Abschlussbericht

Steigerung der Energieeffizienz von Getreideanlagen durch nachhaltige Prozessoptimierung bei Trocknung und Lagerung

gefördert durch die EKSH- Kiel

Laufzeit 2019-2020

Sebastian Marshall	**Albert Spreu**	**Prof. Dr. Yves Reckleben**
FuE-Zentrum FH-Kiel GmbH	RKL e.K.	Fachhochschule-Kiel/Fachbereich Agrarwirtschaft
Schwentinestr. 24	Grüner Kamp 15-17	Grüner Kamp 11
24149 Kiel	24768 Rendsburg	24783 Osterrönfeld

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ... 3
Tabellenverzeichnis ... 3
1. Einführung ... 4
1.1. Projektbeschreibung ... 4
1.2. Strukturwandel in der Landwirtschaft ... 7
1.3. Einfluss der Witterung auf die Erntebedingungen ... 9
1.3.1. Temperatur ... 9
1.3.2. Niederschlag ... 10
1.3.3. Luftfeuchte ... 11
1.4. Energieverbrauch während der Trocknungsphase in S-H ... 12
2. Grundlagen ... 13
2.1. Feuchtegleichgewicht ... 13
2.2. Trocknungsluft ... 16
2.3. Trocknungstemperatur ... 19
2.4. Trocknungssysteme ... 24
2.4.1. Dächerschachtdurchlauftrockner ... 24
2.4.2. Silotrockner ... 25
2.4.3. Lagerbelüftungstrocknung im Flachlager ... 26
2.4.4. Lagerbelüftungstrocknung im Rundsilo ... 27
3. Ergebnisse ... 28
3.1. Trocknungsdaten ... 28
3.2. Berechnung des spezifischen Energieaufwandes ... 32
3.3. Bewertung der Energieeffizienzkennzahlen ... 33
3.4. Bewertung der Anreizsysteme ... 36
3.5. Bewertung der gemessenen Energie / CO_2 Verbräuche ... 37
4. Lösungsansätze für die Praxis ... 40
5. Schlussfolgerungen ... 46
6. Zusammenfassung ... 47
7. Literaturverzeichnis ... 48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erntemengen in Schleswig-Holstein von 2016 - 2018 (RKL, 2019) 5
Abbildung 2: Verteilung der Forschungsbetriebe (türkisfarbene Ortsmarken) in Schleswig-Holstein ... 5
Abbildung 3: Entwicklung der LN in Schleswig-Holstein (Statistisches Bundesamt, 2020)..... 8
Abbildung 4: Temperaturentwicklung im Erntemonat August seit 1900 bis 2020 (Deutscher Wetter Dienst – Climate Data Center, 2020) 9
Abbildung 5: Niederschlagsentwicklung im Erntemonat August seit 1900 bis 2020 (Deutscher Wetter Dienst – Climate Data Center, 2020) 10
Abbildung 6: Entwicklung der Luftfeuchtigkeit im Erntemonat August seit 1900 bis 2020 (Deutscher Wetter Dienst – Climate Data Center, 2020) 11
Abbildung 7: Bereitstellungskosten des Betriebsmittels Heizöl in €/t getrockneter Winter Weizen (Statistisches Bundesamt; Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz)Preise für leichtes Heizöl, Motorenbenzin und Dieselkraftstoff)..... 13
Abbildung 8: Gleichgewicht von relativer Luftfeuchtigkeit und der Kornfeuchte von Weizen (Sorptionsisothermen) für verschiedene Temperaturen (AEL-Hessen, Bericht Nr. 70)..... 14
Abbildung 9: h-x-Diagramm zum Feuchteentzug (Isensee et al., 2013) 17
Abbildung 10: Einfluss der Warmlufttemperatur auf Trocknerleistung und Korntemperatur (Weizen von 21,9 % auf 15,5 % (Maltry in Reimers; 1975) 19
Abbildung 11: Spezifischer Wärmebedarf abhängig von der Zulufttemperatur und der Abluft-Sättigung zwischen 20 und 80 % r.LF. (Isensee et al., 2013) 20
Abbildung 12: Zulässige Korntemperatur (Isensee et al., 2013) 21
Abbildung 13: Trocknungstagebuch aus dem Erntejahr 2020 28
Abbildung 14: Funktionsprinzip des kapazitiven Messverfahrens 41
Abbildung 15: Resonanzkurve der Mikrowellenresonanzmethode 41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: vorläufige Auswertung der spezifischen Energieeinsätze der betrachteten Anlagen..... 7
Tabelle 2: Feuchtigkeitsgleichgewicht verschiedener Produkte bei 15° (Isensee et al, 2013) 15
Tabelle 3: Beispiel zum Feuchteentzug (Isensee et al., 2013)..... 18
Tabelle 4: Zulässige Korntemperaturen für die Trocknung bei Saat- und Brotgetreide (Münzing)..... 22
Tabelle 5: Korn-Temperatur für Getreide (nach ALB-Hessen, Bericht Nr. 70) 23
Tabelle 6: Zulufttemperatur bei Trocknerbauarten für Getreide (nach ALB-Hessen, Bericht Nr. 70) .. 23
Tabelle 7: Maximale Zulufttemperatur für Satztrockner (Isensee et al., 2013)..... 23
Tabelle 8: Maximale Korn-Temperatur von Leguminosen (nach Külker in KTBL 312; 1986) 24
Tabelle 9: Auswertung der Trocknungsdaten aus dem Erntejahr 2019..... 30
Tabelle 10: Auswertung der Trocknungsdaten aus dem Erntejahr 2020..... 31
Tabelle 11: CO2 Emissionen und Einsparpotenzial 39

1. Einführung

Das zweijährige Projekt „Steigerung der Energieeffizienz von Getreideanlagen durch nachhaltige Prozessoptimierung bei Trocknung und Lagerung“ wird aufzeigen, welche Gefahren und Probleme in der Praxis herrschen. Zudem werden Lösungsansätze für die landwirtschaftlichen Betriebe aufgezeigt.

1.1. Projektbeschreibung

In Zusammenarbeit des Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH, dem RKL e.K. und dem Fachbereich Agrarwirtschaft der Fachhochschule Kiel beschäftigte man sich mit der Fragestellung, wie die Steigerung der Energieeffizienz von Getreideanlagen durch nachhaltige Prozessoptimierung bei Trocknung und Lagerung aussehen kann. Dieses Forschungsprojekt beschäftigte sich im ersten Jahr vorrangig mit der Grundlagenerhebung. Zur Optimierung von Prozessen und einzelner Verfahrensabläufe bei der Nachernteaufbereitung ist es notwendig, eine Referenz für den Energieeinsatz zu definieren. Die Fachliteratur findet zu diesem Ansatz keine Aussage. Einzelne Verfahrensabläufe, wie beispielsweise die Trocknung von landwirtschaftlichen Gütern, kennen spezifische Energieeinsätze. Diese Forschungsarbeit soll die Energieeinsätze der Nachernteaufbereitung von der Gutannahme bis zur Abgabe an die aufnehmende Hand darlegen. Allerdings sind Getreideanlagen in ihrer Konzeption so individuell wie die landwirtschaftlichen Betriebe und somit jede einzelne ein Unikat. Um eine Vergleichbarkeit der Getreideanlagen herbeizuführen, sind diese anhand der Referenzfrucht Weizen ausgewählt worden.

Die Auswahl der Untersuchungsobjekte ist in Abstimmung zwischen dem RKL e.K. und dem Fachbereich Agrarwirtschaft der Fachhochschule Kiel erfolgt. Es wurden Auswahlkriterien zugrunde gelegt. Im Einzelnen sind diese das Trocknungsverfahren, der Betriebstyp sowie der Standort. Die zuletzt genannten Auswahlkriterien sind zwar von untergeordneter Bedeutung, sind jedoch nicht unerheblich. Zielsetzung war zudem, die Getreideanlagen vom Norden bis zum Süden Schleswig-Holsteins abzubilden. Zudem sollte es sich vorwiegend um Marktfruchtbetriebe handeln, dessen Leitkultur der Weizen darstellt. Der Winterweizen stellt im Ackerbau in Schleswig-Holstein die Leitkultur dar, siehe dazu Abbildung 1.

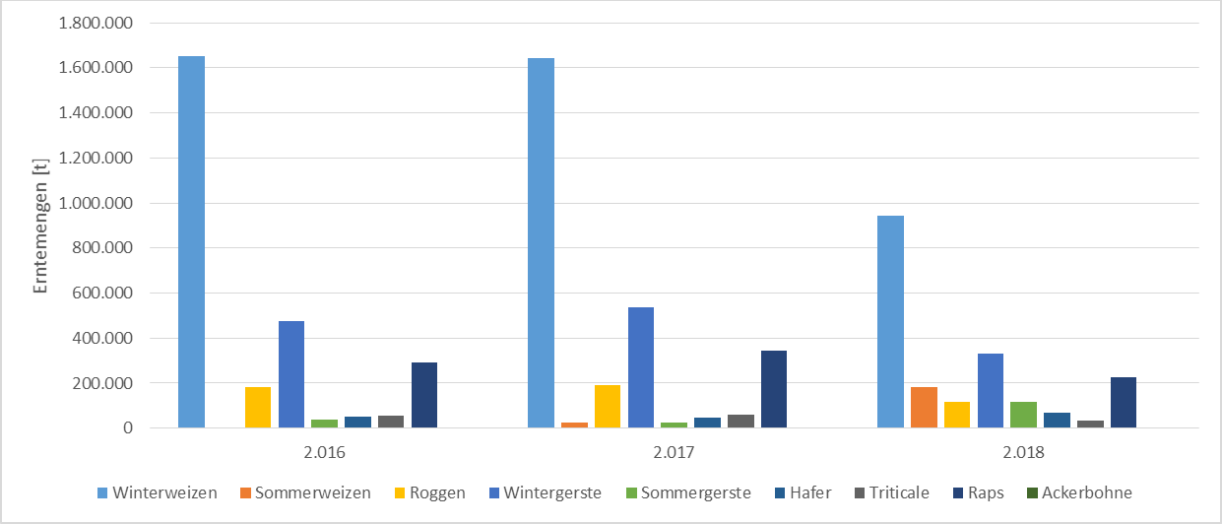


Abbildung 1: Erntemengen in Schleswig-Holstein von 2016 - 2018 (RKL, 2019)

Im Forschungsprojekt sollen mind. 9 Getreideanlagen in ihrem energetischen Verbrauch analysiert werden, von denen jeweils 3 sollen dasselbe Trocknungsverfahren nutzen sollen. Zur Datenerhebung wurden 12 Trocknungsanlagen herangezogen, siehe Abbildung 2.

Als kontinuierliches Trocknungsverfahren wurden in dieser Forschungsarbeit die Dächerschacht-Durchlauftrockner, als absätzige Verfahren die Silosatztrocknung sowie die Lagerbelüftungstrocknung in Schleswig-Holstein untersucht.

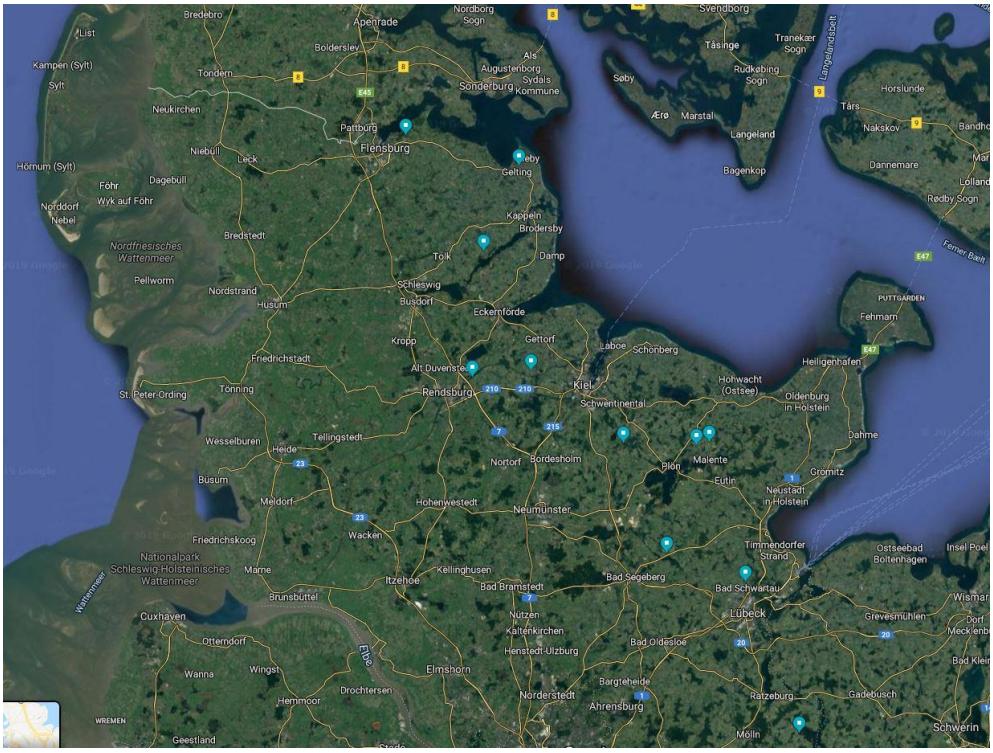


Abbildung 2: Verteilung der Forschungsbetriebe (türkisfarbene Ortsmarken) in Schleswig-Holstein

Den höchsten technischen Aufwand findet man bei der Dächerschacht-Durchlauftrocknung. Dieses Trocknungsverfahren benötigt einen möglichst homogenen Gutstromzufluss. Das Erntegut wird üblicherweise in Feuchtgetreidezellen aufgenommen. Die Kegelbildung bei der Befüllung sowie die Trichterbildung bei der Entnahme und die prozessbedingte Verweilzeit, als Schwitzprozess bezeichnet, sorgen für einen Feuchteausgleich zwischen den Körnern und im Korn selbst, um als weitgehend homogenes Gut die Trocknungsanlage im optimalen Betriebspunkt zu halten. Weitere Steuerungsgrößen sind die Trocknungstemperatur, die Prozessluftmenge sowie die Passageräte im Trocknerschacht.

Als absätziges Trocknungsverfahren wurde der Silotrockner in dieser Forschungsarbeit näher betrachtet. Die flachen und bauchigen Silos haben eine maximale Schütthöhe von 7,85 m. Das Trocknungsgut wird mit variierenden Feuchtigkeiten in den Behälter verbracht. Ein Rührschneckensystem sorgt für eine Homogenisierung und verhindert das Absinken des Hohlraumvolumens während der Schrumpfung durch Wasserabgabe. Dieses Trocknungsverfahren wird im Wesentlichen über die Steuerungsgrößen Trocknungstemperatur, Prozessluftmenge sowie der Verweilzeit geführt.

Als weiteres absätziges Verfahren wurde die Lagerbelüftungstrocknung betrachtet. Dieses Verfahren arbeitet nicht wie die zuvor genannten Verfahren mit der Stellgröße der Trocknungstemperatur, sondern über die relative Luftfeuchtigkeit. Es wird die natürliche Wasseraufnahmekapazität der Luft genutzt. Diese ist naturgemäß begrenzt, sodass der Steuerungsgröße Prozessluftmenge eine besondere Bedeutung zukommt. Da es sich in der Regel um Selbstbaulösungen handelt, sind diese Trocknungsverfahren bei der Ermittlung der energetischen Aufwendungen besonders aufwendig.

Zur Ermittlung der energetischen Aufwendungen wurden bei den zu betrachtenden Trocknern Außenluftkonditionen, wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit sowie Luftdruck erfasst. Des Weiteren wurden die Stromaufnahme, Energieträgereinsätze, Trocknungsgutmenge sowie die Prozessluftmenge in der Erntekampagne 2019 erfasst. Da der Lagerungsprozess auf den meisten Betrieben noch nicht abgeschlossen ist, sind die Energieaufwendungen für die Kühlung und Auslagerung noch nicht erfasst worden. Zur Beurteilung der spezifischen Energieeinsätze wurden die Referenzwerte für Trocknungsanlagen der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung sowie die des DLG-Merkblatts 425 und dem DLG-Prüfrahmen für Trocknungstechnik herangezogen.

Als Vergleichsgröße wurde der spezifische Energieeinsatz pro 1 kg entzogenes Wasser definiert. Der spezifische Energieeinsatz für die Beurteilung des Energieverbrauchs der Gesamtanlage wurde bezogen auf die eingelagerte Tonne. Eine vorläufige Auswertung der spezifischen Energieeinsätze kategorisiert nach Trocknungsverfahren ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Vorläufige Auswertung der spezifischen Energieeinsätze der betrachteten Anlagen

Kennung	Ort	Typ	spez. elek. Energie-einsatz [kWh/kg]	spez. therm. Energie-einsatz [kWh/kg]	spez. Energie-einsatz [kWh/kg]
2019-D-001	Wensin	Durchlauftrockner	0,090	1,020	**1,110**
2019-D-002	Schinkel	Durchlauftrockner	0,210	1,520	**1,730**
2019-D-003	Seedorf	Durchlauftrockner	0,090	1,110	**1,200**
2019-D-004	Kühren	Durchlauftrockner	0,210	1,360	**1,570**
2019-D-005	Gelting	Durchlauftrockner	0,090	1,040	**1,130**
2019-L-001	Bad Schwartau	Lagerbelüftungstrocknung	0,810	0,000	**0,810**
2019-L-002	Ulsnis	Lagerbelüftungstrocknung	0,790	0,000	**0,790**
2019-L-003	Wees	Lagerbelüftungstrocknung	0,790	0,080	**0,870**
2019-L-004	Gelting	Lagerbelüftungstrocknung	0,800	0,000	**0,800**
2019-S-001	Rade bei Rendsburg	Silotrockner	0,082	1,365	**1,447**
2019-S-002	Grebin	Silotrockner	0,151	0,000	**0,151**
2019-S-003	Sieversdorf	Silotrockner	0,075	1,536	**1,611**

1.2. Strukturwandel in der Landwirtschaft

Der landwirtschaftliche Strukturwandel trifft Deutschland seit den 1970er Jahren hart. Gemäß den Daten des Statistischen Bundesamtes gab es 1971 Bundesweit 1.017.697 landwirtschaftliche Betriebe, inklusive der Gartenbaubetriebe. Diese haben eine Fläche von 12.621.824 ha landwirtschaftliche Nutzfläche bewirtschaftet. Vor der Wiedervereinigung der Bundesrepublik Deutschland (1990) lag die Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe bei ca. 629.000. Diese Betriebe haben eine landwirtschaftliche Nutzfläche von ca. 11.770.000 ha bewirtschaftet. 1991 kamen durch die Wiedervereinigung von Ost und West ca. 5.255.000 ha und ca. 6.000 landwirtschaftliche Betriebe hinzu. Trotz dieser positiven Entwicklung verliert die Landwirtschaft im Mittel der Jahre von 1971-2019 jeden Tag ca. 81 ha landwirtschaftliche Nutzfläche, der Zuwachs von ca. 5.000.000 ha ist im Mittelwert

nicht berücksichtigt. In den Jahren 1971–2019 haben gemäß dem Statischen Bundesamt ca. 751.000 landwirtschaftliche Betriebe den Betrieb aufgegeben.

