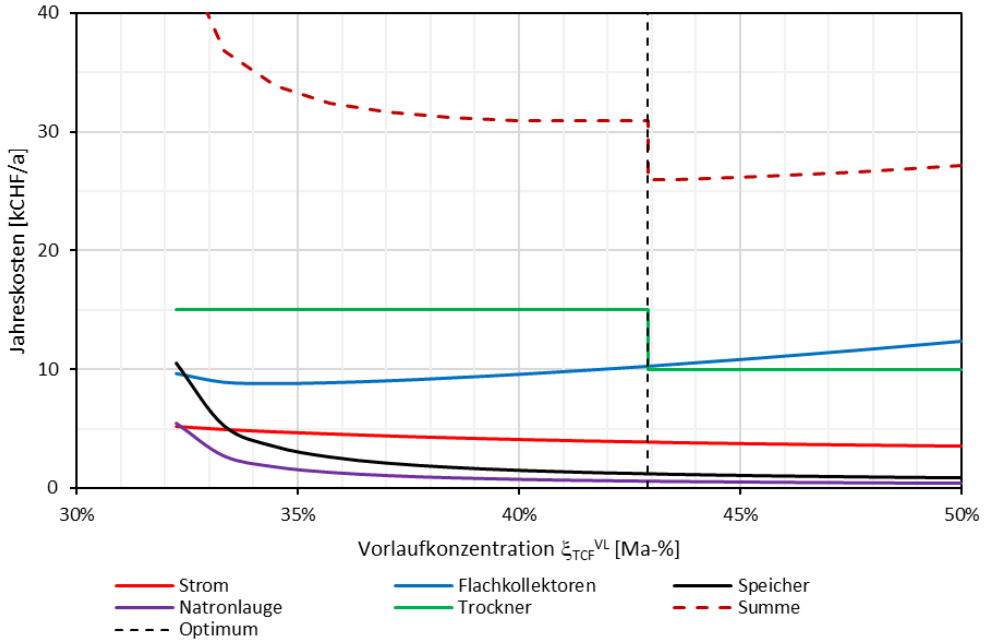

Abbildung 49: Jahreskosten in Abhängigkeit von der Vorlaufkonzentration

Abbildung 49 zeigt die Abhängigkeit der einzelnen Kosten von der Wahl der Vorlaufkonzentration des TCF. Die Randbedingungen der Kostenfunktion sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Bei diesem Beispiel liegt das Optimum der Vorlaufkonzentration bei $\xi_{TCF}^{VL} = 43.5\%$. Die Trocknungsdauer beträgt dabei 48 Stunden.

Optimierung der Rücklaufkonzentration

Eine Veränderung der Rücklaufkonzentration ξ_{TCF}^{RL} bewirkt eine Veränderung der Trocknungsdauer τ_{TP} und des benötigten Speichervolumens $V_{Sp.}$ (Abbildung 50). Die Randbedingungen der im Diagramm aufgeführten Funktionen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Randbedingungen der Rücklaufoptimierung

Vorlaufkonzentration	43.5%
Rücklaufkonzentration	25 – 43%
Anzahl Lösungswechsel	1
Trocknungstemperatur	35°C

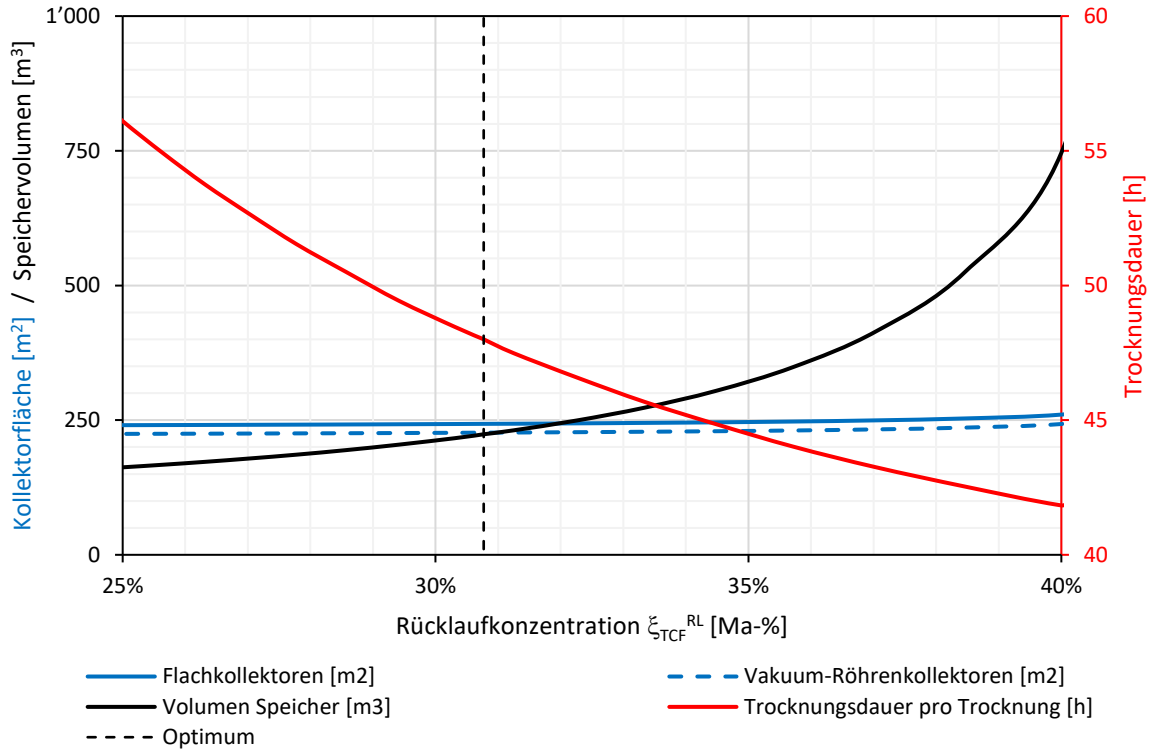

Abbildung 50: Kollektorflächen- und Speichervolumenbedarf sowie Trocknungsdauer in Abhängigkeit von der Rücklaufkonzentration

Die optimale Rücklaufkonzentration wird analog der Vorgehensweise bei der Vorlaufoptimierung über einer Kostenoptimierung ermittelt. Abbildung 51 zeigt die Abhängigkeit der einzelnen Kosten von der Wahl der Rücklaufkonzentration des TCF. Die Randbedingungen der Kostenfunktion sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

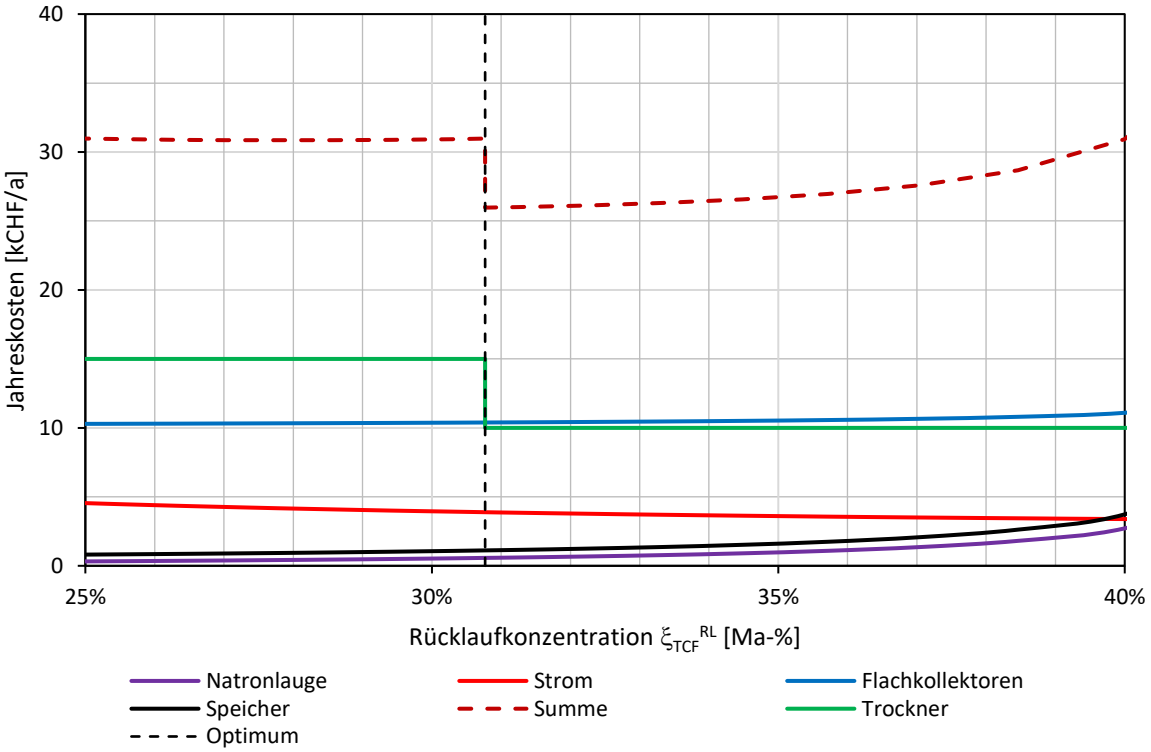

Abbildung 51: Jahreskosten in Abhängigkeit von der Rücklaufkonzentration

Im Ergebnis der Betriebskostenoptimierung ergeben sich die in Tabelle 13 angegebenen Auslegungsgrössen und grobe Jahresbetriebskostenabschätzung. Die Auslegung bezieht sich auf die in Tabelle 8 aufgeführten Randbedingungen und den Betriebsdaten der Holderhof Produkte AG im Jahr 2022 (neugestaltete Anlage, siehe Erläuterungen in Kapitel 3.3.2).

Tabelle 13: optimale Betriebskonfiguration

Vorlaufkonzentration	43%
Rücklaufkonzentration	31%
Lösungswechselkonzentration	40% (1 Lösungswechsel)
Kollektorfläche	240 m^2 Flachkollektoren
Speichervolumen	225 m^3
Natronlauge 50%	120 m^3
Trocknungsdauer	48 h
Stromverbrauch	26 MWh/a
Trocknergrösse	400 m^2
Jahreskosten	26’000 CHF/a

3.4.4 Vergleich mit konventioneller Trocknung

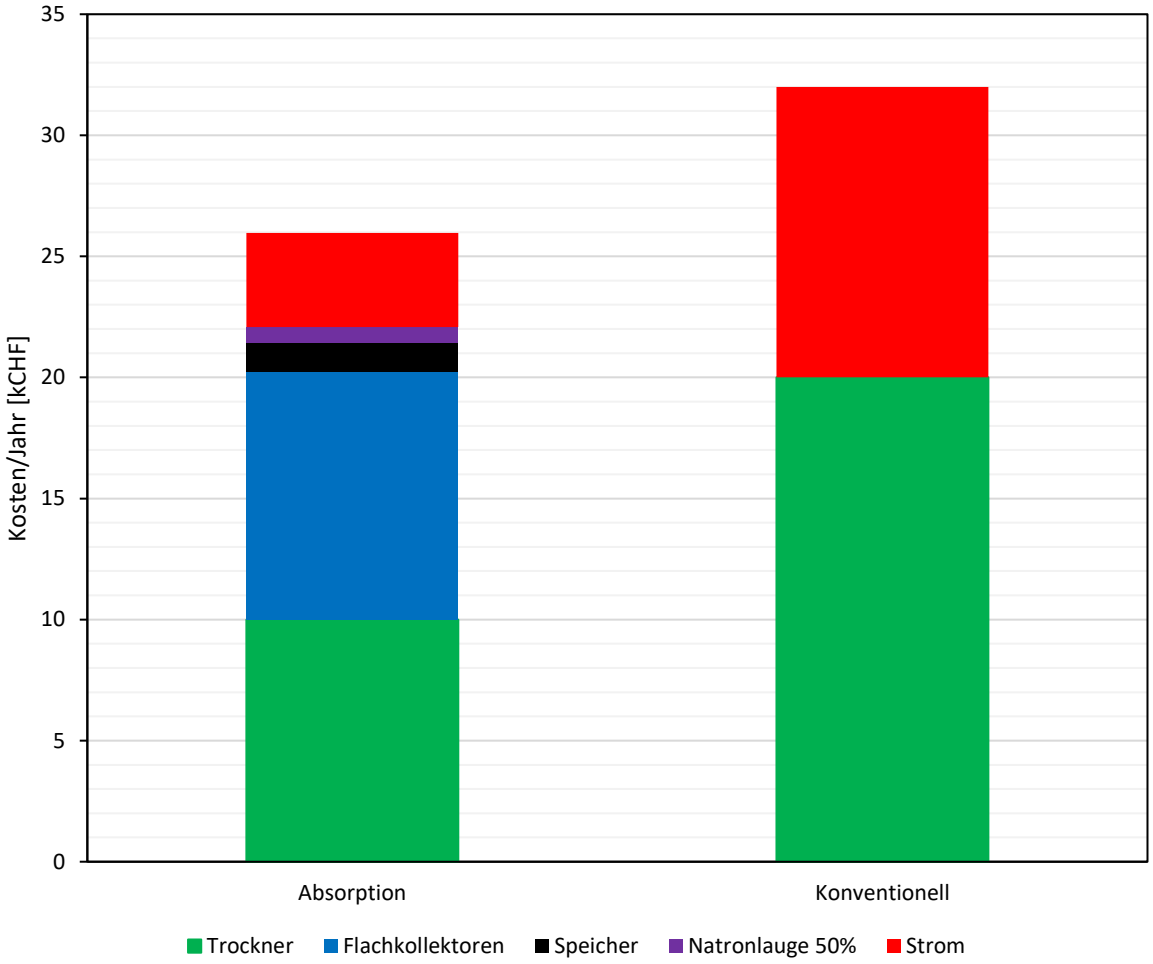

Abbildung 52: Kostenvergleich Absorptionstrocknung mit konventioneller Trocknung

Abbildung 52 zeigt die anhand der im Kapitel 3.4.3 erläuterten Kostenrechnung und der in Tabelle 8 aufgeführten Betriebsbedingungen ermittelten Jahresbetriebskosten für die konventionelle Trocknungsanlage der Holderhof Produkte AG mit einer Trocknungsfläche von 800 m^2 im Betriebsjahr 2022 sowie einer hypothetischen Sorptionstrocknungsanlage mit einer Trocknungsfläche von 400 m^2 (Flächenreduktion durch Reduktion der Trocknungszeit auf 50%). Durch die reduzierte Trocknungsdauer (konventionell üblicherweise 4 Tage) kann der Trockner kleiner gebaut werden, wodurch die Gesamtinvestition der Absorptionstrocknung nur knapp 10% höher als eine äquivalente Anlage konventioneller Bauart ausfällt. Die für den Betrieb benötigte Elektroenergie reduziert sich beim Sorptionstrockner auf ca. 1/3 des Energiebedarfs einer konventionellen Anlage.

