

## Verbesserung der Heubergetechnik

### Improvement of hay processing

**FKZ: 12NA033**

**Projektnehmer:**

Universität Kassel, FB Ökologische Agrarwissenschaften

Fachgebiet Agrartechnik

Nordbahnhofstraße 1a, 37213 Witzenhausen

Tel.: +49 5542 98-1224

Fax: +49 5542 98-1520

E-Mail: [agrartechnik@uni-kassel.de](mailto:agrartechnik@uni-kassel.de)

Internet: [www.uni-kassel.de](http://www.uni-kassel.de)

**Autoren:**

Bohne, Björn; Hensel, Oliver

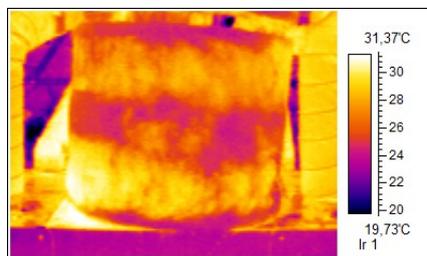
Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft.

Die inhaltliche Verantwortung für den vorliegenden Abschlussbericht inkl. aller erarbeiteten Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen liegt beim Autor / der Autorin / dem Autorenteam. Bis zum formellen Abschluss des Projektes in der Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft können sich noch Änderungen ergeben.

Schlussbericht

## Verbesserung der Heubergetechnik

Förderkennzeichen: 312-06.01-2812NA033



**Laufzeit: 15.04.2013 bis 31.08.2016**

Bohne, B.; Hensel, O.  
Universität Kassel  
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften  
Fachgebiet Agrartechnik  
Projektpartner: KTBL e.V., Darmstadt

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>4</b>
1.1	Gegenstand des Vorhabens . . . . .	4
1.2	Ziele des Projektes . . . . .	5
1.3	Aufgabenstellung des Projektes . . . . .	5
1.4	Planung und tatsächlicher Ablauf des Projektes . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde</b>	<b>7</b>
2.1	Problematik der Qualitätsheuerzeugung . . . . .	8
2.2	Heuwerbung . . . . .	9
2.3	Rundballen als Trocknungsgegenstand . . . . .	11
2.4	Grundlagen der Trocknung . . . . .	12
2.5	Anlagentypen für die Rundballentrocknung . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>16</b>
3.1	Versuchsstandort . . . . .	16
3.2	Witterungsbedingungen . . . . .	16
3.3	Beschreibung der Parzelle und des Halmgutes . . . . .	16
3.4	Grundsätzlich eingesetzte Technik . . . . .	19
3.5	Bröckelverluste in den einzelnen Verfahrensschritten . . . . .	19
3.6	Bröckelverluste und Querverteilung beim Kreiselzettwender . . . . .	20
3.7	Bröckelverluste über den Rechweg beim Schwader . . . . .	23
3.8	Schwadbeschaffenheit bei Zweikreisel- und Schubrechtschwader . . . . .	25
3.9	Pressen der Heurundballen . . . . .	25
3.10	Bestimmung der Ballendichte . . . . .	26
3.11	Trocknungsverlauf der Heurundballen . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Ausführliche Darstellung der Ergebnisse</b>	<b>30</b>
4.1	Trocknungsverlauf im Grüngut . . . . .	30
4.2	Bröckelverluste in den einzelnen Verfahrensschritten . . . . .	30
4.3	Bröckelverluste und Querverteilung beim Kreiselzettwender . . . . .	33
4.4	Bröckelverluste über den Rechweg beim Schwader . . . . .	36
4.5	Schwadbeschaffenheit bei Zweikreisel- und Schubrechtschwader . . . . .	37
4.6	Dichteverteilung in den Heurundballen . . . . .	40
4.7	Trocknungsverlauf der Heurundballen . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>54</b>
5.1	Bröckelverluste . . . . .	54

## *Inhaltsverzeichnis*

5.2 Schwadbeschaffenheit . . . . .	56
5.3 Dichteverteilung und Trocknungsverlauf der Heurundballen . . . . .	56
<b>6 Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse oder Anwendung der Ergebnisse für die Praxis und Beratung</b>	<b>58</b>
<b>7 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; Hinweise auf weiterführende Fragestellungen</b>	<b>60</b>
<b>8 Zusammenfassung</b>	<b>61</b>
<b>9 Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt (Printmedien, Newsletter usw.), bisherige und geplante Aktivitäten zur Verbreitung der Ergebnisse</b>	<b>63</b>
9.1 Studentische Projekt- und Abschlussarbeiten . . . . .	63
9.2 Vorträge . . . . .	64
9.3 Veröffentlichungen in Zeitschriften . . . . .	64
<b>10 Anhang</b>	<b>66</b>
10.1 Präsentationen und Vorträge . . . . .	66
10.1.1 1. Fachgespräch, 13. Dezember 2013 . . . . .	66
10.1.2 2. Fachgespräch, 11. Dezember 2015 . . . . .	92
10.2 Bilder . . . . .	130

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Die Prozesskette in der Heubereitung unter Berücksichtigung der Zielgrößen Trocknung und Verluste . . . . .	10
2.2	Übersicht der Heubelüftungsverfahren . . . . .	13
2.3	In Deutschland verfügbare Trocknungstechnik für Rundballen . . . . .	14
2.4	Übersicht der verschiedenen Luftzustände der Belüftungsluft . . . . .	15
3.1	Lage der Messpunkte bei der Bestimmung der Bröckelverluste beim Wenden . . . . .	20
3.2	Messbahn der Bröckelverlustmessung . . . . .	21
3.3	Lage der Mähswade im Versuch mit Variation der Fahrgeschwindigkeit	22
3.4	Lage der Mähswade in der Variante 1 . . . . .	23
3.5	Lage der Mähswade in der Variante 2 . . . . .	23
3.6	Lage der Mähswade in der Variante 3 . . . . .	23
3.7	Anlage der Messpunkte beim CLAAS Liner 2900 . . . . .	24
3.8	Anlage der Messpunkte beim ELHO V-Twin 750 . . . . .	24
3.9	Profil der mit dem ELHO Schubrechsneider erzeugten Schwade . . . . .	27
3.10	Messungen mit dem radiometrischen Dichteprüfstand im DLG-Testzentrum	28
3.11	Anordnung der 10 Rundballen in der unteren Lage des Trockners . . . . .	28
3.12	Anordnung der Messpunkte am Rundballen . . . . .	29
4.1	Zeitlicher Verlauf des Trockensubstanzgehalts im Grüngut . . . . .	31
4.2	Trockensubstanzgehalt im Grüngut bei den einzelnen Verfahrensschritten	31
4.3	Bröckelverluste nach Verfahrensschritten . . . . .	32
4.4	Bröckelverluste beim Schwaden nach Versuchsdurchgängen . . . . .	32
4.5	Vergleich der Bröckelverluste beim Schwaden über alle Versuchsdurchgänge	33
4.6	Verteilung der Bröckelverlustmessungen nach Messmethoden . . . . .	34
4.7	Gemessene Bröckelverluste im Versuch 1 . . . . .	35
4.8	Gemessene Bröckelverluste im Versuch 2 . . . . .	35
4.9	Gemessene Querverteilung bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten .	36
4.10	Gemessene Querverteilung bei unterschiedlicher Schwadanordnung . . . .	36
4.11	Gemessene Bröckelverluste über die Arbeitsbreite der Schwader . . . . .	37
4.12	Gemessene Schwadbreiten . . . . .	38
4.13	Gemessene Schwadhöhen . . . . .	38
4.14	Masseverteilung der erzeugten Schwade . . . . .	39
4.15	Halmausrichtung beim Zweikreiselschwader mit Mittenschwadablage und zu gering gewählter Schwadbreite . . . . .	40
4.16	Halmausrichtung im Querschnitt des Schwades beim ELHO-Schwader . . . .	40

## Abbildungsverzeichnis

4.17	Grüngutbewegung beim Zweikreiselschwader . . . . .	41
4.18	Grüngutbewegung beim Schubrechtschwader . . . . .	42
4.19	Axiale Dichteverteilung in den untersuchten Rundballen . . . . .	43
4.20	Gemessene Dichteverteilung Vorversuch Krone Presse . . . . .	44
4.21	Gemessene Dichteverteilung Vorversuch Vicon Presse . . . . .	44
4.22	Gemessene Dichteverteilung Versuch 1 Krone Presse . . . . .	45
4.23	Gemessene Dichteverteilung Versuch 1 Vicon Presse . . . . .	45
4.24	Gemessene Dichteverteilung Versuch 2 Krone Presse . . . . .	46
4.25	Gemessene Dichteverteilung Versuch 2 Vicon Presse . . . . .	46
4.26	Gemessene Dichteverteilung Versuch 3 Krone Presse . . . . .	47
4.27	Gemessene Dichteverteilung Versuch 3 Vicon Presse . . . . .	47
4.28	Trockensubstanzgehalte zum Beginn und zum Ende der Trocknung . . .	48
4.29	Gewichtsverlauf der untersuchten Rundballen (n=20) . . . . .	48
4.30	Entwicklung der Ballenmasse über alle Versuchsduchgänge (n=80) . . .	49
4.31	Ballenmasse zu Beginn der Trocknung (n=20) . . . . .	50
4.32	Ballenmasse am Ende der Trocknung (n=20) . . . . .	51
4.33	Druckverteilung in den Ballen zu Beginn der Trocknung (n=6) . . . . .	51
4.34	Druckverteilung in der ersten Versuchsperiode (n=2) . . . . .	52
4.35	Mittleres gemessenes Strömungsprofil aller Ballen (n=8) . . . . .	52
4.36	Strömungsprofil der Varianten in allen Versuchen (n=8) . . . . .	53
10.1	Mähen der Versuchsparzelle . . . . .	130
10.2	Breitstreuen nach dem Mähen . . . . .	131
10.3	Schwaden mit CLAAS Liner 2900 . . . . .	131
10.4	Schwaden mit ELHO V-Twin 750 . . . . .	132

# Tabellenverzeichnis

3.1	Wetterdaten-2014 . . . . .	17
3.2	Wetterdaten-2015 . . . . .	18

# Danksagung

Zuallererst gilt der Dank dem Team des Fachgebietes Agrartechnik des Fachbereiches Ökologische Agrarwissenschaften der Universität Kassel. Viele konstruktive Diskussionen halfen in jeder Arbeitsphase des Projektes das Ziel nicht aus den Augen zu verlieren und die Versuche weiterzuentwickeln. Besonderer Dank gebührt Dr. Uwe Richter für seine zahlreichen Tipps beim Einsatz der Messtechnik und beim Auswerten der Versuchsergebnisse.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an das Team der Hessischen Staatsdomäne Frankenhäuser, allen voran Marco Tamm, welche durch ihr Wohlwollen und ihre Geduld die Feldversuche erst ermöglicht haben.

Auch danken möchten wir den vielen studentischen Hilfskräften, Abschluss- und Projektarbeitern, welche durch ihre intensive Mitarbeit maßgeblich zum Gelingen vieler Versuche beigetragen haben.

Dieses Projekt wäre nicht möglich gewesen ohne die großzügige, dennoch neutrale Unterstützung der Landmaschinenhersteller. Hier sind insbesondere zu nennen: Die Fa. CLAAS, Bad Saulgau vertreten durch Stefan Loebe; die Fa. KRONE, Spelle vertreten durch Dr. Klaus Martensen und die Fa. ELHO vertreten durch Heinrich Bürke. Gernot Bayer von der Fa. Cool Consultant hat zu den Messungen des Trocknungsverlaufs einen wichtigen Beitrag geleistet. Allen soll an dieser Stelle ein herzlicher Dank ausgesprochen werden.

Nicht zuletzt gilt ein besonderer Dank dem Team des KTBL e.V. in Darmstadt, insbesondere Dr. Ulrike Klöble und der Projektmitarbeiterin Lisa Nilles für ihren Einsatz bei der Planung und Durchführung der Fachgespräche zur Heubergetechnik, der Erstellung des KTBL-Heftes 113: „Belüftungsheu -Qualität, Verfahren, Kosten-“ und der betriebswirtschaftlichen Bewertung des Verfahrens Belüftungsheu. Regelmäßige Besprechungen und spontane Gespräche haben sehr zur positiven Entwicklung des Projektes beigetragen.

Herzlichen Dank auch an alle Praktiker, Experten und Wissenschaftler die über spontane Anfragen und Diskussionen immer wieder zum Nachdenken über die Thematik beigetragen haben.

# Kurzfassung

Die Trocknung von Grüngut ist die älteste Methode um den Haustieren während der vegetationslosen Wintermonate eine Futterkonserve in der Stallhaltung vorzulegen. Diese Konvervierungsart wurde im Laufe der Zeit als Heubereitung definiert. Grundlegende Voraussetzungen für den Erfolg der Heubereitung ist eine ausreichend lange Schönwetterperiode um den notwendigen Wasserentzug zu gewährleisten und eine schonende Grüngutbehandlung um das Abbröckeln von Pflanzenteilen zu minimieren. Dies sind auch gleichzeitig die Herausforderungen, welche in der Vergangenheit dazu geführt haben, dass der Anteil der Heubereitung an der Grundfutterproduktion stetig zu Gunsten der im Feld einfacher durchzuführenden Silagebereitung zurückgegangen ist. Seit geraumer Zeit ist jedoch ein gegenläufiger Trend zu beobachten und das Interesse an der Heubereitung nimmt aufgrund der Vorteile dieses Futtermittels wieder zu. Als Gründe sind zu nennen: Tiergesundheitliche Vorteile, steigende Nachfrage nach Heumilchprodukten und gezielte öffentliche Förderung.

Ziel dieses Verbundprojektes war es daher die Heubereitung beispielhaft an verschiedenen Verfahrensschritten zu untersuchen und so zu einer „Verbesserung der Heubereitetechnik“ beizutragen und einen aktuellen Stand des Wissens zu vermitteln. Die Projektstruktur war so angelegt, dass möglichst alle Teilarbeitsschritte der Verfahrenskette betrachtet wurden. Diese begannen bei der Werbetetechnik, gingen über das Pressen und endeten bei der Untersuchung der Trocknungseigenschaften der Ballen. Ergänzt wurden die Untersuchungen um eine betriebswirtschaftliche Verfahrensbewertung welche insbesondere bei der Heutrocknung die Vielzahl unterschiedlicher Techniken zur Luftanwärmung einbezieht, wie Unterdachabsaugung, Luftanwärmung über Biogasabwärme, Hackschnitzelofen und die Entfeuchtertechnik. Als Informations- und Entscheidungshilfe für interessierte Betriebe zu erstellen, wurde das KTBL-Heft 113 „Belüftungsheu -Qualität, Verfahren, Kosten-“ erstellt, in dem das Thema Belüftungsheu in fundierter Form zusammengefasst wurde und so eine Grundlage für den interessierten Personenkreis darstellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit einer an den jeweiligen Trocknungszustand des Grüngutes angepassten Maschineneinstellung eine Minimierung der Werbungsverluste bei raschem Wasserentzug möglich ist. Die Bauart der eingesetzten Technik ist dabei weniger entscheidend. Zudem besteht noch Entwicklungsbedarf bei den Methoden, welche zur Bestimmung der Verluste eingesetzt werden. die noch relativ neue Bürstenmethode erscheint dabei sehr vielversprechend. Zudem ist zur Absicherung der Heuqualität der Einsatz einer zumindest teilweisen Unterdachtrocknung unerlässlich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit dem Verfahren Belüftungsheu eine hochwertiges Grundfutter bei gleichzeitig geringen Verlusten erzeugt werden kann. Einer angepassten Maschineneinstellung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Wei-

## *Tabellenverzeichnis*

tere Untersuchungen sind jedoch im Bereich der eingesetzten Methoden und bei der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit notwendig.

# 1 Einführung

Dieser Projektabschlussbericht beschreibt ausführlich und fundiert das im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft vom 15.04.2013 bis zum 31.08.2016 geförderte und durch die Universität Kassel und das KTBL e.V. durchgeführte Projekt „Verbesserung der Heubergetechnik“.

Den Einstieg in die Thematik bildet eine Übersicht der historischen Entwicklung und des aktuellen Standes des Verfahrens „Belüftungsheu“. Danach folgt die Darstellung der Projektinhalte. Die Darstellungsweise im Bericht wurde so gewählt, dass auch interessierte Laien den Zugang zum Themengebiet „Heubergetechnik“ finden und sich mit der Produktion von Qualitätsheu auseinandersetzen können.

## 1.1 Gegenstand des Vorhabens

In Zeiten hoher Kraftfutterpreise und vor allem zurückgehender Erzeugerpreise kommt der Grundfutterleistung insbesondere in der Milchproduktion eine besondere Bedeutung zu (GREIMEL o.D., S. 126). Dabei stehen nicht nur die Erzeugungskosten im Vordergrund, sondern insbesondere auch die Qualität des Grundfutters. Bei der Trockenkonservierung des Grünfutters, „Heubereitung“, ist zur Sicherstellung einer hohen Qualität eine zumindest teilweise Unterdachtrocknung unabdingbar, um dem optimalen Schnittzeitpunkt vor der Schönwetterperiode die höchste Priorität einzuräumen (vergl. ROSSRUCKER 1991, S. 2).

Die Beschäftigung mit der Beschleunigung und Absicherung der Heubereitung ist wahrscheinlich so alt wie die Grüngutttrocknung selbst. Mit der fortschreitenden Mechanisierung und Technisierung gelang es in der Vergangenheit einige Maßnahmen zur Verbesserung der Heuproduktion umzusetzen. Als Beispiele sind die Belüftungstrocknung, die künstliche Trocknung und die allgemeine Verringerung der Arbeitskraftbedarfs und die Steigerung der Schlagkraft bei Werben, Bergen und Trocknen des Heus zu nennen (vergl. BERG und SCHRADER 1989, S. 32–37) (vergl. ROSSRUCKER 1991, S. 4–5) (vergl. BLÜMEL et al. 1973, S. 3). Gerade bei der künstlichen Trocknung beeinflusst der Wassergehalt im Grüngut die Wirtschaftlichkeit wesentlich (vergl. JUNGBLUTH und WANDEL 1990, S. 546). Bei entsprechenden Witterungsbedingungen sollte die Sonnenenergie auf jeden Fall zum Wasserentzug auf dem Feld genutzt werden, um bei der künstlichen Trocknung Energie zu sparen (vergl. WIENEKE 1974, S. 19). Versuche zum alternativen Anwelken durch Säurezugabe oder thermische Aufbereitung wurden in den 1960er und 1970er Jahren durchgeführt, wurden dann aber nicht weiter verfolgt (vergl. WIENEKE 1972, S. 161–163) (vergl. ebd., S. 165–167) (vergl. WIENEKE 1974, S. 21–23).

Nachdem die Forschung zur Heubereitung in Westdeutschland mit der Etablierung der

Silageerzeugung im Laufe der 1970er Jahre zurück gefahren wurde (vergl. WIENEKE 1972, S. 10), erfährt sie seit einigen Jahren auch außerhalb der traditionellen Heubergegebiete Süddeutschlands, Österreich und der Schweiz wieder eine zunehmende Beachtung. Im Strategiepapier des Fachforums Grünland der Deutschen Agrarforschungsallianz (DAFA) wird Heu als besonders wiederkäuergerechtes Futtermittel genannt. Die besonders verlustarme Gewinnung wird als Voraussetzung für die erfolgreiche Heubereitung genannt (vergl. MICHAELIS 2015, S. 40). Aber auch für die nachhaltige Nutzung und Erhaltung von artenreichen Grünlandbeständen oder der sinnvollen Nutzung von Fruchtfolgegliedern im Ackerbau und den dadurch erbrachten Beitrag zur Biodiversität wird die Heubereitung hervorgehoben und ein dringender Forschungsbedarf angemahnt (vergl. ebd., S. 9).

### 1.2 Ziele des Projektes

Das Ziel des Vorhabens wurde mit der „Verbesserung der Heubergetechnik“ weit gefasst. Es umfasst sowohl technische, als auch wirtschaftliche Fragestellungen. Die Ziele lagen in der praxisnahen Bestimmung der Verluste innerhalb des Verfahrens, der Verbesserung der Voraussetzungen für eine gleichmäßig niedrige Pressdichte und in der Untersuchung des Trocknungsverlaufs von Heurundballen. Die Feldversuche wurden unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt.

Eine weitere wichtige Zielsetzung war die Konzipierung einer betriebswirtschaftlichen Verfahrensbewertung, um eine fundierte, aktuelle wirtschaftliche Einordnung vornehmen zu können. Der Wissenstransfer bildete einen besonderen Schwerpunkt, dieser drückt sich in der Zusammenstellung des KTBL-Heftes 113: „Belüftungsheu -Qualität, Verfahren, Kosten-“ aus. Das Projekt soll insbesondere die Ökologische Landwirtschaft unterstützen, dabei soll das hochwertige erzeugte Grundfutter zur Steigerung der Tiergesundheit beitragen und die Eiweißversorgung durch die Nutzung heimischer Leguminosen verbessert werden. Über den integrierten Wissenstransfer (Fachgespräche, Vorträge und Veröffentlichungen) wurden die Ergebnisse schon während der Laufzeit für die landwirtschaftliche Praxis, die Beratung und die Aus- und Weiterbildung zugänglich gemacht.

### 1.3 Aufgabenstellung des Projektes

Die Aufgabenstellung des Projektes wurde in folgende verfahrenstechnische Fragestellungen untergliedert.

- Mit welcher Methode können die entstehenden Bröckelverluste möglichst realitätsnah abgebildet werden?
- Mit welcher Höhe von Bröckelverlusten muss in den einzelnen Verfahrensschritten gerechnet werden?
- Wie kann das Wenden so durchgeführt werden, dass möglichst wenig Bröckelverluste entstehen?

## 1 Einführung

- Wie lässt sich die Arbeitsweise des Zweikreisel- und des Schubrechtschwaders beschreiben?
- Sind Unterschiede in der Schwadbeschaffenheit dokumentierbar?
- Mit welcher Maschine und welcher Einstellung lassen eine für die Rundballenpresse ideale Schwadform erzielen?
- Hat die Bauart der Rundballenpresse einen Einfluss auf den Dichteverlauf bei Ballen aus Heu?
- Anhand welcher Messgrößen lässt sich der Trocknungsverlauf von Rundballen am besten dokumentieren?
- Gibt es Unterschiede im Trocknungsverlauf von Heurundballen, welche aus Schwaden unterschiedlicher Schwader gepresst wurden?
- Gibt es Unterschiede im Trocknungsverlauf von Heuballen, welche mit unterschiedlichen Pressenbauarten gepresst wurden?
- Welche maschinenbedingten Einflussparameter sind bei der Belüftungsheubereitung von wesentlicher Bedeutung?

### 1.4 Planung und tatsächlicher Ablauf des Projektes

Das Projekt begann mit einer Literaturrecherche zum Thema Mechanisierung der Futterernte, Grünguteigenschaften und Belüftung von Heu. Dadurch wurde der Anschluss an die bisher veröffentlichten Forschungsergebnisse hergestellt.

Im Projekt wurde zunächst die Heuwerbetechnik untersucht, dabei standen insbesondere die Prozessgrößen Gutablage, Trockensubstanzgehalt und Bröckelverluste im Vordergrund. Danach wurde sich mit der praktischen Untersuchung der Durchströmung von Heurundballen befasst. Im letzten Drittel des Projektes wurden zusätzlich zu den Feldversuchen Untersuchungen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit durchgeführt und der Wissenstransfer in die Praxis intensiviert.