1991 gab es in Schleswig-Holstein ca. 27.000 landwirtschaftliche Betriebe, die insgesamt 1.073.000 ha bewirtschaftet haben. So hat 1991 ein landwirtschaftlicher Betrieb ca. 95 Personen der schleswig-holsteinischen Bevölkerung versorgt. Pro Person hatte ein Landwirt ca. 0,41 ha landwirtschaftliche Nutzfläche zur Verfügung.

2001 gab es noch ca. 19.900 landwirtschaftliche Betriebe. Innerhalb von 10 Jahren wurden die landwirtschaftlichen Betriebe um ca. 7.100 reduziert. In diesem Zeitraum haben nicht nur landwirtschaftliche Betriebe aufgegeben, es wurde auch eine erhebliche Menge an landwirtschaftlicher Nutzfläche aus der Produktion genommen. 2001 wurden 1.021.000 ha bewirtschaftet, was einen Verlust von ca. 52.000 ha bedeutet. Durch den Rückgang an Flächen und Betrieben ist die Versorgung je Person von 95 Personen/landwirtschaftlicher Betrieb auf 140 Personen/landwirtschaftlicher Betriebe angestiegen. Dem einzelnen landwirtschaftlichen Betrieb stehen nun nur 0,37 ha für die Versorgung pro Person zur Verfügung. 2019 gibt es laut Statistischem Bundesamt 12.380 landwirtschaftliche Betriebe mit einer Flächenbewirtschaftung von ca. 987.800 ha. 2001 haben weitere 7.552 landwirtschaftliche Betriebe den Betrieb eingestellt. Zudem wurden weitere 33.700 ha aus der landwirtschaftlichen Produktion genommen. In 2019 versorgte jeder landwirtschaftliche Betrieb 235 Personen. Dafür standen dem landwirtschaftlichen Betrieb pro Person 0,34 ha zur Verfügung. Die Entwicklung der landwirtschaftlichen Fläche ist Abbildung 3 zu entnehmen.

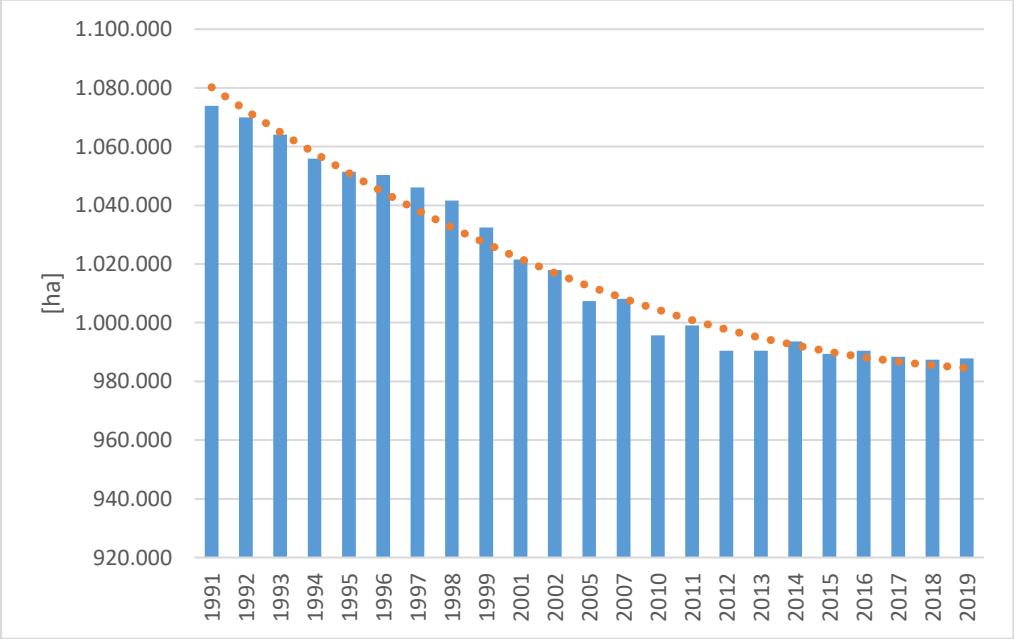


Abbildung 3: Entwicklung der LN in Schleswig-Holstein (Statistisches Bundesamt, 2020)

Durch den strukturellen Wandel sind nicht nur die Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe und deren Fläche zurückgegangen. Die bestehenden landwirtschaftlichen Unternehmen bewirtschaften im landesweiten Mittel (Stand 2019) eine Fläche von 80 ha. 1991 wurden noch ca. 27.700 Betriebe mit einer durchschnittlichen Betriebsgröße von 39 ha bewirtschaftet. 10 Jahre später (2001) wurden nur noch ca. 19.900 Betriebe mit einer Flächenausstattung von 51 ha bewirtschaftet, was ein Bewirtschaftungsplus von 12 ha pro Betrieb ausmacht. 2019 wurden nur noch ca.12.300 Betriebe bewirtschaftet, deren Flächenausstattung einen weiteren Flächenzuwachs von 29 ha verzeichnete.

1.3. Einfluss der Witterung auf die Erntebedingungen

1.3.1. Temperatur

Die Abbildung 4 zeigt den Temperaturverlauf im Erntemonat August seit 1990 bis einschließlich 2020. Die durchschnittliche Temperatur der letzten 120 Jahre im August betrug 16,47°C.

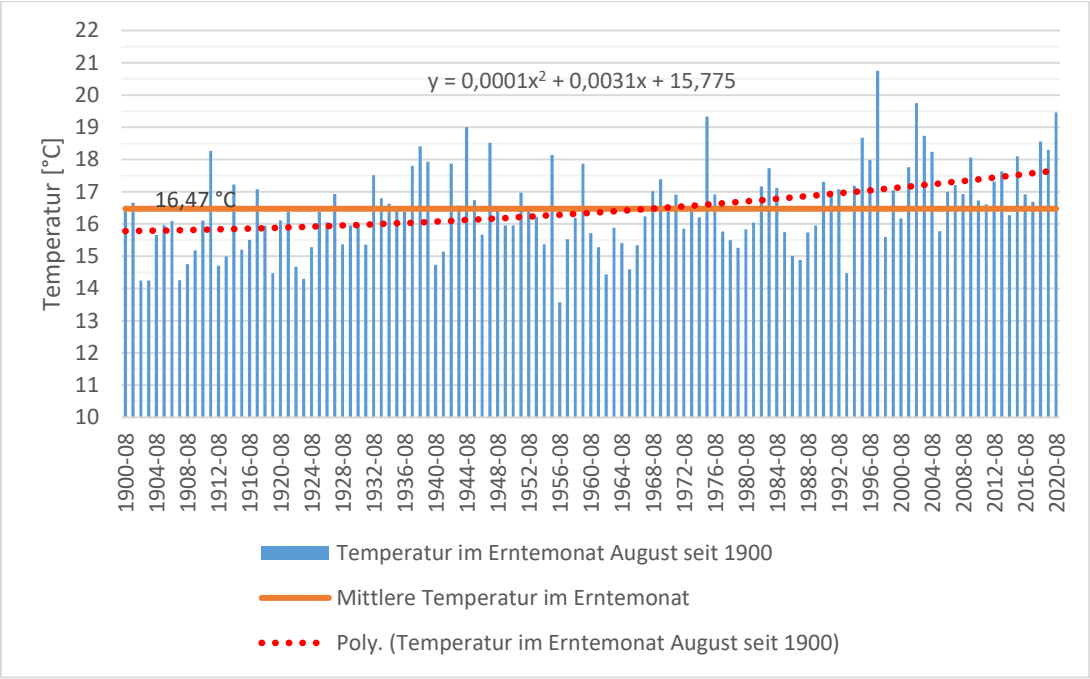


Abbildung 4: Temperaturentwicklung im Erntemonat August seit 1900 bis 2020 (Deutscher Wetter Dienst – Climate Data Center, 2020)

Dieser Durchschnitt ergibt sich aus den Tages- und Nachtzeiten. 1900 wurde in Schleswig-Holstein die Temperatur lediglich durch 11 Wetterstationen gemessen. In 1970 waren es 29 Wetterstationen und 2020 22 Stationen, die die Temperatur gemessen bzw. Daten geliefert haben. Abbildung 4 ist weiter zu entnehmen, dass die Temperatur volatil ist. In den letzten 120 Jahren gab es immer wieder Phasen, die wärmer bzw. kälter als der Durchschnitt waren. Anhand der Trendlinie (rot gepunktet) ist deutlich

zu sehen, dass der Schnittpunkt von Trendlinie und Durchschnitt 1969 ist. Die Trendlinie zeigt eine Temperaturerhöhung von 0,0031°C pro Jahr im Erntemonat August.

1.3.2. Niederschlag

Die durchschnittliche Niederschlagsmenge im Erntemonat August beträgt ca. 85 mm. Wie auch bei der Temperatur ist der Niederschlag extrem volatil. In Abbildung 5 wird die Niederschlagsvolatilität visuell dargestellt.

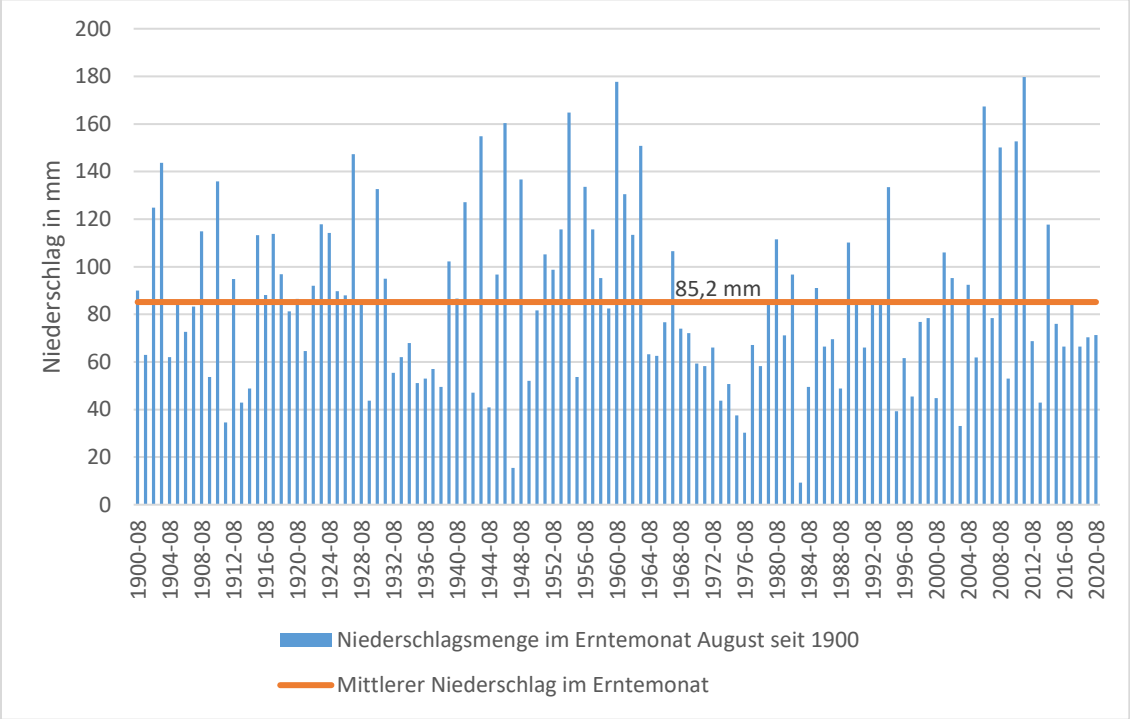


Abbildung 5: Niederschlagsentwicklung im Erntemonat August seit 1900 bis 2020 (Deutscher Wetter Dienst – Climate Data Center, 2020)

Seit 1900 gab es immer wieder Phasen, in denen es mehr oder weniger Niederschlag gab. Wie der Abbildung 6 weiter zu entnehmen ist, gab es immer wieder Jahre mit erheblichen Niederschlagsmengen. Bei genauerer Betrachtung der Zeitleiste gab es in den Zeitreihen von 1900 bis ca. 1932, von ca. 1940 bis ca. 1964 und von ca. 2005 bis ca. 2011 überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmengen im August. Die absoluten Ausreißer in der Zeitreihe sind 1960 mit ca. 177 mm Niederschlag und 2011 mit ca. 180 mm Niederschlag. Durch große Mengen an Niederschlägen im Erntemonat August musste die Ernte auch bei nicht optimalen Bedingungen durchgeführt werden. In diesen Jahren wurden hohe Ansprüche an die Getreidetrocknung gestellt, um die Qualität zu erhalten. In den Jahren 2018–2020 ist verhältnismäßig wenig Regen gefallen, auch nicht gleichmäßig über mehrere Tage im August verteilt, sondern eher in Richtung Starkregenereignisse. Das bedeutet, dass

der Niederschlag in sehr kurzer Zeit niederfällt und eventuell nicht von dem Boden aufgenommen werden kann, was Überschwemmungen und Staunässe je nach Bodenart zur Folge hatte.

1.3.3. Luftfeuchte

Die Luftfeuchtigkeit in Schleswig-Holstein, die maßgeblich durch die Temperatur und dem Niederschlag bestimmt wird, ist aufgrund der geografischen Lages des Bundeslandes recht stabil. Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit in Schleswig-Holstein im Erntemonat August betrug im Mittel der letzten 120 Jahre 79,8 % (Abbildung 6).

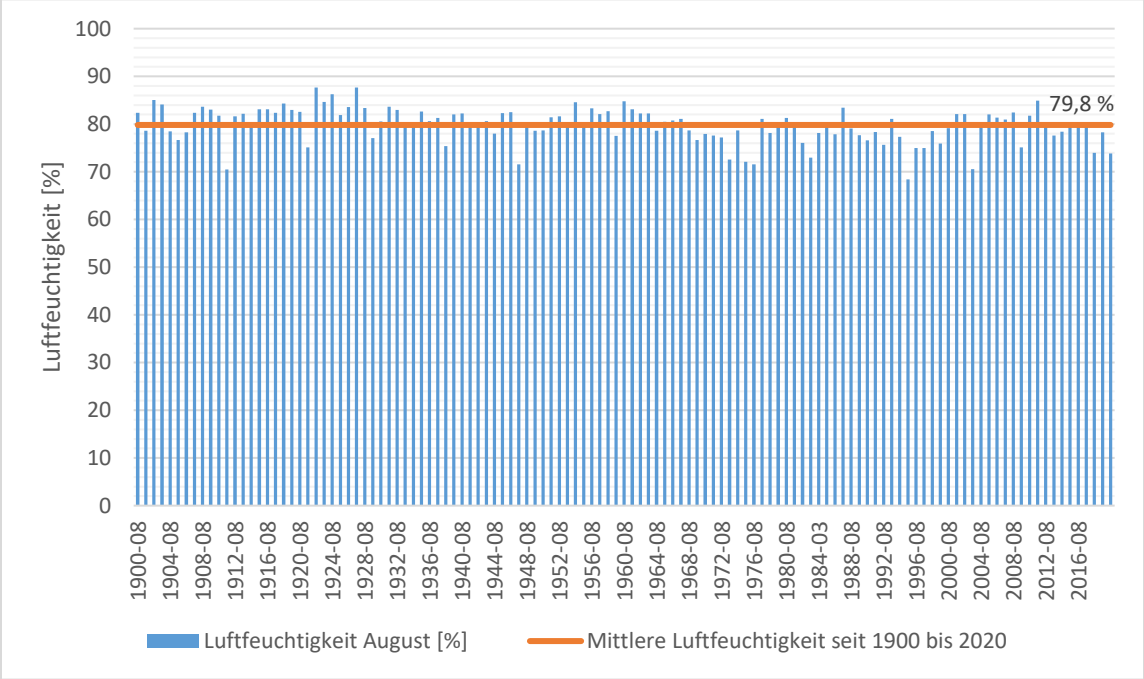


Abbildung 6: Entwicklung der Luftfeuchtigkeit im Erntemonat August seit 1900 bis 2020 (Deutscher Wetter Dienst – Climate Data Center, 2020)

Die dargestellten Witterungsdaten bezogen sich auf den gesamten August. Bei genauerer Betrachtung des Erntefensters führt dies zu einer Unschärfe, da der Weizen nicht 31 Tage im Monat geerntet wird. Das Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) hat sich mit dieser Fragestellung beschäftigt und eine Klimakarte für Deutschland erstellt, die Deutschland in 12 Klimagebiete einteilt. Innerhalb dieser Klimagebiete wird für Weizen der Zeitraum der Ernte und die verfügbaren Volldruschstunden bei unterschiedlichen Kornfeuchten dargestellt. Die Forschungsbetriebe befinden sich in den Klimagebieten 10, 11 und 12. Der Erntezeitraum verschiebt sich innerhalb des Augustes je nach Klimazone. Der Erntezeitraum für das Klimagebiet 10 für die Referenzfrucht Weizen erstreckt sich vom 10.08.–28.08., für das Klimagebiet 11 vom 04.08.–25.08 und für die Klimazone 12 findet die Weizenernte in dem Erntefenster vom 06.08.–26.08 statt.