3.5 Optimierung des Anlagendesigns, Konstruktion und Aufbau einer optimierten Trocknungsanlage (AP5)

Für die, in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen, wurde eine Versuchsanlage benutzt, welche einen Absorber, der ursprünglich für andere Anwendungen entwickelt wurde, verwendet. Dieser ist über Rohrleitungen mit der Trocknungskammer verbunden, welche einen übermässigen Druckverlust sowie hohe Wärmeverluste bzw. -einträge an bzw. von der Umgebung aufweisen. Mit der Konstruktion einer optimierten Trocknungsanlage sollen diese Nachteile beseitigt werden, indem Absorber und Trocknungskammer in einem kompakten Anlagendesign über kurze Strömungskanäle miteinander verbunden werden, wobei die Aussenflächen ausschliesslich mit dem kühlen (aus dem Trockner austretenden) Luftstrom in Verbindung treten, wodurch Wärmeverluste weitgehend vermieden werden. Die durch bisherige Versuche und Simulationen gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich eines optimierten Anlagenbetriebes werden beim Betrieb der optimierten Trocknungsanlage berücksichtigt. So arbeitet die Anlage mit einem Lösungswechsel und Intervallberieselung.

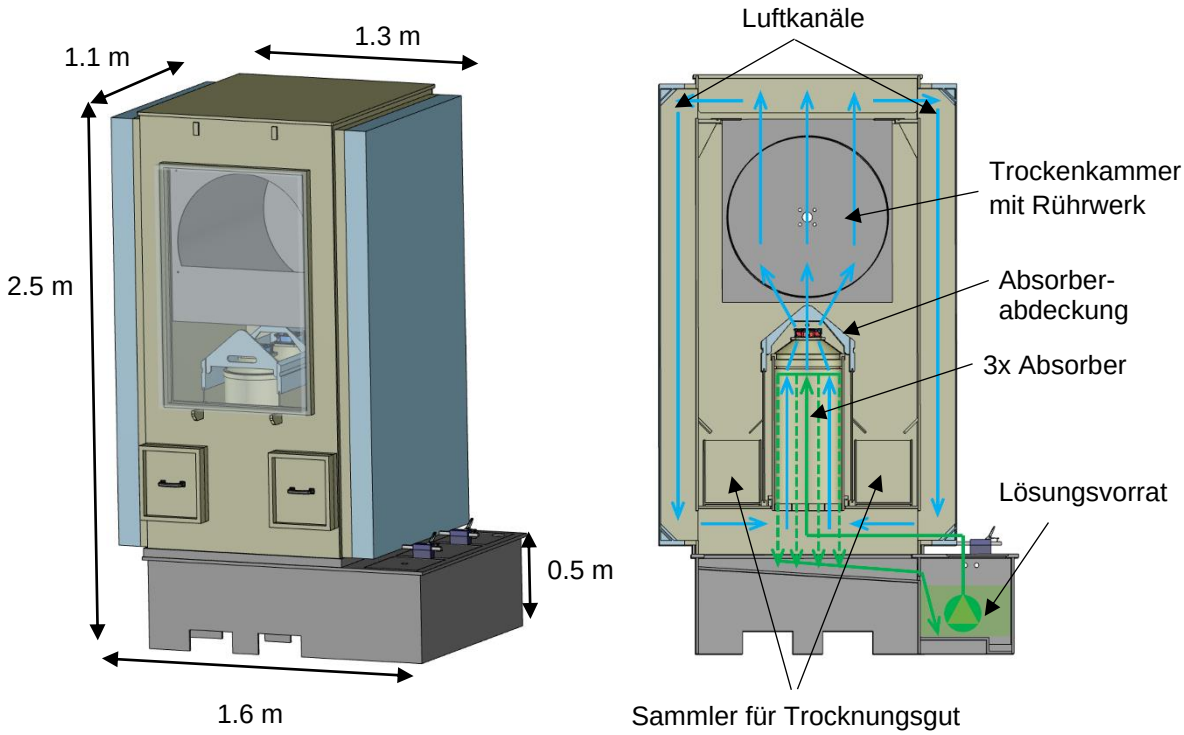

Abbildung 53: Optimiertes Anlagendesign (blau: Luftweg, grün: Lösungsweg)

Die Konstruktion beruht auf einem modularen Aufbau aus leicht zu montierenden Einzelkomponenten. Dies ermöglicht eine einfache Installation der Anlage an verschiedenen Orten zu Test- und Demonstrationszwecken. Unter der Trockenkammer sind mehrere modulare Absorbereinheiten mit Ventilatoren angeordnet. Dieses Konzept erlaubt eine einfache Umsetzung beim Retrofitting von Grossanlagen beliebiger Dimension (Abbildung 71). Aus einem zentralen Versorgungstank mit Pumpen und Temperierung können die Absorber mit konditionierter Lösung versorgt werden.
Die optimierte Trocknungsanlage besteht aus folgenden Komponenten:

- Trockenkammer mit Rührwerk
- Luftkanal für die Umluftführung
- Absorber mit Ventilatoren zur Luftumwälzung

- Sammler für Trocknungsgut und Absorberabdeckung
- Lösungsvorrat mit Lösungsumwälzpumpen und Heizung

Die aus den Absorbern austretende, trockene und warme Luft strömt senkrecht nach oben durch die Trocknungskammer. Über die seitlichen Umluftkanäle wird die aus der Trocknungskammer austretende, feuchte und kühle Luft im Kreislauf zu den Absorbern geleitet. Die Absorber werden aus dem Lösungsvorrat durch die Lösungsumwälzpumpen mit temperierter Lösung versorgt.
Die Temperierung der Lösung erfolgt im Versuchsbetrieb über eine elektrische Heizung (Abbildung 58). Diese war im Betrieb der unter Kapitel 3.1 beschriebenen Versuchsanlage nicht notwendig, da der Energieeintrag durch Ventilator und Lösungspumpe genügend Abwärme erzeugt hat. Durch die optimierte Strömungsführung in der neuen Anlage konnten diese Verluste um über 80% reduziert werden. Mit einer Wärmeisolation der Trocknungsanlage könnte der Trocknungsbetrieb auch ohne Heizung erfolgen.
Die im Kapitel 3.1.1 beschriebene Trocknungskammer mit Rührwerk (Abbildung 23) wird in das neue Anlagendesign integriert. Dabei wurde das bestehende Rührwerk optimiert (Abbildung 56). Die Konstruktion des optimierten Sorptionstrockners ist in Abbildung 53 dargestellt. Der fertiggestellte Trockner ist in Abbildung 55 zu sehen.
Direkt unterhalb der Trocknungskammer befinden sich drei Absorptionswäscher, deren Konstruktion auf den Erfahrungen mit den bisher am IEFE entwickelten Absorbern beruht. Die Absorptionswäscher (Abbildung 54) haben einen Nenndurchmesser von 300 mm und sind 800 mm hoch. Ein Gitter am unteren Ende hält die Füllkörperschüttung des Typs PallRing 15, der obere Abschluss besteht aus einem konischen Deckel mit Diagonalventilator des Typs DV-4118N (Abbildung 57) zur Luftumwälzung. Drei am oberen Ende doppelt geschlitzte PVC-Rohre bilden den Lösungsverteiler, der die Natronlauge direkt über der Schüttung verteilt. Der Lösungsumlauf erfolgt über Membranpumpen (Abbildung 57).
Das getrocknete Gut wird in zwei Schubladen (Sammler) aufgefangen. Ein Gitterrost über den Absorbern (Absorberabdeckung) verhindert eine Verschmutzung der Absorber durch das herabfallende, getrocknete Gut.

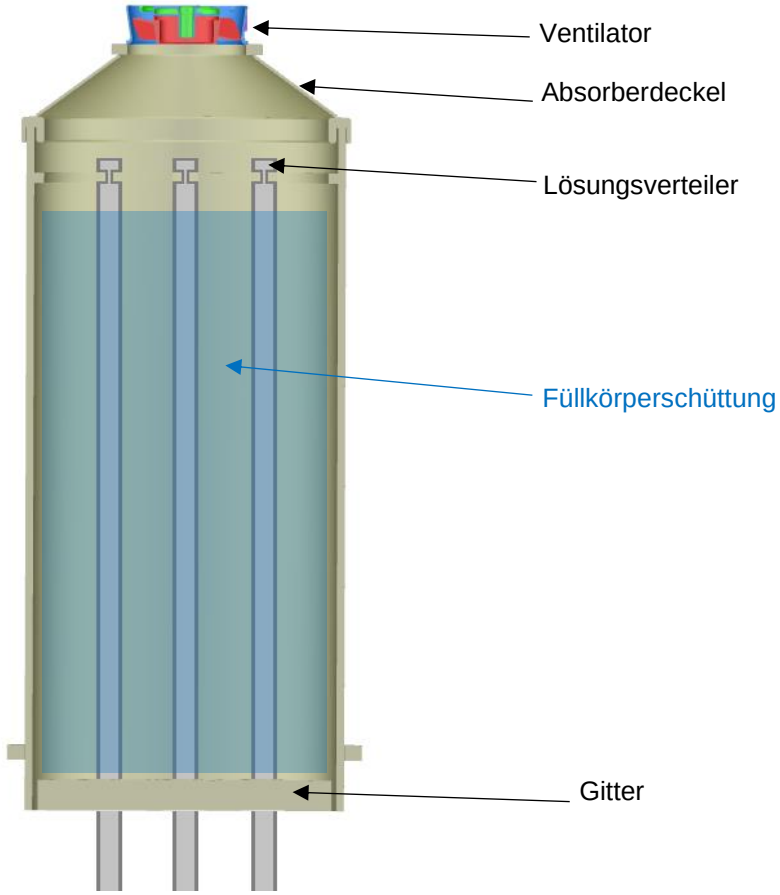

Abbildung 54: Schnitt durch einen 300 mm Absorber

Abbildung 55: Optimierter Kräutertrockner im Labor des IEFE

Abbildung 56: Rührwerk (a: Rührer für den Trocknungsprozess; b: Rührer zur Zerkleinerung des Trocknungsgutes nach der Trocknung)

Abbildung 57: Membranpumpe und Diagonal-Ventilator

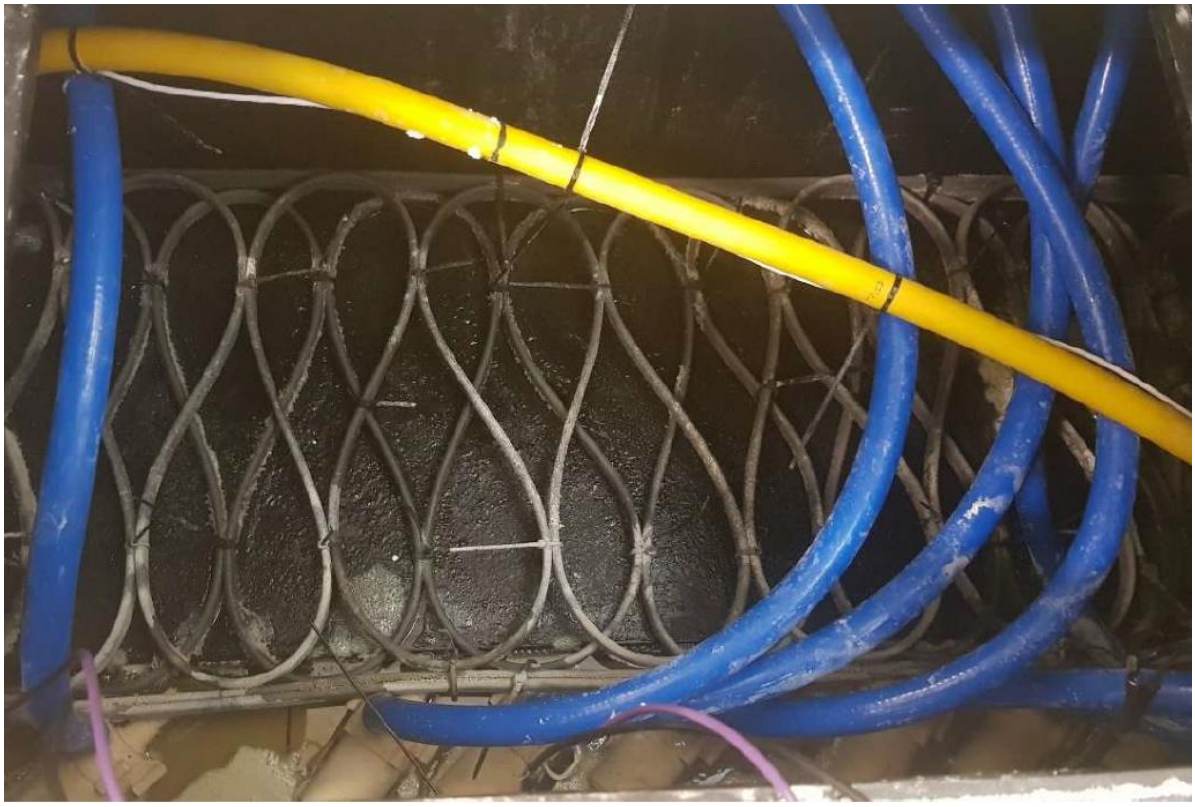

Abbildung 58: Vorratsbehälter des optimierten Trockners, Widerstandsheizung (Begleitheizkabel Grau), Berieselung (blaue Schläuche), Umwälzung Natronlauge im Behälter zwecks Temperaturregelung (gelber Schlauch)

Abbildung 59: Endprodukt der Trocknung in der Sammelschublade

3.5.1 Messdatenerfassung und Prozesssteuerung

Im R&I-Schema (Abbildung 60) sind alle Prozessmessstellen abgebildet. Die verwendeten Messfühler sind in Tabelle 14 aufgelistet.
Die Temperatur- und Feuchtemessung zwischen Absorber und Trockenkammer (T2.2, M2.2) wird für die Prozesssteuerung (Berieselung) verwendet. Mit der Temperatur- und Feuchtemessung am Austritt der Trocknungskammer (T2.1, M2.1) kann der Prozess bilanziert werden.
Mittels Stromzähler wird der Betriebsaufwand gemessen. Hierbei wird unterschieden zwischen Luftumlauf (Ventilatoren), Lösungsumlauf (Membranpumpen) und Temperierung (Widerstandsheizung).
Anhand der Temperaturmessung im Lösungsvorrat (T1.3) kann die Lösungstemperatur mit der elektrischen Beheizung eingestellt werden.
Die Befüllung und Entleerung des Lösungsvorrats wird über die Füllstandssensoren (L1.3-8) gesteuert.
Der Bedarf an Arbeitslösung ist abhängig von Start- und Endfeuchte des Trocknungsgutes und der Start- und Endkonzentration wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben. Typischerweise liegt dieser bei 5 kg NaOH (7.5 Liter Natronlauge 45%) pro kg Trockenmasse der zu trocknenden Kräuter.
Die kontinuierliche, elektronische Aufzeichnung aller Messdaten sowie die Prozesssteuerung erfolgt durch ein LabView-Programm.