## 2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der Erfolg der Heubergung ist extrem von der Witterung abhängig, schon eine einzige Regenschauer kann die Qualität stark verringern (vergl. WIENEKE 1966, S. 9). Daher hat man sich schon früh mit der Verbesserung und Absicherung der Trocknung auseinander gesetzt, als Beispiel ist hier die Reutertrocknung zu nennen, bei der das Grüngut zum Trocknen auf Holzgerüste gehängt wird (vergl. BERG und SCHRADER 1989, S. 29–31). Mit dem Einsetzen der Industrialisierung und der damit einhergehenden Verfügbarkeit mechanischer Gerätschaften wurde ein Teil des enormen Handarbeitsaufwandes durch Maschinenarbeit ersetzt (vergl. ebd., S. 44). Die mechanischen Verluste welche durch die Bearbeitung im Feld entstehen wurden dadurch jedoch nicht zwangsläufig verringert, sondern zum Teil noch erhöht. In der allgemeinen Aufbruchstimmung und durch die Fortschritte auf wissenschaftlich-technologischen Gebiet ab etwa der 1950er Jahre wurde sich auch aufgrund der gewünschten Steigerung der tierischen Leistungen u.a. intensiv mit der Verbesserung der Heubereitung auseinander gesetzt (vergl. SEGLER 1950, S. 5). Dies umfasste einerseits die Werbetechnik und hier insbesondere Geräte zum Wenden und Schwaden, andererseits aber auch die Bergetechnik durch die Entwicklung des Ladewagens und der Weiterentwicklung der Presstechnik (vergl. ebd., S. 7–10). Die Futterqualität lässt sich dadurch jedoch nur begrenzt sichern, setzt man einen hochwertigen zum optimalen Zeitpunkt geschnittenen Grüngutbestand voraus, kommt der Qualitätssicherung durch eine schnelle Trocknung eine besondere Bedeutung zu (vergl. BUSSEN 1968, S. 195). Dabei wurde schon relativ früh die Notwendigkeit einer teilweisen Unterdachtrocknung erkannt (vergl. SEGLER et al. 1953, S. 1). In den 1950er wurde dabei eine Kaltbelüftung favorisiert, weil diese mit relativ geringem Material- und Energieaufwand den landwirtschaftlichen Betrieben realisiert werden konnte (vergl. BIRK 1953, S. 28–38) (vergl. BERG und SCHRADER 1989, S. 36). Über die begrenzten Trocknungsmöglichkeiten mit Umgebungsluft war man sich zu dieser Zeit bewusst. Mit der relativen Verbilligung der Energie im Vergleich zu anderen Produktionsmitteln in den 1960er Jahren rückte die Heißlufttrocknung nach einem kriegsbedingten Rückbau wieder in den Fokus. Die ernährungsphysiologischen Vorteile, die gute Mechanisierbarkeit und die geringen Trocknungsverluste sind hier ebenso als Gründe zu nennen (vergl. WIENEKE 1974, S. 7–8), wie eine staatliche Förderung (vergl. KANDERT 1974, S. 132). Unter Heißlufttrocknung wird dabei die Grünguttrocknung bei Temperaturen bis zu 1100 °C verstanden (vergl. WIENEKE 1974, S. 7) (vergl. BERG und SCHRADER 1989, S. 227). In der Regel wird dabei ein Trommeltrockner verwendet bei dem das Trockengut direkt vom Rauchgas getrocknet wird. Das Trockengut kann in Form von Pellets oder Briketts kompaktiert werden. Bis auf einige wenige Anlagen welche mit

Rohbraunkohle beheizt werden und sich in unmittelbarer Nähe der Abbaugelände befinden, wurde diese Art der Trocknung mit Beginn der Ölkrisen in den 1970er Jahren schlagartig unwirtschaftlich und verschwand vom Markt (vergl. REISCH 1974, S. 167). Dies und die flächendeckende Einführung der Silagekonservierung führten dazu, dass die Heuerzeugung in weiten Teilen eine Nische wurde (vergl. BERG und SCHRADER 1989, S. 10). Ausgenommen davon waren einige Gebiete Süd- und Ostdeutschlands. Im Süden wurde die Heufütterung wegen der Herstellung hochpreisiger Käse beibehalten und in der DDR war eine gewisse Heumenge in der Futtermittelration wegen der mangelhaften Silagequalität bis zuletzt angestrebt.

Aufgrund der Vorteile in der Tierernährung, der Spezialisierung einiger Betriebe auf die eigene Käseherstellung und der regionalen Verfügbarkeit der Abwärme aus Biogasanlagen erfährt die Unterdachbelüftung seit einiger Zeit wieder eine zunehmende Aufmerksamkeit (vergl. NYDEGGER und WIRLEITNER 2009, S. 58).

Die gegenwärtig in Betrieb gehenden und betriebenen Unterdachbelüftungsanlagen sind zumeist Warmbelüftungen bei denen die Temperatur der Trocknungsluft um 5 °C bis 10 °C gegenüber der Umgebungsluft angehoben wird, um so die spezifische Wasseraufnahmekapazität der Trocknungsluft zu erhöhen (vergl. MÜLLER und BREUNIG 1989, S. 125). Je nach Bauart der Anlagen können damit, klassischerweise loses Gut, aber auch Ballen getrocknet werden. Wird heute der Begriff Belüftungstrocknung verwendet, so versteht man darunter die Fertigtrocknung von durch Bodentrocknung vorgewelktem Grüngut.

## **2.1 Problematik der Qualitätsheuerzeugung**

Eine wichtige Voraussetzung zur Erreichung einer hohen Heuqualität ist die Minimierung von Verlusten bei der Futterernte und -konservierung. Die Verluste setzen sich aus Feldverlusten, Lagerungsverlusten und Verlusten bei der Fütterung zusammen. Insbesondere bei der Heubereitung besteht bei steigenden Erträgen und blattreichen Pflanzen (Leguminosen) immer auch die Gefahr von höheren Verlusten aufgrund einer langsameren Trocknungsgeschwindigkeit, großen Trocknungsunterschieden zwischen Stängel und Blatt und einer häufigeren mechanischen Bearbeitung.

Eine entscheidende Rahmenbedingung und Herausforderung in der Futterernte und insbesondere bei der Heuproduktion ist, dass die größte Futtermenge, unter den in Deutschland vorherrschenden Bedingungen, innerhalb einer Zeitspanne von etwa 4 bis 6 Wochen in Mai und Juni aufwächst (vergl. BLÜMEL et al. 1973, S. 4–5). Diese muss geerntet und entsprechend konserviert werden. Diese Tatsache gilt es bei der Kapazitätsplanung zu beachten, sonst entstehen die ersten Verluste durch ein verspätetes Mähen mit einhergehender Verringerung der Futterqualität. Dies ist auch von der Seite der Maschinenkosten bedeutsam, da bei qualitativ minderwertigem Erntegut die Maschinenkosten nicht geringer ausfallen.

Verschärfend wirkt, dass sich ab einer gewissen Betriebsgröße die Ernte des Grundfutters nicht mehr nur auf die Schönwettertage beschränken lässt (vergl. OLFE 1971, S. 125–129). Es muss vielmehr im Mai begonnen und alle möglichen Tage mit einigermaßen

trockener Witterung und höheren Lufttemperaturen genutzt werden. Diese zusätzliche Herausforderung bringt es mit sich, dass eine mengenmäßig und qualitativ überzeugende Ernte ohne eine zumindest teilweise Unterdachtrocknung nicht möglich ist. Die Unterdachtrocknung hat außerdem den Vorteil der Kontrollier- und Steuerbarkeit von Einflussfaktoren auf den Trocknungsverlauf. Dadurch entsteht eine größere Sicherheit im Verfahren. Auf der anderen Seite erfordert ein konsequentes Anwenden dieses Systemsgedankens einen fortwährenden Einsatz von Mäh-, Werbe- und Erntetechnik, um die betriebliche Trocknungskapazität optimal auszulasten. Dies muss bei der Arbeits- und Maschinenplanung berücksichtigt werden.

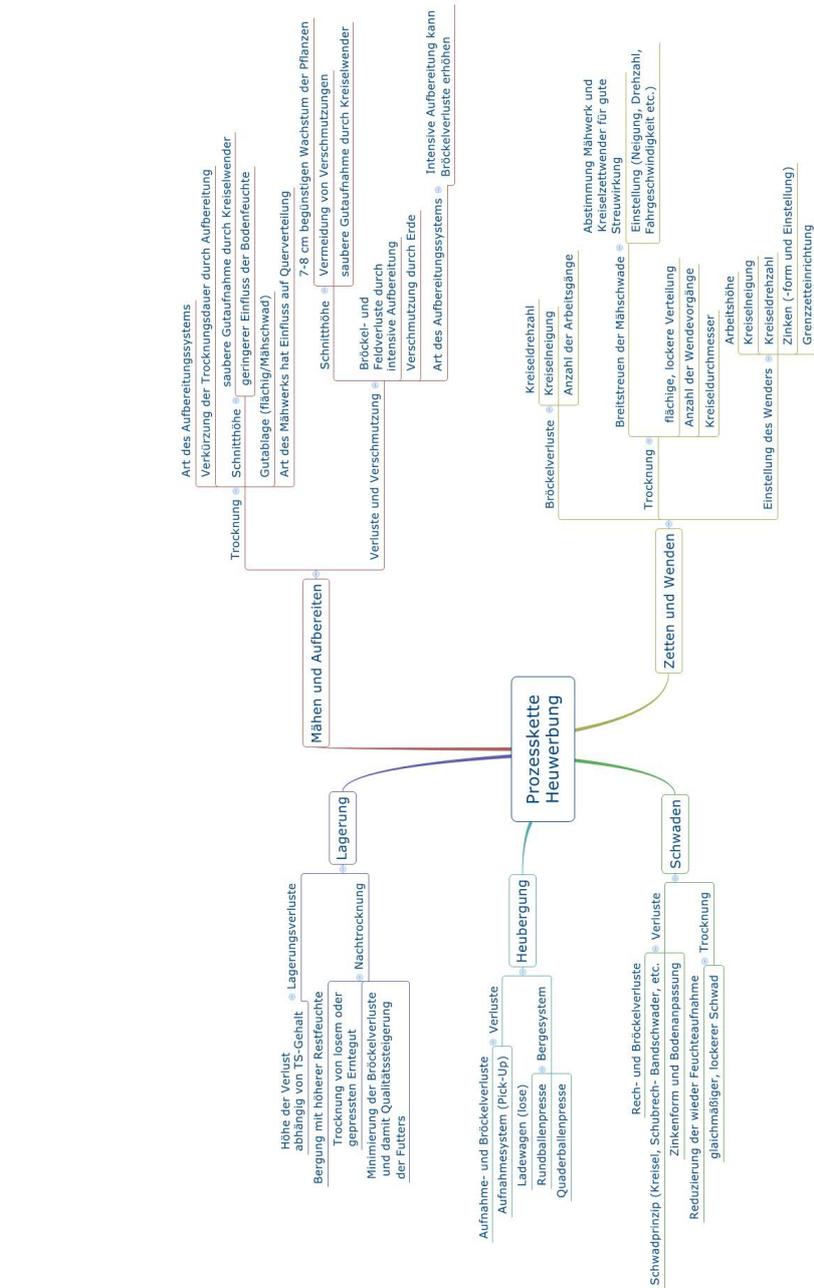
## 2.2 Heuwerbung

Neben der Trocknungsdauer wird auch die Menge an Verlusten, insbesondere Bröckelverluste, durch den Maschineneinsatz bei der Heuernte mitbestimmt. Deshalb ist es wichtig den Prozess der Heuwerbung in Gänze zu sehen und auch die Wechselwirkung der unterschiedlichen Maschinen aufeinander zu berücksichtigen. Bröckelverluste treten zunehmend mit steigendem TS-Gehalt auf. Die letzten Bearbeitungsschritte wie Schwaden und Pressen finden bei hohem TS-Gehalt statt. Bei der Anwendung von Nachtrocknungsanlagen kann das Heu mit einer höheren Restfeuchte vom Feld geborgen werden und Bröckelverluste fallen geringer aus. Um die Verluste möglichst gering zu halten, ist eine für die jeweiligen Bedingungen optimale Einstellung erforderlich. Die einzelnen Geräte müssen in jedem Arbeitsschritt so eingestellt werden, dass sie im Anwendungsfall der Heubereitung eine schnelle Trocknung und zugleich schonende Behandlung des Erntegutes ermöglichen. Weiterhin sind die Maschinen prozessübergreifend aufeinander abzustimmen. Auf der Abbildung 2.2 auf der nächsten Seite wird ein Überblick über die Einflüsse einzelner Parameter in der Prozesskette der Heuwerbung gegeben. Die Zielgrößen Trocknung und Verluste stehen dabei im Vordergrund.

Die Trocknungsgeschwindigkeit verläuft bekanntlich nicht linear, sondern nimmt mit steigendem Trockensubstanzgehalt ab (vergl. BERG und SCHRADER 1989, S. 20). Entscheidend für den Trocknungsverlauf ist nicht nur die Behandlung des Grüngutes, sondern auch der Massebelag ( $\text{kg/m}^2$ ) und damit die Schichtdicke (vergl. ebd., S. 21). Lange Liegezeiten im Feld sind zu vermeiden, da es insbesondere bei schnellwachsenden Gräsern zu einem Einwachsen und Abreißen der frischen Gräser kommen kann, was wiederum Feuchtenester erzeugt (vergl. ebd., S. 21). Der Trocknungsverlauf im Feld wird durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst, dazu zählen das Sättigungsdefizit der Luft, die Sonnenscheindauer, die Globalstrahlung und die Luftbewegung. Dazu kommen Pflanzenart, Entwicklungsstadium des Bestandes, Schichtdicke, Intensität der Aufbereitung, Wiederbefeuchtung (Tau und Bodenfeuchte).

Bei den Maschinen zum Schwaden dominiert heute das Rotorprinzip. Dabei sind in den meisten Fällen Systeme mit gesteuerten Zinken gemeint. Bei Systemen mit ungesteuerten Zinken wurde schon von BERG und SCHRADER (ebd., S. 59) der harte Schlag der Zinken in das Gut bemängelt. Durch veränderbare Zinkendrehzahlen, gummierte Zinken oder Kunststoffzinken wurde damals versucht diesen Verfahrensschritt schonender zu

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde



Darstellung: R. Dietrich

Abbildung 2.1: Die Prozesskette in der Heubereitung unter Berücksichtigung der Zielgrößen Trocknung und Verluste

gestalten. Zudem haben sich heute noch das Sternradprinzip und Schubrechprinzip erhalten. Erwähnenswert ist zudem das Bandschwaderprinzip, welches schwerpunktmäßig bei der Werbung von schwerem Grüngut (Grünroggen, GPS) für Biogasanlagen

eingesetzt wird. Neuerdings und damit leider erst nach dem Ende der Projektlaufzeit steht auch ein innovativer Bandschwadertyp (Reiter Respiro) vor der Markteinführung, welcher speziell beim Schwaden von Heu zu besseren Qualitäten führen soll.

### 2.3 Rundballen als Trocknungsgegenstand

Um kleinere Mengen Heu kompakt zu lagern und besser transportieren zu können, wird es bereits auf dem Feld zu Ballen gepresst. Bei der Herstellung von Ballen für die Belüftung wird bei der Einstellung der Rundballenpresse grundsätzlich ein geringer Druck von 60 bar bis 80 bar angestrebt (vergl. NYDEGGER und WIRLEITNER 2009, S. 61). Locker gepresste Heuballen zeigen eine höhere Trocknungsleistung, gemessen in kg verdunstetes Wasser pro Stunde, als fester gepresste Ballen (vergl. HOLPP 2004, S. 5). Ein locker gepresster Heuballen ermöglicht eine gute Luftdurchströmung innerhalb des Ballens. Um ein Dichtlagern des Heus innerhalb des Ballens zu vermeiden und eine hohe Trocknungsleistung der Luft zu erreichen, ist die Struktur der Grüngutstängel von Bedeutung. Wird eine zu grobe Stängelstruktur wegen einer besseren Durchströmung angestrebt, wirkt sich diese Eigenschaft negativ auf die Futterqualität aus (vergl. PÖLLINGER, WEINGARTMANN, HANDLER und BLUMAUER 2008, S. 46).

Um eine Abschätzung der Belüftbarkeit des Grüngutes, der Neigung zum Dichtlagern und des daraus resultierenden Strömungswiderstandes der Luft treffen zu können, kann das Gräser-Kräuter-Leguminosen-Verhältnis (vergl. PÖLLINGER, RESCH et al. 2008, S. 41) bzw. das Stängel-Blattverhältnis (vergl. PÖLLINGER, WEINGARTMANN, HANDLER und BLUMAUER 2008, S. 48) gemessen werden. Der Ballendurchmesser sollte zwischen 1,2 m und 1,5 m liegen und die Pressdichte den Wert von 110-120 kg TM/m<sup>3</sup> bzw. bei grobstängeligem Futter 140 kg TM/m<sup>3</sup> nicht übersteigen (vergl. NYDEGGER und WIRLEITNER 2009, S. 61). Eine hohe Pressdichte des Ballens hat zwar den Vorteil des geringen Platzbedarfs bei der Lagerung, bei der Handhabung, sowie beim Transport der Ballen. Die hohe Dichte stellt sich beim Trocknungszeitbedarf jedoch als nachteilig heraus, da hier mit der dreifachen Trocknungszeit kalkuliert werden muss und die Ballen ungleichmäßig abtrocknen (vergl. PÖLLINGER, WEINGARTMANN, HANDLER und BLUMAUER 2008, S. 47).

Der Kern des Rundballens sollte weich gepresst werden, wobei die Wicklung des Heus sehr gleichmäßig sein sollte. Um die Pressdichte und Belüftbarkeit der gepressten Heuballen vor Ort zu überprüfen gibt es eine Schätzmethode, so sollte die flache Hand zwischen 0,15 m und 0,2 m seitlich in den Ballenkern eindringen können (vergl. NYDEGGER und WIRLEITNER 2009, S. 61).

Die beste Pressqualität für die Heuballentrocknung, bei einer gleichmäßigen Pressdichte, wird durch eine variable Presskammer erreicht. Sowohl die Pressdichte, als auch das gleichmäßige Pressen beeinflussen den Trocknungsverlauf maßgeblich und werden am besten mit dem Stabketten-Presssystem durch das VarioPack bzw. Novogrip-Presssystem der neuen Comprima-Generation erzeugt. Zusätzlich sind zügiges Fahren und eine reduzierte Zapfwellendrehzahl vorteilhaft, um geringe Bröckelverluste und einen gleichmäßigen und lockeren Ballen zu produzieren. Die Netzumwicklung sollte die

relativ instabilen und locker gepressten Heuballen zusammenhalten und ausreichend stark sein, um mehrmaliges Umlagern der Heuballen zu ermöglichen (vergl. PÖLLINGER, WEINGARTMANN, HANDLER, BLUMAUER und PAAR 2008, S. 49–50). Die Mechanisierung, die für den Transport der Ballen vom Feld zur Trocknungsanlage genutzt wird, sollte schonend und mit größtmöglicher Vorsicht eingesetzt werden, um keine Verformungen und zusätzliche Verdichtungen des Ballens zu bewirken (vergl. HOLPP 2004, S. 5).

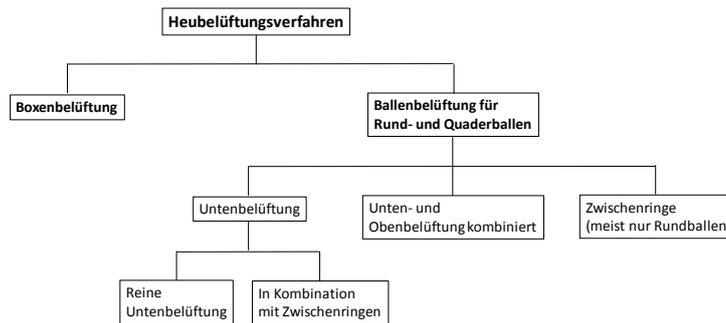
Neben der Einstellung der Presse ist die Schwadform ein ebenso wichtiger Faktor beim Ballenpressen. In der Literatur findet sich dazu der Begriff des „Breiten Doppelschwades“ (vergl. WIRLEITNER 2013, S. 44–45). Zusätzlich sollte der Schwad locker, homogen und trapezförmig geformt sein um einer gute Füllung der Presskammer zu bewirken. Aus diesem Grund sollte die Breite des Schwads an die Spurbreite des Schleppers angepasst sein, so dass der Schwad nicht überfahren wird und gleichmäßig aufgenommen werden kann. Ein Hin- und Herfahren des Traktor-Pressen-Gespans, um eine ausreichende Heuverteilerung innerhalb des Ballens zu erreichen wie PÖLLINGER, WEINGARTMANN, HANDLER, BLUMAUER und PAAR (2008, S. 49) berichtet, ist dann nicht notwendig. Es empfiehlt sich bei der Belüftung einen Deckel auf den Ballen zu legen, der dafür sorgt, dass ein Kamineffekt bzw. ein axialer Luftaustritt nicht entsteht, und die Luft zu einem radialen Austritt gezwungen wird (vergl. MISENER et al. 1990, S. 264). Ohne diese stirnseitige Abdichtung entsteht eine schlechte Luftverteilung innerhalb des Ballens, bei zusätzlich weichem Kern wird die Trocknungsleistung sehr ineffizient (Plue und Bilanski, 1991, S. 527f (vergl. PLUE und BILANSKI 1991, S. 525).

Heuballen, die eine einheitliche Pressdichte aufweisen, aber nur von unten belüftet werden, trocknen ungleichmäßig ab und behalten höhere Feuchtigkeitsgehalte im oberen Randbereich, als Rundballen mit weichem Kern und stirnseitiger Abdichtung (vergl. MISENER et al. 1990, S. 263). Kritische Stellen (Feuchtenester) am Ballen kommen aufgrund von Dichteunterschieden oder unzureichender Luftzufuhr zustande. Zudem ist es nach HOLPP (2004, S. 5) kaum möglich, verdichtete Stellen durch eine Verlängerung der Belüftungszeit zu trocknen, da die Luft immer den Weg des geringsten Widerstands geht. Zusätzlich können bei zu langer Belüftungszeit, durch Feuchtigkeit bedingte, mikrobielle Prozesse im Heu die Gesundheit der Tiere und Menschen nachhaltig gefährden (vergl. NYDEGGER und WIRLEITNER 2009, S. 58).

## 2.4 Grundlagen der Trocknung

In den folgenden Kapiteln wird kurz auf die Grundlagen der Trocknung, am Markt verfügbare Anlagen zur Heutrocknung und die Wirtschaftlichkeit der Heutrocknung eingegangen. Ausführlich wird das Thema „Heutrocknung“ in der KTBL-Schrift 113 beschrieben. Eine systematische Übersicht der Technik zur Belüftungsheuerzeugung ist der Abbildung 2.4 auf der nächsten Seite zu entnehmen.

Die Verfahren zur Trocknung von Heu sind der thermischen Trocknung zuzurechnen. Diese beruht auf den Effekten der Konvektion, der Wärmeleitung und der Strahlung. Bei Grüngut muss die Feuchtigkeit an die Oberfläche transportiert und von dort ab-



Darstellung: L. Nilles

Abbildung 2.2: Übersicht der Heubelüftungsverfahren

geführt werden. Ein Phasenübergang von der flüssigen in die gasförmige Phase ist dabei notwendig, was den Vorgang im Vergleich zu mechanischen Abtrennprozessen energieintensiv macht. Zudem sind bei der thermischen Trocknung entsprechend große Volumenströme zum Abtransport des Wasserdampfes notwendig. Dies beeinflusst die Auslegung des Lüfters und Kanäle zur Abführung der Trocknungsluft.

Der generelle Trocknungsverlauf besteht aus drei Phasen. In der ersten Phase wird das an der Oberfläche des Trocknungsgutes ungebundene Wasser verdampft. Trocknungsgeschwindigkeit und Guttemperatur bleiben hier konstant. In der zweiten Trocknungsphase wird die ungebundene Feuchtigkeit im Trocknungsgut durch den Druckunterschied bei der Verdampfung an die Oberfläche geführt und abgeführt. Die Trocknungsgeschwindigkeit fällt. Daran schließt sich die dritte Trocknungsphase an. Das Trocknungsgut verhält sich zunehmend hygroskopisch, die ungebundene Feuchtigkeit ist im gesamten Trocknungsgut abtransportiert. Der Feuchtigkeitstransport findet nun durch Dampfdiffusion statt. Ist eine Gleichgewichtsfeuchte zwischen Trockengut und Trocknungsluft erreicht ist der Trocknungsprozess beendet (vergl. MALTRY et al. 1975, S. 69–119).

