

Abschlussbericht

AZ-DBU: 33325/01

Entwicklung eines Pflug-Mulch-Systems mit Frontmulcher zur Erosionsvermeidung

insbesondere für den ökologischen Landbau mittels Aufbringen von Mulchmaterial auf gepflügte Ackerflächen



Verfasser: Dipl. Ing. Sören Geißler (TU-Dresden Agrarsystemtechnik)
Martin Hänsel, Katharina Winter, Paul Schlegel (Bioland)

Kooperationspartner: TU Dresden, INT, Professur für Agrarsystemtechnik
Müthing GmbH & Co. KG, Soest
Bioland Beratung GmbH, Mainz

Projektbeginn: 23.06.2016

Projektlaufzeit: 36 (48) Monate bis 22.06.2020

Berichtszeitraum: 23.6.2017 – 22.6.2020

Dresden, 22.09.2020

Inhalt

1	Kurzfassung	6
2	Anlass und Zielsetzung des Projektes.....	6
3	Arbeitsschritte und angewandte Methoden.....	8
4	Technische Ergebnisse.....	9
4.1	<i>Konstruktive Überarbeitung des Funktionsmusters</i>	<i>9</i>
4.1.1	Laboruntersuchungen.....	9
4.1.2	Konstruktive Änderungen am Funktionsmuster	11
4.2	<i>Praxisversuche – technische Ergebnisse</i>	<i>13</i>
4.2.1	Maschinenkonfiguration	14
4.2.2	Wurfweite / Materialverteilung:	14
4.2.3	Zerkleinerungswirkung	15
4.2.4	Leistungsbedarf.....	16
4.2.5	Maschinenhandling	18
5	Pflanzenbauliche Ergebnisse	19
5.1	<i>Randbedingungen der Praxisversuche.....</i>	<i>19</i>
5.1.1	Standorte	19
5.1.2	Witterungsverlauf im Versuchszeitraum	20
5.1.3	Temperaturen	21
5.2	<i>Versuchsmethodik</i>	<i>22</i>
5.2.1	Niederschlagssimulator	22
5.2.2	Bodenbedeckungsgradermittlung.....	23
5.2.3	Pflanzenbauliche Bonituren und Bodenbeprobung (Nmin, Grundnährstoffe, pH-Wert, organische Substanz und Bodenart).....	24
5.2.4	Ertragsermittlung und Stickstoffgehalt bei Hauptkulturen.....	25
5.3	<i>Ergebnisse.....</i>	<i>25</i>
5.3.1	Gutzerkleinerung und Verteilung des Mulchgutes.....	25
5.3.2	Erzielte Bodenbedeckung mit dem Pflug-Mulch-Verfahren.....	27
5.3.3	Abbau der Mulchbedeckung im Zeitverlauf	28
5.3.4	Regeneration der Bodenbedeckung durch den Auflauf der Saat und durch keimendes Unkraut	30
5.3.5	Ergebnisse zur Ertragsentwicklung und zum zeitlichen Verlauf von Nitrat-Gehalten im Boden	30
5.3.6	Vergleich Winterung und Sommerung	31
5.3.7	Unkrautentwicklung in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung durch Mulchmaterial.	33

5.3.8	Anpassung der vor- und nachgelagerten Arbeitsgänge einschließlich der Methoden der Unkrautregulierung an das PMS	34
6	Weiterführende Untersuchungen	35
6.1	<i>Praktische Verfahrensanalyse und ökonomische Betrachtung.....</i>	<i>35</i>
6.2	<i>Praxisorientierte Befragung.....</i>	<i>38</i>
7	Diskussion der Ergebnisse.....	40
7.1	<i>Erreichte Zielstellungen und Einhaltung des Zeitplans</i>	<i>40</i>
7.1.1	Vergleich mit der Zielsetzung	40
7.1.2	Funktionsmuster	41
7.1.3	Verfahren	42
7.2	<i>Zusammenarbeit der Kooperationspartner, externe Kooperation.....</i>	<i>43</i>
8	Öffentlichkeitsarbeit	43
9	Fazit	45
10	Literaturverzeichnis	46
11	Anlagen	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Einstufung des Ackerlandes in Sachsen zur potentiellen Erosionsgefährdung (LfULG 1994).....	6
Abbildung 2 Mulcher-Laborversuchseinrichtung mit Kanälen zur identifikation der Werkzeug-Abwurfbereiche.....	9
Abbildung 3, Plattenschlegelwerkzeug.....	9
Abbildung 4 Ergebnisvergleich Plattenschlegel - Hammerschlegel	10
Abbildung 5 Überblick Abrisskanteneinfluss auf Strömungsgeschwindigkeit	10
Abbildung 6 Umsetzung des Auswurfkonzeptes V3 an der Maschine	12
Abbildung 7 Maschinenkombination im Feldeinsatz bei der Parzellenanlage.....	13
Abbildung 8 Übersicht der Maschinenparameter	14
Abbildung 9 Bedeckungsgrad und Verteilungsbild	15
Abbildung 10 Übersicht der angelegten Fläche	15
Abbildung 11 Diagramm Zugleistungsbedarf 5-Schar-Variodrehpflug	16
Abbildung 12 Übersicht Leistungsbedarf Frontmulcher	17
Abbildung 13 Leistungsbedarf nach Arbeitsbreiten.....	18
Abbildung 14 Verteilung der Tagesniederschläge am Standort Dürreweitzschen im Versuchszeitraum.....	21
Abbildung 15 Aufbau und Position-ierung des Niederschlagssimulators	22
Abbildung 16 Berechnete Testfläche von einem Quadratmeter; Ablauf des Wassers am oberen Bildrand	22
Abbildung 17 Mulchgutauftrag auf weiße Alu-Polyethylen-Verbundplatten.....	24
Abbildung 18 Fraktionen des getrockneten Mulchmaterials.....	25
Abbildung 19 Abhängigkeit der Bodenbedeckungsgrade von der Masse des gemulchten Grönaufwuchses	28
Abbildung 20 Zeitlicher Abbau der Mulchbedeckung nach dem PMS-Einsatz.....	29
Abbildung 21 N _{min} -Gehalte des Bodens in zwei Schichten im Herbst 2019 und Fröhrjahr 2020 (n=6)	31
Abbildung 22 zeitliche Entwicklung der Bodenbedeckung mit Mulch, Kulturpflanzen und Unkraut.....	32
Abbildung 23 Anzahl von Unkrautkeimlingen in Abhängigkeit der Bodenbedeckung durch Mulchmaterial. Unkrautart Galium aparine (Kletten-Labkraut.	33
Abbildung 24 Übersichtsbild Flächenanlage	40
Abbildung 25 Prinzipskizze.....	40
Abbildung 26 Stand der Professur Agrarsystemtechnik auf den Ökofeldtagen 2019.....	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Arbeitsphasen und Stand der Arbeiten 06/2020	8
Tabelle 2 Vergleich der getesteten Auswurfvarianten	11
Tabelle 3 Ausgangssituationen auf den Versuchsstandorten am Tag der Bearbeitung	20
Tabelle 4 Bestimmung der Streuung einer dreifachen Wiederholung in einer Variante	23
Tabelle 5 Potenziale der Bodenbedeckung mit verschiedenem Grüngut von 1 kg Masse bei unterschiedlicher Art des Verteilverfahrens und der Aufbereitung.	26
Tabelle 6 Bodenbedeckung und Masse des Mulchmaterials in den Versuchspartellen.....	27
Tabelle 7 Basisdaten der Maschinenkosten und -nutzung. (Quelle: KTBL)	36
Tabelle 8 Kosten bei geteilten und kombinierten Arbeitsgängen Mulchen und Bodenbearbeitung.....	37

Abkürzungen

CC-Wasser 1	Cross Compliance-Regelung „Erosionsgefährdung durch Wasser“ 1
Fl.	Fläche
K	Kalium
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Mg	Magnesium
N	Stickstoff
Nd.	Niederschlag
P	Phosphat
PMS	Pflug-Mulch-System
SG	Sommergerste
SW	Sommerweizen
Temp.	Temperatur
TM	Trockenmasse
TOC	total organic carbon, Gesamtkohlenstoffgehalt
VDLUFA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V.
WG	Wintergerste
WW	Winterweizen
ZWF	Zwischenfrucht

1 Kurzfassung

Im dritten und vierten Projektjahr erfolgte die Überarbeitung des Frontmulcher-Funktionsmusters für das Pflug-Mulch-System (PMS). Diese erfolgten aufbauend auf der Ermittlung der wissenschaftlichen Grundlagen und Erstellung der Konstruktion im ersten Projektjahr und der Fertigung und Inbetriebnahme des Funktionsmusters sowie Funktionstests und Untersuchungen im Feldeinsatz während des zweiten Projektjahrs. Für die pflanzenbaulichen Untersuchungen des PMS im vierten Projektjahr wurden 6 Flächen in Praxisbetrieben ausgewählt, auf denen im Herbst 2019 Zwischenfrucht- bzw. Luzernebestände vorhanden waren. Es wurde ein umfassendes Testprogramm in diversen Kulturen (Sommerungen und Winterungen) und mit unterschiedlichen Maschineneinstellungen durchgeführt. Dieses diente auch zur Bewertung der Funktion des Funktionsmusters und verschiedener Maschineneinstellungen. Die Tests lieferten Ergebnisse im Hinblick auf Bodenbedeckung, Erosionsschutz und Abbauverhalten der Mulchbedeckungsschicht, die eine Verbesserung des Erosionsschutzes aufzeigten. Die Tests zur N_{\min} -Verlagerungen wiesen für den Wasserschutz allerdings negative Tendenzen auf. Alternative Einsatzmöglichkeiten und -grenzen wurden ebenfalls ermittelt. Die ökonomischen Berechnungen des PMS zeigten bei der betrieblichen Nutzung stärkerer Zugmaschinen ab 200 kW und dem kombinierten Arbeitsgang (Pflügen und Mulchen) Vorzüge gegenüber dem konventionellen System mit zwei Arbeitsgängen.

2 Anlass und Zielsetzung des Projektes

Trotz der starken Entwicklung pflugloser Bewirtschaftung stellt das Pflügen noch immer für die meisten ökologisch und viele konventionell wirtschaftenden landwirtschaftlichen Betriebe eine fast unverzichtbare Maßnahme zur Unkrautregulierung, Feldhygiene, Bodenlockerung, Bodenaktivierung und zur gründlichen Saatvorbereitung dar. 2016 wurden in Deutschland 53 % des Ackerlands mit dem Pflug bearbeitet (Destatis 2020).

Der Bodenabtrag in Deutschland, der hauptsächlich auf landwirtschaftlichen Ackerflächen entsteht, übersteigt allerdings die jährliche Bodenneubildungsrate von 0,3-1,5 t/ha und Jahr mit 1,4 bis 3,2 t/ha und Jahr. Auf gefährdeten Flächen kann der Verlust über 5 bis 13 t/ha und Jahr betragen (Umweltbundesamt 2020; LfULG 2013). Morphologie, Böden und Klima führen zu unterschiedlich gefährdeten Gebieten. In Europa sind bereits 17 % der genutzten Flächen durch Erosion beeinträchtigt (Oldeman 1994). Im Freistaat Sachsen liegt der Anteil durch Wassererosion potenziell gefährdeter Ackerflächen bei über 60 % (Abbildung 1).

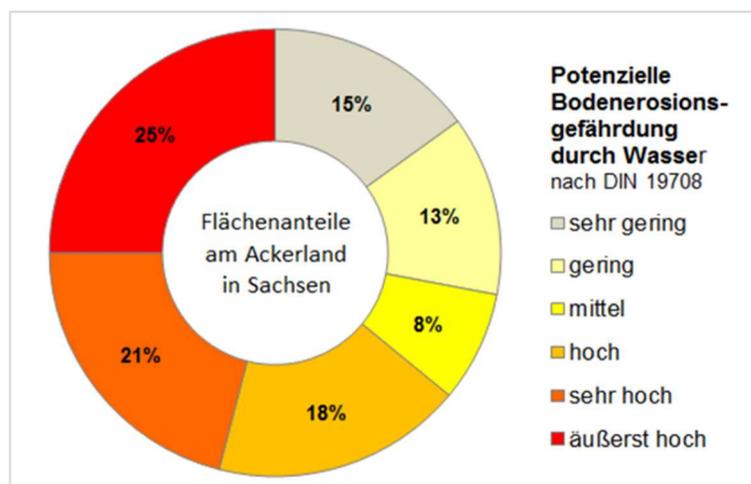


Abbildung 1 Einstufung des Ackerlandes in Sachsen zur potentiellen Erosionsgefährdung (LfULG 1994)

Dies ist eine wesentliche Lücke im Streben nach Nachhaltigkeit in der Bodenbewirtschaftung und im Landbau insgesamt. Zudem sind die gesetzlichen Anforderungen des Bodenschutz-Gesetzes nur schwer zu erfüllen.

Die nachteiligen Wirkungen der Pflugfurche gegenüber Mulchsaatverfahren lassen sich jedoch neutralisieren. Wird die kinetische Energie der Regentropfen im Wesentlichen von Pflanzenmaterial absorbiert, bleibt die stark poröse Oberfläche des Bodens erhalten, wodurch erhebliche Niederschlagsmengen an Ort und Stelle, auch im geneigten Gelände, versickern können. Zudem mindert eine Mulchschicht den Windangriff auf Bodenpartikel wirkungsvoll. Die Wind- und Wassererosionsanfälligkeit des Bodens verringert sich entscheidend. Schon ab etwa 30 % Bodenbedeckung mit Mulchmaterial besteht bereits ein hoher Schutz gegen Bodenabtrag durch Wind und Wasser.

Ausgereifte technische Lösungen mit geringem Mehraufwand für das Aufbringen von Mulchmaterial auf gepflügtes Land gibt es noch nicht. Erste behelfsmäßige Maschinenanordnungen wurden bereits von Landwirten getestet und die Ergebnisse positiv beurteilt.

Hier setzt dieses Forschungsvorhaben an, auf Basis von theoretischen Ansätzen und praktischen Vorversuchen eine technische, funktionssichere Lösung als Versuchsmuster aufzubauen. Mit der Maschinenkombination, im Folgenden Pflug-Mulch-System genannt, werden die ackerbaulichen Vorzüge des Pflügens mit wesentlichen Vorteilen einer Mulchsaat verknüpft. Die beiden erforderlichen Arbeitsgänge Mulchen und Pflügen erfolgen dabei in einer Feldüberfahrt (Frontmulcher-Traktor-Pflug-Kombination). Die aufgewachsenen Gründümpfpflanzen oder Ernterückstände werden direkt beim Pflügen auf die soeben gepflügte Fläche aufgebracht. Der spezielle Frontanbau-Verteilmulcher schlegelt das organische Material im Traktorfrontbereich vor der Überfahrt ab und verteilt es auf der nebenliegenden, im vorigen Umgang bereits gepflügten Fläche. Die technische Realisierbarkeit und auch die prognostizierten ackerbaulichen, erosionsmindernden Vorzüge dieses neuen Bodenbearbeitungssystems sollen im Projekt mit Praxisversuchen auf verschiedenen Standorten gezeigt werden. Ziel ist das Aufbringen einer Mulchschicht mit mindestens 30% Bedeckungsgrad.

Die Neuentwicklung und der Aufbau des Mulchers für das Pflug-Mulch-System ist erforderlich, weil vorhandene Maschinen das Mulchmaterial weder quer noch gleichmäßig neben einen Traktor verlagern können.

Durch die Neuentwicklung des Front-Pflugmulchers als Maschinenfunktionsmuster ist von einem sehr hohen Innovationsgrad auszugehen und die Forschungsergebnisse sollen wichtige Grundlagen für die gewerbliche Serienfertigung entsprechender Geräte und eine zügige Einführung in die landwirtschaftliche Praxis legen.

3 Arbeitsschritte und angewandte Methoden

Das gesamte FuE Projekt gliedert sich in 3 Arbeitsphasen mit entsprechenden Arbeitsetapen. Die Bearbeitung der ersten Arbeitsphase wurde anschließend an den ersten Zwischenbericht mit dem Abschluss der Konstruktion des Frontmulchers und dem Aufbau als Funktionsmuster fertiggestellt (Tabelle 1). Die zweite Projektphase wurde mit den Tastversuchen des Versuchsmusters, der Entwicklung der Versuchsmethodik und der Untersuchung von Maschinenparametern im Feldtest mit der entsprechenden pflanzenbaulichen Auswertung abgeschlossen. Im Jahr 2018 konnten aufgrund von Trockenheit im Raum Sachsen keine Feldversuche durchgeführt werden, sodass der Projektzeitraum auf 48 Monate verlängert werden musste. Die Projektphase 3 konnte mit Ende der Projektlaufzeit erfolgreich abgeschlossen werden.

Tabelle 1 Arbeitsphasen und Stand der Arbeiten 06/2020

Zeitlicher Ablauf (Monat nach Projektbeginn)	3	6	9	12	15	18	21	24	30	36	42	48
Voruntersuchungen, Konstruktion und Aufbau des Frontmulchers, Prüfstanduntersuchungen, Stationärtests												
Feldversuche zu Funktionssicherheit, Einsatzpotenzial und -grenzen, verfahrenstechnische Untersuchungen mit Aufnahme von Messdaten von Technik und Bodendaten												
Verfahrensbewertung, technische Verbesserungen und umfassende Feldversuche in unterschiedlichen Kulturen und Böden, Vorführungen, Vorstellung des Pflug-Mulch-Verfahrens	Projektphasen 1, 2 & 3 abgeschlossen											

Innerhalb der dritten Projektphase wurden folgende Teilarbeiten bearbeitet:

1. Technische Überarbeitung des Funktionsmusters
2. Planung und Durchführung der Praxisversuche
3. Pflanzenbauliche und technische Auswertung der Praxisversuche
4. Ökonomische Betrachtung des Pflug-Mulch-Verfahrens
5. Veröffentlichung der Projektergebnisse und Vorführen des Funktionsmusters

Im Anschluss an die im zweiten Zwischenbericht dargestellten Arbeiten wurden von Seiten der TU-Dresden weitere Laboruntersuchungen zur Optimierung des Mulchgutaustrags aus der Maschine durchgeführt sowie maschinentechnische Veränderungen vorgenommen. Technischer Support sowie die Lieferung von Bauteilen erfolgte mit Unterstützung der Müthing GmbH und Co. KG. Die Praxisversuche zur Bewertung des modular aufgebauten Funktionsmusters und des Pflug-Mulch-Verfahrens an sich wurden in verschiedenen Kulturen durchgeführt. Die umfassende pflanzenbauliche Begleitung, Bonitur und Auswertung erfolgten durch die Firma Bioland Beratung GmbH. Diese Untersuchungen ermöglichen eine abschließende Bewertung des Verfahrens, sowie eine Einschätzung des Funktionsmusters. Die ausführlichen pflanzenbaulichen Ergebnisse geben zudem einen Ausblick für die weiterhin notwendigen technischen Entwicklungen.

