



Schlussbericht vom 20. Dezember 2021
Veröffentlicht am 07. Oktober 2022

Parameterstudie von Reindampftrocknung

Green, Clean & Energy Efficient Drying



Labortestanlage «Triss» von AquAero, 2021



AQUAERO

Datum: 20.12.2021

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger/innen:

AquAero GmbH
c/o FHNW, Klosterzelgstr. 2
<http://aquaero-water.com/en/>

Autor/in:

Thomas Manyoky, AquAero, manyoky@aquaero-water.com
Christoph Müller, AquAero, mueller@aquaero-water.com

BFE-Projektbegleitung:

Nathalie Rüegg, nathalie.rueegg@bfe.admin.ch
Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502113-01

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



Zusammenfassung

«Green, Clean & Energy Efficient Drying» ist der Vorsatz der Reindampftrocknung: Die wärmepumpenbasierte Trocknungstechnologie erzielt höchste Energieeffizienz und kann durch den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energiequellen klimaneutral und gleichzeitig mit reduzierten Kosten produzieren.

Ausgangslage der vorliegenden Technologiestudie war die betriebstüchtige Laboranlage, die AquAero im Vorfeld in Finanzierung durch die Klimastiftung Schweiz entwickelt hatte. Die Anlage wurde primär zur Trocknung von Schüttgütern konzipiert und daher als Bandtrockner im kontinuierlichen Betrieb ausgerüstet.

Das Trocknungsprinzip basiert auf der bekannten Heissdampftrocknung, womit alle Materialien getrocknet werden können, die nicht empfindlich sind für Temperaturen $>100^{\circ}\text{C}$. Die Innovation kombiniert diese Methode jedoch mit der Brüdenrückverdichtung zur Wärmerückgewinnung. Diese Bauweise wird in der Literatur gängig mit «Open Loop Heat Pump System» oder mit «Mechanical Vapour Recompression (MVR) System» beschrieben. Neben einer hohen Produktqualität verspricht dieses System viele weitere Vorteile gegenüber der herkömmlichen Trocknung mit Dampf oder Luft: Durch die Wärmerückgewinnung wird nicht nur eine hohe Energieeffizienz garantiert, die wärmepumpenbasierte Technologie macht auch einen Betrieb mit erneuerbaren Energiequellen möglich. Dadurch kann der CO_2 Ausstoss verglichen mit herkömmlichen Trocknungsverfahren massiv gesenkt und eine klimaneutrale Produktion angeboten werden. Ziel von AquAero ist es, einen neuen Trocknungs-Benchmark für temperaturunempfindliche Materialien zu etablieren. Neben den Vorteilen bringt das System jedoch auch Schwierigkeiten mit sich. Zum einen muss je nach Material die Verschmutzung des Wärmetauschers berücksichtigt werden und zum anderen fordert der stationäre Betrieb des offenen Systems durch variable äussere Einflüsse eine stete Regelung. Diese bedingt eine gründliche Kenntnis der Abhängigkeiten der Parameter.

Hauptziel des P&D Projekts war es, an der Laboranlage eine Parameterstudie durchzuführen, um durch eine Vielzahl von Tests die Abhängigkeit der Betriebsparameter beschreiben zu können. Daraus sollte der ideale Betriebspunkt abgeleitet werden. Ferner dient dieselbe Kenntnis der Grundlage der Regelung. Ebenso war es ein Ziel, an der Anlage eine Skalierungsstudie hin zu grösseren Materialraten durchzuführen, um Skalierungsregeln ableiten zu können. Darüber hinaus wurden Testtrocknungen von verschiedenen Materialien (Ton, Gärreste, HTC-Biokohle, Biertreber) für interessierte Firmen durchgeführt. Parallel dazu wurde eine Kleinanlage zur Bestimmung von Sorptionsisothermen in Dampf und zur Analyse des Materialverhaltens gebaut. Die Parameterstudie wurde mit Silikagel als Testmaterial durchgeführt und ist weitgehend gemäss den theoretischen Erwartungen verlaufen. Silikagel konnte binnen einer Verweilzeit von 30 Minuten von einem TS von 50% auf über 90% getrocknet werden, wozu ein Energiebedarf von bloss 0.55 kWh/kg notwendig war. Dabei stellte sich eine Materialtemperatur von 115°C bei einer Dampftemperatur von 170°C ein, was für Lebensmittel unkritisch ist. Die weiteren Materialien (Ton, Gärreste, HTC-Biokohle und Biertreber) wurden als Zugabe zum Silikagel getestet, womit Silikagel als Matrixmaterial verwendet wurde. Das System liess sich durch das thermisch träge Verhalten recht einfach manuell in stationärem Zustand halten. In der beschränkten Skalierung verhielt sich das System annähernd linear. Hinsichtlich der Parameter zeigte sich, dass ein Mindestmass an Dampfkreislauf-Massenstrom essentiell für den Betrieb ist. Ist dieser nicht gegeben, so bricht die Dampfatmosfera durch fehlenden Wärmerücktransport hin zum Material zusammen. Alle anderen Parameter haben zwar eine Wirkung auf den Ziel-TS und die Energieeffizienz, sind aber nicht von essentieller Bedeutung für den Betrieb. Die Testmaterialien konnten allesamt auf die jeweilig geforderten Trockensubstanzanteile (TS) getrocknet werden. In Kauf genommen wurde dabei, dass die als Bandtrocknung konzipierte Anlage nicht für schlammartige und klebende Materialien geeignet ist.

Der durch das BFE ermöglichte Technologiestand macht die Entwicklung einer Regelung für den autonomen Betrieb als künftig letzten Laborschritt möglich. Erfreulicherweise tritt die Technologie auf breites Interesse in verschiedensten Branchen, womit wir uns das Ziel setzen, im 2022 die erste Pilot- oder Demonstrationsanlage in industrieller Umgebung in Betrieb zu nehmen.



Résumé

"Green, Clean & Energy Efficient Drying", tel est le principe du séchage à la vapeur pure : la technologie de séchage basée sur une pompe à chaleur atteint une efficacité énergétique maximale et peut, grâce à l'utilisation d'électricité issue de sources d'énergie renouvelables, produire sans impact sur le climat tout en réduisant les coûts.

Le point de départ de la présente étude technologique était l'installation de laboratoire opérationnelle qu'AquAero avait préalablement développée grâce au financement de la Fondation Suisse pour le Climat. L'installation a été conçue en premier lieu pour le séchage de produits en vrac et a donc été équipée d'un séchoir à bande fonctionnant en continu.

Le principe de séchage est basé sur le séchage à la vapeur chaude bien connu, ce qui permet de sécher toutes les matières qui ne sont pas sensibles à des températures $>100^{\circ}\text{C}$. L'innovation combine toutefois cette méthode avec la recompression des vapeurs pour la récupération de la chaleur. Ce type de construction est couramment décrit dans la littérature comme "Open Loop Heat Pump System" ou "Mechanical Vapour Recompression (MVR) System". Outre une qualité de produit élevée, ce système promet de nombreux autres avantages par rapport au séchage traditionnel à la vapeur ou à l'air : la récupération de chaleur garantit non seulement une efficacité énergétique élevée, mais la technologie basée sur les pompes à chaleur permet également un fonctionnement avec des sources d'énergie renouvelables. Cela permet de réduire massivement les émissions de CO_2 par rapport aux procédés de séchage traditionnels et de proposer une production climatiquement neutre. L'objectif d'AquAero est d'établir une nouvelle référence en matière de séchage pour les matériaux insensibles à la température. Outre ses avantages, le système présente toutefois des difficultés. D'une part, il faut tenir compte de l'encrassement de l'échangeur de chaleur selon le matériau et, d'autre part, le fonctionnement stationnaire du système ouvert exige une régulation constante en raison d'influences extérieures variables. Celle-ci nécessite une connaissance approfondie des interdépendances des paramètres.

L'objectif principal du projet P&D était de réaliser une étude des paramètres sur l'installation de laboratoire afin de pouvoir décrire l'interdépendance des paramètres de fonctionnement par le biais d'un grand nombre de tests. Le point de fonctionnement idéal devait en être déduit. De plus, cette connaissance sert de base à la régulation. De même, l'un des objectifs était de réaliser une étude de mise à l'échelle de l'installation vers des débits de matériaux plus importants afin de pouvoir en déduire des règles de mise à l'échelle. En outre, des tests de séchage de différents matériaux (argile, résidus de fermentation, biochar HTC, drêches de bière) ont été réalisés pour les entreprises intéressées. Parallèlement, une petite installation a été construite pour déterminer les isothermes de sorption dans la vapeur et pour analyser le comportement des matériaux. L'étude des paramètres a été réalisée avec du gel de silice comme matériau d'essai et s'est déroulée en grande partie conformément aux attentes théoriques. Le gel de silice a pu être séché d'un taux de matière sèche de 50% à plus de 90% en l'espace de 30 minutes, ce qui a nécessité une consommation d'énergie de seulement 0,55 kWh/kg. La température du matériau était de 115°C et la température de la vapeur de 170°C , ce qui n'est pas critique pour les aliments. Les autres matériaux (argile, résidus de fermentation, biochar HTC et drêches de bière) ont été testés en tant qu'ajouts au gel de silice, ce qui a permis d'utiliser le gel de silice comme matériau de matrice. Le système a pu être maintenu manuellement en état stationnaire assez facilement grâce à son comportement thermiquement inerte. Le système s'est comporté de manière presque linéaire à l'échelle limitée. En ce qui concerne les paramètres, il s'est avéré qu'un débit massique minimal du circuit de vapeur était essentiel pour le fonctionnement. S'il n'est pas atteint, l'atmosphère de vapeur s'effondre en raison du manque de transfert de chaleur vers le matériau. Tous les autres paramètres ont certes un effet sur le TS cible et l'efficacité énergétique, mais ils ne sont pas essentiels pour le fonctionnement. Les matériaux testés ont tous pu être séchés jusqu'à obtention des pourcentages de matière sèche (MS) requis. Il a été



admis que l'installation, conçue comme un séchoir à bande, n'est pas adaptée aux matériaux boueux et collants.

Le niveau technologique atteint grâce à l'OFEN rend possible le développement d'une régulation pour un fonctionnement autonome, qui sera la dernière étape du laboratoire. Il est réjouissant de constater que cette technologie suscite un large intérêt dans les secteurs les plus divers, ce qui nous permet de nous fixer comme objectif de mettre en service la première installation pilote ou de démonstration dans un environnement industriel en 2022.



Summary

"Green, Clean & Energy Efficient Drying" is the resolution of pure steam drying: The heat pump based drying technology achieves highest energy efficiency and can produce climate neutral and at the same time with reduced costs by using electricity from renewable energy sources.

The starting point for this technology study was the operational laboratory plant that AquAero had developed in advance with funding from the Swiss Climate Foundation. The plant was designed primarily for drying bulk materials and was therefore equipped as a belt dryer in continuous operation.

The drying principle is based on the well-known hot steam drying method, which can be used to dry all materials that are not sensitive to temperatures $>100^{\circ}\text{C}$. The new drying method is based on a continuous belt dryer. However, the innovation combines this method with vapor recompression for heat recovery. This design is commonly described in the literature as "Open Loop Heat Pump System" or as "Mechanical Vapor Recompression (MVR) System". In addition to high product quality, this system promises many other advantages over conventional drying with steam or air: Heat recovery not only guarantees high energy efficiency, but the heat pump-based technology also makes operation with renewable energy sources possible. As a result, CO₂ emissions can be massively reduced compared to conventional drying processes and climate-neutral production can be offered. The aim of AquAero is to establish a new drying benchmark for temperature-insensitive materials. In addition to the advantages, however, the system also brings difficulties. On the one hand, depending on the material, the fouling of the heat exchanger must be taken into account, and on the other hand, the steady-state operation of the open system due to variable external influences requires constant control. This requires a thorough knowledge of the dependencies of the parameters.

The main objective of the P&D project was to carry out a parameter study on the laboratory plant in order to be able to describe the dependence of the operating parameters by means of a large number of tests. From this, the ideal operating point was to be derived. Furthermore, the same knowledge serves as the basis for the control system. Likewise, it was an objective to carry out a scaling study on the plant towards larger material rates in order to be able to derive scaling rules. In addition, test dryings of different materials (clay, digestate, HTC biochar, brewer's grains) were carried out for interested companies. In parallel, a small-scale plant was built to determine sorption isotherms in steam and to analyze material behavior. The parameter study was carried out with silica gel as test material and proceeded largely according to theoretical expectations. Silica gel could be dried from a TS of 50% to over 90% within a residence time of 30 minutes, requiring an energy consumption of only 0.55 kWh/kg. The material temperature was 115°C with a steam temperature of 170°C , which is not critical for foodstuffs. The other materials (clay, digestate, HTC biochar and spent grains) were tested as additions to the silica gel, using silica gel as the matrix material. The system was quite easy to maintain in steady state manually due to its thermally inert behavior. In the limited scaling, the system behaved approximately linear. With respect to the parameters, it was found that a minimum steam cycle mass flow is essential for operation. If this is not given, the steam atmosphere collapses due to lack of heat transfer back to the material. All other parameters have an effect on the target TS and energy efficiency, but are not essential for operation. The test materials could all be dried to the respective required dry substance contents (DS). It was accepted that the plant, which was designed as a belt drying system, is not suitable for sludge-like and sticky materials.

The state of technology made possible by the SFOE makes it possible to develop a control system for autonomous operation as the final laboratory step in the future. Encouragingly, the technology is attracting widespread interest in a wide range of industries, with the goal of commissioning the first pilot or demonstration plant in an industrial environment in 2022.



Take-home messages

- Die industrielle Materialtrocknung verzehrt in industrialisierten Ländern zwischen 12 und 25 % des gesamtindustriellen Energiebedarfs, womit der Prozess der Trocknung zu den energieintensivsten zählt. Da Trocknung meist auf fossilen Energiequellen basiert, ist der CO₂-Ausstoss gigantisch hoch. Kann dafür eine Technologie bereitgestellt werden, die es möglich macht, den Energiebedarf bedeutend zu reduzieren, so ist das absolute Reduktionspotential weltweit sehr gross.
- Die Technologie von AquAero genannt «Reindampftrocknung» erzielt durch die Wärmerückgewinnung eine hohe Energieeffizienz, ist daher aber zu einem gewissen Mass von elektrischem Strom abhängig. Wird Elektrizität aus erneuerbaren Quellen eingesetzt, erfolgt der Trocknungsprozess «klimaneutral.» Im Vergleich zur herkömmlichen Heissdampftrocknung liegt der Energieaufwand bei rund der Hälfte, verglichen mit der konventionellen Heisslufttrocknung ist es rund ein Drittel. Nebeneffekt der Technologie ist die Rückgewinnung des Wassers in mineralfreiem und sterilem Zustand, was bereits in südeuropäischen Staaten geschätzt wird. Im Gegensatz zu herkömmlichen Trocknungsverfahren, die v.a. mit Gas befeuert werden, basiert die Reindampftrocknung auf elektrischem Strom. Daher variieren die Betriebskosten abhängig vom lokalen Strompreis. In den meisten europäischen Ländern spricht das Strom-Gaspreis-Verhältnis für die Reindampftrocknung.
- Es besteht ein Anwendungspotential für alle temperaturunempfindlichen Materialien, da die Trocknung ausschliesslich bei Temperaturen über 100°C abläuft. Die Technologie kann dazu mit allen bekannten Förderverfahren ausgerüstet werden. Die Wärmerückgewinnung lässt sich mit einem Band, einem Fliessbett, einem Schaufelmischer oder ähnlichem kombinieren. Zudem ist die Technologie in ihrer Grösse für alle industriellen Anwendung skalierbar.
- Indem die Technologie von AquAero auf der bekannten Heissdampftrocknung aufbaut, können die Vorteile derselben gegenüber Heisslufttrocknung beibehalten werden. Grundlegend ist dabei die Abwesenheit von Sauerstoff während der Trocknung. Oxidation am Produkt wird unterbunden, die Produktqualität bleibt dadurch erhalten. Hinsichtlich Lebensmittel oder Tierfutter werden z.B. Fette nicht ranzig. Durch die Verbannung von Sauerstoff ist ebenso die Brand- & Explosionsgefahr ausgeschlossen. Ebenso kann durch den Kreislaufprozess der Aromenverlust minimiert werden. Indem die Temperatur durchwegs über 100°C beträgt, tritt immer Pasteurisierung des Materials auf, teils gar Sterilisierung. Die Technologie birgt keine Geruchs- & Staubemissionen an die Umgebung.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	4
Summary	6
Take-home messages	7
Inhaltsverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einleitung	11
1.1 Trocknungsprozesse und Energiebedarf im europäischen Kontext.....	11
1.1.1 Energiebedarf und CO ₂ -Emissionen der Trocknung im industriellen Kontext.....	11
1.1.2 Politische Weichenstellung.....	11
1.1.3 Business Opportunity der Reindampftrocknung.....	12
1.2 Stand der Technik der herkömmlichen Trocknungstechnologien	12
1.3 Reindampftrocknung – Einsatzgebiete und die energetischen Vorteile.....	13
1.3.1 Energieeffizienz	13
1.3.2 Energie- und CO ₂ -Sparpotential der Reindampftrocknung	15
1.3.3 Anwendungspotential und weitere Vorteile der Reindampftrocknung.....	16
1.4 AquAero	17
1.4.1 Hintergrund von AquAero	17
1.4.2 Technische Herausforderungen der Entwicklung.....	18
1.4.3 Projektnotwendigkeit zur Lösung der technischen Herausforderungen.....	19
1.5 Projektziele	22
1.5.1 Parameter- und Skalierungsstudie	22
1.5.2 Prüfstand «Mobs» zur Bestimmung von Sorptionsisothermen	22
1.5.3 Total Cost of Ownership	22
1.6 Projektplan.....	22
2 Anlagenbeschriebe	24
2.1 Reindampftrocknungsanlage «Triss»	24
2.2 Sorptionsprüfstand «Mobs».....	25
3 Vorgehen und Methode	27
4 Ergebnisse und Diskussion	28
4.1 Parameterstudie	28
4.2 Inbetriebnahme der Reindampftrocknungsanlage «Triss»	28
4.3 Trocknungsbetrieb	30
4.3.1 Entlüftung des Kondensators	30
4.3.2 Trockensubstanzanteil TS	32



4.4	Skalierungsstudie	34
4.5	Skalierungs- und Designregeln	36
4.6	Energie- und Massenbilanz	37
4.6.1	Verbesserungspotential der Energieeffizienz	39
4.6.2	Vergleich mit herkömmlichen Trocknungssystemen mitsamt hypothetischer Wärmerückgewinnung	39
4.6.3	Vergleich mit ähnlicher Entwicklung im EU-Projekts «DryFiciency»	41
4.7	Materialtests	41
4.8	Sorptionsprüfstand «Mobs»	44
4.9	Total Cost of Ownership der Reindampftrocknung	46
5	Schlussfolgerungen und Fazit	49
6	Ausblick und zukünftige Umsetzung	50
7	Nationale und internationale Zusammenarbeit	51
8	Publikationen	51
9	Literaturverzeichnis	52



Abkürzungsverzeichnis

TS:	Trockensubstanzanteil
SL:	Stratificatin Layer (Dampf-Luft-Grenze / Dampfstand des heissen schwimmenden Dampfs über der kalten Luft)
TRiSS:	Test Rig for Superheated Steam Drying
MobS:	Mobile Sorption Test Rig
FU:	Frequenz Umrichter



1 Einleitung

1.1 Trocknungsprozesse und Energiebedarf im europäischen Kontext

1.1.1 Energiebedarf und CO₂-Emissionen der Trocknung im industriellen Kontext

Zurzeit werden in industrialisierten Ländern 12- 25 % des gesamtindustriellen Energieaufwandes zur Trocknung verwendet¹. Da dies meist basierend auf der Verbrennung von fossilen Energieträgern geschieht, werden in Europa jährlich rund 88.6 MTonnen CO₂ und in der Schweiz rund 1.6 MTonnen CO₂ durch die industrielle Materialtrocknung ausgestossen, was den Klimawandel stetig mitbeeinflusst und verheerende Auswirkungen für die Flora und Fauna haben, sowie sich für die Gesellschaft und Wirtschaft sehr kostspielig entfalten könnte. Abbildung 1 zeigt den Energieverbrauch der industriellen Trocknung von im Mittel 18%² im Kontext der übrigen Verbrauchertypen. Indem die Trocknung im Mittel mit 18% den zweitgrössten Aufwand ausmacht, lässt sich durch revolutionäre Technologien dementsprechend viel einsparen.

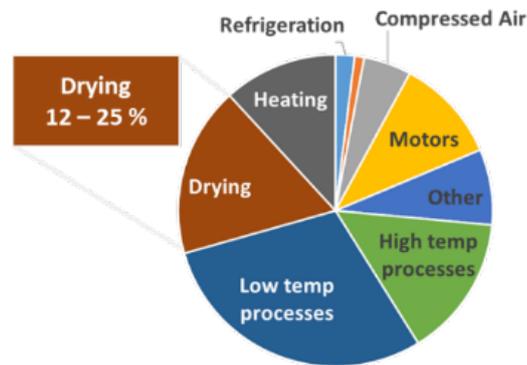


Abbildung 1 : Aufteilung des Energieverbrauchs gemäss Prozessen in industrialisierten Ländern

1.1.2 Politische Weichenstellung

Um die Emissionen zu drosseln, hat die Europäische Kommission eine neue Gesetzesgrundlage für die CO₂-Emissionen eingeführt³, der Emissionshandelssysteme umfasst, für die eine Emissionsobergrenze und ein CO₂-Preis definiert wurden. Darüber hinaus hat die EU im New Green Deal einen ehrgeizigen Plan zur Erreichung einer wettbewerbsfähigen kohlenstoffarmen Wirtschaft bis ins Jahr 2050 vorgelegt und definiert darin ein Energieeffizienzziel für die EU für 2030, das eine Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs um 32,5% verlangt⁴. Dieses Ziel soll u.a. durch innovative Technologien erreicht werden, die eine energieeffiziente Produktion sowie einen Ersatz fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Quellen erlauben. Den CO₂-Ausstoss zu reduzieren und gleichzeitig die Produktion von Gütern in Menge und Kosten konstant zu halten, stellt jedoch eine technologische Herausforderung dar. Diese ist jedoch für ein Start-up wie AquAero zugleich eine Chance, bei den gesuchten Lösungen mitzuwirken. Die Reindampftrocknung könnte zu den Zielen des New Green Deals durch zwei Aspekte wesentlich beitragen: Indem die Technologie nur rund einen Drittel der Energie konventioneller Systeme benötigt und der Rest durch erneuerbare Energiequellen aufgebracht werden kann, können Treibhausgasemissionen potentiell gar auf null reduziert werden.

¹ Handbook of Industrial Drying, 4th Edition, Arun S. Mujumdar, 2015, S.4

² Handbook of Industrial Drying, A.S. Mujumdar, 2006

³ European Commission Regulatory framework for industrial CO₂ emissions, https://www.ec.gc.ca/doc/media/m_124/p2_eng.htm

⁴ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-10>



1.1.3 Business Opportunity der Reindampftrocknung

Als Start-up liegt die Motivation in der sich anbietenden Geschäftsmöglichkeit. Mit der Zielsetzung des Pariser Klimaabkommens einer klimaneutralen Wirtschaft bis 2050, der sich die Schweiz und Europa verpflichtet haben, öffnen sich enorme Geschäftspotentiale für neue grüne Technologien. Indem die Politik die Gesetzgebung hinsichtlich Energieeffizienz und CO₂-Emission bereits derart geändert hat, zeigt sich bereits jetzt eine Nachfrage nach der von AquAero entwickelten Reindampftrocknung in verschiedenen Branchen.