1.4. Energieverbrauch während der Trocknungsphase in S-H

Der notwendige Energieaufwand zur Getreidetrocknung wird durch die Bereiche Trocknungssystem, Kulturart und Erntefeuchte maßgeblich beeinflusst. Das Trocknungssystem hat den größten Einfluss auf den Energieverbrauch, denn hier kommt es darauf an, wie alt das genutzte System ist und noch entschiedener ist, welches Trocknungssystem angewendet wird. In diesem Forschungsprojekt wurden verschiedene Trocknungstypen auf ihre energetische Effizienz hin untersucht:

- Lagerbelüftungstrocknung
- Silotrockner
- Durchlauftrockner

In der Regel wird ein fossiler Energieträger für die Wärmegewinnung, die zur Getreidetrocknung benötigt wird, genutzt. Zu ca. 98 % wird Heizöl genutzt, ca. 2 % entfällt auf Gas. Wenige Getreidetrocknungsanlagen nutzen bisher die möglichen Systemkopplungen mit Erneuerbaren Energien. Mögliche Systemkopplungen wären über Photovoltaik als reiner Stromlieferant möglich oder Biogas als Strom- und Wärmelieferant.

Abbildung 7 zeigt den Kostenverlauf von Heizöl seit dem Jahr 2000 in $€_{netto}$/l sowie die Kosten für das Betriebsmittel-Heizöl in Bezug auf den getrockneten Winterweizen aus der Besonderen Ernte Ermittlung des BMEL für Schleswig-Holstein. 2010 betrug der Anteil vom Heizöl an den Vollkosten für den Winterweizen ca. 2,56 €/t.

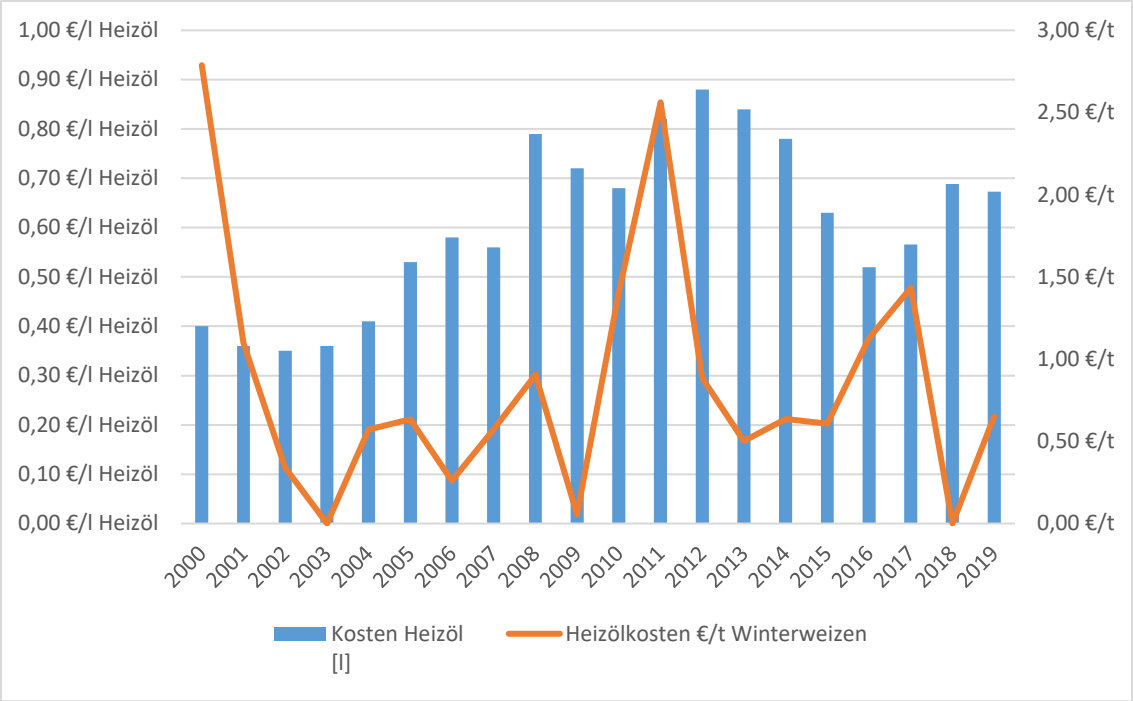


Abbildung 7: Bereitstellungskosten des Betriebsmittels Heizöl in €/t getrockneter Winter Weizen (Statistisches Bundesamt; Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz) Preise für leichtes Heizöl, Motorenbenzin und Dieselkraftstoff)

Aus den Besonderen Ernte Ermittlungen (2000–2019) wurden insgesamt 35,5 Mio. t Weizen geerntet, was im Jahresschnitt ca. 1,76 Mio. t Weizen ausmacht. Zum Trocknen der gesamten Erntemenge der letzten 20 Jahre wurde Heizöl im Wert von ca. 30,5 Mio. € aufgewendet, was im Jahresschnitt einen Verbrauch in Höhe von 1,5 Mio. € ergibt.

2. Grundlagen

Nachfolgend sollen die wesentlichen Grundlagen für den Betrieb einer Getreidetrocknung und der Zusammenhang zwischen den Parametern (Feuchtegleichgewicht, Trocknungsluft und Temperatur) dargestellt werden. Die in Schleswig-Holstein verbreiten Trocknungssysteme werden betrachtet und in ihren Unterschieden für das Management und die spezifischen Anforderungen in Bezug auf das Trocknungsergebnis ausgewertet.

2.1. Feuchtegleichgewicht

Der Feuchtegehalt steht für die möglichen Umsetzungsprozesse im Korn. Dieser Zustand wird als Wasseraktivität des Getreides mit dem aw-Wert bezeichnet, was mit einem Hygrometer zu messen ist. Ein aw-Wert von 0,65 relativer Luftfeuchtigkeit und 14 % Kornfeuchte kennzeichnet hohe mikrobielle Stabilität.

Das Hygrometer misst die Atmosphäre nahe an den Körnern. Damit entspricht sein Messwert der relativen Luftfeuchte (r.LF.). Und diese wiederum steht im Gleichgewicht mit der Kornfeuchte. Der Zusammenhang von Korn- und Luftzustand wird über die Sorptionskurve ausgedrückt. Das Korn mit seiner porösen Struktur kann Feuchtigkeit aufnehmen oder abgeben – in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit bzw. dem zugehörigen Dampfdruck. Das Feuchtegleichgewicht, in Abbildung 8 für einige Temperaturen dargestellt, sagt also aus, ob die Luft im Stande ist, Feuchtigkeit aufzunehmen oder umgekehrt, ob der Feuchtegehalt des Korns sich der umgebenden Luft anpasst. Als mittleres Wertepaar gelten 14 % Kornfeuchte und 65 % relative Luftfeuchte. Dies sind zugleich die Bedingungen, unter denen Getreide über lange Zeit lagerstabil bleibt.

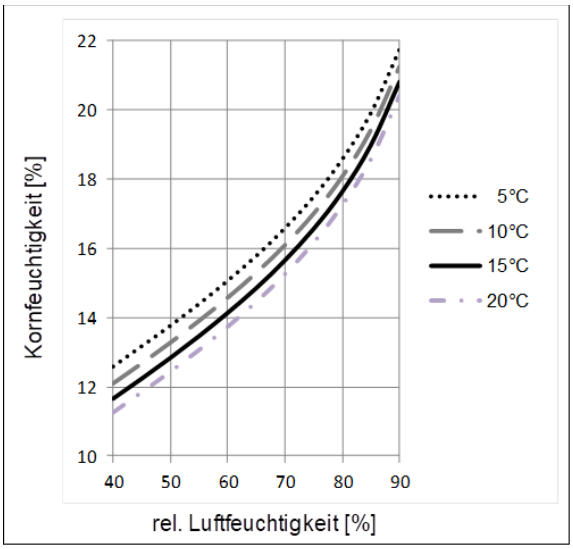


Abbildung 8: Gleichgewicht von relativer Luftfeuchtigkeit und der Kornfeuchte von Weizen (Sorptionsisothermen) für verschiedene Temperaturen (AEL-Hessen, Bericht Nr. 70)

Dieses Gleichgewicht unterscheidet sich etwas bei den einzelnen Getreidearten (Tabelle 2). Raps fällt mit wesentlich geringerem Niveau aus dem Rahmen, Mais hingegen verhält sich wie Weizen.

Tabelle 2: Feuchtigkeitsgleichgewicht verschiedener Produkte bei 15° (Isensee et al, 2013)

Fruchtart	rel. Luftfeuchtigkeit [%]				
	60	65	70	75	80
Weizen	13,2	13,9	14,6	15,9	16,9
Gerste	13,2	14,1	15	16,1	16,9
Roggen	13,3	14	14,9	16,2	17,2
Hafer	12,5	13,3	14,3	15,4	16,2
Raps, Rübsen	7,4	8	8,8	10,2	11,3
Ackerbohnen	12,5	13,5	14,7	16,5	17,9
Erbsen	12	13	14	15,5	16,6
Sonnenblumen	8,1	9,5	10,2	11,8	13,0
Leinsamen	8	8,6	9,3	11	12,3
Hirse	12,5	13,5	14,8	16	16,9
Weidelgras	11,9	12,8	14	15,3	16,3
Mais	13,2	13,9	14,6	15,9	16,9

In den zurückliegenden 120 Jahren betrug die relative Luftfeuchte 79,8 % (vgl. Abbildung 6) damit sind beim Feuchtigkeitsvergleich beim Weizen 16,9 % Feuchte enthalten. Das bedeutet einen Trocknungsbedarf von 2,4 % aufgrund der höheren Luftfeuchte.

2.2.Trocknungsluft

Die Luft dient zweierlei Aufgaben: Als Träger der Energie liefert sie die für die Trocknung notwendige Wärme, als Wasserdampf aufnehmendes Medium transportiert sie die Feuchtigkeit ab. Dafür strömt die Luft gleichmäßig um die einzelnen Körner in der gesamten Schüttung.

Die thermodynamischen Eigenschaften der Luft sind wesentlich für Wirkung und Effizienz der Trocknung. Luft ist im physikalischen Sinn ein Gemisch aus trockener Luft und Wasserdampf. Das Verhältnis zueinander wird über den Druck formuliert. Für die Trocknung interessiert die relative Luftfeuchtigkeit, also das Verhältnis von vorhandener Feuchtigkeit zur Höchstmenge, ausgedrückt in g Wasser je kg Luft oder in Prozent.

Die Differenz bildet das Sättigungsdefizit als Maß dafür, wie viel Feuchte die Luft aufnehmen kann, also die Trocknungskapazität. Je nach Wassergehalt und Temperatur enthält die Luft Energie, im Mittel 0,36 Wh/m³. Die Wasseraufnahme benötigt eine Verdunstungsenergie von 539 kcal/kg H2O bzw. 0,625 kWh/kg. In der Realität von Trocknungsanlagen liegt der Wert je nach Wirkungsgrad deutlich höher.

Den Zusammenhang von Temperatur, Feuchte und Energie stellt das h-x-Diagramm von Mollier dar (Abbildung 9).

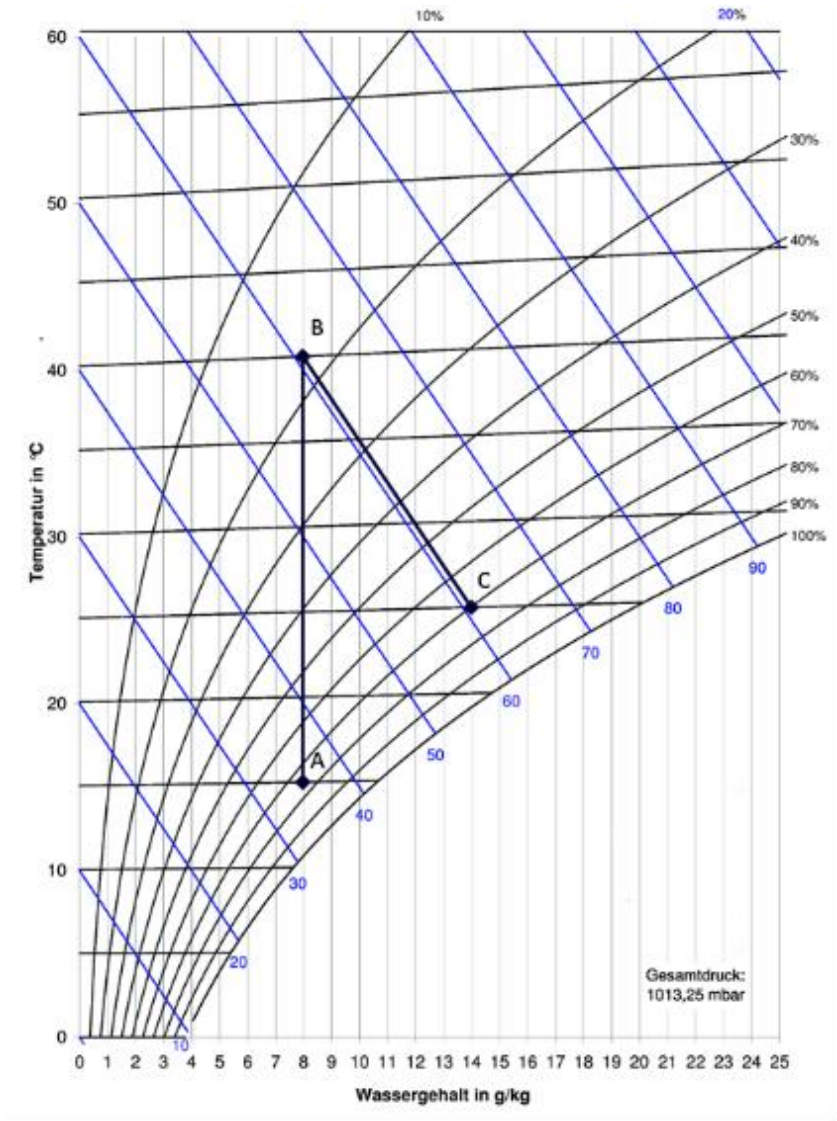


Abbildung 9: h-x-Diagramm nach Mollier zum Feuchteentzug (Isensee et al., 2013)

Die X-Achse verzeichnet den absoluten Wassergehalt in g je kg Luft, also auf die Masse bezogen, da sich das Volumen mit der Temperatur ändert. Im Mittel kann man 1,2 kg/m³ Luft ansetzen. Die relative Luftfeuchtigkeit in % verläuft in Kurven. Die Y-Achse gibt die Temperatur in °C an, außerdem den Energiegehalt (Enthalpie) in kcal/kg (1 kg = 0,28 Wh), fortlaufend mit den schräg verlaufenden Linien.

Die Kurven der relativen Luftfeuchte reichen bis zu 100 %, darüberhinausgehende Werte stellen als „Nebelzone“ die Sättigung dar, womit gemeint ist, dass die Luft nicht mehr alles Wasser in Form von Dampf binden kann und Teile des Wassers kondensieren.

Anhand des h-x-Diagramms ist es möglich, die maximal erreichbare Wasseraufnahme der Trocknungsluft zu ermitteln und somit die notwendige Luftmenge und daraus die Gebläseleistung zu errechnen. Ein Beispiel soll das erläutern.

Tabelle 3: Beispiel zum Feuchteentzug (Isensee et al., 2013)

	relative Luftfeuchtigkeit [%]	Wassergehalt [g/kg]
A. Aktuelle Außenlufttemperatur 15°C	75	8
B. Temperaturerhöhung auf 40°C	17	8
C. Abluft aus der Trocknungsanlage 25°C	70	14
Sättigungsdifferenz		**6**

Die normale Außenluft mit 15° hat eine relative Feuchte von 75 % (Punkt A im h-x-Diagramm, Abbildung 9). Sie wird auf 40° für die Warmlufttrocknung erwärmt, erreicht damit in Punkt B eine r.LF. von 17 %. Der absolute Wassergehalt bleibt mit 8 g/kg Luft gleich (Tabelle 3). Während der Trocknung kühlt die Luft ab und nimmt Feuchtigkeit aus dem Getreide auf. D.h., von Punkt B wird entlang der Enthalpie-Linie bis zur Austrittstemperatur 25°C (Punkt C) eine Gerade gezogen. Der Wasserentzug kann nun auf der x-Achse abgelesen werden. Dazu werden die Senkrechten von Punkt C und A auf die x-Achse gezogen. Aus der Differenz der Werte 14 und 8 folgt die Wasseraufnahme mit 6 g/kg, umgerechnet für 1,2 g/m³ Luft also 5 g/m³.

Dieses Beispiel lässt sich auf andere Fälle, so auf das geringe Temperaturniveau der Belüftungs- wie das hohe der Durchlauftrocknung, übertragen.

Alternativ zur Erwärmung der Trocknungsluft senkt die starke Kühlung der Luft durch Kondensation den absoluten Wassergehalt. Die folgende geringe Erwärmung schafft eine niedrige relative Luftfeuchte und damit ein ergiebiges Sättigungsdefizit. Im h-x-Diagramm wird die Außenluft von 15° mit 75 % r.LF. gekühlt. An dem Schnittpunkt K von 5° mit der Sättigungskurve ist ein Wassergehalt von 5,5 g/kg abzulesen – 2,5 g/kg sind also kondensiert. Die Erwärmung von diesem Schnittpunkt aus auf 15° ergibt eine relative Luftfeuchtigkeit von ca. 50 %. Damit wird also ein Sättigungsdefizit auf niedrigem Temperaturniveau erreicht, was bei hitzeempfindlichen Gütern, z.B. Gewürzen, von Bedeutung ist. Für Getreide wäre das Verfahren zu teuer, weil der Antriebsbedarf (E-Motor) für das Kühlaggregat, zumeist eine Entfeuchtungs-Wärmepumpe und der Kapitalbedarf, zu hoch sind.