4 Technische Ergebnisse

Die Projektbearbeitung konnte, mit einer Verschiebung der Feldversuche aus 2018 ins Jahr 2019, wie geplant erfolgen. In der Projektlaufzeit wurden die zuvor genannten Arbeitsschritte erfolgreich bearbeitet. Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse kurz dargestellt.

4.1 Konstruktive Überarbeitung des Funktionsmusters

4.1.1 Laboruntersuchungen

Durch die nicht durchführbaren Praxisversuche im Jahr 2018 wurde der Zeitraum sowie die anschließende Vegetationspause und das Frühjahr 2019 genutzt um projektbegleitend weitere Laborversuche zur Werkzeug- und Auswurfgestaltung des Funktionsmusters durchgeführt. Dazu wurde die aus Zwischenbericht 1 bekannte Mulcher-Laborversuchseinrichtung genutzt. Ziel war das definieren eines für Auswurf- und Zerkleinerungswirkung idealen Werkzeugs. Dazu wurden zusätzlich in Anlehnung an die Plattenschlegel der Mähler aus den 70er Jahren Konzeptwerkzeuge erstellt und mit dem Müthing-Hammerschlegel verglichen. Die Konzeptwerkzeuge wurden mit Schneidenwinkeln von $\eta = 10, 20, 30, 40^\circ$ gefertigt und getestet.

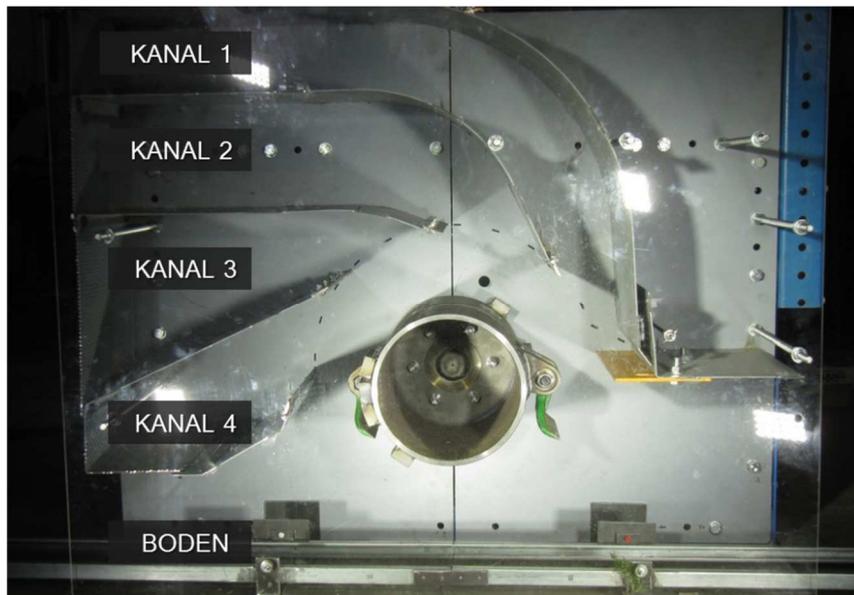


Abbildung 2 Mulcher-Laborversuchseinrichtung mit Kanälen zur Identifikation der Werkzeug-Abwurfbereiche

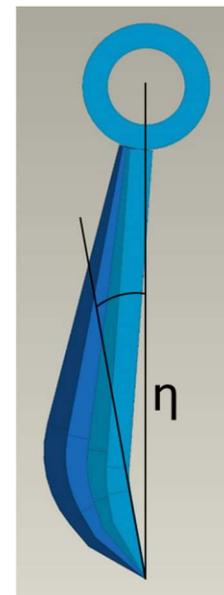


Abbildung 3, Plattenschlegelwerkzeug

Es wurde vermutet, dass diese Werkzeugform einen schmalen Abwurfbereich erzeugt und somit eine stärkere Konzentration des Gutstromes ermöglicht. Diese Erwartungen konnten durch die Laborversuche nicht bestätigt werden. Je nach Schneidenwinkel wurden Ergebnisse erzielt, die vergleichbar oder schlechter als jene des Hammerschlegels waren (Abbildung 4). Das Konzept Plattenschlegel wurde anschließend nicht weiterverfolgt. Es folgten weitere Untersuchungen des Hammerschlegels mit verschiedenen Gutarten (Luzerne, Raps, Ackersenf, Weizenstroh) bei denen ein Materialanteil in Kanal 1&2, welcher der Auswurföffnung des Funktionsmusters entspricht, von deutlich über 80% erreicht wurde. In der Werkzeugkonfiguration des Funktionsmusters wurde der Müthing-Hammerschlegel somit weiter als Vorzugsvariante genutzt.

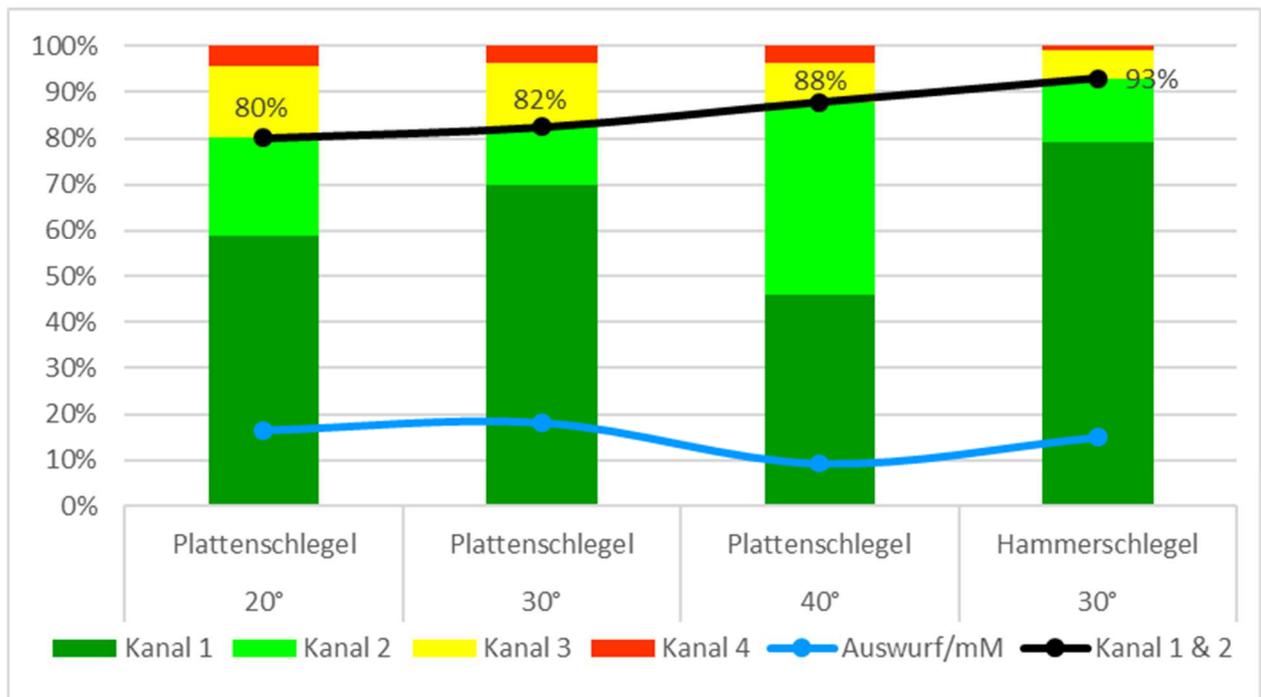


Abbildung 4 Ergebnisvergleich Plattenschlegel - Hammerschlegel

Für die Luftströmung im Bereich der Auswurfkontur wurde in Strömungsmessungen im Laborversuch ermittelt, dass eine Abrisskante an der Rückseite der Auswurfkontur möglichst nah am Flugkreisdurchmesser der Hammerschlegelwerkzeuge einen positiven Effekt auf die Strömungsgeschwindigkeit im Auswurfkanal hat. Dies kann weiter dazu beitragen, den Auswurf des gemulchten Materials zu verbessern. Die Positionierung dieser Abrisskante ist in Abbildung 8 (grün) dargestellt. Abbildung 5 zeigt den Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten im Kanal durch den Einbau der Abrisskante.

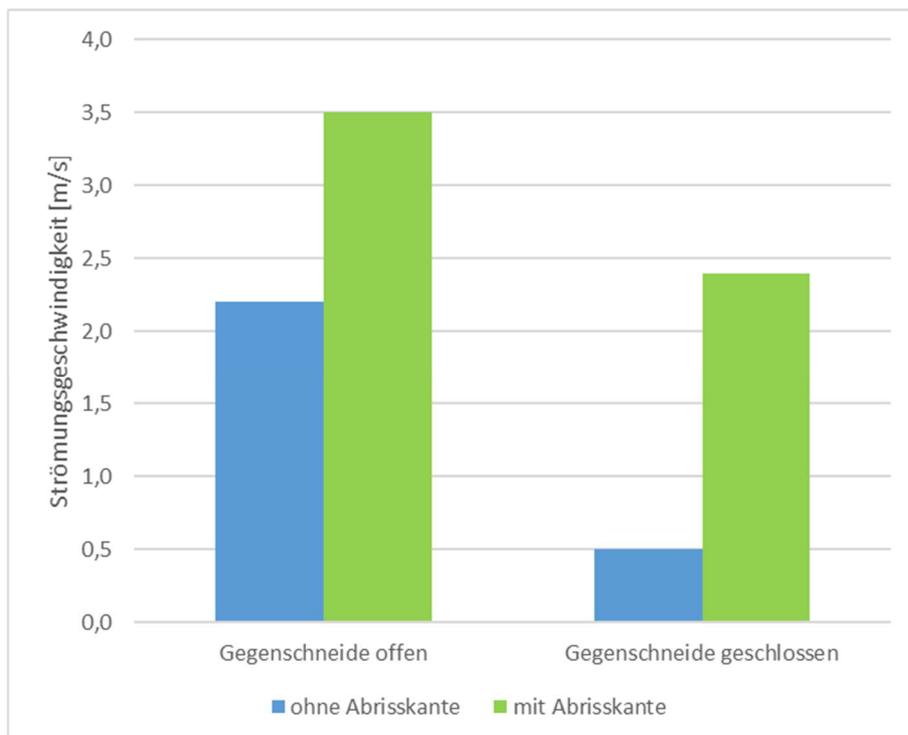


Abbildung 5 Überblick Abrisskanteneinfluss auf Strömungsgeschwindigkeit

4.1.2 Konstruktive Änderungen am Funktionsmuster

Die konstruktive Gestaltung des Frontmulcher Funktionsmusters wurde bereits in den ersten beiden Zwischenberichten ausführlich erläutert. Die Ergebnisse der Feldtests 2017 zeigten, wie im Zwischenbericht 2 mulch dargestellt, ein nicht zufriedenstellendes Verteilungsbild der gemulchten Masse. Konstruktive Änderungen sollten hier Verbesserungen erreichen. Mit Hilfe von gezahnten Abrisskanten an den Auswurfkrümmern sollte eine Auffächerung des Gutstroms erzeugt werden. In Tastversuchen im Juni und Oktober 2018 wurde deutlich, dass dies mit passiver Einwirkung nicht zu erreichen ist. Tastversuche mit demontiertem Auswurfkrümmer zeigten zudem, dass das gemulchte Material hauptsächlich bei der Umlenkung im Krümmer stark abgebremst wird, und sich dadurch zu Klumpen verbindet, welche sich anschließend nicht mehr fein genug auflösen, um eine gleichmäßige Mulchbedeckungsschicht zu erzeugen.

Es wurde entschieden das Konzept V1 mit 3 Auswurfkrümmern nicht weiter zu verfolgen. Durch den modularen Aufbau des Funktionsmusters mit definierten Schnittstellen ist es möglich andere Auswurfkonturen zu montieren. Mit den neu gewonnenen Erkenntnissen aus Labor- und Feldversuchen wurden alternative Auswurfkonzepte entwickelt. Diese wurden zudem unter Berücksichtigung der Sichtverhältnisse im Frontanbau konzipiert. Die Maschine sollte in Transportstellung nicht höher als 1,5m aufbauen. Alle weiteren Anforderungen aus dem Lastenheft wurden übernommen. Tests mit einem Prototypmuster von Konzept V2 zeigten, dass die geschlossene Zusammenführung in 3 Kanälen zum Verstopfen neigt, und keine Verbesserung der Materialverteilung erreicht. Mit Konzept V3 (Abbildung 6) wurden vielversprechende Ergebnisse erzielt und diese Variante für die Praxisversuche aufgebaut. Ziel dieser Konstruktion ist das möglichst direkte Umlenken des Gutstromes zur Seite. Durch die größere Anzahl von Krümmern wird eine bessere Verteilung des gemulchten Materials in der Fläche erreicht. Um das Funktionsmuster möglichst einfach zu halten wurde zunächst auf einen Fahrtrichtungswechsel verzichtet. Der Vergleich in Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der Vor- und Nachteile der getesteten Auswurfvarianten.

Tabelle 2 Vergleich der getesteten Auswurfvarianten

Kriterium	Variante 1 3 Türme	Variante 2 Tangentialführung	Variante 3 Direktauswurf
Bild			
Materialverteilung	- (Streifenablage)	-- (Materialstau)	++ (gleichmäßig)
Wurfweite	0	-	+
Wurfrichtungswechsel	++	0	0
Sicht nach vorn	--	+	+

Fertigung und Montage der neuen Auswurfkontur erfolgten durch die TU-Dresden. Unterstützung mit Maschinenteilen erfolgte durch die Müthing GmbH und Co. KG.

Erste Tests der Auswurfkontur erfolgten im Juni 2019, die ersten Ergebnisse zeigten ein deutlich verbessertes Verteilungsergebnis.

Zusammenfassend ergibt Variante 3 die vielversprechendste Auswurfvariante. Eine Änderung der Wurfrichtung nach links/rechts ist möglich und wurde als Konzept konstruiert. Hierbei werden zwei Auswurfkonturen montiert und hydraulisch über der Auswurföffnung der Maschine verschoben. Somit kann die Auswurfrichtung zukünftig mit dem Drehen des Pfluges über das Vorgewende-Management des Traktors gesteuert werden.



Abbildung 6 Umsetzung des Auswurfkonzeptes V3 an der Maschine

4.2 Praxisversuche – technische Ergebnisse

Ab Oktober 2019 erfolgten auf insgesamt 6 Flächen zu jeweils 0,5 ha Praxisversuche zur Bewertung des Pflug-Mulch-Verfahrens. Wie im Projektantrag beschrieben konnte das entwickelte Funktionsmuster dazu als technische Basis zur Verfügung stehen.

Die Versuchsplanung, Bonitur und Auswertung erfolgten durch die Bioland Beratung GmbH. Für Traktor und Pflug wurden Leihmaschinen verwendet. Der Einsatz der Maschinenkombination erfolgte durch die TU-Dresden. Verschleißteile wie Werkzeuge wurden von der Müthing GmbH & Co. KG bereitgestellt.

Die Gesamte Maschinenkombination bestand aus:

- Frontmulcher- Funktionsmuster (2,8m)
- Valtra T234 Direct (173 kW, stufenlos)
- Kverneland ES85-100 5-Schar-Pflug (1,6-2,5m)

Vor Anlegen der jeweiligen Vergleichsparzellen wurden die Einstellparameter (Gegenschneidenposition, Drehzahl, Abgabewinkel der Krümmen, Fahrgeschwindigkeit) des Funktionsmusters auf Testflächen an die Einsatzbedingungen angepasst. Im Anschluss erfolgte die Anlage eines Blockes nach dem Pflug-Mulch-Verfahren. Neben dieser Fläche wurde der Bestand gemulcht und untergepflügt. Die so angelegten Flächen konnten im Anschluss bonitiert werden. (Bedeckungsgrad, Abbau des Mulchmaterials, Bodenabtragsversuche, Nmin Untersuchungen)

In Anhang 1 und 2 sind die Versuchsdokumentation sowie die fotografische Dokumentation mit den Arbeitsergebnissen und Flächenübersichten der einzelnen Versuchsflächen dargestellt.

Im Folgenden werden die maschinentechnischen Ergebnisse der Versuche dargestellt, die detaillierten pflanzenbaulichen Ergebnisse sind in Kapitel 5 dokumentiert.



Abbildung 7 Maschinenkombination im Feldeinsatz bei der Parzellenanlage

4.2.1 Maschinenkonfiguration

Nachdem die Einstellparameter der Versuchsmaschine, wie in Zwischenbericht 2 dargelegt, identifiziert werden konnten, war das Ziel der Praxisversuche für jede Fläche eine optimale Einstellung zu erzielen. Als Basiskonfiguration wurden folgende Daten festgelegt:

- Gegenschneidenposition (Schneidspalt) [mm]: $s = 25$ (9-45)
- Abgabewinkel der Auswurfkrümmer [°]: $\alpha = 70$ (70-90)
- Nenndrehzahl (Zapfwelle) [U/min]: $n_z = 850$ (700-1000)
→ entspricht Rotordrehzahl [U/min]: $n_R = 1900$ (1500-2250)
- Fahrgeschwindigkeit [km/h] $v = 7$ (5-12)

Die Werte in Klammern zeigen den theoretisch möglichen Variationsbereich.