Die Heutrocknung lässt sich in den Bereich der Konvektionstrocknung und dort in die Durchströmungstrocknung einordnen. Dies bedeutet: Das Trocknungsmedium durchfließt das Trocknungsgut. Die Sicherstellung eines ausreichenden Volumenstroms zur Abführung der Gutfeuchte kommt in der Regel ein Radialventilator zum Einsatz. Dieser besteht aus einem Spiralgehäuse mit Ein- und Austrittsstutzen, dem Laufrad und der Zunge. Die Ansaugung der Luft erfolgt axial, der Ausstoß radial. Die ausgestoßene Luft wird gebündelt und über einen Strömungskanal in das Trocknungsgut geleitet.

Der allergrößte Teil der heute in der Praxis in Betrieb gehenden Anlagen, sind Anlagen für Warmbelüftung bei denen die Außenluft vor dem Einblasen in den Ballen um 5 bis 10 K erwärmt wird. Der wirtschaftliche Erfolg einer solchen Anlage hängt stark von den Bereitstellungskosten für die Wärme ab. Hinsichtlich der relativ langen Trocknungsdauer und der nur gering erwärmten Trocknungsluft ist diese Art der Trocknung

## 2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

zur Sicherstellung einer hohen Grüngutqualität nicht ganz unproblematisch.

### 2.5 Anlagentypen für die Rundballentrocknung

Auf dem deutschen Markt für Rundballentrocknungen gibt es verschiedene Systeme, die sich in ihrer Bauart voneinander unterscheiden. In der Abbildung 2.5 werden die verschiedenen typischen Varianten:

- Untenbelüftung
- Oben- und Untenbelüftung
- flexible Systeme mit mittiger Belüftung
- sonstige Systeme

vorgestellt.

Firma	Internetadresse	Unten- belüftung	Oben- & Unten- belüftung	Flexibles System	Sonstige Systeme
Auer Landmaschinenbau GmbH	<a href="http://www.auerlmb.at">www.auerlmb.at</a>	X			
BL Heutrocknung	<a href="http://www.bl-heutrocknung.eu">http://www.bl-heutrocknung.eu</a>	X			
GeräteBau Birk	<a href="http://www.gb-birk.de">www.gb-birk.de</a>	X			
Gielesberger – Kran + Trocknungsanlagen	<a href="http://www.heukran.at/">http://www.heukran.at/</a>	X		X	
Clim Air.50 s.r.l.	<a href="http://www.climair50.com">www.climair50.com</a>		X		
Heutrocknung SR GmbH	<a href="http://www.heutrocknung.com">www.heutrocknung.com</a>	X		X	X <sup>1</sup>
LASCO Heutechnik GmbH	<a href="http://www.lasco.at">www.lasco.at</a>	X		X	X <sup>2</sup>
RMH-Landtechnik Handelsagentur	<a href="http://www.r-m-h.at">www.r-m-h.at</a>				X <sup>3</sup>
RTS - Trocknung	<a href="http://heutrocknung.at/">http://heutrocknung.at/</a>	X			X <sup>4</sup>
Spindler Lüftungen	<a href="http://www.heubelueftung.at">http://www.heubelueftung.at</a>	X		X	X <sup>5</sup>
STEIDL – energie der zukunft	<a href="http://www.heutrocknung.net">http://www.heutrocknung.net</a>	X			X <sup>6</sup>
Weiss Mawek Metallbau Landtechnik GmbH	<a href="http://www.weiss-soell.at">www.weiss-soell.at</a>	X	X	X	
WILD - Farmtechnik GmbH	<a href="http://www.wild-farmtechnik.ch">www.wild-farmtechnik.ch</a>	X			

X<sup>1</sup>: Anhängertrocknung

X<sup>2</sup>: Kombi-Flex-System

X<sup>3</sup>: Kompaktanlage für 8 Ballen

X<sup>4</sup>: Flexibles System mit einer Oben- und Untenbelüftung

X<sup>5</sup>: Blockbauweise für 16 Ballen

X<sup>6</sup>: Belüftung aus der Ballenmitte heraus mittels perforiertem Rohr

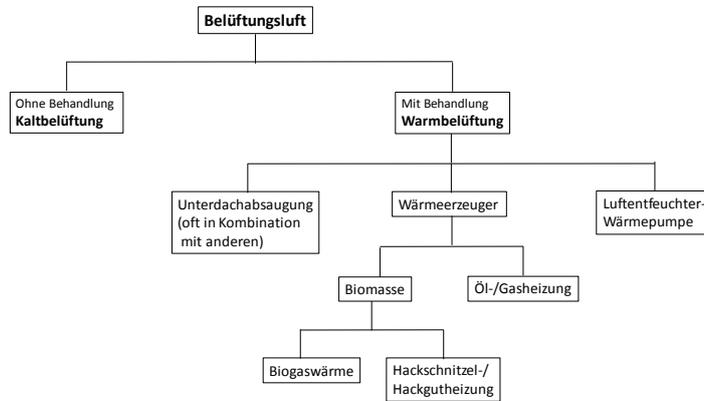
Darstellung: S. Biet

Abbildung 2.3: In Deutschland verfügbare Trocknungstechnik für Rundballen

Die Verfahren zur Anwärmung der Trocknungsluft sind vielfältig, siehe Abbildung 2.5 auf der nächsten Seite. Die Warmbelüftung mit ausschließlicher Luftanwärmung durch Sonnenenergie kommt nachts und bei Regen an ihre Grenzen. Daher kann und muss zur Sicherstellung einer ausreichenden Trocknungsleistung auf weitere Luftanwärmungs-

## 2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

oder Entfeuchtertechniken zurückgegriffen werden. Eine sehr sichere und effiziente Trocknung wird mit Luftentfeuchter-Wärmepumpen erreicht, wobei die Trocknungsluft einerseits entfeuchtet und andererseits erwärmt wird.



Darstellung: L. Nilles

Abbildung 2.4: Übersicht der verschiedenen Luftzustände der Belüftungsluft

## **3 Material und Methoden**

Zur Beantwortung der in Abschnitt 1.3 auf Seite 5 genannten Fragestellungen wurde ein praxisnaher Versuchsansatz gewählt. Feldversuche bildeten dabei den Schwerpunkt der Untersuchungen. Sofern nicht anders angegeben, fanden die Versuche auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen in Grebenstein bei Kassel statt.

### **3.1 Versuchsstandort**

Die Hessische Staatsdomäne Frankenhausen liegt in der Nähe von Grebenstein bei Kassel. Dieser Betrieb wird seit 1998 ökologisch bewirtschaftet, er verfügt über 312 ha landwirtschaftliche Nutzfläche, wovon auf etwa 83 ha Klee gras bzw. Luzerne angebaut werden. Dies bildet die Futtergrundlage für die betriebseigenen 95 Milchkühe plus deren Nachzucht. Ein Teil der Futterfläche ist in jedem Jahr für die Heubereitung vorgesehen. Für die Versuche im Rahmen dieses Projektes stand die betriebseigene Rundballenbelüftung zur Verfügung. Ebenso konnte zu großen Teilen die vorhandene Technik genutzt werden. Die Betriebsflächen liegen zwischen 160 und 250 m ü. NN. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 650 mm und die Jahresdurchschnittstemperatur 8,5 °C.

### **3.2 Witterungsbedingungen**

Die einzelnen Tage der Versuchsperioden waren zumeist niederschlagsfrei und mit maximalen Lufttemperaturen von 18,9 °C bis 34,3 °C gut für die Heuernte geeignet. Die Versuchsperioden spiegeln die Schönwetterperioden der entsprechenden Jahre wider. Die einzelnen Tageswerte sind der Tabelle 3.1 auf der nächsten Seite und der Tabelle 3.2 auf Seite 18 zu entnehmen.

### **3.3 Beschreibung der Parzelle und des Halmgutes**

Die Versuche fanden auf ebenen, rechteckigen und nebeneinander liegenden Feldfutterparzellen statt. Die Versuchsparzellen hatten eine Breite von 80 m und eine Länge von 350 m bis 500 m. Die Größe betrug damit in etwa 2,5 ha bis 4,0 ha. Die Arbeitsrichtung verlief parallel zur langen Seite der Fläche. Durch die Verwendung eines Parallelfahrsystems am Schlepper und der georeferenzierten Flächenvermessung wurden Fehler, welche durch ungenaues Anschlussfahren oder durch Verschieben von Messpunkten hervorgerufen werden können, ausgeschlossen. Die Flächenaufteilung erfolgte durch ein 3 m Linienraster, dadurch stand insbesondere für das Schwaden, pro Überfahrt,

Tabelle 3.1: Wetterdaten-2014

Datum	Boden 20 cm [C°]	Boden 5 cm [C°]	Luft 20 cm [C°]	Luft 2 m (MW) [C°]	Luft 2 m (Max.) [C°]	Luft 2 m (Min.) [C°]	Rel- Luft- feuchte [%]	Nieder- schlag [mm]	Global- strah- lung [W/m <sup>2</sup> ]	Wind [m s <sup>-1</sup> ]	Wind (Max.) [m s <sup>-1</sup> ]
19.05.2014	13,5	15,5	15,8	16,3	23,7	9,9	71	0	3573	1,7	6,2
20.05.2014	14,7	17,5	18,9	19,9	29,1	12,1	61	0	7171	1,8	6
21.05.2014	15,8	18,2	20,2	21,3	28,7	14	56	0	6221	1,9	7,9
31.05.2014	14,6	15,9	12,4	13,4	20,2	5	68	0	8362	2	2,75
01.06.2014	14,7	15,5	11,9	12,6	18,9	4,9	73	0	6520	1,6	6,9
02.06.2014	15	16,1	14,1	15	21,8	7,8	67	0	6872	1,3	5,9
01.07.2014	15,6	16,6	13,1	13,5	19,5	8	75	0	6300	1,9	8
02.07.2014	15,7	16,8	13,4	14,3	21,6	5,7	71	0	7230	1,6	10,5
03.07.2014	16,5	18,6	17	17,9	27,6	8,3	64	0	8309	2,1	8,6

Tabelle 3.2: Wetterdaten-2015

Datum	Boden 20 cm [C°]	Boden 5 cm [C°]	Luft 20 cm [C°]	Luft 2 m (MW) [C°]	Luft 2 m (Max.) [C°]	Luft 2 m (Min.) [C°]	Rel- Luft- feuchte [%]	Nieder- schlag [mm]	Global- strahl- lung [W/m <sup>2</sup> ]	Wind [m s <sup>-1</sup> ]	Wind (Max.) [m s <sup>-1</sup> ]
03.06.2015	15,2	17,3	16,3	16,9	20	8,6	65	0	5089	3,7	10,4
04.06.2015	15,4	17,6	14,3	15,2	23,1	4,5	67	0	8121	1,4	7,3
05.06.2015	16,9	20,3	20,3	21,4	31,2	7,9	58	0	8171	2,1	8,7
06.06.2015	18,2	21,1	20,1	20,5	24,5	15	72	0,7	5688	2,6	8,1
10.06.2015	16,2	18,3	15,7	15,8	20,6	8,6	63	0	6563	2	8,8
11.06.2015	17,1	19,3	16,9	17,2	23	11,6	61	0	6790	1,8	9,2
12.06.2015	17,6	20,3	17,7	18,7	28,8	7,1	67	0	7818	1	4,3
13.06.2015	18,3	20,2	19	19,8	26,2	13,5	73	0,7	4033	2	8,8
14.06.2015	17,8	19,7	16,5	16,9	23,5	8,5	70	0	7455	2,2	7,1
28.06.2015	17,7	19,7	16,2	16,6	23,4	8,9	73	0,4	6673	1,1	4,9
29.06.2015	18,7	21,1	19,2	19,8	26,2	13	68	5	6464	1,8	7,5
30.06.2015	19,2	21,5	19,1	20	27,9	12	66	0,1	8161	1,1	5
01.07.2015	19,7	22	21,5	22,8	29,8	13,3	53	0	8114	2	7,6
02.07.2015	20,6	23,6	25,1	26,4	34,1	16,8	51	0	7974	2	7,5
03.07.2015	21,1	23,7	23,7	24,8	34,3	18	69	2,7	5753	1,2	4,5
31.07.2015	16,8	16,8	12,2	13,3	20,1	6,4	66	0	6089	1,5	8
01.08.2015	17	17,9	16	16,6	27,4	7,1	63	0	6666	1,2	6,4
02.08.2015	18,1	19,5	18,3	19,7	27,9	9,7	58	0	7168	1,3	5,6

### 3 Material und Methoden

für jedes Gerät eine Flächenbreite von 9 m zur Verfügung. So konnte immer die volle Maschinenarbeitsbreite genutzt werden. In den Versuchen zur Schwadbeschaffenheit erfolgte die Anlage abwechselnd (Schwad 1-3-5 [Variante 1] bzw. 2-4-6 [Variante 2]) Das Grüngut im Versuchsjahr 2014 bestand aus dem zweiten Schnitt eines Luzerne-Klee-Gras Gemenges (TM-Anteile 70-20-10 %). Die Luzerne befand sich zum Schnittzeitpunkt im Bereich 59-61 (Knospen kurz vor Blühbeginn) basierend auf der BBCH-Skala. Die mittlere Bestandeshöhe lag bei 0,82 m und der mittlere Trockenmasseertrag des Aufwuchses betrug im ersten Durchgang, 19.05.2014 bis 21.05.2014, 27,93 dt TM/ha, im zweiten, 31.05.2014 bis 02.06.2014, 28,49 dt TM/ha und im dritten, 01.07.2014 bis 03.07.2014, 37,12 dt TM/ha.

Im Versuchsjahr 2015 war das Grüngut der zweite bzw. dritte Schnitt eines Luzerne-Klee-Gras Gemenges (TM-Anteile 1. Versuchsreihe 30-40-30 %, 2. Versuchsreihe 70-20-10 %). Die unterschiedliche Bestandszusammensetzung ist auf das sehr trockene Frühjahr zurück zu führen, welches die Entwicklung der Luzerne beeinträchtigte. Die Versuchsreihen zur Untersuchung der Kreiselzettwenders fanden vom 30.06.2015 bis 01.07.2015 und am 01.08.2015 statt. Die Feldversuche mit den Schwadern fanden am 30.06.2015 und am 01.08.2015 statt. Den Versuchen zum Pressen und zur Trocknung ging ein Vorversuch vom 03.06.2015 bis 06.06.2015 voraus. Die eigentlichen Versuche fanden vom 10.06.2015 bis 14.06.2015, vom 28.06.2015 bis 03.07.2015 und vom 31.07.2015 bis zum 02.08.2015 statt. Die Luzerne befand sich nach der BBCH-Skala im Bereich 59-61 (Knospen kurz vor Blühbeginn). Die mittlere Bestandeshöhe lag bei 0,55 m. Der mittlere Trockenmasseertrag des Aufwuchses betrug bei der Versuchsreihe, welche am 28.06. begann, 36 dt TM/ha und bei der Versuchsreihe, welche am 31.07. begann, 27,76 dt TM/ha.

#### 3.4 Grundsätzlich eingesetzte Technik

Die Versuchspartellen wurden mit einem gezogenen ELHO Scheibenmäherwerk „Arrow 3200 PR“ (3,2 m AB) mit Walzenaufbereiter gemäht, Abbildung 10.1 auf Seite 130. Die Breite des Mähschwades wurde so eingestellt, dass das Futter nicht durch die Schlepperreifen überfahren wurde. Damit wurde ein Hineindrücken des Grüngutes in die nach dem Mähen noch feuchte Stoppel vermieden. Unmittelbar nach dem Mähen wurden die Futterschwade mit einem KUHN Kreiselzettwender „GF 8501 MH“ (8,5 m AB) breitgestreut, siehe Abbildung 10.2 auf Seite 131. Die Fahrgeschwindigkeit betrug 7,5 km/h, die Zapfwelldrehzahl 450 U/min und die Kreiseldrehzahl 140 U/min. Das Wenden erfolgte mit derselben Maschine.

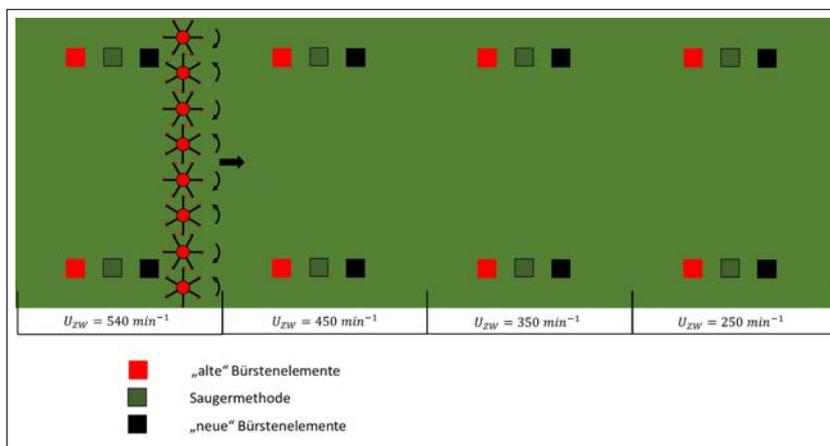
#### 3.5 Bröckelverluste in den einzelnen Verfahrensschritten

Die Versuche zum Schwaden fanden am 21.05., 02.06. und 03.07.2014 statt. Die Messungen begannen jeweils mit dem Einmessen der Fläche, der Bonitur des Grüngutbestandes sowie der Ermittlung des Trockensubstanzgehaltes. Abgeschlossen wurden die Messun-

gen nach dem Schwaden durch die Entnahme und das Wägen der Bröckelverluste. Zur Ermittlung der Bröckelverluste wurde die Bürstenmethode eingesetzt. Die verwendeten Bürstenelemente sind gehen zurück auf Untersuchungen von (vergl. BUCKMASTER 1993, S. 650) und (vergl. SAUTER J. et al. 2011, S. 199–200).

### 3.6 Bröckelverluste und Querverteilung beim Kreiselzettwender

Die Versuche fanden am 30.06., 01.07. und am 01.08.2015 statt. Innerhalb der Versuchsreihe wurden zwei Bereiche abgedeckt: Zum einen wurden die Messmethoden zur Bestimmung von Bröckelverlusten parallel verwendet und zum anderen wurde die Auswirkung einer Variation des Maschinenparameters „Kreiseldrehzahl“ untersucht. Die Bröckelverluste wurden dabei mittels der Bürsten- und der Saugermethode aufgenommen. Beide Versuchsbereiche wurden in einem Versuch kombiniert durchgeführt und besitzen den gleichen Versuchsaufbau, siehe Abbildung 3.1.



Darstellung: B. Bohne

Abbildung 3.1: Lage der Messpunkte bei der Bestimmung der Bröckelverluste beim Wenden

Die Bereiche für die Messelemente wurden nach dem Zetten von Hand mit einer Heugabel freigeräumt. Nach Platzieren bzw. Absaugen der entsprechenden Messfläche wurde das Halmgut vorsichtig wieder auf die Messstrecke gelegt. Die Messpunkte befinden sich jeweils auf der linken bzw. rechten Seite an den äußeren zueinander rotierenden Kreiseln. Auf jeder Seite befanden sich drei Messpunkte hintereinander, siehe Abbildung 3.2 auf der nächsten Seite. Den Anfang der Messstrecke bildeten jeweils die alten Bürstenelemente, das Ende der Messbahn die neuen Bürstenelemente. Die Messfläche der Bürstenelemente betrug ca.  $500 \times 500 \text{ mm}$  ( $0,25 \text{ m}^2$ ). Um die gleiche Höhe von Bürstenelementen und Stoppeln zu erreichen, wurden die Bürstenelemente durch Entfernen der Grassode an der vorgesehenen Stelle im Boden versenkt. Der Abstand der Messpunktmitten betrug 3 m. Zwischen den beiden Bürstenelementen wurde der

### 3 Material und Methoden

Messpunkt für die Staubsaugermethode platziert. Mit einem Messrahmen wurde auch hier eine Fläche von  $0,25 \text{ m}^2$  bestimmt und mit Kunststoffstäben entsprechend markiert. Anschließend wurden die Bereiche für die Saugermethode kreuzweise mit einem Industriesauger abgesaugt. Hierdurch sollten die Messflächen von losem Erdreich und tief in den Stoppel sitzendem Material, wie beispielsweise Düngerückstände, befreit werden. Diese Rückstände würden sonst beim Aufsaugen der eigentlichen Bröckelverluste das Ergebnis beeinflussen. Durch das zweimalige Saugen, vor und nach dem Wenden kann dieser Einfluss vermindert werden. Durch die gleiche Größe der Messflächen sind die Ergebnisse der Bröckelverluste miteinander vergleichbar.



Foto: B. Bohne

Abbildung 3.2: Messbahn der Bröckelverlustmessung

Der oben beschriebene Versuchsaufbau deckt den Bereich zur Bestimmung des Einflusses der Kreiseldrehzahl ab. Weiterhin lässt er einen Vergleich der angewendeten Methoden untereinander zu. Der Versuchsaufbau entspricht der Abbildung 3.1 auf der vorherigen Seite und ist so gestaltet, dass das Zugfahrzeug mit angebautem Kreiselzettwender über die Versuchsfläche fahren kann. Durch die Einteilung der Versuchsparzelle in vier 100 m lange Abschnitte können zu jeder Kreiseldrehzahl die Bröckelverluste mit den unterschiedlichen Messmethoden aufgenommen werden. In jedem Versuchsabschnitt befinden sich sechs Messpunkte für eine vordefinierte Drehzahl. Die Messpunkte der einzelnen Messstrecken wurden mit unterschiedlichen Kreiseldrehzahlen angefahren. Die Einstellung der verschiedenen Kreiseldrehzahlen erfolgte über die Veränderung der Zapfwelldrehzahl (in Klammern dargestellt).

1. 160 U/min (540 U/min) Fahrgeschwindigkeit (FG) 7,2 km/h
2. 140 U/min (450 U/min) FG 7,2 km/h

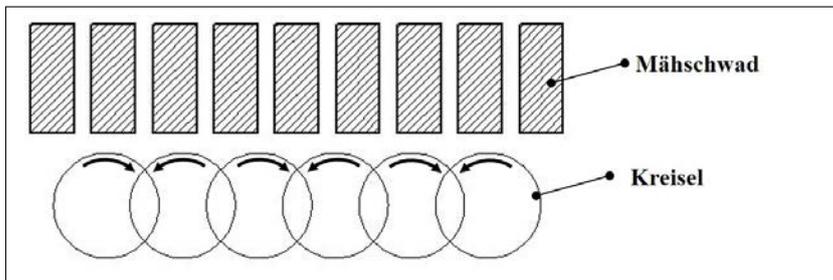
### 3 Material und Methoden

3. 108 U/min (350 U/min) FG 7,2 km/h
4. 78 U/min (250 U/min) FG 6,4 km/h

Um als einzige Variable den Einfluss der Kreiseldrehzahl untersuchen zu können, wurde versucht die Fahrgeschwindigkeit konstant zu halten, was mit Ausnahme der langsamsten Drehzahl auch gelang.

In den Versuchen zur Querverteilung wurden zum einen unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten und deren Einfluss auf die Querverteilung untersucht, zum anderen wurden unterschiedliche Schwadabstände realisiert, gezettet und danach die Querverteilung gemessen. Die Messung der Querverteilung erfolgte nach DLG-Standard durch ein Messraster von einem Meter. Hierzu wurde in Meterabständen die Masse des Erntegutes aufgenommen und gewogen. Aus den aufgenommenen Massen wurde der Variationskoeffizient (VK) errechnet. Er beschreibt die Kennzahl für die Streuung eines Merkmals und entspricht der Standardabweichung dividiert durch den Mittelwert. Der VK dient nach DLG Standard als Maß für die Güte der Querverteilung. Je kleiner der Variationskoeffizient, desto gleichmäßiger die Querverteilung.