1.2 Stand der Technik der herkömmlichen Trocknungstechnologien

Ein Überblick über die Geschichte der Materialtrocknung zeigt einen langen Zeitraum von mehr als 100 Jahren, in dem fast ausschliesslich auf ineffiziente Heisslufttrocknung gesetzt wurde. Der letzte Innovationsschritt hin zur Heissdampftrocknung (ohne Wärmerückgewinnung) liegt mehr als 30 Jahre zurück. Die damalige Innovation bestand darin, sich die besseren Eigenschaften von Heissdampf gegenüber Heissluft zunutze zu machen. Heute werden nach wie vor 70% des Marktanteils durch Heisslufttrocknung ohne Wärmerückgewinnung abgedeckt. Der Markttrend verändert sich jedoch in letzter Zeit aufgrund der restriktiven CO₂-Gesetzgebung in Richtung grüner Technologien.

Abbildung 2 zeigt einen schematischen Aufbau der Heisslufttrocknung. Fossil beheizte Luft von bis zu 400°C durchströmt das Material, trocknet dieses und wird über einen Kamin an die Atmosphäre abgegeben. Das Trockenprodukt wird dabei z.B. über einen Zyklon abgeschieden.

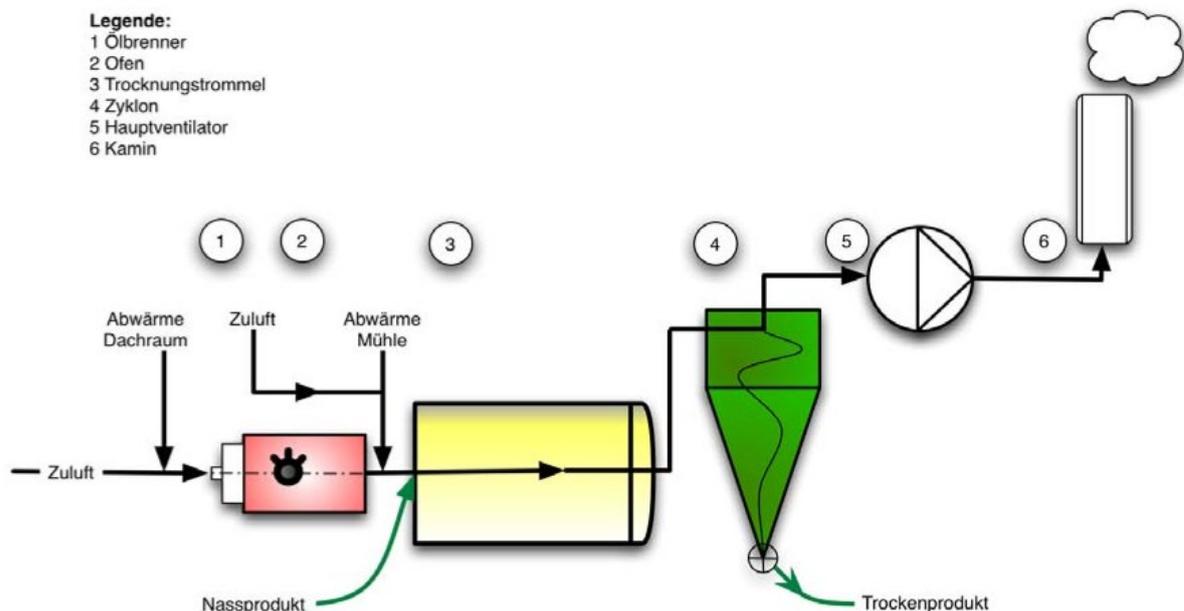


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der herkömmlichen Heisslufttrocknung,

Quelle: BFE Projekt, Neue Verfahren zur Effizienzverbesserung in Trocknungsanlagen Phase 1, Schlussbericht 2005

Abbildung 3 zeigt, wie die Wärmeanteile im Prozess prozentual aufgeteilt sind. Im Speziellen wird ersichtlich, wie gross die Anteile der Verdampfungsenthalpie (-wärme) und der Wärme in der Abluft sind. Da diese nicht zurückgewonnen werden, ist die herkömmliche Heisslufttrocknung derart ineffizient.

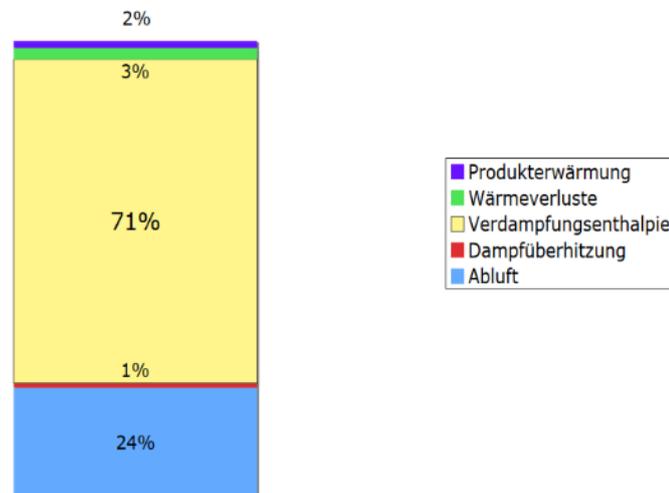


Abbildung 3: Prozentuale Wärmeanteile in der künstlichen Trocknung von landwirtschaftl. Produkten, Quelle: BFE Projekt, Neue Verfahren zur Effizienzverbesserung in Trocknungsanlagen Phase 1, Schlussbericht 2005

Wie der schematische Aufbau von konventionellen Heissdampftrocknern in Abbildung 4 zeigt, verliert auch diese Technologie die Abwärme in den Brüden an die Atmosphäre, es sei denn, diese könnte lokal zur Beheizung durch Kondensation unter 100°C genutzt werden.

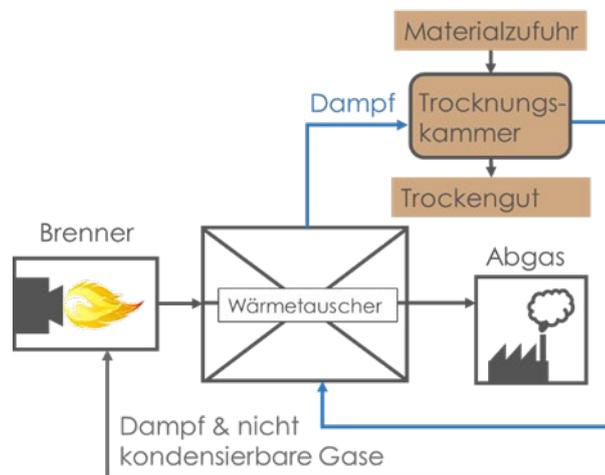


Abbildung 4: Schematischer Aufbau der Heissdampftrocknung ohne Wärmerückgewinnung

Diese beiden Technologien verkörpern den «Stand der Technik des Marktes» und können als direkte Konkurrenz zusammengefasst werden. Beide Technologien verpassen es, das Potential der Wärmerückgewinnung zur Effizienzsteigerung zu nutzen.

1.3 Reindampftrocknung – Einsatzgebiete und die energetischen Vorteile

1.3.1 Energieeffizienz

Die Innovation hebt sich durch ihre erhöhte Energieeffizienz und der dadurch verbundenen Reduktion des CO₂-Ausstosses von konventionellen Technologien ab. Abbildung 5 zeigt die Verhältnisse der Einsparung: Verglichen mit der Heisslufttrocknung lässt sich der Energieaufwand um 70 % reduzieren; verglichen mit der Heissdampftrocknung ist es rund die Hälfte. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich durch den Einsatz der Hochtemperaturwärmepumpe der Bedarf der Energieform von fossilen Brennstoffen zu elektrischem Strom verlagert.

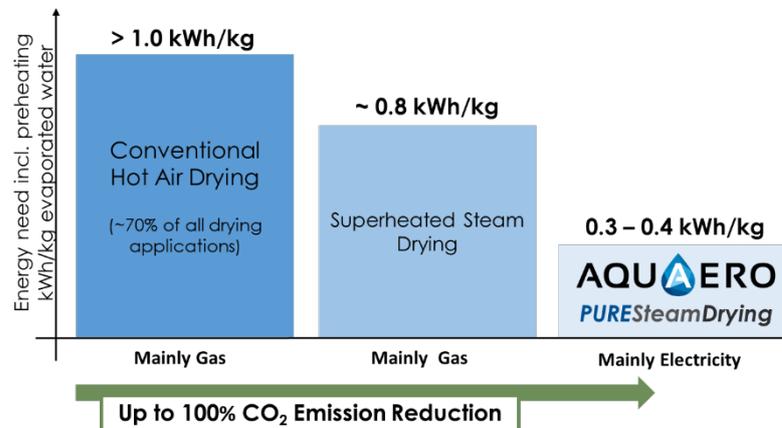


Abbildung 5 : Vergleich der spezifischen Energieaufwände konkurrierender Trocknungsprinzipien mit der Reindampftrocknung von AquAero

Die Verlagerung der geforderten Energieform von fossilen Energieträgern hin zu elektrischem Strom, kann je nach Land ein Vor- oder Nachteil sein. Grundsätzlich bietet sich die Möglichkeit, den Energiebedarf ausschliesslich durch erneuerbare Stromquellen bereitzustellen. Wie Abbildung 6 zeigt, besteht in Europa je nach Land eine massive Diskrepanz des Strom-Gaspreisverhältnisses, wodurch sich der Umstand des Energieformwechsels zusätzlich in den Kosten positiv oder negativ auswirken kann. Die Reindampftrocknung vermag durch ihre erhöhte Energieeffizienz ein Verhältnis von bis zu 3.5 wettzumachen. Wichtig zu beachten ist der Umstand, dass Energiepreise durch staatliche Besteuerung oder Subvention sehr schnell ändern können. Es ist anzunehmen, dass die europäische Klima- und Energiepolitik die Weichen derart stellen wird, dass der Einsatz von Wärmepumpen durch einen tieferen Strompreis wie auch durch weitere Besteuerung des CO₂-Ausstosses zusätzlich begünstigt wird.

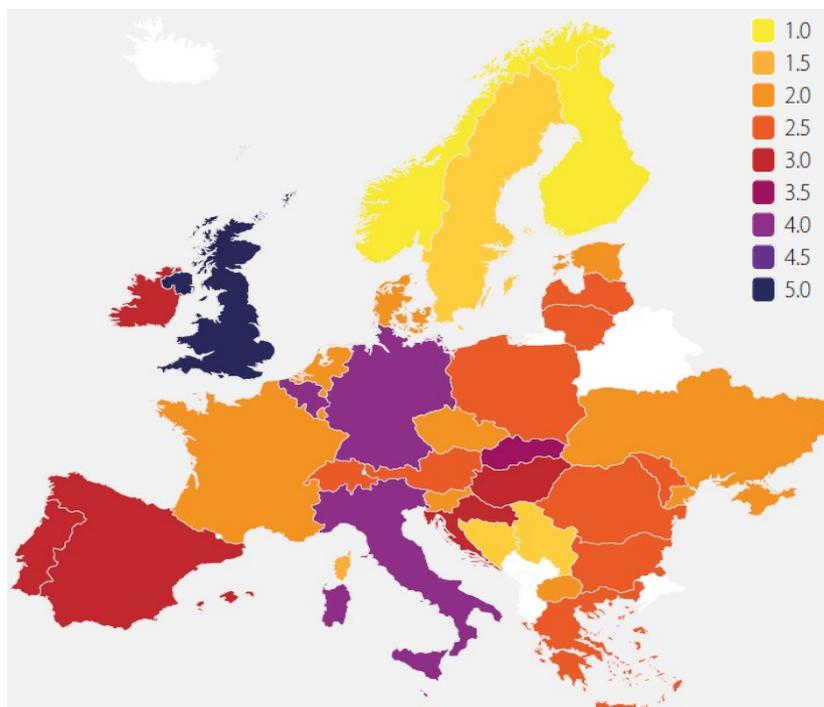


Abbildung 6: Vergleich des Strom-Gaspreisverhältnisse in europäischen Ländern für industrielle Endverbraucher kleiner Grösse 2020 (2 GWh/a bis 20 GWh/a Stromverbrauch, 3 GWh/a bis 28 GWh/a Gasverbrauch)

Quelle: <https://www.sintef.no/globalassets/sintef-energi/industrial-heat-pump-whitepaper/2020-07-10-whitepaper-ihp-a4.pdf>



1.3.2 Energie- und CO₂-Sparpotential der Reindampftrocknung

Ausgehend von der in Abbildung 5 gezeigten Effizienzsteigerung kann unter Annahmen des verwendeten Strommix eine Abschätzung des jährlichen Energie- und CO₂-Sparpotentials gemacht werden:

Im Jahr 2019 betrug der Gesamtenergieverbrauch der Europäischen Union 1'561 Mtoe (Millionen Tonnen Öläquivalent)⁵ und der Schweiz 20 Mtoe. Der Anteil der Industrie macht davon mit 30% deren 468 Mtoe (EU) resp. 6 Mtoe (CH) aus, wovon im Mittel 18 %⁶ zur industriellen Trocknung verwendet werden. Damit berechnet sich der Energiebedarf zur Trocknung auf 84 Mtoe (EU) resp. 1 Mtoe (CH). Um davon ausgehend eine quantitative Aussage über die Energieersparnis machen zu können, sind einige Annahmen festzuhalten:

- Der Anteil der Produkte, der temperaturunempfindlich getrocknet werden kann, liegt gemäss Schätzungen zwischen 40 % und 60 %. Es wird konservativ mit 40 % gerechnet.
- Der mittlere spezifische Energieverbrauch der konventionellen Trockner beträgt 1,3 kWh/kg Wasser. Darin sind die grosse Mehrheit der Heisslufttrockner wie auch der im Vergleich kleine Anteil der Heissdampftrockner einbezogen.
- Der spezifische Energieverbrauch der Reindampftrocknung betrage 0,4 kWh/kg Wasser, was dem Mittel verschiedener Prozesse entspricht.

	Energiebedarf EU		Energiebedarf CH	
	TWh	Mtoe	TWh	Mtoe
Energieaufwand der durch Reindampftrocknung ersetzbaren Trocknungsanwendungen (2019)	392	33.7	5	0.43
Einsparpotential bei Verwendung der Reindampftrocknung	271	23.3	3.5	0.3

Tabelle 1 Energiereduktionspotential durch Reindampftrocknung in der Schweiz und Europa

Die CO₂-Emissionen werden mit folgenden Randbedingungen bilanziert:

- Der Energieaufwand zur Trocknung wird zurzeit hauptsächlich durch Erdgas gedeckt. Damit fallen 203,2 tCO₂ pro TWh an.
- Die Reindampftrocknung wird ausschliesslich durch elektrischen Strom betrieben. In der Bilanz wird daher mit dem europäischen Mittel wie auch einem erneuerbaren Strommix gerechnet:
 - Strommix des europäischen Mittels⁷: zurzeit 300 tCO₂ / TWh
 - Strommix des Schweizer Mittels: zurzeit 218 tCO₂ / TWh
 - Strommix aus erneuerbaren Energien: zurzeit 50 tCO₂ / TWh (gleich für EU/CH)

	CO ₂ -Emissionen in Mio t	
	EU	CH
CO ₂ -Emissionen durch die indust. Materialtrocknung 2019	79.7	1.0
Reduktionspotential mit heutigem Strommix je Region	43.5	0.68
Reduktionspotential mit erneuerbarem Strommix	73.7	0.94

Tabelle 2 CO₂-Emissionsreduktionspotential durch Reindampftrocknung in der Schweiz und Europa

Aus Sicht eines Betriebes kann die Technologie nicht nur zur Abwendung von CO₂-Ausgleichszahlungen dienen, werden die vereinbarten Reduktionsziele übertroffen, können CO₂-Zertifikate generiert und zu einem lukrativen Marktpreis verkauft werden.

⁵ Eurostat News release "Energy consumption in the EU", https://ec.europa.eu/info/news/energy-consumption-eu-increased-1-2017-eurostat-figures-confirm-2019-feb-07_cs

⁶ Handbook of Industrial Drying, A.S. Mujumdar, 2006

⁷ Statista Amount of CO₂ emissions from electricity generation in the EU by country in 2016, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1009521/umfrage/co2-emissionen-durch-stromerzeugung-in-der-eu/>



1.3.3 Anwendungspotential und weitere Vorteile der Reindampftrocknung

Neben dem Potential der Reduktion des Energiebedarfs und der CO₂-Emissionen bietet die Reindampftrocknung zusätzlich den Vorteil der Rückgewinnung des Wassers in grossen Mengen und in sterilem, demineralisiertem Zustand. Dies bringt im Speziellen in Staaten mit Wasserknappheit, so z.B. bereits in Südeuropa, einen Zusatznutzen. In der Lebensmittelbranche kann das Wasser zur täglichen Reinigung verwendet werden. In der Keramikbranche, so z.B. zur Formung von Backsteinen, wo zusätzlich Wasser hinzugefügt werden muss, kann das Wasser mitsamt seiner Austrittstemperatur in einem betriebsinternen Kreislauf gehalten werden und dabei nicht nur den Wasserbedarf reduzieren, sondern durch die Rückführung der Restwärme (Destillattemperatur: 100°C) gar noch die Gesamteffizienz aufwerten.

Das Trocknungsprinzip ist einfach auf alle temperaturunempfindlichen Materialien, die sich >100° C trocknen lassen, adaptierbar und einfach in der Grösse skalierbar. Es kann damit in vielen verschiedenen Branchen breit eingesetzt werden. Tabelle 3 zeigt eine Auflistung möglicher Materialien, die sich durch die Reindampftrocknung trocknen lassen. Davon eignen sich jene Produkte am besten, die explizit eine Trocknungstemperatur zwischen 100° und 200°C verlangen und dabei nicht zusätzliche organische Substanzen vergasen lassen.

Industrial sector:	Products:
Food industry – sugar	Sugar beet pulp, dietary fibre from sugar beet
Feed industry – base materials	Hog fuel, Corn fibres, Protein containing base materials (soy beans, rape seed, sunflower seed, soy meal, Okara, etc.)
Food industry	Shrimps, Pork, Bamboo shoot, Paddy / rice, Herbs, Cacao beans, Corn gluten, Tobacco (drying, expansion)
Food industry - starch	Starch, gets gelatinised, Wheat flour, Distillers grain
Food industry - meat	Pork, Bone meal
Biomass (for electricity generation)	Sawdust, Wood fibre, Pulverised coal, Wood chips, Wood pulp, Puce and Birch bark, milled peat, Peat for briquettes
Chemical industry	Washing powder, pigments, Potassium salt, Powdery chemicals, Catalysts, Colouring agents
Laundry industry	Laundry
Paper & Pulp	Paper, Fibre sludge from waste water treatment
Textile	(Coated) Textile
Waste materials	Industrial wastes, filter cakes, sludges from water purification, municipal sludge,
Vegetables & Fruits	Vegetables
Dairy industry	Milk powder
Potato	Potato products, Fries (pre-drying)
Building materials	Wood, Lime mud (before calcination), mineral wool, fibres

Tabelle 3 :Potentielle Anwendungen, FLT 2004⁸

Der Nutzen der Reindampftrocknung kann folgend zusammengefasst werden:

1. Höhere Energieeffizienz als mit konventionellen Verfahren
2. Gleichbleibende oder gar erhöhter Produktionsdurchsatz
3. Erhöhte Produktqualität durch die Abwesenheit von Sauerstoff (keine Oxidation) und weniger Aromenverlust durch Kreislaufprozess
4. Betriebskostenreduktion im Unternehmens sofern der Strompreis nicht höher als das 3.5-fache des Gaspreises beträgt.

⁸ Industrial Superheated Steam, Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik, Heft L 202, 2004, Frankfurt a.M.



5. Erhöhte Sicherheit im Betrieb: Durch Abwesenheit von Sauerstoff im Trocknungssystem besteht keine Brand- und Explosionsgefahr
6. Die Elektrifizierung macht die Nutzung erneuerbarer Stromquellen möglich, von fossilen Brennstoffen kann abgesehen, CO₂-Emissionen können weit reduziert und CO₂-Ausgleichszahlungen verhindert werden.
7. Keine Geruchs-, Staub- und NO_x/CO-Emissionen aus dem Trocknungsprozess in die Umwelt
8. Rückgewinnung des Wassers zur Wiederverwendung in der Produktionskette im Unternehmen
9. Pasteurisation des Produktes
10. Die Trockner eignen sich zur einfachen Integration in eine bestehende Prozesskette und bieten eine einfache Wartung.

1.4 AquAero

1.4.1 Hintergrund von AquAero

AquAero ist ein Spin-off-Unternehmen der FHNW mit Gründung 2014. Während einer Entwicklungszeit von gut 6 Jahren wurde in Zusammenarbeit mit BASF eine Technologie entwickelt, die ursprünglich zur Wassergewinnung aus der Luft in der Wüste mittels MOF (Metal Organic Framework) und zwischenzeitlich alternativ zur industriellen Luftentfeuchtung gedacht war. Schon während jener Entwicklung wurde klar, dass das Verfahren, das mittlerweile mit dem Trademark «Reindampftrocknung» bezeichnet wird, auch zur Materialtrocknung verwendet werden könnte. Während einer fünfjährigen Entwicklungszeit wurden zwei Laboranlagen gebaut, durch die der Funktionsnachweis gegeben und das Energiesparpotential bilanziert werden konnte. Obwohl die Technologie hinsichtlich energieeffizienter Desorption des Wassers aus dem Trocknungsmittel optimale Resultate zeigte, musste eingestanden werden, dass sie kaum gegen alternative Wasserversorgungsmethoden bestehen könnte. Da auch der Markt der industriellen Entfeuchtung sehr klein und als ungeeignet für ein Start-up beurteilt wurde, kam uns die alternative Verwendung der Technologie zur Materialtrocknung gelegen. Umgehend wurde mit der Entwicklung der dritten Anlage, der Adaptierung der Technologie zur kontinuierlichen Materialtrocknung begonnen. Das Projekt wurde durch die Klimastiftung Schweiz finanziert. Die für verschiedene Materialien verwendbare Laboranlage «Triss» (siehe Abbildung 7) war schliesslich Ausgangslage für das BFE-Projekt.