Mit Hilfe der Einstellparameter konnte das Frontmulcher-Funktionsmuster an die verschiedenen Gegebenheiten angepasst werden. Diese umfassten Luzernebestände mit teilweise sehr geringem Aufwuchs (5t/ha) bis hin zu Ackersenfbeständen mit bis zu 35 t/ha. Der Maschinendurchsatz konnte somit von 10 t/h bis 70 t/h getestet werden.

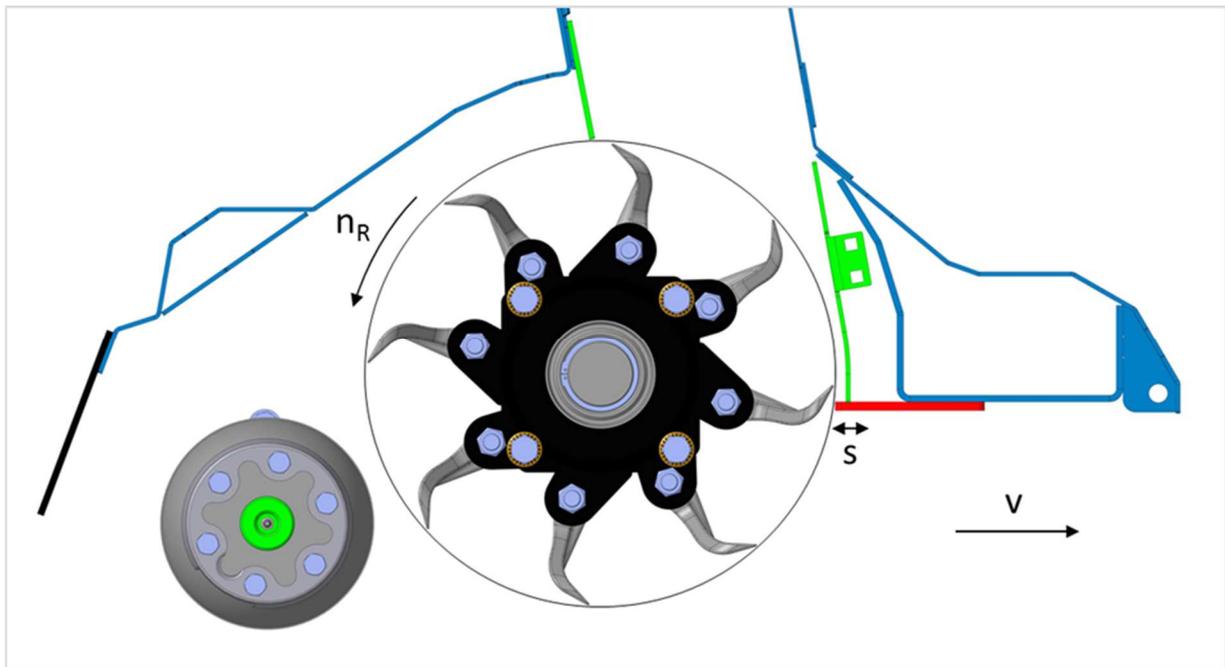


Abbildung 8 Übersicht der Maschinenparameter

4.2.2 Wurfweite / Materialverteilung:

Mit den Einstellparametern der Maschine konnte für alle Aufwüchse ein zufriedenstellendes Verteilungsergebnis erreicht werden. Erste Schätzungen ergaben Bodenbedeckungsgrade von deutlich über 60% (Abbildung 9). Mit der Auswurfkontur Variante 3 sind deutlich höhere Wurfweiten von, je nach Gutart, bis zu 6m möglich. Für ein optimales Verteilungsergebnis wurde die Maschine so eingestellt, dass sie nicht nur auf die nebenliegende Fahrspur, sondern auch darüber hinaus wirft. Durch die so erzeugte Mehrfachbedeckung kann das beste Verteilungsergebnis erzielt werden. Hier ist eine deutliche Verbesserung durch die Auswurfkontur V3 erkennbar. In vergleichbaren Bedingungen wurden in den Versuchen 2017 maximal 30% Bedeckungsgrad erreicht.

Die geschraubte Anbringung der Auswurfkrümmer sorgte an den ersten Versuchstagen (Fläche 1,4,6) in zähfasrigen Beständen (insbesondere Flächen 1 und 4) für ungleichmäßigen

Auswurf und teilweise Verstopfungen. Für die Durchführung der zweiten Versuchsreihe (Flächen 2,3,5) wurden diese angeschweißt. Das Arbeitsbild konnte dadurch verbessert werden. (vgl. Anlage 1,2)



Abbildung 9 Bedeckungsgrad und Verteilungsbild

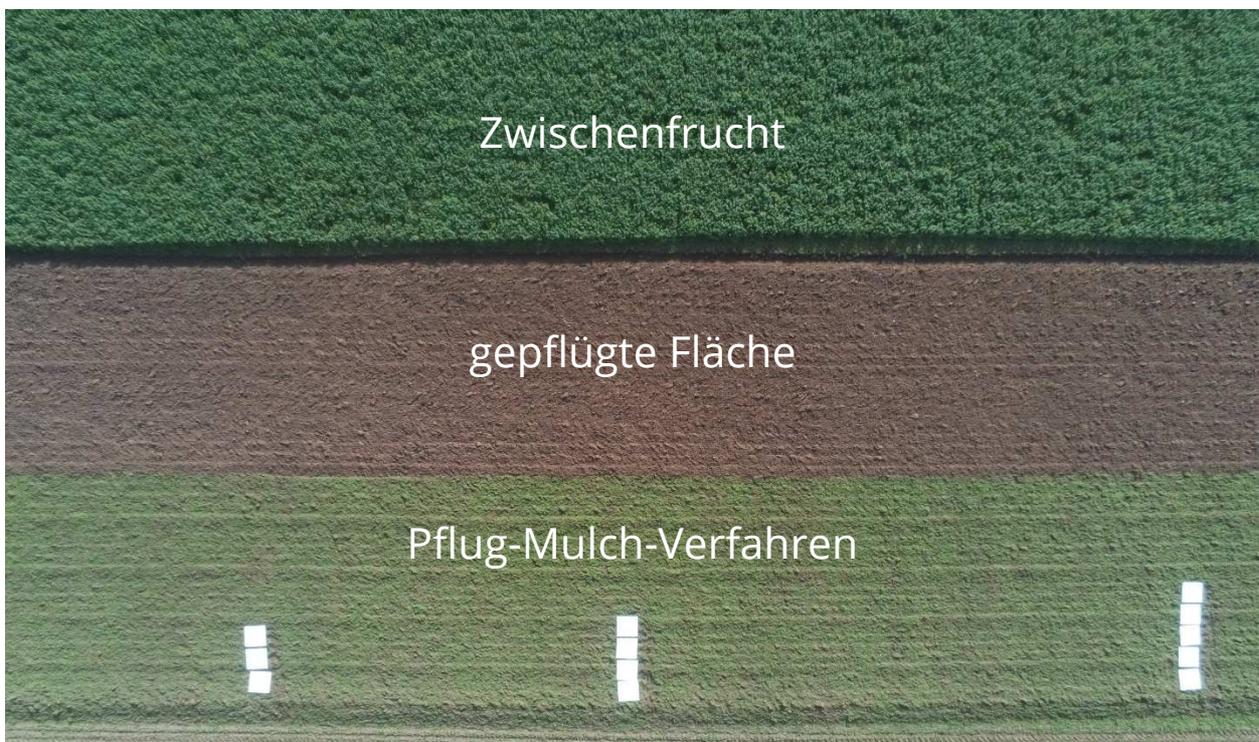


Abbildung 10 Übersicht der angelegten Fläche

4.2.3 Zerkleinerungswirkung

Insbesondere in den stark ausgeprägten Beständen bei hohen Durchsätzen wurde das Mulchmaterial intensiv zerkleinert. Die Halmlängen betragen hier 1-10cm mit hohem Anteil der kleinen Fraktionen. Auch mit Anpassung der Gegenschneide konnte dieses Arbeitsergebnis nicht ausreichend stark beeinflusst werden. Begründet werden kann dieses Verhalten mit dem relativ kleinen Mulchergehäuse. Dieses basiert in den Abmessungen auf der Maschine MU-L. Es zeigte sich, dass diese Maschinengröße bei hohen Durchsätzen zum aufstauen des Mulchmaterials neigt, und so eine sehr intensive Zerkleinerung herbeigeführt wird. Dieses Verhalten wird auch in den Untersuchungen zum Leistungsbedarf in 4.2.4 ersichtlich. In Summe führten diese Effekte auch dazu, dass maximal 7 km/h Fahrgeschwindigkeit erreicht werden konnten. Es ist zu erwarten, dass sich diese Problematik mit einem größeren Mulchergehäuse der Baugröße MU-M oder MU-PRO lösen lässt. Detaillierte pflanzenbauliche Einschätzungen der Zerkleinerungswirkung sind in Kapitel 5 dargestellt.

4.2.4 Leistungsbedarf

Für die Komponenten des Gesamtsystems wurden Leistungsdaten aufgezeichnet, um die in Zwischenbericht 1 rechnerisch ermittelten Leistungswerte zu überprüfen. Die Ermittlung erfolgte für Pflug und Frontmulcher getrennt. Die Pflugleistung wurde mit Hilfe eines Messdreiecks der Professur Agrarsystemtechnik (Rückkopplungsfreies Messen von Horizontal-, Vertikal-, und Querkraft, siehe Anhang) und dem in Feldtests und Praxisversuchen verwendeten 5-Schar-Variodrehpflug in mittelschweren bis schweren Einsatzbedingungen (toniger Lehmboden, Weizenstoppel, Region Heidenau) ermittelt. Folgende Parameter wurden dabei variiert:

- Arbeitsbreite (2; 2,5m)
- Fahrgeschwindigkeit (5; 8;12 km/h)
- Arbeitstiefe (15; 25cm)

Für jede Einstellung wurden 4 Messungen zufällig auf der Versuchsfläche verteilt durchgeführt. Die Ergebnisse für die Arbeitstiefe 25cm sind in Abbildung 11 dargestellt. Es wird deutlich, dass die in der Praxis übliche Fahrgeschwindigkeit von 8 km/h eine gute Kombination aus Flächenleistung und Zugleistungsbedarf darstellt. Für 2,5m Arbeitsbreite wird dabei eine Zugleistung von ca. 55 kW benötigt.

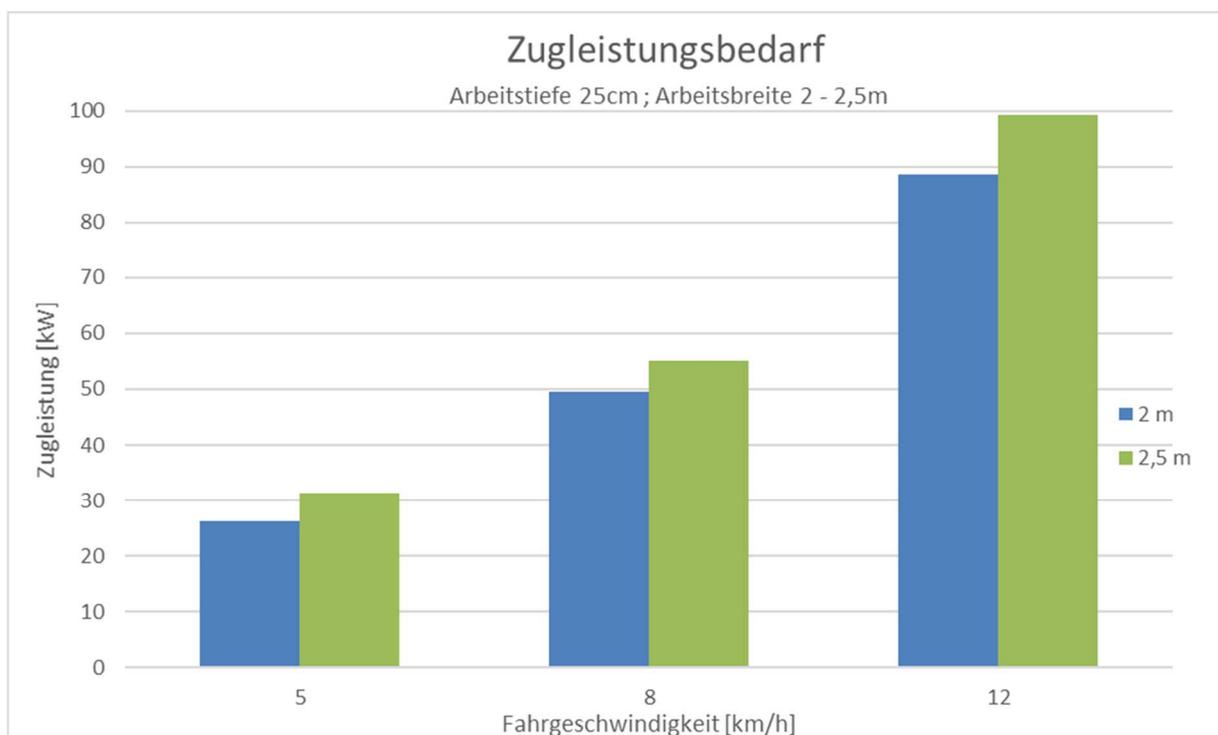


Abbildung 11 Diagramm Zugleistungsbedarf 5-Schar-Variodrehpflug

Während der Praxisversuche wurden mit Hilfe einer Drehmomentmessnabe der Professur Agrarsystemtechnik (NCTE-Serie 7000, max. 3 kNm) der Drehleistungsbedarf des Frontmulchers bestimmt. Dazu wurden auf einer der Testflächen in typischen Einsatzbedingungen (Zwischenfrucht, 25% TM-Anteil, 32 t/ha) folgende Parameter untersucht:

- Zapfwelldrehzahl (850; 1000 U/min)
- Fahrgeschwindigkeit (5; 7 km/h)
- Schneidspalt (s=10, 25, 40mm)

Wie bereits unter 4.2.3 beschrieben, führt der Stau effekt des kleinen Mulchgehäuses bei hohen Durchsätzen zu gesteigerter Zerkleinerungswirkung und damit einhergehend höheren Schnittkräften. Diese erhöhen den Leistungsbedarf des Mulchprozesses. Im konkreten Fall beträgt der Drehleistungsbedarf bei 2,5m Arbeitsbreite, der ermittelten Vorzugsdrehzahl von 850 U/min und 7 km/h Fahrgeschwindigkeit 75kW (siehe Abbildung 12). Neben dem Vergleich der Fahrgeschwindigkeiten und Rotordrehzahlen wurde untersucht, ob eine Veränderung des Schneidspaltes Einfluss auf den Leistungsbedarf hat. Die Ergebnisse zeigen Unterschiede im Bereich von 1-2 kW, welche nicht als Signifikant bezeichnet werden können.

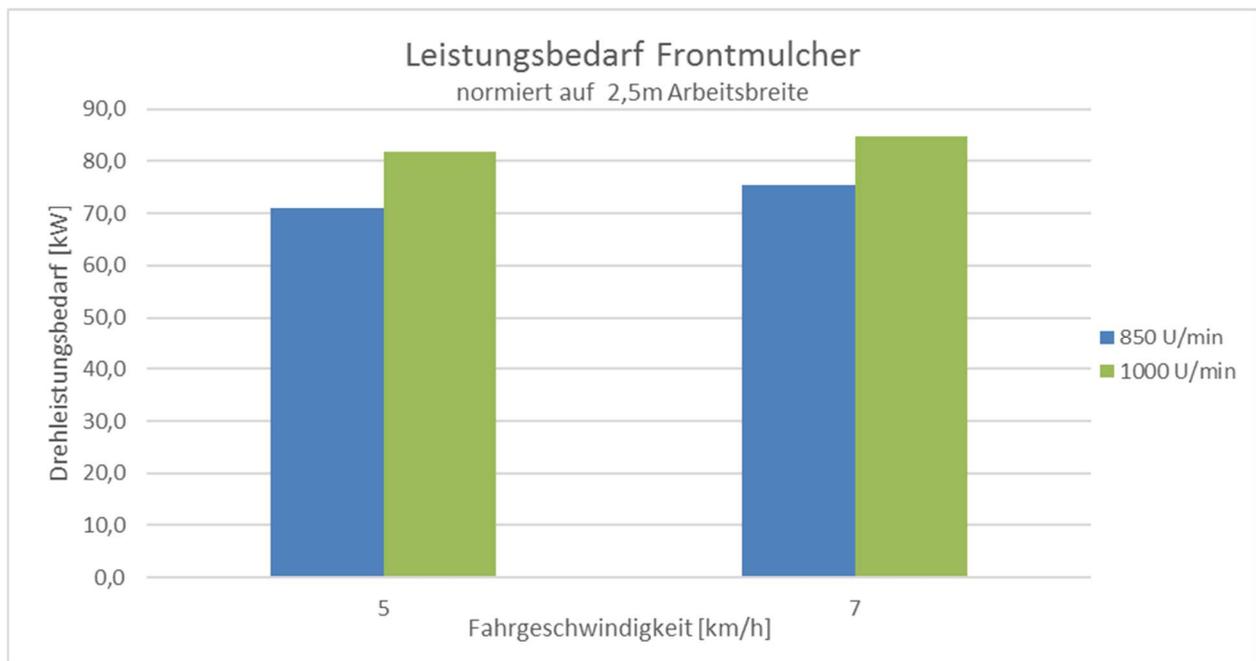


Abbildung 12 Übersicht Leistungsbedarf Frontmulcher

Der Gesamtleistungsbedarf der Maschinenkombination beträgt bei den genannten Einsatzbedingungen (7 km/h, 850 U/min, 2,5m) kumuliert ca. 120kW. Hinzu kommt Bergfahrleistung von in Summe ca. 30 kW. Mit einem Getriebewirkungsgrad von 95% sowie Laufwerksverlusten von 10% wird somit eine Traktornennleistung nach ECE R24 von ca. 180 kW benötigt Dies entspricht den theoretischen Annahmen aus Zwischenbericht 1.