2.3.Trocknungstemperatur

Der Wärme kommt für die Feuchteabgabe im Korn, wie für die Aufnahme in der Luft, eine große Bedeutung zu. Je höher die Temperatur, desto höher der Effekt. Doch das Korn setzt Grenzen.

Mit Blick auf die Kornqualität ist die Temperatur im Inneren des Korns gemeint. Als Eingangsgröße steht die Zulufttemperatur. Sie geht im Lauf des Trocknungsprozesses zurück: Zunächst, weil sie sich am kalten Getreide abkühlt bzw. Wärme an das Getreide abgibt, dann wegen der Verdunstungswärme (Feuchtigkeitsaufnahme). Diese Korn-Luft-Temperatur ist also niedriger als die der Zuluft, aber höher als die des Korns. Mit der Wirkungsdauer der Trocknung nähern sich beide Temperaturen an.

Eine hohe Zuluft-Temperatur steigert die Trocknerleistung beachtlich, nach Versuchsergebnissen (Abbildung 10) linear. Zugleich nimmt die Korntemperatur zu.

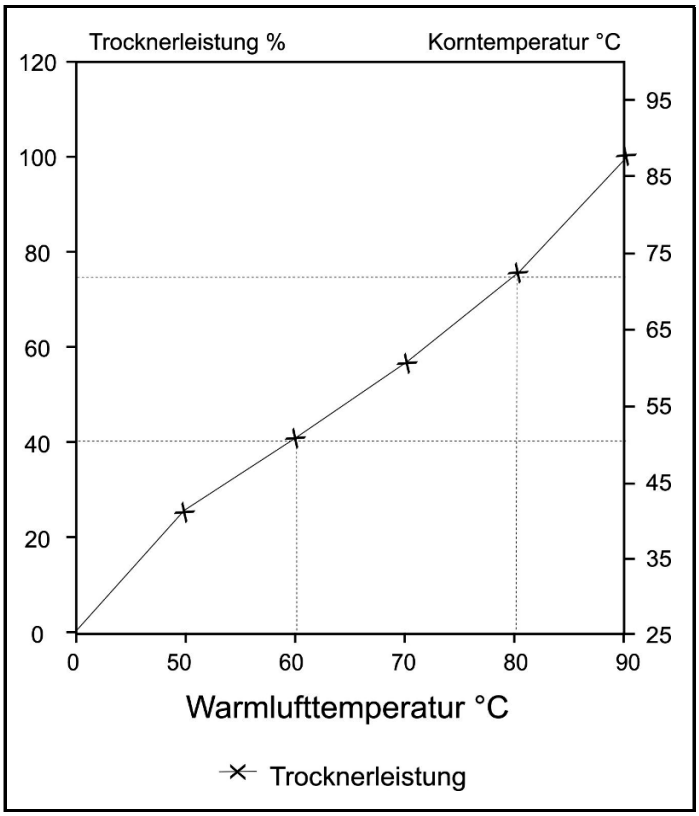


Abbildung 10: Einfluss der Warmlufttemperatur auf Trocknerleistung und Korntemperatur (Weizen von 21,9 % auf 15,5 %) (Maltry in Reimers; 1975)

Die Verdunstung von Wasser erfordert Energie: 625 Wh je kg Wasser bilden die physikalische Grundlage. Die in einer Trocknungsanlage tatsächlich verbrauchte Wärme liegt zwischen 1.100 und 1.800 Wh/kg Wasser, kann aber auch 2.000 Wh/kg übersteigen. Unabhängig von den Gegebenheiten der Anlage wirken Temperatur- und Feuchteniveau. Je höher die Trocknungstemperatur, desto günstiger die Feuchteabgabe. Aber all diese Faktoren überragt die Sättigung der Abluft wie Abbildung 11 veranschaulicht.

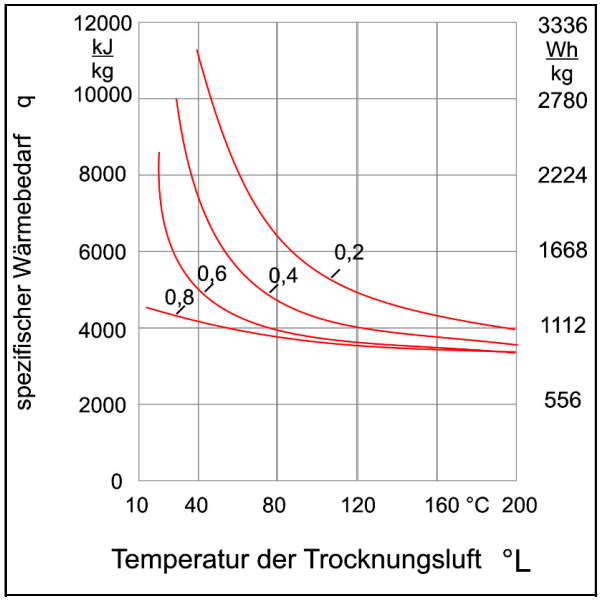


Abbildung 11: Spezifischer Wärmebedarf abhängig von der Zulufttemperatur und der Abluft-Sättigung zwischen 20 und 80 % r.LF. (Isensee et al., 2013)

Die Kurven für geringe Sättigung fallen sehr stark, was einige Zahlen verdeutlichen. Die Erhöhung der Trocknungstemperatur von 60° auf 80°C mindert

- bei 40 % Sättigung den Energiebedarf um 13 - 15 %
- bei 80 % Sättigung den Energiebedarf um 3 - 5 %

Die Wasserbindungskräfte nehmen von Roggen über Gerste, Mais, Weizen und Hafer ab, was sich auf den Energieverbrauch auswirkt.

Die Besonderheit der Wasserbindung im Korn bedeutet, dass der Wärmebedarf mit abnehmender Getreidefeuchte ansteigt.

Daher ist es wichtig, ob sich die Trocknerleistung auf die Absenkung von 20 % auf 16 % oder – aktuell – von 19 % auf 15 % bezieht. Diese Absenkung des Feuchtebereiches senkt die Nennleistung eines Durchlauftrockners bei gleichbleibenden Rahmendaten um ca. 16 %. Der niedrigere Wert wird heute angesichts der Ansprüche des Getreidemarktes zu Grunde gelegt.

Die Intensität der Wärmeeinwirkung wird von Risiken für die Qualität begrenzt, denn sie wirkt auf wesentliche Inhaltsstoffe. Empfindlich reagiert die Keimfähigkeit, sie lässt sich nach anerkannten Methoden messen, gilt also auch als Maßstab für die tolerierbare Temperatur, namentlich beim anspruchsvollen Saatgut. Stärke und Eiweiß verändern ihre Struktur und Eigenschaft. Die Backfähigkeit verschlechtert sich, evtl. auch der ernährungsphysiologische Wert.

Außerdem verursacht zu scharfes Trocknen Schrumpfrisse in der äußeren Kornschicht, die die Verbindung des Keimlings mit dem Mehlkörper gefährden.

Die Wärme wirkt je nach Temperatur und Dauer. Beide Faktoren sind grundlegend untersucht, den Zusammenhang stellt Abbildung 12 dar. Danach tritt bei einer Korntemperatur von 60° bereits nach 3 Minuten eine Schädigung auf, bei 50° erst nach 30 Minuten. Trockenes Getreide erlaubt höhere Werte. Der aufgezeigte Bereich ist im Wesentlichen mit spezieller Messtechnik in Praxisbetrieben bestätigt – allerdings bei naturgemäß breiter Streuung der Ergebnisse.

Die aufgeführten Werte bedeuten, dass bei hoher Zulufttemperatur das Korn schnell diesen Bereich verlassen muss – typisch für den Durchlauftrockner.

Die Auswirkung der hohen Temperatur betrifft vor allem die Körner, die direkt an dem heißen Blech entlanggleiten. Denn dieser Kontakt schafft einen höheren Wärmeübergang als die reine Luftkonvektion. Im Eingangsbereich des Trockners wird das Korn übertrocknet, aber wohl nicht geschädigt. Dieser Anteil fällt am gesamten Durchsatz allerdings nicht auf.

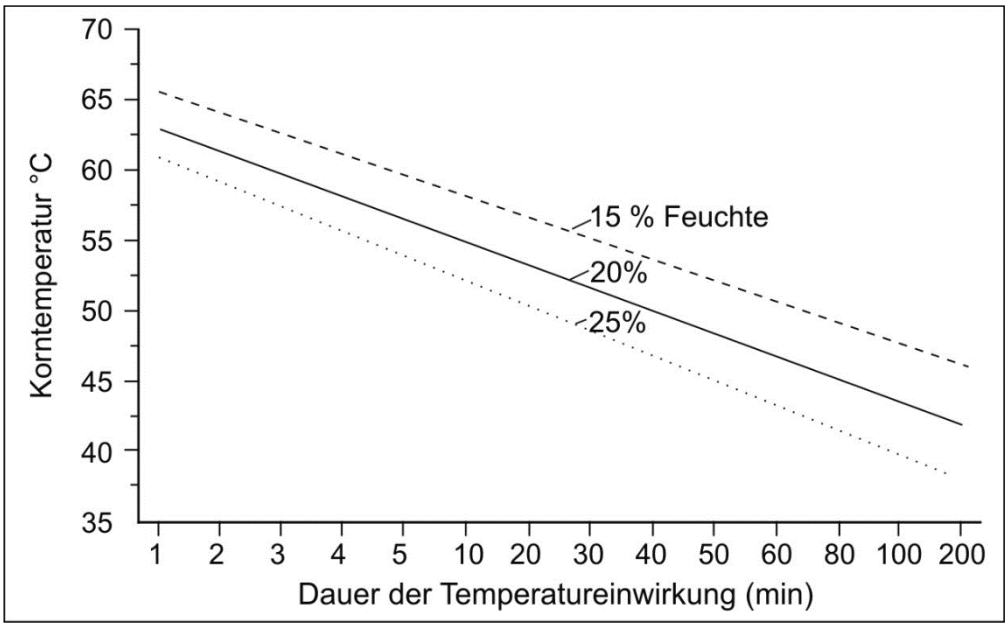


Abbildung 12: Zulässige Korntemperatur (Isensee et al., 2013)

Bei geringer Zulufttemperatur kann die Ware über Stunden im Trockner liegen – typisch für den Satz- oder Ruheschicht-Trockner.

In allen Trocknern gleichen sich die Temperaturen für das Korn und die Zuluft im Laufe der Zeit an.

Die **Korn-Luft-Temperatur** gilt als Regel-/Steuergröße im Trockner, da die Korntemperatur nicht messbar ist. Die Sollwerte dazu variieren in der Literatur und Praxis beachtlich. Zu bedenken sind einige technologische Faktoren, z.B. ob die Anlage den Trocknungsverlauf berücksichtigt. Denn zunehmende Temperatur deutet auf abnehmende Kornfeuchte hin, also auf das Ende der Trocknung. Bei geringer Feuchte fehlt es an Verdunstungskälte, so dass die warme Zuluft weniger abkühlt. Außerdem kann die Korn-Luft-Temperatur von Schwankungen der Zulufttemperatur verursacht werden, wenn nämlich die Brennerregelung in starken Intervallen schaltet.

Generell korreliert die Korn-Luft-Temperatur je nach Trocknungsverfahren und Bauart mit der Temperatur des Korns; als Anhaltswert seien 10-20 K als Differenz genannt.

Werden Grenz- oder Richtwerte vorgegeben, ist zu unterscheiden, ob die Korn-Luft-Temperatur oder die reine Korn-Temperatur gemeint ist, mit Blick auf das Trocknungsverfahren also, ob die Daten sich auf Durchlauf- oder Satztrockner beziehen.

Außerdem ist anzumerken, dass viele Versuche im Labor mit wiederbefeuchtetem Getreide, also unter nichtpraxisgemäßen Bedingungen, durchgeführt sind. Schließlich hat sich das Sortenspektrum geändert, damit u.U. auch die Sensibilität gegenüber der Temperatur.

Derartige Grenzwerte finden sich in der Literatur oder den Vorgaben von Marktpartnern. Die Vorgaben der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) legt die reine Korntemperatur fest für Getreide, das sie auf Lager nimmt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Zulässige Korntemperaturen für die Trocknung bei Saat- und Brotgetreide (Münzing)

Anfangsfeuchte	Höchsttemperatur
über 20 %	36°C
18 bis 20 %	40°C
bis 18 %	45°C

Differenzierte Angaben für Getreide unterschiedlicher Verwertungsrichtung und Eingangsfeuchte liefert Tabelle 5.

Tabelle 5: Korn-Temperatur für Getreide (nach ALB-Hessen, Bericht Nr. 70)

Eingangsfeuchte [%]	maximale Korn-Temperatur [°C]		
	Backweizen	Roggen, Hafer, Gerste als Marktware	Saatgut
16	55	65	49
18	49	59	43
20	43	53	38
22	37	47	34
24	35	40	30

Diese Werte berücksichtigen die Sensibilität gegenüber den Backeigenschaften. Sie korrelieren eng mit der Keimfähigkeit. Diese wiederum wird bei den Werten für Saatgut noch stärker beachtet. Die höchsten Temperaturen verträgt gemäß Tabelle 5 das Futtergetreide.

Für die Betriebsweise eines Trockners kommt es auf die einzuhaltende Zuluft-Temperatur an. Sie wird in Tabelle 6 nach dem Trocknungsverfahren und damit der Verweildauer des Korns in der Warmluft unterschieden.

Tabelle 6: Zulufttemperatur bei Trocknerbauarten für Getreide (nach ALB-Hessen, Bericht Nr. 70)

Trockenart	Maximale Temperatur der Trocknungsluft		
	Backweizen max. °C	Roggen, Hafer, Gerste als Marktware max. °C	Getreide mit erforderlich hoher Keimfähigkeit max. °C
Satztrockner	56	67	50
Umlauftrockner	62	72	52
Durchlauftrockner	66	76	53

Das bewegte Getreide im Durchlauf- und Umlauftrockner verträgt eine wärmere Zuluft, weil eine punktuelle Erhitzung und lange währende Einwirkung vermieden werden. Die Angaben mehrerer Autoren zur Satztrocknung charakterisieren die Bedeutung einzelner Arten bzw. deren Kornform und -größe (Tabelle 7).

Tabelle 7: Maximale Zulufttemperatur für Satztrockner (Isensee et al., 2013)

Getreideart	maximale Zulufttemperatur [°C]
Backweizen	50 - 60
Futtergetreide	55 - 65
Saatgut, Braugerste	40 - 50
Mais	50 - 80
Leguminosen	35
Raps	35
Rambe	43

Die einzelnen Leguminosen werden i.d.R. wie Futtergetreide getrocknet (Tabelle 8).

Tabelle 8: Maximale Korn-Temperatur von Leguminosen (nach Külker in KTBL 312; 1986)

Fruchtart	Anfangsfeuchte [%]	max. Korntemperatur [°C]
Ackerbohnen	18 - 20	35
Speiseerbsen	20 - 22 > 22	30 25
Leguminosen	< 18 18 - 20	45 40
Wicken	20 - 22 > 22	35 30

Allerdings geben die Körner auf Grund ihrer Größe und harten Schale die Feuchtigkeit nur schwer ab. Der Trocknungsprozess wird dann unterbrochen, um den Feuchteausgleich langsamer ablaufen zu lassen.

2.4.Trocknungssysteme

2.4.1. Dächerschachtdurchlauftrockner

Der Dächerschachtdurchlauftrockner gehört heute zu den etablierten Trocknungsverfahren und wird als Standartverfahren eingestuft. Bei dieser Bauform handelt es sich um einen rechteckigen Hochbehälter mit horizontal verlaufenden Luftschächten, die wie ein Dach geformt sind. Auf der Zuluftseite sind die Zuluftdächer und auf der Abluftseite die Abluftdächer mit Öffnungen versehen. Die Trocknungsluft strömt von den Zuluftdächern durch das Trocknungsgut in die Abluftdächer. Diese Bauform ermöglicht es, alle drei Strömungsarten der Luft für den Trocknungsgang zu nutzen. Somit wird das Korn von allen Seiten mit der Trocknungsluft beaufschlagt und eine optimale Wasseraufnahme gewährleistet. Dächerschachtdurchlauftrockner arbeiten kontinuierlich. Über einen regelmäßigen Austrag wird das Trocknungsgut intervallartig durch die Trocknersäule geführt. Die übliche Steuerung des Trocknungsgangs wird über die Passage-Geschwindigkeit geregelt. Die Trocknungstemperatur der Trocknungsluft beträgt üblicherweise 80°C. Durch die Verdunstungskälte sowie die kurze Verweilzeit im Trockner entsteht keine Qualitätsminderung bei Konsumware.

Hinweis: Saatgut muss bei geringeren Temperaturen getrocknet werden.

Die Trocknungsleistung wird für einen Feuchteentzug von 19 % auf 15 % angegeben. In der Praxis haben sich die Standardumweltbedingungen gemäß DLG-Prüfrahmen zur Beschreibung der Trocknungsleistung etabliert. Demnach hat die Außenluft eine durchschnittliche Temperatur von 20°C bei 65 % relativer Luftfeuchte und Normaldruck. So entsteht ein Sättigungsdefizit bei der Aufheizung dieser Außenluft auf die Trocknungstemperatur von etwa 19,5 g/m³ Luft. Je nach Trocknermodell und Wirkungsgradverlust liegt die benötigte Luftmenge pro Tonne Nennleistung unter 3.000 m/h/t und die Wärmeleistung bei etwa 60 kW/h.