Die Versuche fanden am 02.07.2015 bzw. am 05.08.2015 auf einem Praxisbetrieb in Mittelhessen statt. Der Ertrag des grasbetonten Grünfuttermengens lag in Versuch 1 bei 26 dt/ha und im Versuch 2 bei 24 dt/ha. In beiden Versuchen wurde ein Kreiselzettwender der Fa. KUHN vom Typ GF 6301 MHO, AB 6,5 m eingesetzt, der Streuwinkel betrug 15°. Jede Variante wurde dreimal wiederholt. Im ersten Versuch betrug die Breite des Mähschwades 0,7 m und der Mähschwadabstand 0,3 m, der zentrale Schwad lag in der Mitte der Arbeitsbreite. Zum besseren Verständnis und zur Einordnung ist in Abbildung 3.6 auf der nächsten Seite die Lage der Mähschwade dargestellt. Die Fahrgeschwindigkeit wurde in Stufen von 3,5 km/h, 6,0 km/h und 9 km/h variiert. Die Zapfwelldrehzahl wurde konstant bei 450 U/min gehalten, was einer Kreiseldrehzahl von 140 U/min entspricht.

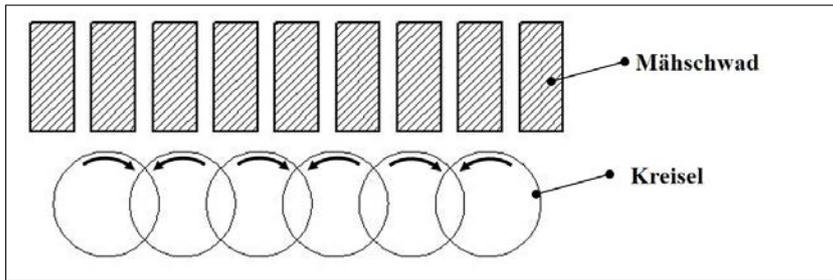


Darstellung: R. Dietrich

Abbildung 3.3: Lage der Mähschwade im Versuch mit Variation der Fahrgeschwindigkeit

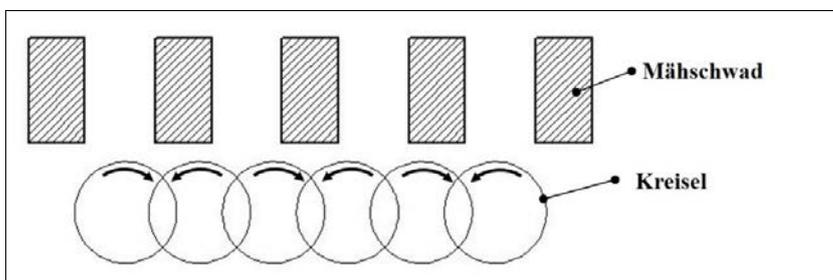
Im zweiten Versuch war eine Variante identisch mit der oben beschriebenen, zusätzlich wurde eine Variante mit 0,9 m einem breiten Schwad und 0,3 m Schwadabstand angelegt und noch eine Variante mit 1,2 m breiten Schwaden und 0,5 m Schwadabstand. Auch in diesen Varianten lag der zentrale Schwad stets in der Mitte der Arbeitsbreite. Die Fahrgeschwindigkeit betrug 6 km/h und die Zapfwelldrehzahl 450 U/min. Zur

Verdeutlichung sind nachfolgend die drei unterschiedlichen Varianten der Schwadanlage dargestellt.



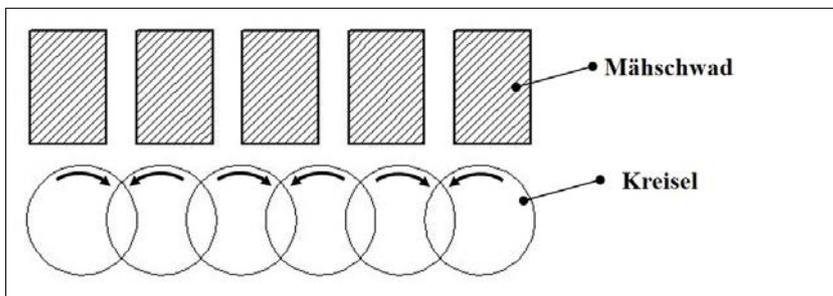
Darstellung: R. Dietrich

Abbildung 3.4: Lage der Mähschwade in der Variante 1



Darstellung: R. Dietrich

Abbildung 3.5: Lage der Mähschwade in der Variante 2



Darstellung: R. Dietrich

Abbildung 3.6: Lage der Mähschwade in der Variante 3

### 3.7 Bröckelverluste über den Rechweg beim Schwader

Die Schwaderversuche fanden in drei Durchgängen statt und es wurden dieselben Methoden zur Bröckelverlustbestimmung angewendet, wie auch schon unter Abschnitt 3.6 auf Seite 20 beschrieben. Die Anordnung der Messelemente wurde jedoch an die zu untersuchenden Maschinen angepasst. Um die Erhebung der Bröckelverluste über

### 3 Material und Methoden

die Arbeitsbreite zu ermöglichen, wurden die Messelemente gleichmäßig über die Maschinenarbeitsbreite verteilt. Im Falle des Schwaders mit Mittelschwadablage lagen die Messpunkte in einer Linie quer zur Fahrtrichtung, siehe Abbildung 3.7, da die Schwadbildung hier durch einen portionsweisen Quertransport des Grüngutes erfolgt.

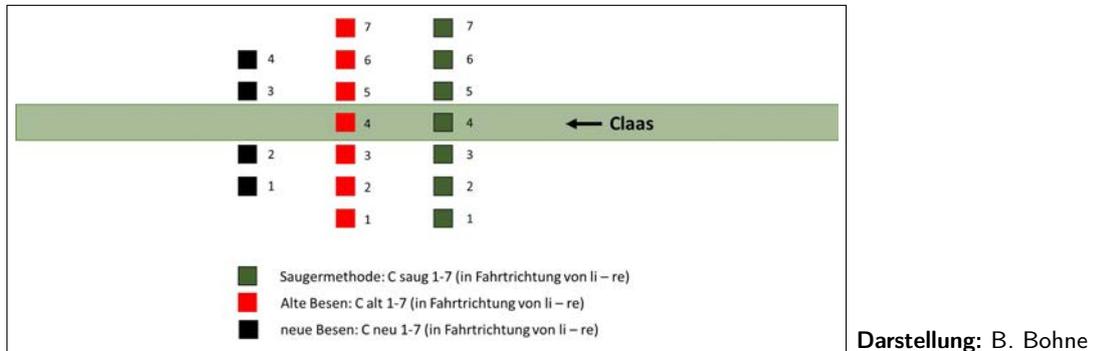


Abbildung 3.7: Anlage der Messpunkte beim CLAAS Liner 2900

In der Messparzelle des Schubrechtschwaders wurden die Messelemente V-förmig angeordnet, um den bauartbedingten rollenden Längstransport des Grüngutes über eine Strecke von ca. 1,5 m zu berücksichtigen, siehe Abbildung 3.8.

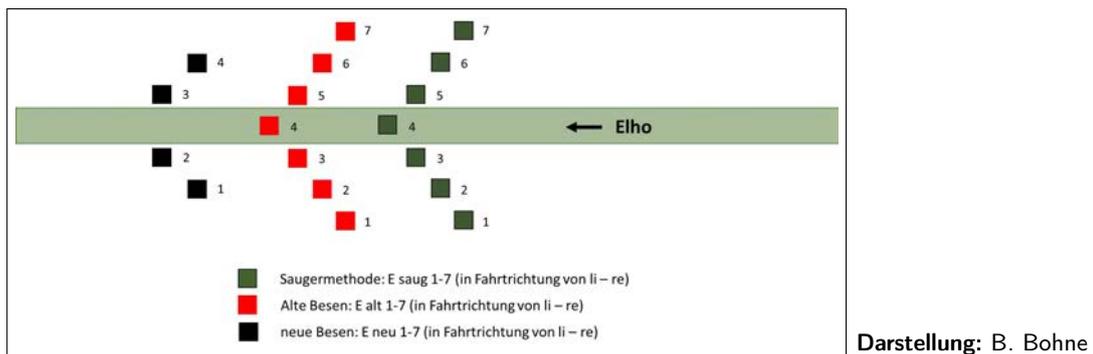


Abbildung 3.8: Anlage der Messpunkte beim ELHO V-Twin 750

Die Schwader wurden so eingestellt, dass die Schwadbreite 1,5 m bis 1,6 m betrug. Die Schwadmasse lag im Mittel bei 3,5 kg FM/m. Geschwadet wurde im ersten Durchgang bei einem TS-Gehalt von 56 %, im zweiten bei 82 % und im dritten bei 76 %. Eine weitere Angleichung war aufgrund der Witterungsbedingungen während der Versuche nicht möglich.

### 3.8 Schwadbeschaffenheit bei Zweikreisel- und Schubrechtschwader

Die Gutbewegungen beim Schwaden wurden qualitativ durch die Einfärbung von rechteckigen Flächen (Kantenlänge 1,5 m mal 0,75 m) im liegenden Grüngut und anschließender Bonitur des Ablageortes im Schwad dokumentiert. Nach dem Abschluss des Schwadens erfolgte die Profilmessung. Die Schwadmasse wurde durch Herauslösen von 1 m Schwad und anschließendem Wägen bestimmt.

Zum Schwaden wurde ein CLAAS Zweikreisel-Schwader mit Mittenschwadablage „Liner 2900“ mit einer Arbeitsbreite von 8,3 m (Variante 1) und ein ELHO Schubrechtschwader „V-Twin 750“ (Variante 2), Arbeitsbreite 8,4 m eingesetzt, siehe Abbildung 10.3 auf Seite 131 und Abbildung 10.4 auf Seite 132.

### 3.9 Pressen der Heurundballen

Parallel zur langen Seite der Fläche wurden mit einem Schubrechtschwader 8 Schwade angelegt. Die Schwade wurden abwechselnd (Schwad 1-3-5-7 Variante 1 bzw. Schwad 2-4-6-8 Variante 2) mit den verschiedenen Pressen aufgenommen.

Beim Pressgut handelte es sich um den 3. Schnitt eines Luzerne-Klee-Gras Gemenges (TM Anteile 70-20-10 %). Der Hauptbestandbildner befand sich laut BBCH Skala im Bereich 59-61 (Knospen kurz von Blühbeginn). Die mittlere Bestandeshöhe der Luzerne lag bei 0,81 m. Der mittlere Trockenmasseertrag des Aufwuchses betrug 23,77 dt TM/ha.

Am Versuchstag (18.07.2014) betrug vor dem Pressen die Schwaddichte im Mittel 3,5 kg/m<sup>3</sup>/FM bzw. 2,5 kg/m<sup>3</sup>/TS. Die mittlere Breite betrug 1,55 m und die größte Höhe 0,3 m, zur Mitte hin fiel das Schwad auf 0,25 m ab. Der durchschnittliche Trockensubstanzgehalt des Halmgutes zu Beginn des Pressens betrug 70,4 %.

Das Pressen erfolgte 5 bis 6 Stunden nach dem Schwaden noch am selben Tag. Dazu wurden die KRONE Comprima F 155 Vario Bale (Variante 1) mit einem Pressdruck 40 bar und die VICON RV 1901 progressive density plus (Variante 2) mit 50 bar Pressdruck eingesetzt. Der Pressdruck wurde bei beiden Pressen so niedrig wie technisch vertretbar eingestellt, um einerseits einen möglichst lockeren Ballen zu erzeugen (Zielwert 120 kg/m<sup>3</sup>/TS) und um andererseits einen sicheren Antrieb der Presskammerbänder zu gewährleisten. Die Fahrgeschwindigkeit betrug in beiden Varianten 11 km/h. Die Netzbindung erfolgte mit 4 Wicklungen. Bei der Comprima wurde zur Ballengröße die maximal mögliche Einstellung vorgewählt, was letztendlich zu Ballen mit ca. 1,4 m Durchmesser führte. Es wurden insgesamt 20 Ballen gepresst: 10 von der Variante 1 (KRONE) und 10 von der Variante 2 (VICON).

Zu den Versuchen im Jahr 2015 betrug die Breite des zum Pressen vorbereiteten Schwads 1,5 m bis 1,6 m, die Schwadhöhe lag zwischen 0,35 m und 0,4 m. Die Schwaddichte bewegte sich zwischen 3,0 und 3,5 kg/m<sup>3</sup>/FM. Dabei wurde wiederum auf eine gleichmäßige Schwadbeschaffenheit besonderer Wert gelegt, Abbildung 3.9 auf Seite 27. Zum Pressen des Grüngutes wurden wiederum die Rundballenpressen KRONE

### 3 Material und Methoden

Comprima F 155 Vario Bale (Variante 1) und VICON RV 1901 progressive density plus (Variante 2) eingesetzt. Die Netzbindung der Ballen erfolgte mit 4 Wicklungen. Der Zieldurchmesser der Ballen war 1,4 m. Eine besondere Weichkerneinstellung wurde nicht vorgenommen. In Absprache mit dem Prüfungsausschuss für Grünlandlandtechnik der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft (DLG) wurde die Fahrgeschwindigkeit des Schlepper-Pressen-Gespannes so gewählt, dass unter den vorherrschenden Bedingungen die Presszeit für die Rundballen einheitlich 60 Sekunden betrug.

Der Trockensubstanzgehalt (TS) des Grüngutes zum Zeitpunkt des Pressens betrug:

- Vorversuch: 83 %
- Versuchsperiode 1: 70 %
- Versuchsperiode 2: 80 %
- Versuchsperiode 3: 77 %

Die Pressdruckeinstellung bei der KRONE Presse wurde zwischen Vorversuch und den Versuchsperioden verändert. Der Wert 40 bar bei der KRONE Presse markierte im vorliegenden Einsatzbereich auch den minimalen Wert, welcher einen zuverlässigen Antrieb des Rollbodens ermöglichte. Eine Veränderung der Einstellung innerhalb einer Versuchsperiode wurde nicht durchgeführt, da die begrenzte Trocknungskapazität eine Untersuchung zusätzlicher Varianten nicht zugelassen hat. Der gewählte Ablauf ermöglichte es, die Ergebnisse der radiometrischen Dichtemessung auch gleichzeitig für die Interpretation des Trocknungsverlaufs zu nutzen. Dabei wurde ein Einfluss durch die Variation der Grüngutbeschaffenheit zwischen den Versuchsperioden in Kauf genommen. Der Pressdruck von 60 bar wurde bei der VICON Presse gewählt, da dieser Wert auch hier das Minimum zum sicheren Antrieb der Kammerbänder darstellte. Da die daraus folgende Dichte der Ballen unterhalb des Zielbereichs war, wurde der Pressdruck ab Versuchsperiode 2 angepasst.

Folgende Pressdrücke (bar) wurden bei den Pressen eingestellt:

- Vorversuch: KRONE 50 bar; VICON 60 bar
- Versuchsperiode 1: KRONE 40 bar; VICON 60 bar
- Versuchsperiode 2: KRONE 40 bar; VICON 65 bar
- Versuchsperiode 3: KRONE 40 bar; VICON 65 bar

#### 3.10 Bestimmung der Ballendichte

Um die Ballendichte zerstörungsfrei, präzise und wiederholbar zu bestimmen, wurde die radiometrische Messmethode ausgewählt. Dazu wurde der Prüfstand im DLG Testzentrum für Technik und Betriebsmittel in Groß-Umstadt genutzt, siehe Abbildung 3.10 auf Seite 28. Die Prüfeinrichtung wurde vor den Messungen auf Heu kalibriert. Die Messungen fanden auf der Kreisfläche in Winkeln von 0, 30, 60, 90, 120 und 150 Grad statt. Der Intervall der Messungen entlang der zentralen Linie lag bei 5 cm. Die erhobenen Einzelmesswerte wurden mit der im Testzentrum vorhandenen Software



Foto.: B. Bohne

Abbildung 3.9: Profil der mit dem ELHO Schubrechschwader erzeugten Schwade

interpoliert und grafisch dargestellt. Zum Zeitpunkt der Dichtemessungen hatten die Ballen durchweg einen Trockensubstanzgehalt (TS) von  $> 85\%$  erreicht.

### 3.11 Trocknungsverlauf der Heurundballen

Die Trocknung der Ballen begann noch am selben Tag unmittelbar nach dem Pressen und Abtransportieren der Ballen. Zur Trocknung wurde die betriebseigene Trocknungsanlage vom Typ Kombi-FLEX der Fa. LASCO aus Lochen am See (Österreich) mit einer Kapazität von 20 Ballen (10 Ballen in der unteren Lage, 10 Ballen in der oberen Lage) eingesetzt. Die Anlage verfügt über einen 7,5 kW Lüfter, welcher bei 600 Pa eine Luftmenge von  $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$  liefert. Die Trocknung verfügt zusätzlich über ein Heizregister, welches erlaubt die Temperatur der Trocknungsluft im Vergleich zur Umgebungsluft um max.  $10^\circ\text{C}$  zu erhöhen. Die Anordnung der Ballen auf dem Trocknungskanal ist der Abbildung 3.11 auf der nächsten Seite am Beispiel der unteren Ballenlage zu entnehmen. In der oberen Lage wurden die nächsten 10 Ballen so angeordnet, dass die Ballen am Trocknungsplatz unten und oben von derselben Presse stammten (Bsp.: Krone auf Krone).

Mit Ausnahme der Ballenmasse, fanden die Messungen nur an den Ballen der unteren Ebene statt. Um den Trocknungsprozess zu beschreiben wurden das Ballengewicht, die Luftströmung an der Ballenoberfläche und der statische Druck im Ballen gemessen, siehe Abbildung 3.12 auf Seite 29. Die Luftströmungsgeschwindigkeit wurde mittels Trichter

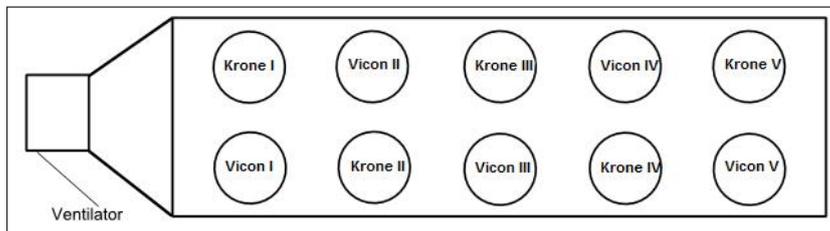
### 3 Material und Methoden



Foto: B. Bohne

Abbildung 3.10: Messungen mit dem radiometrischen Dichteprüfstand im DLG-Testzentrum

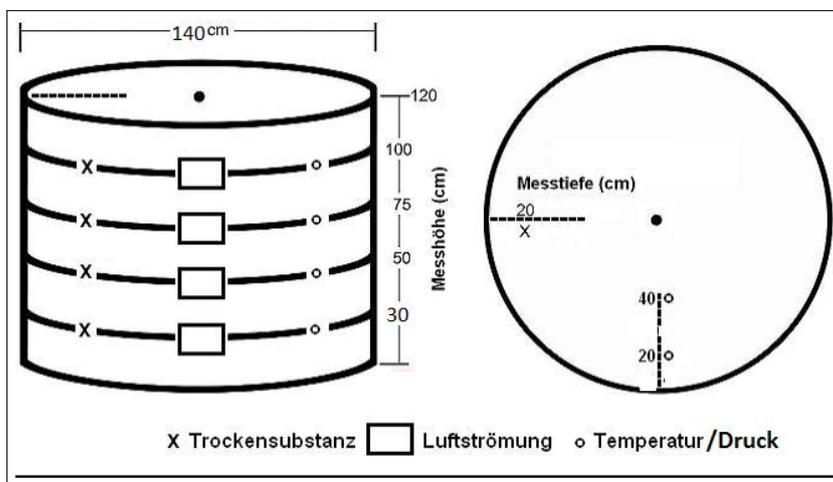
und Anemometer in vier Messhöhen und an drei Seiten des Ballens durchgeführt. Der statische Druck wurde mit einer Messlanze an einer Seite, in vier Messhöhen und sieben Messtiefe aufgenommen.



Darstellung: B. Bohne

Abbildung 3.11: Anordnung der 10 Rundballen in der unteren Lage des Trockners

### 3 Material und Methoden



Darstellung: B. Bohne

Abbildung 3.12: Anordnung der Messpunkte am Rundballen

## 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

Die im folgenden Kapitel dargestellten Grafiken wurden mit dem Statistik Programm IBM SPSS 22 bzw. 24 erstellt.

### 4.1 Trocknungsverlauf im Grüngut

Der Abbildung 4.2 auf der nächsten Seite sind die Mittelwerte der Messungen des Trockensubstanzgehaltes (TS) im Grüngut im Versuchsjahr 2014 zu Beginn der einzelnen Verfahrensschritte zu entnehmen. Der TS-Verlauf wird durch eine Interpolationslinie dargestellt. Die rote Linie markiert den für die Rundballentrocknung angestrebten TS-Gehalt von 70 %. Dieser wurde in nahezu allen Durchgängen erreicht. Der steile Anstieg des Trockensubstanzgehaltes zwischen dem ersten und zweiten Wenden im ersten Durchgang ist damit zu erklären, dass in diesem Falle eine größere Zeitspanne zwischen den Verfahrensschritten lag. Auf einen dritten Wendevorgang wurde im ersten Durchgang verzichtet.

In der Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite ist der Trockensubstanzverlauf durch Interpolationslinien in Abhängigkeit von der Trocknungszeit aufgetragen. Auch hier steht die rote Linie auf der y-Achse wieder für den angestrebten TS-Gehalt von 70 %.

### 4.2 Bröckelverluste in den einzelnen Verfahrensschritten

In den nun folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Bröckelverlustmessungen des Versuchsjahres 2014 dargestellt. Die Abbildung 4.3 auf Seite 32 zeigt die gemessenen Bröckelverluste (BV) getrennt nach Durchgängen und Verfahrensschritten. Im ersten Durchgang traten TM-Verluste in Höhe von 22 % auf, im zweiten Durchgang von 33 % und im dritten Durchgang von 16 %.

Werden nun die gemessenen BV aller Versuchsdurchgänge des Verfahrensschritts „Schwaden“ zusammen genommen und in einer Boxplotgrafik dargestellt, so ergibt sich das in Abbildung 4.5 auf Seite 33 dargestellte Bild. Die gemessenen BV zwischen den beiden Varianten unterscheiden sich nur marginal.

Die parallele Verwendung von drei Methoden zur Ermittlung der BV im Versuchsjahr 2015 ermöglichte den in Abbildung 4.2 auf Seite 34 dargestellten Vergleich. Die Ergebnisse beziehen sich auf alle Versuchsdurchgänge. Durch die Verwendung eines Boxplot-Diagramms sind der Median und die Streuung der Ergebnisse erkennbar.