Eine Übersicht über weitere Arbeitsbreiten ist in Abbildung 13 dargestellt.

Bei den Praxisversuchen sorgte die Kombination aus Drehzahlreduzierung (850 U/min Zapfwelle) und der mutmaßlich höheren Getriebeverluste des stufenlos-Leistungsverzweigten Antriebstranges bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten dafür, dass in steilen Hanglagen nicht ausreichend Leistung zur Verfügung stand. Hier wurde das Verfahren absätzig durchgeführt. Für die wirtschaftlichen Betrachtungen unter 6.1 wird deshalb für das Gesamtsystem eine benötigte Traktornennleistung von 200 kW angesetzt.

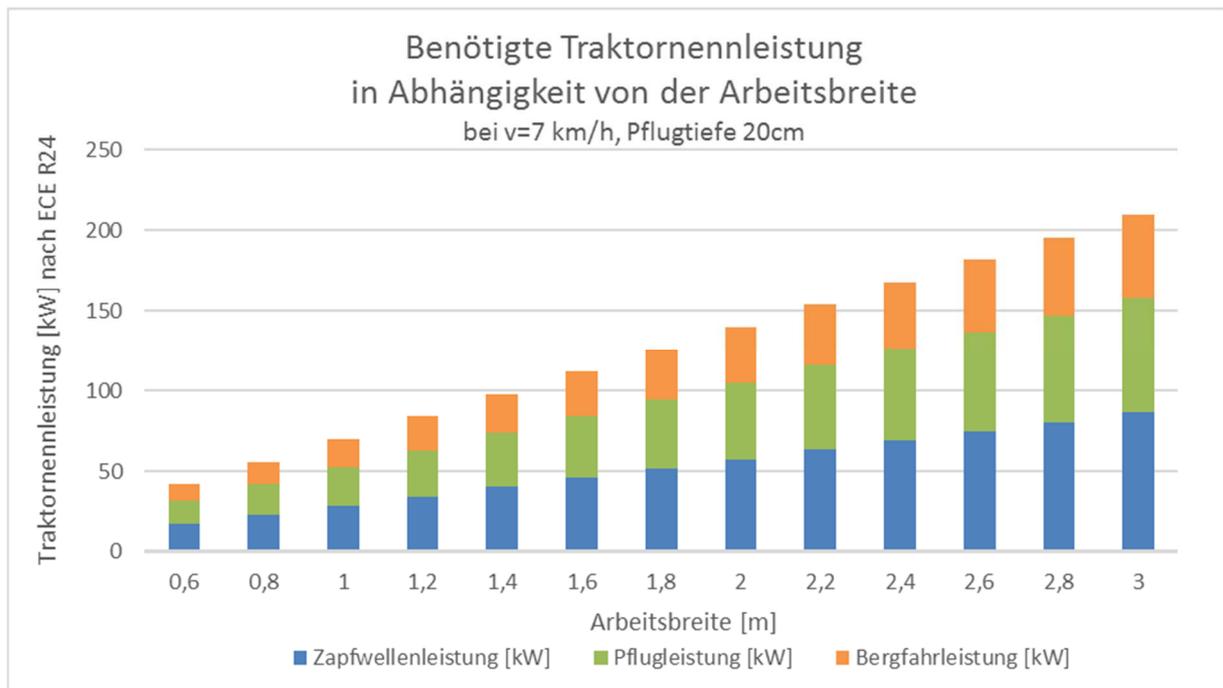


Abbildung 13 Leistungsbedarf nach Arbeitsbreiten

4.2.5 Maschinenhandling

Auf den weichen, feuchten Böden einiger Flächen konnte der Frontmulcher nicht in Schwimmstellung auf der Stützwalze laufen, sondern musste leicht angehoben werden. Teilweise wurden sonst die Vorderräder des Traktors zu stark entlastet und damit Lenkbefehle schlecht umgesetzt. Hieraus resultierte eine zum Teil schwankende Schnitthöhe des Mulchers. Da der Pendelausgleich auf dem Abstützen auf der Stützwalze basiert, konnte die Boden Anpassung nicht mehr optimal erfolgen. Bei Tastversuchen zum Onland-pflügen wurden diese Problematiken nicht festgestellt. Für diese Verfahrensweise kann die Komplexität der Maschine deutlich reduziert werden indem auf Pendelausgleich und Seitenverschiebung verzichtet wird.

Um die Verschmutzung des Traktors durch Mulchmaterial zu verhindern wurde ein Schutznetz angebracht. (Abbildung 7) Dieses reduzierte die Verschmutzung auf ein akzeptables Maß.

Zwischen den Versuchsflächen waren längere Straßenfahrten mit der Maschinenkombination notwendig. Die Baulänge und Übersicht nach vorn war dabei ausreichend und vergleichbar mit Frontmähdwerken.

Eine Zusammenfassung sowie eine Bewertung des Funktionsmusters ist unter 7.1.1 dargestellt.

5 Pflanzenbauliche Ergebnisse

5.1 Randbedingungen der Praxisversuche

5.1.1 Standorte

Für die Praxisversuche in der Anbausaison 2019/2020 wurden fünf Flächen ausgewählt, die durch Bodenart und Topographie Anfälligkeit für Erosion durch Niederschlag aufwiesen. Außerdem musste ein ausreichend massereicher Pflanzenbestand für den Mulchvorgang vorhanden sein. Zudem wurde eine weitere, ebene Fläche mit einbezogen, um die Datengrundlage für Bodenbedeckung zu erweitern und um noch einen weiteren Betrieb mit für das Thema Pflug-Mulch-Verfahren zu sensibilisieren.

Das Jahr 2019 war in Mitteldeutschland zunächst wiederum trocken. Erst im September führten dann ausreichende Niederschläge in Sachsen noch zu einem Zuwachs der Biomasse, sodass die Versuche im ursprünglich geplanten Gebiet stattfinden konnten.

Mit Aufwuchsmengen im Mittel von 8 t/ha bis 32,8 t/ha auf den verschiedenen Standorten wurde ein weiter Bereich bearbeitet, der sowohl für die erzielbare Bodenbedeckung und den folgenden Pflanzenbau als auch für die Leistungsfähigkeit des technischen Systems eine umfassende Testsituation darstellte. Dabei war die Wuchshöhe des Bestandes nicht immer bestimmend für die vorhandene Grünmasse. Vor allem dichter Ausfallraps (Ursache: Hagelschlag) auf einer konventionell bewirtschafteten Fläche entsprach bei nur 30 cm Wuchshöhe einer Grünmasse von 27 t/ha. Nur ein Gründüngungsgemenge mit 130 cm Wuchshöhe, das ebenfalls unter konventioneller Bewirtschaftung stand, lieferte mit 32,8 t/ha am Tag der Bearbeitung einen noch massereicheren Aufwuchs. Die ökologisch bewirtschafteten Flächen lieferten Aufwüchse um 10 t/ha auf, wobei ein Luzerneaufwuchs auch das Massenniveau der Zwischenfrüchte auf anderen Öko-Flächen erreichte.

Alle Böden verfügten über mehr als 50 % Schluff-Anteile. Die Versuchsflächen waren bis zu 16,5 % geneigt. Wobei auch eine Fläche völlig eben war. Die Homogenität innerhalb der einzelnen Versuchsflächen konnte auf Grund der erforderlichen Parzellengrößen beim Parameter Hangneigung nicht durchweg eingehalten werden. Im Weiteren traten noch Unterschiede in der Bodenart zwischen den Versuchsvarianten auf den Standorten als potenzielle Varianzursache zu Tage. Diese heterogene Versuchsgrundlage veranlasste dazu, alle sechs Standorte als einen Versuch in der Auswertung zusammen zu fassen.

Die Flächen 1 und 2 lagen im Erosionsgefährdungskataster mit der Cross Compliance-Regelung „Erosionsgefährdung durch Wasser“ 1 (CC-Wasser 1):

- Pflugverbot vom 1. Dezember bis 15. Februar
- Pflügen erlaubt, wenn Aussaat vor 1. Dezember erfolgt
- Pflügen zulässig, wenn Bewirtschaftung quer zum Hang erfolgt

Soweit erforderlich wurden für die Versuche die notwendigen Genehmigungen für das Pflügen bei der zuständigen amtlichen Stelle eingeholt.

Tabelle 3 Ausgangssituationen auf den Versuchsstandorten am Tag der Bearbeitung

Fläche Nr.	1	2	3	4	5	6
Bearbeitungsdatum	9.10.19	24.10.19	24.10.19	10.10.19	22.10.19	10.10.19
Anbau	ökologisch	ökologisch	ökologisch	konventionell	ökologisch	konventionell
Hangneigung (%)	18	5	8	0	11	9
Kultur	Luzerne 4. Standjahr	ZWF ¹	Luzerne	ZWF ²	ZWF ³	Raps
Anbauform	HF ⁴	ZF	HF ⁴	ZF	ZF	ZF
Wuchshöhe (cm)	80 - 100	70 - 120,	45 - 65	130	140	30
Grünmasse je ha						
r	5	3	3	7	3	3
Minimum (t)	6,4	6,5	6,6	7,4	5,5	25,5
Maximum (t)	17,4	17,3	9,1	37,4	14,5	28,3
Mittelwert (t)	11,2	11,7	8,0	32,8	10,3	27,0
CV	0,39	0,46	0,16	0,12	0,44	0,04
SD	4,33	5,43	1,31	3,89	4,55	1,15

¹ Zwischenfrucht (ZWF): Senf-Phacelia-Gemenge;

² Zwischenfrucht (ZWF): Senf-Phacelia-Ramtilkraut-Gemenge

³ Zwischenfrucht (ZWF): 30% Phacelia, 17,5 % Weißer Senf, 12,5 % Ramtilkraut, 40 % Gartenkresse

⁴ Hauptfrucht (HF)

5.1.2 Witterungsverlauf im Versuchszeitraum

Die natürlichen Niederschläge waren für den Einsatz des Pflug-Mulch-Verfahrens und die folgende Phase der Bodenbeprobung eine wesentliche Voraussetzung für vergleichbare Ergebnisse. Zum einen sollten bei der Bodenbearbeitung gute Bodenstrukturen entstehen, zum anderen ließ aber eine Vorbelastung der Struktur der Bodenoberflächen durch Niederschläge im weiteren Zeitverlauf eine ausgeprägte Differenzierung der Ergebnisse der Niederschlagssimulationen erwarten. Dagegen hätte eine Wassersättigung der Böden eine Angleichung dieser Ergebnisse erwarten lassen.

Nach dem in den Sommermonaten von Juli bis September mit zusammen 157 mm Niederschlag ein eher trockener Jahresabschnitt den Versuchen vorausging, erhöhten die Niederschläge den Wassergehalt im Pflughorizont des Bodens in der ersten Oktoberdekade 2019 mit 38 mm bis zum Beginn der Bodenbearbeitungen. Damit war eine Bodenfeuchte erreicht, die eine Pflugfurche unter guten Bodenbedingungen sicherstellte. Das heißt, der Boden wurde auf den Streichblechen des Pfluges gekrümelt. Schmierflächen entstanden allgemein nicht. Der Versuchseinsatz fand dann vom 09.10.2019 bis 24.10.2019 in einem eher trockenen Zeitabschnitt mit etwa 10 mm Niederschlag im Oktober unter einheitlichen Boden- und Klimabedingungen auf den verschiedenen Standorten statt (Abbildung 14).

Vom Einsatz bis zu den ersten Niederschlagssimulationen für die Bodenabtragsversuche am 02.12.2019 traten nur Regenereignisse mit maximalen Wassermengen von 6 mm pro Tag

auf. Insgesamt fielen 42 mm Regen. Das führte zu einem Anstieg der Bodenfeuchte auf einem nahegelegenen Lössboden der Lysimeterstation Brandis (Lysimeter 9; Bodenart Ut3/Ut4) im Bereich von 10 %-Punkten in 0,5 m Tiefe. Mit 28 % Wassergehalt ist jedoch eine weitere Wasseraufnahme des Bodens bis zu einem Wert von 50 % gewährleistet (Scheffer und Schachtschabel 1989). Im Versuchszeitraum 2019/20 wurden maximal nur 31 % Wassergehalt im Februar in Brandis im Lössprofil bei 0,5 m Tiefe registriert, obwohl weitere 181 mm Niederschlag in den Monaten ab Dezember bis Mai hinzukamen. Somit war auch für Beregnungsversuche im Januar mit einer Wasseraufnahmekapazität des Bodens zu rechnen. Mit den dicht aufeinanderfolgenden Niederschlagsereignissen im Februar bis Mitte März und den einsetzenden Verhaltensregeln in Bezug auf die Verbreitung von COVID-19 kamen dann die Beregnungsversuche vorerst zum Stillstand. Am 8.5.2020 wurde der letzte Beregnungstest nach einem 2 Monate dauernden trockenen Witterungsabschnitt mit insgesamt nur 31 mm Regen abgeschlossen.

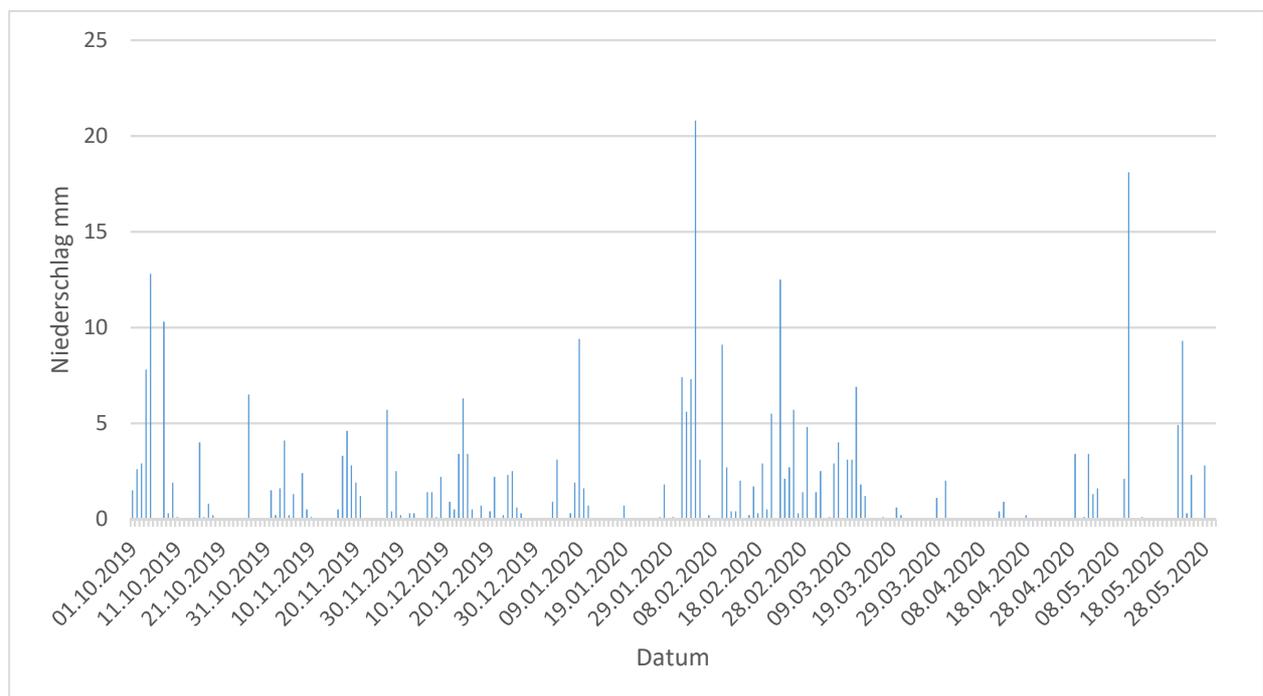


Abbildung 14 Verteilung der Tagesniederschläge am Standort Dürreweitzschen im Versuchszeitraum

5.1.3 Temperaturen

Der Temperaturverlauf im Untersuchungszeitraum vom Herbst 2019 bis ins Frühjahr 2020 hatte Einfluss auf die Ausführbarkeit der Beregnungssimulationen. Auf gefrorenen Böden bekämen diese Untersuchungen einen völlig anderen Charakter als auf offenen Böden. Zudem wirkt bekanntermaßen die Eisbildung direkt auf die Bodenstruktur ein. Im Zusammenhang mit dem Temperaturverlauf steht außerdem die Abbaugeschwindigkeit von organischer Substanz (Mulchmaterial) auf der Bodenoberfläche (Prochnow et al. 2000).

Insgesamt waren die Temperaturen über den gesamten Versuchszeitraum hinweg mild, der Winter war dabei deutlich zu warm gegenüber den Mittelwerten der Referenzperiode. Dadurch konnten den Winter über Beregnungssimulationen ausgeführt werden. Eistage traten kaum auf. In Folge konnte auch über die Wintermonate Regenwurmaktivität bis zur Bodenoberfläche beobachtet werden.

5.2 Versuchsmethodik

5.2.1 Niederschlagssimulator

Für die Simulation der Niederschläge wurde ein Niederschlagssimulator eingesetzt, der eine Fläche von 1 m² beregnen konnte (Abbildung 15). Die Beregnungsintensität war 20 mm in 20 Minuten, ein Wert, der als seltenes extremes Ereignis eingeordnet wird. Die Technik der Beregnung ist bei Zimmerling (2004) ausführlich beschrieben. Im Wesentlichen wurde für die Regensimulation eine schwenkbare Düse (Veejet 80/100) eingesetzt, die 2 m über der Bodenparzelle arbeitete. Die Tropfengröße an der Düse wurde über den Wasserdruck (0,4 bar) geregelt und die Wassermenge über die Länge der Pausen am Umkehrpunkt zwischen den Schwenks gesteuert. Während stationären Phase der Düsen wurde das abgegebene Wasser abgeleitet und gelangte nicht auf die Testparzelle.