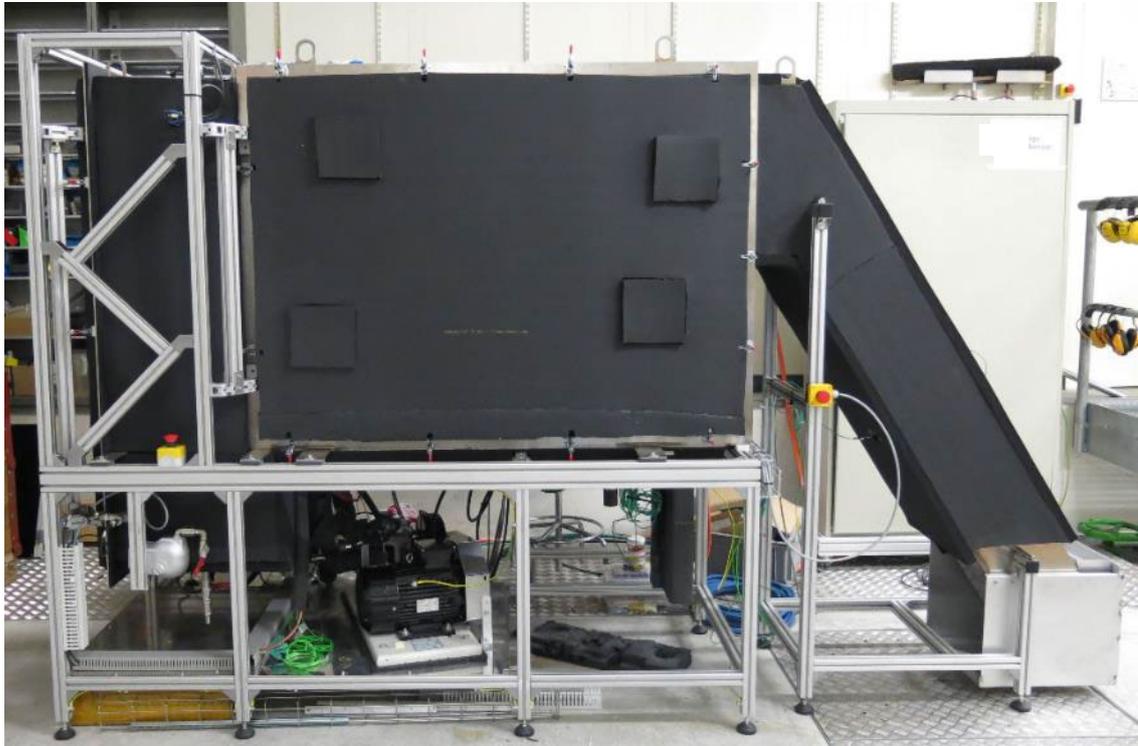


Abbildung 7 : Reindampftrocknungs-Laboranlage Triss von AquAero an der FHNW

1.4.2 Technische Herausforderungen der Entwicklung

Die Hauptherausforderung des Betriebs der Reindampftrocknung wird am besten ausgehend vom Stand der Technik erklärt: Abbildung 8 zeigt den Längsschnitt einer kommerziell verfügbaren Heissdampftrocknungsanlage der Firma Heckmann in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut. Das Anlagengehäuse ist gegen oben geschlossen und gegen unten offen. Darin schwimmt der überhitzte Wasserdampf mit halber Dichte über der kalten Umgebungsluft und grenzt sich erstaunlicherweise einfach durch eine relativ dünne Schichtung der sog. Stratification Layer, thermisch und als Gas von derselben ab. Durch diese offene Schleuse kann Material in kostengünstiger Bauweise ein- und ausgeschleust werden, ohne dabei Luft in den Dampf zu transportieren. Diese Bauweise ist freier Stand der Technik. Das Prinzip ist ein Pfeiler der Technologie. Es wurde anfangs 1990er Jahre von T.J. Stubbing erfunden und patentiert. Diese konventionelle Heissdampftrocknungstechnologie wird ohne Wärmerückgewinnung gemacht. Wird Material in die Dampfatmosfera eingeführt und getrocknet, so wird der überschüssige Dampf einfachheitshalber stets kondensiert. Die dabei abgeführte Wärme wird dem System durch Neubeheizung erstattet. Können der Materialmassenstrom, die Verweilzeit, der Heissdampfmassenstrom und dessen Temperatur konstant gehalten werden, so ist als Resultat ein konstanter TS garantiert. Dieses Verfahren verhält sich also linear, ist daher einfach zu steuern und bleibt stets stabil. Grosser Nachteil ist der Wärmeverlust.

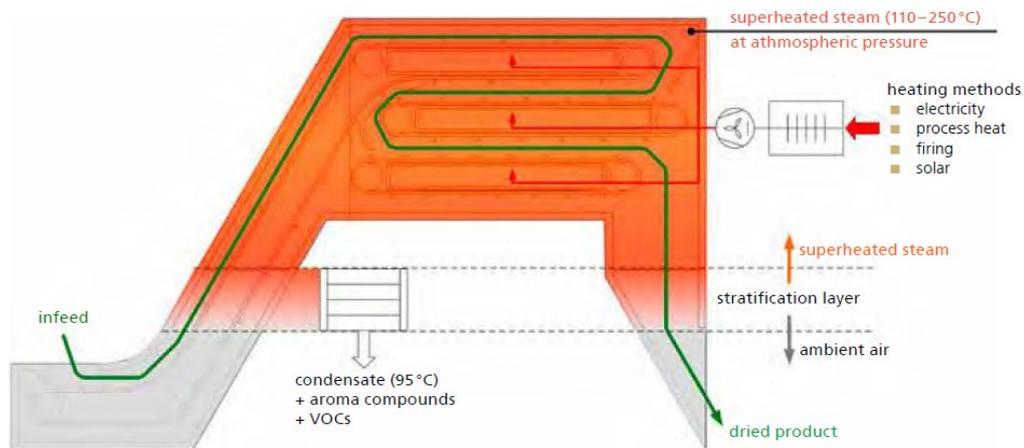


Abbildung 8 : Anlagenschema des Fraunhofer Institut mit dem Prinzip der offenen Schleuse⁹ gemäss T.J. Stubbing

Führt man sich nun das Verfahren der Reindampftrocknung vor Augen, wo der überschüssige Dampf nicht direkt durch Kondensation abgeführt, sondern durch einen Brüdenverdichter abgesaugt und derart kondensiert wird, dass die Verdampfungswärme ins System zurückfließt, wird eine Rückbezüglichkeit geschaffen, die alle Verfahrensparameter voneinander abhängig werden lässt. Damit verliert das System das lineare Verhalten, die Steuerung wird zur Herausforderung und bedarf gar einer Regelung.

Da marktrepräsentative Anlagen weit grösser als die Laboranlage gefordert sind, liegt die zweite technische Herausforderung in der Skalierung der Technologie hin zu grösseren Förderraten und Baudimensionen.

Eine weitere Herausforderung, um die Reindampftrocknung materialspezifisch anpassen zu können, liegt darin, dass der Kunde zwar einen TS vorgibt, dabei jedoch je nach Material eine unterschiedliche Trocknungstemperatur eingestellt werden muss.

1.4.3 Projektnotwendigkeit zur Lösung der technischen Herausforderungen

Parameterstudie

Um die ausgeführten Vorteile der Reindampftrocknung nutzbar machen zu können, soll in diesem Projekt eine Lösungsgrundlage für die in Kapitel 1.1 gezeigten Herausforderungen erarbeitet werden. Wie genannt sind dies das Verfahrensverständnis für einen stabilen Betrieb, die Kenntnis des Verhaltens bei der Skalierung und die Bestimmung der materialabhängigen notwendigen Trocknungstemperatur.

Wie aufgezeigt, erfährt das System durch die Wärmerückgewinnung eine Rückbezüglichkeit, wodurch der stabile Betrieb nicht mehr gegeben ist. Da damit das Verfahren nicht mehr bloss gesteuert werden kann, sollte in diesem P&D-Projekt eine Parameterstudie zum vertieften Verständnis der gegenseitigen Abhängigkeit der Anlageparameter durchgeführt werden. Diese Kenntnis sollte schliesslich als Grundlage dienen, um eine Regelung auszuarbeiten, die den Betrieb und eine materialgerechte Trocknung sicherstellt. In einem Folgeprojekt wird diese Kenntnis in einer Regelung ausgearbeitet und in die SPS-Steuerung integriert.

⁹ Quelle: Fraunhofer Inst. IGB, Trocknung mit überhitztem Wasserdampf bei Atmosphärendruck, 2018– 1803 BR pt – dampftrocknung – en

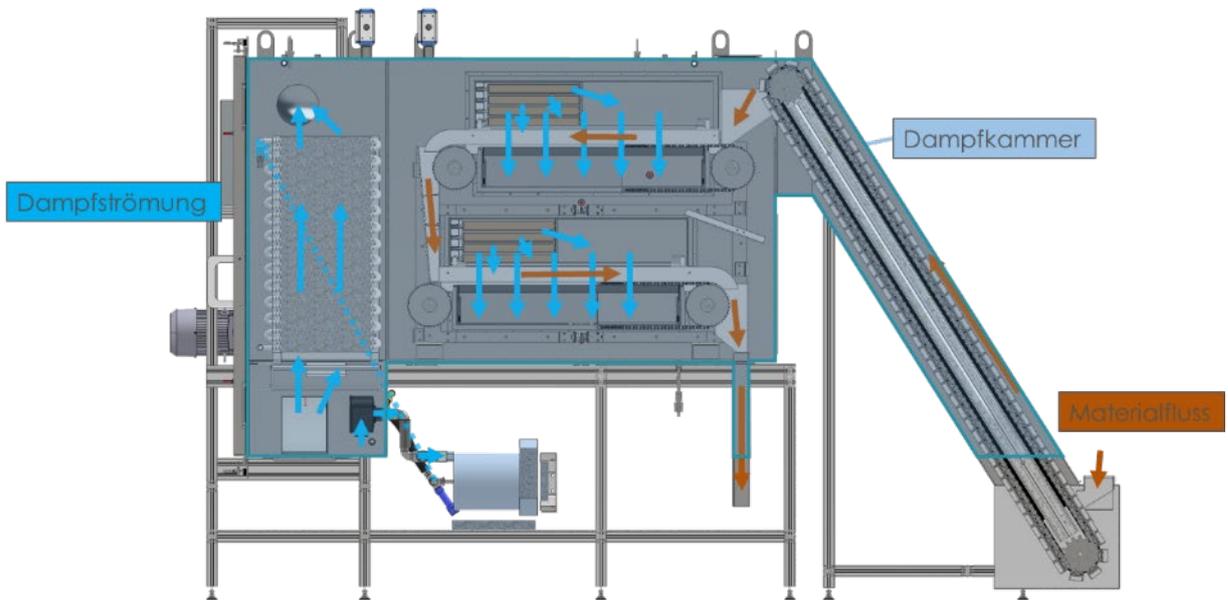


Abbildung 9 : Einblick in die Reindampftrocknungs-Laboranlage Triss von AquAero:
Materialfluss in orange, Dampfströmung in blau, Dampfkammer türkis umrandet

Skalierungsstudie

Da erst von der Theorie her abzuschätzen ist, wie sich das Verfahren bei Skalierung verhält, sollte in diesem Projekt eine Skalierungsstudie Aufschluss über das Verhalten geben. Kann schliesslich die Betriebscharakteristik beschrieben werden, so lassen sich Skalierungs- und Designregeln ableiten, welche zum Bau der Pilotanlagen notwendig sind.

Bestimmung von Sorptionsisothermen

Um den vom Kunden geforderten TS erzielen zu können, muss bekannt sein, bei welcher Temperatur das Material getrocknet werden muss. Da der Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem TS in den materialspezifischen Sorptionsisothermen steckt, sollte im vorliegenden Projekt für diesen Zusammenhang ein Prüfstand zur Bestimmung von Sorptionsisothermen gebaut werden. Eine Sorptionsisotherme zeigt die Wasserbeladung eines Materials in Abhängigkeit der Wasseraktivität, bzw. des Relativdrucks. Letzterer kann in feuchter Luft als relative Luftfeuchtigkeit gelesen werden. Damit wird ausgesagt, wie stark das Wasser im Innern des Materials gebunden ist. Da die Reindampftrocknung immer bei Atmosphärendruck abläuft, kann diese Beziehung vereinfacht werden und lässt damit eine direkte Aussage über die minimale Trocknungstemperatur bzw. die effektive (fühlbare) Materialtemperatur zu. Schliesslich kann aus der minimalen Trocknungstemperatur eine Aussage über die minimale Wärmepumpenleistung gemacht werden, woraus die Energieeffizienz abgeleitet werden kann. Die effektive Materialtemperatur kann zum einen ein Killerkriterium sein, sofern ein Material thermisch nicht beständig ist, zum anderen kann sie eine Minimalanforderung sein, sofern während der Trocknung eine Sterilisation erreicht werden soll.

Folgend sei der Zusammenhang von Wasserbeladung und Mindesttemperatur durch die Sorptionsisotherme von Fischmehl ausgeführt. Lebensmittel müssen zur Konservierung auf einen Feuchtegehalt von rund 10- 13% (TS 87- 90%) getrocknet werden. Im Beispiel wird konservativ 10% verwendet.

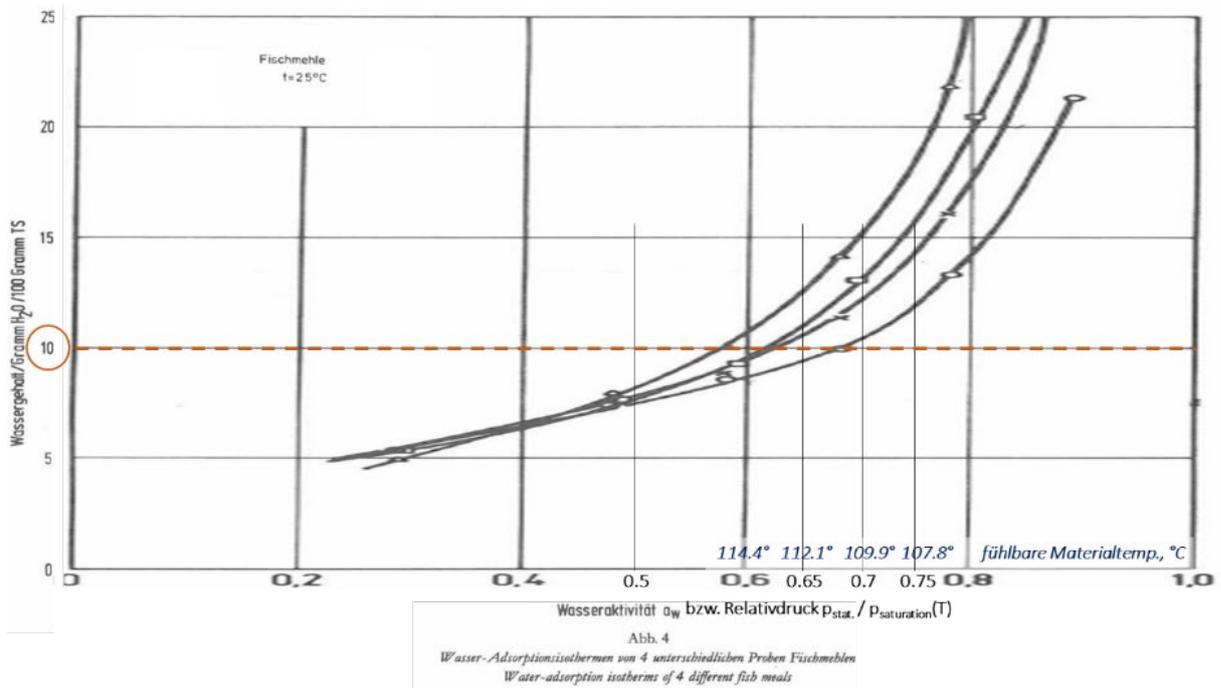


Abbildung 10: Sorptionsisothermen von Fischmehl¹⁰

Die effektive Materialtemperatur (T_{Mat}) hängt direkt vom Relativdruck (p_{rel}) ab. Dieser definiert sich im reinen überhitzten Dampf (ohne Luft) als Verhältnis zwischen dem statischen Druck (p) und dem Dampfdruck ($p_0(T_{Mat})$) der Materialtemperatur (Sättigungsdruck), $p_{rel} = p/p_0(T_{Mat})$. Der statische Druck der Trocknung ist bei der Reindampftrocknung immer gleich dem Atmosphärendruck also rund 1 barA. Somit kann aus dem Relativdruck der Dampfdruck (Sättigungsdruck) bestimmt werden und aus der Dampfdruckkurve die Verdampfungstemperatur gefolgert werden. Beispielsweise entstammt der Relativdruck von 0.5 dem Quotienten von 1 barA/ 2 barA, wobei der Dampfdruck von 2 barA einer Verdampfungstemperatur von 120°C entspricht. Im Beispiel des Fischmehls beläuft sich die für das Produkt fühlbare Temperatur auf 110- 115°C. Kann diese Temperatur nicht garantiert werden, so verdampft das Wasser nicht. Damit die Wärme während der Trocknung vom überhitzten Dampf zum Material fließen kann, liegt die Heissdampf Temperatur über der Materialtemperatur und wird je nach geforderter Trocknungsgeschwindigkeit eingestellt werden. Dennoch wird die Materialtemperatur nur durch den Gleichgewichtszustand gemäss der Sorptionsisotherme des Materials bestimmt. Dies beruht auf dem Effekt, dass die Temperatur nicht steigt, solange Wasser verdampft. Bekanntlich sind es bei Oberflächenwasser 100°C, bei Kapillar- und Porenwasser erhöhen die Bindungskräfte die notwendige Verdampfungstemperatur. Daher ist es wichtig zwischen der Dampftemperatur und der Materialtemperatur zu unterscheiden.

Zur Bestimmung von Sorptionsisothermen in überhitztem Dampf wird im vorliegenden Projekt ein kleiner Prüfstand ohne Wärmerückgewinnung, genannt «Mobs», gebaut, welcher nur kleine Materialproben benötigt und mit beschränktem Aufwand betrieben werden kann. Damit kann eine Aussage gemacht werden, bei welcher Temperatur das Material getrocknet werden muss und in etwa bei welcher Energieeffizienz die Trocknung im Reindampfverfahren ablaufen würde. Neben dem Sorptionsverhalten können auch Aussagen gemacht werden, ob ein Material thermisch beständig ist oder ob das Material stoffliche Veränderungen erfährt. Mit diesen Erkenntnissen kann schliesslich der Reindampftrocknungsprozess in der Anlage «Triss» materialspezifisch angepasst werden.

¹⁰ Quelle: Das Wasserdampfsorptionsverhalten verschiedener Handelsfuttermittel pflanzlicher und tierischer Herkunft, A. Thalmann, 1980



1.5 Projektziele

1.5.1 Parameter- und Skalierungsstudie

Das übergeordnete Projektziel bestand darin, das Zusammenspiel aller relevanten Anlagen- und Verfahrensparametern zu verstehen und deren optimalen Betriebspunkt zu finden. Dazu sollten zwei Studien durchgeführt werden: eine Parameterstudie bei bestehender Anlagegrösse sowie eine Skalierungsstudie, bei der die Förderrate und damit verbunden die Trocknungsrate bzw. Kondensationsrate erhöht werden sollte. Daraus sollten Skalierungs- und Designregeln für den Bau der nachfolgenden Pilotanlage abgeleitet werden.

1.5.2 Prüfstand «Mobs» zur Bestimmung von Sorptionsisothermen

Wie in Kapitel 1.4 beschrieben wurde die zweite Kleinanlage «Mobs» zur Bestimmung von Materialeigenschaften, im Speziellen von Sorptionsisothermen, gebaut. Im Projekt soll das Trocknungsverhalten von ausgewählten Materialien (Silikagel, HTC-Biokohle, Ton) im Dampf mittels kleinen Materialsamples untersucht werden. Die gleichen Materialien werden auch in der Laboranlage «Triss» getrocknet und verglichen.

1.5.3 Total Cost of Ownership

Parallel zu diesen technischen Zielen galt es, die Kostenseite der neuen Technologie für Betreiber zu beleuchten, um einen Benchmark mit bestehenden Systemen machen zu können. Dabei sollte gezeigt werden, ob und bei welchen Randbedingungen sich die Anschaffung eines Reindampftrockners für einen Betreiber lohnen würde. Dabei war klar, dass die Antwort hauptsächlich von den lokalen Energiekosten abhängig wäre, insbesondere vom Strom-Gaspreisverhältnis wie in Abbildung 6 gezeigt.

1.6 Projektplan

In der Parameterstudie der Reindampftrocknungsanlage «Triss» galt es vorerst auf hoher Flugebene herauszufinden, wie sich das Zusammenspiel der Parameter verhalten würde. In einem eingehenderen Schritt sollten die bedeutendsten Abhängigkeiten ausgemessen und in Beziehung gebracht werden. Schliesslich sollte damit ausgesagt werden können, wie der optimale Betriebspunkt gefahren werden muss.

Im Vorfeld der Parameterstudie bestand die Vorstellung, dass alle Anlagen- und Betriebsparameter einen ähnlichen Einfluss auf den Gesamtbetrieb der Reindampftrocknung hätten. Daher wurde allen Parametern die gleiche Bedeutung gegeben. In der Parameterstudie sollten also alle Parameter systematisch verändert werden. Da während der Studie recht schnell ersichtlich wurde, bei welchen Parameter-Änderungen die grössten Gradienten im Gesamtbetrieb auftreten würden, wurde die Studie in dem Sinne angepasst. Abbildung 11 gibt einen Überblick über die veränderbaren Parameter (Stellgrössen), deren Aktoren (Stellglieder) und den Grössen, die aus diesen Einstellungen resultierten. Die wenig bis gar nicht veränderten Grössen sind in grauer Schriftfarbe aufgelistet.

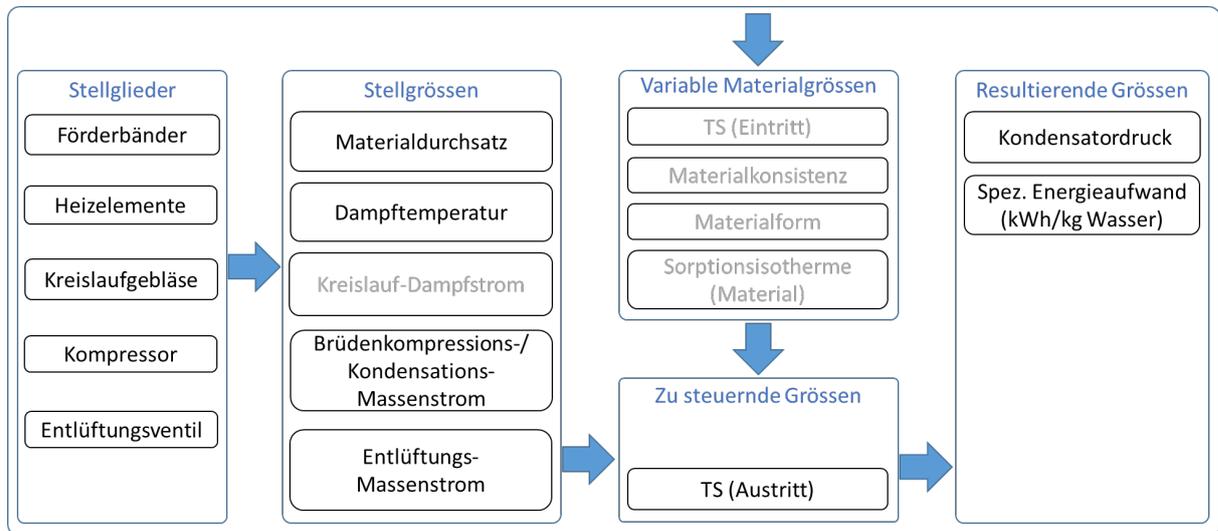


Abbildung 11 : Stellgrößen und Stellglieder des Reindampftrockners

In der Parameter- und Skalierungsstudie sollten diese Parameter im Zusammenspiel so verändert werden, dass die Betriebscharakteristik bzw. deren Abhängigkeiten ersichtlich würden. Darauf basierend sollten Beziehungen gebildet werden, welche einzuhalten sind, um die Technologie bei gleichbleibendem Material und dessen Beschaffenheit zu skalieren. Prozessspezifisch wurde analysiert, wie die Anlageparameter eingestellt werden müssen, um die vom Kunden erforderlichen TS-Werte sicherzustellen. Es galt also, den TS am Austritt stets zu überwachen, dass er gemäss Kundenvorgabe resultieren würde. Schliesslich stellten sich der Kondensatordruck und der spezifische Energieaufwand ein. Konnte die TS-Anforderung erzielt werden, wurden die Parameter bezüglich der Trocknungsgeschwindigkeit und der Energieeffizienz bewertet. Letzteren galt es möglichst tief zu halten.