Bei den „alten Bürstenelementen“ ist die Streuung geringer, als bei den „neuen Bürstenelementen“ und der „Saugermethode“. Auch liegt der Median unterhalb der

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

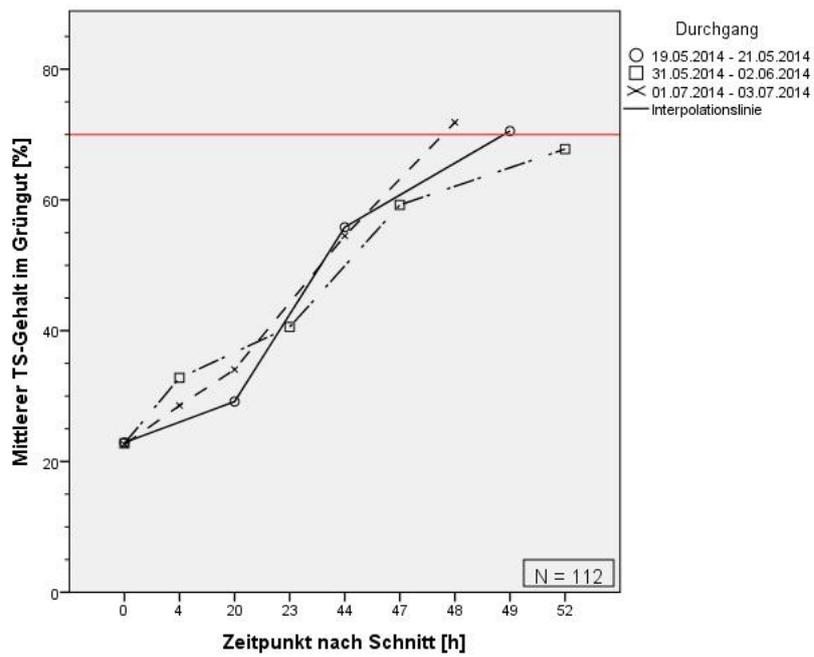


Abbildung 4.1: Zeitlicher Verlauf des Trockensubstanzgehalts im Grüngut

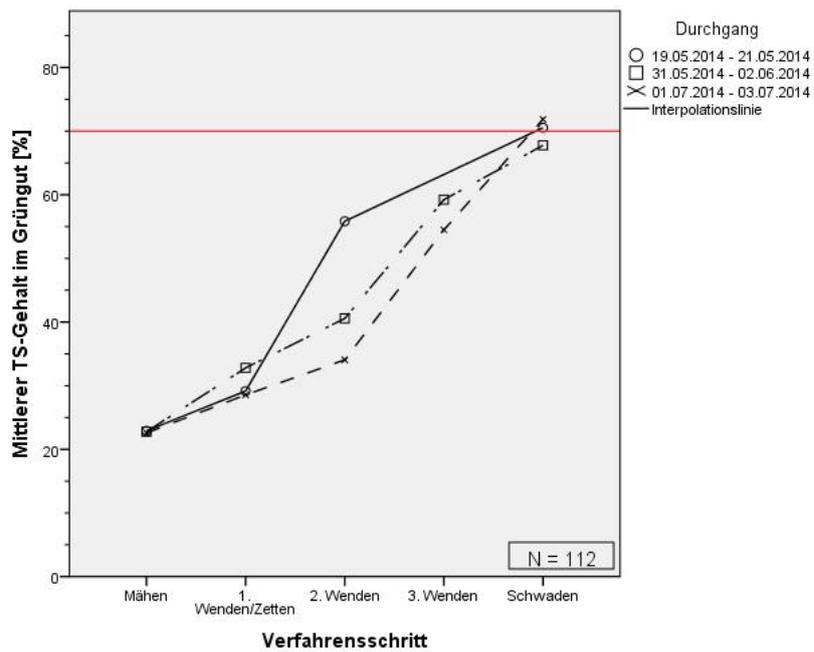


Abbildung 4.2: Trockensubstanzgehalt im Grüngut bei den einzelnen Verfahrensschritten

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

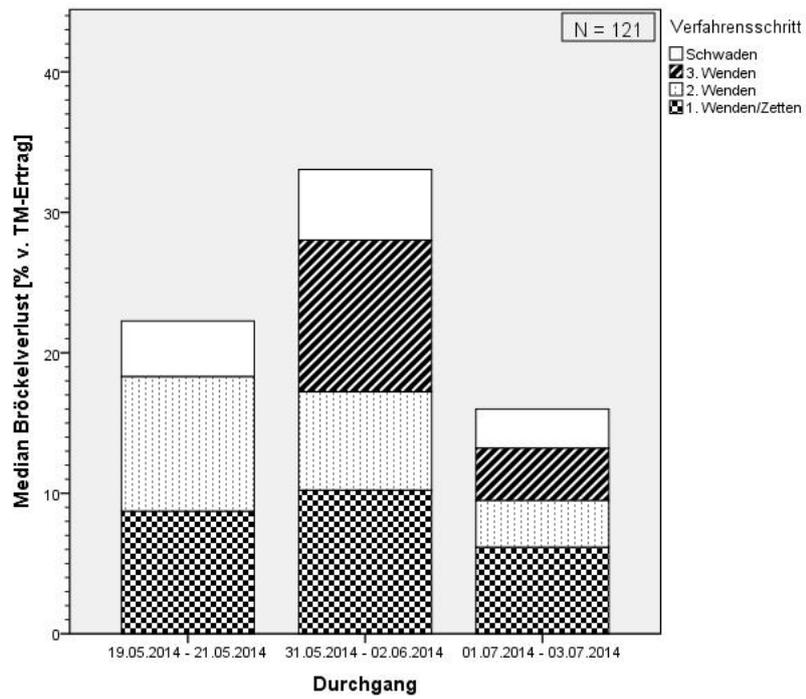


Abbildung 4.3: Bröckelverluste nach Verfahrensschritten

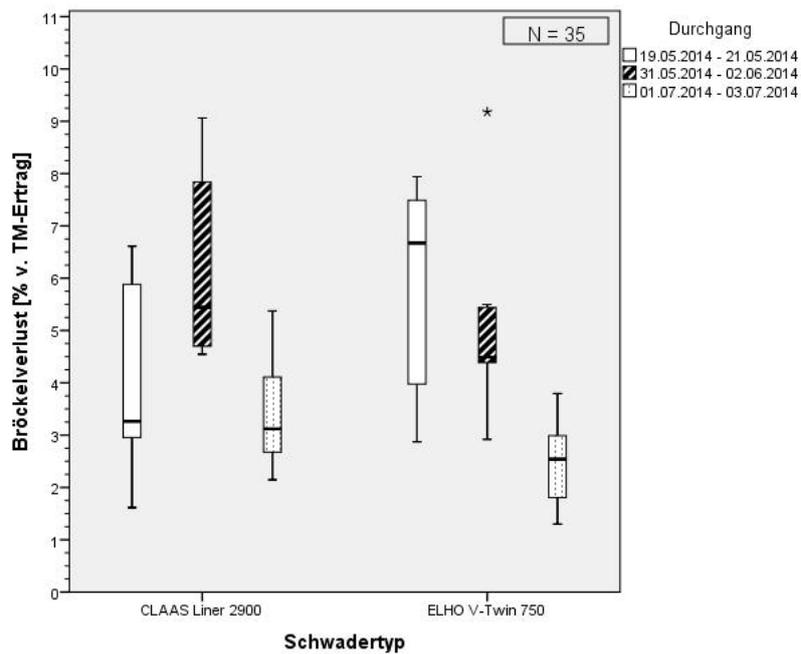


Abbildung 4.4: Bröckelverluste beim Schwaden nach Versuchsdurchgängen

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

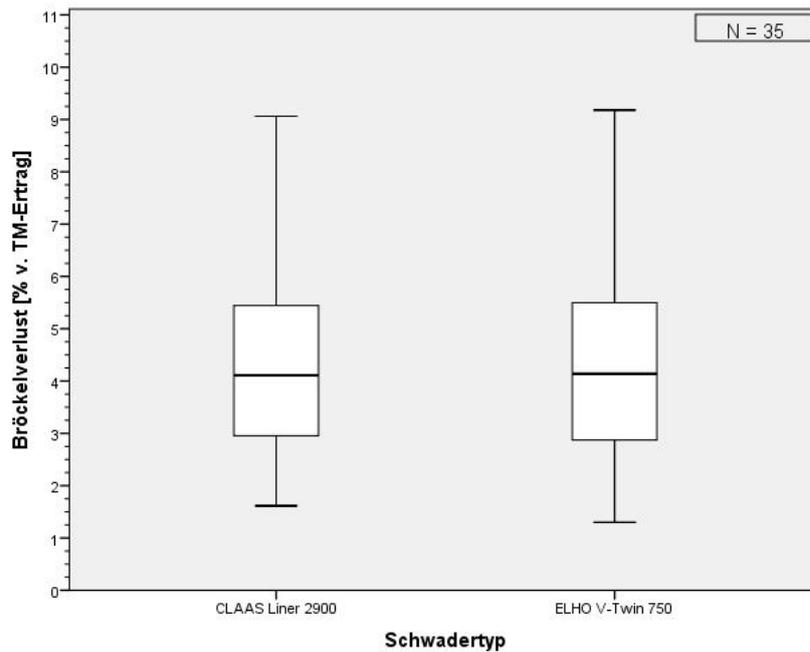


Abbildung 4.5: Vergleich der Bröckelverluste beim Schwaden über alle Versuchsdurchgänge

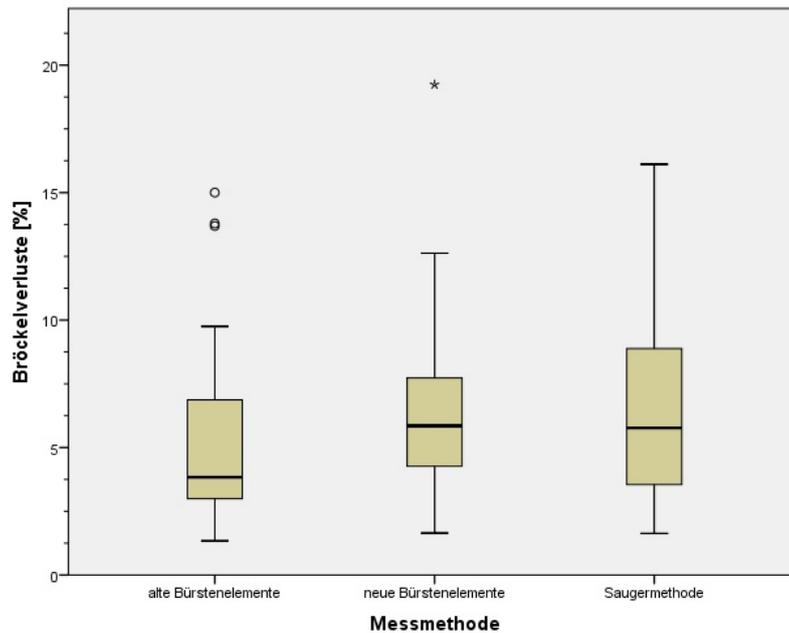
beiden anderen Messmethoden. Die Ausreißer entstammen allesamt aus der zweiten Versuchsreihe bei einem TS-Gehalt von 68 %. Ein Grund kann der hohe Luzerneanteil in dieser Versuchsreihe sein, welcher aufgrund der lockeren Blätter dieser Pflanze die Bröckelverluste erhöht. Basierend auf dieser Auswertung, werden in den folgenden Darstellungen nur die Ergebnisse verwendet, welche mit den „alten Bürstenelementen“ erzielt wurden.

### 4.3 Bröckelverluste und Querverteilung beim Kreiselzettwender

Die Bröckelverluste (BV) sind als Prozentwert vom Gesamtertrag errechnet. In der ersten Versuchsreihe, siehe Abbildung 4.7 auf Seite 35, betrug der Grünmasseertrag 36 dt/ha. Der Trockensubstanzgehalt (TS) beim ersten Wendevorgang betrug 46 %. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Drehzahl die BV zunehmen.

Der zweite Wendedurchgang der ersten Versuchsreihe erfolgte bei einem Trockensubstanzgehalt im Grüngut von 68 %. Bei den Ergebnissen fällt auf, dass im Vergleich zum ersten Wendedurchgang die BV nicht wesentlich höher sind, obwohl ein höherer TS-Gehalt vorlag. Eventuell liegt dies am 30 % Weidelgrasanteil im Grünlandaufwuchs, welches aufgrund seiner morphologischen Eigenschaften nicht zu BV neigt. Die Ausnahme bildet hier die Variante mit 250 U/min. Dies lässt sich damit erklären, dass es hier

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse



Darstellung: B. Bohne

Abbildung 4.6: Verteilung der Bröckelverlustmessungen nach Messmethoden

aufgrund der geringen Drehzahl und des hohen TS-Gehaltes eine leichte Schwadbildung eintritt. Dieser Schwad liegt nun mittig auf dem Messpunkt und beeinflusst das Messergebnis.

In der zweiten Versuchsreihe betrug der mittlere Ertrag 27,76 dt/ha, auch hier fand der zweite Wendedurchgang bei einem TS-Gehalt von 68 % statt, siehe Abbildung 4.8 auf der nächsten Seite. Allgemein liegen die BV oberhalb von den Ergebnissen der ersten Versuchsreihe. Als Grund kann der Anteil von 70 % Luzerne in der Grünfuttermischung genannt werden, welcher zu hohen BV neigt. Besonders deutlich ist dies bei hohen TS-Gehalten erkennbar.

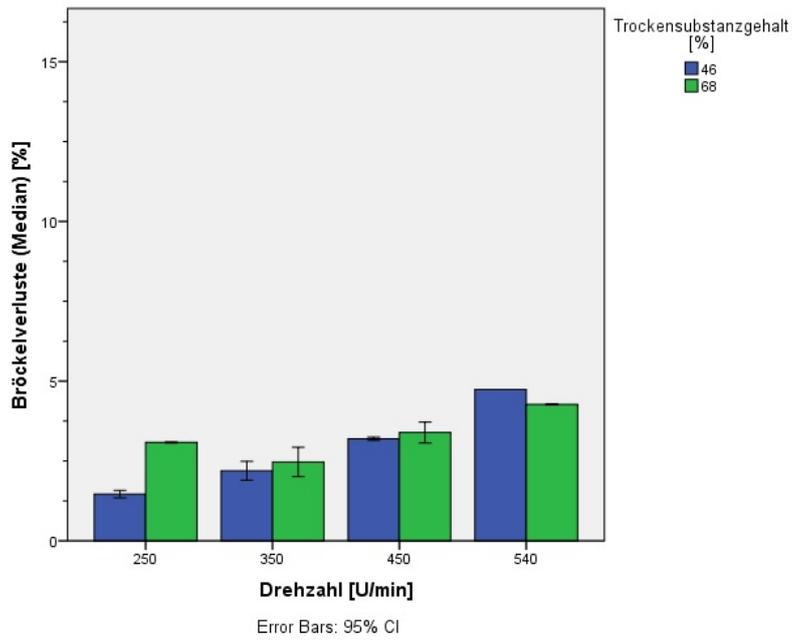
Nachfolgend sind die Ergebnisse der Untersuchungen der Einflüsse auf die Güte der Querverteilung beim Kreiselzettwender dargestellt. Die Darstellung erfolgt anhand von Grafiken und der Berechnung des Variationskoeffizienten (VK).

Aus der Darstellung der Querverteilung bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten Abbildung 4.9 auf Seite 36 ist zu erkennen, dass die Verteilung von der Fahrgeschwindigkeit abhängig ist. Der Variationskoeffizient (VK) für die Fahrgeschwindigkeit (FG) 3,5 km/h betrug 16 %, für die FG 5,8 km/h 21 % und für die FG 8,9 km/h 26 %. Der größte VK liegt damit bei der schnellsten FG vor.

Es folgen nun die Ergebnisse der Querverteilung bei unterschiedlichen Schwadabständen. Diese sind der Abbildung 4.10 auf Seite 36 zu entnehmen.

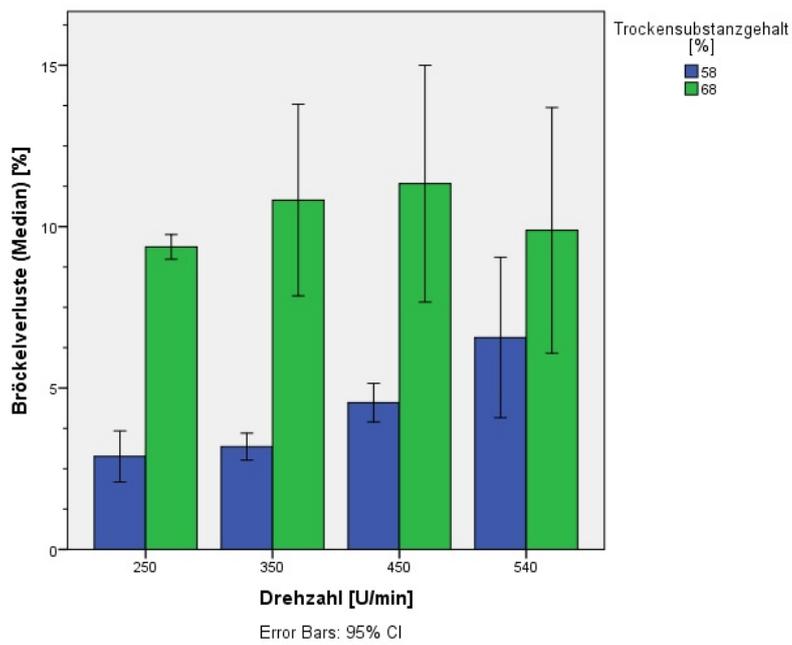
Der VK lag in der Schwadvariante 1 bei 30 %, in der Variante 2 bei 44 % und in der Variante 3 bei 28 %.

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse



Darstellung: B. Bohne

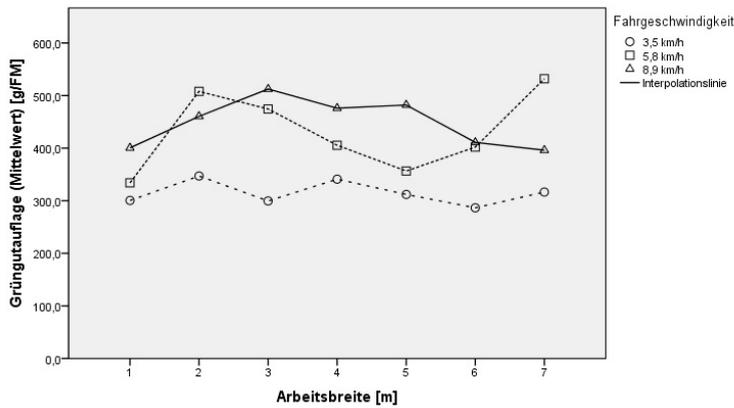
Abbildung 4.7: Gemessene Bröckelverluste im Versuch 1



Darstellung: B. Bohne

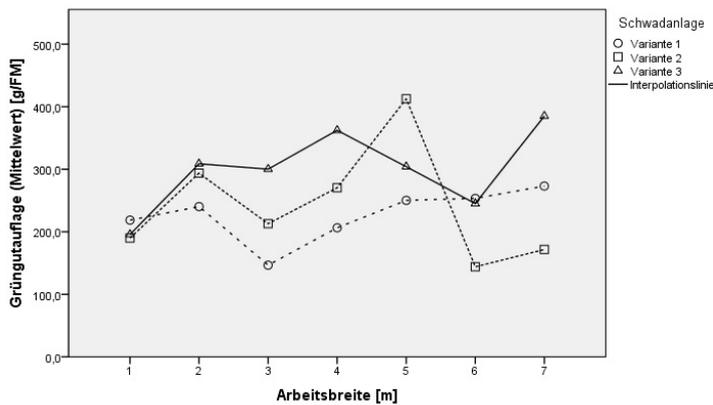
Abbildung 4.8: Gemessene Bröckelverluste im Versuch 2

## 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse



Darstellung: B. Bohne

Abbildung 4.9: Gemessene Querverteilung bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten



Darstellung: B. Bohne

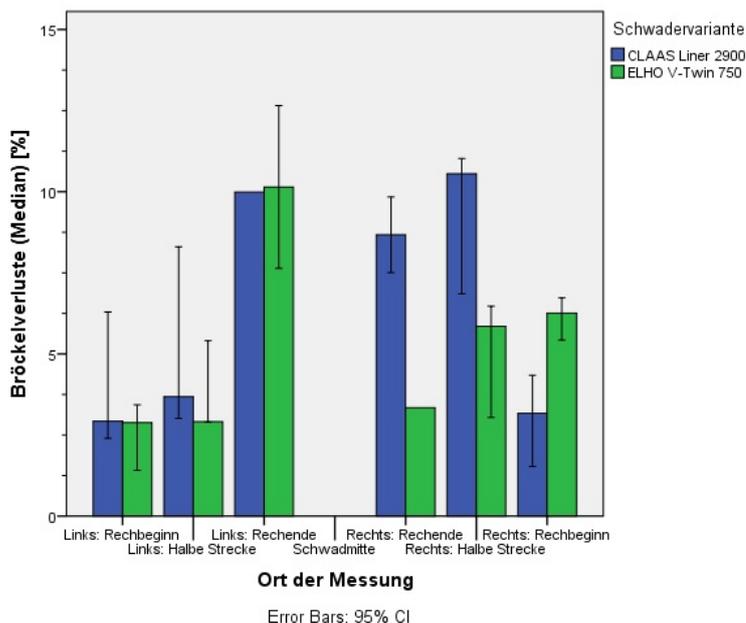
Abbildung 4.10: Gemessene Querverteilung bei unterschiedlicher Schwadanordnung

### 4.4 Bröckelverluste über den Rechweg beim Schwader

In die Auswertung der in Abbildung 4.11 auf der nächsten Seite dargestellten Ergebnisse sind die Resultate aller Versuchsdurchgänge mit eingeflossen.

Die Ergebnisse dokumentieren auf der linken Seite eine Erhöhung der Bröckelverluste mit der Zunahme des Rechweges. Leider zeigen sich diese Ergebnisse nicht auf der rechten Seite. Sodass noch kein eindeutiger Zusammenhang bewiesen werden kann. Auffällig ist die hohe Streuung der einzelnen Ergebnisse welche an der Länge der Fehlerbalken am Ende einer jeden Säule abzulesen ist.

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse



Darstellung: B. Bohne

Abbildung 4.11: Gemessene Bröckelverluste über die Arbeitsbreite der Schwader

### 4.5 Schwadbeschaffenheit bei Zweikreisel- und Schubrechtschwader

Wie schon der Versuchsbeschreibung angeführt, wurde zum einen versucht die Schwader so einzustellen, dass letztendlich ein ähnliches Schwadbild zu erwarten war, zum anderen aber Größen wie Arbeitsbreite, Zinkenhöhe usw. vergleichbar waren.

Die Abbildung 4.12 auf der nächsten Seite zeigt die gemessenen Schwadbreiten in Form eines Boxplots. Die Schwadbreite liegt im Median beim Zweikreisel-Mittelschwader bei 1,9 m und bei 1,8 m beim Schubrechtschwader. Der kleinste und größte Wert liegen bei 1,65 m und 2,1 m in der Variante 1 bzw. bei 1,45 m und 2,1 m in der Variante 2. Die in Abbildung 4.13 auf der nächsten Seite dargestellten Mittelwerte der Schwadhöhenmessung resultieren aus einer Messung im Querprofil des Schwads im Abstand von 0,4 m wobei ein Randbereich von 0,1 m an beiden Seiten des Schwads bis zum ersten Messpunkt verblieb. Die aufgetragenen Interpolationslinien ergeben ein M- bis trapezförmiges Oberflächenprofil. Die Spannweite der Ergebnisse, hier dargestellt durch die Fehlerbalken, liegt bei 0,09 m bis 0,18 m. Der Schwad des ELHO-Schwaders ist in den Messpunkten zur Mitte hin im Schnitt um etwa 0,05 m höher. Eine Begründung kann die geringere Schwadbreite sein Abbildung 4.12 auf der nächsten Seite, welche bei unveränderter Arbeitsbreite zu einer Vergrößerung der Schwadhöhe führt.

Die Abbildung 4.14 auf Seite 39 zu entnehmenden Schwadmassen ergeben mit Medianwerten von 2,69 kg TM/m in der Variante 2 im Vergleich zu 2,44 kg TM/m in der Variante 1 etwas höhere Werte für den ELHO-Schwader.