Tabelle 14: Messstellen optimierter Trockner

E1.3	Lösungs	Stromzähler Lösungsumlauf	ABB
E1.4		Stromzähler Heizung	ABB
L1.3-6		Niveaugeber	Endress & Hauser, FTW 31/325
T1.3		Lösungstemperatur	SAWI PT100, 4-Leiter, Klasse A
E2.2	Luftweg	Stromzähler Luftumlauf	ABB
M2.1		Feuchte Austritt Trockenkammer	Jumo Kapazitiv, ±3%rH
T2.1		Lufttemperatur Austritt Trockenkammer	Jumo PT1000, Klasse B
M2.2		Feuchte Eintritt Trockenkammer	Jumo Kapazitiv, ±3%rH
T2.2		Lufttemperatur Eintritt Trockenkammer	Jumo PT1000, Klasse B
T2.0		Lufttemperatur Umgebung	SAWI PT100, 4-Leiter, Klasse A

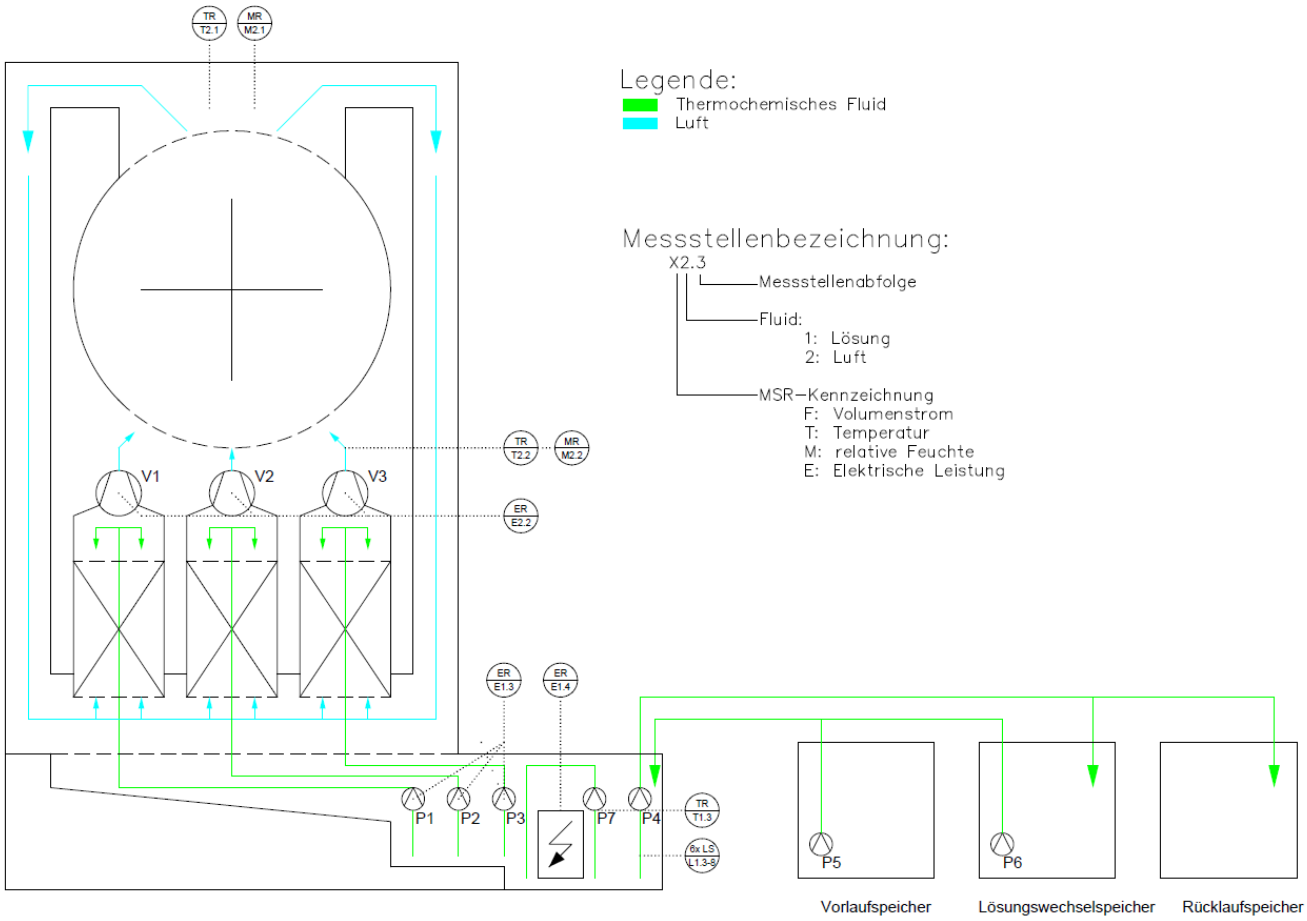

Abbildung 60: R&I-Schema optimierter Kräutertrockner

Das Steuerkonzept der Anlage ermöglicht einen vollautomatischen Betrieb über den gesamten Trocknungsprozess. Manuell erfolgt lediglich das Ein- und Ausbringen des Trockengutes sowie der Wechsel des Rührwerkes vor dem Zerkleinerungs-/Trennprozess (Trennung der zerkleinerten Blätter von den Stielen). Ein Sicherheitskonzept verhindert eigensicher Fehlfunktionen, welche zur Zerstörung von Anlagenkomponenten oder dem Austreten von Arbeitsstoffen führen können. Die eingesetzten Sensoren (Konduktive Füllsstandssensoren, PT100, kapazitive Feuchtesensoren) sind robust und können von Grossproduzenten im Niederpreissegment bezogen werden. Für eine kommerzielle Anwendung, welche keine messtechnische Aufzeichnung zur Prozessbilanzierung benötigt, kann die LabView-Steuerung durch eine einfache SPS- oder Relaissteuerung ersetzt werden.

Die Prozesssteuerung des optimierten Trockners besteht aus 5 Komponenten:

- *Ventilatorsteuerung*
  Die Ventilatoren sind während des gesamten Trocknungsprozesses im Betrieb. Zur Vermeidung von Tropfenaustrag im Absorber wird der Luftvolumenstrom während der Berieselung um 90% reduziert. Zur Effizienzsteigerung des Trocknungsprozesses kann der Luftvolumenstrom mit abnehmendem Wassergehalt im Trocknungsgut reduziert werden, um eine höhere Wasserfracht in der Trocknungsluft zu erreichen (Energieeinsparung).

- *Temperatursteuerung*
  Die Temperatur der Trocknungsluft am Eintritt des Trockners wird durch die Lösungstemperatur bestimmt. Die Temperatur der Lösung kann bei Bedarf (Reduzierung der Trocknungszeit am Trocknungsende) über die elektrische Beheizung eingestellt werden.

- *Intervallberieselung der Absorber*
  Zur Optimierung des Betriebsaufwandes (Energiebedarf) werden die Absorber nicht kontinuierlich mit frischer Lösung versorgt. Werden die Absorber mit temperierter (beheizter) Lösung betrieben, wird der Berieselungsintervall nach der Lufttemperatur am Absorberaustritt (T2.2) geregelt (Hysterese ca. 1 K). Anderenfalls wird ein festes Zeitintervall (Berieselung: 40 s, Pause: 5 min) verwendet.

- *Lösungswechsel*
  Zum Beginn des Trocknungsprozesses wird der Lösungsvorrat mit Lösung aus dem Lösungswechselspeicher bis zum Erreichen des Füllstandes L1.5 befüllt. Beim Erreichen des Füllstandes L1.4 wird die Lösung aus dem Lösungsvorrat in den Rücklaufspeicher befördert, bis der Füllstand L1.8 signalisiert, dass der Lösungsvorrat leer ist. Danach wird der Lösungsvorrat bis zum Füllstand L1.6 mit Lösung aus dem Vorlaufspeicher befüllt. Die Füllstande L1.7 und L1.3 dienen als Pumpenschutz und Überfüllsicherung.

- *Rührwerkssteuerung*
  Das Rührwerk durchmischt das Trocknungsgut zur Vermeidung einer ungleichmässigen Luftdurchströmung (siehe Kapitel 3.3.1) im letzten Viertel des Trocknungsprozesses.
  Bei einer Gesamtdauer des Trocknungsprozesses von 48 h beginnt nach 36 h der Rührprozess. Zunächst wird für 10 h mit einem langem Zeitintervall (Rühren (5 rpm): 5 min, Pause: 55 min) gearbeitet. In den letzten beiden Stunden des Trocknungsprozesses wird der Zeitintervall verkürzt (Rühren (5 rpm): 5 min, Pause: 5 min).
  Nach abgeschlossener Trocknung wird das Rührwerk gewechselt (Abbildung 56), um das Trocknungsgut durch das Lochgitter der Trocknungskammer durchzumahlen und gebrauchsfertigen Tee in den Sammlern (Abbildung 59) zu erhalten.

Ablauf des Trocknungsprozesses:
Nach dem manuellen Befüllen der Trocknungskammer mit Trocknungsgut wird der Trocknungsprozess gestartet. Dabei werden folgende Prozessschritte nacheinander durchlaufen:

- Befüllen des Lösungsvorrates mit Arbeitsmittel aus dem Lösungswechselspeicher
- Trocknungsbetrieb (mit niedrig konzentrierter Lösung):
  - Luftumwälzung über Ventilatoren der Absorbermodule
  - Intervallberieselung der Absorber
  - Temperatursteuerung (Lösungstemperierung - optional)

Erreichen des Füllstandniveaus im Lösungsvorrat für den Lösungswechsel (L1.4):

- Entleeren des Lösungsvorrates in den Rücklaufspeicher
- Befüllen des Lösungsvorrates aus dem Vorlaufspeicher
- Trocknungsbetrieb (mit hochkonzentrierter Lösung):
  - Luftumwälzung über Ventilatoren der Absorbermodule
  - Intervallberieselung der Absorber
  - Temperatursteuerung (Lösungstemperierung)
  - Rührwerkssteuerung

Erreichen des Füllstandniveaus im Lösungsvorrat für das Ende des Trocknungsprozesses (gewünschte Endfeuchte erreicht, L1.6):

- Manueller Austausch des Rührwerks und Zerkleinerung/Trennung des Trocknungsgutes von den Stängeln

Nach dem automatischen Trocknungsprozess kann das getrocknete Gut aus den Sammelschubladen entnommen werden. Stängel und grobes Material befinden sich in der Trocknungskammer.

Die Inbetriebnahme des optimierten Trockners wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von Mirko Berri und Davide Gagliardino [32] durchgeführt. Neben dem Funktionstest der Anlagenkomponenten sowie der Programmierung der Anlagensteuerung wurde dabei insbesondere die Verteilung der Arbeitslösung im Absorberkopf experimentell untersucht und optimiert (Abbildung 61 und Abbildung 62). Weiterhin wurde untersucht, ab welcher Strömungsgeschwindigkeit die Luft im Absorber Lösungströpfchen mitreisst (Abbildung 63). Auch die Dimensionierung und die Erprobung der Heizung zur Lösungstemperierung im Lösungsvorrat wurde von den Studierenden in ihrer Bachelorarbeit vorgenommen (Abbildung 64).

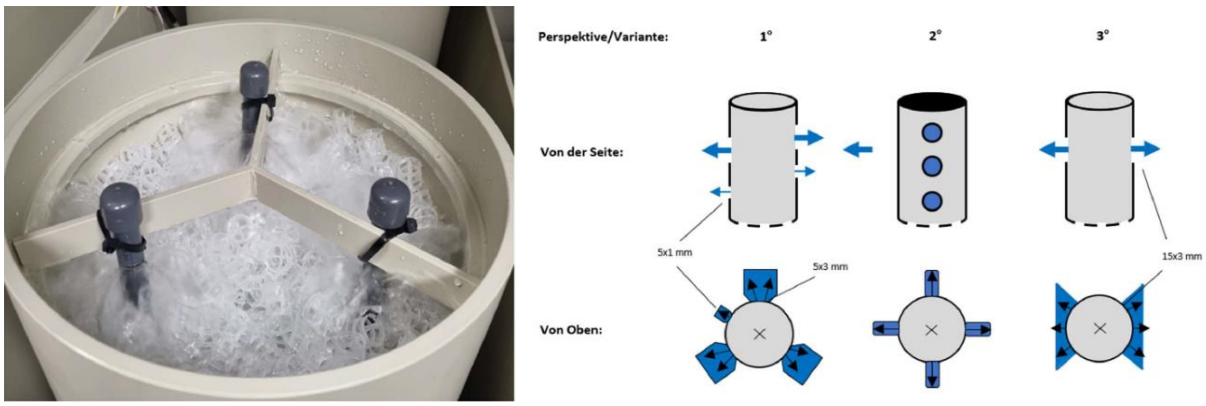

Abbildung 61: Optimierung der Lösungsverteilung im Absorberkopf [32]