Abbildung 15 Aufbau und Positionierung des Niederschlagssimulators

Abbildung 16 Beregnete Testfläche von einem Quadratmeter; Ablauf des Wassers am oberen Bildrand

Die Parzellen wurden mindestens 20 Minuten lang beregnet, bis 40 mm Niederschlag ausgebracht waren (Abbildung 16). Falls erforderlich, wurde über die 20 Minute hinaus bewässert, um zumindest den Abflussbeginn von der Parzelle noch zeitlich dokumentieren zu können. Das von den Parzellen abfließende Wasser mit dem darin abgetragenen Bodenmaterial lief in Laborflaschen mit 2 l Volumen ab.

Die Feststoffe der Wasser-Boden-Suspension wurden nach dem Absetzen dekantiert und in Aluminiumschalen an der Luft bei 20° C und 40 % relative Luftfeuchte bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend gewogen.

Die Wiederholbarkeit der ausgebrachten Wassermenge der Regnertechnik wurde vor den Versuchen mit einer Reihe von Druckstufen geprüft. Dazu wurde auch das Manometer an einer stehenden Wassersäule bis 5 m Höhe (0,5 bar) abgeglichen. Es zeigte sich eine nahezu perfekte Wiederholgenauigkeit der Beregnungstechnik im Druckbereich von 0,1 bar bis 0,5 bar bei einer fest eingestellten Schwenkfrequenz. Zudem wurde die lineare Abhängigkeit der Flussmenge vom Speisedruck der Düse deutlich. Bei den Feldversuchen erfolgte außerdem eine Korrektur für die Höhenlage des Druckmessers in Bezug auf die Montagehöhe der Düse, um diese Fehlerquelle klein zu halten.

Zur Bestimmung der gesamten Streuung der Regensimulation, des technischen Aufbaus einschließlich der Bodenparameter, wurde eine dreifache Wiederholung des Vorgangs auf einer

augenscheinlich einheitlichen Bodenparzelle in Mais nach der Aussaat im Mai 2020 ausgeführt, bevor die Saat auf lief. Die Variationskoeffizienten der Parameter Abflussbeginn, Abflussmenge bis zur 20. Minute und Sedimentaustrag lagen alle über 0,5 (Tabelle 4). Aufgrund der sicheren Wiederholbarkeit der ausgebrachten Niederschlagsmenge, musste diese hohe Variabilität in der Bodenbeschaffenheit der Beregnungspartellen begründet gewesen sein. Daraus ergab sich ein stark eingeschränkter Aussagewert dieser Daten. Die Auswertung der Datenwerte wurde deswegen auf die Spannweite und Maximalwerte begrenzt. Eine hohe Variabilität der Beregnungsversuche wurde auch von Zimmerling (2004) mit der gleichen Beregnungstechnik beobachtet. Gleichzeitig schränkt der hohe Arbeitsaufwand für die einzelnen Beregnungen die Anzahl der Wiederholungen stark ein.

Tabelle 4 Bestimmung der Streuung einer dreifachen Wiederholung in einer Variante

n = 3	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
Abflussbeginn, [min]	12,7	6,7	0,53
Abfluss bis 20. min, [ml]	655	448	0,68
Sedimentaustrag, [g]	3	1,7	0,58

Die Hangneigungen wurden mittels einem zwei Meter langem Richtscheit und Wasserwaage mit drei Wiederholungen im Bereich der Beregnungspartellen gemessen.

5.2.2 Bodenbedeckungsgradermittlung

Über den Grad der Bodenbedeckung lassen sich Rückschlüsse auf die Erosionsfestigkeit einer Ackeroberfläche ziehen. Für die Bestimmung des Bedeckungsgrades wurde die Knotenschnurmethode von Winnige et al. 1998 modifiziert angewandt. Bis heute ist kein objektives und vor allem robustes maschinelles Verfahren für die Erfassung des Parameters Bodenbedeckungsgrad bekannt. Die Datenauswertung anhand von Bildanalysen durch Computersoftware findet in der Regel an der Farbunterscheidung spätestens bei erdbraunem, angerottetem Material ihre Grenzen. Einen ausführlichen Bericht dazu gibt Pforte (2010).

Im Projekt wurden die Bedeckungsgrade in der Regel über Fotografien der Mulchauflage visuell bestimmt, indem ein quadratisches Gitter mit mindestens 100 Knotenpunkten der Abbildung überlagert wurde. Die Auszählung der Knotenpunkte, die mit einem Mulchpartikel zusammentrafen, wurde sodann in Prozent Bedeckungsgrad gewertet. Vorteil dieser Foto-Raster-Kombination ist eine Auswertungsmöglichkeit und kontrollierten Lichtverhältnissen am Bildschirm sowie einer ständig gegebenen Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse. Als Plausibilitätsprüfung der Zählungen wurde regelmäßig automatisierte Bildanalysen gemäß Riegler-Nurscher et al. (2016) in Auftrag gegeben, als auch rein visuelle Anteilsschätzungen mit Hilfe des Göttinger Schätzrahmens im Feld sowie parallele Auszählungen und Schätzungen in den Fotos vorgenommen.

Unterstützt wurde die Wiederholbarkeit der Mulchdictebestimmungen in dem das Mulchgut auf weiße, quadratische Aluminium-Polyethylen-Verbundplatten (Dibond) mit einem Quadratmeter Fläche aufgetragen wurde (Abbildung 17). Dies ermöglichte ein genaues Wiegen des Mulchauftrages, sowie eine Bestimmung der Dichte des Mulchauftrages auf einem einheitlichen und hoch kontrastierenden Untergrund.



Abbildung 17 Mulchgutauftrag auf weiße Alu-Polyethylen-Verbundplatten

Für die Bestimmung des Abbaus der Mulchschichten wurden die Bedeckungen über den Versuchszeitraum an mindestens 6 Terminen mit jeweils 3 Fotos in jeder Variante dokumentiert und mit der Gitterrastermethode ausgewertet.

Bodenanalysen auf Nährstoffgehalte, N_{\min} , organische Substanz und Körnung sowie Untersuchungen an Pflanzenmaterial wurden bei BioChem agrar GmbH in Auftrag gegeben.

Die Regenwurmaktivität in der oberflächennahen Bodenschicht bis 30 cm Tiefe wurde durch auszählen der Individuen aus Bodenproben von definierter Masse bestimmt. Mit dem Spaten wurde dazu an 5 unterschiedlichen Stellen ein Bodenblock ausgegraben. Diese Blöcke wurden gewogen und dann auf die Anzahl der Regenwürmer untersucht. Ein Austreiben sämtlicher Individuen aus dem Bodenprofil wurde nicht unternommen, da keine Wirkung auf die gesamte Population der Regenwürmer auf Grund der kurzzeitigen Versuche zu erwarten waren.

Für Temperaturmessungen wurde ein Einstichthermometer (Sondenzlänge 140 mm) mit einem geeichten Gerät abgeglichen. Aktuelle Windgeschwindigkeiten im Zusammenhang mit den Beregnungsversuchen wurden mit einem Schalensternanemometer (VEB-Anemometerbau Dresden) unbekannter Genauigkeit erfasst.

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit der Software BiAS, Version 11.10, der Goethe-Universität-Frankfurt.

5.2.3 Pflanzenbauliche Bonituren und Bodenbeprobung (N_{\min} , Grundnährstoffe, pH-Wert, organische Substanz und Bodenart)

Für die pflanzenbaulichen Bonituren wurden im Frühjahr in den Versuchsvarianten die Pflanzen pro m^2 gezählt als auch die Pflanzenhöhen gemessen und Quadratmeterschnitte genommen. Bei Kartoffeln und Mais wurden lediglich die Pflanzenhöhen erfasst.

Bodenproben für N_{\min} -Untersuchung wurden sowohl im Vorwinter wie auch im Frühjahr gezogen. Die Mischproben bestanden aus je 5 Einstichen aus 0-30 cm und aus 30-60 cm Bodentiefe pro Variante (Pflug-Mulch-System (PMS), Pflug (P) und betriebsübliche Bewirtschaftung). Die Laborarbeiten wurden bei BioChem Agrar (VDLUFA-Methode MB I, A 6.1.4.1, Methodenabweichung: Reduktionsmittel Hydrazinsulfat) in Auftrag gegeben.

Je Variante wurden für die Untersuchung der Grundnährstoffe, pH-Wert und organische Substanz (TOC) sowie zur Bodenart eine Mischprobe genommen. Die ebene Fläche 4 wurde nicht weiter beprobt. Die Analysen erfolgten auch hier bei BioChem Agrar nach VDLUFA-Methoden, teilweise mit Modifikationen.

5.2.4 Ertragsermittlung und Stickstoffgehalt bei Hauptkulturen

Die Ernte, der nach dem Pflug-Mulch-Einsatz angebauten Früchte, konnte auf Grund der Projektlaufzeit bis Ende Juni 2020 nur als Biomasseschnitt vor dem eigentlichen Reifezeitpunkt durchgeführt werden.

Zur Ertragsermittlung wurden je 3 mal 1 m² Biomasse am 22.05.2020 von den Winterweizenbeständen (Fläche 1 und 6) und den Gemüseerbsen (Fläche 2) geschnitten. Diese wurden gewogen und eine Mischprobe im Labor auf ihren Stickstoffgehalt untersucht, um Hinweise auf die Stickstoffverfügbarkeit im Boden zu erlangen. Eine zweite Beprobung fand am 17.06.2020 zur Ermittlung des Biomassezuwachses statt. Zu diesem Termin wurden nur Proben der Flächen 1 und 6 in dreimaliger Wiederholung genommen. Fläche 2 wurde wegen hohem Unkrautbesatz nicht mehr beprobt.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Gutzerkleinerung und Verteilung des Mulchgutes

Untersuchungen zur Größe von Mulchpartikeln aus grünem Pflanzenmaterial im Hinblick auf Bodenbedeckung und Erosionsminderung sind nicht bekannt. Für die Bearbeitung von Getreidestoppeln wurde jedoch festgestellt, dass längere Stoppeln der Einarbeitung mit unterschiedlichen Geräten einen höheren Widerstand bieten als kürzer und damit zu höheren Bedeckungsgraden führen. Für die Größe speziell von Mulchpartikeln fehlt jedoch generell die Dokumentation in den Versuchen zur Reduzierung von Bodenerosion. Als wesentliche Ursache dieser Dokumentationslücke lässt sich die fehlende effiziente Bestimmungsmethode für diesen Parameter annehmen (Leurs 2005). Auch in den vorliegenden Untersuchungen blieb deswegen die genaue Spezifizierung der Mulchpartikelgröße eine nicht gelöste Aufgabe, so dass nur Fotos als Vergleichsgrundlage und einfache Längeneinschätzungen angegeben werden konnten.

Der im Pflug-Mulch-Verfahren eingesetzte Schlegelmulcher lieferte bauartbedingt keine definierte Schnittlänge des Mulchmaterials. Es lässt sich eine maximale Schnitt- oder Knicklänge des Grüngutes angeben, diese lag häufig bei ca. 5 cm. Die untere Grenze der Partikelgröße lag im Millimeterbereich. Insgesamt wurde das Grüngut zusätzlich quer und längs zur Längsachse der Pflanzen aufgetrennt und auch aufgefasert. (Abbildung 18).



Abbildung 18 Fraktionen des getrockneten Mulchmaterials

Für eine erste Abschätzung der Bedeutung der Häcksellänge für den Grad der Bodenbedeckung wurde Pflanzenaufwuchs auch manuell in längere Partikel geschnitten, manuell auf den Dibondplatten verteilt und der Bedeckungsgrad bestimmt. Im Vergleich zur Ablage des Funktionsmusters konnten mit 1 kg Grüngutfrischmasse mit länger geschnittenen Partikeln von 12 bis 25 cm etwa 23 %-Punkte mehr Bedeckungsgrad bei manuell optimierter Ablage erreicht werden (Tabelle 5).

Tabelle 5 Potenziale der Bodenbedeckung mit verschiedenem Grüngut von 1 kg Masse bei unterschiedlicher Art des Verteilverfahrens und der Aufbereitung.

Grüngut-aufbereitung	Verteilverfahren	Partikellänge [cm]	Bedeckung [%]	Standardabweichung	Wiederholungen
geschnitten	gelegt	12 bis 25	85	8,4	9
geschnitten	geworfen	12	68	30	2
gehäckselt	gelegt	< 5	68	2,8	2
gehäckselt	PMS	< 5	62		

Für eine Beurteilung der Gutarten hinsichtlich ihrer Eignung zur Erzeugung von hohen Bedeckungsgraden bei geringerem Grünmasseaufwand ist die Datenlage aus den Versuchen noch zu gering. Von Vorteil für eine dichte gleichmäßige Mulchauflage dürften nach den Beobachtungen eine schnelle Massebildung der Pflanzen, ein Mulchmaterial mit geringer Neigung zum Aneinanderhaften, das heißt, mit hohem Gehalt an Trockensubstanz, als auch möglicherweise Pflanzen mit großen Blattanteilen in Bezug auf die gesamte Masse (z. B. Raps) sein.

5.3.2 Erzielte Bodenbedeckung mit dem Pflug-Mulch-Verfahren

Beim Arbeitsgang mit der Maschinenkombination wurde das Mulchmaterial auf den waagrecht ausgelegten Kunststoff-Aluminium-Verbundplatten aufgefangen, wodurch Bedeckungsgrad und Frischmasseauftrag präzise bestimmt werden konnten. Über die ca. 12 Wiederholungen je Variante wurden starke Schwankungen im Arbeitsergebnis der Versuchsfahrten deutlich, was sich an der breiten Wertestreuung abzeichnete (Tabelle 6).

Insgesamt ließen sich auf den Versuchspartzen trotz teilweise starken Schwankungen in den Beständen mindestens 30 % Bedeckungsgrad bestimmen, sodass für alle Versuchsflächen ein ausreichender Erosionsschutz mit dem Pflug-Mulch-Verfahren bearbeiteten Flächen angenommen werden konnte. Darüber hinaus zeigten mittlere Bedeckungsgrade bis weit über 70 % das große Potenzial, welches in dem Verfahren vorhanden ist. So hohe Bedeckungsgrade werden in der Praxis bei Mulchsaaten auf bearbeiteten Böden in der Regel nicht erreicht (Schindewolf 2012).

Tabelle 6 Bodenbedeckung und Masse des Mulchmaterials in den Versuchspartzen

Fläche Nummer	1	2	3	4	5	6
Kultur	Luzerne 4. Standjahr	Gelbsenf Phacelia	Luzerne	Gelbsenf, Phacelia, Ramtillkraut	Phacelia, Weißer Senf, Ramtillkraut, Gartenkresse	Raps
Einsatzdatum	09.10.19	24.10.19	24.10.19	10.10.19	22.10.19	10.10.19
Mulch, FM g/m ²						
Mittelwert	366	1093	535	866	923	2831
Minimum	23	375	187	502	355	2016
Maximum	808	1727	883	1300	1418	3878
Bedeckungsgrad, %						
Mittelwert	31	66	51	53	76	87
Minimum	9 - 56	39-80	38-63	21-76	63-87	76-94
Maximum	56	80	63	76	87	94
Hauptfrucht 2020	Weizen	Erbsen	Kartoffeln	Sommerweizen	Mais	Weizen

Das Frontmulcher-Funktionsmuster erzeugte bauart- und betriebsbedingt grundsätzlich kurzes Häckselmaterial von etwa 0,5 bis 6 cm Länge. Noch längere Partikel wiesen allgemein Knickstellen nach etwa 5 cm auf. Neben den Schnitten quer zur Wuchssachse der Pflanzen, war das Material grundsätzlich gut sichtbar auch längs aufgefasert, was für eine intensive Aufarbeitung im Mulcher spricht. Unter dieser spezifischen Voraussetzung ist der erzielte Bodenbedeckungsgrad je Gewichtseinheit gemulchtes Material zustande gekommen.

In den Versuchen folgte die Bodenbedeckung in Abhängigkeit von der gemulchten Grünmasse einer logarithmischen Funktion (Abbildung 19), die bei 60 t/ha Grünguteinsatz 100 % Bodenbedeckung erreicht. Die Güte der Anpassung der Funktion an die gewonnenen Daten wird durch das Bestimmtheitsmaß R^2 beschrieben.

Während gemäß der logarithmischen Funktion im Bereich geringer Grünmasse der Bedeckungsgrad empfindlich auf Unterschiede in der Grünmasse reagiert, wird im oberen Bereich der Kurve nur noch mit stark steigendem Aufwand eine Steigerung des Bodenbedeckungsgrades erreicht. Dieses Verhalten kommt dem Pflug-Mulch-Verfahren insgesamt entgegen, weil mit relativ wenig Grünmasse hohe Bodenschutzeffekte erreicht werden können. Grundsätzlich bestätigen die Versuchsdaten, dass das Verfahren prinzipiell für den Erosionsschutz einsetzbar ist, weil die relevanten Bedeckungsgrade mit einer in der Praxis möglichen Aufwuchsmasse von Pflanzen erreicht werden können.