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

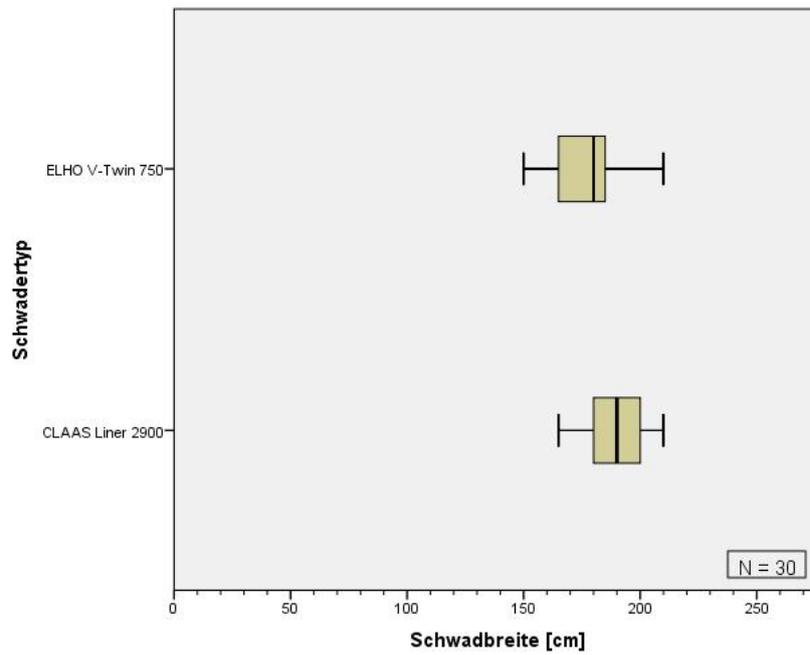


Abbildung 4.12: Gemessene Schwadbreiten

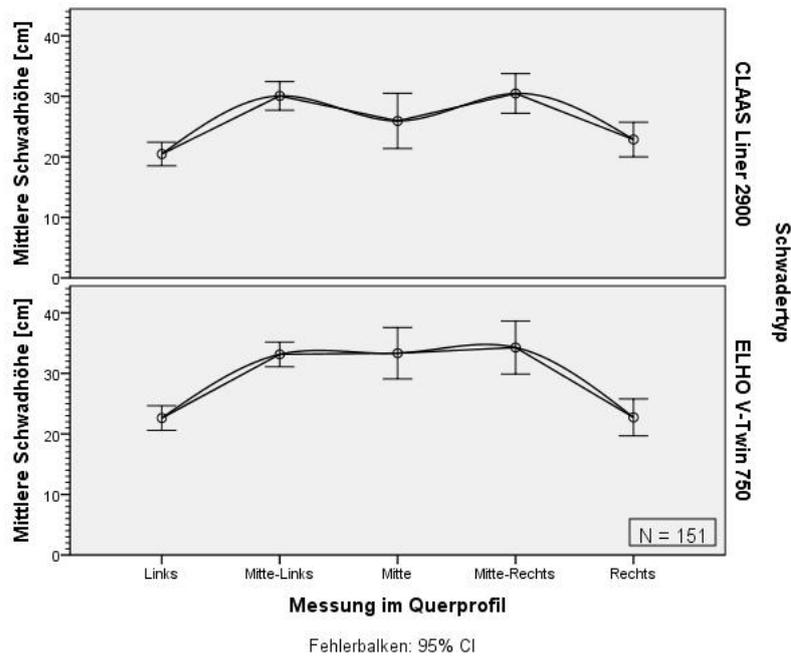


Abbildung 4.13: Gemessene Schwadhöhen

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

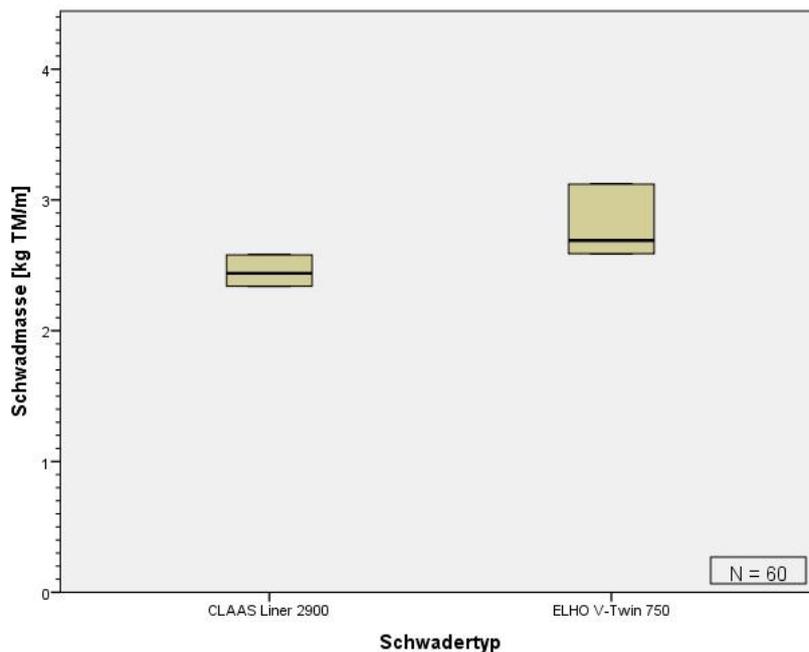


Abbildung 4.14: Masseverteilung der erzeugten Schwade

Für die Beschreibung der Halmausrichtung in den Schwaden ist bisher noch kein standardisiertes Messverfahren etabliert. Es wurde daher versucht mit Hilfe von Farbmarkierungen definierter Größe (1,5 m auf 0,75 m) die Gutbewegungen zu dokumentieren. Abbildung 4.16 auf der nächsten Seite und Abbildung 4.15 auf der nächsten Seite. Zu erwähnen ist die besondere Halmausrichtung, welche durch das Arbeitsprinzip des Schubrechschwaders hervorgerufen wird. Abbildung 4.16 auf der nächsten Seite. Durch das Rollen des Grüngutes beim Längstransport in den Schwad finden sich die Halme in der Form eines Stranges wieder. Demgegenüber tritt durch die kreisförmigen Rechbewegungen eines Zweikreiselschwaders mit Mittenschwadablage eher eine horizontale Schichtung der Halme auf, welche bei geringer Schwadbreite und hohen Rechmengen eine Tendenz zum Anstellen der Halme in der Schwadmitte bewirkt. Abbildung 4.15 auf der nächsten Seite. In den Versuchen kam diese Überhöhung des Schwades bedingt durch die Einstellung des Gerätes jedoch nicht vor. In den Abbildung 4.17 auf Seite 41 und Abbildung 4.18 auf Seite 42 ist die Lage der farblich markierten Flächen nach dem Schwaden dokumentiert. Das Arbeitsprinzip des Zweikreiselschwaders führt dazu, dass die vorher rechteckige Form der Messfläche sich eher als Quadrat im Schwad wiederfindet und die Halme leicht gemischt werden. Abbildung 4.17 auf Seite 41. Das Grüngut wird portionsweise direkt seitlich in den Schwad geführt, die Rechbewegung ist deutlich zu erkennen. Die Abbildung 4.18 auf Seite 42 zeigt das Ergebnis der Schwadformung des Schubrechschwaders. Das „Einrollen“ der Messflächen ist deutlich zu erkennen. Das eingefärbte Grüngut der Messfläche findet sich als Ganzes im Schwad wieder und das Einbringen des Grüngutes in den Schwad findet durch den rollenden Längstransport

um ca. 150 cm flächenversetzt in Fahrtrichtung statt.



Abbildung 4.15: Halmausrichtung beim Zweikreiselschwader mit Mittenschwadablage und zu gering gewählter Schwadbreite



Abbildung 4.16: Halmausrichtung im Querschnitt des Schwades beim ELHO-Schwader

## 4.6 Dichteverteilung in den Heurundballen

Im Versuchsjahr 2014 lag die errechnete Ballendichte aus den Abmessungen und dem Gewicht der Ballen in der Variante mit der semivariablen Presse bei  $115,97 \text{ kg TM/m}^3$  und bei der variablen Presse bei  $98,91 \text{ kg TM/m}^3$ . Die Dichteverteilung in axialer Richtung je eines beispielhaften Rundballens aus beiden Behandlungen ist in der Abbildung 4.19 auf Seite 43 dargestellt. Die beiden parallelen Linien innerhalb der Grafik begrenzen den gewünschten Dichtebereich von  $120\text{-}130 \text{ kg TM/m}^3$ . Der gewählte Messbereich ist etwas geringer als der Ballendurchmesser, um Beeinflussungen durch ungleichmäßig geformte Randbereiche zu vermeiden. Der Bereich zwischen  $0,6 \text{ m}$  und  $0,75 \text{ m}$  entspricht dabei der Ballenmitte.

Im Versuchsjahr 2015 wurde je Versuchsperiode und Variante bei einem Rundballen die Dichte bestimmt. Der Abbildung 4.20 auf Seite 44 und der Abbildung 4.21 auf Seite 44 ist zu entnehmen, dass der angestrebte Dichtebereich von  $120\text{-}130 \text{ kg TM/m}^3$  im Vorversuch nur bei der semivariablen Presse erreicht wurde, die variable Presse erreicht diese Verdichtung zum großen Teil nicht.

In der ersten Versuchsperiode wurde das Grüngut mit einem Trockensubstanzgehalt (TS) von  $70\%$  gepresst. Durch den höheren Wassergehalt im Grüngut erhöhte sich die Verdichtung, dies ist der Abbildung 4.22 auf Seite 45 und der Abbildung 4.23 auf Seite 45 zu entnehmen. Die Ballen der semivariablen Presse waren trotz geringerer Pressdruckeinstellung dichter. Die Ballen der variablen Presse erreichten nun den gewünschten Dichtebereich.

Zum Zeitpunkt des Pressens in der zweiten Versuchsperiode war das Grüngut mit einem TS-Gehalt von ca.  $80\%$  trockener. Der Ballen der semivariablen Presse wies nur in Teilen die gewünschte Dichte auf, siehe Abbildung 4.24 auf Seite 46, tendenziell war er zu locker. Dies spiegelt sich auch im Messdiagramm wieder. Während der Messung

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

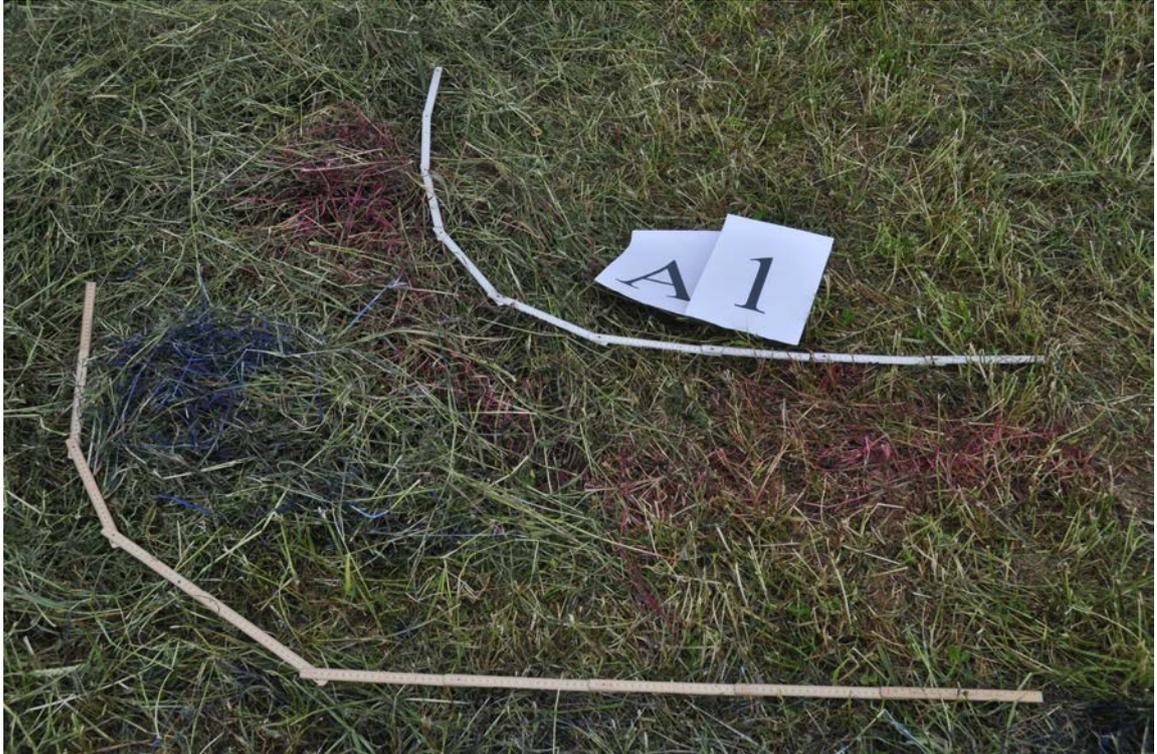


Abbildung 4.17: Grüngutbewegung beim Zweikreiselschwader

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse



Abbildung 4.18: Grüngutbewegung beim Schubrechsneider

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

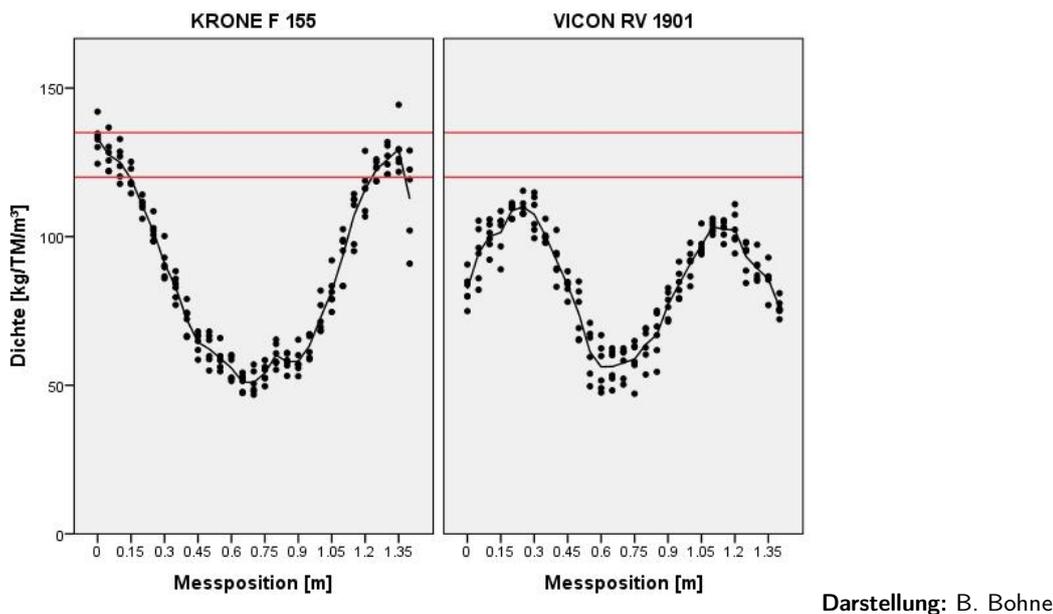


Abbildung 4.19: Axiale Dichteverteilung in den untersuchten Rundballen

konnte der Ballen nicht durchgängig seine zylindrische Form halten. Was zu Schwierigkeiten bei der Messung führte. Nach einer aufgrund der vorhergehenden Versuche angepassten DichteEinstellung wies der Ballen der variablen Presse nun die gewünschte Dichteverteilung auf, siehe Abbildung 4.25 auf Seite 46.

Die Grüngutbeschaffenheit in der dritten Versuchsperiode war der der vorangegangenen Versuchsperiode sehr ähnlich. Die Pressen wurden mit unveränderter Einstellung eingesetzt. In der Abbildung 4.26 auf Seite 47 und der Abbildung 4.27 auf Seite 47 sind Ähnlichkeiten zu erkennen. Wobei der Ballen der semivariablen Presse im mittleren Randbereich etwas fester ist, trotz unveränderter Einstellung.

### 4.7 Trocknungsverlauf der Heurundballen

Der Abbildung 4.28 auf Seite 48 sind die gemessenen Trockensubstanzwerte beider Behandlungen des Jahres 2014 zu entnehmen. In die Auswertung flossen 5 Ballen je Behandlung ein. In der Grafik markiert eine Linie einen Trockensubstanzgehalt von 70 % welches den Zielwert beim Pressen des vorgetrockneten Heus markiert. Die zweite Linie markiert einen Trockensubstanzgehalt von 87 % welcher den Wert für die Lagerfähigkeit des Heus darstellt. Die Proben wurden aus einer Tiefe zwischen 0,0 m und 0,2 entnommen.

In der Abbildung 4.29 auf Seite 48 ist der Verlauf der Ballenmassen während der Trocknung dargestellt. In die Auswertung wurden die Werte aller Ballen eines Trocknungsdurchgangs einbezogen (10 Stück der Behandlung 1 und 10 Stück der Behandlung

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

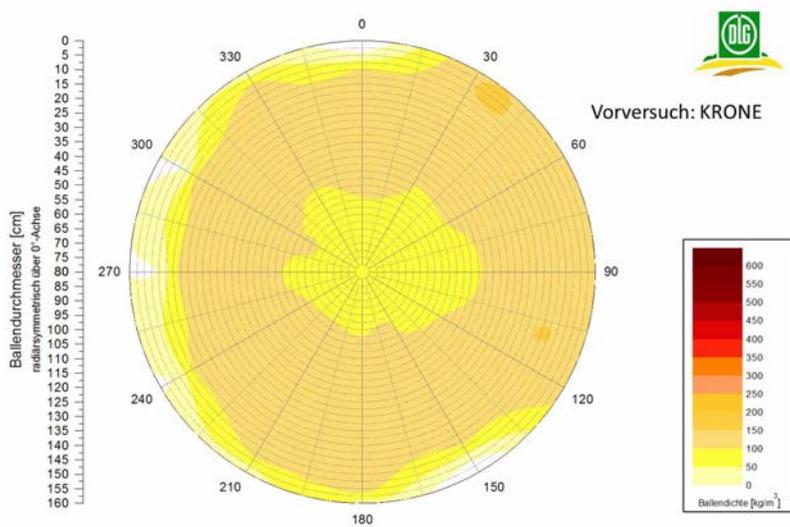


Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.20: Gemessene Dichteverteilung Vorversuch Krone Presse

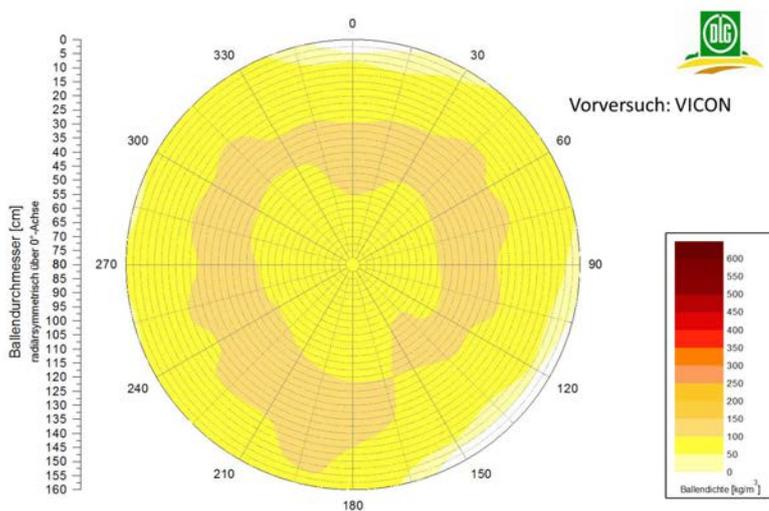


Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.21: Gemessene Dichteverteilung Vorversuch Vicon Presse

2). Den ermittelten Werten zu Beginn der Trocknung, beim Umstapeln und zu Trocknungsende ist zu entnehmen, dass der Wasserentzug während der Trocknung ca. 50 kg je Ballen betrug.

Die Messungen während der Ballentrocknung im Jahr 2015 erbrachten folgende Ergebnisse: Die Ballenmasse verringerte sich in allen Versuchen in den beiden Vari-

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

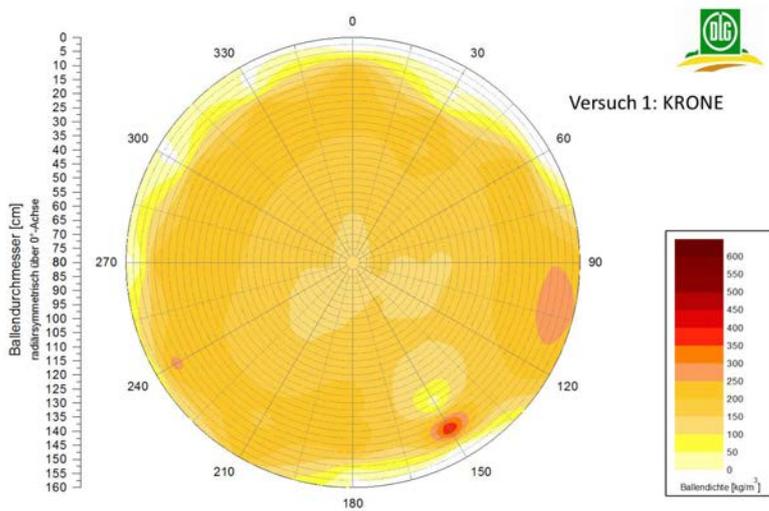


Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.22: Gemessene Dichteverteilung Versuch 1 Krone Presse

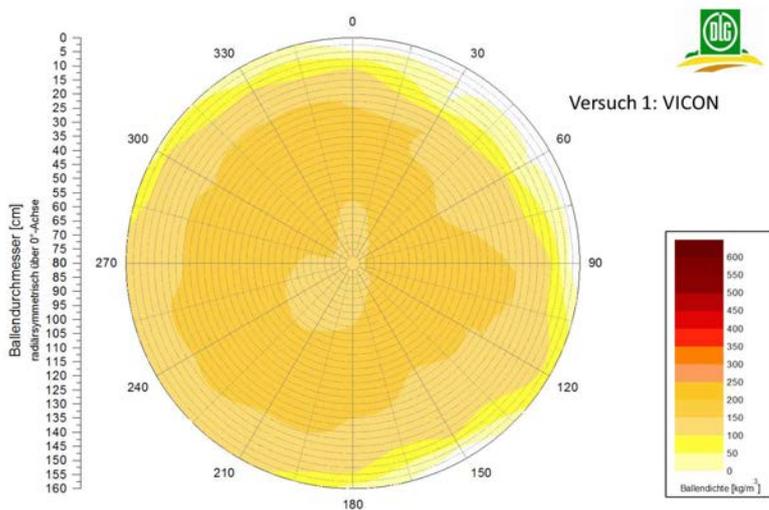


Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.23: Gemessene Dichteverteilung Versuch 1 Vicon Presse

anten relativ gleichmäßig, siehe Abbildung 4.30 auf Seite 49. Bei Trocknungsbeginn war die Streuung bei den Ballen größer als bei Trocknungsende. Dies kann mit den unterschiedlichen Grüngutfeuchten in den unterschiedlichen Versuchsperioden erklärt werden. Die dargestellten Werte umfassen vier Durchgänge mit je zwei Varianten und zehn Wiederholungen, also insgesamt 80 Ballen.

Für die detaillierte Darstellung der Ballenmassen zu Beginn, siehe 4.31 und zum Ende

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

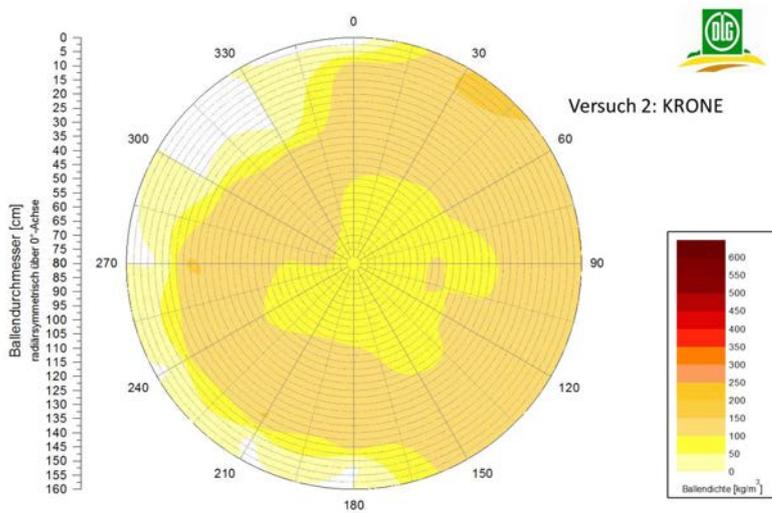


Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.24: Gemessene Dichteverteilung Versuch 2 Krone Presse

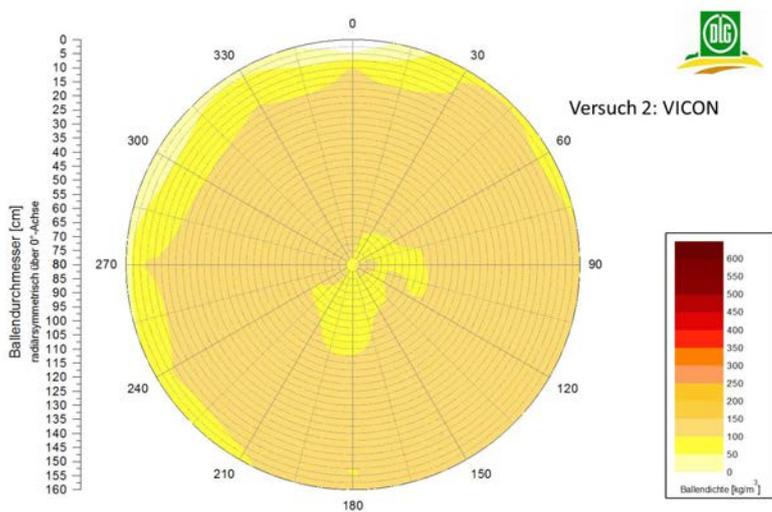


Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.25: Gemessene Dichteverteilung Versuch 2 Vicon Presse

der Trocknung, siehe Abbildung 4.32 auf Seite 51 der Trocknung wurde ein Boxplot Diagramm gewählt. Deutlich abzulesen sind die unterschiedlichen Ballengewichte in den verschiedenen Durchgängen. Der Grund liegt in den unterschiedlichen Grüngutfeuchten. Zum Trocknungsende gleichen sich die Ballengewichte bedingt durch den Wasserentzug wiederum an.