Moderne Durchlauftrockner verfügen über eine Wärmerückgewinnung. Dazu wird die Luft aus der Kühlzone angesogen und der Warmluft in der Zulufthaube beigemischt. Dies ist möglich, weil die Luft aus der Kühlzone das Sättigungsdefizit nicht komplett ausschöpft. Des Weiteren wird die Kühlluft am Trocknungsgut aufgeheizt, wodurch zusätzlich Wasser aufgenommen werden kann. Dieser Effekt sorgt dafür, dass moderne Trockner im Energiemix weniger als 0,99 kWh pro kg entzogenes Wasser benötigen.

2.4.2. Silotrockner

Diese Trocknerbauform findet in den letzten Jahren immer mehr Verbreitung. Das liegt darin begründet, dass trotz hoher Investitionskosten die Vorteile der unkomplizierten Handhabung überwiegen. Bei Silotrocknern handelt es sich i.d.R. um bauchige Rundsilozellen mit einem Vollbelüftungsboden. Die maximale Schütthöhe von 6,5 m ist durch das hohe Luftvolumen und den dadurch entstehenden Strömungswiderstand der Trocknungsgüter bedingt. Das Rundsilo wird mit einer Zwangsverteilung ausgestattet, da die Bauform der Silos sowie die Charakteristik der Getreideschüttwinkel dafür sorgen, dass üblicherweise eine Kegelform entstehen würde. Eine schichtweise Einlagerung, die eine Ebene ergibt, ist jedoch systemimmanent. Des Weiteren sind Silotrockner immer mit einer Mischtraverse ausgestattet. Auf dieser Traverse befinden sich mindestens zwei Rührschnecken, die das Trocknungsgut vertikal durchmischen. Die Mischtraverse macht dabei in 24 Stunden mindestens zwei Umrundungen. Als Plangröße wird eine Rührschnecke pro 150 t Siloinhalt vorgesehen. Für Silotrockner, die für Mais konfiguriert werden, wird normalerweise eine Rührschnecke pro 100 t Siloinhalt eingeplant. Die Trocknungstemperatur für Getreide beträgt 45°C, Mais wird mit 60°C getrocknet. Das Sättigungsdefizit der Trocknungsluft beträgt 7,5–12,5 g/m³ Luft. Vorteilhaft sind an diesem Trockner die Homogenisierung des Trocknungsgutes durch das Rührschneckensystem sowie der geringe Bedienaufwand. Als Nachteil ist die Untertrocknung im unteren Bereich zu nennen. Diese entsteht im Bereich der Fegeschnecke, da dort das Rührschneckensystem nicht hineinreichen kann. Damit ist ein Bereich von 50–70 cm über dem Vollbelüftungsboden nicht durchmischt und untertrocknet. Dort findet eine nachhaltige Qualitätsveränderung des Trocknungsgutes statt, da sich Qualitätsparameter, wie Keimfähigkeit und Klebereiweiße verändern.

Silotrockner haben üblicherweise einen spezifischen Energiebedarf von mehr als 1,34 kWh pro kg entzogenes Wasser. Sie werden überwiegend in mittelgroßen Landwirtschaftsbetrieben aufgestellt und passen aufgrund der mittleren Trocknungstemperatur sehr gut zu Wärmekonzepten von mittleren und größeren Biogasanlagen. In der Praxis haben sich besonders bei der Körnermaistrocknung Probleme ergeben.

2.4.3. Lagerbelüftungstrocknung im Flachlager

Die Lagerbelüftungstrocknung nutzt das Prinzip der Gleichgewichtsfeuchtigkeit. So besteht beispielsweise ein Gleichgewicht zwischen 14 % Gutfeuchte von Weizen und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit bei 20°C Lufttemperatur. Demnach wird die Trocknungsluft so konditioniert, dass diese dem Feuchtegleichgewicht entspricht. So wird etwa 1 g Wasser pro Kubikmeter Luft aufgenommen. Das Trocknungsgut kann mit Feuchtigkeiten bis zu 19 % ins Flachlager verbracht werden und wird durch die durchströmende Luft getrocknet. Durch die geringe Wasseraufnahme wird eine hohe Luftrate notwendig. Üblicherweise werden Luftraten von 60–80 Kubikmeter Luft pro Kubikmeter Getreide und Stunde durch das Lagergut geführt. Das führt zu hohen Luftgeschwindigkeiten im Getreidestapel sowie hohen Strömungswiderständen. Letztgenannte sorgen für eine zusätzliche Temperaturerhöhung und damit zu einer weiteren Absenkung der relativen Luftfeuchtigkeit in der Trocknungsluft. Um größere Schwankungen im Trocknungserfolg zu vermeiden, wird in der Lagerbelüftungstrocknung ein Teilumluftverfahren durchgeführt. Es wird feuchtere Luft aus der Halle angesogen und mit Frischluft gemischt, bevor diese in den Hauptluftkanal durch das Radialgebläse gedrückt wird. So werden Feuchteschwankungen der Umgebungsluft egalisiert und der Trocknungsgang stabilisiert.

Strömt die vorkonditionierte Trocknungsluft in das Trocknungsgut, wird ein Trocknungshorizont von 70 cm aufgebaut und so lange Feuchtigkeit abgeführt, bis das Feuchtegleichgewicht erreicht ist. Ab diesem Zeitpunkt wandert der Trocknungshorizont den Getreidestapel hinauf. Das Trocknungsziel ist erreicht, wenn oberhalb des Getreides eine relative Luftfeuchtigkeit von 65 % erreicht ist.

Üblicherweise wird das Luftregime mit 70 % Umluft und 30 % Frischluft gefahren. Die heutige Steuerungstechnik regelt durch entsprechende Kombifühler für die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur die Luftklappen bzw. deren Öffnungsbreite und damit das Mischungsverhältnis zwischen Frisch- und Umluft. Systemimmanent ist die schichtweise Einlagerung des Trocknungsgutes. Dieses wird durch eine vollautomatische stationäre Bandanlage in der Halle realisiert. Als Mobillösung haben sich Förderbänder mit Schwenkeinrichtung etabliert. Lagerbelüftungstrocknungen haben einen hohen Anspruch an die Luftführung und Lagerhöhe. Der Kanalabstand ist abhängig vom Feuchteentzug, dem Belüftungssystem und der Schütthöhe. Werden Wellblechkanäle zur Luftführung genutzt, beträgt der Kanalabstand 1,25–1,5 m. Unterflurkanäle benötigen einen Kanalabstand von 1,0–1,25 m. Die Lagerhöhe ist durchaus variabel. Als Standard gelten 3,0 bis maximal 6,0 m. Höhere Lager sind aufgrund der Temperaturanhebung durch Kompression vorteilhaft und benötigen so keine zusätzliche thermische Anwärmung. Allerdings bedürfen diese einer besonderen Fürsorge, da es zur Verkrustung

an der Stapeloberfläche kommen kann. Diese muss alle zwei Tage mit einer 20 cm tiefen Harke aufgebrochen werden. Lagerbelüftungstrocknungen sind Niedrigenergietrocknungsverfahren, die einen spezifischen Energiebedarf vom 0,4–0,7 kWh pro kg entzogenes Wasser haben. Lagerbelüftungstrocknungen sind jedoch limitiert. Gutfeuchten über 19 % sind nicht verarbeitbar.

2.4.4. Lagerbelüftungstrocknung im Rundsilo

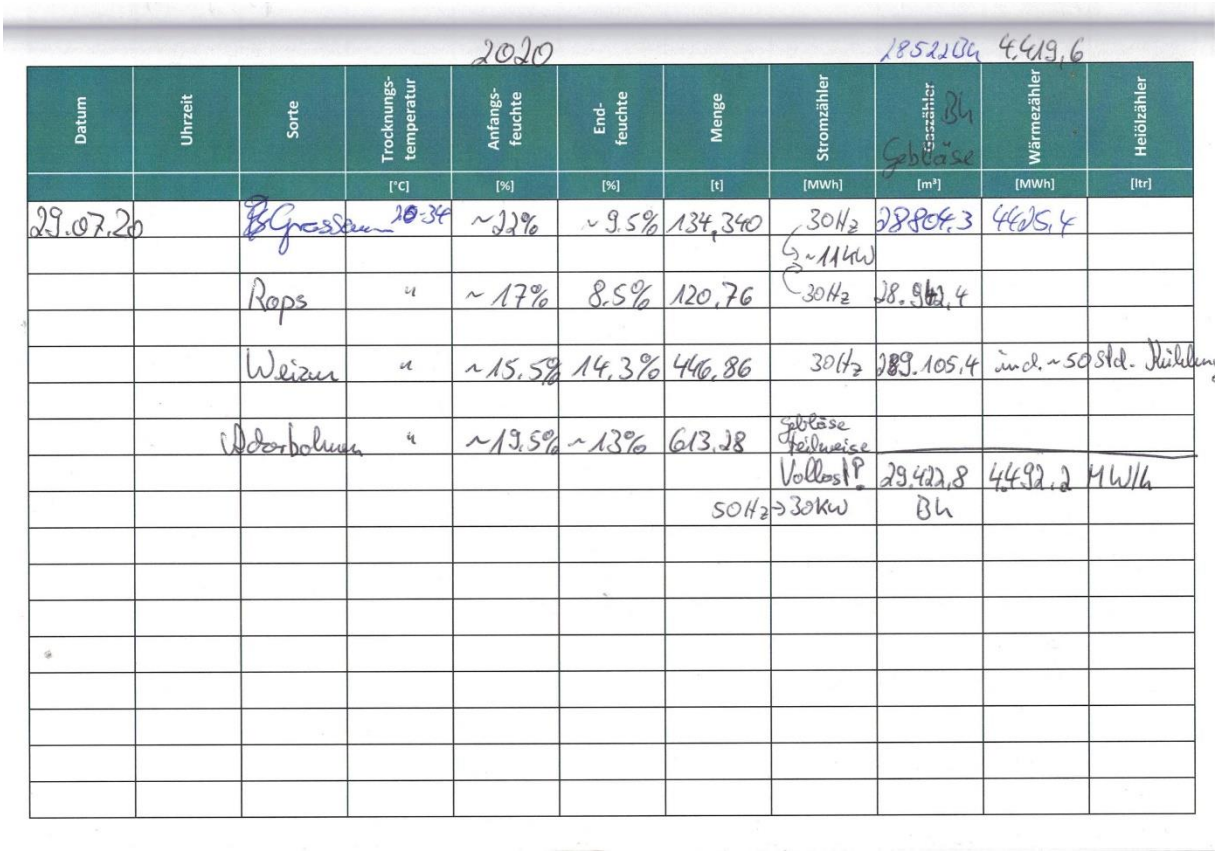
Diese Form der Trocknung ist relativ neu in Europa und findet nicht nur in Frühdruschgebieten seine Verbreitung. Bei den Rundsilos, die zur Lagerbelüftungstrocknung genutzt werden, handelt es sich um bauchige Bauformen mit Vollbelüftungsboden. Üblicherweise werden diese Silos konzeptionell mit mobiler Fördertechnik beschickt. Am Silodom ist eine passiv durch den Getreidestrom angetriebene Verteilung vorgesehen, die die Gutfeuchte auf maximal 18–19 % limitiert. Feuchteres Erntegut würde auf den Schurren nicht mehr richtig rutschen, eine Kegelbildung wäre die Folge. Lagerbelüftungstrocknungen benötigen für einen gleichmäßigen Luftfluss einen eingeebneten Getreidestapel. Auch bei dieser Art der Lagerbelüftungstrocknung werden je % Feuchtigkeitsentzug 15 Kubikmeter Luft pro Kubikmeter Getreide und Stunde benötigt. Die Lagerhöhe beträgt bei hohen Getreidefeuchtigkeiten maximal 6,5 m. Der Strömungswiderstand der Lagergüter sorgt für die notwendige Anwärmung, damit verbunden die Absenkung der relativen Luftfeuchtigkeit zur Erzielung der Gleichgewichtsfeuchte. Die Lagerbelüftungstrocknung im Rundsilo arbeitet weitestgehend mit Frischluft. Unter gewissen Witterungsbedingungen (zu hohe Außenluftfeuchtigkeit) kann es dazu kommen, dass das Feuchtegleichgewicht nicht erreicht werden kann. Dann muss die Trocknungsluft extern um bis zu 5° K angeheizt werden. Dies geschieht üblicherweise durch eine direkte Befeuerung mit Propangas. Indirekte Befeuerung ist technisch jedoch auch umsetzbar. Üblicherweise beträgt die Laufzeit des Brenners 3–8 % der Gebläselaufzeit. Das Sättigungsdefizit beträgt gut 1 g/m³ Luft. Die Trocknungszeit liegt je nach Feuchteentzug bei etwa 14–21 Tagen. Der spezifische Energiebedarf beträgt etwa 0,6–0,8 kWh pro kg entzogenes Wasser.

3. Ergebnisse

Nachfolgend werden die betriebsindividuellen Trocknungsdaten analysiert und bewertet.

3.1. Trocknungsdaten

Für die Erfassung der notwendigen Erntedaten hat das RKL ein angepasstes Trocknungstagebuch an die teilnehmenden Betriebe herausgegeben (Abbildung 13).



Datum	Uhrzeit	Sorte	Trocknungs-temperatur	Anfangs-feuchte	End-feuchte	Menge	Stromzähler	Gebläse Betriebsstunden	Wärmezähler	Heiölzähler
			[°C]	[%]	[%]	[t]	[MWh]	[m³]	[MWh]	[ltr]
29.07.20		Grassaat	10-34	~22%	~9.5%	134,340	30Hz	28804,3	4405,4	
							~114kW			
		Raps	"	~17%	8.5%	120,76	30Hz	28.942,4		
		Weizen	"	~15.5%	14,3%	446,86	30Hz	289.105,4	inkl. ~50	Std. Kühlen
		Winterraps	"	~19.5%	~13%	613,28	Gebläse teilweise			
							Volllast!	29.422,8	4492,2	4 kWh
						50Hz → 30kW		Bh		

Abbildung 13: Trocknungstagebuch aus dem Erntejahr 2020

Dieses Trocknungstagebuch erfasst alle notwendigen Angaben, die für die Analyse der Erntedaten notwendig sind. Allerdings sind die erhaltenen Datensätze nur so individuell, wie die am Betrieb vorhandenen Trocknungsanlagen. Analysiert wurden verschiedene Trocknungssysteme wie: Lagerbelüftungstrocknung, Silotrockner und Durchlauftrockner. Um eine Vergleichbarkeit der Trocknungssysteme zu erhalten, wurde Weizen als Referenzfrucht gewählt und das Energieeffizienzkriterium auf kWh/l H_20 (spezifischer Energieeinsatz) festgelegt. Analysiert wurde, wieviel Energie (in kWh) aufgewendet werden musste, um dem Erntegut einen Liter H_20 zu entziehen. Im DLG Merkblatt 425 aus 5/2018 „Getreide sicher lagern“ wurden die Referenzwerte für die einzelnen Trocknungssysteme erarbeitet. Der spezifische Energieeinsatz in kWh/kg_{H20} unterscheidet sich deutlich

zwischen den Trocknungssystemen. So liegt der spezifische Energieeinsatz bei Durchlauftrocknern bei 0,99–1,65 kWh/kg_{H20}, bei Silotrocknern bei 1,34–1,8 kWh/kg_{H20} und bei der Lagerbelüftungstrocknung bei 0,6-0,8 kWh/kg_{H20}.

Der Betrachtungszeitraum für die Erntedaten sind die Jahre 2019 und 2020, die sich durch anhaltende Trockenheit auszeichnen. Der durchschnittliche Trocknungsbedarf in Schleswig–Holstein liegt bei 75 %. Durch die zwei aufeinanderfolgenden, sehr trockenen Ernten ist der durchschnittliche Trocknungsbedarf gesunken.

Im Erntejahr 2019 wurden Durchlauftrockner, Silosatztrockner und Lagerbelüftungstrocknungen untersucht (Tabelle 9). Als Energieträger zum Trocknen des Erntegutes wurden Heizöl, Flüssiggas, Strom und KWK-Wärme (KWK = Kraft-Wärme-Kopplung) aus einer Biogasanlage genutzt. Alle Energieträger wurden auf die Bezugsgröße kWh umgerechnet. Die Primärenergie in einem Liter Heizöl beträgt 9,98 kWh, bei Flüssiggas 6,57 kWh/l.

In Kapitel 3 sind die einzelnen Trocknungssysteme in ihrer Funktionsweise beschrieben. Bei gleichen Trocknungssystemen verschiedener Hersteller wurden diese individuell in ihrer Bauweise angepasst, da die gegebenen Rahmbedingungen der Betriebe unterschiedlich sind. Die untersuchten Trocknungsanlagen sind je nach Anschaffungszeitpunkt (1978-2011) mehr oder weniger fortschrittlich. Der deutlichste Unterschied im technischen Fortschritt liegt in der Steuerungstechnik. Nicht jede Trocknungsanlage kann wichtige Daten wie Wiegemengen, Temperaturen und Feuchte- bzw. Trockengehalte ausgeben.