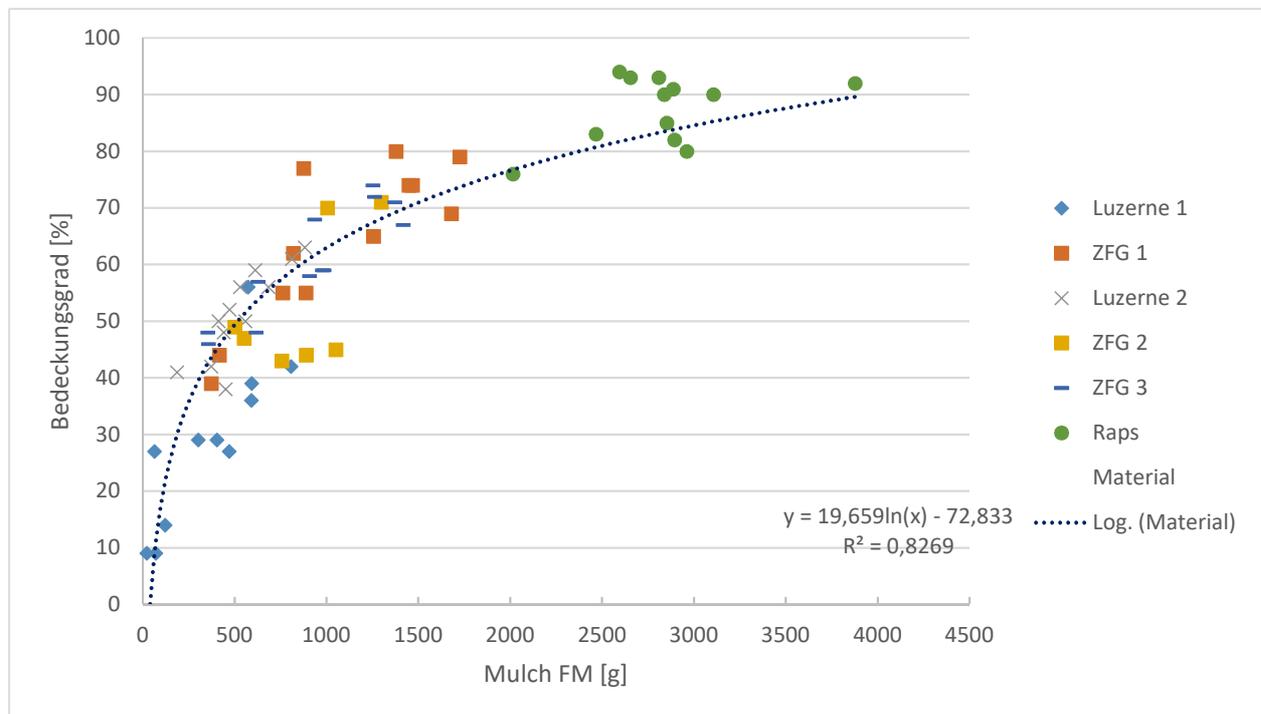


Abbildung 19 Abhängigkeit der Bodenbedeckungsgrade von der Masse des gemulchten Grönaufwuchses

5.3.3 Abbau der Mulchbedeckung im Zeitverlauf

Der natürliche Mulchabbau auf der Bodenoberfläche kann durch Fraß bzw. Zersetzung des Materials über Makro- und Mikroorganismen erfolgen (Prochnow et al. 2000). Außerdem sind Transportvorgänge durch Wind, Wasser oder Tiere anzunehmen. Beobachtet wurde zum Beispiel, dass Regenwürmer das gleichmäßig verteilte Mulchmaterial in ihre unterirdischen Gänge hineinzogen und etliches Material über dem offenen Ende dieser Röhren anhäuften. Mit dieser Aktivität verringerte sich augenscheinlich der Bodenbedeckungsgrad. Aber die Regenwürmer schufen mit dieser Tätigkeit Makroporen, mit einer gegenüber Verschlammung gut geschützten Öffnung. Auf technischem Weg wird die Mulchauflage bei der Bodenbearbeitung beispielsweise bei der Saatbettbereitung verändert, indem aufliegendes Material in den Boden eingemischt wird, wodurch sich die Erosionsschutzfunktion vermindert. Sowohl der natürliche als auch der technische Abbau der Mulchdecke wurde im Zeitverlauf beobachtet (Abbildung 20).

Der natürliche Abbau des Mulchmaterials ohne technische Eingriffe folgte auf den Flächen 2, 3 und 5 einem vergleichbaren abnehmenden linearen Trend von Oktober 2019 bis zum Februar 2020. Demnach blieben die abbauenden Faktoren über den Herbst und Winter

durchgehend aktiv, sodass Ende Februar selbst Bedeckungen von ursprünglich 65 % bis unter 20 % abgebaut waren. Im Zeitraum von Oktober bis Ende Januar blieben auf Flächen die für den Anbau von Sommerkulturen vorgesehen waren 30 % Bedeckungsgrad und mehr erhalten.

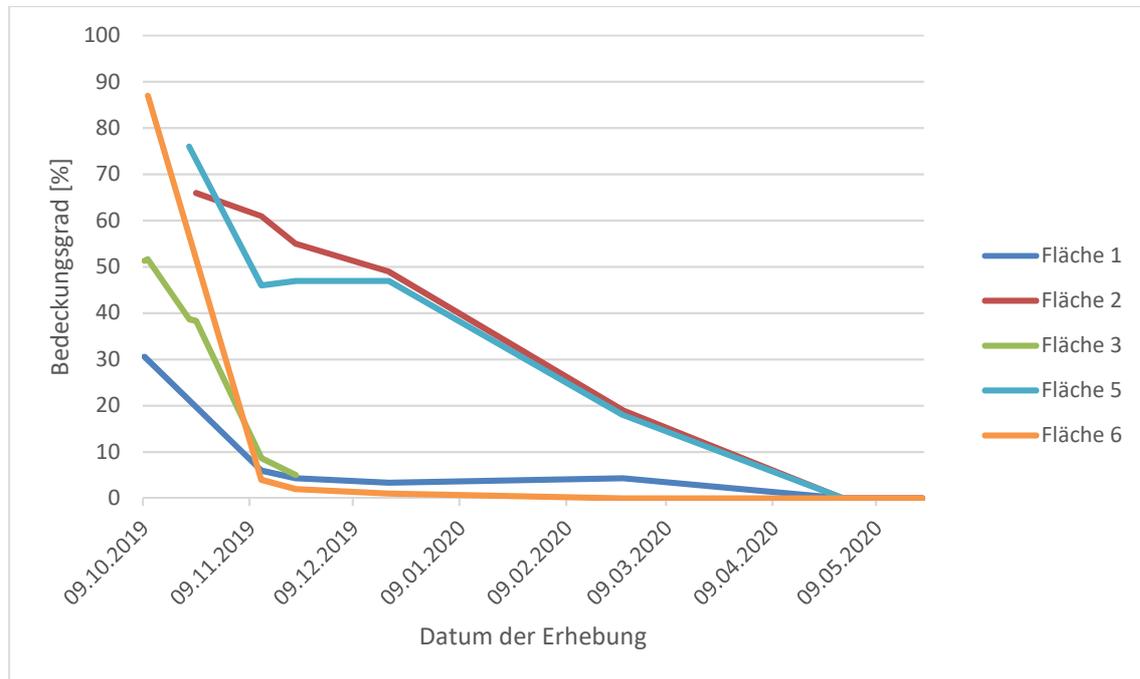


Abbildung 20 Zeitlicher Abbau der Mulchbedeckung nach dem PMS-Einsatz

Nach Prochnow et al. (2000) steuern Temperatur, Niederschläge und das Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis der Ausgangssubstanz den Abbau des Mulchmaterials. In den PMS-Versuchen zeigte sich, dass die Faktoren für den Mulchabbau über Winter noch ausreichend erfüllt waren und ein Abbau der Mulchschicht erfolgte. Häckselgut von Zwischenfrüchten und Luzerne auf drei Schlägen, die im Herbst und Winter nicht bearbeitet wurden, unterlagen einem einheitlichen gleichmäßigen, schnellen Abbau und führte somit zu einem frühen Abfall der Bedeckungsgrade noch im Winter.

Als Gegenmaßnahme dazu müsste ein möglichst später Einsatz des Pflug-Mulch-Verfahrens ausgeführt und ein hoher Verholungsgrad des Mulchgutes angestrebt werden. Praxisnäher wäre es, stattdessen eine überwinternde Zwischenfrucht mit PMS-Bearbeitung im Frühjahr zu kombinieren.

Der technisch bedingte Mulchabbau erfolgte mit der Saatbettbereitung in der zweiten Oktoberhälfte auf den Flächen 1 und 6 und führte zum völligen Verlust der organischen Bodenaufgabe durch die Bodenbearbeitung, sodass kein Unterschied mehr zu einer reinen Pflugfurche bestand. Eine schwache Ergänzung der Bodenbedeckung entwickelte sich erst wieder mit dem Aufgang der Saaten. Diese geringe Resistenz der Mulchaufgabe gegen die Einarbeitung in den Boden, wird als besonders kritischer Punkt im PMS gewertet, wofür noch Lösungen gefunden werden müssen. Dabei kommt nicht nur die Art der Mulchaufgabe als Ursache in Frage, sondern auch die Art der Maschinenteknik für die Saatbettbereitung.

Aus Versuchen in Sachsen (LfULG 2013) zur Einarbeitung unterschiedlich langer Getreidestoppeln auf Feldern nach der Getreideernte lässt sich ableiten, dass längeres Mulchgut einer Einarbeitung bei der Bodenbearbeitung besser widersteht. Zusätzlich kann mittels einer geringeren Intensität der Bodenbearbeitung mit geringeren Einarbeitungsraten des Mulch-

materials gerechnet werden (Schindewolf 2010). Das bedeutet, Frontmulcher sollte zukünftig idealerweise variable, einstellbare Schnittlängen beim Mulchvorgang ausführen können. Damit ließe sich der gewünschte Grad der Einarbeitung an den Bedarf anpassen. Hinsichtlich der Maschinenteknik zur Saatbettbereitung muss beachtet werden, dass dieser Arbeitsgang im Projektverlauf mit der auf den Betrieben vorhandenen Technik unspezifisch mehr oder minder intensiv ausgeführt wurde, ohne genau auf das Pflug-Mulch-Verfahren abgestimmt zu werden. Somit ist bei diesem Arbeitsgang noch Optimierungspotenzial sowohl in der Auswahl der Maschinenart als auch in der Einstellung der Bodenbearbeitungsmaschinen auf die aktuelle Situation anzunehmen.

5.3.4 Regeneration der Bodenbedeckung durch den Auflauf der Saat und durch keimendes Unkraut

Der Schutz des Bodens vor Erosion durch Wasser oder Wind wird nicht nur durch eine Auflage von Mulchmaterial, also abgemähtes Pflanzenmaterial, erreicht, sondern auch durch die Bedeckung mit dem Aufwuchs der neuen Kulturen sowie durch aufkeimendes Unkraut. Dieser Neuaufbau der Bodenbedeckung wurde mit der Schätzung von Bodenbedeckungsgraden im Zeitverlauf auf fünf Flächen dokumentiert (Abbildung 22).

Je nach Anbauvorhaben, Sommerung oder Winterung, traten die Minima der Bodenbedeckung zu verschiedenen Zeiten auf. Die Flächen mit Winterungen durchliefen das Bedeckungsminimum ab dem Tag der Saatbettbereitung im Oktober bis Anfang Januar bzw. bis Mitte Februar, je nach Aussaattermin. Die drei Flächen mit geplanter Sommerung kamen ab Mitte Januar bis Anfang Februar in eine kritische Phase hinsichtlich des Erosionsschutzes, die bis Ende April anhielt.

Fläche 1 mit Winterweizen als Hauptkultur wies am 14.01.20 wieder einen Bedeckungsgrad von 30 % auf, womit wieder ein ausreichender Erosionsschutz gegeben war. Die konventionell bewirtschaftete Fläche 6 mit späterer Aussaat erreichte einen Bedeckungsgrad von 30 % erst um den 20.02.20. Aus der Abbaukinetik auf den drei anderen Flächen ohne Saatbettbereitung im Oktober lässt sich ableiten, dass 40 bis 50 % Mulchauflage nach der Saat des Getreides notwendig gewesen wären, um einen lückenlosen Erosionsschutz zu gewährleisten. Das Einsetzen des Jungpflanzenaufwuchses hätte dann den Mulchabbau durch die natürlichen Prozesse im Zeitverlauf ausreichend kompensiert. Dieses Maß an Mulchbedeckung nach der anschließenden Aussaat muss bei der zukünftigen Entwicklung des PMS als zusätzliche Zielgröße dienen.

5.3.5 Ergebnisse zur Ertragsentwicklung und zum zeitlichen Verlauf von Nitrat-Gehalten im Boden

Die Versuchspartellen mit den Varianten Pflugfurche mit PMS (Mulchmaterial kommt auf die Pflugfurche), Pflugfurche ohne PMS (Mulchmaterial wird komplett eingepflügt) und betriebsübliche Bodenbearbeitung wurden nach der Anlage der Varianten wieder in die jeweilige betriebliche Bewirtschaftung eingegliedert. D.h. die Varianten wurden an jedem Standort betriebsüblich weiter bewirtschaftet. Die Wirkung der Bodenvorbereitung mit dem Pflug-Mulch-Verfahren wurde über die Ausbildung der Pflanzenmasse, der Stickstoffkonzentration in den Blättern und der N_{\min} -Entwicklung im Boden beobachtet. In der Versuchsauswertung wurde jeder einzelne Versuchsstandort als Versuchswiederholung gezählt und für die Auswertung relative Daten bezogen auf das Pflug-Mulch-Verfahren genutzt, soweit dies erforderlich war.

Anhand der ausgewählten Parameter ließen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten feststellen. Hierbei ist zu beachten, dass die zahlreichen Streuungsursachen in Verbindung mit einer begrenzten Zahl von Wiederholungen in einer Vegetationsperiode sicherlich noch keine endgültige Bewertung des Pflug-Mulch-Verfahrens zulassen.

Sowohl bei den Trockenmasseerträgen als auch bei den Stickstoffgehalten von Blattproben lagen die Vergleichsvariante Pflugfurche mit Einpflügen des Mulchmaterials im Mittel jeweils dicht an den Werten des Pflug-Mulch-Verfahrens. Die betriebliche Ausführung der Bodenbearbeitung, die ohne Pflugfurche gestaltet wurde, tendierte dagegen zu leicht abfallenden Werten in beiden Parametern, was mit den durchweg geringen N_{\min} -Werten im Boden in Verbindung stehen könnte.

Mit Blick auf die N_{\min} -Werte im Herbst 2019 und im Frühjahr 2020 in zwei Bodenschichten, lieferte das Pflug-Mulch-Verfahren relativ zu den anderen Varianten die höchsten Spitzenwerte mit 100 kg/ha N_{\min} , im Herbst nur in der Schicht von 0 cm bis 30 cm sowie im Frühjahr nur in der Schicht von 30 cm bis 60 cm. Die betrieblichen Ausführungen der Bodenbearbeitung zeigten dagegen in keinem Fall Werte über 40 kg/ha. Die Pflugfurche ohne Mulchaufgabe lieferte dagegen eher mittlere Werte im Variantenvergleich. Die N_{\min} -Entwicklung in den Bodenschichten von Herbst 2019 zum Frühjahr 2020 entspricht im Charakter insgesamt einer Verlagerung im Bodenprofil durch die Winterniederschläge. Auch muss davon ausgegangen werden, dass die Bodenbearbeitung mit dem Pflug zu einer relativ hohen Mineralisierung von Stickstoff geführt hat. Eventuell ist die Mineralisierung des Mulchmaterials an der Bodenoberfläche im Pflug-Mulch-Verfahren bei speziellen Grüngutarten besonders schnell abgelaufen, möglicherweise noch intensiver als beim Einpflügen dieser leicht zersetzbaren Substanz. In folgenden Begleituntersuchungen des PMS sollten die Ursachen für dieses Abbauverhalten geklärt werden, weil es sich hierbei um relevante Fakten einerseits für die Steuerung der Pflanzenernährung und andererseits für den Wasserschutz handelt.

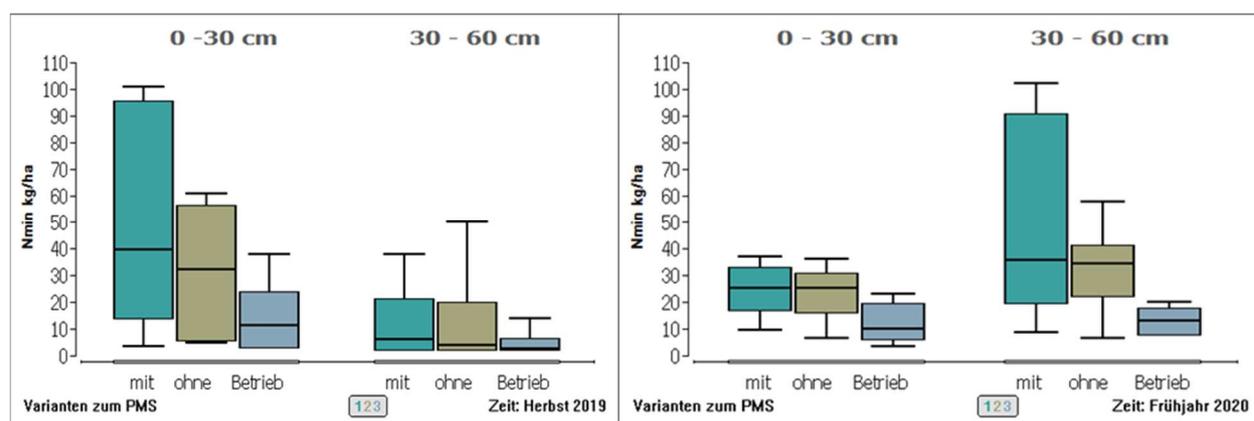


Abbildung 21 N_{\min} -Gehalte des Bodens in zwei Schichten im Herbst 2019 und Frühjahr 2020 (n=6)

5.3.6 Vergleich Winterung und Sommerung

Winter- und Sommerungen unterlagen auch in den Bodenbearbeitungsvarianten mit dem Pflug-Mulch-Verfahren langen Brachezeiten, wobei der Abbau der Mulchdecke durch die Bodenbearbeitung bzw. durch Mikroorganismen und Regenwürmer zu schnell für einen anhaltenden Schutz der Bodenoberfläche stattfand.