Die Messungen des statischen Druckes umfassten je einen Ballen der beiden Pressen-

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

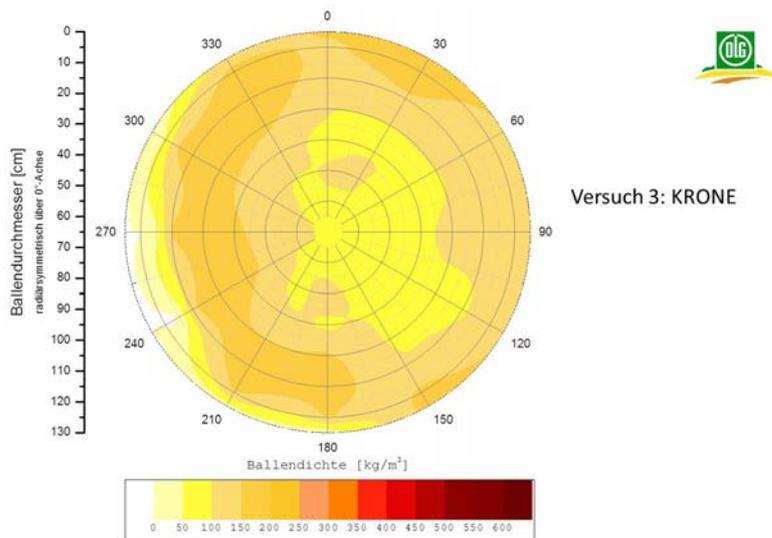


Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.26: Gemessene Dichteverteilung Versuch 3 Krone Presse

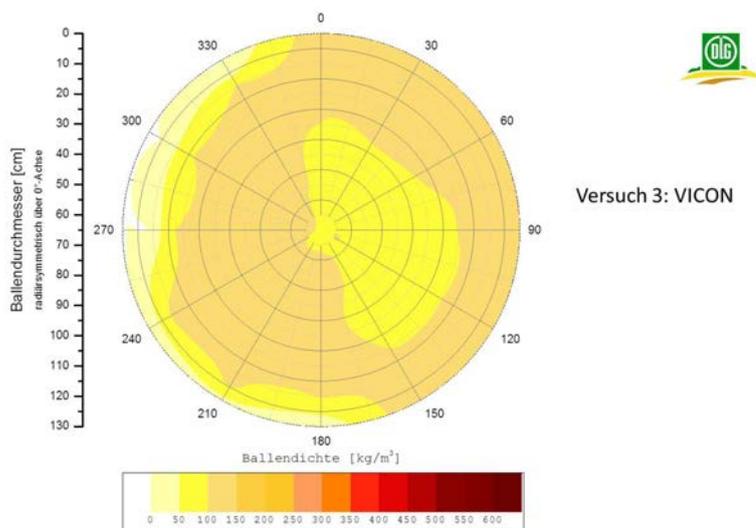


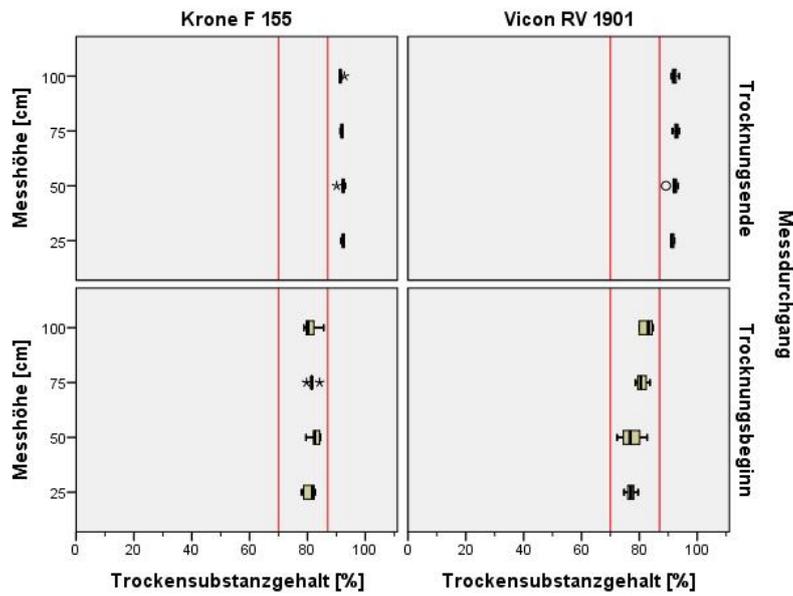
Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.27: Gemessene Dichteverteilung Versuch 3 Vicon Presse

varianten zu Trocknungsbeginn in dreifacher Wiederholung, siehe Abbildung 4.33 auf Seite 51. Bei den Ballen der semivariablen Presse wurden im Mittel höhere Drücke gemessen, was auf eine höhere Verdichtung schließen lässt. Die Ergebnisse in Abschnitt 4.6 auf Seite 40 unterstützen dies.

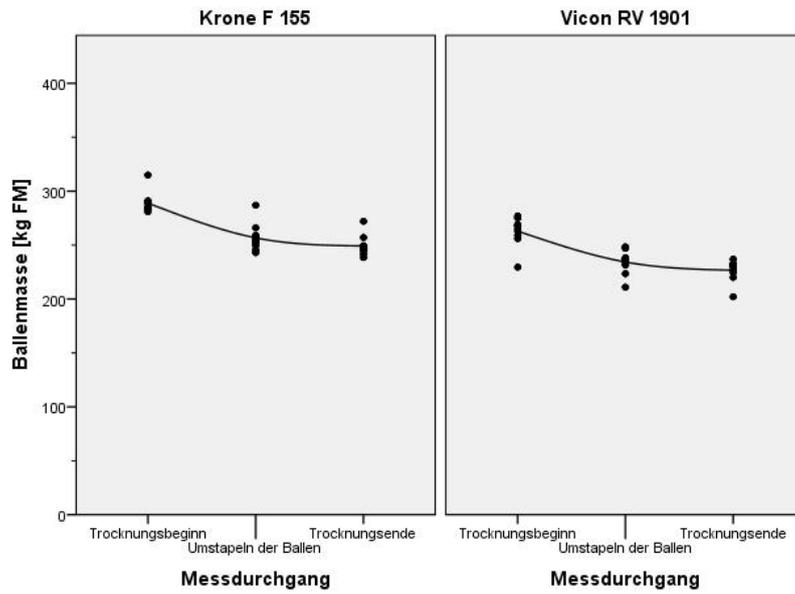
Wird nun die Druckverteilung in unterschiedlichen Tiefen des Ballens betrachtet. So ergibt sich das in Abbildung 4.34 auf Seite 52 dargestellte Bild. Der Druck in den äußeren

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse



Darstellung: B. Bohne

Abbildung 4.28: Trockensubstanzgehalte zum Beginn und zum Ende der Trocknung



Darstellung: B. Bohne

Abbildung 4.29: Gewichtsverlauf der untersuchten Rundballen (n=20)

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

Schichten der Ballen der semivariablen Presse ist geringfügig höher, in größerer Messtiefe gleichen sich die Werte an. Zu beachten ist hier der geringe Stichprobenumfang.

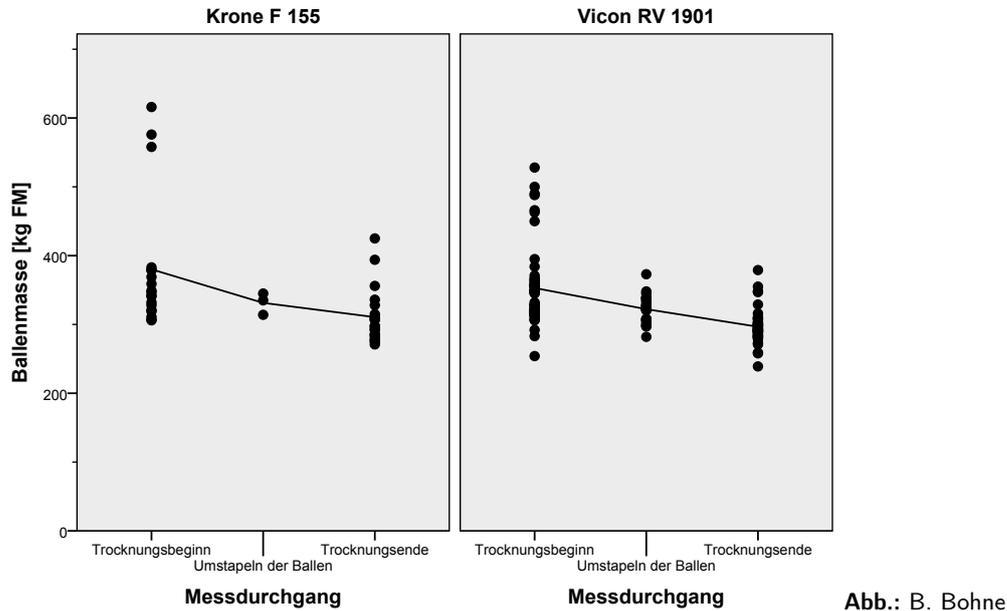


Abbildung 4.30: Entwicklung der Ballenmasse über alle Versuchsdurchgänge (n=80)

Werden nun die Messergebnisse der Strömungsmessungen getrennt nach Versuchsperioden mittels Boxplot-Grafiken zusammengefasst, so ergibt sich das in Abbildung 4.35 auf Seite 52 dargestellte Bild. Die Strömungsgeschwindigkeiten liegen an der Ballenoberfläche der Ballen aus der variablen Presse geringfügig höher. Durch die Zusammenfassung aller Strömungsmessungen der Versuchsdurchgänge ergibt sich das in der Abbildung 4.36 auf Seite 53 dargestellte Bild. Die Strömungsprofile sind sehr ähnlich.

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

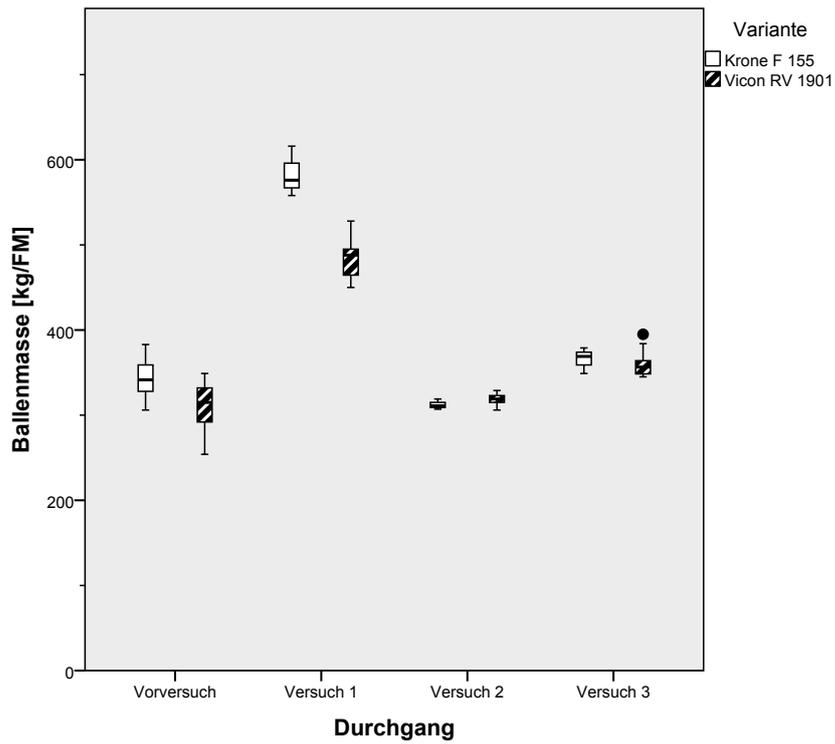


Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.31: Ballenmasse zu Beginn der Trocknung (n=20)

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

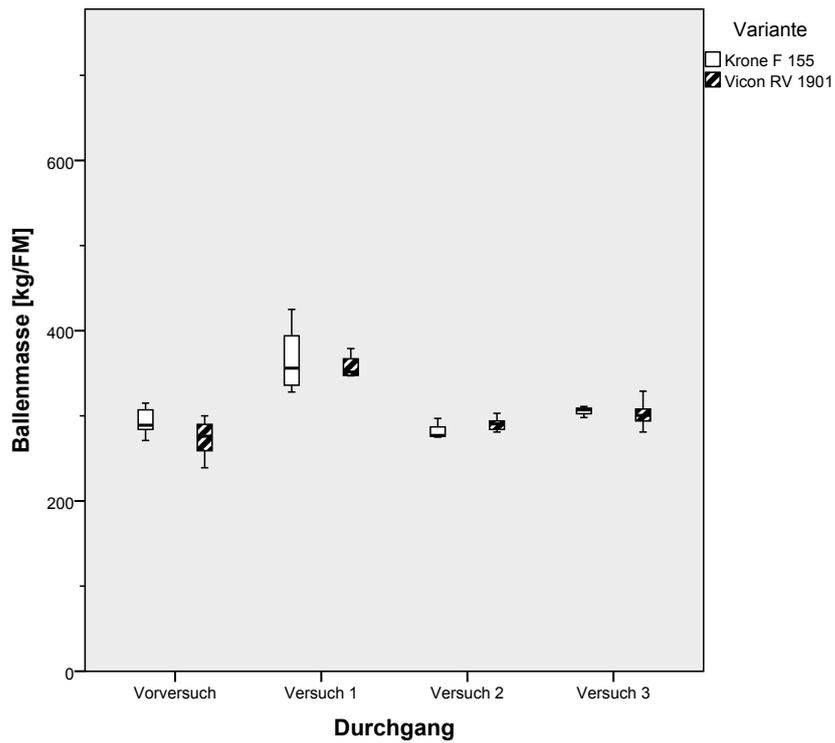


Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.32: Ballenmasse am Ende der Trocknung (n=20)

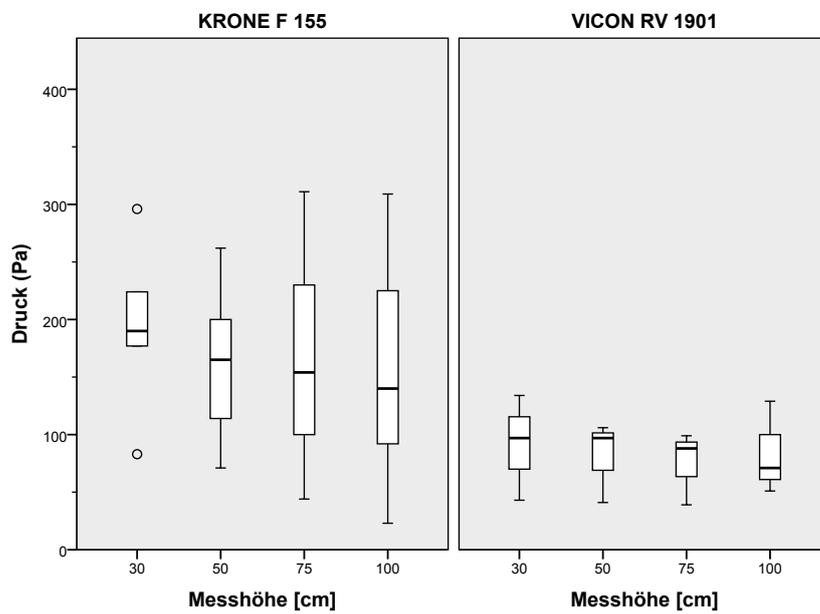


Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.33: Druckverteilung in den Ballen zu Beginn der Trocknung (n=6)

4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

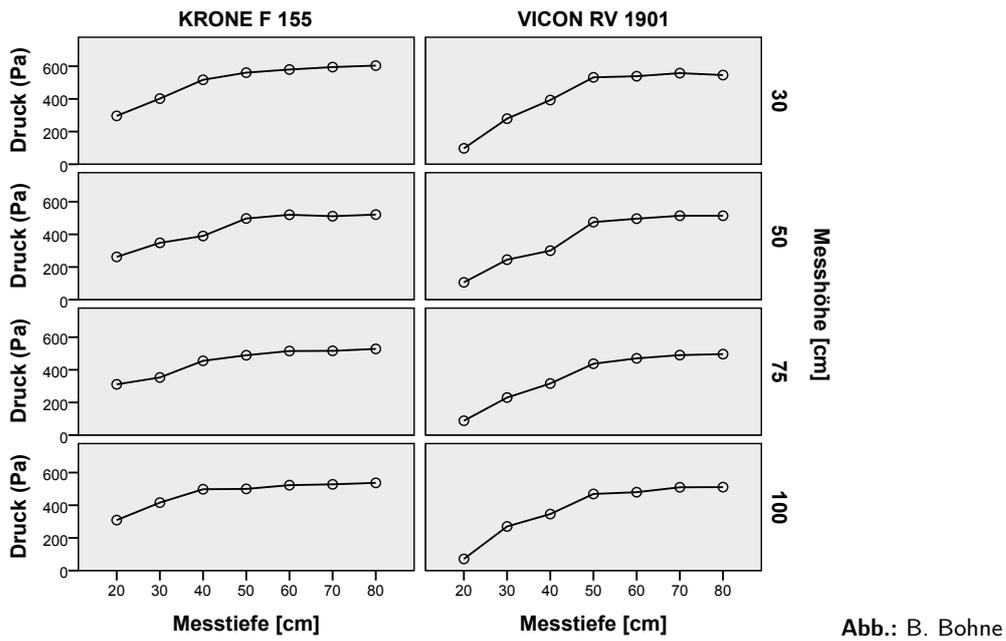


Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.34: Druckverteilung in der ersten Versuchsperiode (n=2)

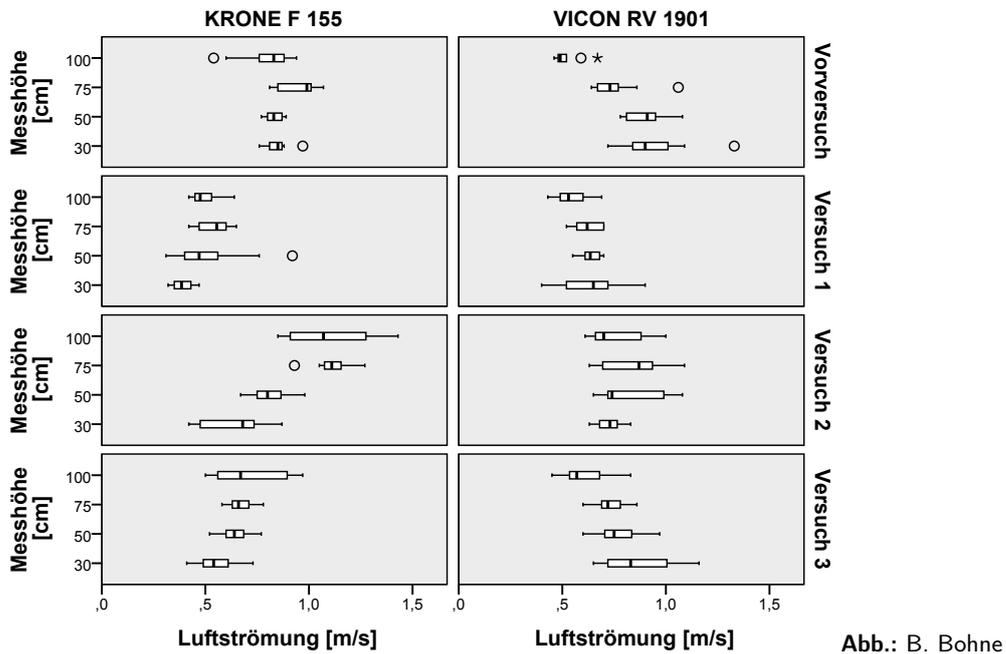


Abb.: B. Bohne

Abbildung 4.35: Mittleres gemessenes Strömungsprofil aller Ballen (n=8)

#### 4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

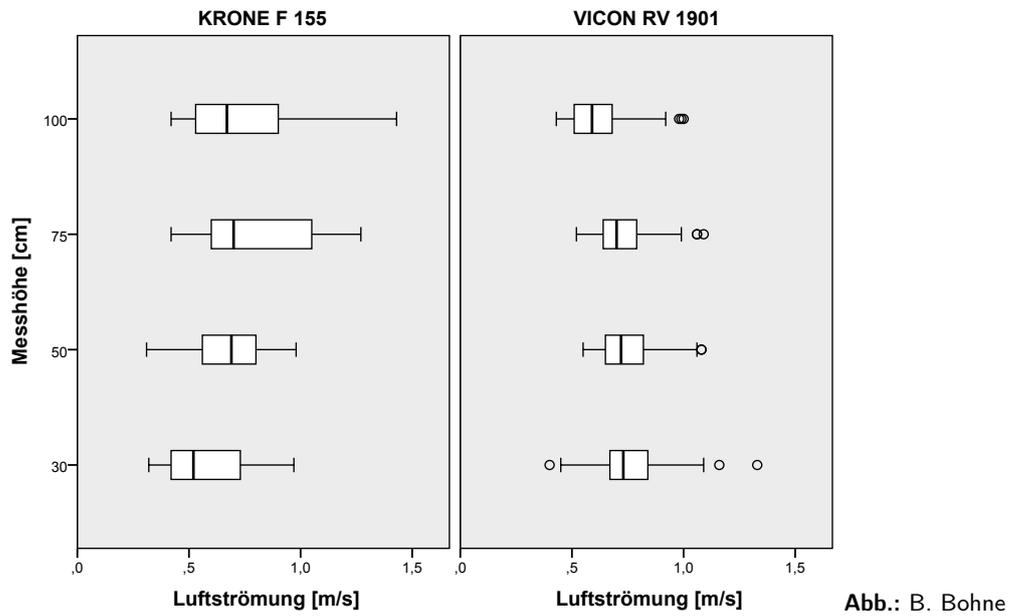


Abbildung 4.36: Strömungsprofil der Varianten in allen Versuchen (n=8)

## 5 Diskussion der Ergebnisse

Aus den Ergebnissen dieses Projektes wird deutlich, dass es mehrere Wege zu einer qualitätsorientierten und damit verlustoptimierten Heuernte gibt. Zu groß sind bei der Grüngutbergung die Einflüsse des Grüngutes, des Wetters und der Fläche an sich, als dass man das Verlustniveau allein mit den eingesetzten Maschinen begründen könnte. Daher ist der Erfolg sowohl von der genauen Kenntnis von Art und aktuellem Zustand des Grüngutes, als auch der Wirkungsweise und Einstellung der Maschinen abhängig. Gerade bei Grünfütterlegumiosen ist durch die unterschiedliche Trocknungsgeschwindigkeit von Stängel und Blatt, die Gefahr einer Abtrennung von Pflanzenteilen sehr hoch. Um den Nutzen einer Erhebung der Bröckelverluste beurteilen zu können, muss in einem ersten Schritt die Relevanz der Bröckelverluste diskutiert werden. Ebenso ist die dabei eingesetzte Erhebungsmethode von Bedeutung, da die Höhe der Bröckelverluste immer zusammen mit der Erhebungsmethode interpretiert werden sollte.

Ein Weg um die Verluste während der Heutrocknung zu verringern ist, die Bodentrocknung teilweise durch eine Unterdachtrocknung zu ersetzen. Soll diese funktionieren, so müssen auch hier die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Trocknung gegeben sein.