Wie in Tabelle 9 ersichtlich, haben gleiche Trocknungssysteme unterschiedliche spezifische Energieeinsätze. In Betrachtung befinden sich drei Durchlauftrockner (DLT), ein Silotrockner (ST) und vier Lagerbelüftungstrocknungen (LBT). In der Tabelle werden die unterschiedlichen Trocknungssysteme untereinander verglichen. Als Referenz dienen die Kennzahlen aus dem DLG Merkblatt 425. Wie zu erkennen ist, liegt der spezifische Energieeinsatz bei den Durchlauftrocknern im Mittel bei ca. 2,17 kWh/kg H_2O. Der Referenzwert liegt bei 1,65 kWh/kg H_2O, was eine Differenz bei ca. 0,5 kWh/kg H_2O ausmacht. Das bedeutet, dass die untersuchten Durchlauftrockner aus dem Forschungsprojekt nicht so effizient sind wie die, die von der DLG getestet wurden. Im Weiteren wurde die Effizienz der Lagerbelüftungstrocknung betrachtet. Bei diesem Trocknungssystem gibt die DLG-einen Richtwert von 0,80 kWh/kg H_2O an. Die analysierten Lagerbelüftungstrocknungen haben einen spezifischen Energieeinsatz im Mittel von ca. 1,79 kWh/kg H_2O. Der spezifische Energieeinsatz, der in der Praxis angewendet wird, übersteigt den Referenzwert der DLG um mehr als das Doppelte. Der ausgewertete Silosatztrockner hat einen spezifischen Energieeinsatz von 1,46 kWh/kg H_2O, der Referenzwert aus der Literatur gibt einen Verbrauch von 2 kWh/kg H_2O vor. Damit ist der auswertete Silosatztrockner wesentlich effizienter als der Referenzwert.

Tabelle 9: Auswertung der Trocknungsdaten aus dem Erntejahr 2019

		Gut Gelting	Gut Helmstorf	Jahnke	Lütje	Gut Toestorf	Bent Hansen	Dirk-Willi Hansen	Holsteiner Land und Marktfrucht KG
Trocknunssystem		DLT	DLT	DLT	ST	LBT	LBT	LBT	LBT
Energieträger		Heizöl	Heizöl	Heizöl	BGA Wärme	Flüssiggas	Wärme BGA	Flüssiggas	Strom
Verbrauch Energieträger	[kWh]	106.000	105.052	2.200	59.480	13.815	0	13.140	6.218
Stromverbrauch	[kWh]	5.346			972	24.680	4.890	1.980	
Energieverbrauch gesamt	**[kWh]**	**111.346**	**105.052**	**2.200**	**60.452**	**38.495**	**4.890**	**15.120**	**6.218**
Ertragsniveau Weizen	[t]	10	9,4	10	10	10	9,937	10	10
Weizentrocken [feucht]	[t]	1.709	3.045	31	1.230	1.302	515	450	1.480
Weizentrocken [trocken]	[t]	1.661	2.993	30	1.188	1.294	495	442	1.435
Wasserentzug	[t]	48	52	1	41	8	20	8	45
Wasserentzug	[l]	47.988	52.217	1.045	41.357	7.907	19.710	7.895	44.848
Wasserentzug	[%]	2,81	1,71	3,37	3,36	0,61	3,83	1,75	3,03
spezifischer Energieeinsatz	**kWh/l**	**2,320**	**2,012**	**2,105**	**1,462**	**4,868**	**0,248**	**1,915**	**0,139**
Referenzwert DLG	kWh/l	1,65	1,65	1,65	2,00	0,80	0,80	0,80	0,80
Differenz	**kWh/l**	**0,67**	**0,36**	**0,46**	**-0,54**	**4,07**	**-0,55**	**1,12**	**-0,66**
Fossiler Energieträger	[l]	11.135	10.505	220	60.452	5.859	489	2.301	6.218
Fossiler Energieträger Refer.	[l]	7.918	8.616	172	82.713	963	1.577	961	35.878
Energieträger Differenz	[l]	3.217	1.889	48	-22.261	4.896	-1.088	1.340	-29.660
Energieträger Differenz	[%]	29	18	22	-37	84	-222	58	-477
Kosten Energieträger	[€/l]	0,67	0,67	1,67	0,30	0,35	0,30	0,35	0,26
Kosten Energieträger	[€]	7.492	7.069	368	18.136	2.051	147	805	1.586
Kosten Energieträger Refer.	[€]	2.164	1.271	80	-6.678	1.714	-326	469	9.149
Kostendifferrenz	**[€]**	**3.217**	**1.889**	**48**	**-22.261**	**4.896**	**-1.088**	**1.340**	**-29.660**

Tabelle 10: Auswertung der Trocknungsdaten aus dem Erntejahr 2020

		Gut Gelting	Gut Helmstorf	Jahnke	Gut Emkendorf	Lütje	Gut Toestorf	Bent Hansen	Dirk-Willi Hansen	Holsteiner Land und Marktfrucht KG
Trocknunssystem		**DLT**	**DLT**	**DLT**	**DLT**	**ST**	**LBT**	**LBT**	**LBT**	**LBT**
Energieträger		**Heizöl**	**Heizöl**	**Heizöl**	**Flüssiggas**	**BGA Wärme**	**Flüssiggas**	**Wärme BGA**	**Flüssiggas**	**Strom**
Verbrauch Energieträger	[kWh]	**14.620**	**71.481**	**23.154**	**30.400**	**59.480**	**reines belüften**	**1.526**	**Es bestand kein Trocknungsbedarf**	
Stromverbrauch	[kWh]	**748**	**0**	**1.880**	**50.000**	**2.214**	**320**	**4.404**		
Energieverbrauch gesamt	**[kWh]**	**15.368**	**71.481**	**25.034**	**80.400**	**61.694**	**320**	**5.930**		
Ertragsniveau Weizen	[t]	9,5	9,4	10	10	10	10	9,937		
Weizentrocken [feucht]	[t]	1.805	2.798	340	1.388	1.188	698	447		
Weizentrocken [trocken]	[t]	1.777	2.764	328	1.346	1.144	694	441		
Wasserentzug	[t]	28	33	12	42	44	4	6		
Wasserentzug	[l]	27.528	33.143	11.974	41.961	44.443	4.063	6.257		
Wasserentzug	[%]	0	0	0	0	0	0	0		
spezifischer Energieeinsatz	**kWh/l**	**0,558**	**2,157**	**2,091**	**1,916**	**1,388**	**0,079**	**0,948**		
Referenzwert DLG	kWh/l	1,65	1,65	1,65	1,65	2,00	0,80	0,80		
Differenz	**kWh/l**	**1,09**	**-0,51**	**-0,44**	**-0,27**	**0,61**	**0,72**	**-0,15**		
Fossiler Energieträger	[l]	1.537	7.148	2.503	8.040	61.694	49	593		
Fossiler Energieträger Refer.	[l]	4.542	5.469	1.976	6.924	88.887	495	501		
Energieträger Differenz	[l]	-3.005	1.680	528	1.116	-27.193	-446	92		
Energieträger Differenz	[%]	-1,96	23,50	21,08	13,89	-44,08	-915,86	15,59		
Kosten Energieträger	[€/l]	0,67	0,67	1,67	1,67	0,30	0,35	0,30		
Kosten Energieträger	[€]	1.034	4.810	4.188	13.450	18.508	17	178		
Kosten Energieträger Refer.	[€]	-2.022	1.130	883	1.868	-8.158	-156	28		
Kostendifferrenz	**[€]**	**-3.005**	**1.680**	**528**	**1.116**	**-27.193**	**-446**	**92**		

3.2. Berechnung des spezifischen Energieaufwandes

Mit der Kennzahl Energieeffizienz oder auch spezifischer Energieeinsatz wird eine Vergleichsbasis für die einzelnen Trocknungssysteme geschaffen. Der spezifische Energieeinsatz wird in kWh/l ausgegeben. Dadurch wird angezeigt, wie viele Kilowattstunden (Energie) benötigt werden, um einen Liter Wasser aus dem jeweiligen Trocknungsgut herauszutrocknen. Im Folgenden wird an einem konkreten Bespiel der Berechnungsweg aufgezeigt:

$$spezifische\ Energieeinsatz = \frac{Energieeinsatz\ [kWh]}{Wassermasse\ [l]}$$

$$m_W = Wassermasse\ [kg]$$

$$E = Energieeinsatz\ [kWh]$$

$$E_\Sigma = \frac{E\ [kWh]}{m_W\ [l]}$$

Als ersten Berechnungsschritt muss die Wassermasse [m_W] (Gewichtsdifferenz zwischen Feucht- und Trockengut) errechnet werden:

$$m_W = Wassermasse\ [kg]$$

$$m_N = Trocknungsgutmenge\ [kg]$$

$$X_V = Anfangsfeuchte\ [\%]$$

$$X_N = Endfeuchte\ [\%]$$

$$Wasssermasse = \frac{(Anfangsfeuchte[\%] - Endfeuchte[\%])}{(100 - Endfeuchte\ [\%]} * Feuchtgut\ [t]$$

$$m_W = \left(\frac{X_V - X_N}{100 - X_N}\right) * m_N$$

Eingesetzt am Praxisbeispiel bedeutet das:

$$m_N = 148.000\ [kg]$$

$$X_V = 16{,}8\ [\%]$$

$$X_N = 14{,}2\ [\%]$$

$$m_W = \left(\frac{16{,}8\ - 14{,}2}{100 - 14{,}2}\right) * \ 148.000[kg]$$

$$m_W = 4.484\ [kg]$$

Für die weitere Berechnung wird nur die Energiemenge aus dem jeweiligen Energieträger (Heizöl, Erdgas oder Strom), der zum Trocknen genutzt wird, benötigt. Um die richtige Menge an kWh einsetzen zu können, müssen die jeweiligen Energieinhalte der fossilen Energieträger bekannt sein:

- 1 l Diesel = 9,9 kWh
- 1 l leichtes Heizöl = 9,8 kWh
- 1 l Flüssiggas = 6,57 kWh
- 1 kWh Strom = 1 kWh Strom

Der Betrieb aus diesem Beispiel nutz zum Trocknen des Erntegutes Strom als Energieträger. Verbraucht wurden 6.218 kWh. Werden die ermittelten Ergebnisse in die Formel eingesetzt, sieht dies wie folgt aus:

$$E_\Sigma = \frac{6.218}{44.848}$$

$$\boldsymbol{E_\Sigma = \ 0{,}139 \frac{kWh}{l}\ H_2O}$$

3.3. Bewertung der Energieeffizienzkennzahlen

Die Bewertung des spezifischen Energieeinsatzes lässt sich in drei Kategorien unterteilen:

- Betriebsindividuelle Datenerfassung
- Vergleichszahlen aus der Literatur
- Betriebsmanagement der Getreidetrocknungsanlage

Betriebsindividuelle Datenerfassung:

Zu Beginn des Projektes wurde an alle teilnehmenden landwirtschaftlichen Betriebe ein standardisiertes Trocknungsbuch herausgegeben. Es stellte sich heraus, dass die doppelte Aufzeichnung (betriebseigene- und Projektaufzeichnungen) schwierig war, so dass die Projektaufzeichnungen etwas stiefmütterlich behandelt wurden. Die betriebseigenen Daten wurden dann für die Auswertung als Gegenkontrolle herangezogen. Die Analyse der betriebseigenen Daten hat ergeben, dass gleiche Trocknungssysteme mit ähnlicher Ausstattung völlig unterschiedliche spezifische Energieeinsätze vorweisen. Diese Unterschiede im spezifischen Energieeinsatz können verschiedenste Gründe haben, so zum Bespiel Standorteigenschaften, Erntefeuchtigkeiten, Sortenunterschiede, eingesetzte Energieträger, technische Ausstattung uvm.. Berücksichtigt werden muss auch das Jahr der Inbetriebnahme der Getreidetrocknungsanlage. Wenn zwischen der Inbetriebnahme gleicher Trocknungssysteme (z.B. Durchlauftrockner) 10–15 Jahre liegen, kann die technische Ausstattung nicht identisch sein. Messeinrichtungen wurden zunehmend genauer, Elevatoren sind anders ausgelegt und auch das Förderwegekonzept hat sich weiterentwickelt.

Vergleichszahlen aus der Literatur (DLG – Merkblatt 425)

Die für den Vergleich genutzten Kennzahlen oder Referenzwerte stammen aus dem DLG-Merkblatt 425. Diese Referenzwerte wurden von der BLE (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung) übernommen und als Richtwerte für den Eintritt in das Förderprogramm Energie-Effizienz in der Landwirtschaft als Maßgabe gesetzt. Für die Einordung dieser Kennzahlen fehlen einige Informationen. Es ist nicht bekannt, wie viele Getreidetrocknungsanlagen je Trocknungssystem betrachtet wurden und es fehlt die Information, wann diese Anlagen in Betrieb genommen wurden. Sind in der Auswertung nur „neuere“ Anlagen mit einer Inbetriebnahme bspw. seit dem Jahr 2000 enthalten oder auch Trocknungsanlagen, die aus den 1970er oder 1980er Jahren stammen? Anhand der spezifischen Energieeinsätze der Referenzwerte ist eher davon auszugehen, dass vor allem neuere Anlagen in den Referenzwerten enthalten sind. Obwohl diese Fragen aktuell unbeantwortet sind, sind es die einzigen zitier- und anwendbaren Referenzwerte in der Getreidetechnologie.

Betriebsmanagement der Getreidetrocknungsanlage

Das betriebliche Management kann nur so gut sein, wie die Technik es zulässt. Veraltete Technik, die vielleicht noch in einem schlechten Zustand ist, kann auch das beste Management nicht weiter optimieren. Die Getreideernte und die daraus resultierende Trocknung des Getreides ist eine intensive Arbeitsperiode, in der zeitgleich zahlreiche Vorgänge organisiert und abgestimmt werden müssen. Der Betriebsablauf des Trocknens ist mit verschiedenen Schwierigkeiten behaftet. Es fängt damit an, dass

häufig kein Wiegesystem auf dem Betrieb vorhanden ist oder nur ein sehr altes, das in den Trocknungsprozess mit eingebunden ist. Betriebe ohne Wiegesystem verlassen sich während der Ernte auf den Mähdrescher mit der Mengenerfassung und nach dem Trocknen auf den Landhandel. Wichtig ist auch zu wissen, wie feucht das Erntegut ist, da spielt die Art und Häufigkeit der Probennahme eine entscheidende Rolle. Auch die Technik der Förderwege ist oft überaltert (20–30 Jahre), so dass häufig nicht bekannt ist, wie groß die Förderleistung der Elevatoren ist. Im Trocknungsprozess selbst ist häufig nicht klar, ob wirklich die eingestellte Temperatur und die eingestellte Luftmenge am Trocknungsgut ankommt, weil Systeme entweder aus Arbeitsstress heraus nicht angepasst wurden oder keine Möglichkeit zur Einstellung vorhanden ist. Bei Brennern und Gebläsen sind die Leistungsdaten oft nicht nachvollziehbar, weil die Bauteile im An/Aus-Verfahren betrieben werden. Das bedeutet, dass immer die volle Leistung der Bauteile abgerufen wird, auch wenn diese nicht notwendig ist. Das führt zu unnötig hohem Energieverbrauch. Eine andere Problematik ist, dass der zuständige Mitarbeiter nicht nachvollziehen kann, was im Getreidesilo passiert, da eine ausreichende Messtechnik fehlt oder diese durch Nachrüstung so platziert ist, dass nur unzureichende Ergebnisse ausgegeben werden. So fehlt auch das Wissen darüber, ob genügend Luft im Getreidesilo das Getreide durchdringt und wieviel Wasser entzogen wird. Erst durch eine Differenzbetrachtung vom Erntegut zum Trockengut ergibt sich die Wassermasse. Wie weit die Trocknung des Getreides im Trocknungsprozess ist, kann dann nur durch eine Probennahme und sofortiger Analyse geschätzt werden.

Alle beschriebenen Probleme führen dazu, dass sich die Betriebsmittelkosten (Energie) auf einem Niveau befinden, das nicht notwendig wäre. Problematisch ist auch, wenn ein landwirtschaftlicher Betrieb mehr als nur eine Getreidetrocknung managen muss, wo auch noch unterschiedliche Trocknungssysteme aus unterschiedlichen Jahren und Qualitäten mit unterschiedlichen Energieträgen betrieben werden.

Dies soll nur einen Einblick in die vielfältige Problematik der Getreidetrocknung aufzeigen. Eine Getreidetrocknungsanlage in ihrer Vielfalt könnte man aus aktueller Sicht heraus auch als Blackbox bezeichnen.

3.4. Bewertung der Anreizsysteme

Die Anreizsysteme für landwirtschaftliche Investitionen, besonders im Rahmen für Getreidetrocknungsanlagen, sind eher kümmerlich. Ein Förderprogramm (Richtlinie zur Förderung der Energie-Effizienz und CO_2-Einsparung in der Landwirtschaft und Gartenbau; 2020) bietet die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Die Richtlinie wurde in 2020 überarbeitet, die neuste und gültige Fassung ist vom 18.09.2020.

In der Richtlinie vom 29.10.2018 und frühere Fassungen (Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Steigerung der Energie-Effizienz in der Landwirtschaft und im Gartenbau; 2018) bestanden drei Möglichkeiten zur Investition. Erstens die Investition in den Neubau einer Anlage, zweitens die systemische Optimierung (mit dieser konnte ein bestehendes System energetisch auf den Stand der Technik gebracht werden) und drittens die Einzelmaßnahme (mit dieser konnten spezielle Bauteile erneuert werden). Jede dieser Möglichkeiten wurde mit attraktiven Prozentsätzen gefördert. Voraussetzung zur Teilnahme an diesem Förderprogramm, zumindest in dem Themenbereich Neubau und systemischen Optimierung, musste ein Energiegutachten erstellt werden, das aufzeigt, welche Energieeinsparung gegenüber dem IST-Zustand möglich wäre. Die Bereiche der systemischen Optimierung und der Bereich der Einzelmaßnahme wurde mit pauschal 30 % der Nettoinvestitionssumme gefördert. Voraussetzung hierbei war eine Mindest-Investition von 3.000 € bei Einzelmaßnehmen und 7.000 € bei systemischen Optimierungen.

Wurde durch den Neubau einer Anlage eine Energieersparnis von 60 % erzielt, standen dem Landwirt eine Förderung von 40 % der Nettoinvestitionssumme zu. Bei 50 % Energieersparnis standen dem Landwirt noch 30 % Förderung zu und bei 40 % Ersparnis erhielt der Landwirt noch 20 % Förderung.