Beim Anbau von Winterungen ergab sich durch die Mulchdecke beim PMS-Einsatz nur ein zeitlich kurzer Vorteil gegenüber einer reinen Pflugfurche. Der erhöhte Bodenschutz bestand

nur vom PSM-Einsatz bis zum Arbeitsgang Saatbettbereitung, mit dem das Mulchmaterial komplett eingearbeitet wurde. Diese Zeitspanne dürfte in der Praxis etwa ein bis zwei Wochen betragen. Die Bedeckungsgrade lagen nach der Saatbettbereitung unter 5 %. Erst mit dem Aufwuchs der Kulturpflanzen erhöhte sich der Bedeckungsgrad auf den Versuchsflächen wieder, so dass ab Mitte Februar wieder ein Bedeckungsgrad über 30 % anzutreffen war, der einen ausreichenden Erosionsschutz bot. (Abbildung 22)

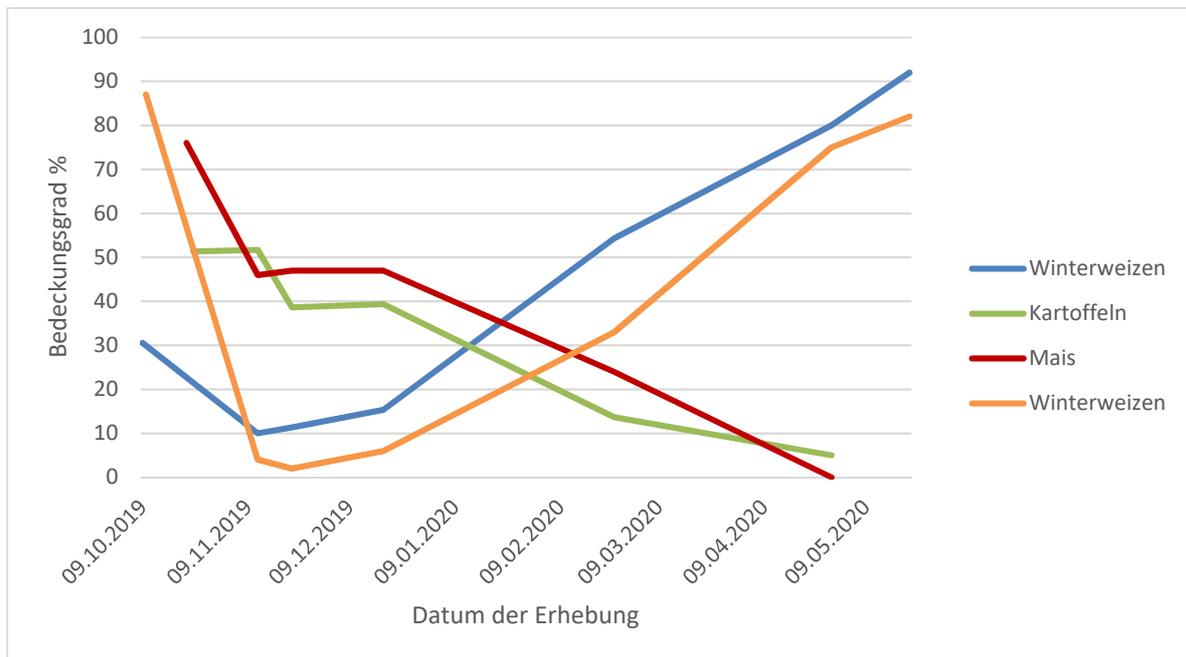


Abbildung 22 zeitliche Entwicklung der Bodenbedeckung mit Mulch, Kulturpflanzen und Unkraut

Für Sommerungen war die Mulchdecke nach dem PMS zur wendenden Grundbodenbearbeitung von Oktober bis in den Februar ausreichend vorhanden, bis die Bodenaufgabe durch Mikro- und Makroorganismen auf unter 30 % abgebaut war. Dieser zügige Abbau dürfte durch die milden Wintertemperaturen 2019/20 gefördert gewesen sein. Dass der Temperaturverlauf beim Abbau des Mulchgutes eine wesentliche Rolle einnimmt stellt Prochnow (2004) fest. Alternativ zu einer Winterfurche, könnte für Sommerungen auch eine Frühjahrsfurche nach einer überwinterten Zwischenfrucht ausgeführt werden. Dennoch würde nach der ersten Saatbettbereitung der Erosionsschutz durch die Bodenbearbeitung völlig aufgehoben sein. Gerade während der kritischen Phase der Erosionsereignisse im Mai wären die Äcker mit Mais oder Kartoffeln ohne weiteren Erosionsschutz.

Um zu einem anhaltenden Erosionsschutz vom Herbst bis ins späte Frühjahr mit dem PMS zu kommen, muss die Abbaurate des Mulchgutes durch biotische und abiotische Faktoren noch wesentlich gesenkt werden. Des Weiteren sollten die auf das Pflug-Mulch-Verfahren nachfolgenden Arbeitsgänge auf ihre Intensität der Einarbeitung von Mulchmaterial getestet werden. Letztlich kann auch die Zeitpunktverlagerung des PM-Einsatzes in den Spätherbst bis Frühwinter den Erhalt des Bodenschutzes im Frühjahr verlängern.

5.3.7 Unkrautentwicklung in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung durch Mulchmaterial

Die Analysen der Unkrautentwicklung in Abhängigkeit der Mulchbedeckung konnten nicht in den Hauptkulturen nach dem PMS-Einsatz ausgeführt werden, weil der Abbau der Mulchschichten durch biologische und technische Faktoren keine Mulchauflagen nach den Aussaaten hinterließ. Deswegen wurden nachträglich Fotos der Bodenoberfläche (waagrechte Bildebene zur Bodenoberfläche aus etwa 1,2 m Höhe; Fläche etwa 1 m²) mit Bildinhalten noch vor der Saatbettbereitung ausgesucht, die eine Beurteilung der Unkrautdichte bei wechselnden Mulchbedeckungen zuließen. Diese wurde dazu in kleine 47 Quadrate von etwa 2 dm² unterteilt, um dann jeweils den Bedeckungsgrad sowie die Anzahl der Unkräuter darauf zu bestimmen. Um etwa gleich große Stichproben zu erhalten wurden die Unkrautzahlen auf den Quadraten mit maximal 10 % Bedeckungsgrad sowie mit mehr als 10 % mit einander verglichen (siehe Abbildung 23)

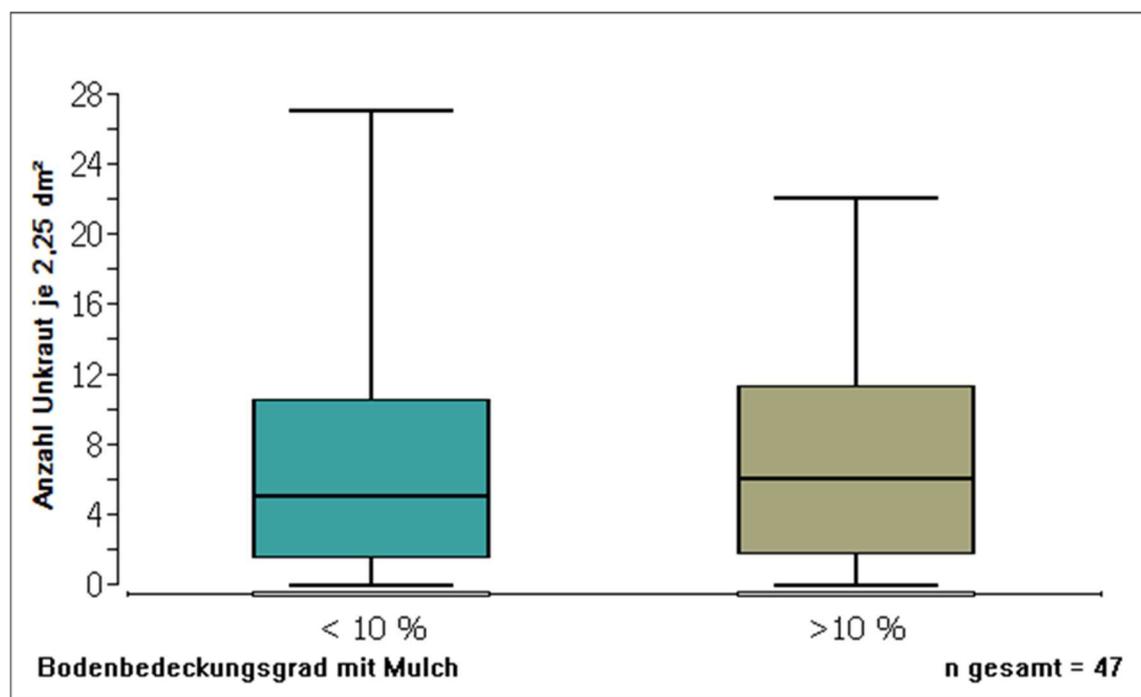


Abbildung 23 Anzahl von Unkrautkeimlingen in Abhängigkeit der Bodenbedeckung durch Mulchmaterial. Unkrautart Galium aparine (Kletten-Labkraut).

Im Ergebnis war kein Einfluss der Mulchbedeckung im Auflauf von Unkraut (Keimlinge von Galium aparine) auf dieser einen Fläche feststellbar. Allerdings wurde der höchste Bedeckungsgrad auf den 47 Teilflächen von 2,25 dm² auch nur auf 35 % bestimmt. Diese geringe Mulchauflage war durch den biogenen Abbau bis zum Tag der Aufnahme am 17.12. 2019 bedingt.

In einem Versuch zur Bodenbearbeitung von Wilhelm & Hensel (2009) gab es bei Strohmulch bei einer Gruppentrennung bei 30% Bedeckungsgrad ebenfalls keine Unterschiede zwischen diesen Gruppen im Auflauf von gesättem Ölrettich.

Allgemein wird der Bodenbearbeitung mit dem Pflug ein höherer Grad der Unkrautbekämpfung zugeordnet als der pfluglosen Bearbeitung. Differenziert ergibt sich das Bild, dass selbst ein nur sporadisch vorkommender höherer Unkrautbesatz in der Vorfrucht bei Pflugverzicht mit einem sofortigen starken Unkrautauflauf in der Nachfrucht verbunden ist, was vor allem

bei Kamille-Arten (*Matricaria*) und Kletten-Labkraut (*Galium aparine*) beobachtet wurde (Pal-lutt 2000). Auch speziell für den Ökolandbau wurden höhere Unkrautvorkommen bei Pflug-verzicht festgestellt (Pekrun et al. 2003).

Falls die Mulchaufgaben beim Einsatz des PMS tatsächlich nicht oder nicht ausreichend zur Unkrautunterdrückung beitragen können, birgt das gesamte System durch die Wendung des Bodens die Chance, zumindest Totalherbizide in vielen Fällen ersetzen zu können.

5.3.8 Anpassung der vor- und nachgelagerten Arbeitsgänge einschließlich der Methoden der Unkrautregulierung an das PMS

Das PMS erfordert für einen optimalen Verfahrensablauf zeitlich und technisch passend abgestimmte Vorbereitungen bzw. an das Verfahren angepasste nachgelagerte Maschinenein-sätze. So wurden während der Einsätze des PMS die Bereiche Zwischenfruchtanbau, Terminierung des PMS-Einsatzes und auch geeignete Maschinen zur mechanischen Unkraut-regulierung als Punkte mit Anpassungsbedarf identifiziert. Während der Zwischenfruchtan-bau in Pflanzenart und Termin auf eine hohe Biomasse ausgerichtet werden muss, sollte die Art- und Weise der nachfolgenden Arbeitsgänge die daraus entstandene Mulchbedeckung möglichst wenig reduzieren und dabei genügend Durchgang für das vorhandene Mulchma-terial bieten.

Kernaufgabe des Zwischenfruchtanbaus ist es, die notwendige minimale Pflanzenmasse für den Mulchvorgang bereitzustellen, um jederzeit einen Bodenbedeckungsgrad von mindes-tens 30 % absichern zu können. In den Versuchsdaten zeichnete sich noch kein Grenzwert für die Masse des Grönaufwuchses ab, der für eine anhaltend ausreichend dichte Mulchauf-lage erreicht werden muss. Dazu wurden die Mulchschichten durch Mikro- und Makroorga-nismen von Oktober bis Februar in jedem Fall schon unter 30 % Bedeckungsgrad abgebaut. (siehe 5.3.3). Um eine lange Bodenbedeckung zu gewährleisten ist es für das PMS-Verfahren förderlich, früheste Aussaatzeiten für Zwischenfrüchte im Sommer zu nutzen und möglichst abbauresistente Zwischenfruchtarten auszusäen. Diese Resistenz weisen zum Beispiel Pflan-zenarten mit einem weiten C/N-Verhältnis auf (Prochnow 2000), also Pflanzen, die schnell „verholzen“. (Für die Stickstoffversorgung der Hauptkultur wäre dagegen enges C/N-Verhält-nis wünschenswert. Auf diesen gegenläufigen Bedarf sei an dieser Stelle nur hingewiesen.)

Mulchmaterial auf der Bodenoberfläche lässt technische Probleme, vor allem mit dem Durchgang der Biomasse zwischen den Scharen der Geräte, bei Bestell- und Kulturpflege-maßnahmen erwarten. Aber auch Probleme mit der Kornablage von Sämaschinen sind bei Mulchaufgabe zu diskutieren.

Über einen sehr geringen Durchgang bei den traditionellen Ackereggen mit kurzen Zinken und geringer Baulänge berichtete schon Domsch (1960) und verwies dahingehend auf die Vorteile von gefederten langen Eggenzinken mit Strichabständen von etwa 10 cm, wie sie damals in den ersten Generationen von Feingrubbern verbaut wurden. Gezogene Saatbett-kombinationen verfügen heute über Scharstrichabstände von 6 cm bis 25 cm, bei 3 bis 5 Werkzeugebenen, auch Balken genannt (Bsp: Lemken Korund, Kompaktor). Die Schar-strichabstände der Zinken lassen sich je nach Hersteller der Kombinationen innerhalb ge-wisser Grenzen verändern, so dass man von Anpassungsmöglichkeiten an den Bedarf des PMS ausgehen kann. Darüber hinaus sind an Walzen und scheibenförmigen, rotierenden Werkzeugen jeglicher Art, die fast immer Bestandteil der Saatbettmaschinen sind, erfah-rungsgemäß keine Störungen durch Mulchmaterial jeder Länge zu erwarten.

Ebenso sind bei Kreisel – oder Scheibeneggen sowie Fräsen keinerlei Störungen in Bezug auf den Materialdurchgang beispielsweise in Getreidestoppeln zu erwarten (LfULG 2013). Eher besteht bei den Scheibeneggen und bei bestimmten zapfwellenbetriebenen Geräten die Gefahr der umfangreichen Einarbeitung von Mulchgut.

Kritisch einzustufen sind dagegen die eng stehenden Zinken an Unkrautstriegeln (28 mm bis 35 mm) in Bezug auf den Durchgang des Mulchmaterials. Als Alternative liegen jedoch positive Ergebnisse für Maschinen vor, die durch den Bodenkontakt angetriebene Werkzeuge mitführen. Zum Beispiel waren die Maschinentypen Rollstriegel und Rotary Hoe in Sachen Durchgang von Getreidestrohstopeln einem Striegel überlegen (LfULG 2009).

Besonders erosionsgefährdet ist das gesamte Anbauverfahren bei Kartoffeln durch den Einsatz von Fräsworkzeugen für die Dammformung. Zusätzlich werden die Böden nach dem Pflügen noch beetweise gesiebt, um Steine und Kluten zu entfernen (LfLUG 2014). Verbreitet sind auch Umkehrfräsen im Kartoffelanbau, die grobes Material wie Steine, Kluten aber auch Ernterückstände tief vergraben, damit die Kartoffelernte störungsfrei ablaufen kann. Der Einsatz des PMS erscheint im Zusammenhang mit dieser intensiven Bodenaufbereitung nicht sinnvoll möglich zu sein.

Sämaschinen mit Schleppscharen sind als weiterer Engpass für den Durchgang von Mulchmaterial bekannt. Mit der Entwicklung von Scheibenscharen, auch Rollschare genannt, ist diese Sätechnik mulchsaattauglich, so dass damit auch ein PMS kombinierbar sein dürfte.

Insgesamt zeichnet sich ab, dass es im Zusammenhang mit dem PMS für den Feldbau grundsätzlich geeignete Maschinenteknik gibt, die alle Feldarbeiten nach dem PMS-Einsatz störungsfrei ermöglichen.

6 Weiterführende Untersuchungen

6.1 Praktische Verfahrensanalyse und ökonomische Betrachtung

Um die ökonomischen Grundzüge des PMS zu umreißen, wurde die Leistungen und Kosten dieses neuen Systems mit bekannten Verfahren verglichen, die alternativ mit herkömmlichen Maschinen zur Verfügung stehen. Die Kosten- und Leistungsangaben entstammen dazu den online angebotenen KTBL-Datensammlungen „MaKost“, dem „Feldarbeitsrechner“ und dem Kalkulator für unregelmäßige Schläge, mit dessen Hilfe die Daten der Flächenleistungen für unterschiedliche Arbeitsgeschwindigkeiten erstellt wurden. Die Kosten und Leistungen für das Funktionsmuster des Frontmulchers wurden durch die Firma Müthing GmbH & Co. KG anhand des Fertigungsmehraufwandes geschätzt.

Ausgewählt wurden als Vergleichsverfahren die Ausführung von Mulchen und Pflügen in getrennten Arbeitsgängen, wodurch auf jeweils eine kleinere Traktorenklasse (157 kW) zurückgegriffen werden konnte. Außerdem wurde die getrennten Arbeitsgänge Mulchen und Scheibeneggen ausgewählt. Diese Kombination dürfte für die Ausführung von Mulchsaaten in Frage kommen und dazu eine besonders kostengünstige Version sein. Für das PMS wurden die Kosten und Leistungen zu den Stufen der Arbeitsgeschwindigkeit von 5 km/h und 7 km/h als Vergleichsgrundlage kalkuliert und dafür die Leistungsstufe der Zugmaschine mit 200 kW gewählt.