Hinsichtlich der Skalierungsstudie wurde angenommen, dass sich mit der in Grösse konstanten Laboranlage eine Vergrößerung der Förderrate in vernünftigen Grenzen recht einfach anstellen liesse. Unklar war dabei, ob sich diese binnen der gesetzten Grenzen annähernd linear verhalten würde und ob sich dabei die Dynamik des Verfahrens erhöhen würde. Bislang war der Prozess recht träge und konnte gut von Hand geregelt werden. Ebenso war unklar, bei welcher Förderrate die Anlagegrösse limitiert wäre. Es wurde angenommen, dass die Limitation aufgrund der Wärmeübergangsfläche des Kondensators eintreten würde.



2 Anlagenbeschriebe

2.1 Reindampftrocknungsanlage «Triss»

Wie im Prozessschema (Abbildung 12) dargestellt, besteht die Reindampftrocknungsanlage «Triss» aus einem überhitzten Dampfkreislauf mit einer Materialtrocknungskammer (Schritte 1 bis 5) in Kombination mit einem in den Kreislauf integrierten Brüdenkompressor zur Wärmerückgewinnung (Durchgang 6 bis 8). Die Wärmerückgewinnungseinheit ist skalierbar aber immer dieselbe - unabhängig des Materials und der industriellen Anwendung. Folgend sei der Trocknungsprozess ausgeführt:

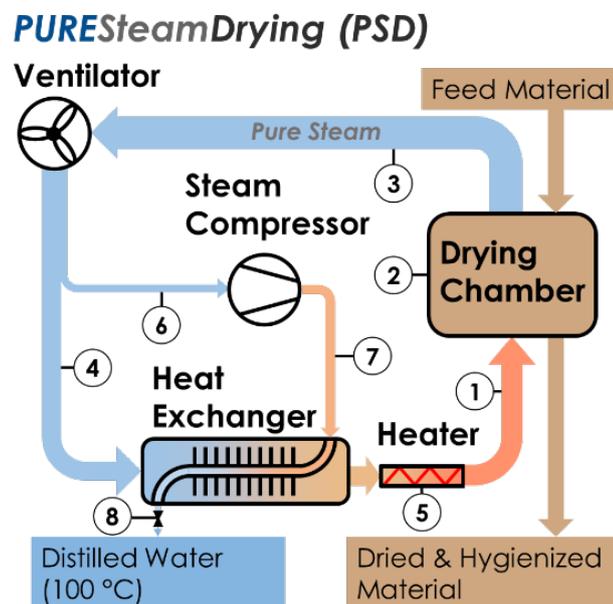


Abbildung 12 : Prozessschema der Reindampftrocknung «Triss»

1. In der Startphase wird das leere System mit Luft bei Atmosphärendruck auf über 100°C aufgeheizt. Darauf folgend wird Wasserdampf aus einem Dampfgenerator in das nach oben geschlossene und nach unten offene System eingeleitet. Dabei wird die dichtere Luft durch Gravitation nach unten verdrängt, bis der Luftanteil im System unter 10% liegt. Folgend wird der Dampf mittels Kreislaufgebläse durch die Trockenkammer (2) zirkuliert, wo das Schüttgut hindurchgefördert wird und der Luftanteil mit der Zeit gar auf weniger als 2% sinkt.
2. Die Feuchtigkeit der Materialien verdampft in der Trocknungskammer durch Wärmezufuhr bei überhitzter Temperatur des Dampfes. Am Eingang der Trocknungskammer (1) ist der Dampf über die Sättigungstemperatur überhitzt. Beim Passieren des Schüttguts wird die Wärmeenergie des Dampfes ans Material übertragen und zusätzliches Wasser verdampft.
3. Am Ausgang der Trocknungskammer (3) wird der Dampfmassenstrom mit dem aus dem Material verdampften Wasser erhöht. Die Temperatur wird dabei in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt (TS) des Materials bzw. dem Zustand der Sorptionsisotherme bestimmt und geringfügig gesenkt (rund 110°C für repräsentative Tests).
4. Der Kreislaufdampf tritt in den Wärmetauscher ein (4) und wird durch die Kondensation des Brüdenkompressionsdampfes bei einer höheren Temperatur auf der anderen Seite des Wärmetauschers erneuert überhitzt (wie später unter 7 beschrieben).



5. Nach der Überhitzung im Wärmetauscher werden zusätzliche Heizelemente benötigt, um Wärmeverluste auszugleichen und die Trocknungstemperatur besser (schneller) steuern zu können, womit die erforderliche Trockensubstanz eingestellt werden kann. Im Labor wird elektrisch beheizt, die Wärme könnte jedoch auch aus erneuerbaren Quellen stammen.
6. Nachdem der Dampf die Trocknungskammer verlassen hat, wird ein Teil des zusätzlichen Dampfes aus dem Kreislauf abgesogen und durch den Brüdenkompressor je nach Materialanspruch auf einen Druck von ca. 2,5 bis 5 barA verdichtet.
7. Entsprechend dem Druck im Kondensator kondensiert der Dampf bei dessen Sättigungstemperatur zwischen 130° und 150°C. Dabei wird die bei der Kondensation freiwerdende Verdampfungsenthalpie durch den Wärmetauscher dem Dampfkreislauf bei erhöhter Temperatur zurückgegeben.
8. Destilliertes, steriles Wasser von >100°C verlässt das System, wobei der Kreislaufdampf erhalten bleibt. Schliesslich kann das Wasser von 100°C zum Vorheizen oder im Unternehmen anstelle von Leitungswasser verwendet werden.

Die Reindampftrocknung kann flexibel auf die Materialansprüche angepasst werden, indem die passende Materialförderereinheit mit der Wärmerückgewinnungseinheit kombiniert wird. Je nach Material und industrieller Anwendung kann ein Bandförderer, ein Fließbett, ein Schaufelförderer oder sogar ein Sprühtrocknungsturm angegliedert werden.

Im Prozessschema nicht ersichtlich, ist die kontinuierliche Ein- und Ausschleusung des Materials. Wie in Abbildung 8 beschrieben, wird dies durch offene Schleusen bewerkstelligt, indem das Material von unten her aus der Umgebungsluft durch die Stratification Layer in den überhitzten Dampf geführt wird ohne dabei Luft ins System zu transferieren. Die Herausforderung wird gelöst, indem die Dampfatosphäre durch ihren Dichteunterschied von der Umgebungsluft getrennt wird. Der Dampf „schwimmt“ über der dichteren Luft. Die beiden bleiben durch die Stratification Layer getrennt. Damit kann die Anlage nach unten offen gebaut werden, wodurch das Material durch kostengünstige Weise ein- und ausgeschleust werden kann.

2.2 Sorptionsprüfstand «Mobs»

Abbildung 13 zeigt den Prüfstand «Mobs» zur Bestimmung von Sorptionsisothermen im schematischen Querschnitt. Dem Prüfstand liegt erneut das Prinzip des über der kalten Luft schwimmenden heissen Dampfes zugrunde. Der Aufbau ist gegen oben geschlossen und gegen unten offen. Darin wird ein Prüfmaterial in einer Schale dem überhitzten Dampf ausgesetzt und steht auf Stelzen auf einer Waage. Durch Halogen-Heizelemente kann die Temperatur schrittweise erhöht werden, wodurch Wasser aus dem Material verdampft. Dabei wird stets abgewartet, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt, was durch die Waage erkennbar ist, sofern bei der eingestellten Temperatur kein weiteres Wasser verdampft. Die Prüfvorrichtung bedarf < 100 g Material, welches jedoch vor der Dampfbefüllung eingeführt wird.



P&ID MobS

Vers. 02

T Temperature
O2 Oxygen
V Valve
M Motor

SE-T Temperature
SE-O2 Oxygen
SE-W Weight

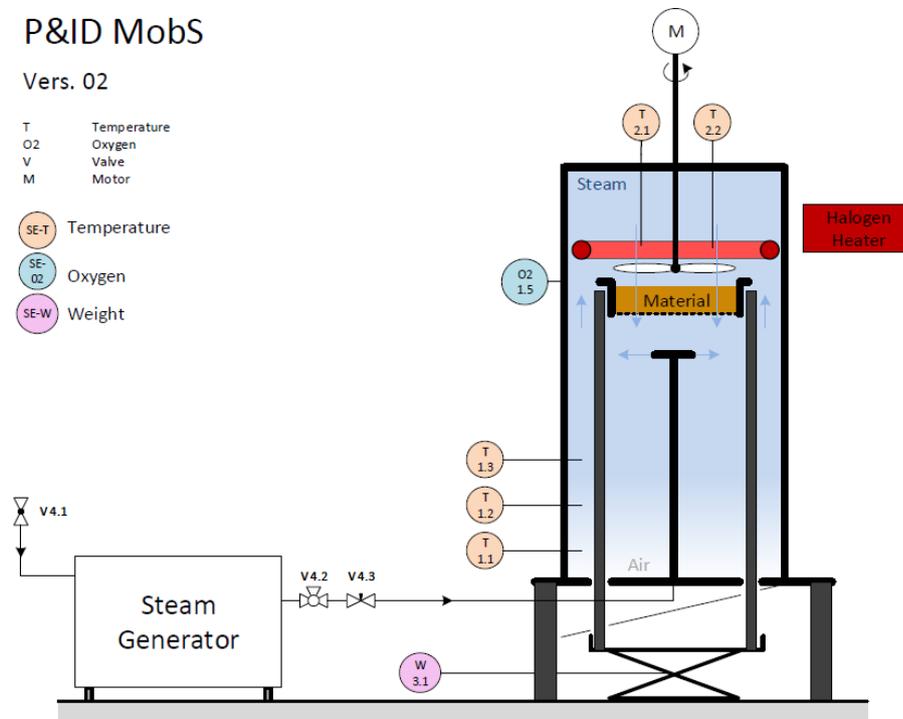


Abbildung 13 : P&ID und CAD des Prüfstandes «Mobs» zur Bestimmung von Sorptionsisothermen in Dampf

Folgend sei das Messprozedere ausgeführt:

1. Zur Inbetriebnahme wird die Anlage samt einer Probe mit Dampf befüllt. Ob der Dampfstand erreicht ist, wird durch den Sauerstoffsensord und/oder einen Temperatursensord erkannt.
2. Die Heizelemente werden eingeschalten und auf eine eingestellte Temperatur geregelt.
3. Das Gewicht der Probe wird kontinuierlich aufgezeichnet. Unterschreitet die Gewichtsänderung einen bestimmten minimalen Wert, wird die Messung bei dieser Temperatur beendet.
4. Die Temperatur wird auf einen höheren Wert gestellt und Punkt 3 wird erneut durchlaufen.
5. Ändert sich das Gewicht bei einer maximalen Temperatur nicht mehr, so wird die Messreihe erfolgreich beendet.
6. Überschreitet der Sauerstoffsensord während der Messreihe einen bestimmten Grenzwert, wird die Dampfzufuhr erhöht.



3 Vorgehen und Methode

Die Gesamtordnung im Projekt bestand darin, durch die Parameterstudie vorerst den Bestpunkt für den Betrieb zu finden, diesen danach in der Skalierungsstudie skaliert zu erhalten und die Energieeffizienz des Prozesses zu bestimmen. Aus den Messreihen sollte folgend die Energiebilanz erstellt werden, womit ein Vergleich mit alternativen Trocknungsverfahren gemacht wird. Durch Kenntnis der Energieeffizienz konnte schliesslich die Gesamtkostenrechnung für den Betreiber ausgearbeitet werden, womit ein Vergleich mit bestehenden System hinsichtlich der Kosten gemacht werden konnte.

Methodik in der Parameter- und Skalierungsstudie der Laboranlage TRISS

Im Vorfeld wurde eine Systematik ausgearbeitet, gemäss der die Parameter verändert werden sollten, um den gegenseitigen Einfluss, insbesondere auf die Effizienz als übergeordnete Prüfgrösse zu bestimmen. Dabei galt es, jeweils nur einen der Parameter zu verändern, während die anderen konstant gehalten werden sollten. Um diesen Ansatz umzusetzen, musste das System jedoch zuerst in einen stabilen Betriebszustand gebracht werden, bei dem alle Parameter konstant blieben. Darauffolgend konnten Parameter verändert werden. Wurde ein Parameter-Setting eingestellt, wurde es mindestens solange belassen, bis das Material die Anlage vorständig durchlaufen hatte, um den TS am Austritt zu bestimmen. Es zeigte sich jedoch recht schnell, dass teils bei Veränderung der Parameter eine Feinjustierung anderer Stellgrössen nötig war, um den Betrieb stabil zu halten.

In der Umsetzung hat sich abgezeichnet, bei welchen Änderungen die grössten Gradienten der Auswirkung auf den Gesamtprozess bestünden. Damit konnten die Variationen eingeschränkt und um den Bestpunkt gelegt werden. Da sich gezeigt hat, dass die Skalierung als ein Parameter der Parameterstudie gesehen werden muss, wurde die Skalierungsstudie faktisch in die Parameterstudie integriert.

Für die Skalierung wurde ein grösserer Brüdenverdichter installiert. Für die Parameterstudie wurde die Anlage mit einem 3.7 kW Verdichter ausgestattet. Zur Skalierung wurde eine Leistung von 7.5 kW installiert. Ursprünglich wurde angenommen, dass die Anlage derart designt wäre, dass innerhalb einer gewissen Bandbreite skaliert werden könnte und dazu bloss ein grösserer Brüdenverdichter angeschafft werden müsste. Leider hat sich recht schnell gezeigt, dass die Begrenzung in zweifacher Weise beim Kreislaufgebläse liegen würde: Zum einen wurde ein grösserer Kreislaufvolumenstrom benötigt als dimensioniert, womit dem Gebläse nur noch wenig Spielraum bis zur Höchstleistung blieb. Zum anderen zeigte sich, dass der Strömungswiderstand des Kreislaufkanals beim Erhöhen des Kreislaufvolumenstroms stärker ansteigen würde als in der Auslegung berechnet. Damit kam das Gebläse erst recht schneller an die Skalierungsgrenze als geplant und stellte sich als begrenzende Komponente heraus. Damit konnte das Potential des grösseren Brüdenkompressors nicht ausgeschöpft werden.

Methodik der Messreihen zur Bestimmung von Sorptionsisothermen am Sorptionsprüfstand «MobS»

Um den Wassergehalt im Material (Restfeuchte) in Abhängigkeit der Wasseraktivität bestimmen zu können, durchläuft das Material in der Prüfung, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, eine Anzahl Temperaturen bis keine Verdampfung mehr festgestellt werden kann. Darauffolgend wird es zur Überprüfung der vollständigen Trocknung und des Eigengewichts des Materials (TS 100%) in einen Moisture Analyzer überführt. Zur Erstellung der Sorptionsisothermen wird schliesslich die Temperatur in den Relativdruck umgerechnet. Aus dem Nettogewicht (ohne Schale und Stelzen) samt Restfeuchte und dem Trockengewicht des Materials wird zudem der jeweilige Wasseranteil bestimmt und über dem Relativdruck als Sorptionsisotherme aufgetragen.



4 Ergebnisse und Diskussion

Die Resultate werden wie folgt strukturiert:

1. Parameterstudie der Laboranlage «Triss»
2. Skalierungsstudie
3. Skalierungs- und Designregeln
4. Energie- und Massebilanz
5. Vergleich mit herkömmlichen Systemen
6. Materialtests im «Triss»
7. Sorptionsisothermen-Messung am Prüfstand «Mobs»
8. Total Cost of Ownership Betrachtung

4.1 Parameterstudie

Zur Ausführung der Messergebnisse wird zuerst der Messstellenplan mit der Zuordnung der Sensoren in Abbildung 14 gezeigt, damit in den Diagrammen klar wird, an welchen Stellen gemessen wurde. Da neben dem stationären Betrieb der Laboranlage «Triss» auch die Inbetriebnahme von Bedeutung ist und eine aufschlussreiche Charakteristik zeigt, wurde sie ebenso analysiert und wird nachfolgend zuerst ausgeführt. Danach werden die eigentlichen Messreihen präsentiert.

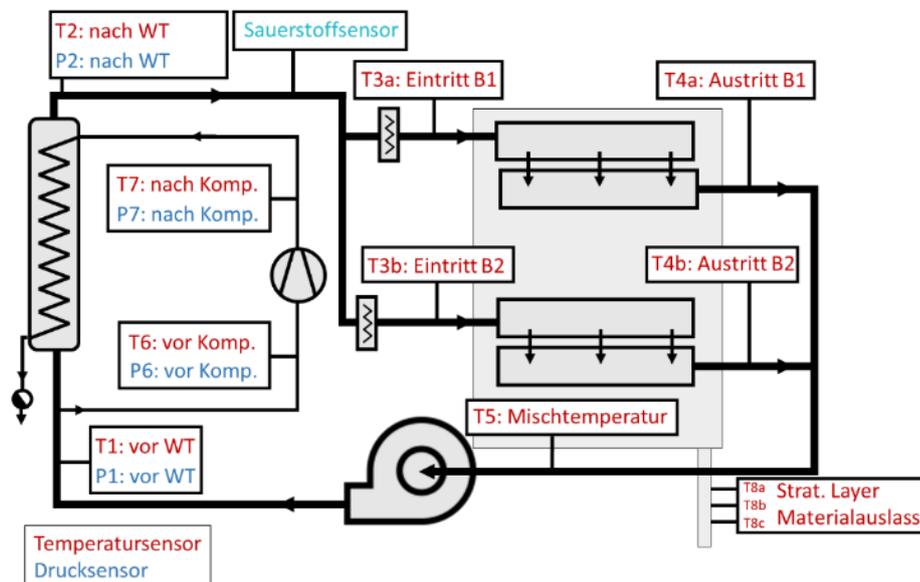


Abbildung 14 Messstellenplan mit Sensorbezeichnungen

4.2 Inbetriebnahme der Reindampftrocknungsanlage «Triss»

Da die Reindampftrocknung in einer reinen Dampfatmosfera bei Umgebungsdruck abläuft, muss die Anlage mit Luft auf eine Temperatur von mindestens 100°C vorgeheizt und eine Dampfatmosfera geschaffen werden. Dies wird in drei Schritten erreicht.

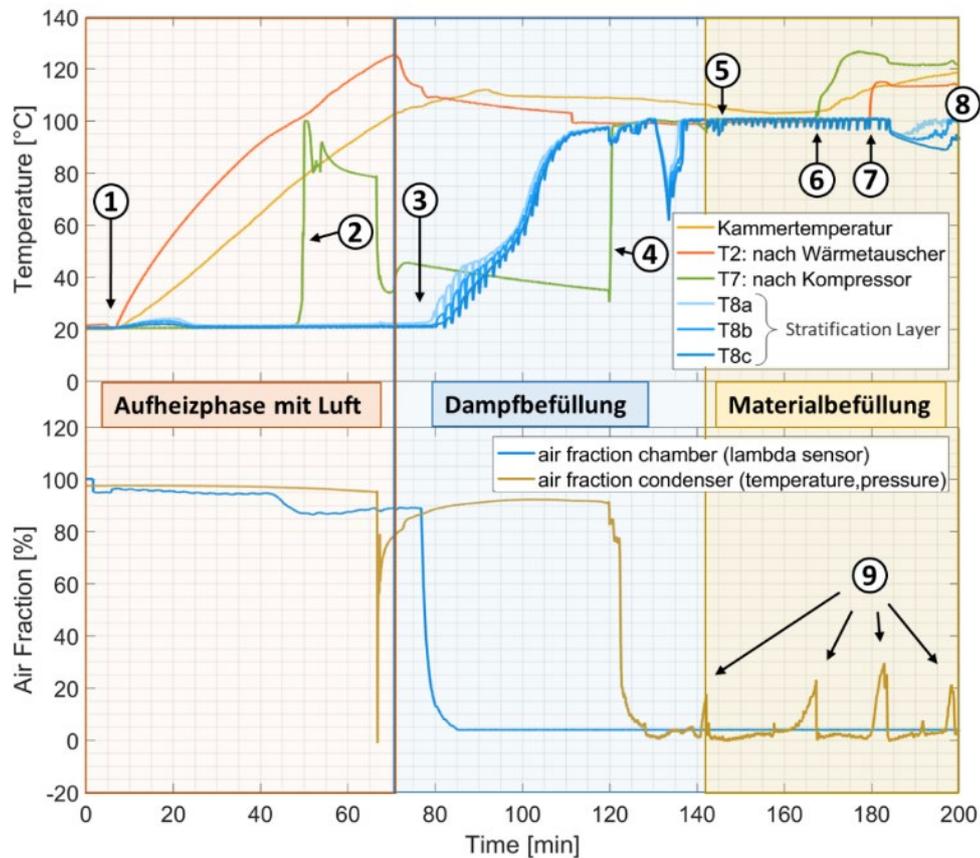


Abbildung 15 Inbetriebnahme der Anlage

1. Aufheizphase mit Luft

In einer ersten Phase wird die Anlage mit heisser Luft aufgeheizt. Dazu wird Luft mit dem Kreislaufgebläse durch den Trockner zirkuliert, welcher über die Heizelemente Wärme zugeführt wird. Diese Phase beginnt bei (Pos. 1) in Abbildung 15 und dauert ca. eine Stunde. Gegen Ende dieser Phase wird der Kompressor im Leerlauf (kurzgeschlossen) eingeschaltet (Pos. 2), um diesen ebenfalls vorzuwärmen, wodurch grössere thermische Spannungen und Kondensation im Kompressor bei der Dampfbefüllung vermieden werden. Die Phase ist abgeschlossen, wenn die Trocknungskammer eine Temperatur von über 100°C erreicht. Die zirkulierende Luft im Kreislaufkanal hat zu diesem Zeitpunkt die Temperatur von 100°C bereits weit überschritten (T2), da dieser durch die Luft direkt beheizt werden kann.

2. Dampfbefüllung

Nachdem die Kammertemperatur von 100 °C erreicht ist, beginnt die Dampfbefüllung (Pos. 3). Dazu werden Heizelemente und Kreislaufgebläse ausgeschaltet und Dampf aus einem Dampfgenerator von oben in die Anlage geleitet. Dabei wird die Luft, welche eine geringere Dichte hat, nach unten aus der Anlage verdrängt. Dies wird durch das Ansteigen der Temperatursensoren (T8) beim Materialauslass ersichtlich. Gegen Ende dieser Phase wird der Kompressor wieder eingeschaltet, um Betriebstemperatur zu erreichen, wodurch die Temperatur kurz einknickt (Pos. 4).