Nach der Richtlinie zur Förderung der Energie Effizienz und CO_2-Einsparung in der Landwirtschaft und Gartenbau vom 18.09.2020 ist für den Erhalt der Förderung im Bereich des Neubaus oder der systemischen Optimierung weiterhin ein Energiegutachten notwendig. In diesem CO_2–Einsparkonzept ist die Energieeffizienz nicht mehr ausschlaggebend. Die Fördergröße ist jetzt eine betriebliche CO_2–Einsparung. Das CO_2–Einsparkonzept ist nicht mehr auf den Bereich fixiert, in dem investiert werden soll, sondern die gesamten Energieströme des landwirtschaftlichen Betriebes müssen nun bilanziert und in CO_2 umgerechnet werden. In dem Bereich, in dem dann investiert werden soll, muss ein IST-SOLL Vergleich gemacht werden, aus dem die zukünftige CO_2–Ersparnis errechnet wird. Danach erhält der landwirtschaftliche Betrieb einmalig 700 €/t CO_2. Bei Investitionen in Erneuerbare Energien, wie zum Beispiel in Photovoltaik-Anlagen, erhält der landwirtschaftliche Betriebe 800 €/t CO_2. Eine maximale Förderhöhe von 30 % der Nettoinvestitionskosten ist möglich.

Gemäß den Erfahrungen des RKL kann bei der Investition in eine Getreidetrocknungsanlage eine Ersparnis von 5–20 t CO_2 erzielt werden, was eine Förderung in Höhe von 3.500-14.000 € für den

landwirtschaftlichen Betrieb bedeuten würde. Bei der Höhe der Gesamtinvestition ist dies kein Anreiz für den Betrieb.

Ein ähnliches Förderprogramm wurde durch die BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle; 2020) aufgelegt. Die Rahmenbedingungen und die Förderhöhe sind nahezu identisch zu der neuen Förderrichtlinie des BLE. So ist hier auch kein Anreiz für eine Investition zu finden.

Derzeit ist festzustellen, dass es Förderprogramme für die Landwirtschaft gibt und man auch an die Förderungen kommen kann. Allerdings ist die Förderhöhe in Bezug auf die Investitionssumme unattraktiv, was keinen Anreiz für Investitionen in der Landwirtschaft bietet.

3.5. Bewertung der gemessenen Energie / des CO_2 Verbrauches

Die ausgewerteten Anlagen sind überwiegend nicht energieeffizient, da diese meist zwischen 15 und 30 Jahre alt sind. Somit besteht ein dringender Investitionsbedarf in effiziente Technik. Um den Einblick in die Energieverbräuche zu vertiefen, wurden die Besonderen Ernte Ermittlungen vom BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) der letzten 20 Jahre ausgewertet. In der weiterführenden Analyse befinden sich fünf Kulturarten (Winterweizen, Winter- Sommergerste, Roggen und Raps) und drei Trocknungssysteme (Silotrockner, Lagerbelüftungstrocknung und Durchlauftrockner). Die Klimaziele der Bundesregierung beziehen sich auf die Einsparung von Kohlstoffdioxid. Die Ergebnisse der folgenden Auswertung beziehen sich auch auf die Einsparung von CO_2. Innerhalb der Auswertung wurde deutlich, dass der Silotrockner eine Sonderform der Trocknung darstellt. Aufgrund nicht plausibler Ergebnisse wurde der Silotrockner in der weiteren Betrachtung nicht mehr berücksichtigt. In Schleswig–Holstein wurden im Durchschnitt der letzten 20 Jahre (2000 - 2019) folgende Getreidemengen geerntet:

- Winterweizen 1.765.290 t
- Wintergerste 476.925 t
- Sommergerste 50.455 t
- Roggen 166.475 t
- Winterraps 381.233 t

Um diese Getreide- und Ölsaatenmenge auf handelsfähige Trockengehalte zu bringen, müssen dem Korn ca. 32.210 t/H_2O entzogen werden. Kumuliert und gewichtet müssen für diesen Wasserentzug die spezifischen Energieeinsätze aus den Trocknungssystemen Lagerbelüftungstrocknung und Durchlauftrockner 1,82 kWh Energie aufgewendet werden, um 1 kg Wasser zu entziehen. Das macht eine Gesamt-Energiemenge von 58.636.992 kWh aus. Würden die Getreidetrocknungsanlagen wenigstens so effizient sein, wie es in der Literatur dargestellt wird, müssten die Trocknungsanlagen lediglich unter gleichen Annahmen und Bedingungen 1,28 kWh/kg H_2O aufwenden. Diese

Trocknungsanlagen würden dann eine Energiemenge von 41.243.358 kWh benötigen, was bereits eine Energieersparnis von ca. 30 % ausmachen würde.

Nach der Untersuchung beziehungsweise der Auswertung kann ausgeschlossen werden, dass sich die schlechte Effizienz als Jahreseffekt darstellt. Die zuletzt getroffenen Aussagen beziehen sich auf einen 20-jährigen Durchschnitt.

Die Tabelle 11 zeigt die beiden ausgewerteten Trocknungssysteme Durchlauftrockner (DLT) und Lagerbelüftungstrocknung (LBT) in Bezug auf die CO_2-Emissionen und das mögliche Einsparpotenzial. Die LBT wurde für die Betrachtung nochmals in zwei Systeme unterteilt. System 1 wird mit Heizöl und Strom im Verhältnis 90 zu 10 betrieben, während das zweite System nur mit Strom betrieben wird. In Bezug auf den spezifischen Energieeinsatz hat diese Aufteilung keinen Einfluss. Eine erhebliche Bewandtnis bekommt diese Aufteilung bei der Betrachtung auf CO_2–Basis. Die ausschlaggebende Rolle ist der CO_2–Footprint von Heizöl und Strom. Gemäß dem Umwelt-Bundesamt für Mensch und Umwelt beträgt der Umrechnungsfaktor (CO_2–Äquivalent) für leichtes Heizöl 0,294 und für Strom 0,537. Das bedeutet für die Betrachtung, dass die LBT die nur mit Heizöl und Strom betrieben wird, gegen der LBT die ausschließlich mit Strom betrieben wird, einen wesentlichen CO_2-Vorteil hat. Die Empfehlung, die hieraus abgeleitet werden kann, ist, dass die LBT nie ausschließlich mit Strom betrieben werden sollte. Für das durchschnittliche Erntejahr werden in der Praxis ca. 15.500 t CO_2 emittiert. Würden nur die Referenzwerte aus der Literatur erreicht werden, bedeutet dies eine Ersparnis von ca. 24 % gegenüber der Praxis. Im Bereich der Lagerbelüftungstrocknung ist ein enormes Einsparpotenzial vorhanden. Dieses besteht darin, dass die LBT auf die Effizienz der Literaturwerte gebracht werden muss. Hinzu kommt, dass die Anlagen als Systemkopplung (Einsatz von Heizöl und Strom in Verhältnis 90 zu 10) betrieben werden sollten.

Tabelle 11: CO_2 Emissionen und Einsparpotenzial in Schleswig-Holstein

Kulturart	Trocknungssystem	t CO_2 Emission [Ø Praxis letzten 20 Jahre]	t CO_2 Emission [Ø Referenz letzten 20 Jahre]	t CO_2 Emission [Einsparpotential]	Einspar-potenzial [%]
Weizen	DLT	12 472	9 484	2 989	
Wintergerste	DLT	1 350	1 027	324	
Sommergerste	DLT	280	213	67	
Raps	DLT	406	309	97	
Roggen	DLT	983	748	236	
Summe		**15 492**	**11 780**	**3 712**	**24**
Kulturart	**Trocknungssystem**	**t CO_2 Emission [Ø Praxis letzten 20 Jahre]**	**t CO_2 Emission [Ø Referenz letzten 20 Jahre]**	**t CO_2 Emission [Einsparpotential]**	**Einspar-potenzial [%]**
Winterweizen	LBT	11 717	4 384	7 333	
Wintergerste	LBT	1 269	475	794	
Sommergerste	LBT	263	98	164	
Raps	LBT	381	143	239	
Roggen	LBT	924	346	578	
Summe		**14 553**	**5 445**	**9 108**	**63**

Die Ersparnis, die in Tabelle 11 dargestellt ist, beträgt insgesamt 12.820 t CO_2/Jahr. Um einen Bezug für die Größe dieser Einsparung zu bekommen, wird die Höhe der Einsparung in Bezug zu einem Vier-Personen-Haushalt gebracht. Ein Vier-Personen-Haushalt im Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von ca. 150 m² mit Ölheizung verbraucht ca. 3.000 l Heizöl (30.000 kWh / 8,2 t CO_2) und ca. 4.000 kWh Strom bzw. 2,1 t CO_2, was einen Energieverbrauch von 34.000 kWh/Jahr bzw. 10,3 t CO_2 darstellt. Die Höhe der möglichen Einsparung von der Praxis zur Literatur beträgt ca. 1.244 Vier-Personen-Haushalte in Schleswig-Holstein pro Jahr.

Kernaussagen:

1. Die Getreidetrocknungsanlagen sind in Bezug auf die Energie-Effizienz wesentlich schlechter als erwartet.
2. Von der Praxis bis hin zu den Literaturwerten (DLG-Merkblatt 425) ausgehend besteht ein Einsparpotenzial von mindestens 30 %.
3. Im besten Fall ist der energetische Verbrauch von 1 kWh/kg H_2O möglich, was ein weiteres Einsparpotenzial von 70 % in Bezug auf den Literaturwert bedeutet.
4. Die ausgewerteten Daten sind kein Jahreseffekt, sondern bilden den Durchschnitt der letzten 20 Jahre. Innerhalb dieser Jahre gab es Ausreißer-Jahre, die extrem nass waren sowie Jahre, die extrem trocken waren und es in diesen keinen Trocknungsbedarf gab.

5. In Schleswig-Holstein werden in der Praxis jährlich ca. 14.000–15.000 t CO_2 bei LBT und DLT emittiert. Ein Vier-Personen-Haushalt mit einer Wohnfläche von ca. 150 m² und einer Ölheizung (Bj. 2000) verbraucht ca. 3.000 l Heizöl und 4.000 kWh Strom, was eine CO_2–Emission von 10,3 t/Jahr ergibt. Die in Schleswig-Holstein imitierten Tonnen CO_2 entsprechen etwa 1.277–1.368 Vier-Personen-Haushalten.

4. Lösungsansätze für die Praxis

Wie bereits angedeutet, gibt es keine Getreidetrocknung von der Stange. Jede Getreidetrocknung ist individuell auf die Bedürfnisse des landwirtschaftlichen Betriebes angepasst. Einen generellen Lösungsansatz, der alle Probleme löst, gibt es nicht. Die Lösungsansätze für die aufgezeigten Probleme in der Getreidetrocknungsanlage sind immer eine Kombination aus betrieblichem Management und technischer Investition. Die Investition in eine Fuhrwerkswaage würde schon einige Klarheit in die Getreidetrocknung bringen. Die Erntemengenerfassung wäre wesentlich genauer. Hinzu kommt, dass Getreide, das vermarktet werden soll, nicht erst am Landhandel gewogen wird, sondern auf dem eigenen Betrieb. Somit besteht eine Gegenkontrolle zum Landhandel. Durch das genaue Wissen über die Menge der vermarktungsfähigen Ware könnte ein besserer Vermarktungserlös erzielt werden. Der Einsatz einer Fuhrwerkswaage ist äußerst variabel. Liefermengen können kontrolliert und Gespanne auf ihr zulässiges Gesamtgewicht kontrolliert werden.

Eine weitere technische Möglichkeit ist die Investition in Messtechnik für die Feuchteerkennung während des Trocknungsprozesses. Hierfür kommen drei unterschiedliche Messmethoden in Frage:

- Mikrowellenresonanz der Firma Tews
- Kapazitive Messung der Firma Liebherr
- Kabelradar-Technik der Firma Trime–GW

Im Folgenden werden die einzelnen Messverfahren beschrieben.

Zur Ermittlung von Produktfeuchten bedient man sich in der Landwirtschaft und vor allem in der Industrie dem dielektrischen Messprinzip. Gemessen wird hierbei die Dielektrizitätskonstante (DK) eines Materials über ein elektromagnetisches Hochfrequenzfeld, welches das zu messende Gut durchdringt. Die DK von Wasser hat bei 20°C einen Wert von 80 und unterscheidet sich damit von der DK von Feststoffen, die je nach Material einen DK-Wert von 2–30 aufweisen. Bei diesem starken dielektrischen Kontrast kann die DK somit als Maß für den Wassergehalt bzw. die Materialfeuchte herangezogen werden. Die DK von trockenem Getreide liegt bei 2 (KTBL-Arbeitsblatt Nr. 0130/1974).

Kapazitives Messverfahren

Bei diesem Messprinzip (Abbildung 14) wird ein hochfrequentes Messsignal zwischen 5 MHz und 80 MHz mittels Stab- oder Plattenkondensator erzeugt (Abb. 14). Das elektromagnetische Hochfrequenzfeld durchdringt das Produkt und die Dielektrizitätskonstante bzw. die Kapazität des Materials wird ermittelt. Die DK wird aber in diesem Frequenzbereich teils durch nahezu gleiche Anteile vom Wassergehalt (Realteil) und vom Mineraliengehalt und Temperatur (Imaginärteil) beeinflusst. Eine Trennung der Einflussgrößen ist nicht möglich. Daher ist eine präzise Feuchtemessung unter Störgrößen wie Temperatur und Mineralgehalt schwer möglich.

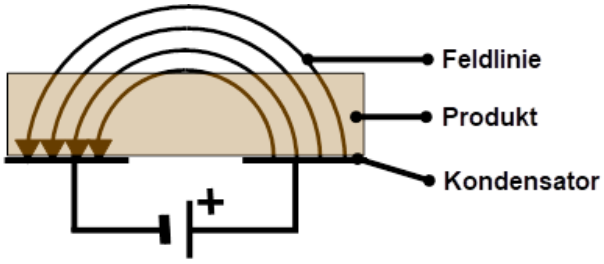


Abbildung 14: Funktionsprinzip des kapazitiven Messverfahrens

Mikrowellenresonanzmethode

Das Mikrowellen-Resonatorverfahren ist ein Feuchtemessverfahren, das mit elektromagnetischen Feldern arbeitet. Als Sensoren kommen entweder Hohlraumresonatoren oder Streufeldresonatoren zum Einsatz. Die jeweilige zur Messung benutzte Resonanz wird durch zwei Parameter charakterisiert, die Resonanzfrequenz und die Halbwertsbreite der Resonanzkurve (Abbildung 15).

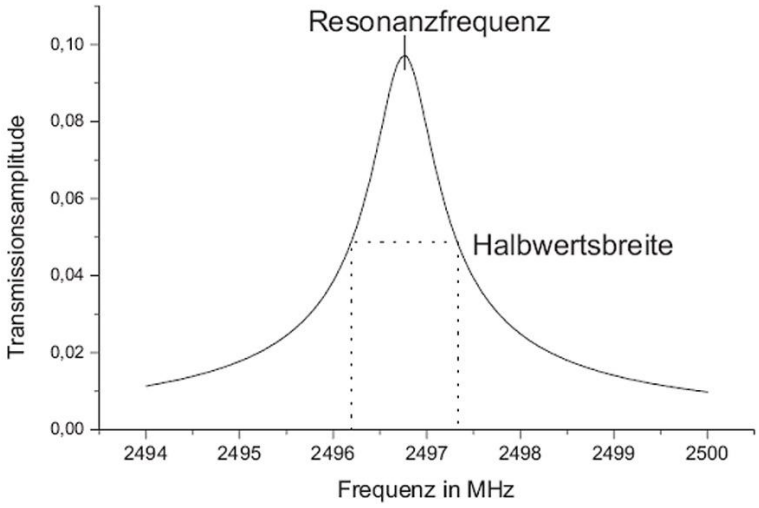


Abbildung 15: Resonanzkurve der Mikrowellenresonanzmethode

Wird ein Messgut in den Resonator eingebracht, bzw. bei Streufeldresonatoren mit dem Resonator in Kontakt gebracht, sinkt die Resonanzfrequenz und gleichzeitig nimmt die Halbwertsbreite der Resonanzkurve zu. Bei jeder Messung wird die Veränderung dieser beiden Resonanzparameter bei Belastung des Resonators mit Messgut gemessen. Die Veränderung beider gemessener Parameter ist in gleicher Weise abhängig von der Masse des Messgutes, jedoch in unterschiedlicher Weise von der Messgutfeuchte. Der Quotient der beiden Messgrößen ist deshalb nur abhängig von der Messgutfeuchte. Dieser Quotient ist also ein geeigneter Wert zur dichte- und masseunabhängigen Feuchtemessung. Da die Messung der Veränderung der beiden Resonanzparameter (Resonanzfrequenz und Halbwertsbreite) masseabhängig ist, kann bei Messgütern, die homogen bzgl. ihrer Dichte sind, eine Dichtemessung über einen der beiden Resonanzparameter erfolgen.

Der Unterschied zum kapazitiven Messverfahren besteht in der Verwendung der hohen Messfrequenz. Bei genügend hoher Messfrequenz können im Messgut gelöste Salze und Mineralstoffe dem Wechselfeld nicht folgen, das Messergebnis wird also nicht durch eine Ionenleitung beeinflusst. Da beim Mikrowellen - Resonatorverfahren eine Messung zweier Parameter erfolgt, kann eine dichteunabhängige Feuchtemessung realisiert werden. Diese ist unabhängig vom Mineralstoffgehalt des Messgutes und somit, z.B. im Fall von landwirtschaftlichen Produkten, vom Anbaugebiet. Beim kapazitiven Messverfahren ist dagegen eine dichteunabhängige Feuchtemessung nicht möglich. Bedingt durch die vom Mineralstoffgehalt abhängende Ionenleitung kommt es zu einer ausgeprägten Sortenabhängigkeit der jeweiligen Messwerte.