### 5.1 Bröckelverluste

Bei der Darstellung der Bröckelverluste (BV) in den einzelnen Verfahrensschritten, siehe Abschnitt 4.2 auf Seite 30, lassen sich die im Vergleich höheren Verluste im zweiten Durchgang nicht mit der Durchführung eines dritten Wendedurchgangs erklären, da auch der dritte Durchgang diesen Verfahrensschritt umfasste, aber deutlich geringere Bröckelverluste aufwies. Ein eindeutiger Trend zu höheren Verlusten in fortgeschrittenen Trocknungsstadien ist nicht zu erkennen. Eine Beeinflussung der Verlustverhältnisse zwischen den einzelnen Verfahrensschritten durch die Methode liegt nicht vor, da diese in allen Verfahrensschritten unverändert angewendet wurde.

Betrachtet man nun die gemessenen Bröckelverluste beim Schwaden in den unterschiedlichen Versuchsdurchgängen Abbildung 4.4 auf Seite 32, so ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten und Durchgängen. Die errechneten Mediane liegen alle unter 7% und sind damit auf dem aus der Literatur bekannten Niveau. Aufgrund der Spannweite der ermittelten Ergebnisse kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Werte in ihrer absoluten Höhe auch durch Ungenauigkeiten in der Messmethodik beeinflusst wurden.

Da bei der Interpretation der Höhe der Bröckelverluste immer auch die Erhebungsmethode einen Einfluss besitzt sollen nachfolgend auch die verschiedenen eingesetzten Methoden diskutiert werden. Bei der Besenmethode ist als nachteilig festzuhalten, dass der Aufwand für den quadratischen Aushub der Flächen für die Bürstenelemente sehr

## 5 Diskussion der Ergebnisse

arbeits- und zeitintensiv ist. Die Staubsaugermethode ist in der Vorbereitung deutlich im Vorteil, da hierbei das aufwändige Graben der Vertiefungen für die Bürstenelemente entfällt. Allerdings ist hier das Problem, dass eine entsprechende Energieversorgung für den Sauger bereitgestellt werden muss. Weiterhin ist auch festzuhalten, dass die absolute Höhe der Bröckelverluste bei den alten Bürstenelemente in den meisten Messungen einen geringeren Wert aufweisen als bei den neuen Bürsten und der Saugermethode. Eine mögliche Begründung könnte das Problem der Entleerung darstellen. Die Fasern der Besen sind im Vergleich zu den neuen Bürstenelementen sehr dicht und steif. Durch die sehr dichte Oberfläche der alten Messbesen könnten unter Umständen nicht alle anfallenden Verluste aufgenommen werden. Entstehende BV könnten oberflächlich liegen bleiben und werden bereits beim Entfernen des Halmgutes und beim Abrechen teilweise vom Messelement entfernt. Zusätzlich lassen sich die BV nicht einfach aus den Messbesen entfernen. Trotz gründlichem Durchstreifen der Besen per Hand können Verluste tief in der Faserstoppel hängen bleiben. Die neuen Bürstenelemente weisen teilweise hohe Werte für die BV im Verhältnis zu den alten Bürstenelementen auf. Durch den Aufbau der neuen Elemente, mit Grundkörper und Fasern in größerem Rasterabstand, lassen sich diese leichter und restlos entleeren.

In den ersten Versuchen je Versuchsreihe verhalten sich die Ergebnisse der alten Bürstenelemente erwartungsgemäß, mit steigender Drehzahl steigen auch die Bröckelverluste an. Eine Störgröße bei der Bestimmung der Bröckelverluste stellt Erde dar. Bei der zweiten Versuchsreihe war auffällig, dass beim Entleeren der neuen Bürstenelemente immer wieder kleinere Teilchen Erde mit in den Behälter fallen. Dabei zerbrachen diese teilweise. Zwar wurden die groben Erdteilchen aussortiert aber es könnten kleine Teilchen zurückgeblieben sein. Dies könnte ein Grund für die Ergebnisverteilung sein. Diese Vermutung könnte durch eine Untersuchung der Proben im Labor und einer Rohascheuntersuchung nachträglich noch belegt werden.

Die Ergebnisse der Saugermethode können stark vom Anwender abhängig sein. Die Gründlichkeit des Saugens beeinflusst die Genauigkeit der Ergebnisse. Es ist allerdings schwierig alle Verluste die tief in der Stoppel liegen, restlos aufzunehmen ohne loses Erdmaterial mit aufzusaugen. Trotz des vorherigen Absaugens befinden sich noch Restmaterial und auch mineralische Bestandteile in den Proben. Dies ist u.a. daran zu erkennen, dass die Proben der Saugermethode an einigen Messpunkten den größeren Massewert im Verhältnis zu den beiden Bürstenelementen aufweisen.

Neben den unterschiedlichen Bröckelverlusten, welche pro Messung auftreten, haben Störgrößen Einfluss auf die Messung. Messungenauigkeiten wie BV, welche beim Entleeren der Bürstenelemente nicht aus den Elementen entfernt werden können oder beim Entleeren nicht in den vorgesehenen Auffangbehälter fallen und Fremdmaterial können die Messung beeinflussen. Bei Betrachtung der Fehlerbalken in der Ergebnisdarstellung sind unabhängig von der Messmethode stellenweise große Unterschiede zwischen den Messmethoden und den beiden Messpunkten ersichtlich.

Unabhängig von der Messmethode kann es zu individuellen Fehlern kommen. Bei der Entleerung werden die Bürstenelemente in den Aufnahmebehälter gestellt und möglichst alle BV per Hand entleert. Dabei wird das Bürstenelemente mehrfach gedreht bis augenscheinlich keine Verluste mehr aus der Messfläche fallen. Dabei können bereits

die ersten BV aus dem Messelement neben den Behälter fallen. Des Weiteren können Windböen aufgesammelte Verluste direkt aus dem Messelement, bzw. aus dem Auffangbehälter wehen. Bei der Saugermethode besteht die Gefahr, dass nicht alle BV aufgesaugt werden oder es können mineralische Bestandteile mit aufgesaugt werden. Da die Massen der BV sehr klein sind, verfälschen schon geringe Abweichungen die Messergebnisse. Bei einer Abweichung in der Messung von 1 g variiert das Ergebnis je nach Ertrag, in diesen Versuchsreihen zwischen 1,2 – 1,4%. Neben dem Verlust von BV beim Einsammeln tragen auch aufgesammelte mineralische Bestandteile (Erde, Sand) zur Ergebnisverfälschung bei. Da Erde eine höhere Dichte als getrocknetes Gras besitzt, können die Ergebnisse bereits durch sehr kleine Unterschiede verfälscht werden. Auch längere Stängel, welche eher als Rech- und weniger als Bröckelverluste zu beurteilen sind, können das Ergebnis beeinflussen. Eine Sortierung der Proben per Hand nach groben Material, Bröckelverlusten und kleinsten Bestandteilen (Erde, Sand und kleinste BV) wäre für die Ergebnisgenauigkeit sinnvoll, ist aber auch sehr zeit- und arbeitsaufwändig und dem subjektiven Verständnis des Personals unterlegen.

### 5.2 Schwadbeschaffenheit

Nach Abschluss der Versuche kann gesagt werden, dass es mit beiden eingesetzten Schwadern möglich war, dass zu Beginn geforderte trapezförmige Schwadprofil herzustellen. Die gemessenen Schwadbreiten, Schwadhöhen und Schwadmassen waren ähnlich, siehe Abschnitt 4.5 auf Seite 37.

Die Ablage der Grünguthalme im Schwad unterscheidet sich jedoch deutlich. Der Schubrechtschwader greift nicht in die Schichtung der Grüngutmatte auf der Fläche ein, sondern legt sie eingerollt im Schwad ab. Bei der eingesetzten Maschine nimmt dieser Rollprozess in etwa eine Länge von 1,5m in Fahrtrichtung in Anspruch. Der Zweikreiselschwader löst die Grüngutschichtung auf und mischt das Grüngut zusätzlich. Letztendlich ist entscheidend, ob diese Unterschiede in der Schwadstruktur das Pressen der Rundballen und die darauf folgende Unterdachrocknung beeinflussen.

### 5.3 Dichteverteilung und Trocknungsverlauf der Heurundballen

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass Unterschiede im Dichteverlauf zwischen den unterschiedlichen Pressensystemen bestehen. Diese sind einerseits konstruktionsbedingt, aber auf der anderen Seite auch vom Grüngut und der Einstellung der Presse abhängig. Von daher sind die Ergebnisse immer im Kontext mit den Randbedingungen zu beurteilen, in denen sie entstanden sind.

Die Strömungsgeschwindigkeiten liegen an der Ballenoberfläche der Ballen aus der variablen Presse geringfügig höher. Was sich vermutlich mit der leicht geringeren Pressdichte erklären lässt. Ob dies eher ein Vor- oder Nachteil ist, wäre noch zu diskutieren.

Die Spannweite der Messergebnisse bei den Ballen der semivariablen Presse etwas höher,

## 5 *Diskussion der Ergebnisse*

was eventuell auf eine größere Heterogenität der Ballen hinweist. Das Festkammerprinzip zu Beginn der Ballenformung könnte ein Grund sein.

## 6 Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse oder Anwendung der Ergebnisse für die Praxis und Beratung

Zwischen den Projektpartnern besteht Einigkeit darüber, dass die bisher erzielten Ergebnisse keinen Zweifel daran lassen, dass die Verwertung wie sie im Antrag beschrieben wurde, umgesetzt werden kann. Hierzu einige Beispiele:

- **Erfindungen**

Das durch die Universität Kassel zum Patent angemeldete Konzept eines "Verfahrens zur Überwachung von während eines Bewegens von Erntegut abgesonderten Verlust-Erntegut" wurde zwischenzeitlich unter dem Aktenzeichen DE 10 2014 108 947 offengelegt. Derzeit wird in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Innovation Nordhessen mbH (GINo) an der Vermarktung gearbeitet.

- **Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten**

Das Interesse seitens der Landmaschinenhersteller an den Versuchen, welche sie durch Bereitstellung von Maschinen unterstützen, besteht weiterhin. Die regelmäßig abgefassten Sachstandsberichte werden sowohl vom Produktmarketing als auch von den Entwicklungsabteilungen positiv aufgenommen und diskutiert. Somit ist ein direkter Fluss der Projektergebnisse in die Produktentwicklung gewährleistet. Aber auch der Kundendienstbereich kann mit den erzielten Ergebnissen unterstützt werden und umfassendere Lösungsansätze bei Problemen in der Praxis anbieten.

Der Kontakt zum DLG-Testzentrum wurde weiterhin gepflegt mit vertraulichen Besprechungen über FuE Maschinenversuche und Tests im Bereich Futterernte, sowie über Treffen im Rahmen der Prüfungskommission Grünlandtechnik. Das KTBL-Heft 113 „Belüftungsheu -Qualität, Verfahren, Kosten-“ ist erschienen. Dort können die Projektergebnisse und noch zusätzliche Informationen aus dem Themengebiet nachgelesen werden.

- **Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**

Mittlerweile bestehen Kontakte zu verschiedenen landwirtschaftlichen Betrieben in ganz Deutschland, welche alle sehr an der Qualitätsheuerzeugung interessiert sind bzw. sie schon praktizieren. Diese breite Vernetzung und die positive Resonanz seitens der Praxis lassen keinen Zweifel an der schnellen Umsetzung der Optimierungsvorschläge und führen damit unmittelbar zu einer Verbesserung der Futterernte. Die begleitende Arbeitsgruppe „Heubergetechnik“ welcher un-

*6 Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse oder Anwendung der Erg*

terschiedliche Vertreter aus Wissenschaft, Beratung und Praxis angehören trägt zudem zur weiten Verbreitung der Ergebnisse bei.

## **7 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; Hinweise auf weiterführende Fragestellungen**

Die ursprünglich geplanten Ziele konnten vollständig erreicht werden. Die Feldversuche erbrachten neue Ergebnisse, welche zu einem verbesserten Verständnis der Maschinenarbeit während der Heubereitung führen. Die Untersuchungen zu den Parametern, welche einen Einfluss auf die Werbungsverluste haben, erbrachten neue Erkenntnisse zur Interaktion zwischen der Maschineneinstellung und dem Auftreten der Werbungsverluste. Die Press- und Belüftungsversuche stellten die Auswirkungen unterschiedlicher Pressenbauarten auf die Belüftungseigenschaften der erzeugten Rundballen heraus. Diese Erkenntnisse erlauben auch Verbesserung beim Trocknungsprozess an sich. Verschiedene Wissenstransfermaßnahmen wurden durchgeführt, dabei sind besonders zwei Fachgespräche an der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen für Praktiker und Berater hervorzuheben.

Des Weiteren konnte das KTBL-Heft 113 „Belüftungsheu – Qualität, Verfahren, Kosten“ verfasst werden, damit steht eine wichtige Informationsquelle zum Thema Belüftungsheu für interessierte Landwirte und Berater zur Verfügung. Es werden vielfältige Hinweise gegeben, um die Heuernte allgemein und die Belüftungsheuernte im speziellen zu verbessern. In Abstimmung mit der Arbeitsgruppe „Heubergetechnik“ wurde ein betriebswirtschaftlicher Vergleich für verschiedene Heubelüftungsverfahren erstellt, welcher anhand des Merkheftes publiziert wird. Daher ist das Ziel der betriebswirtschaftlichen Bewertung von Belüftungsheuverfahren erreicht. Die Datenbanken des KTBL e.V. werden um das Verfahren Belüftungsheu ergänzt, sodass zu erwarten ist, dass das Verfahren in die Datensammlungen Futterbau und Datensammlung Betriebswirtschaft aufgenommen werden kann und so einem noch weiteren Interessentenkreis Planungsdaten zur Verfügung gestellt werden können. Daher wird das Ziel des Wissenstransfers erreicht. Zur Weiterführung der im Projekt erzielten Ergebnisse und der Umsetzung von Pilotprojekten, insbesondere in Ostdeutschland, wurde sich an einem Projektkonsortium beteiligt, welches eine Projektförderung im Rahmen des EIP-AGRI anstrebt.

## 8 Zusammenfassung

Das Interesse an der Belüftungstrocknung von Heu nimmt seit einigen Jahren in Deutschland kontinuierlich zu. Die Gründe liegen in einer steigenden Nachfrage nach Heumilchprodukten durch die Verbraucher, in der Verfügbarkeit von günstiger Biogas-abwärme und in einem grundsätzlichen Interesse an dem Futtermittel Heu. Dennoch ist das Verfahren der Heuernte nach wie vor problematisch. Hauptursache ist die extreme Witterungsabhängigkeit, welche sich aus der notwendigen solaren Bodentrocknung ergibt. Mit einer teilweisen Belüftungstrocknung, kann die Feldliegezeit und damit das Witterungsrisiko verringert werden.

Unklar war bisher welche Auswirkungen der Einsatz der aktuellen Maschinenteknik auf die Prozessgrößen Gutablage, Trockensubstanzgehalt und Bröckelverluste hat und wie ein gut zu belüftender Ballen hergestellt werden kann. Zudem fehlt es an verlässlichen Zahlen, um den wirtschaftlichen Nutzen des Verfahrens Rundballenbelüftung abschätzen zu können und so die Grundlage für eine Investition in eine solche Technik zu schaffen. Es wurden verschiedene Feldversuche durchgeführt um den Einfluss der genannten Prozessgrößen zu ermitteln. Zudem wurden Daten zur Belüftung von Heu erhoben und daraus eine Datensammlung/Onlineanwendung erstellt. Die Verfügbarkeit von verlässlichen Daten zum Technikeinsatz und zur Wirtschaftlichkeit könnte ein Anreiz für eine weitere Investition in die Heubelüftung sein und auch die Erzeugung und Nutzung heimischer (Öko-) Futtermittel befördern.

Zu Projektbeginn wurde eine Literaturrecherche zum aktuellen Wissensstand bei der Werbung und Bergung von Belüftungsheu durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die vorhandene Literatur zum Thema Heubergetechnik teilweise schon über 40 Jahre alt war und damalige Versuchsanstellungen und Ergebnisse nicht ohne weiteres in die heutige Zeit übertragbar sind, es wurden aber auch einige Informationen wiedergefunden, welche in Vergessenheit geraten waren. Gleichzeitig wurde mit einer intensiven Vernetzungsarbeit mit Erzeugern, Industrie, Prüfinstituten, Beratern und Bildungseinrichtungen begonnen, um auch das nicht veröffentlichte Wissen zu erschließen. Dabei stellte sich heraus, dass durchaus die Relevanz der Verfahrensparameter Bröckelverluste, Schwadform und Durchströmbarkeit bekannt ist, jedoch wenig Wissen zur messtechnischen Erfassung dieser Parameter vorhanden ist. Im Design der Feldversuche fand dies Ausdruck, indem auch immer ein Teil Methodenversuch integriert war, um an der Weiterentwicklung der messtechnischen Grundlagen zu arbeiten.

Im Ergebnis ergaben die Versuche, dass zur Verlustminimierung in der Vorwelkphase eine an der Zusammensetzung und dem Trocknungszustand des Grüngutes ausgerichtete Maschineneinstellung einen größeren Einfluss ausübt als die Art der eingesetzten Maschine. Ebenso hat die Kenntnis der Kinematik der verwendeten Presse im Zusammenspiel mit den Eigenschaften des Grüngutes einen großen Einfluss auf die Belüftungsfähigkeit

## 8 Zusammenfassung

der Ballen. Die grundlegenden Zusammenhänge (Grobstängeliges Gut verdichtet sich schlechter als feinstängeliges und feuchtes Gut besser als trockenes) wirken stärker als die Bauart und Marke der Presse. Um daraus die richtigen Schlüsse zu ziehen sind jedoch einige Kenntnisse der eingesetzten Presse notwendig. Der Verlauf der Wärmelufttrocknung von Rundballen ist in hohem Maße von der Art der Ballenbelüftung abhängig. Je nachdem ob der Ballen von einer oder zwei Seiten belüftet wird, ergeben sich unterschiedliche Trocknungsverläufe. Die oberen und unteren Randbereiche des Rundballens, bedürfen dabei einer besonderen Beachtung. Der Einfluss der verwendeten Presstechnik tritt bei angepasster Einstellung zurück. Die verwendete Methodik zur Beschreibung des Trocknungsverlaufs hat einen großen Einfluss auf die wirklichkeitsnahe Dokumentation. Die Versuche waren thematisch breit angelegt, um das Thema Heubereitung hinreichend bearbeiten zu können, dies ging teilweise zu Lasten der quantitativen Auswertbarkeit. Der Erfolg der Verfahrens hängt sowohl vom angepassten Einsatz der Werbe- und Bergetechnik, als auch von den Kosten zur Bereitstellung der Wärme bei der Unterdachrocknung ab.

## **9 Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt (Printmedien, Newsletter usw.), bisherige und geplante Aktivitäten zur Verbreitung der Ergebnisse**

Neben den hier genannten Veröffentlichungen und der Veröffentlichung des Abschlussberichtes über das Internetportal Organic Eprints (nach Freigabe durch den Projektträger) planen die Autoren, die Ergebnisse auch in einer begutachteten Fachzeitschrift zu veröffentlichen. Die Teilnahme an weiteren Tagungen (z.B. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau 2017 in Freising) wird ebenfalls angestrebt.

### **9.1 Studentische Projekt- und Abschlussarbeiten**

Während der Projektlaufzeit wurden folgende Projekt- und Abschlussarbeiten in thematischen Zusammenhang mit geförderten Vorhaben abgefasst (Diese Arbeiten sind, sofern kein Sperrvermerk besteht, einsehbar.):

- Benedikt Kary (2013): Betrachtung der Bodenheutrocknung unter Berücksichtigung verschiedener Schwadtechniken sowie Methoden zur Quantifizierung der Verluste
- Daniel Wenzel (2013): Vergleich von zwei Geräten zum Schwaden von Leguminosenheu anhand der entstehenden Bröckelverluste
- Ties Ruigrok (2014): Der Einfluss von unterschiedlichen Schwadtechniken auf den Trocknungsverlauf von Heurundballen in einer Heutrocknung
- Florian Reum (2014): Entwicklung eines Indoorprüfstands für Kreiselzettwender zur Simulation des Wendevorgangs
- René Dietrich und Matthias Flügel (2015): Verbesserung der Qualitätsheuerzeugung durch Optimierung der Werbetechnik
- Leonhard Kirchner (2015): Betrachtung fütterungsrelevanter Bröckelverluste in der Heuwerbung und Untersuchung der Bestimmungsmethode „Messbesen“
- Hannes Klockmann und Steffen Mallast (2015): Der Einfluss von unterschiedlichen Schwadtechniken auf den Trocknungsverlauf von Heurundballen mittels einer Heutrocknungsanlage

- René Dietrich (2015): Visualisierung, Evaluierung und Optimierung des Wendeprozesses in der Heuernte unter besonderer Berücksichtigung maschinenbedingter Einflussparameter
- Lennart Vincent Loose (2015): Die Dichtebestimmung an Heurundballen mit einem Penetrologger
- Simon Biet (2016): Rundballenheutrocknung: Eine Planungshilfe für den Hof Volquardsen
- Jörg Berg (2016): Optimierungsvorschläge zur Einstellung von Rundballenpressen ggfs. Entwurf eines optimierten Rundballentrockners
- Nils Hobein, Marcel Sobek und Björn Steinbach (2016): Analyse zweier Schwadersysteme hinsichtlich der Sortierung einzelner Pflanzenbestandteile, sowie der Ausrichtung von Halmen im Schwad während der Heuwerbung
- Alexander Homann (2016): Agrartechnische Charakterisierung von Heutrocknungsanlagen: Eine fallstudiengestützte Entscheidungshilfe
- Lennart Vincent Loose (2016): Vergleich der Messmethodik an Heurundballen: Die Radiometrische- und die Penetrologermethode

## 9.2 Vorträge

Folgende Vorträge wurden, mit Ausnahme von Kurzpräsentationen des Projektes, Führungen von Besuchergruppen und Einbeziehung in Vorlesungen und Seminare, während der Projektlaufzeit gehalten:

- Bohne, B. (2013): Schwachstellen bisheriger Maschinenketten. Fachgespräch „Wirtschaftliche Heubergetechnik -Welche innovativen Verfahren stehen zur Wahl?-" 13.12.2013, Hessische Staatsdomäne Frankenhausen.
- Bohne, B. (2015): Wo liegen die Knackpunkte im Verfahren? Fachgespräch „Qualitätsheu durch Belüftung“ 11.12.2015, Hessische Staatsdomäne Frankenhausen.
- Bohne, B. (2016): Erzeugung von Qualitätsheu. „Aktuelles zu Bergung und Belüftung“ 02.02.2016, Seminar für Mutterkuhhalter, Haus Riswick, Kleve.
- Nilles, L. (2015): Überblick über die Kosten der Heubelüftung. Fachgespräch „Qualitätsheu durch Belüftung“ 11.12.2015, Hessische Staatsdomäne Frankenhausen.

## 9.3 Veröffentlichungen in Zeitschriften

- Bohne, B. (2014): Bergekette ohne Lücken. Bauernzeitung, Heft 19, S. 30-31
- Bohne, B. (2014): Heubereitung aus hochwertigen Futterpflanzen. Naturland Nachrichten, Heft 3, S. 32-34
- Bohne, B. (2015): Was ist bei der Gewinnung von hochwertigem Heu zu beachten? Rheinische Bauernzeitung, Heft 17, S. 38-40
- Bohne, B. (2016): Künstlicher Wasserentzug. Bauernzeitung, Heft 3, S. 30-31
- Bohne, B. (2016): Moderne Heutrocknung. LZ-Rheinland, Heft 6, S. 36-37
- Bohne, B. (2016): Gutes Heu schonend werben. Wochenblatt für Landwirtschaft und Landleben, Heft 21, S. 24-25

9 *Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt*

- Bohne, B. (2016): Besseres Heu mit weniger Bröckelverlusten. BWAgrar, Heft 25, S. 23-24
- Bohne, B. (2016): Unterm Dach weitertrocknen? Wochenblatt für Landwirtschaft und Landleben, Heft 27, S.25-26