Der Luftanteil in der Anlage wird an zwei Stellen gemessen. Zum einen direkt mit einer Lambda-Sonde, welche über dem Wärmetauscher an der Decke der Anlage im Dampfkreislaufstrom befestigt ist und zum andern indirekt auf Basis der Kenntnis der Dampfgesetze durch Messung von Druck und Temperatur des Dampfs beim Kondensatauslass nach dem Kondensator. Damit kann, in Kombination mit den Temperatursensoren am Materialauslass (T8), die Dampfbefüllung genau überwacht werden, was in Abbildung 15 ausgeprägt ersichtlich ist.



Zuerst nimmt der Wert der Lambda-Sonde schlagartig ab, dann steigen die Werte der Temperatursensoren (T8) langsam an, da die heisse Luft nach unten verdrängt wird. Erreichen diese 100 °C, bedeutet dies, dass das Dampfvolument am Anlageboden angekommen ist, was mit der zweiten Messung des Luftanteils überprüft werden kann. Die Entlüftung funktioniert sehr gut. Es gelingt ohne Probleme, die Luft durch den leichteren Dampf von oben nach unten aus der Kammer zu verdrängen. Schliesslich schwimmt der Dampf über der kalten Umgebungsluft. Es bestätigt sich, dass das Gehäuse gegen unten offengelassen werden kann und sich eine Übergangsschicht/Grenzschicht zwischen Dampf und Luft, die sogenannte Stratification Layer bildet. Über dieser Schicht stellt sich ein Temperaturprofil ein, das sich innert rund 50 cm von Umgebungstemperatur auf über 100°C erstreckt.

3. Materialbefüllung

Sobald die Dampfatmosfera generiert ist, kann Material in die Anlage geführt werden (Pos 5). Während dieser Phase muss nach wie vor Dampf mit dem Dampfgenerator erzeugt werden. Dies ist notwendig, da Dampf am kalten Material kondensiert und dieses damit aufwärmt. Da noch kein Dampf durch den Trocknungsprozess generiert wird, muss dieser vom Dampfgenerator bereitgestellt werden. Während diesem Prozess werden die Heizelemente sowie das Kreislaufgebläse wieder in Betrieb genommen. Sobald ein Grossteil der Anlage mit Material gefüllt ist, wird der Kompressor weiter hochgefahren, womit der Kondensatordruck steigt (Pos. 6). Dadurch erhöht sich die Kondensationstemperatur im Kondensator, wodurch Wärme wieder an den Dampfkreislauf abgegeben werden kann (Pos. 7). Ist die Anlage komplett mit Material gefüllt und eine ausreichende Wasserverdampfungsrate erreicht, kann der Dampfgenerator abgeschaltet werden und der reguläre Trocknungsprozess beginnt. Da auf der einen Seite der Ziel-TS des Materials am Austritt vom Relativdruck und damit von der Dampftemperatur abhängt (vorausgesetzt die Verweilzeit ist genügend lang) und auf der anderen Seite dem kontinuierlichen Prozess zur Materialvorheizung stetig Wärme zugeführt werden muss, wurden diese beiden Ansprüche derart gelöst, dass die Wärme vor dem Material bei der höchst nötigen Temperatur eingeführt wurde und die Vorheizung auf tieferer Temperatur durch den entstehenden Dampf aus dem Material gemacht wird.

Während dieser Phase muss weiter entlüftet werden. Obwohl der Luftgehalt in der Anlage sehr gering ist, staut sich die Restluft im Kondensator an und muss regelmässig ausgestossen werden (Pos. 9).

4.3 Trocknungsbetrieb

Während der Parameterstudie hat sich gezeigt, dass gewisse Materialien am Steigförderer wie auch am Band haften oder gar kleben bleiben. Dies wurde akzeptiert, da die Optimierung des Fördersystems nicht im Zentrum dieser Studie stand. Um nicht von diesen Nebeneffekten beeinträchtigt zu werden, wurde entschieden, die Studie ausschliesslich mit Silikagel Typ B mit Kugeldurchmesser von 5- 10mm durchzuführen. Silikagel eignet sich auch deswegen gut, um als Referenzmaterial verwendet zu werden, da das Wasser durch Dipolkräfte und nicht durch Van der Waals Kräfte gebunden ist, womit die Sorptionsisotherme unabhängig von der Temperatur gleich bleibt.

Entgegen von Befürchtungen, in der Dampfkammer könnte sich an den Wänden Kondensat bilden und die Kammer müsste überwacht und aktiv beheizt werden, blieb es an den Kammerwänden trocken. Die Dampftemperatur war stets leicht überhitzt zwischen 110° und 120°C. Es konnte durch die Fenster beobachtet werden, dass keine Kondensation stattfindet. Leichte Kondensation hat im Bereich der Übergangsschicht (Stratification Layer) am Ein- und Austritt stattgefunden, dies ganz gemäss Erwartung. Die Optimierung dieser Bereiche war nicht Fokus dieses Projekts.

4.3.1 Entlüftung des Kondensators

Obwohl durch die raffinierte offene Schleuse kaum Luft ins System gelangt, können Spuren Mengen nie komplett ausgeschlossen werden. Die kleinen Luftanteile im System konzentrieren sich im Kondensator auf und blockieren mit der Zeit wertvolle Wärmeübertragungsfläche. Um dies zu vermeiden, muss der Kondensator kontinuierlich entlüftet werden. Zurzeit wird dies manuell mit einem Nadelventil gemacht. Der Luftanteil im Kondensator kann damit einfach aus dem Kondensatordruck und der Kondensatortemperatur bzw. deren Abweichung von der



Sättigungstemperatur berechnet werden. Abbildung 16 zeigt den geringen Luftanteil in der Kammer, der gar kleiner ist als die Messschwelle der Lambda-Sonde und den schwankenden (aufkonzentrierten) Luftanteil im Kondensator. Schnelle Änderungen sind auf Ventilbetätigung zurückzuführen.

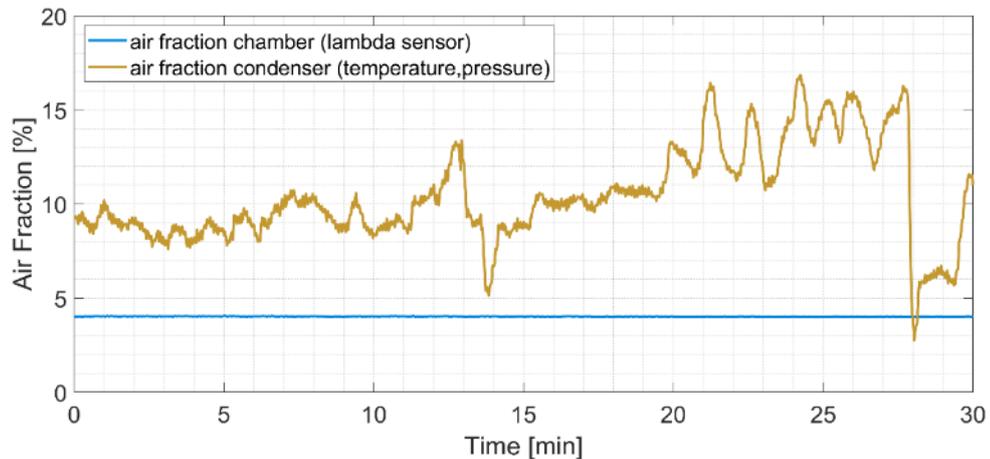


Abbildung 16 Luftanteil in der Trocknungskammer und im Kondensator

Da der in den Kondensator geführten Luftmassenstrom nicht konstant ist und stark vom Betriebszustand der Anlage abhängig ist, muss das Luftablassventil laufend nachjustiert werden. Damit kann der Luftanteil im Kondensator bei einem angestrebten Prozentsatz gehalten werden.

Die Parameterstudie hat gezeigt, dass die Anlage am effizientesten mit einem Luftanteil von rund 10 % gefahren wird. Dabei ist das Optimum zwischen zwei negativen Tendenzen zu finden: dem Dampfverlust durch Entlüftung vs einer erhöhten Wärmepumpenleistung: Um den Wärmeübergang im Kondensator maximal und den notwendigen Druckaufbau der Wärmepumpe minimal zu halten, muss der Luftanteil durch Entlüftung möglichst tief gehalten werden. Da jedoch mitsamt der Entlüftung auch Dampf aus dem System entweicht, wird die Effizienz negativ beeinflusst. Steigt im Gegensatz dazu der Luftanteil im Kondensator zu stark an, nimmt die Effizienz des Wärmetauschers durch versperrte Fläche ab, womit die Wärmepumpe mit erhöhter Leistung arbeiten muss, was sich ebenfalls negativ auf die Effizienz der Anlage auswirkt. Abbildung 17 zeigt den Dampfverlust in Abhängigkeit des Luftanteils im Kondensator. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Luftanteil gegen 10 % der Dampfverlust minimal ausfällt. Da die Wärmepumpenleistung bis zu 10% Luftanteil nur leicht steigt, liegt der optimale Betriebspunkt bei rund 10 % Luftanteil. Da diesem Effekt eine hohe Bedeutung zukommt, wird eine automatisierte Regelung des Entlüftungsventils für einen autonomen Betrieb der Anlage essentiell sein.

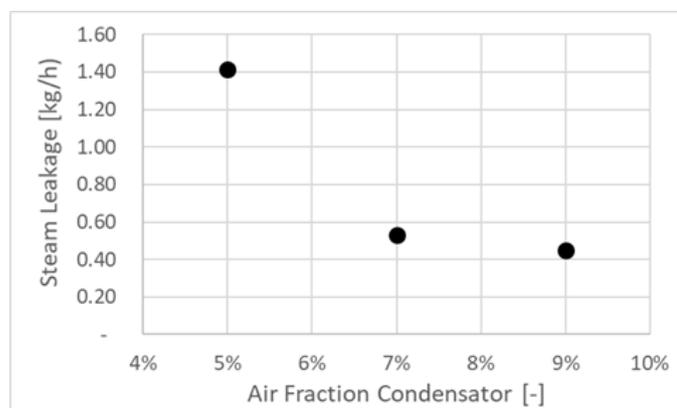


Abbildung 17 Dampfverlust durch Entlüftung am Kondensator in Abhängigkeit der verbleibenden Luft im Kondensator



4.3.2 Trockensubstanzanteil TS

Der wichtigste Parameter für den Kunden ist der Trockensubstanzanteil TS des Materials nach dem Trocknungsprozess. Dieser wird vom Kunden vorgegeben und muss konstant eingehalten werden.

Der gewünschte TS wird primär über die Trocknungstemperatur eingestellt, sofern die Verweilzeit genügend lang ist. Welche Temperatur für einen bestimmten TS mindestens eingestellt werden muss, ist vom Material abhängig und kann, wie in der Einleitung aufgezeigt, aus den Sorptionsisothermen abgeleitet werden. Umgekehrt kann der TS des Materials im Trockner bei der Reindampftrocknung, die immer bei Atmosphärendruck abläuft, direkt über die Materialtemperatur bestimmt werden.

Bestimmt wurde der TS mit einem Moisture Analyzer von Mettler Toledo, Typ «HS153»:

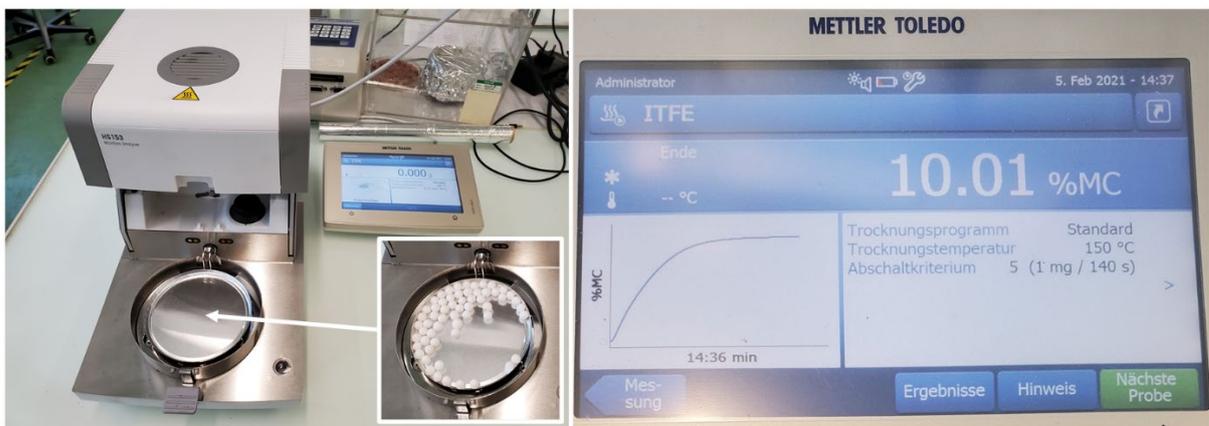


Abbildung 18 Moisture Analyzer Typ «HS153» von Mettler Toledo

Dabei wird eine Testmenge von rund 10 g in den Moisture Analyzer gelegt (vgl. Abbildung 18) und der Gewichtsverlust (durch Restwasserverdampfung) gemessen. Für Silikagel wurde eine Trocknungstemperatur von 150°C gewählt. Die Messung wurde als abgeschlossen betrachtet, wenn sich das Gewicht über einen Zeitraum von 140 s nicht mehr als 1 mg änderte. Für organische Materialien (Biokohle) wurde aufgrund der Selbstzündungsgefahr die Trocknungstemperatur auf 100°C reduziert. Die Proben wurden während dem Trocknungsdurchgang zu drei Zeitpunkten entnommen:

1. Vor dem Eintritt in den Trockner, um den Ausgangs-TS zu bestimmen.
2. Unmittelbar nachdem das Material aus dem Trockner gefallen ist. (Diese Probe wurde mit einem Probenbehälter direkt aufgefangen und luftdicht verpackt, damit das beim Abkühlen verdampfende Wasser nicht entweichen konnte.)
3. Nachdem es aus dem Trockner gefallen und an der Luft abgekühlt ist. (Während das Material an der Luft abkühlt, findet immer eine Nachverdampfung statt. Diese kann über die TS-Differenz von 2 zu 3 bestimmt werden.)

Abbildung 19 zeigt den TS des Silikagels als Testmaterial unmittelbar nach Austritt aus dem Trockner und ebenso nach einem zusätzlichen Flash Drying Effekt an der Luft in Abhängigkeit der Temperatur des Dampfes nach dem Material am Ende des zweiten Bandes. Die Temperatur des Dampfes nach Durchströmung des Materials ist in etwa gleich der Materialtemperatur. Vergleicht man diese Werte mit der aus der Literatur bekannten Sorptionsisothermen für Silikagel, zeigt dies bereits eine gute Übereinstimmung.

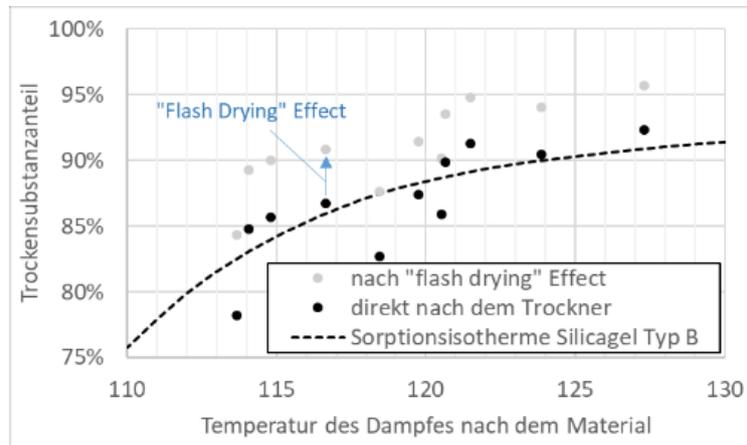


Abbildung 19 Vergleich der Sorptionsisothermen für Silikagel Typ B aus der Literatur (Fuji Silysia) mit den Messresultaten und Veranschaulichung des «Flash Drying» - Effekts

Zusätzlich zeigt Abbildung 19 den sogenannten «Flash Drying» Effekt, welcher bei der Heissdampftrocknung auftritt. Sobald das noch heisse Material aus der Dampfathmosphäre in die Umgebungsluft fällt, sinkt der Partialdruck des Dampfes in der Luft (bzw. der Relativdruck) schlagartig, was zu einer zusätzlichen Wasserverdampfung führt, bis das Material den entsprechenden Sättigungsdruck erreicht hat. Dieser Effekt hat den Vorteil, dass sich die Wärmeenergie, mit welcher das Material den Trockner verlässt, für den Trocknungsprozess verwenden lässt und nicht als Verlust anfällt.

Auf Basis der Kenntnis der materialspezifischen Sorptionsisothermen kann der Trockner jeweils so eingestellt werden, dass der TS abhängig vom Material durch unterschiedliche Temperaturen erreicht wird.

Abbildung 20 zeigt Trocknungstests mit Tonstücken von Backsteinen der Firma Wienerberger, die mit der von ihnen bereitgestellten Sorptionsisothermen verglichen werden.

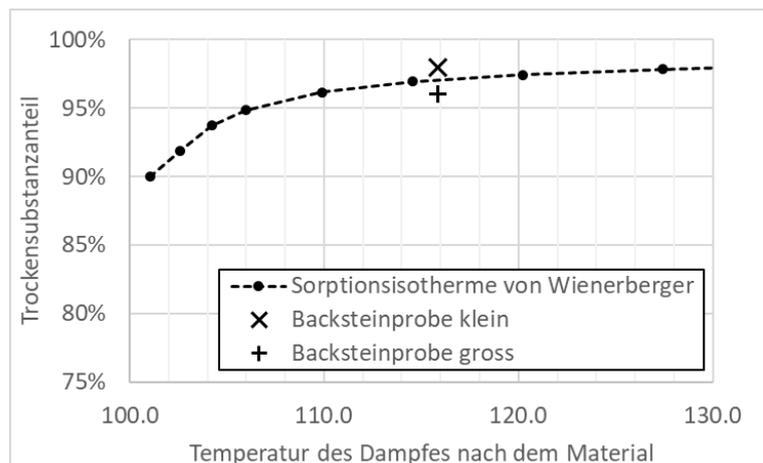


Abbildung 20 Erreichte TS bei der Testtrocknung von Ton verglichen mit der Sorptionsisothermen für Ton von Wienerberger

Es kann gezeigt werden, dass die Reindampftrocknung den TS auch für Ton gemäss Theorie erzielt. Es hat sich erwartungsgemäss jedoch auch gezeigt, dass auch die Probengrösse einen Einfluss auf den Ziel TS hat. Um diesem Einfluss gerecht zu werden, muss die Verweildauer des Materials im Trockner justiert werden. Eine Analyse der Verweilzeit des Materials im Dampf zeigt, dass sich der TS bei längeren Verweilzeiten deutlich nach oben bewegt, ohne dass die Temperatur stark erhöht werden müsste. Die Energieeffizienz erhöht sich aus diesem Grund bei längeren Verweilzeiten. Die Analyse wurde allerdings schlicht gehalten, da sich die Gesamtdurchläufe mit längeren



Verweilzeiten zu lange hingezogen haben und die zusätzliche Erkenntnis daraus gering war. Der TS wurde jeweils bestimmt, nachdem das Material die Anlage bei unverändertem Betriebszustand vollständig durchlaufen hatte. Leider lassen nicht alle Materialien lange Verweilzeiten zu. Z.B. bei Petfood kann eine thermische Zerstörung von Vitalstoffen eintreten. Ist eine hohe Prozessgeschwindigkeit gefordert, so wird dies primär mit erhöhter Temperatur und Konvektion erreicht.

4.4 Skalierungsstudie

Wie in der Einleitung beschrieben, wurde zur Skalierung ein grösserer Brüdenkompressor von 7.5 kW anstelle von 3.7 kW angeschlossen. Leider stellte sich heraus, dass das System zur Wärmerückführung einen grösseren Kreislaufvolumenstrom benötigte als bei der Dimensionierung geplant, womit das System in seiner Wärmerückführung durch das Kreislaufgebläse stärker limitiert wäre als geplant. Dieser unterschätzte Bedarf des Kreislaufvolumenstroms trieb die Druckverluste in die Höhe, wodurch das Gebläse an die Leistungsgrenze stiess.

Um das Kreislaufgebläse bei der Wärmerückführung etwas zu entlasten wurde der Filter zum Schutz des Wärmetauschers zugunsten eines geringeren Druckverlusts im Kreislauf entfernt, da sich erfreulicherweise gezeigt hat, dass er (zumindest während der Studie von rund 170 Betriebsstunden) nicht nötig war. Um den für die Brüdenverdichtung zur Verfügung stehenden Dampf zu erhöhen wurde das Material als zweite Massnahme vor eintreten in den Trockner auf bis zu 70°C vorgeheizt und erst dann in die Anlage eingeführt. Damit konnte der benötigte Dampf zur Vorheizung auf eine Materialtemperatur von 100°C beim Einführen des Materials in die Dampfatosphäre reduziert werden, womit mehr Dampf zur Rekuperation zur Verfügung blieb. Damit konnte die Skalierung zwar nur in einem begrenzten Mass von gut Faktor 1.5 von 10 auf 16 kg/h Wasserverdampfung durchgeführt werden, fiel dennoch aber zufriedenstellend aus.

Wie in Abbildung 21 gezeigt, wurde das Kreislaufgebläse mittels FU zu überhöhten Drehzahlen von bis zu 70 Hz bewegt, womit der Volumenstrom soweit gesteigert wurden, dass die Verdampfungsrate um rund Faktor 1.5 erhöht werden konnte. Ebenso zeigt sich, dass die Skalierung der Verdampfungsrate über der Kreislaufgebläsedrehzahl (bzw. dem Volumenstrom des Kreislaufgebläses) in etwa linear verläuft. Erfreulicherweise zeigte sich zudem, dass bei der Skalierung keine neuen Gesetzmässigkeiten auftreten. Der skalierte Betrieb verhält sich thermisch ähnlich träge wie jener der Parameterstudie. Solange das Kreislaufgebläse die Wärme zurückführen kann, konnten bei gleichbleibenden Trocknungstemperaturen und Bandgeschwindigkeit die Materialeintrittsrate und die Brüdenkompressionsrate miteinander erhöht werden. Der TS am Austritt blieb in etwa konstant und die Effizienz konnte leicht erhöht werden.