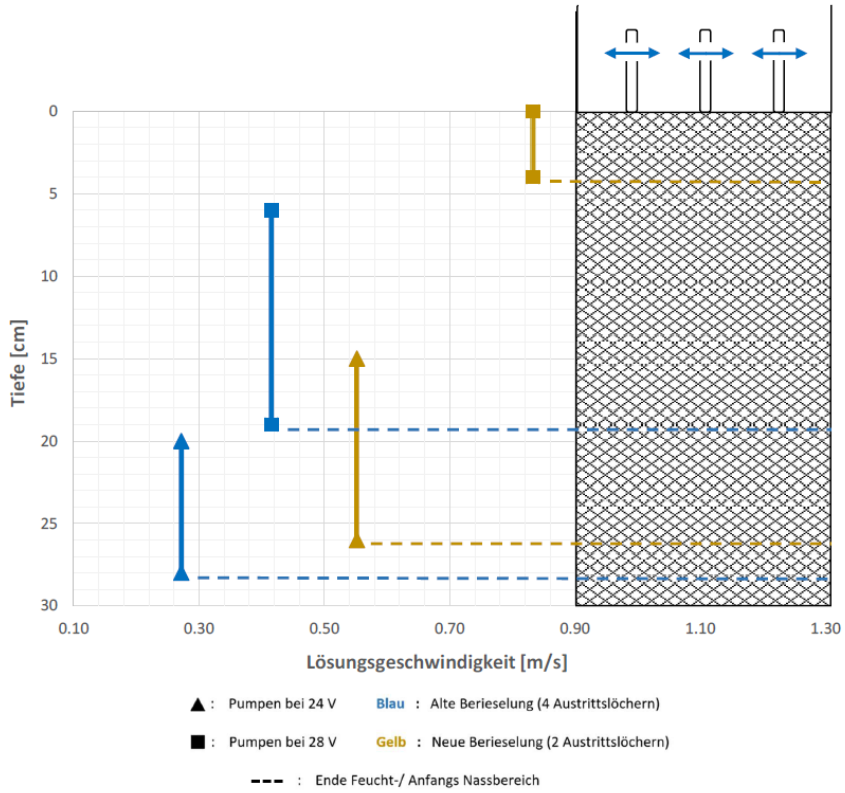

Abbildung 62: Auswertung der Berieselungsversuche [32]

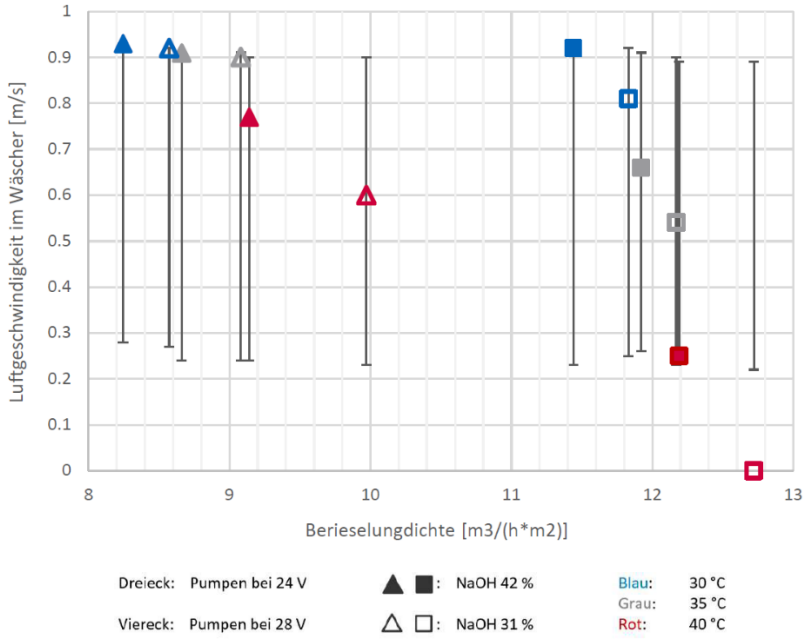

Abbildung 63: Lösungsaustragsgrenzen in Abhängigkeit der Luftleerrohrgeschwindigkeit im Absorber [32]

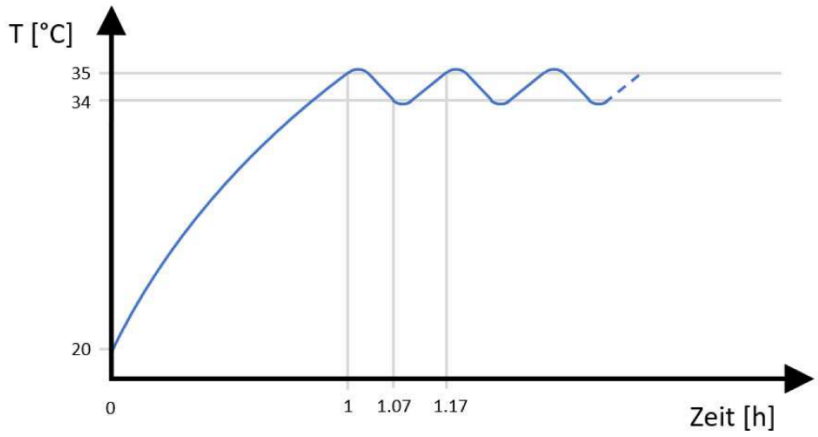

Abbildung 64: Temperaturregelung im Lösungsvorrat [32]

3.6 Betrieb der optimierten Trocknungsanlage mit saisonalen Trocknungssubstanzen (AP6)

3.6.1 Vergleichstrocknung Holderhof und optimierte Sorptive Trocknung

Zwischen den ersten Vergleichstrocknungen (Kapitel 3.3.2) und der Inbetriebnahme des optimierten Anlagendesigns liegen 2 Jahre. In der Zwischenzeit hat man die Trocknungsanlage der Holderhof Produkte AG um eine Temperatursteuerung durch Frischluftzufuhr sowie eine Luftvolumenstrom-regelung erweitert. Durch diese Massnahmen konnte der Energieverbrauch der konventionellen Trocknungsanlage auf ca. 1/3 gesenkt werden (Abbildung 69). Parallel getrocknet und untersucht wurden erneut Brennnesseln (09.05.2023), Apfelminze (22.05.2023) und Pfefferminze (20.06.2023). Die Trocknungsbedingungen sind in Tabelle 15 aufgelistet. Die Trocknungstemperatur und die Lösungskonzentrationen der Absorptionstrocknung wird entsprechend der Empfehlung durch Projektpartner Matthias Barth und den Ergebnissen der Optimierung anhand der Prozesssimulation (Kapitel 3.4.3) festgelegt. Die Betriebsparameter vom Absorber und vom Trockner (Luftgeschwindigkeiten und Berieselungsdichte) werden von den Vorversuchen übernommen. Durch die Optimierung der Trocknungsanlage am Holderhof liegt die Trocknungstemperatur niedriger als bei der Absorptionstrocknung. Dies wurde erst bei der Versuchsauswertung ersichtlich. Daraus resultierend kann eine bessere Qualität der beim Holderhof getrockneten Kräuter erwartet werden, was bei einer vergleichenden Betrachtung berücksichtigt werden sollte. Bei der Pfefferminztrocknung am 20.06.2023 wurde der Lösungsvorrat mit einer zu hoch temperierten Lösung (40 °C) befüllt, was zusätzlich zu einer anfänglich hohen Trocknungstemperatur führte.

Tabelle 15: Randbedingungen / Trocknungsparameter

Anlagenkenngrössen	**Holderhof**	**Absorptionstrockner**
Fläche Trockner	320 m^2	0.7 m^2
Masse Trocknungsgut	5000 kg	40 kg
Feuchtigkeit Trocknungsgut φ_{Anfang}, φ_{Ende}	75%, 12%	
Trocknungstemperatur	25 - 32 °C	34 - 35 °C
Luftgeschwindigkeit Trockner	0.05 – 0.1 m/s	0.1 m/s
Leerrohrgeschwindigkeit Luft in Absorber		0.5 m/s
Volumen Natronlauge		50 l
Berieselungsdichte Natronlauge		10 $m^3/(m^2*h)$ (Intervall)
Vorlaufkonzentration Lösung		45 %
Rücklaufkonzentration Lösung		30 %
Lösungswechselkonzentration		40 %

Vergleich des Trocknungsverlaufes

Beispielhaft wird die Pfefferminztrocknungen vom 20.06.2023 betrachtet.

Abbildung 65 zeigt den Temperaturverlauf im Sorptionstrockner. Die Natronlauge hatte beim Trocknungsstart eine Temperatur von 40°C. Der Sollwert der Lösungstemperaturreglung betrug 36°C. Gestartet wurde mit einer 40%igen Natronlauge, nach 24 Stunden wurde die nun auf 30% verdünnte Lauge abgepumpt und durch eine 45%ige Natronlauge ersetzt. Ersichtlich ist der Lösungswechsel an der Veränderung der Wasserbeladung (Abbildung 66). Ab einer Trocknungszeit von ca. 30 Stunden hat sich die Wasseraufnahme durch die Trocknungsluft stark verringert (Differenz der Wasserbeladung zwischen Luftein- und -austritt). Die Wasseraufnahme der Luft in der Trockenkammer kann durch eine Reduzierung des Luftvolumenstroms gegen Ende der Trocknung erhöht werden, wodurch sich der Energiebedarf reduzieren liesse.

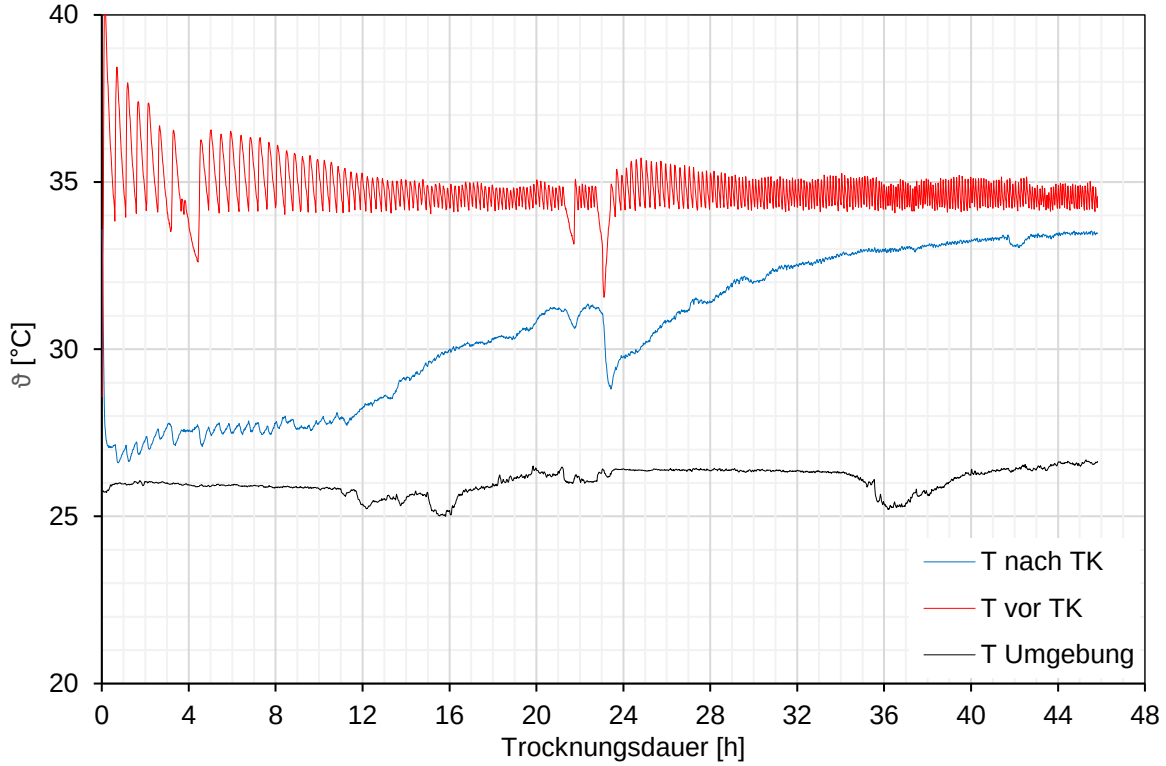

Abbildung 65: Temperaturdiagramm Pfefferminztrocknung vom 20.06.2023 mit dem optimierten Sorptionstrockner

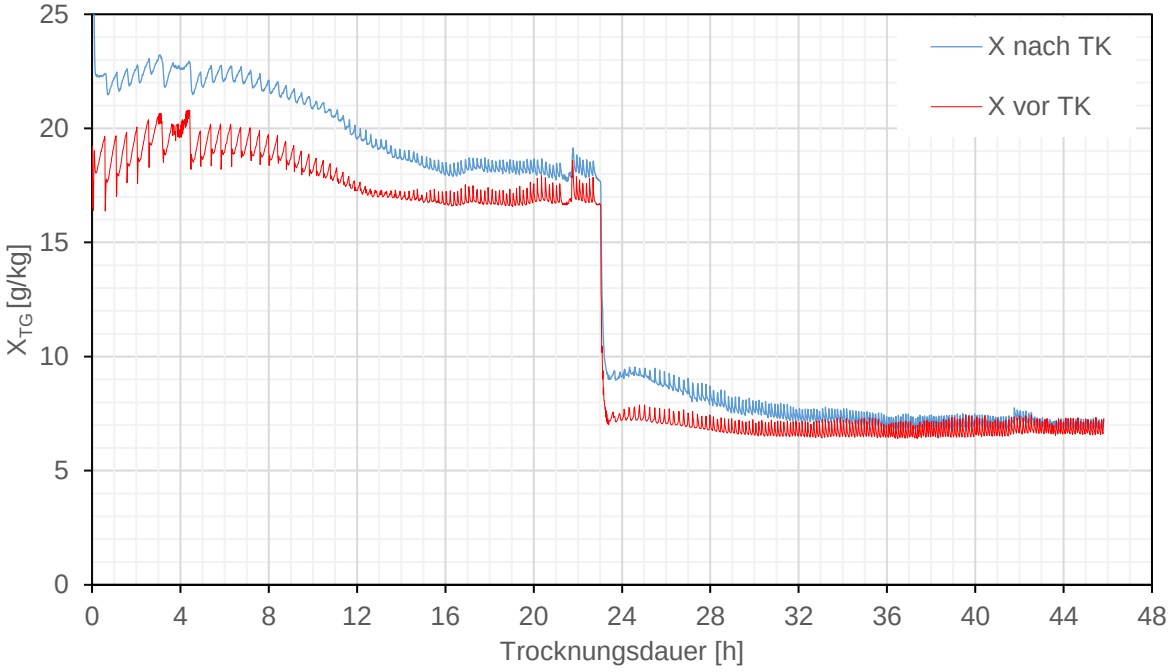

Abbildung 66: Wasserbeladung der Trocknungsluft während der Pfefferminztrocknung vom 20.06.2023 mit dem optimierten Sorptionstrockner

Die Trocknungstemperatur der konventionellen Anlage am Holderhof (Abbildung 67) liegt tiefer als bei der Absorptionstrocknung. Beim Überschreiten einer Lufttemperatur von 32°C vor der Trocknungskammer wird durch Zufuhr von Umgebungsluft die Temperatur reduziert. Ab einer Temperatur von 25°C arbeitet die Anlage wieder vollständig im Umluftbetrieb. Die Trocknung startet im Frischluftbetrieb. Durch dies Massnahme kann im ersten Trocknungsabschnitt mehr Feuchtigkeit an die Umgebung abgegeben werden, als die Luftentfeuchter im Umluftbetrieb der Trocknungsluft entziehen können.
Ein Vergleich des Verlaufes der Wasserbeladungen vor und nach der Trocknungskammer (Abbildung 66 und Abbildung 68) zeigt, dass die Trocknungsluft im Sorptionstrockner eine höhere Wasserfracht aufnimmt als in der Trocknungsanlage am Holderhof und daraus resultiert eine signifikante Verkürzung der Trocknungszeit. Hierin liegt ein Vorteil des Absorptionstrocknungsverfahrens gegenüber der konventionellen Trocknung mit Luftentfeuchtern. Das Wasseraufnahmevermögen im Luftwäscher (Absorber) ist deutlich höher, ohne signifikant die Investitions- und Betriebskosten zu erhöhen.