Time Domain Refectometry (TDR)

Das TDR-Messprinzip (Time-Domain-Reflectometry, auch Kabelradar genannt) hat sich in den letzten 10 Jahren als präzises Messverfahren für anspruchsvolle Anwendungen etabliert. Bei der TDR-Technologie kommen zwei- oder dreiadrige, parallele Wellenleiter (als eigentlicher Sensor) zum Einsatz, die in Form von Stäben oder Platten in das zu untersuchende Material eingebracht werden. Es wird ein Spannungssprung angelegt, der sich entlang eines Koaxialkabels ausbreitet, das an die Wellenleiter angeschlossen ist. Geht der Spannungssprung an den Sensor über, kommt es zu einer Teilreflexion. Der weiterlaufende Teil wird am Sensorende vollständig reflektiert. Die Sprungantwort eines Wellenleiters lässt sich über den Zeitbereich messen, wobei die Reflexionszeit das Maß für den Wassergehalt ist. Grundlage für die Anwendung der TDR zur Feuchtemessung bildet folgender physikalischer Zusammenhang:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}$$

Demnach ist die Geschwindigkeit c einer elektromagnetischen Welle im Vakuum gleich der Lichtgeschwindigkeit c_0. Außerhalb des Vakuums ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit c nur von der Dielektrizitätskonstante ε_r und der magnetischen Durchlässigkeit μ_r des Materials, in dem sich die Welle ausbreitet, abhängig. Letztere kann in nichtmagnetischen Materialien gleich 1 gesetzt werden, so dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit nur von der Dielektrizitätszahl abhängig ist.

Die Herausforderung bei der TDR-Messung liegt in der sehr kurzen Laufzeit der elektromagnetischen Welle auf dem Sensor, so dass für die Messung sehr kurzzeitige und steilflankige Impulse (Anstiegszeit < 300 Picosekunden (ps) = 10-12 s) nötig sind. Am Beispiel einer 15 cm langen TDR-Messsonde (l = 15 cm) errechnet sich die Laufzeit in Luft t_l mit einer DK von 1 und die Laufzeit in Wasser t_w mit DK = 1 folgendermaßen:

$$t = \frac{2l}{c_0} \cdot \sqrt{\varepsilon_r}$$

$$t_l = \frac{0{,}3m}{3 \cdot 10^8 ms^{-1}} \cdot \sqrt{1} = 1ns$$

$$t_w = \frac{0{,}3m}{3 \cdot 10^8 ms^{-1}} \cdot \sqrt{81} = 9ns$$

Daraus ergibt sich eine Laufzeitdifferenz von nur 1–9 Nanosekunden (ns) zwischen den beiden Extremen 0 % und 100 % Feuchte. Um diese kleine Zeitdifferenz messtechnisch präzise erfassen zu können, sind elektronische Messvorrichtungen notwendig, die diesen Zeitbereich mit einer Genauigkeit von ±2x10-12 s (±2 Picosekunden) auflösen können.

Im Bereich der Energieeinsparung könnten Frequenzumrichter an energieintensiven Bauteilen wie Gebläsen oder Förderwegen verbaut werden. Ein Frequenzumrichter ist nichts anderes als ein Wechselrichter. Ein Wechselrichter ist ein Gerät, das die Drehzahl von Elektromotoren entsprechend dem tatsächlichen Bedarf der Anwendung regelt und so den Energieverbrauch des Motors um 20 bis 50 % senkt. Umrichter reduzieren die Leistung einer Anwendung, wie z. B. eines Gebläses, durch Regelung der Motordrehzahl, sodass sie nicht schneller läuft als notwendig. Viele Motoren sind überdimensioniert, um einen Spitzenbedarf abdecken zu können, der selten oder sogar niemals auftritt. Der Umrichter passt die Motordrehzahl an die tatsächlichen Anforderungen der Anwendung an. Hierdurch lässt sich häufig der Energieverbrauch um bis zu 50 % reduzieren, in manchen Fällen sogar mehr

Mit einem Frequenzumrichter läuft der Motor an dem für die Anwendung optimalen Betriebspunkt, sodass der Stromverbrauch exakt dem Bedarf entspricht und ein sanfter Anlauf sichergestellt wird. Hierdurch werden Energiekosten gesenkt und Stillstands-Zeiten verringert. Die weiteren Vorteile von Frequenzumrichtern sind:

- Die Genauigkeit der Prozessführung durch Regelung der Phasengeschwindigkeit lässt sich einstellen.
- Schutz des Motors und der Kabel vor Störungen
- Sanfter Anlauf und Stopp zur Verhinderung mechanischer Schäden
- Geringerer Wartungsaufwand durch Sanftanlauf
- Weiter Drehzahl-, Drehmoment- und Leistungsbereich für eine präzise Drehzahlregelung für optimierte Prozesse und verbesserte Produktqualität
- Der verbesserte Leistungsfaktor trägt zur Energieeffizienz bei
- Elektromagnetischer Schutz empfindlicher Einrichtungen vor Interferenzen
- Höhere Produktion dank einer angepassten Motordrehzahl

Betriebsmanagement

Das betriebliche Management, für das in der Regel der Betriebsleiter zuständig ist, umfasst eine Vielzahl von Aufgaben. Der Betriebsleiter ist ein sogenannter Allrounder, denn er muss die Übersicht über alle notwendigen Tätigkeiten haben, Personal führen können und auch die speziellen Prozesse jeder Tätigkeit verstehen.

Der Trocknungsprozess ist komplex und verlangt Wissen aus der Physik, Chemie und Biologie. Während des Trocknungsprozesses ergeben sich folgende Fragen:

- Wie nass ist das Erntegut?
- Welchen Trockengehalt soll das Erntegut nach dem Trocknungsprozess haben?
- Muss getrocknet werden oder reicht belüften?
- Wie viel Wasser muss aus dem Erntegut herausgetrocknet werden?
- Reicht die vorhandene Trocknerleistung aus oder werden zusätzliche Kapazitäten nötig?
- Wie viel Wasser wird bei welcher Trocknungstemperatur mit der Luft abtransportiert?
- Wie viel Luft [m^3] muss das Getreide durchströmen, um einen Trocknungseffekt zu erzielen?
- Welche Temperatur ist beim Trocknen maximal möglich, ohne das Korn zu beschädigen (Spannungsrisse im Korn, Verlust von Backqualitäten)?
- Wie lange dauert der Trocknungsprozess, um einen Prozent Feuchteentzug zu schaffen?

Die Erntefeuchte und später auch der Trockengehalt werden durch ein Trockensubstanz-Messgerät ermittelt. Das Messergebnis zeigt dann, ob ein Belüften der Ware ausreicht oder ob getrocknet werden muss.

Wieviel Wasser aus dem Erntegut entzogen werden muss, zeigt nachfolgende Berechnung

$$Wasssermasse = \frac{(Anfangsfeuchte[\%] - Endfeuchte[\%])}{(100 - Endfeuchte\ [\%]} * Feuchtgut\ [t]$$

Anhand der Referenzkennzahlen der DLG (spezifischer Energieeinsatz) für die verschiedenen Trocknungssysteme kann ermittelt werden, wieviel Energie (kWh) aufgewendet werden muss, um die errechnete Wassermasse trocknen zu können. Der Verbrauch der kWh kann dann mit der Leistung des Brenners aus der Trocknung verglichen werden. So bekommt der Betriebsleiter ein Gefühl dafür, ob die vorhandene Trocknungskapazität ausreicht. Dies ist eine berechnete Größe, die durch Umwelteinflüsse aber abweichen kann.

Die anfallende Wassermasse muss in Benutzungsfeuchte (Kondenswasser, Schwitzwasser, Tau und Niederschlag) und osmotische Feuchtigkeit (die Feuchtigkeit innerhalb des Korns) unterschieden werden. Die osmotische Feuchtigkeit muss während des Trocknungsprozesses dem Trocknungsgut entzogen werden.

Im betrieblichen Management muss vieles gleichzeitig entschieden werden, da die Arbeit innerhalb der Getreidetrocknungsanlage mit sehr viel Erfahrung und Bauchgefühl betrieben wird. Der Betriebsleiter benötigt tieferen bzw. spezielleren Einblick in die Getreidetrocknungsanlage, insbesondere in die physikalischen Prozesse, die für die Trocknung zwingend nötig sind. Diese Spezialkenntnisse kann der Betriebsleiter nur durch Fortbildung erlangen.

5. Schlussfolgerungen

Die Erhebung zeigt deutlich, dass die Getreidetrocknungsanlagen in Schleswig–Holstein sehr ineffizient in Bezug auf den spezifischen Energieeinsatz und der CO_2-Emission sind.

Die Trocknungssysteme könnten im Energieeinsatz von Praxis zum Literaturwert (DLG Merkblatt 425) ca. 30 % Energie einsparen. Bei nahezu jeder Getreidetrocknungsanlage besteht mehr oder weniger ein Investitionsbedarf. Der Investitionsbedarf erstreckt sich auf den Neubau des Trocknungssystems oder lediglich auf den Einbau von Messsensorik mit passender Steuerung mit Visualisierung. Leider besteht kein bzw. nur ein äußerst schlechtes Anreizsystem für Investitionen.

In Bezug auf die Gesellschaft bzw. aus Sicht eines Verbrauchers, der keinen Bezug zur Landwirtschaft hat, sind Getreidetrocknungsanlagen absolute Energieschleudern. Und sehr wahrscheinlich würde die Aussage hinzukommen, dass diese Anlagen abgeschaltet werden sollten, um Energie zu sparen. Es soll nur eine provokante Aussage bleiben. Denn eines ist klar, zur Nahrungsmittelsicherung benötigen wir alle die Landwirtschaft und die technischen Einrichtungen, die in dem Betriebszweig notwendig sind.

Hinzu kommt, dass das betriebliche Management der einzelnen Betriebszweige auf den landwirtschaftlichen Unternehmen sehr umfangreich ist. Der Betriebsleiter ist nicht immer in der Lage, jeden einzelnen Prozess zu 100 % zu verstehen und nachzuverfolgen, denn die Getreidetrocknung fordert sehr viel Wissen aus den naturwissenschaftlichen Bereichen der Physik, Chemie und Biologie. Weiterhin muss der Betriebsleiter bzw. der Verantwortliche der Getreidetrocknungsanlage ein sehr gutes technisches Verständnis besitzen, um die anfallenden Probleme in besonders alten Anlagen zu identifizieren, bewerten und reparieren zu können. Um den gesamten Prozess der Getreidetrocknung als Betriebsleiter durchblicken zu können, ist dieser auf regelmäßige Fort- und Weiterbildungen angewiesen. Alternativ könnten Arbeitskreise zum Thema Getreidetrocknung für einen direkten Austausch unter Berufskollegen ins Leben gerufen werden.

Auf den meisten landwirtschaftlichen Betrieben fehlt ein Wiegesystem, wie eine Radlastwaage oder eine Fuhrwerkswaage. Egal, welches System genutzt wird, erfüllt es seinen Zweck. Das Wiegesystem dient der Erfassung der Ernte- und der Trocknungsmenge, um den Masseverlust während des Trocknens zu identifizieren sowie der Vermarktungssicherheit. Der Landwirt weiß dann genau, welche Menge an Getreide vermarktet werden kann. Die Getreidetrocknung geschieht immer mehr dezentral, da sich der Landhandel immer mehr aus den kleineren ländlichen Strukturen zurückzieht. Die Konsequenz daraus ist, dass die Vermarktung ebenfalls dezentral geschehen muss, dazu gibt es verschiedene digitale Vermarktungsplattformen. Auch in diesem Bereich sind Fort- und Weiterbildungen sehr wichtig, da sich diese Vermarktungsform in Zukunft stärker etablieren wird.

Um die ermittelten Erkenntnisse zu festigen bzw. bestätigen zu können, müssen mehr Landwirte aus Schleswig–Holstein über einen längeren Zeitraum an diesem oder einem zukünftigen Forschungsprojekt teilnehmen. Die im Forschungsprojekt aufgedeckten Probleme und Schwierigkeiten sind in all ihrer Vielfalt im Zeitraum von zwei Jahren nur theoretisch lösbar, es können nur wichtige Ansätze zur Lösung aufgezeigt werden.

Im Rahmen dieser Studie konnte aufgrund der Pandemie seit März 2020 nur bedingt und im kleinen Kreis mit den Praktikern gearbeitet werden. Die Ergebnisse der Studie sollen zunächst vor allem in die Beratung bei Neubaumaßnahmen einfließen. Außerdem sind die Qualifizierung der angehenden Betriebsleiterinnen und Betriebsleiter bei BBZ, FH-Kiel und CAU-Kiel geplant.

6. Zusammenfassung

Die Zielstellung für dieses Projekt, die Energieverbräuche von Getreideanlagen unterschiedlicher Bauform zu erfassen und daraus ableitend Einsparpotentiale abzuleiten,m ist die wesentliche Aufgabe. Es wurden insgesamt 12 Getreideanlagen betrachtet, davon 5 Durchlauftrockner, 4 Lagerbelüftungstrocknungen und 3 Silotrockner. Der spezifische Energieeinsatz der betrachteten Anlagen lag bei 0,139 bis 4,868 kWh/kg im Jahr 2019. Im zweiten Untersuchungsjahr lag aufgrund der besseren Erntebedingungen bei zwei Anlagen kein Trocknungsbedarf vor, bei den anderen Anlagen betrug die Schwankung im spezifischen Energieeinsatz zwischen 0,079 und 2,157 kWh/kg Wasser. Dieser erhebliche Unterschied zwischen den Anlagentypen und den Betriebsergebnissen – bezogen auf den spezifischen Energieeinsatz – zeigt das große Potential bei den Getreideanlagen.

Die eigenen Datenerhebungen zeigen, dass ein Potential an Energieeinsparung von bis zu 30 % in normalen und bis zu 50 % in trockenen Jahren besteht. Es bleibt zu erwarten, dass auch in sehr nassen Erntejahren große Einsparpotentiale bestehen. Diese gilt es zukünftig in Qualifizierungsmaßnahmen mit den Anlagenbetreibern herauszuarbeiten und zusätzlich weitere Anlagen zu betrachten. Der Fokus sollte hierbei auf das Baujahr der Anlage gelegt werden, so dass eine Clusterung über das Lebensalter und die Bauart vorgenommen werden könnte. Die Bearbeiter der Studie regen an, dass ausgehend aus den Ergebnissen für Schleswig-Holstein eine umfangreichere Befragung/Datenerhebung durchzuführen ist. Außerdem kann ein Qualifikationsanspruch für die Betreiber der Anlagen als notwendig erachtet werden, um so die hinreichende Aus- und Weiterbildung beim RKL und der FH-Kiel zu erhalten und die Mängel im Management der Anlagen aufzuzeigen. Das erwartete Einsparpotential von 30 % an Energie lässt sich nach Ansicht der Autoren noch weiter steigern, indem das Anlagenmanagement durch zusätzliche Sensorik weiter verbessert wird.

Wir danken für die finanzielle Unterstützung seitens der EKSH.

7. Literaturverzeichnis

ALB-Hessen. (2001). *Getreide und Ölsaaten fachgerecht lagern und gesund erhalten; Bericht Nr. 70.* Hessen: ALB-Hessen.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Bafa). (2020). *: Nichtwohngebäude, Anlage und Systeme,.* https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieberatung/Nichtwohngebaeude_Anlagen_Systeme/Modul2_Energieberatung/modul2_energieberatung_node.html.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (2000 - 2019). *Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE).* Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (2018). *Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in der Landwirtschaft und im Gartenbau.* Bonn: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.

Deutscher Wetterdienst. (08 2020). *Climate Data Center*. Von https://cdc.dwd.de/portal/ abgerufen

Frisch J. (1986). *Getreidekonservierung und - lagerung;.* Münster-Hiltrup: KTBL Schrift 312.

Gengenbsch H., S. A. (2018). *Geteide sicher lagern - Reinigen, Trocknen und Kühlen DLG Merkblatt 425.* Frankfurt am Main: DLG e.V.

Isensee E.,Keiser H., Spreu A. (2013). *Getreidetrocknung - Hallenbuch: Trocknen, Fördern, Lagern.* Rendsburg: RKL e.K.

Maltry, W., Pötke, E., & Schneider, B. (1975). *Landwirtschaftliche Trocknungstechnik.* VEB Verlag Technik Berlin, 2. Auflage.

Münzig K. (kein Datum). *Bundesforschungsanstalt für Getreide und Kartoffelverarbeitung,.* Detmold: Bundesforschungsanstalt für Getreide und Kartoffelverarbeitung.

Schmidt, D. (2020). *Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO2-einsparung in der Landwirtschaft und Gartenbau Teil A - Landwirtschaftliche Erzeugung, Wissenstransfer.* Bonn: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.

Statistische Bundesamt (destatis). (2020). *Bevölkerung - Einwohnerzahl von Deutschland von 1990 bis 2019*. Von https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2861/umfrage/entwicklung-der-gesamtbevoelkerung-deutschlands/ abgerufen

Statistisches Bundesamt (destatis). (2020). *Einwohnerzahl in Schleswig-Holstein von 1960 bis 2019*. Von https://de.statista.com/statistik/daten/studie/155171/umfrage/entwicklung-der-bevoelkerung-von-schleswig-holstein-seit-1961/ abgerufen

Statistisches Bundesamt (destatis). (12. 5 2020). *Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz)Preise für leichtes Heizöl, Motorenbenzin und Dieselkraftstoff*. Von https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erzeugerpreisindex-gewerbliche-Produkte/Publikationen/Downloads-Erzeugerpreise/erzeugerpreise-preisreihe-heizoel-pdf-5612402.pdf;jsessionid=621F73ED8B319B507237F0CE73C30D42.live721?__blob=publicationFile abgerufen