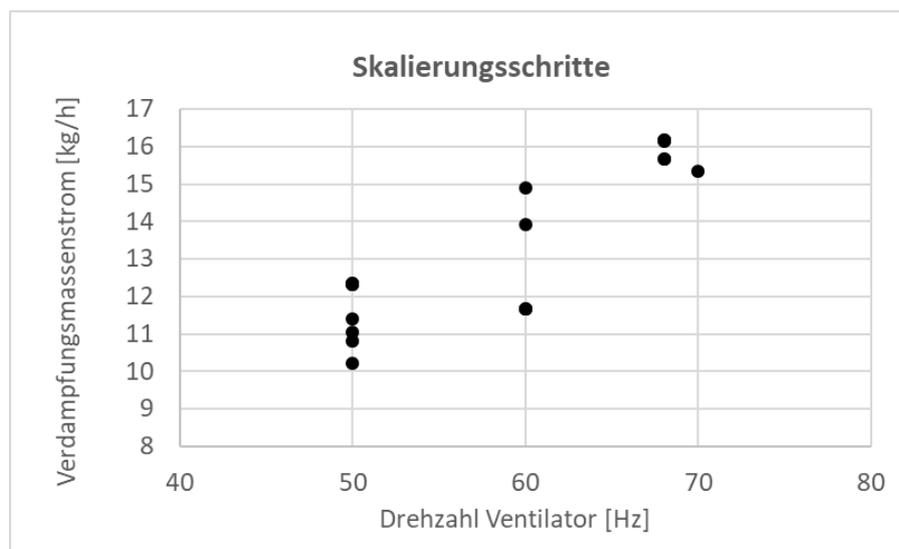


Abbildung 21 Skalierter Verdampfungsmassenstrom in Abhängigkeit der skalierten Kreislaufgebläsedrehzahl



Abbildung 22 zeigt den fallenden Gesamtenergiebedarf der Reindampftrocknung bei zunehmender Temperaturerhöhung der Wärmerückführung durch die Wärmepumpe (bzw. Temperaturdifferenz über dem Wärmetauscher). Die abnehmende Tendenz zeigt sich bei zwei Betriebszuständen unterschiedlicher TS-Zielwerte.

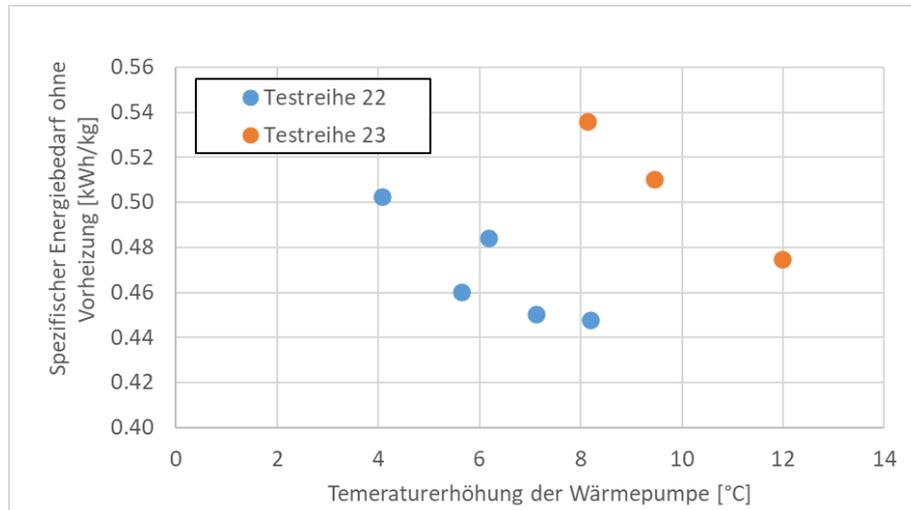


Abbildung 22 Spezifischer Energiebedarf des Gesamtsystems in Abhängigkeit der Temperaturerhöhung durch die Wärmepumpe (bzw. Differenz über dem Wärmetauscher); Testreihen 22, 23 unterscheiden sich im Ziel-TS

Im Hinblick auf die Pilotanlage fehlte im Bereich der skalierten Brüdenkompression Know-How. Um die Skalierungsstudie in diesem Aspekt dennoch durchführen zu können, wurde zur Überbrückung des Problems während dem Betrieb der Reindampftrocknung zusätzlich der Dampfgenerator laufen gelassen, womit dem Brüdenkompressor unbegrenzt Dampf zur Verfügung stand, ohne dass der Betrieb ins Ungleichgewicht bewegt würde. Abbildung 23 zeigt den isentropen Kompressorwirkungsgrad in Abhängigkeit des Drucks im Kondensator bzw. bei erhöhter Kondensationstemperatur. Die Kurve macht deutlich, dass der Bestpunkt im höheren Druckbereich liegt. Jedoch unterliegt der Kompressor dem Gesamtbetriebszustand, indem der Kondensationsdruck durch die Kondensationstemperatur bestimmt wird. Diese wiederum, ausgehend von der Eintrittstemperatur des Dampfs in den Wärmetauscher, hängt schliesslich auch vom Volumenstrom des Dampfs ab, der rekuperiert werden kann. Je geringer also die Gesamtverluste an der Anlage ausfallen, umso mehr Dampf kann der Kompressor in Kondensator fördern, womit der Kondensationsdruck steigt und in dessen Folge sowohl der Kompressorwirkungsgrad wie auch der Gesamtwirkungsgrad der Anlage steigen.

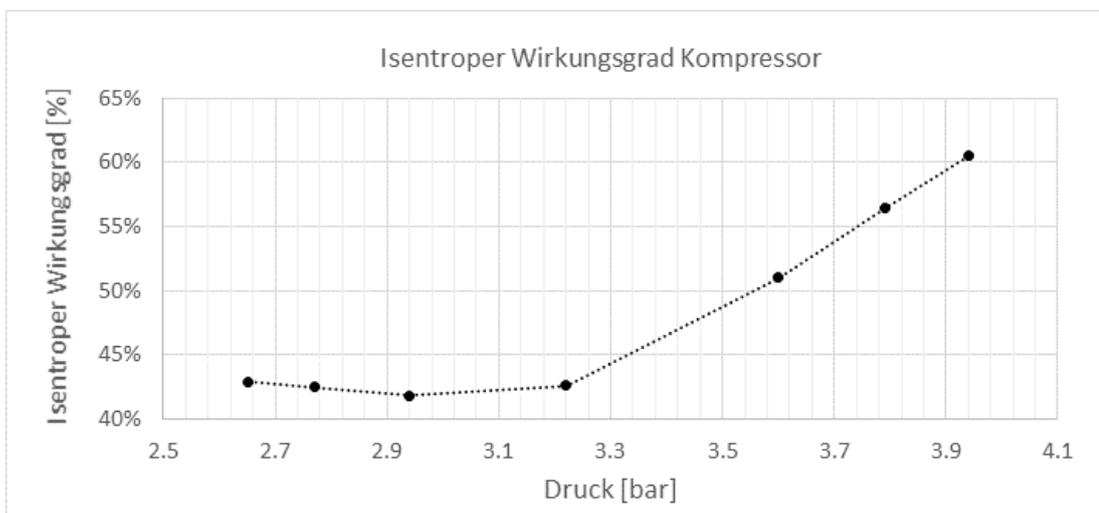


Abbildung 23 Isentroper Kompressorwirkungsgrad in Abhängigkeit des Druckaufbaus im Kondensator



4.5 Skalierungs- und Designregeln

Die Hauptdesignregel, die aus den Messreihen abgeleitet werden konnte, bezweckt die Dimensionierung des Kreislaufgebläses, da das Verfahren essentiell davon abhängt:

Im Idealfall, kaum Wärmeverluste über dem System und bei einem Materialeintritt von 100°C, müsste das Gebläse bloss ein Massenstromverhältnis von rund 30:1 bezogen auf die Brüdenkompressionsrate liefern. Im Realfall muss jedoch nicht nur die Verdampfungsenthalpie aus dem Wärmetauscher transferiert werden. Zusätzlich muss Wärme für Wärmeverluste, zur Vorheizung des Materials und für Oberflächenwasser, das bei der Vorheizung auf dem Material kondensiert und beim Steigförderer nicht abgetropft ist, bevor das Material in den Trocknungsprozess übergegangen ist. Um flexibel zu sein und imstande, diese Summe der Wärme überführen zu können, muss das Verhältnis bei mindestens 60:1 liegen. Da dem Kreislaufgebläse zentrale Bedeutung zukommt, fährt man gar auf der sicheren Seite, indem man dessen Volumenstrom grösser als nötig einstellt. Indem die Dissipation der Kreislaufströmung in systeminterne Wärme übergeht, dient sie zudem dem thermischen Prozess als Quelle und ist nicht verloren.

Hinsichtlich Wärmeverlusten hat sich herausgestellt, dass es besser ist, die Kanalführungen rechteckig zu designen, jedoch im inneren des Trockners verlaufen zu lassen, als diese in Rohren ausserhalb der Trocknungskammer zu führen und damit zusätzliche äussere zu isolierende Oberfläche zu generieren. Grundsätzlich gilt, die äussere Oberfläche so klein wie möglich zu halten, was sich nicht nur in geringeren Wärmeverlusten sondern auch durch kosteneffizientere Isolation auszahlt. Ebenso hat sich gezeigt, dass der Steigförderer stärker als eingeschätzt als Wärmetauscher fungiert, da er sich bekanntlich mit seiner Metallmasse stets zwischen dem heissen Dampf und der kalten Umgebungsluft bewegt. Dabei wird künftig zu beachten sein, dass der Steigförderer zugunsten hoher Energieeffizienz mit möglichst wenig Masse und mit möglichst niedrigen Wärmeübergangseigenschaften designt wird. Im Speziellen sollen jegliche statischen Spannvorrichtungen ausserhalb des Dampf-Luftübergangs positioniert werden, damit sie nicht als Kältebrücke fungieren.

Zusätzlich zu den Messreihen wurde ein Simulationstool erstellt, in dem die gleichen Stellglieder eingestellt werden können wie an der Laboranlage. Ziel ist es, das System im Simulationstool so abzubilden, dass dessen Output-Grössen durch die Sensoren der Laboranlage überprüft werden können. Ferner soll das Tool derart umgebaut werden, dass die Stellgrössen (so. z.B. die Dimension des Kreislaufgebläses) resultieren, um damit eine Grundlage zur Dimensionierung künftiger Anlagen zu schaffen. Es handelt sich also vorerst um ein Einstellungstool und noch nicht um ein Auslegungstool, das durch die Anlage validiert wird. Abbildung 24 zeigt den schematischen Aufbau des Tools. Dabei sind die beteiligten Prozesse, die in der Anlage nicht direkt eingestellt werden können, mit Funktionen hinterlegt.

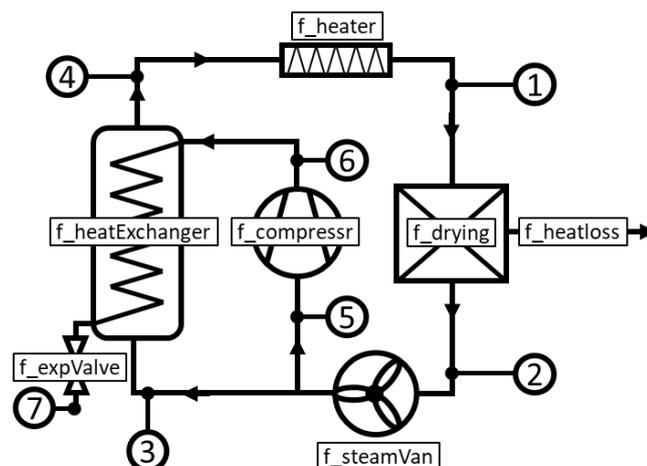


Abbildung 24 Schema des Simulationstool mit den implementierten Funktionen

Input-Stellgrössen sind:



- Volumenstrom des Dampfkreislaufgebläses
- Massenstrom des Brüdenkompressors (bzw. Kondensationsstrom)
- Trocknungstemperatur vor dem Material (vereinfacht ist alles Material dieser Höchsttemperatur ausgesetzt)
- Wasserverdampfungsrate aus dem Material

Output-Größen sind:

- Alle Zustandsgrößen jeweils bei den Ziffern
- Leistung des Kreislaufgebläses, des Brüdenkompressors und der Heizelemente
- Spezifischer Energiebedarf pro Kilogramm verdampftes Wasser

Abbildung 25 zeigt, den in Tabelle 4 gemessenen Betriebsreferenzpunkt für Silikagel. Die Simulation wurde sowohl für den nicht optimierten Zustand wie auch für den fiktiv optimierten Fall gerechnet. Die Simulation deutet darauf hin, dass der spezifische Energiebedarf auf 66 % gesenkt werden kann, indem mehr Dampf rekuperiert wird.

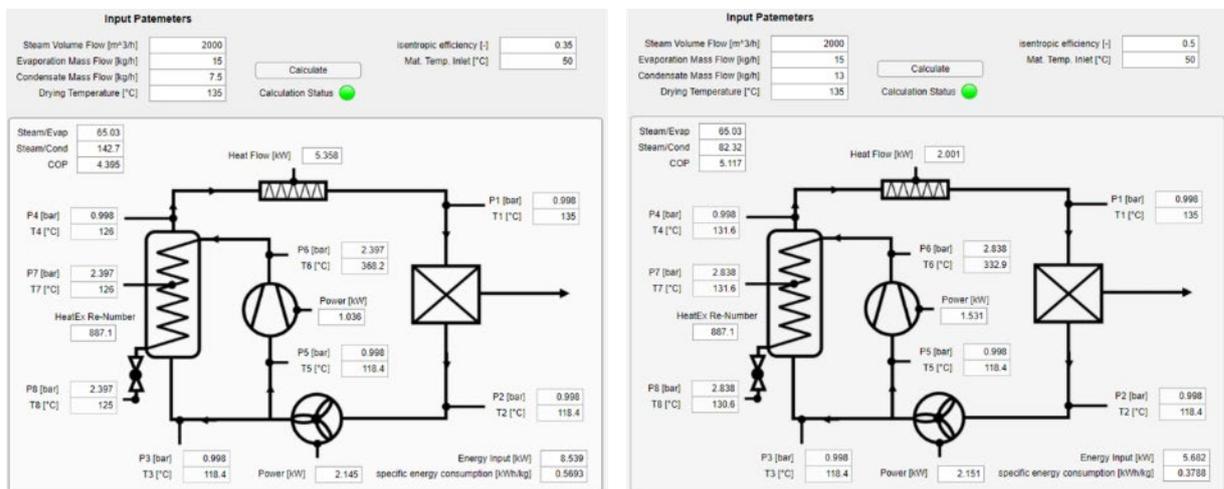


Abbildung 25 Fallvergleich der Zustandsgrößen als Output: real vs optimiert
(Simulation des in Tabelle 4 gemessenen Betriebspunktes)

Der Vergleich zeigt, dass sich das Tool in einem fiktiv optimierten Zustand verwenden lässt, womit es in der Umkehrung zur Auslegung verwendet werden kann. Im Gegensatz zum gemessenen Kompressordruck zeigt das Tool, um wieviel höher der Druck im Kondensator ansteigen würde, könnte die angestrebte Menge Dampf rekuperiert werden. Diese Aussage ist wichtig, um den Brüdenkompressor für künftige Anlagen richtig auszuwählen.

4.6 Energie- und Massenbilanz

Für den bis zum jetzigen Zeitpunkt gefahrenen Bestpunkt der Laboranlage wurde eine detaillierte Massen- und Energiebilanz aufgestellt. Ausgewertet wurden nur Betriebspunkte, welche mindestens 30 Minuten konstant gefahren wurden, bzw. der Verweilzeit des Materials im Dampf entsprachen. Damit konnte sichergestellt werden, dass die TS-Werte nach Austritt des Materials aus dem Dampf durch die gesamte Verweildauer beeinflusst wurden. Alle Werte sind über diesen Zeitraum gemittelt. Die Bilanzierung kann nur für Silikagel gemacht werden. Alle anderen Materialien waren entweder nur in kleinem Masse vorhanden oder nicht geeignet um ausschliesslich Silikagel durch die Anlage gefördert zu werden und wurden daher dem Gel beigegeben. Damit sind die Masse- und Energiebilanz nur für den Silikagel repräsentativ.

Folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über den gefahrenen Betriebspunkt. Die detaillierte Bilanz ist in Abbildung 26 dargestellt.



Trocknungsbetrieb mit Silikagel Typ B

Spezifischer Energiebedarf - Trocknung	0.5 kWh/kg
Spezifischer Energiebedarf - Vorheizung	0.05 kWh/kg
Materialdurchsatz	35 kg/h
Verdampfungsrate	16 kg/h
Elektrische Anlageleistung	8.7 kW
Trockensubstanzanteil am Eintritt	50 %
Trockensubstanzanteil am Austritt	91 %
Materialtemperatur am Eintritt	72 °C
Maximale Trocknungstemperatur (Dampf)	155 °C
Maximale Trocknungstemperatur (Material)	115 °C
Verweildauer im Trockner	30 min
Leistungsziffer der Wärmepumpe COP	4.1

Tabelle 4 Kenngrößen des Bestbetriebspunktes der Laboranlage «Triss»

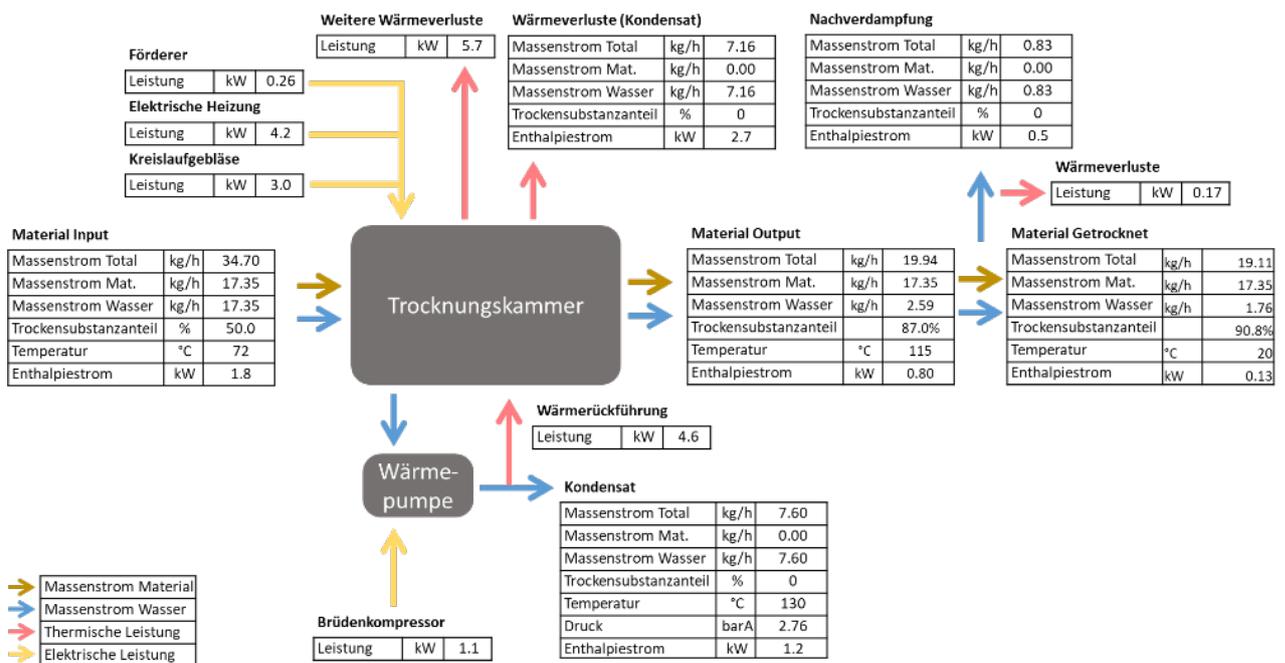


Abbildung 26 Detaillierte Massen- und Energiebilanz der Laboranlage in ihrem bisherigen Bestpunktes (gemittelt über 30 Minuten)

In Abbildung 26 wird die Bilanz als Flussdiagramm mit Pfeilen für die Masse- und Energieflüsse dargestellt. Schwierig zu messen waren Kondensatströme, die als Verluste durch Leckagen angefallen sind. Diese haben sich nach Austritt meist wieder verflüchtigt. Mit dem Posten «Weitere Wärmeverluste» wird der Anteil der Wasserverdampfung in die Umgebungsluft abgebildet. Er kann nur durch fehlendes flüssiges Wasser bilanziert werden. Beobachtet wird dieser Effekt am Eintritt der Anlage, wo stets eine Verdunstung in die Atmosphäre beobachtet werden kann. Auffallend gross fallen die Wärmeverluste in der Bilanz aus, was die Anlage in ihrer Effizienz schwächt bzw. zu einem verminderten Potential der Wärmewiederverwertung führt. Die Verluste können auf ungenügende Isolation und ein ungünstiges Verhältnis von Anlageoberfläche zu Anlagevolumen zurückgeführt werden, was in einer Pilotanlage sehr einfach verbessert werden kann. Schliesslich fällt auf, dass die Brüdenkompressionsrate im Vergleich zum Verdampfungsstrom aus dem Material gering ausfällt. Dies ist die direkte Folge der genannten Verluste. Der verminderte Brüdenkompressionsstrom führt schliesslich zu einem



geringeren Druckaufbau im Kondensator, bzw. stellt sich die Kondensationstemperatur geringer ein. Aus der Literatur sind für ähnliche Prozesse Drücke von 4- 5 barA bekannt, wohingegen hier nur 2.76 barA auftreten.

4.6.1 Verbesserungspotential der Energieeffizienz

Die Messungen an der Laboranlage TRISS ergaben einen spezifischen Energiebedarf von 0.55 kWh/kg verdampftes Wasser inkl. der Vorheizung. Eine detaillierte Aufschlüsselung des Energiebedarfs ist in Abbildung 27 dargestellt. Es wird gezeigt, inwiefern sich der Energiebedarf auf die Leistungsbezüger aufteilt und für welchen Prozess (Trocknung oder Vorheizung) diese benötigt wird. Um den Anteil zur Trocknung genauer zu verstehen, wurden die dabei auftretenden Wärmeverluste genauer abgeschätzt.

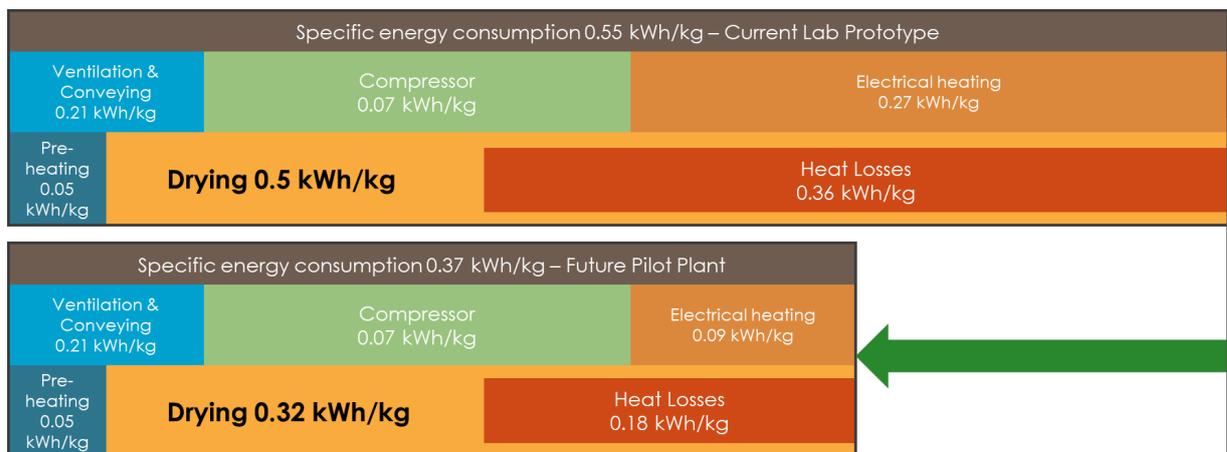


Abbildung 27 Energetische Analyse der Messresultate und dessen Optimierungspotential

Es wird ersichtlich, dass bei der Laboranlage TRISS ein grosser Teil des Energiebedarfs über die Heizelemente bereitgestellt werden muss, was thermodynamisch nicht effizient ist. Grund hierfür sind die grossen Wärmeverluste der Anlage. Diese resultieren zum einen aus der nicht optimalen Isolierung, welche aus finanziellen Gründen etwas reduziert ausgefallen ist und zum andern aus der kleinen Anlagegrösse. Je kleiner ein Trockner, desto ungünstiger das Verhältnis zwischen äusserer Oberfläche und Trocknervolumen. Aus den Messresultaten lässt sich jedoch prognostizieren, dass bei der nächstgrösseren Pilotanlage, durch die grössere Bauweise und einem optimierten Isolationskonzept die Wärmeverluste mindestens halbiert werden können. Dieser reduzierte Wärmebedarf kann vollumfänglich bei den Heizelementen eingespart werden, wodurch sich das Verhältnis der Wärmeenergiebereitstellung weg von den Heizelementen hin zur Wärmepumpe bewegen wird. Dadurch wird der Trocknungsprozess nochmals wesentlich effizienter und die prognostizierte Trocknungseffizienz von < 0.4 kWh/kg kann erreicht werden.