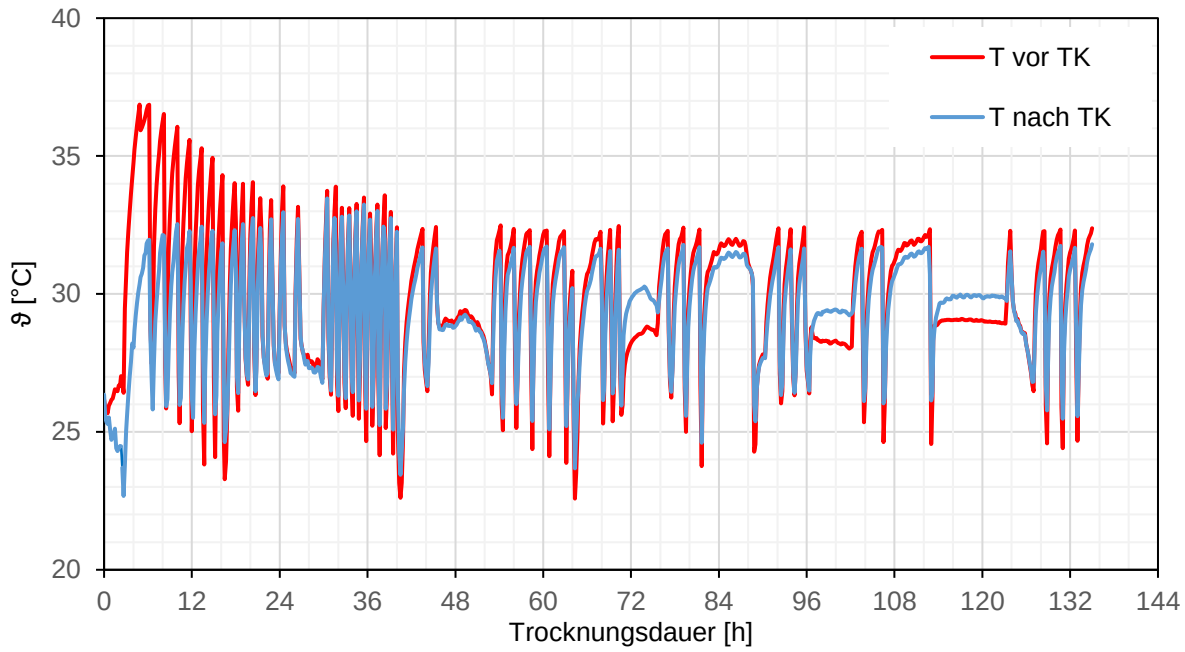

Abbildung 67: Temperaturdiagramm Pfefferminztrocknung vom 20.06.2023 im konventionellen Trockner

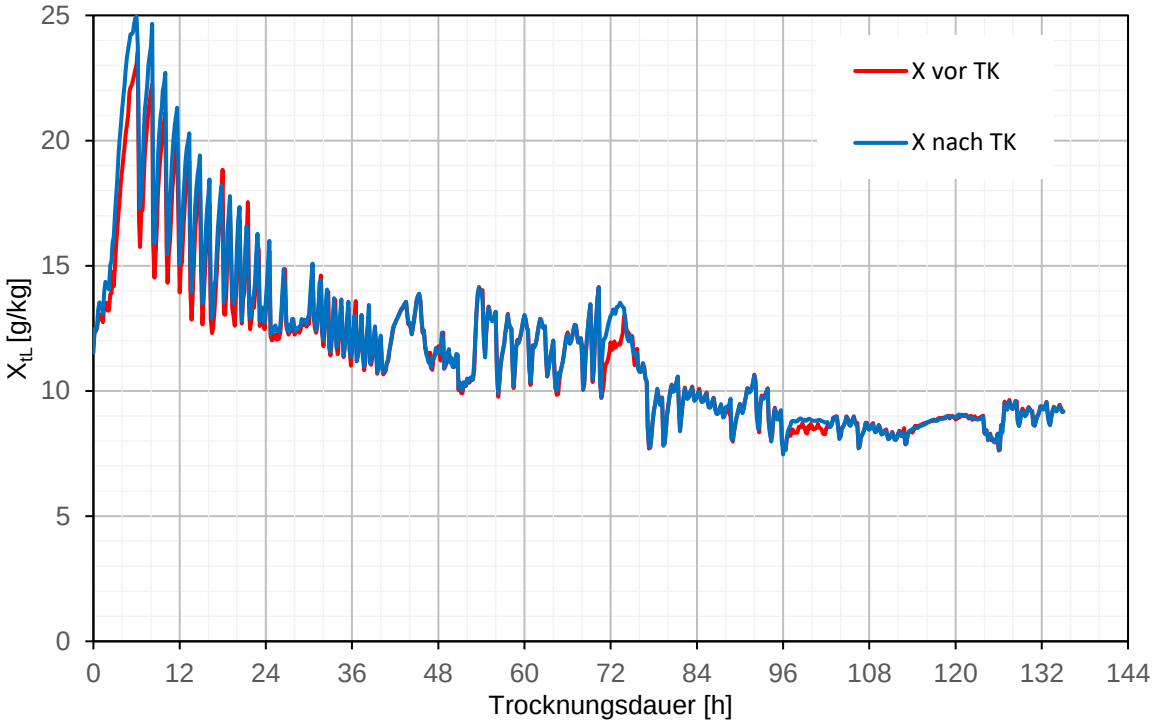

Abbildung 68: Wasserbeladung während der Pfefferminztrocknung vom 20.06.2023 im konventionellen Trockner

Qualitätsvergleich

Im Mai und Juni 2023 wurden drei Vergleichstrocknungen mit Brennnessel, Apfelminze und Pfefferminze parallel am Holderhof und an der Sorptionstrocknungsanlage durchgeführt. Für jeden Trocknungsversuch wurden 3 Proben (1x ungetrocknet, 1x je Trocknungsanlage getrocknet) entnommen und am ILGI analysiert. Die Randbedingungen der Probenahme und der Trocknung sind in Tabelle 16 vermerkt.

Tabelle 16: Randbedingungen der Vergleichstrocknungen

Trocknungsgut	Brennnessel		Apfelminze		Pfefferminze	
	Holderhof	SONITRO	Holderhof	SONITRO	Holderhof	SONITRO
Erntedatum	09.05.2023		22.05.2023		20.06.2023	
Dauer bis Trocknungsstart	0 h	20 h [1]	0 h	5 h	0 h	5 h
Trocknungsdauer	92 h	55 h	118 h	62 h [2]	136 h	47 h
Trocknungstemperatur	25-32 °C	34-35 °C	25-32 °C	30-35 °C [2]	25-32 °C	34-40 °C [3]

[1] Eine Störung an der Heizungsregelung hat den Start um 15 Stunden verzögert

[2] Probleme mit Pumpen haben dazu geführt, dass in der ersten Trocknungshälfte nicht alle Absorber ordnungsgemäss gearbeitet haben, Trocknungstemperatur etwas tiefer als geplant, Luftfeuchte etwas höher und längere Trocknungsdauer

[3] Natronlauge vor Trocknungsbeginn zu hoch temperiert

Die erhaltenen Proben wurden auf ausgesuchte Aromastoffe, sowie Gesamtpolyphenolgehalt und Ascorbinsäure (nur in Brennnessel und Apfelminze) untersucht. Zusätzlich wurden, falls verfügbar, die

frischen Kräuter, sowie die gefriergetrockneten Kräuter auf die oben genannten Inhaltsstoffe analysiert. In der nachfolgenden Tabelle sind die Probenbezeichnungen aufgeführt.

Tabelle 17: Übersicht über das unterschiedliche Material

Probencode	Spezie	Verarbeitungsart	durchgeführte Analysen
MSU_F	*Mentha suaveolens*	Frisch	GC-MS, TPC
MSU_GT		Gefriertrockung	GC-MS, TPC, Vit C
MSU_HT		Konventionelle Trocknung	GC-MS, TPC, Vit C
MSU_ST		SONITRO	GC-MS, TPC, Vit C
URT_HT	*Urtica dioica*	Konventionelle Trocknung	GC-MS, TPC, Vit C
URT_ST		SONITRO	GC-MS, TPC, Vit C
MPI_F	*Mentha piperita*	Frisch	GC-MS, TPC
MPI_HT		Gefriertrocknung	TPC
MPI_ST		Konventionelle Trocknung	GC-MS, TPC

Legende:
GC-MS: Quantifizierung ausgesuchter Aromastoffe
TPC: Bestimmung des Gesamtpolyphenolgehaltes¨
Vit C: Bestimmung des Ascorbinsäuregehaltes

Die Zielverbindungen für die Aromaanalyse wurden in Pfefferminze gemäss Literaturdaten definiert. Bei Brennnessel wurden die Verbindungen anhand vorhergehender Analysen im Rahmen des Projektes definiert (Chetschik et al., 2022; Bericht SONITRO Aromaanalytik Brennnessel). Für die Apfelminze hingegen, mussten die Aromakomponenten zunächst über Gaschromatographie-Olfaktometrie und Gaschromatographie-Massenspektrometrie identifiziert werden, was im Rahmen einer Bachelorarbeit erfolgte (BA J. Geller, 2023; Analytische Beurteilung der Aromaqualität von getrockneten Kräutern), weil es nur begrenzt Literaturdaten gab, auf die man sich bei der Auswahl der Aromastoffe für die Quantifizierung abstützen konnte. Die gewählten Methoden für die Aromaanalyse, sowie für die Bestimmung des Totalpolyphenolgehaltes und der Ascorbinsäure sind der Bachelorarbeit (J. Geller, 2023) zu entnehmen. In Folge sind die Ergebnisse der Analysen dargestellt und diskutiert.

Aromaanalytik:

Die Ergebnisse der Analyse von ausgewählten Aromastoffen in Brennnesseln sind in der Tabelle 18 zu finden. Es wurden 8 Aromastoffe in der SONITRO- und in der konventionell getrockneten Proben untersucht.

Tabelle 18: Gehalte von ausgewählten Aromastoffen in SONITRO-getrockneten und konventionell/Holderhof- getrockneten Brennnessel

Analyt	Konzentration [$\mu g * g^{-1} TM$] mit absoluter Standardabweichung	
	URT_ST	URT_HT
Hexanal°	0.7590 ± 7.615E-03	0.3410 ± 5.695E-03
1-Hexanol	0.3326 ± 1.796E-02	0.3055 ± 4.384E-02
Myrcen	1.027 ± 5.775E-02	0.6246 ± 8.969E-02
Eucalyptol	0.3774 ± 1.009E-02	1.517 ± 0.1855
Essigsäure	2.337 ± 8.844E-02	2.131 ± 4.880E-02
2-Methylbuttersäure	0.9181 ± 8.427E-03	6.801 ± 0.3461
3-Methylbuttersäure	5.244 ± 6.626E-02	17.32 ± 0.4117
Carvon	0.2131 ± 7.417E-03	22.03 ± 1.318

° = nur Doppelbestimmung durchgeführt; URT = Brennnessel, ST = SONITRO-Trocknung, HT = konventionell Trocknung (Holderhof)

Aromakomponenten, wie beispielsweise das Hexanal, das 1-Hexanol und das Myrcene, die mit Frische des Trocknungsgutes in Verbindung gebracht werden, konnten in dem SONITRO-getrockneten Material in höheren Quantitäten analysiert werden, während Komponenten wie die 2- und 3-Methylbuttersäure, die eher einer Prozessaromatik zuzuordnen sind, in dem konventionell getrocknetem Material in höheren Quantitäten zu finden waren. Interessanterweise waren die Gehalte der Terpene Carvon und Eucalyptol in dem konventionell getrockneten Trocknungsgut deutlich höher als in dem SONITRO getrocknetem Muster, wobei eine thermische Generierung dieser Aromastoffe vermutet werden kann. Dieser Befund konnte jedoch nicht bei der Apfelminze festgestellt werden, da Carvon und Eukalyptol in der konventionell getrockneten und in der SONITRO-getrockneten Probe in ähnlichen Konzentrationen zu finden waren. Bei der Quantifizierung ausgewählter Aromakomponenten in Apfelminze konnten ähnliche Trends beobachtet werden. Die Ergebnisse der Analysen sind in der Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Gehalte von ausgewählten Aromastoffen in SONITRO-getrockneten und konventionell/Holderhof- getrockneter Apfelminze

Analyt	Konzentration [$\mu g * g^{-1} TM$] mit absoluter Standardabweichung			
	MSU_F	MSU_GT	MSU_ST	MSU_HT
Ethyl-2-methylbutanoat	1.935 ± 0.1307	0.9737 ± 5.029E-02	1.065 ± 1.073E-02°	1.242 ± 2.598E-02°
α-Pinen	44.53 ± 3.788	12.75 ± 2.145*	20.33 ± 0.5110	20.57 ± 1.050
Hexanal	46.77 ± 8.521	nicht quantifizierbar[4]	44.91 ± 1.837	30.88 ± 1.670°
β-Pinen	54.96 ± 4.090	15.70 ± 2.250	27.04 ± 0.9921	29.57 ± 1.305
(Z)-3-Hexenal	628.6 ± 243.6*	Nicht nachweisbar	Nicht nachweisbar	Nicht nachweisbar
Myrcen	56.96 ± 1.974	12.19 ± 17.95	21.53 ± 0.9608	21.96 ± 1.121
Limonen	1136 ± 44.73	349.0 ± 54.95*	544.9 ± 24.27	533.7 ± 28.28
Eucalyptol	370.8 ± 26.37	129.3 ± 9.509	169.1 ± 7.767	174.0 ± 5.753
Linalool	5.236 ± 0.2460	4.067 ± 0.1813	4.609 ± 3.950E-02	4.110 ± 0.2010
β-Caryophyllen	143.3 ± 7.725	101.49 ± 9.52	153.9 ± 2.457	132.4 ± 9.185
Carvon	5825 ± 185.2	4971 ± 170.4	5052 ± 70.15	4332 ± 198.3
(Z)-Carveol	14.41 ± 0.5970	12.27± 0.8468	10.34 ± 0.1717	9.468 ± 0.7924
Eugenol	Nicht quantifizierbar[5]			