4.6.2 Vergleich mit herkömmlichen Trocknungssystemen mitsamt hypothetischer Wärmerückgewinnung

Folgend wird die Reindampftrocknung als Benchmark im Kontext der Heisslufttrocknung beurteilt. Da die Heisslufttrocknung mit einem Anteil von 70% aller Anwendungen die zurzeit meist-verwendete Trocknungstechnologie und gleichzeitig die energieintensivste ist, stellen sich die meisten Betreiber die Frage, inwiefern damit weitergefahren werden kann. In der Vergleichsrechnung werden folgende Fälle gegenübergestellt:

- Reindampftrocknung
- Heisslufttrocknung ohne Wärmerückgewinnung
- Heisslufttrocknung mit Wärmerückgewinnung
- Heisslufttrocknung mit externer Abwärmequelle



Zur Bilanzierung der Heisslufttrocknung wird auf das Beispiel der landwirtschaftlichen Trocknung aus dem BFE-Projekt «Neue Verfahren zur Effizienzverbesserung in Trocknungsanlagen, 2005», aus dem Kapitel Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zurückgegriffen. Der Trocknungsprozess läuft in etwa zwischen einem TS von 50% am Eintritt und einem TS von 90% am Austritt ab. Dieselbe Technologie wird zur Trocknung allmöglicher Biomassen, Lebensmittel, Keramiken, usw. verwendet. Als Beispiel einer Anwendung, wo Abwärme aus externer Quelle verwendet werden kann, wird das Beispiel der Gärrestetrocknung auf Biogasanlagen genommen, wo Abwärme aus dem BHKW-Gasmotor bei mehr als 300°C zur Verfügung steht und lokal zu rund 0.01 CHF/kWh bezogen werden kann.

Zur hypothetischen Integrierung einer Hochtemperaturwärmepumpe wird auf Betriebsdaten der Keramiktrocknung aus dem Projekt DryFiciency zurückgegriffen. Die Pumpe arbeitet zwischen einer unteren Temperatur von 50°C und einer oberen Temperatur von 120°C. Die vorliegende Temperaturdifferenz von 70°C und eine Gütezahl von 0.4 begrenzt die Pumpe bei einer Leistungsziffer (COP) von 2.25. In Bezug auf das Beispiel der landwirtschaftlichen Trocknung bedeutet dies, dass die Enthalpie des Abgases zwischen 95°C mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 55% und 50° mit 100% genutzt werden kann.

Strompreis	0.12 CHF/kWh
Gaspreis	0.06 CHF/kWh
Abwärmepreis bei 300°C aus BHKW auf Biogasanlagen	0.01 CHF/kWh

Tabelle 5 Energiekosten für den präsentierten Vergleich

Abbildung 28 zeigt den Vergleich des Gesamtenergieaufwandes, des Anteils an elektrischem Strom wie auch der Energiekosten der Fälle a)- d). Dabei werden die Strom-, Gas- und Abwärmekosten gemäss der in Tabelle 5 aufgeführten Preise berechnet. Der Vergleich zeigt, dass die Reindampftrocknung das Potential hat, den geringsten Energieaufwand zu erzielen. Die mit Wärmerückgewinnung aufgewertete Heisslufttrocknung kommt mit gut 0.5 kWh/kg zwar hinsichtlich dem Energieaufwand vielversprechend tief zu liegen, kann aber bei den Kosten nicht punkten. Sie bleibt ähnlich teuer wie ohne Wärmerückgewinnung. Kann auf eine externe Wärmequelle abgestützt werden, was leider nur in ausgesprochenen Anwendungen der Fall ist, so kommt die konventionelle Heisslufttrocknung auf die tiefsten Energiekosten. Kann eine konventionelle Heisslufttrocknungsanlage nur partiell mit Abwärme aus externer Quelle versorgt werden, so ist sie kostengünstiger als die Reindampftrocknung, wenn mindestens 42% der benötigten Wärme aus einer externen Abwärmequelle bezogen werden können. Selbstverständlich könnte auch bei der Reindampftrocknung der Wärmebedarf aus einer externen Quelle bezogen werden, womit die Energiekosten gesenkt werden könnten. Dieser Fall wird aber in diesem Vergleich nicht weiterverfolgt.

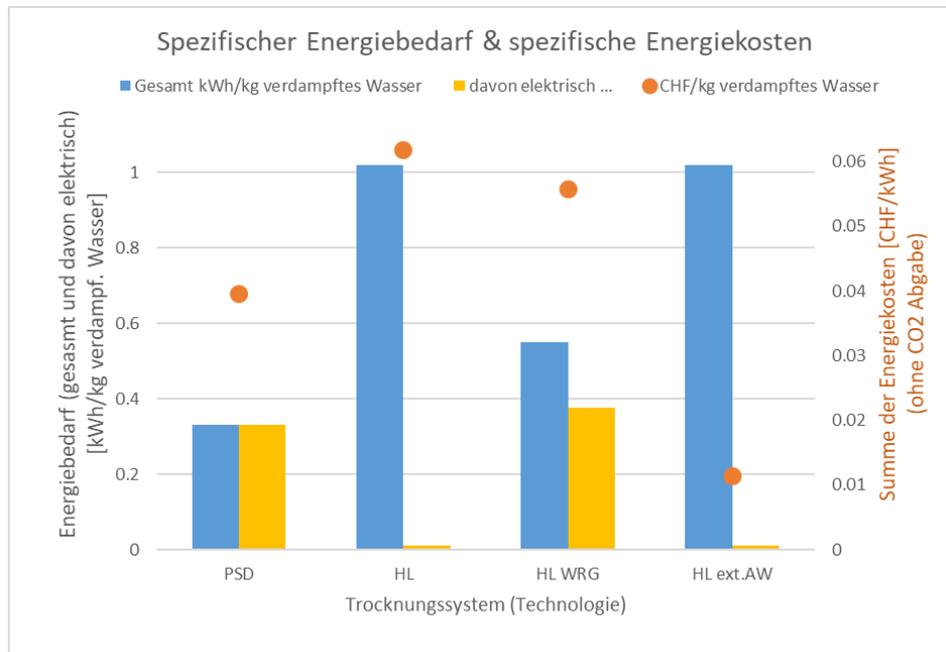


Abbildung 28 Vergleich des Gesamtenergiebedarfs (blau), des Anteils an elektrischem Strom (gelb) sowie der Energiekosten (orange Punkte) in der Schweiz: Reindampftrocknung (PSD), konventioneller Heisslufttrocknung (HL), HL mit Wärmerückgewinnung und HL mit externer Abwärmequelle

4.6.3 Vergleich mit ähnlicher Entwicklung im EU-Projekts «DryFiciency»

Im EU-Projekt «Dryficiency»¹¹ wurde zwischen 2016 und 2021 eine ähnliche Heissdampftrocknungstechnologie entwickelt. Der grosse Unterschied der Technologien besteht jedoch im Arbeitsmodus. Während AquAeros Reindampftrocknung im kontinuierlichen Modus arbeitet, ist die Technologie aus DryFiciency im Batchmode konzipiert. Zudem gibt es viel weitere anlagebezogene Unterschiede, die in den unterschiedlichen Grössen und verschiedenen Anwendungszwecken begründet sind. AquAeros Laboranlage sollte möglichst breit anwendbar sein, wozu ein Bandförderer verwendet wurde. Die norwegische Scanship-Anlage ist hingegen nur zur Trocknung von Schlämmen designt, wozu sie mit einem Schaufelförderer ausgestattet ist. Zudem ist sie während dem Batchmode für die rund hundertfache Wasserverdampfung ausgelegt. Die Scanship-Technologie wurde zur Trocknung von Schlämmen auf Schiffen und in Abfallbewirtschaftungssystemen auf dem Land entwickelt, wozu sich der Batchmode besser eignet. AquAeros Reindampftrocknung hingegen wurde für industrielle Produktionsketten entwickelt und deshalb in kontinuierlichem Betrieb designt.

Genauere Angaben der Energieeffizienz der norwegischen Anlage sind nicht bekannt. Es ist anzunehmen, dass die mittlere Energieeffizienz über zahlreichen Batches tiefer zu liegen kommt, als die optimierte Reindampftrocknung.

4.7 Materialtests

Es wurden vier Testtrocknungen verschiedener Produkte für Partnerfirmen durchgeführt. Die Tests wurden sowohl mit der Laboranlage wie auch teils mit dem Prüfstand zur Bestimmung von Sorptionsisothermen «Mobs» gemacht, was im Kapitel 4.7 ausgeführt wird.

Da zum einen nur begrenzt Material zur Verfügung stand und zum anderen das Bandfördersystem der Anlage nicht optimal für diese unterschiedlichen Materialien geeignet ist, wurden die Tests immer mit Silikagel als

¹¹ EU Horizon 2020 programme for energy efficiency and innovation action under grant agreement No. 723576, <https://dryficiency.eu/>



Matrixmaterial durchgeführt. Damit kann zwar nur indirekt eine Aussage über die Energieeffizienz gemacht werden, es kann jedoch der für die Partner wichtigere Aspekt, der Erhalt der Produktqualität und der Ziel-TS direkt beurteilt werden. Silikagel liefert dabei die notwendige Wasserverdampfung, um den Prozess aufrecht zu erhalten. Eine qualitative Aussage über die Energieeffizienz kann schliesslich aus dem Vergleich der Sorptionsisothermen der Produktmaterialien mit jener von Silikagel gemacht werden. Liegt eine Kurve bei höheren Relativdrücken (Wasseraktivität) als jene von Silikagel, so ist die Energieeffizienz besser. Da dies für alle getesteten Materialien zutrifft, kann gefolgert werden, dass der Energieaufwand für alle tiefer liegt als jener für Silikagel der Parameterstudie.



Abbildung 29 Einblick in die Testtrocknungen von Biokohle, Ton, Gärresten und Biertreber mit Silikagel als Matrixmaterial in der Laboranlage «Triss»

Wenn auch das Bandfördersystem nicht geeignet ist für Gärreste oder Biertreber, die beide teils am Band kleben, konnten dennoch alle Produkte gemäss dem jeweilig geforderten TS getrocknet werden. Beim Biertreber galt es zudem die Hygieneanforderung einer maximalen bakteriellen Aktivität zu erfüllen. Die Analyse des Kunden vor und nach der Trocknung des Trebers hat eine Reduktion von mehr als 4 Grössenordnungen ergeben, womit der Anspruch des Partners erfüllt werden konnte.

Tabelle 6 zeigt einen Überblick über die getesteten Produkte im Vergleich. Da bei allen Tests stets Silikagel als Matrixmaterial verwendet wurde, kann für die einzelnen Materialien nur qualitativ auf eine Energieeffizienz geschlossen werden.

Produkt	Eintrittsbedingungen (alle Test mit Silikagel als Matrixmaterial)	Parameterkombination	Ergebnisse	Erkenntnisse
Silikagel	TS: 50% Temperatur: 72°C Materialdurchsatz: 36 kg/h	Verweilzeit: 30 min Dampftemperatur: 170°C Materialtemperatur: 115°C Verdampfungsrate: 16 kg/h	TS Out: 91% Energieeffizienz: 0.55 kWh/kg Wasser COP WP: 4.1	wird als Benchmark für andere Materialien betrachtet <ul style="list-style-type: none"> • TS in idealer Verweilzeit und Dampftemperatur erzielt • Reindampftrocknung und Fördersystem bestens geeignet
Biokohle	TS: 77 % Temperatur: 20 °C Materialdurchsatz: kg/h	Verweilzeit: 30 min Dampftemperatur: 158 °C Materialtemperatur: ~120 °C Verdampfungsrate: 12.3 kg/h	TS Out: 94 % Energieeffizienz: 0.59 kWh/kg Wasser	<ul style="list-style-type: none"> • TS in idealer Verweilzeit und Dampftemperatur erzielt • Reindampftrocknung geeignet sich bestens • Fördersystem nur für grössere Stücke geeignet, kleine fallen durch Bandgitter durch
Ton	TS: 85 % Temperatur: 20 °C Materialdurchsatz: 26 kg/h	Verweilzeit: 30 min Dampftemperatur: 152 °C Materialtemperatur: 116 °C Verdampfungsrate: 11.6 kg/h	TS Out: 95.5 – 98.3 % Energieeffizienz: 0.68 kWh/kg Wasser	<ul style="list-style-type: none"> • TS in idealer Verweilzeit und Dampftemperatur erzielt • Reindampftrocknung geeignet sich bestens • Fördersystem weniger geeignet, Ton klebt leicht
Biertreber	TS: 37 % Temperatur: 20 °C Materialdurchsatz: 33.2 kg/h	Verweilzeit: 30 min Dampftemperatur: 152 °C Materialtemperatur: ~107 °C Verdampfungsrate: 14.7 kg/h	TS Out: 86 % Energieeffizienz: 0.66 kWh/kg Wasser	<ul style="list-style-type: none"> • TS in idealer Verweilzeit und Dampftemperatur erzielt • Sterilisation erreicht • Reindampftrocknung geeignet sich bestens • Fördersystem ungeeignet, Treber klebt stark
Gärreste	TS: 28 % Temperatur: 20 °C Materialdurchsatz: 30 kg/h	Verweilzeit: 30 min Dampftemperatur: 160 °C Materialtemperatur: ~104 °C Verdampfungsrate: 12.8 kg/h	TS Out: 61 % Energieeffizienz: 0.57 kWh/kg Wasser	<ul style="list-style-type: none"> • TS in idealer Verweilzeit und Dampftemperatur erzielt • Reindampftrocknung geeignet sich bestens • Fördersystem ungeeignet, Gärreste kleben stark (schlammartig)

Tabelle 6 Übersicht über die Materialtrocknungstests in der Laboranlage «Triss»



4.8 Sorptionsprüfstand «Mobs»

Wie in Kapitel 2.2 eingeführt, dient der Prüfstand «Mobs» der Bestimmung von Sorptionsisothermen wie auch der Analyse des Materialverhaltens in Dampf, wozu nach der Trocknung eine chemische Analyse notwendig ist.

Die Inbetriebnahme des Prüfstands brachte einige Herausforderungen zum Vorschein, die aus der Theorie unterschätzt wurden:

- Zur verbesserten Konvektion musste nachträglich ein interner Propeller eingebaut werden.
- Da sich zeigte, dass die Messreihen mehrere Stunden andauern würden, musste stetig neuer Dampf in die «Glockenvorrichtung» geleitet werden.
- Schliesslich konnte die Messungenaugigkeit durch erhöhte Materialbatchmasse unter 2% Messunsicherheit reduziert werden.

Auf diesem Stand konnten schliesslich für drei Materialien zufriedenstellende Messreihen aufgenommen werden. Ausgemessen wurden Silikagel, Ton und Biokohle, wovon Silikagel durch die aus der Literatur bekannte Sorptionsisotherme als Referenz gedient hat. Die Kurve konnte auf 3% genau reproduziert werden.

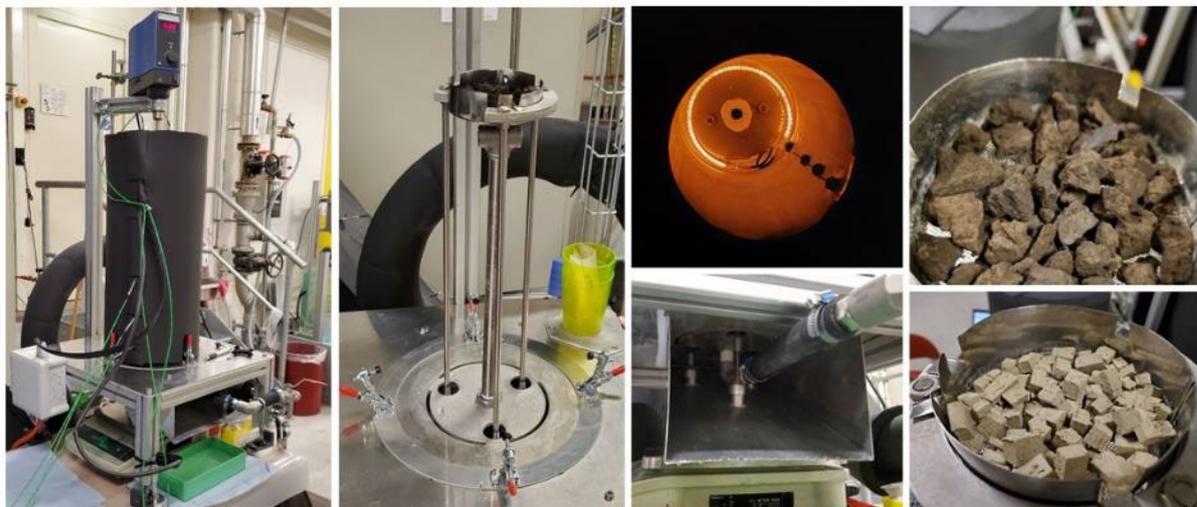


Abbildung 30 Sorptionsprüfstand «Mobs» mit zwei Materialproben: Biokohle (oben rechts) und Ton (unten rechts)

Abbildung 30 zeigt den Prüfstand «Mobs» in seiner optimierten Ausführung. Im Bild links ist die Glockenstruktur mit von oben zugeführtem Propeller zu sehen; daneben ist die stelzenförmige Materialhalterung mit aufgesetztem Materialbecher zu sehen. Wiederum daneben ist ein Blick von unten her in die Glocke mit leuchtendem Halogen-Heizer zu sehen. Darunter ist ersichtlich, wie der Dampf zugeführt und das Kondenswasser über der Waage abgeschieden wird. Ganz rechts sind Materialproben (Biokohle und Ton) zu sehen.

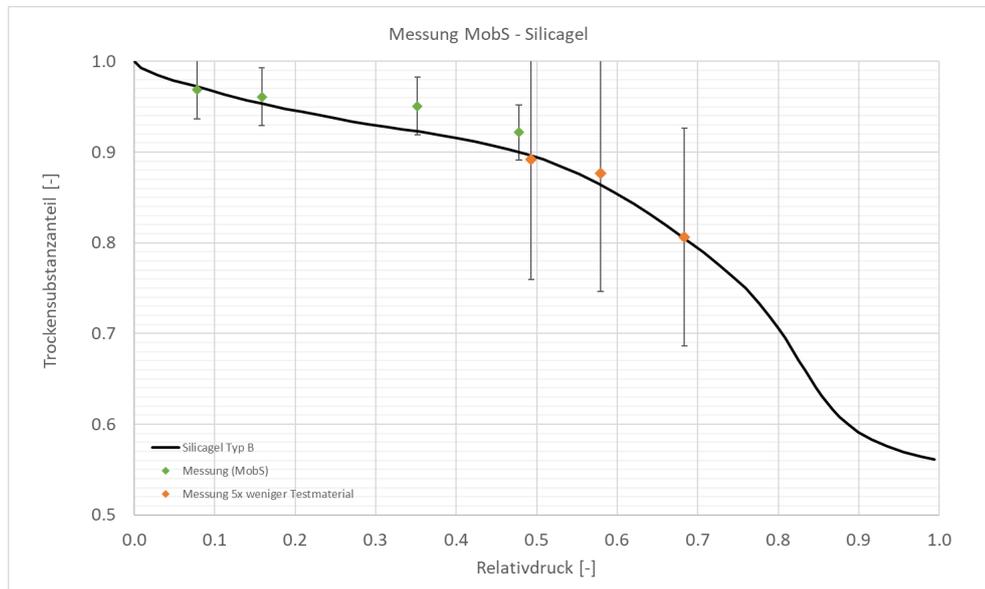


Abbildung 31 Sorptionsisotherme von Silicagel in überhitztem Dampf im Vergleich mit der Literatur

Der in Abbildung 31 gemachte Vergleich für Silicagel zwischen der Literatur und den eigenen Messreihen zeigt, dass das eigene Messverfahren in Dampf die Kurve auf rund 3% genau reproduzieren kann. Daraus darf jedoch nicht geschlossen werden, dass Sorptionsisothermen einfachheitshalber in Luft gemacht werden könnten. Dies gilt nur, wenn das Wasser auf der inneren Oberfläche des Materials durch Dipolkräfte gebunden ist, nicht aber für Van der Waals-Kräfte; diese sind abhängig von der Trocknungstemperatur, womit sich eine Van der Waals basierte Kurve mit zunehmender Temperatur nach rechts zu höheren Relativdrücken verschiebt.

Die drei orangen Punkte zeigen im Gegensatz zu den grünen Punkten eine Messreihe mit 5x geringerer Materialmasse, womit die Unsicherheit 5x grösser resultierte.

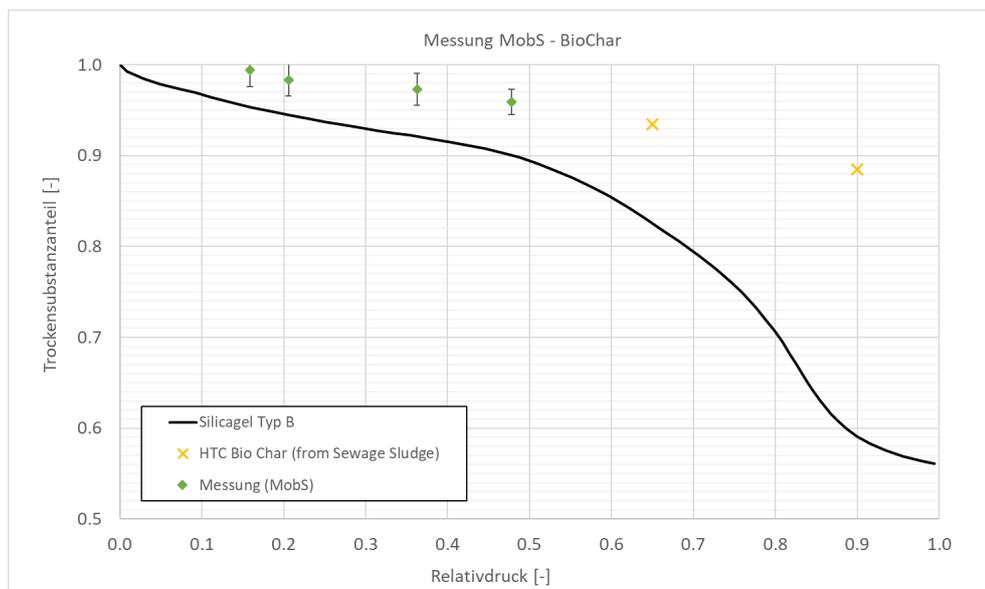


Abbildung 32 Sorptionsisotherme von Biokohle in überhitztem Dampf in Relation zu Silicagel

Abbildung 32 zeigt die Sorptionsisotherme für Biokohle. Dabei wurden die vier grünen Punkte in Dampf gemessen und mit den zwei gelben Punkten einer luftbasierten Messung ergänzt. Es zeigt sich, dass die Kurve bei gleicher Wasserbeladung im Vergleich zu Silicagel weiter rechts, also bei höheren Relativdrücken, liegt. Das heisst, dass



Biokohle bei niedrigeren Temperaturen getrocknet werden kann und der Energiebedarf durch Reindampftrocknung tiefer liegt.

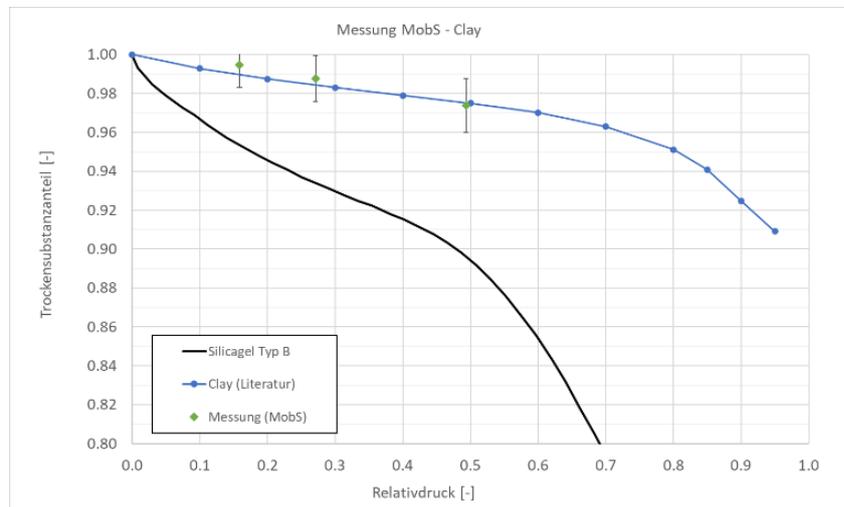


Abbildung 33 Sorptionsisotherme von Ton in überhitztem Dampf in Relation zu Silicagel

Abbildung 33 zeigt die Messreihen für Ton im Vergleich mit der aus der Literatur bekannten Sorptionsisotherme. Die Kurve konnte auf 1% genau reproduziert werden. Der Prüfstand «Mobs» wird damit als hinreichend genau beurteilt, um künftig beliebige Materialien in Kleinmengen zu trocknen und eine Voraussage über den Energiebedarf machen zu können. Zudem kann das in Dampf getrocknete Material in einer chemischen Analyse weiter auf seine Materialeigenschaften und damit den Einfluss des Dampfes während der Trocknung beurteilt werden.

4.9 Total Cost of Ownership der Reindampftrocknung

Um einzuschätzen, ob die Reindampftrocknung für einen Produktionsbetrieb von finanziellem Nutzen ist und inwiefern sich der Return of Invest bei einer Neuanschaffung bzw. bei einem Systemwechsel verhält, wurde eine sog. Total Cost of Ownership Rechnung gemacht. Wichtig ist dabei zu beachten, dass die Betriebskosten sehr individuell von den Gas- und Strompreisen abhängen. Verglichen wurde die Reindampftrocknung mit der Heissluft- und der Heissdampftrocknung jeweils ohne Wärmerückgewinnung, da diese Systeme zurzeit fast das vollumfängliche industrielle Inventar der Direkttrocknung bilden und als Benchmark dienen. Verglichen werden Trockner z.B. zur Produktion von Petfood gleicher Produktionsrate (350 kg/h) bzw. Wasserverdampfungsrate (311 kg/h). Der Produktionsstandort sei in der Schweiz, was sich v.a. in den Gas- und Strompreisen niederschlägt. In der TCO-Rechnung wurde eine einmalige Investition sowie repräsentative wiederkehrende fixe und variable Kosten einbezogen. Für den Fallvergleich wurden folgende Annahmen gemacht:

Anlagespezifikation			
	Material Input	kg/h	700
	TS Input	%	50%
	TS Output	%	90%
	Trockenmassenstrom	kg/h	350
	Verdampfungsrate	kg/h	311.11
Energiekosten			
	Stromkosten	CHF/kWh	0.15
	Gaskosten	CHF/kWh	0.065
	CO2-Abgaben	CHF/t	96
	Brennstoff	Erdgas (2017)	
	spezifischer CO2 Ausstoss	g CO2/kWh	203.21

Tabelle 7 Randbedingungen und Annahmen für den präsentierten Fall der Total Cost of Ownership Rechnung



Abbildung 34 zeigt die kumulierten Kosten über 10 Jahre im Falle der Neuanschaffung einer Trocknungsanlage und im Falle eines Systemwechsels von konventioneller Heisslufttrocknung auf Reindampftrocknung. Obwohl die Investition der Anschaffung einer Reindampftrocknungsanlage deutlich höher liegt als jene der konventionellen Technologien, zahlt sich die Anschaffung durch die deutlich tieferen Betriebskosten schon nach 1.5- 2.5 Jahren für eine Neuanschaffung sowie nach 2.5- 5 Jahren bei einem Systemwechsel aus. Danach kann mit jedem Jahr eine beträchtliche Summe gespart werden. Der Grund der höheren Investition liegt zum einen in der umfangreicheren technischen Ausstattung der Reindampftrocknung wie auch in der Notwendigkeit der Verwendung von Edelstahl im Gegensatz zur Heisslufttrocknung, wo je nach Anspruch auf Edelstahl verzichtet werden kann.

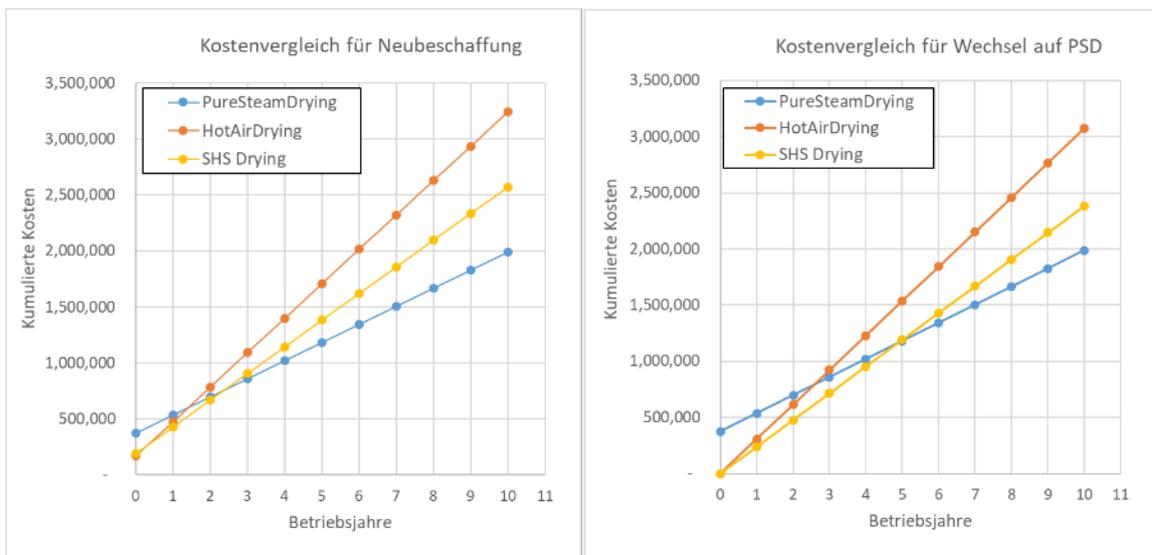


Abbildung 34 Vergleiche der kumulierten Kosten über die Betriebsjahre bei Neuanschaffung und bei Systemwechsel (Randbedingungen siehe Tabelle 7)

Abbildung 35 zeigt Vergleiche der totalen Produktionskosten bezogen auf das Kilogramm getrocknetes Material und als Gesamtsumme pro Jahr, wenn von einer Amortisation über 5 Jahre ausgegangen wird. Trocknungsanlagen stehen jedoch oft über 30 Jahre im Einsatz, womit die tatsächlichen Produktionskosten weit tiefer liegen. Abbildung 36 zeigt daher die totalen Produktionskosten bezogen auf das Kilogramm getrocknetes Material und als Gesamtsumme pro Jahr fiktiv über einer Amortisationszeit von 20 Jahren.

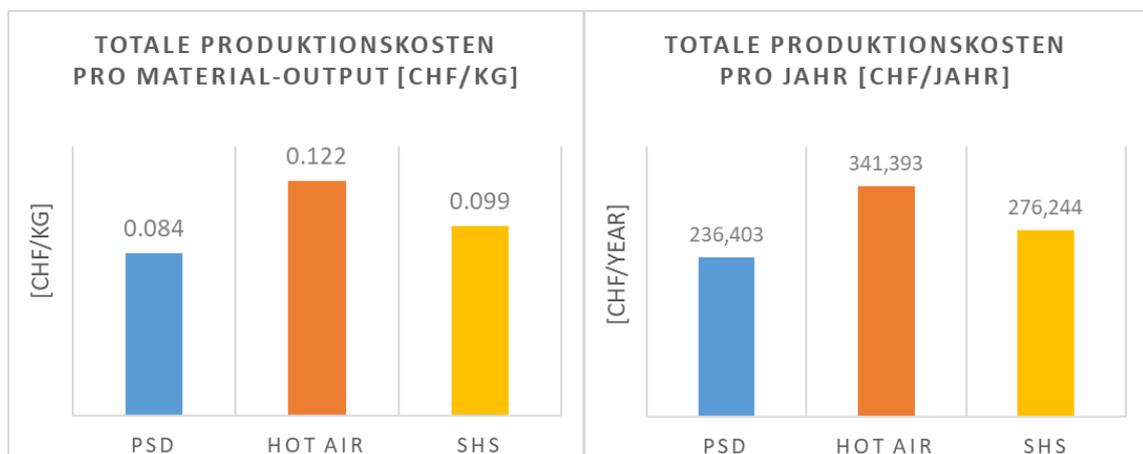


Abbildung 35 Vergleiche der totalen Produktionskosten je Produktions-Output und pro Jahr (Amortisation über 5 Jahre) (Randbedingungen siehe Tabelle 7)

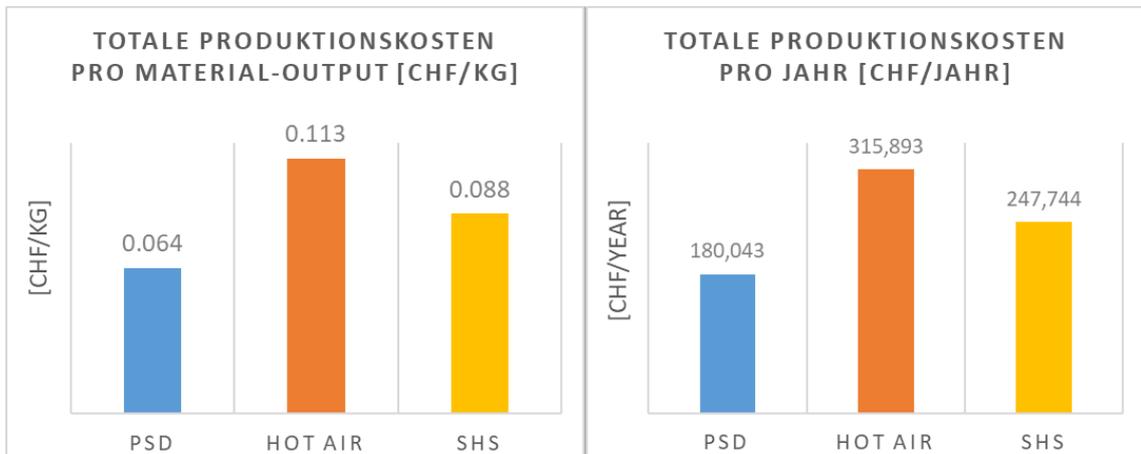


Abbildung 36 Vergleiche der totalen Produktionskosten je Produktions-Output und pro Jahr (Amortisation über 20 Jahre)
(Randbedingungen siehe Tabelle 7)

Im konkreten Fall sinken die Betriebskosten bei einer Amortisationszeit von 5 Jahren bei Verwendung der Reindampftrocknung auf rund 69% verglichen mit der Heisslufttrocknung. Macht man eine Hochrechnung über eine fiktive Amortisationszeit von 20 Jahren, so fallen die Kosten gar auf rund 57% jener mit Heisslufttrocknung. Die TCO-Rechnung macht deutlich, dass die Reindampftrocknung in der Schweiz einen finanziellen Vorteil gegenüber konventionellen Trocknungssystemen bringen kann. Umso besser steht die Reindampftrocknung gar in Ländern da, je tiefer das Strom-Gaspreis-Verhältnis ausfällt, wie in Abbildung 5 in der Einleitung gezeigt wurde.



5 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Studie bestätigt das Potential der Technologie in optimierter Form durch den Einsatz von elektrischem Strom aus erneuerbaren Quellen zur klimaneutralen Produktion eingesetzt zu werden. Es zeigt sich jedoch auch, dass die Kostenseite sehr stark vom lokalen Strom-Gas-Preisverhältnis abhängt. Es lohnt sich, die Reindampftrocknung einzusetzen, solange der Strompreis den Gaspreis nicht mehr als 3.5 überragt. In der Schweiz liegt man mit einem stabilen Verhältnis von 2.5 günstig. Dieses Beispiel zeigt jedoch auch, wie stark die Technologie von politischen Entscheidungen abhängig ist. Die Anschaffung der Technologie ist ebenso im Produktionskontext einer Firma zu beurteilen. Lassen sich die Brüden der Verdampfung in einem anderen Prozess auf tieferer Temperatur wiederverwenden oder ist genügend Abwärme bei höherer Temperatur (z.B. aus einem Motor) vorhanden, die zur Beheizung der Trocknung eingesetzt werden kann, so macht der Einsatz der Reindampftrocknung keinen Sinn. Die Technologie hat ihren Wert darin, dass sie in isoliertem Kontext durch die Wärmerückgewinnung auf geringste Neubeheizung angewiesen ist. Über diese Studie hinaus, zeigt eine Marktrecherche, dass der Kompaktheit der Technologie hohe Bedeutung zukommt, zumal viele Betriebe beschränkte Platzverhältnisse haben. So kann dieser Vorteil gar erhöhte Kosten relativieren.

Haupterkennnis des Projekts ist das Zusammenspiel der Betriebsparameter der Anlage. Im Vorfeld waren viele Abhängigkeiten der Parameter nur aus der Theorie oder gar nicht bekannt und konnten nun aus der Praxis verstanden werden. Ebenso war es wichtig, technische Probleme im Bereich der Materialförderung und Limitationen wie z.B. beim Kreislaufgebläse aufzudecken, um diese bei der Pilotanlage vermeiden zu können.

Hinsichtlich der untersuchten Materialien, die sich in grössere Materialgruppen einteilen lassen, ist deren unterschiedliche Konsistenz kein Grund nicht mit der Reindampftrocknung getrocknet zu werden. Für jede Materialbeschaffenheit findet sich das geeignete Förderprinzip. Die Materialien sind jedoch strikte durch ihre Temperaturbeständigkeit limitiert. Kann ein Material nicht bis rund 115°C belastet werden, so macht der Einsatz der Reindampftrocknung keinen Sinn. Eine Chance dieser erhöhten Temperaturen ist in der Lebensmittelindustrie die sterilisierende Wirkung. Je nach Produktionsanforderung können so zwei Schritte in einem untergebracht werden. Darüber hinaus ist die Wasserrückgewinnung ein vielerorts geschätzter Aspekt der Technologie. In der Lebensmittelbranche kann das sterile Wasser zu Reinigungszwecken oder gar wie in der Keramikindustrie erneut in der Produktion eingesetzt werden. Die sauerstofffreie Trocknung ist zwar keine Neuheit, sie ist bereits von der klassischen Heissdampftrocknung her bekannt, sie ist aber dennoch eine Chance, da damit neben den anderen Aspekten auch die Produktqualität erhalten bleibt und zugleich keine Brand- und Explosionsgefahr besteht.

Die Studie bildet nun die Grundlage für den erfolgreichen Bau der Pilotanlage und ebenso für den Abschluss der Entwicklung. Gemäss den Parameterabhängigkeiten wird in einem Folgeprojekt eine autonome Steuerung mit Regelkreisen ausgearbeitet.

Das Projekt ist für die Entwicklung der Technologie und damit für AquaAero essentiell. Wir bedanken uns beim BFE für die finanzielle Unterstützung und das Vertrauen.



6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Übergeordnetes Ziel ist der Markteintritt. Dazu soll vorerst eine Demonstrations- oder Pilotanlage gebaut werden, um die Technologie vom Labor in eine industrielle Umgebung überzusiedeln.

In einem ersten Schritt ist eine Zusammenarbeit mit IWB, Basel, geplant. IWB produziert Biokohle aus Holzhackschnitzeln durch Pyrolyse. Dabei müssen die Holzhackschnitzel möglichst energieeffizient getrocknet werden. Dabei eignet sich die kleine Grösse der geforderten Anlage. Im Gegensatz zu repräsentativen Trocknungsraten der Industrie von 1- 20 t/h Wasserverdampfung fordert das Preprocessing der Pyrolyse bloss 100 kg/h. Damit kann der Fokus in diesem Entwicklungsschritt primär auf die Integration in die industrielle Umgebung und deren Standards gelegt werden. Da jedoch Holzhackschnitzel ein Partikelspektrum von sehr fein bis sehr grob haben, eignet sich ein Band nicht. Es braucht einen Optimierungsschritt. Es wurde vereinbart, ein Paddelmischer als Fördersystem während der Trocknung zu verwenden. Da AquAero damit noch keine Erfahrung hat, werden im Vorfeld des Pilotprojekts Test mit einem Einwellenmischer gemacht.

In einem zweiten Schritt soll eine weitere, grössere Demonstrations- oder Pilotanlage gebaut werden. Dabei soll der Fokus auf der Skalierung der Technologie liegen. Geplant ist eine Skalierung der Wasserverdampfung auf rund 500 kg/h mit einem Partner aus der Keramik- oder Lebensmittelindustrie. Die Skalierung wird weitere technische Entwicklung fordern. Ebenso wird ein anderer Brüdenkompressionstyp und ein anderes Fördersystem eingesetzt.

Um die Technologie zu komplettieren und auf Laborlevel fertig zu entwickeln, ist als unmittelbare Folgearbeit ein abschliessendes Projekt in Zusammenarbeit mit der Klimastiftung Schweiz angelaufen. Ziel ist es, die SPS-Steuerung mit einer Regelung zu ergänzen, damit der Prozess autonom betrieben werden kann. Die in diesem Projekt erarbeitete Parameterstudie bietet dabei die Grundlage, wie eine Regelung aufgebaut werden muss, um trotz variabler Betriebsparameter stationär zu laufen. Im Folgeprojekt wird iterativ an einer Regelung gearbeitet werden, indem die Regelung durch stetige Tests geprüft und angepasst wird.

Offen bleibt das Langzeitverhalten der Anlage. Insbesondere die Verschmutzung der Wärmetauscherflächen ist stark materialabhängig und würde im Zweifelsfall mit einfachem Reinigungszugang gebaut. Auch das Förderprinzip wird stets dem Material anzupassen sein. Dazu ist vorgesehen, weitere Systeme zu testen. Ebenso kann für unterschiedliche Anlagegrössen nicht der gleiche Kompressortyp verwendet werden. Die jedoch neulich wachsende Anzahl verfügbarer Brüdenkompressoren lässt diesen Aspekt unkritisch werden.



7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

AquAero hat in diesem Projekt Testtrocknungen für folgende Partner gemacht. Die Zusammenarbeit dient ebenso dem Technology-Market-Fit.

- Für GRegio Energie, Chur, wurde HTC-Biokohle aus Klärschlamm getrocknet, was sehr gut funktioniert hat.
- Für Axpo Kompogas, Baden, wurden Gärreste aus Kompogasanlagen getrocknet, was zwar funktioniert hat, jedoch das Bandförderprinzip nicht für die schlammige Masse geeignet war.
- Für Wienerberger AG, Wien, wurde Ton zur Backstein- und Zielproduktion getrocknet. Ton lässt sich hervorragend durch die Reindampftrocknung trocknen.
- Für eine anonyme Firma aus der Schweiz wurde Biertreber getrocknet. Sowohl der TS wie auch die Hygieneansprüche konnten optimal erzielt werden.

Für alle diese Produkte eignet sich die Reindampftrocknung. Die Ansprüche der Partnerfirmen konnten erzielt werden. AquAero dankt den Firmen für ihr Vertrauen und die Chance der Trocknung ihrer Produkte.

8 Publikationen

White Paper "PURESteamDrying - Green, Clean & Energy Efficient Drying"



9 Literaturverzeichnis

- Arun S. Muyundar, 2015, Handbook of Industrial Drying, 4th Edition
- Stefan Krummenacher, 2005, BFE Schlussbericht, Neue Verfahren zur Effizienzverbesserung in Trocknungsanlagen Phase 1
- European Commission, Regulatory Framework for Industrial Air Emissions, 2020, https://www.ec.gc.ca/doc/media/m_124/p2_eng.htm
- European Environment Agency, Final energy consumption by sector and fuel in Europe, 2020, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-10>
- Fraunhofer Institut IGB, 2018, Trocknung mit überhitztem Wasserdampf bei Atmosphärendruck, 1803 BR pt – dampftrocknung – en
- Robert de Boer, TNO et al, 2021, Strengthening Industrial Heat Pump Innovation Decarbonizing Industrial Heat, <https://www.sintef.no/globalassets/sintef-energi/industrial-heat-pump-whitepaper/2020-07-10-whitepaper-ihp-a4.pdf>
- Eurostat Statistics Explained, 2019, Energy consumption in the EU, https://ec.europa.eu/info/news/energy-consumption-eu-increased-1-2017-eurostat-figures-confirm-2019-feb-07_cs
- Statista, 2020, Amount of CO2 emissions from electricity generation in the EU by country in 2016, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1009521/umfrage/co2-emissionen-durch-stromerzeugung-in-der-eu/>
- FLT Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik, 2004, Abschlussbericht Industrial Superheated Steam Drying. Heft L 202 Frankfurt a.M.
- Thalmann, 1980, Das Wasserdampfsorptionsverhalten verschiedener Handelsfuttermittel pflanzlicher und tierischer Herkunft
- EU Horizon 2020 programme for energy efficiency and innovation action under grant agreement No. 723576, DryFiciency, 2021, <https://dryficiency.eu/>