* = Standardabweichung >15%; ° = nur Doppelbestimmung für die Berechnung verwendet; MSU = Apfelminze, F = Frisch, ST = SONITRO, HT = konventionelle Trocknung (Holderhof)

Zusätzlich zu dem Vergleich SONITRO vs. konventionelle Trocknung, wurde die frische, unbehandelte Probe, sowie die gefriergetrocknete Probe analysiert, um mehr Aufschluss auf den Einfluss der unterschiedlichen Trocknungsarten auf die ursprüngliche Aromatik der Apfelminze zu evaluieren. Die Resultate zeigen, dass fast alle Aromastoffe im frischen Material in höheren Quantitäten zu finden waren. (Z)-3-Hexenal, konnte nur in der frischen Probe analysiert werden. Zwischen der SONITRO und der konventionellen Trocknung konnte hingegen kein eindeutiger Trend beobachtet werden. Verbindungen wie Carvon, Linalool, (Z)-Carveol und Hexanal konnten in SONITRO-getrockneter Apfelminze in höheren Quantitäten als in der konventionell getrockneten Apfelminze festgestellt werden, während für die anderen Verbindungen kaum Unterschiede festgestellt werden konnten. Bei dem gefriergetrockneten Material wurden dagegen einige Verbindungen in tieferen Quantitäten im Vergleich zu den konventionell- und SONITRO getrockneten Proben analysiert. Auch wenn Gefriertrocknung als eine sehr schonende Trocknungsart bekannt ist, werden bei dieser Methode flüchtige Verbindungen durch den Sublimationsprozess des Wassers aus dem Trocknungsgut abgezogen, wodurch es nachvollziehbar ist, dass bei dieser Trocknungsart die grössten Verluste für die Aromastoffe zu verzeichnen sind.

Während die Unterschiede hinsichtlich ausgewählter Aromastoffe im konventionellem Trocknungsgut vs. SONITRO-getrockneter Apfelminze eher verhalten ausgefallen sind, konnten insgesamt mehr Aromastoffe in der SONITRO-getrockneten Pfefferminze im Vergleich zu der konventionell getrockneten Pfefferminze festgestellt werden. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Gehalte von ausgewählten Aromastoffen in SONITRO-getrockneten und konventionell/Holderhof- getrockneter Pfefferminze

Analyt	Konzentration [$\mu g * g^{-1} TM$] mit absoluter Standardabweichung		
	MPI_F	MPI_ST	MPI_HT
α-Pinen	138.0 ± 6.896	78.78 ± 3.380	61.39 ± 0.5570
β-Pinen	129.7 ± 5.947	74.52 ± 2.044	59.30 ± 0.7792
Myrcen	190.3 ± 5.101	96.69 ± 3.627	80.86 ± 1.366
Eucalyptol	1'059 ± 15.86	594.4 ± 22.51	381.8 ± 3.036
Limonen	190.9 ± 7.235	121.6 ± 5.934	224.6 ± 3.658
Linalool	130.6 ± 5.740	134.0 ± 0.2403	72.09 ± 2.518
Piperiton	499.1 ± 11.58	488.5 ± 9.644	230.0 ± 9.335
Menthon	20'848 ± 364.1	16'756 ± 396.2	11'066 ± 192.3
Menthol	3'043 ± 15.72	2'868 ± 71.89	1'949 ± 63.10

Die Mittelwerte stammen aus jeweils drei Replikaten (n = 3).

MPI = Pfefferminze, F = frisch, ST = SONITRO-Trocknung, HT = konventionell Trocknung (Holderhof)

Auch hier wurden die höchsten Gehalte für die ausgewählten Aromastoffe im frischen Material detektiert. Bis auf das Limonen, das in der konventionell getrockneten Pfefferminze interessanterweise in der höchsten Konzentration analysiert werden konnte, wurden höhere Gehalte an ausgewählten Aromastoffen in der SONITRO Probe im Vergleich zu der konventionell getrockneten Probe nachgewiesen.
Im Vergleich zu den andren Kräutern, konnten insbesondere in der Pfefferminze hohe Quantitäten an ausgesuchten Aromastoffen in der SONITRO-Probe im Vergleich zu der traditionell getrockneten Probe analysiert werden, was auf die deutlich kürzere Trocknungszeit (auch wenn bei höheren Temperaturen) der SONITRO-Trocknung zurückgeführt werden kann. Bei Apfelminze- und der Brennnesseltrocknung war die Differenz zwischen den Trocknungszeiten nicht so ausgeprägt wie bei Pfefferminze, was unteranderem als ein möglicher Grund für die weniger deutlichen Unterschiede hinsichtlich der Gehalte von ausgewählten Aromakomponenten in den unterschiedlich getrockneten Kräutern (SONITRO vs. konventionell) angesehen werden kann.

Gesamtpolyphenolgehalt:

Neben den ausgesuchten Aromastoffen, wurde auch der Gesamtpolyphenolgehalt sowohl in den frischen als auch in den getrockneten Kräutern gemessen. Der Gesamtpolyphenolgehalt kann als ein Qualitätsindikator angesehen werden, da Polyphenole für ihre antioxidative und gesundheitsfördernde Wirkung bekannt sind. Bei der Analyse des Gesamtpolyphenolgehaltes werden alle phenolischen Komponenten mittels eines photometrischen Assays detektiert. Bei pflanzlichen Rohstoffen mit einem hohen Gesamtpolyphenolgehalt, wird davon ausgegangen, dass mehr phenolische Verbindungen vorhanden sind, was in einer höheren antioxidativen Wirkung des Rohstoffes resultiert. Der Assay für die Bestimmung des Gesamtpolyphenolgehaltes reagiert nicht rein selektiv auf phenolische Substanzen und eine Reaktion mit Reduktonen, die ebenfalls bei Trocknungsprozessen entstehen, sind ebenfalls bekannt. In der Tabelle 21 sind die ermittelten Gesamtpolyphenolgehalte der analysierten Kräuter dargestellt.

Tabelle 21: Gehalte von ausgewählten Aromastoffen in SONITRO-getrockneten und konventionell/Holderhof- getrockneter Pfefferminze

Probe	Gesamtphenolgehalt $[mg\ GAS * g^{-1}\ TM]$ mit abs. Standardabweichung	Prozentuale Standardabweichung
MSU_F	53.12 ± 1.379	2.59
MSU_GT	99.01 ± 11.26	11.4
MSU_ST	91.44 ± 3.723	4.07
MSU_HT	75.74 ± 4.386	5.79
URT_ST°	50.83 ± 2.86	5.62
URT_HT	18.47 ± 2.333	12.6
MPI_GT	49.75 ± 5.790	11.6
MPI_ST	84.74 ± 5.139	6.06
MPI_HT	72.59 ± 1.890	2.60

Die Mittelwerte stammen aus jeweils drei Replikaten (n = 3), {mit ° markiert nur Doppelbestimmung (n = 2)}.

URT = Brennnessel, MSU = Apfelminze, MPI = Pfefferminze, F = Frisch, GT = Gefriertrocknung, ST = SONITRO-Trocknung, HT = konventionelle Trocknung (Holderhof)

Insgesamt konnte ein höherer Gesamtpolyphenolgehalt in SONITRO-getrockneten Kräutern als in konventionell getrockneten Kräutern festgestellt werden. Bei der frischen Apfelminze war der Gesamtpolyphenolgehalt tiefer als in den getrockneten Kräutern, was wie bereits oben erwähnt,

vermutlich auf die grössere Konzentration von Reduktonen, die bei den Trocknungsprozessen gebildet werden, zurückzuführen ist. Für die gefriergetrockneten Proben konnte kein einheitlicher Trend festgestellt werden. Bei der Apfelminze konnten höhere Gehalte in der gefriergetrockneten Probe im Vergleich zu der SONITRO- und konventionell getrockneten Probe identifiziert werden, während bei der Pfefferminze die Gehalte der gefriergetrockneten Probe tiefer als die der SONITRO- und konventionell getrockneten Probe waren.

Ascorbinsäure:

Neben den ausgesuchten Aromakomponenten und dem Gesamtpolyphenolgehalt, wurde auch die Ascorbinsäure als qualitätsprägender Indikator in Brennnesseln und Apfelminze analysiert. In den Pfefferminzmustern wurde dieser Inhaltsstoff aufgrund der geringen Konzentration nicht analysiert. Die Resultate der Untersuchungen sind nachfolgend in der Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Gehalte von Ascorbinsäure in SONITRO-getrockneten und konventionell/Holderhof- getrockneter Kräutern

Probe	Ascorbinsäure [$ug * g^{-1} TM$] mit abs. Standardabweichung	Prozentuale Standardabweichung
MSU_F	nicht nachweisbar	-
MSU_GT	1597 ± 75.8	4.74
MSU_ST	157.2 ± 10.9	6.94
MSU_HT	64.47 ± 4.69	7.27
URT_ST	443.8 ± 19.91	4.48
URT_HT	134.4 ± 4.733	3.52

URT = Brennnessel, MSU = Apfelminze, F = Frisch, GT = Gefriertrocknung, ST = SONITRO-Trocknung, HT = konventionelle Trocknung (Holderhof)

Insgesamt konnten höhere Ascorbinsäuregehalte in den SONITRO-getrockneten Proben analysiert werden. Interessanterweise konnte in der gefriergetrockneten Probe der Apfelminze ein noch höherer Gehalt als in der SONITRO-getrockneten Probe festgestellt werden, was darauf zurückgeführt werden kann, dass die Gefriertrocknung als eine sehr schonende Trocknungsart für Lebensmittelrohstoffe ist. Aufgrund des Verlustes der gefriergetrockneten Probe der Pfefferminze, konnte diese Beobachtung nicht in der Pfefferminze konsolidiert werden.

Fazit:

Generell lässt sich vermuten, dass die Trocknungssettings (Temperatur/Luftfeuchtigkeit am Eintritt der Trocknungskammer) einen grossen Einfluss auf die Gehalte der wertgebenden Inhaltsstoffe im Trocknungsgut haben. Darüber hinaus, sollte auch berücksichtigt werden, dass die Morphologie der Kräuter einen wichtigen Einfluss auf die Gehalte von ausgesuchten Inhaltsstoffen im Trocknungsgut aufweisen. Im Falle der flüchtigen Verbindungen kann es zu einem unterschiedlichen Abdampfverhalten bei der Trocknung kommen.
In weiteren Untersuchungen sollten idealerweise gleiche technologische Settings bei der Trocknung der Kräuter angewendet werden, um den Einfluss der unterschiedlichen Methoden besser miteinander vergleichen zu können. Dabei sollte ebenfalls auf ähnliche Standzeiten des zu trocknenden Gutes vor der Trocknung Wert gelegt werden. Bei langen Standzeiten kann es zu einer chemischen Veränderung des Trocknungsgutes kommen, was unteranderem einen Einfluss auf Gehalte der wertgebenden Inhaltsstoffe haben kann. Darüber hinaus sollten idealerweise die unterschiedlichen Trocknungen wiederholt werden, um sicherzustellen, dass die unterschiedlichen Trocknungstechnologien reproduzierbar anwendbar sind und sich in der gleichen Art und Weise auf die Gehalte von ausgewählten Inhaltsstoffen auswirken.

3.6.2 Optimierung des Betriebsaufwandes

In Abbildung 69 wird der gemessene, spezifische Energiebedarf für beide Trocknungsanlagen aufgeschlüsselt nach den Anlagenkomponenten dargestellt. Zum Vergleich ist der in Kapitel 3.3.2 beschriebene Betriebsaufwand aus den Vergleichstrocknungen im Jahr 2021 dargestellt.
Die Zielvorgaben (Abbildung 33) bezüglich des Energiebedarfes von Ventilator und Lösungspumpe konnten durch die optimierte Strömungsgeometrie, Intervallberieselung und den Einsatz passenderer Komponenten erreicht beziehungsweise unterboten werden. (Reduzierung des Energieaufwandes für Ventilator und Lösungspumpe «SONITRO 2021» und «SONITRO Pfefferminze 20.06.2023»)
Seit dem ersten Vergleich des Betriebsaufwandes ist die konventionelle Trocknungsanlage vergrössert und mit gewonnen Erkenntnissen aus der Analyse der Vergleichstrocknungen optimiert worden. Die neuen Trocknungskammern sind mit 2 Luftentfeuchtern ausgestattet, von denen einer während der Trocknung abgeschaltet werden kann, und zudem sind Lüftungsklappen vorhanden, die einen Frischluftbetrieb ermöglichen. (Reduzierung des Energieaufwandes für Ventilator und Entfeuchter «Konventioneller Trockner 2021» und «Konventioneller Trockner 2023»)
Auffallend ist der hohe Energiebedarf für die Temperierung der Lösung im Sorptionstrockner (Heizung, «SONITRO Pfefferminze 20.06.2023»). Dieser ist zurückzuführen auf die höhere Trocknungstemperatur (im Vergleich zur konventionellen Trocknung) und den Verzicht auf eine Isolation des Sorptionstrocknungsapparates.

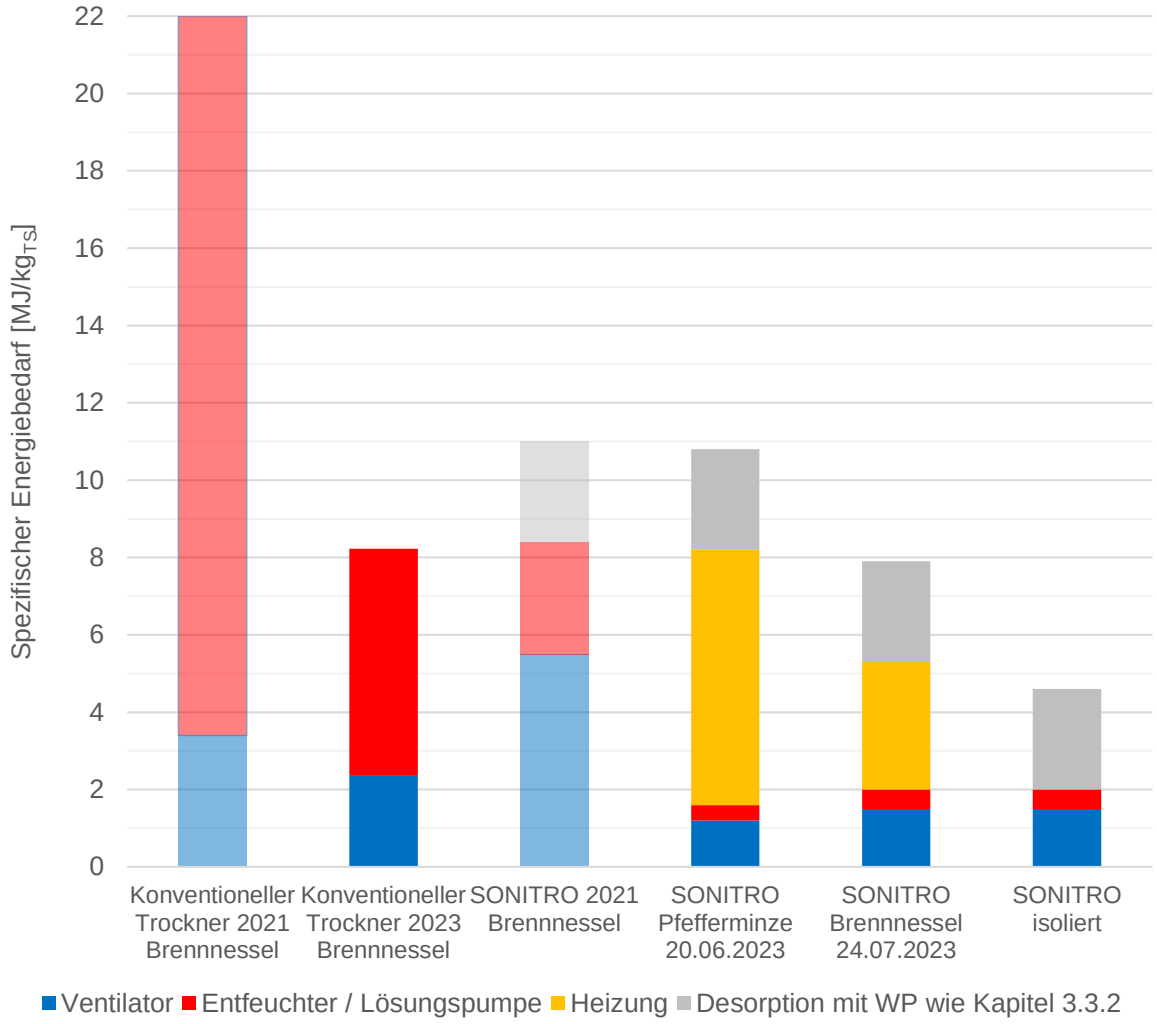

Abbildung 69: Energiebilanz

Mit einem zusätzlichen Trocknungsversuch am Absorptionstrockner (Brennnessel, 24.07.2023, Abbildung 70) wurde untersucht, wie sich der Heizwärmebedarf durch die Absenkung der Trocknungstemperatur, bzw. den Verzicht auf das Beheizen der ersten Trocknungsphase, verändert. Wie in Abbildung 69 ersichtlich ist, konnte der Heizenergiebedarf um 50% gesenkt werden. Der Energiebedarf für Ventilator und Lösungspumpe ist dabei um 25% angestiegen, da sich die Trocknungsdauer verlängert hat.

Eine weitere Massnahme, den hohen Heizwärmebedarf zu senken, besteht darin, die Anlage zu isolieren. Nach einer überschlägigen Berechnung können die Wärmeverluste mit einer Isolationsschicht > 6 cm vermieden werden.

Wie im Kapitel 3.6.1 bereits erwähnt, kann der Energiebedarf des Ventilators durch eine Reduzierung des Luftvolumenstroms zum Ende der Trocknung gesenkt werden.

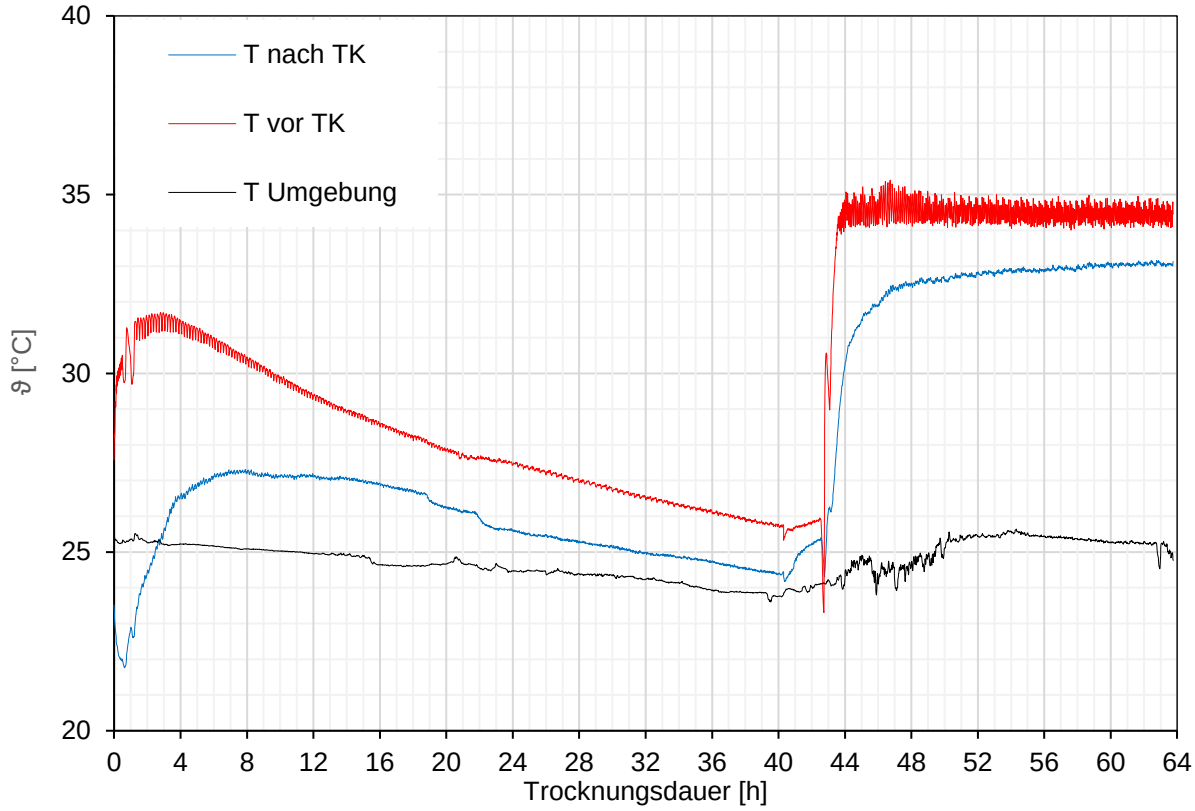

Abbildung 70: Temperaturdiagramm Brennnesseltrocknung vom 24.07.2023

4 Schlussfolgerungen und Fazit

4.1 Projektierung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsanlage

Die Planung, der Aufbau sowie die Inbetriebnahme der Trocknungsanlage verliefen, bis auf den im Kapitel 3.1.1 erwähnten Schaden am Absorber, reibungslos. Aufgrund der Erfahrung wurde das Sicherheitskonzept der Anlage verbessert. Sowohl eine Überhitzung der Anlage, als auch ein unkontrolliertes Austreten von Lösung sowie ein Trockenlaufen der Umwälzpumpen wird im unbeaufsichtigten Betrieb sicher verhindert.

4.2 Vorversuche mit Modellsubstanzen

Der Anlagenbetrieb konnte unter realen Bedingungen getestet werden. Das Arbeitsmittel NaOH zeigte sich als gut handhabbar. Mit den zur Verfügung stehenden mathematischen Modellen, lassen sich die zu erwartenden Phasengleichgewichte gut vorhersagen. Der Natriumcarbonatumsatz weist mit 2.3 % NaOH-Abbau einen geringeren Wert aus als dies erwartet wurde.

4.3 Versuchsbetrieb mit saisonalen Trocknungssubstanzen

Die Absorptionstrocknung funktioniert gut, Kräuter können gezielt und zuverlässig bis zur angestrebten Endfeuchte von 12% getrocknet werden. Chemische Veränderungen am Trocknungsgut hinsichtlich Aussehen, Geruch und Geschmack wurden nicht festgestellt. Eine Energieverbrauchsanalyse zeigt ein Energieeinsparpotential von 75% auf.

4.4 Simulation

Eine Absorptionstrocknungsanlage benötigt aufgrund der höheren Trocknungsgeschwindigkeit weniger Trocknerfläche als eine konventionelle Anlage. Der Wärmebedarf für die Regeneration der Lösung kann durch eine Solarthermieanlage gewonnen werden, welche eine Fläche benötigt, die in etwa 50% der Fläche der Trocknungskammer entspricht. Das benötigte Speichervolumen beträgt ca. 0.5 m^3 pro m^2 Trocknungsfläche. Mit dem Sorptionstrocknungsprozess kann die Trocknungsdauer auf ca. 50% reduziert werden.

4.5 Optimierung des Anlagendesigns

Die im Verlauf des Testbetriebes gewonnenen Erkenntnisse konnten erfolgreich in einem neuen Anlagendesign umgesetzt werden. Die neu aufgebaute Trocknungsanlage vereint Absorber und Trocknungskammer. Die prognostizierte Energieeinsparung von 75% konnte aufgrund des hohen Heizwärmebedarfs für die Lösungstemperierung noch nicht erreicht werden. Wie der Versuch vom 24.07.2023 (Abbildung 70) zeigt, ist im ersten Trockenabschnitt keine Temperierung notwendig. Wärmeverluste können auch zum Trocknungsende (erhöhte Trocknungstemperatur) durch eine Wärmeisolation der Luftkanäle soweit reduziert werden, dass keine Zusatzbeheizung notwendig ist.
Ein weiteres Potential zur Reduzierung des Energiebedarfes besteht in der intelligenten Umluftregelung. Wie in Kapitel 3.6.1 erwähnt, erfolgt die Beladung der Trocknungsluft mit Wasser aus dem Trocknungsgut über den Trocknungsverlauf nicht gleichmässig. Reduziert man den Luftvolumenstrom am Ende der Trocknung, kann dadurch die Wasseraufnahme der Luft erhöht werden.
Die optimierte Trocknungsanlage kann für Kleinchargen (z.B. pharmazeutische Trocknungsgüter) gut eingesetzt werden. Dank der vollautomatisierten Prozesssteuerung (Kapitel 3.5.1) und dem Rührwerk

(Kapitel 3.3.1) kann das Trocknungsgut mit geringem Aufwand getrocknet werden. Der modulare Anlagenaufbau ermöglicht einen unkomplizierten Einsatz der Anlage an verschiedenen Orten. So können mit dieser Anlage zukünftig neue Anwendungsbereiche erschlossen werden.
Der modulare Aufbau der optimierten Trocknungsanlage kann auch für grosse Trocknungsanlagen, wie sie z.B. am Holderhof eingesetzt werden, übernommen werden. Ähnlich wie in der Kleinanlage können die Absorbermodule (mit Ventilator) in beliebiger Zahl unter der Trocknungskammer angeordnet werden (Abbildung 71). Die Lösungsversorgung erfolgt über einen zentralen Lösungsvorrat mit Pumpen und ggf. Temperierung. Das Verhältnis von Trocknerfläche zu Absorberfläche beträgt ca. 5:1.

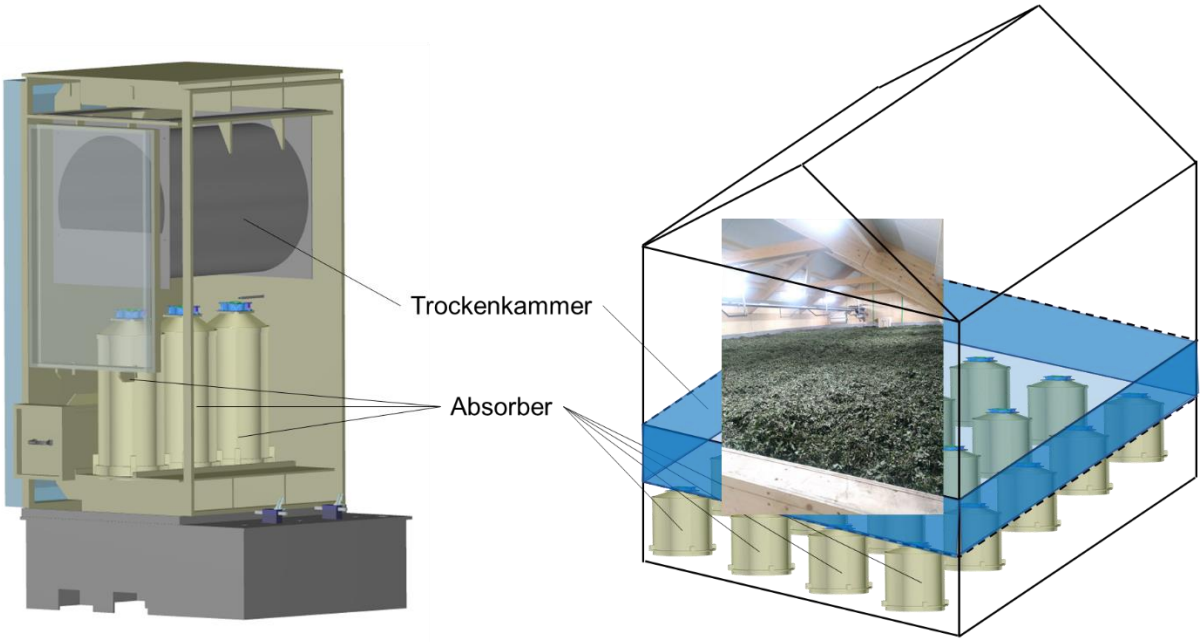

Abbildung 71: Aufbau Demonstrationsanlage / grosse Trocknungsanlage

4.6 Betrieb der optimierten Trocknungsanlage

Anhand mehrerer Vergleichstrocknungen (Kapitel 3.6.1) und Produktanalysen am ILGI konnte praktisch nachgewiesen werden, dass mit dem Sorptionstrocknungsverfahren eine gleichwertige bis höhere Produktqualität der sorptionsgetrockneten Kräuter im Vergleich zu Proben aus der konventionellen Trocknung erreicht wird.
Mit der Absorptionstrocknung kann die Trocknungszeit - wie prognostiziert - um 50% verkürzt werden. Abgesehen vom Heizwärmebedarf, welcher durch eine Wärmeisolation der Anlage vermieden werden kann, konnte der Bedarf an elektrischer Energie für den Absorptionstrocknungsprozess auf ein Viertel des konventionellen Prozesses reduziert werden.

5 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Der modulare und skalierbare Aufbau mit mehreren kleinen Absorbern und das unkomplizierte Steuerkonzept sind in bestehenden und neu zu errichtenden Trocknungsanlagen einfach umsetzbar. Noch nicht verfügbar sind periphere Komponenten wie Speicher, Regenerationsanlagen und Transportleitungen. Eine zukünftige Anwendung des sorptiven Trocknungsverfahrens benötigt die Verfügbarkeit solcher Komponenten.
Die im Projekt entwickelte transportable Demonstrationsanlage kann für Testanwendungen an verschiedenen Orten genutzt werden, um neue Anwendungsmöglichkeiten zu erschliessen.
Die sorptionsgestützte Trocknung kann auch in ein s.g. Thermochemisches Energieversorgungsnetzwerk integriert werden, wodurch überschüssige Energiepotentiale und Abwärmequellen effizient genutzt werden können.

6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das SONITRO-Projekt basiert auf Absorptionsprozessen zur Regulierung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit von Luft und Gasen. In SONITRO wird die so getrocknete Luft zum Trocknen von Kräutern verwendet.

Das IEFE koordiniert Projekt «*TheGreefa, Thermochemical fluids greenhouse farming*» (Grant Agreement-101000801), das im Oktober 2020 innerhalb des Programmes H2020 gestartet ist und eine Laufzeit bis Mai 2024 hat. Das Konsortium von TheGreefa besteht aus 12 Partners aus 7 Ländern Europas und Afrika. Das Thema ist die Senkung der CO_2-Emissionen in der Landwirtschaft: TheGreefa wird die Umsetzung der Absorption-Technologie in Gewächshäusern für Luftklimatisierung und Wasserzurückgewinnung von der Feuchtigkeit demonstrieren. Obwohl der Schwerpunkt des Projekts auf dem Gewächshaus liegt, wird TheGreefa auch die sorptive Trocknung von Lebensmitteln und Pflanzen betrachten, indem Trocknungsversuchen von neuen Substanzen und unten verschiedenen Randbedingungen und evtl. Konstruktionen durchgeführt werden. Neben der technischen Machbarkeit in verschiedenen Klimazonen werden Marktanalysen durchgeführt, die ökonomische, politische und soziale Randbedingungen analysiert, Fallstudien durchgeführt und Business Cases entwickelt, die als Basis der Industrialisierung dieser Technologie dienen. Um diese Technologie breit bekannt zu machen und so sie in weiteren Anlagen realisieren zu können, sind Verbreitungs- und Kommunikationsaktivitäten, inkl. Workshops auf europäischen und nordafrikanischen Ebenen vorgesehen.

Die sorptive Trocknung stellt eine von vielen Anwendungen der offenen Absorptionsprozesse dar. Neben dem Projekt TheGreefa wird die sorptive Klimatisierung in Gewächshäusern innerhalb vom BfE-Programm Demo- und Pilotprojekte *SI-502038-1* und in Energieversorgungsnetzen innerhalb vom BfE-Projekt TCology, *SI-502368* untersucht.

Untersuchungen und Machbarkeitstudien für sorptive Klimatisierung von historischen Gebäuden laufen gerade auf der Klosterinsel Rheinau zusammen mit dem Hochbauamt Kanton ZH.

7 Kommunikation

Ein Workshop über «Thermochemische Energieversorgungsnetze» wird am 13. September 2023 in Wangen bei Dübendorf und Winterthur stattfinden. Das ZHAW-IEFE wird die Aktivitäten in diesem Bereich vorgestellt und die entsprechenden Anlagen, unten anderen die SONITRO-Anlage, können besichtigen werden.

Die Verbreitung der sorptiven Technologie für Gewächshäuser und Trocknungsanlage wird in Zusammenarbeit mit dem Konsortium des H2020-Projekt TheGreefa auf internationale Ebene. TheGreefa ist Partner des Clustern AreaZero (www.area-zero.eu), einer Allianz von sechs H2020-Projekte, deren Ziel es ist, bei der Umsetzung von Technologien, Techniken oder Strategien zur Reduzierung schädlicher Emissionen, saubererer Energie und verbesserter Energieeffizienz im Agrarsektor durchzuführen.

8 Publikationen

Publikationen sind für Anfang 2024 vorgesehen.

9 Literaturverzeichnis

[01] Energiebedarf der Schweizer Landwirtschaft: aktueller Stand und Verbesserungsmöglichkeiten, Bericht des Bundesrates vom 21.06.2017

[02] A. Sharma, C.R. Chen, N.V. Lan: Solar-energy drying systems: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) S. 1185–1210

[03] Grammer Solar GmbH: Solare Hackschnitzeltrocknung bestens bewährt (Waldservice Ortenau GmbH, Ohlsbach /D), https://grammer-solar.com/de/home/aktuelles-interessantes/solare-hackschnitzeltrocknung-bestens-bewaehrt.html, veröffentlicht: 04.07.2019

[04] ee-news: 1300 m^2 Luftkollektoren: Trocknen Holzhackschnitzel und Heuballen mit Sonnenenergie (Land- und Forstwirt Alois Grubmüller, Schöllnach / D), https://www.ee-news.ch/de/search?q=1300+m2+Luftkollektoren, veröffentlicht: 16.11.2018

[05] T. Ziegler: Leitfaden Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen, Bornimer Agrartechnische Berichte Nr. 94 (2017)

[06] T. Bergmann, C. Koller, S. Danesi: Sorptive Niedertemperaturtrocknung, Bericht zum Innovationsscheck der Innosuisse Gesuch Nr. 34634.1 INNO-EE

[07] J. Kaufmann, F. Winnefeld (EMPA): Wärmespeicher aus Spezialbeton, Vortrag zum IG-Treffen SP/WT des energie-cluster.ch am 14.04.2015

[08] Horizon2020-Projekt DryFiciency (grant agreement No. 723576), http://dry-f.eu

[09] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2018, Bundesamt für Energie (BFE)

[10] Horizon2020-Projekt H-DisNet (grant agreement No. 695780), https://www.h-disnet.eu

[11] S. Danesi, C. Koller und T. Bergmann: Thermochemische Energieversorgungsnetzwerke, 20. Status-Seminar "Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt", ETH-Zürich 2018

[12] Swisstea: https://swisstea.ch/de/

[13] M. Sollberger und M. Zweifel: Modellierung eines adiabaten Absorbers und praktische Untersuchungen an einer Absorptionsanlage, Bachelorarbeit, IEFE - ZHAW, 2019

[14] Projektabschluss Innovationsscheck Projekt-Nr. 34634-1 INNO-EE

[15] S. Dina, H. Ambarita, F. Napitupulu und H. Kawai: Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans, Case Studies in Thermal Engineering Nr. 5 (2015) S. 32 - 40

[16] K. Nagaya, Y. Li, Z. Jin, M. Fukumuro, Y. Ando und A. Akaishi: Low-temperature desiccant-based food drying system with airflow and temperature control, Journal of Food Engineering Nr. 75 (2006) S. 71 - 77

[17] J. Atuonwu, X. Jin, G. van Stratena, H. van Deventerb und A. van Boxtel: Reducing energy consumption in food drying: opportunities in desiccant adsorption and other dehumidification strategies, Procedia Food Science Nr. 1(2011) S. 1799 - 1805

[18] T. Thoruwa, C. Johnstone, A. Grant und J. Smith: Novel, low cost $CaCl_2$ based desiccants for solar crop drying applications, Renewable Energy Nr. 19 (2000) S. 513 - 520

[19] M. Dorouzi, H. Mortezapour, H. Akhavan und A. Moghaddam: Tomato slices drying in a liquid desiccant-assisted solar dryer coupled with a photovoltaic-thermal regeneration system, Solar Energy Nr. 162 (2018) S. 364 - 371

[20] J. Addy, M. Jaradat, D. Fleig, K. Vajen und U. Jordan: Experimentelle Untersuchung an einer offenen Absorptionsanlage zur Heutrocknung, DKV-Tagung AA II. 1, Düsseldorf 2014

[21] T. Päßler, U. Eicker: Entwicklung einer Konvektionstrocknungsanlage mit Lufttrocknung durch solarthermisch regenerierte Flüssigsorptionsmittel, Proceedings of the 18th Symposium Thermische Solarenergie, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Bad Staffelstein 2008

[22] BMBF-Projekt OpenSorp (Förderkennziffer: 03SF0444)

[23] R. Weber und V. Dorer: Saisonale Wärmespeicherung mit Natronlauge (NaOH), 15. Schweizerisches Status-Seminar "Energie- und Umweltforschung im Bauwesen", ETH-Zürich 2008

[24] K. Stephan, M. Schmitt, D. Hebecker und T. Bergmann: Dynamics of a heat transformer working with the mixture NaOH-H2O, Int. J. Refrig. Bd. 7 Nr. 20 (1997) S. 483 – 495

[25] M. Kraume: Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik – Grundlagen und apparative Umsetzung, Springer Verlag, Berlin (2019)

[26] S. Wolf, U. Fahl, M. Blesl, A. Voß, R. Jakobs: Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland, Universität Stuttgart. Stuttgart (2014). S. 8

[27] J.F. Gülich: Kreiselpumpen Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb. Springer Verlag, Berlin (2020). S. 56

[28] P. Büchi und L. Vontobel: Entwicklung einer sorptiven Niedertemperaturtrocknungsanlage für Kräuter, Projektarbeit, IEFE-ZHAW, 2020

[29] M. Berri und D. Gagliardino: Praktische Untersuchungen an einer Trocknungsanlage für Kräuter, Projektarbeit, IEFE-ZHAW, 2022

[30] https://www.energieschweiz.ch/tools/solarrechner/

[31] V. Quaschning: Regenerative Energiesysteme, Hanser Verlag, München (2022), S70ff

10 Anhang

Wasserdampfdruck nach Antoine:

$p_W^{LV}(T) = 10^{A-\frac{B}{C-T}}$

Gültigkeitsbereich: 0 – 100 °C

A = 10.32907

B = 1642.89

C = 230.3

Trocknungsprogramm

Tabelle 23: Beispielhaftes Trocknungsprogramm

Datum Trocknungs-beginn	Masse feuchtes Trocknungsgut [kg]	Datum Trocknungs-beginn	Masse feuchtes Trocknungsgut [kg]	Datum Trocknungs-beginn	Masse feuchtes Trocknungsgut [kg]
01.06.2022	1501	01.08.2022	1501	01.10.2022	0
02.06.2022	0	02.08.2022	4502	02.10.2022	0
03.06.2022	4502	03.08.2022	0	03.10.2022	1501
04.06.2022	0	04.08.2022	1501	04.10.2022	0
05.06.2022	0	05.08.2022	4502	05.10.2022	4502
06.06.2022	1501	06.08.2022	0	06.10.2022	0
07.06.2022	4502	07.08.2022	0	07.10.2022	1501

08.06.2022	0	08.08.2022	1501	08.10.2022	0
09.06.2022	1501	09.08.2022	0	09.10.2022	0
10.06.2022	0	10.08.2022	4502	10.10.2022	4502
11.06.2022	0	11.08.2022	0	11.10.2022	1501
12.06.2022	0	12.08.2022	1501	12.10.2022	0
13.06.2022	4502	13.08.2022	0	13.10.2022	4502
14.06.2022	1501	14.08.2022	0	14.10.2022	1501
15.06.2022	4502	15.08.2022	4502	15.10.2022	0
16.06.2022	0	16.08.2022	1501	16.10.2022	0
17.06.2022	1501	17.08.2022	0	17.10.2022	4502
18.06.2022	0	18.08.2022	4502	18.10.2022	0
19.06.2022	0	19.08.2022	1501	19.10.2022	1501
20.06.2022	4502	20.08.2022	0	20.10.2022	0
21.06.2022	1501	21.08.2022	0	21.10.2022	4502
22.06.2022	0	22.08.2022	4502	22.10.2022	0
23.06.2022	4502	23.08.2022	0	23.10.2022	0
24.06.2022	0	24.08.2022	1501	24.10.2022	0
25.06.2022	0	25.08.2022	0	25.10.2022	0
26.06.2022	0	26.08.2022	4502	26.10.2022	0
27.06.2022	4502	27.08.2022	0	27.10.2022	0
28.06.2022	1501	28.08.2022	0	28.10.2022	0
29.06.2022	1501	29.08.2022	1501	29.10.2022	0
30.06.2022	0	30.08.2022	4502	30.10.2022	0
01.07.2022	4502	31.08.2022	0	31.10.2022	0
02.07.2022	0	01.09.2022	1501		
03.07.2022	0	02.09.2022	4502		
04.07.2022	1501	03.09.2022	0		
05.07.2022	4502	04.09.2022	0		
06.07.2022	0	05.09.2022	1501		
07.07.2022	1501	06.09.2022	0		
08.07.2022	4502	07.09.2022	4502		
09.07.2022	0	08.09.2022	0		
10.07.2022	0	09.09.2022	1501		
11.07.2022	1501	10.09.2022	0		
12.07.2022	0	11.09.2022	0		
13.07.2022	4502	12.09.2022	4502		
14.07.2022	0	13.09.2022	1501		
15.07.2022	1501	14.09.2022	0		
16.07.2022	0	15.09.2022	4502		
17.07.2022	0	16.09.2022	1501		
18.07.2022	4502	17.09.2022	0		
19.07.2022	1501	18.09.2022	0		
20.07.2022	0	19.09.2022	4502		
21.07.2022	4502	20.09.2022	0		
22.07.2022	1501	21.09.2022	1501		
23.07.2022	0	22.09.2022	0		
24.07.2022	0	23.09.2022	4502		
25.07.2022	4502	24.09.2022	0		

26.07.2022	0	25.09.2022	0		
27.07.2022	1501	26.09.2022	1501		
28.07.2022	0	27.09.2022	4502		
29.07.2022	4502	28.09.2022	0		
30.07.2022	0	29.09.2022	1501		
31.07.2022	0	30.09.2022	4502		