Bei den Basisdaten der Maschinenkosten fallen die relativ hohen Festkosten des Standard-Mulchgerätes auf (Tabelle 7). Diese liegen über denen der in der Anschaffung wesentlich teureren Bodenbearbeitungsmaschinen Pflug und Scheibenegge. Ursache dafür ist der vom KTBL unterstellte geringe jährliche Nutzungsumfang der Mulchtechnik mit 50 h je Jahr, was nur etwa 90 ha bearbeiteter Fläche entspricht. Das Abschreibungsende des Mulchers wird

nach 10 Jahren erreicht. Pflug und Scheibenegge werden mit einer vielfachen Flächenleistung im Vergleich zu den Mulchern und einer längeren Abschreibungsdauer berechnet. Das Frontmulcher-Funktionsmuster wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit auf demselben Nutzungsumfang-Abschreibungszeitraum wie der Standardmulcher angesetzt. Zusätzlich wurden die variablen Kosten des PMS-Gerätes um 30 % erhöht, um einen möglicherweise höheren Verschleißaufwand von den vermehrten Bauteilen darzustellen.

Beim Arbeitszeitbedarf zeigt die Kopplung der Arbeitsgänge von Pflügen und Mulchen in Verbindung mit der relativ leistungsstarken Zugmaschine von 200 kW Vorteile gegenüber den getrennten Arbeitsgängen mit Traktoren der kleineren Klasse von 157 kW. Je nach unterstellter Arbeitsgeschwindigkeit des PMS liefert es bis zu 75 % mehr Flächenleistung je Zeiteinheit gegenüber dem getrennten Einsatz von Mulcher und Pflug. Je Stunde lassen sich mit dem PMS 1,14 ha bis 1,55 ha bearbeiten. Standardmulcher und Pflug getrennt liefern insgesamt eine Leistung von 0,89 ha je Stunde. Das PMS steht selbst gegenüber der getrennten Kombination von Mulcher und-Scheibeneggen (Flächenleistung 1,1 ha/h bei 8 kmh Arbeitsgeschwindigkeit in der Summe der beiden Arbeitsgänge) auf einer vergleichbaren Leistungsebene.

Der größere Traktor für das PMS verursacht aber grundsätzlich um 9,50 €/h höhere gesamte Maschinenkosten als das kleinere Modell. Dafür benötigt er durch die Gerätekopplung jedoch weniger Einsatzzeit je ha als die beiden kleineren Traktoren in Summe. Wenn die Pflug-Variante gegenübergestellt wird bewegen sich die Maschinengesamtkosten jeweils um 90 Euro/ha. Die darüber hinaus eingesparte Arbeitszeit beim PMS führt damit zu einem leichten Kostenvorteil bei der kombinierten Technik. Gegenüber der zeitsparenden Scheibeneggen-Variante hat das PMS-Verfahren deutlich höhere Maschinenkosten um 16,40 €/ha bzw. um 28,54 €/ha, je nach tatsächlich erreichtem Arbeitstempo. Eine Kostenkompensation durch Arbeitszeiterparnis ist in diesem Vergleich kaum mehr gegeben.

Tabelle 7 Basisdaten der Maschinenkosten und -nutzung. (Quelle: KTBL)

Einzelmaschinen	Anschaffungspreis	Fixkosten	variable Kosten	Nutzungsumfang		Abschreibung
				h/a	a	
Traktor	€	€/h	€/h	h/a	a	€/a
Standardtraktor, Allradantrieb, stufenloses Getriebe, 40 km/h, 200 (185-215) kW	242.000	26,15	26,51	833	12	16.133
Standardtraktor, Allradantrieb, stufenloses Getriebe, 40 km/h, 157 (148-167) kW	194.000	21,25	21,91	833	12	12933
Anbaugeräte, (Typ, Arbeitsbreite)		€/ha	€/ha			
Vario-Pflug, 5-Schar	30.000	13,34	10,97	179	14	1.714
Scheibenegge, 4 m	21.000	6,27	5,00	286	14	1.200
Schlegelmulcher, 2,75 m	7.900	16,10	2,90	50	10	600
Funktionsmuster* 2,80 m	12.000	23,82	3,90	50	10	907

*geschätzte Kostenwerte

Insgesamt lässt sich das Pflug-Mulch-Verfahren mit wenig Aufwand wirtschaftlich in die landwirtschaftlichen Betriebe integrieren, die bereits über gewisse Ausstattung verfügen. Das heißt, sowohl ein Traktor mit rund 200 kW als auch ein Pflug mit einer Arbeitsbreite im Bereich von 2,50 m stehen zur Verfügung. Bei Vario-Pflügen lässt sich nach Herstellerangaben die Schnittbreite der Schare etwa verdoppeln, z. B. im Bereich von 22 cm bis 50 cm je Schar. Demnach lässt sich die Arbeitsbreite von 2,5 m ab einem 5-Scharpflug erreichen.

Tabelle 8 Kosten bei geteilten und kombinierten Arbeitsgängen Mulchen und Bodenbearbeitung

Parzellengröße: 10 ha Arbeitsgänge	Arbeits- breite	Geschwin- digkeit	Flächen- leistung	Kosten, gesamt	Zeitbedarf auf Fläche
Mulcher und Pflug, 2 Arbeitsgänge	m	km/h	ha/h	€/ha	h/ha
Traktor, 157 kW, Schlegelmulcher, 2,75 m	2,60	8	1,81	42,86	0,55
Traktor, 157 kW, Vario-Pflug, 5 Schar	2,50	8	1,74	49,11	0,57
Summe			0,89	91,97	1,13
Mulcher und Scheibenegge, 2 Arbeitsgänge					
Traktor, 157 kW, Schlegelmulcher, 2,75 m	2,60	8	1,81	42,86	0,55
Traktor, 157 kW, Scheibenegge 4 m	3,90	8	2,79	26,74	0,36
Summe			1,10	69,60	0,91
Parzellengröße: 10 ha Arbeitsgänge	Arbeits- breite	Geschwin- digkeit	Flächen- leistung	Kosten, gesamt	Zeitbedarf auf Fläche
Pflügen und Mulchen kombiniert, 7 km/h	m	km/h	ha/h	€/ha	h/ha
Traktor, 200 kW		7	1,55	33,97	0,65
Vario-Pflug, 5-Schar	2,50			24,31	
Funktionsmuster*, 2,80 m	2,50			27,72	
Summe			1,55	86,00	0,65
Pflügen und Mulchen kombiniert, 5 km/h					
Traktor, 200 kW		5	1,14	46,11	0,88
Vario-Pflug, 5-Schar	2,50			24,31	
Funktionsmuster*, 2,80 m	2,50			27,72	
Summe			1,14	98,14	0,88

Quelle: eigene Kalkulationen auf Grundlage KTBL Web-Anwendungen: Makost, Feldarbeitsrechner, Unregelmäßige Schläge

* prognostizierte Werte

6.2 Praxisorientierte Befragung

Nachdem alle Versuche und Datenerhebungen auf den teilnehmenden Betrieben beendet waren, wurde mittels Fragebogen die Einschätzung der beteiligten Landwirte zum Pflug-Mulch-System (PMS) eingeholt. Zu diesem Zeitpunkt verfügten diese Landwirte über die Erfahrung mit den Versuchsflächen auch im Hinblick auf die Wiederbestellung mit den Hauptfrüchten der Anbausaison des Jahres 2021. Außerdem wurden Auskünfte zu spezifischen Maschinen eingeholt, die in Verbindung mit dem PMS eingesetzt werden könnten. Insgesamt waren neben vorgegebenen Antworten auch freie Äußerungen möglich.

1. In welchen Ihrer Kulturen ist hauptsächlich mit Bodenerosion in den Hanglagen zu rechnen?

Die Landwirte erwarteten Bodenerosion hauptsächlich im Mai und Juni in Kartoffeln, im Frühjahr bei Mais oder schon vorher bei einer starken Schneeschmelze im Ausgang des Winters. Im Sommer könne nach der Stoppelbearbeitung mit Bodenerosion gerechnet werden. Ein Landwirt gab an, dass aus seinem Erfahrungsschatz bei allen Kulturen und jeder Zeit Erosionsvorgänge stattfinden könnten.

2. Wie bearbeiten Sie Ihre Flächen mit Zwischenfruchtbeständen in der Regel betriebsüblich weiter?

Zwischenfrüchte werden entweder nach dem Absterben oder bei niedriger Wuchshöhe direkt eingepflügt oder bei Bedarf, zum Beispiel bei hohem Aufwuchs, vorher gemulcht. Auf manchen Betrieben wird kaum Zwischenfruchtanbau betrieben. Luzerne als Hauptfrucht wird über die Arbeitsgänge Mulchen, Grubbern und Pflügen umgebrochen.

3. Behinderte der oben aufliegende Mulch in den Versuchspartellen nach dem Einsatz des PMS die Feldbestellung oder die mechanische Unkrautregulierung im Herbst und oder im Frühjahr?

Es traten weder im Herbst noch im Frühjahr Behinderungen bei den Feldarbeiten nach dem PMS-Einsatz auf. Es wurde eher auf das Problem einer geringen Mulchauflage hingewiesen, in diesem Fall bei der Zwischenfrucht Senf.

4. Wie ist Ihr Betrieb maschinell ausgestattet? (Das PMS braucht eine spezielle Abstimmung von Traktorleistung, Pflug- und Mulcherbreite, damit die Betriebe selbst mit dem PMS arbeiten können.)

Die beiden größeren Betriebe, mit 300 ha bzw. 900 ha LN, verfügt über Traktoren mit maximal 160 kW bzw. 250 kW Motorleistung. Auf jedem dieser Betriebe ist ein Pflug mit 3 m Arbeitsbreite verfügbar. Der kleine Betrieb mit insgesamt 5 ha Anbaufläche pflügt mit einem 45 kW Traktor bei 0,75 m Arbeitsbreite, außerdem gibt es dort noch eine Zugmaschine mit 82 kW Motorleistung.

5. Wie hoch schätzen Sie die Zeit- und Energieersparnis durch die Vereinigung der beiden Arbeitsgänge Mulchen und Pflügen ein?

Unerheblich und bedeutsam wurden je einmal als Antwort gegeben. Für den dritten Betrieb erschien diese Frage nicht relevant zu sein, da er die Größe seines Traktors für nicht ausreichend ansah, das PMS selbst ausführen zu können.

6. Das PMS lässt sich auch aufgeteilt auf zwei Traktoren umsetzen. Während ein Traktor pflügt, überträgt ein zweiter Traktor das Mulchmaterial auf die Pflugfurche. Dabei muss immer ein

Wechsel von Pflug und Mulcher eingehalten werden. Wäre das PMS für Sie in diesem Betriebsmodus eine Option, auch wenn weder Arbeitszeit noch Energie gespart werden kann?

Zwei Betriebe antworteten mit ja. Der dritte Betrieb sah in diesem Modus keine Option für sich, da er generell nur im sehr geringen Maße mit Wassererosion auf einer Winterfurche rechnete.

7. Das PMS kann auch in Kombination mit einem Grubber oder einer anderen Bodenbearbeitungstechnik ausgeführt werden. Auch die Kombination mit Direkt- oder Mulchsämaschinen ist denkbar. Wäre das PMS in diesen Kombinationen für Sie eine Option?

Die Antworten waren positiv und das PMS wurde in Verbindung mit vorhandenen Grubbern, mulchsaattauglichen Sämaschinen und generell mit pflugloser Bodenbearbeitung als Möglichkeit bestätigt.

8. Welche Vorteile, Chancen und Probleme würden Sie bei dem Einsatz des PMS für den Ackerbau sehen?

Die Vorteile wurden bei Arbeitszeiterparnis, Verminderung der Bodenerosion und bei der Verbesserung der Bodenparameter Wasseraufnahme, Verdunstungsschutz und Gare in verschiedenen Gewichtungen gesehen. Im Falle geringer Mulchmengen in Verbindung mit der sehr kurzen Häcksellänge wurde im Einzelfall auch nur mit geringen Vorteilen gerechnet.

Nachteile wurden befürchtet, wenn durch zu langes Häckselgut Probleme mit nachfolgenden Arbeiten auftreten würden, etwa beim Striegeln und Drillen. Auch die spezielle erforderliche Ausstattung des Traktors, und der Leistungsbedarf des Mulchers wurden als Nachteile genannt.

Die Ergebnisse der Befragung dienen als Orientierung und sind aufgrund der kleinen Menge der Befragten nicht repräsentativ. Die Befragung wird zukünftig auf Feldtagen und Vorführungen erweitert. Anschließend können weitere Aussagen abgeleitet werden.

7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Erreichte Zielstellungen und Einhaltung des Zeitplans

7.1.1 Vergleich mit der Zielsetzung

Die im Arbeitsplan definierten Zielstellungen des Projektes wurden erreicht, der Meilenstein 3 wurde im Juni 2020 mit einem abschließenden Projekttreffen erfolgreich abgeschlossen. Im Jahr 2018/2019 wurden grundlegende Optimierungen an der Maschine vorgenommen und ab Herbst 2019 im Praxisversuch getestet. Der entwickelte Frontmulcher diente dabei als technische Basis zur Durchführung und Bewertung des Pflug-Mulch-Verfahrens.

Die kostenneutrale Projektverlängerung um 12 Monate aufgrund der Trockenheit im Spätsommer und Herbst 2018 ermöglichte die Durchführung der Praxisversuche in 2019 und damit das Erreichen der Projektziele hinsichtlich der Bewertung des Verfahrens.

Die projektbegleitenden, umfangreichen Labortests wirkten sich positiv auf die Entwicklung der Versuchsmaschine aus. Das technische Risiko beim Aufbau des Frontmulchers wurde damit erheblich reduziert. Bereits nach dem ersten Funktionstest war ersichtlich, dass die Grundfunktion des Auswerfens des Mulchgutes mit der Maschine umgesetzt werden kann.

Die Umfangreichen Praxisversuche ermöglichten die Bewertung des Pflug-Mulch-Verfahrens sowie der aufgebauten Versuchsmaschine. Die neu gewonnenen Erkenntnisse können zukünftig bei der technischen Weiterentwicklung berücksichtigt werden. Hier ist insbesondere eine Erweiterung der bestehenden Mulchtechnik in Richtung gröberer Zerkleinerung zu nennen. Diese würde ein deutlich breiteres Einsatzspektrum und einen größeren Spielraum bei der Anpassung an verschiedene Gutarten ermöglichen.

Die zukünftige Adaption des Verfahrens an weitere Bodenbearbeitungstechnik wie Grubber oder Scheibenegge wurde von interessierten Landwirten häufig genannt. Damit kann das Marktpotential der Maschine weiter vergrößert werden.

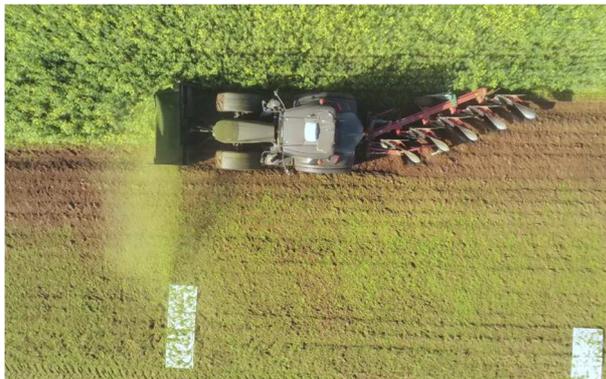


Abbildung 24 Übersichtsbild Flächenanlage

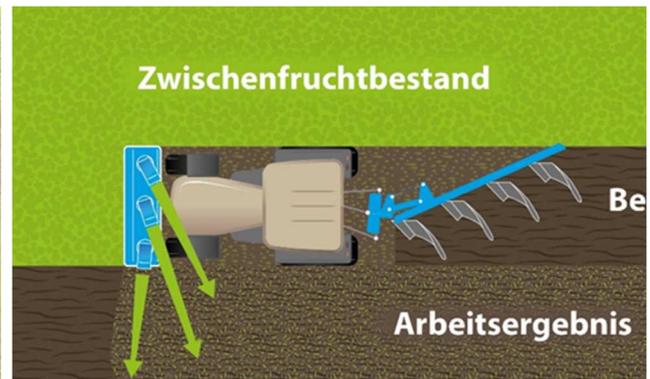


Abbildung 25 Prinzipskizze

Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen einen Vergleich der während der Entwicklung der Projektidee erstellten Prinzipskizze mit dem tatsächlichen Arbeitsbild während der Praxisversuche.

7.1.2 Funktionsmuster

Bereits mit Meilenstein 3 konnte die technische Machbarkeit des im Projektantrag als Ziel formulierten Auswurfs von Mulchmaterial ohne zusätzliche aktive Fördereinrichtungen nachgewiesen werden. Die dazu notwendigen Grundlagen wurden im Laborversuch ermittelt und auf das Funktionsmuster übertragen. In der Versuchsauswertung der Feldtests 2017 wurden das Potenzial und die Einsatzgrenzen des Systems quantifiziert. Als größte Schwachstelle wurde die Materialverteilung identifiziert. Nachfolgende Untersuchungen führten zur konstruktiven Überarbeitung des Funktionsmusters und dem Aufbau der Auswurfkontur Variante 3.

Mit dieser konnte das im Vorfeld definierte Verfahrensziel des Erreichens von mindestens 30% Bedeckungsgrad mit Pflanzenmaterial sicher umgesetzt werden. In den Praxisversuchen wurden größtenteils deutlich höhere Bedeckungsgrade erreicht. Mit dem entwickelten Frontmulcher kann zudem tiefes einarbeiten von großen Mengen an Grünmaterial vermieden werden. Dabei lässt sich die Pflugtiefe verringern, da durch die Trennung von Biomassestrom und Bodenbearbeitung nur wenig Grünmasse eingepflügt werden muss. Das Häckselgut an der Bodenoberfläche behindert die nachfolgenden Arbeitsgänge nachweislich nicht.

Die pflanzenbaulichen Ergebnisse zeigen, dass die Zerkleinerungswirkung des Funktionsmusters zu intensiv war. Je nach Einsatzsituation (bspw. vor Sommer oder Winterfrucht) werden unterschiedliche Anforderungen an die Zerkleinerung gestellt.

Dabei ist es sinnvoll, zukünftig auf eine größere Basismaschine zu setzen und somit mehr Einsatzsicherheit und (in Grenzen) gröberes Mulchmaterial zu erhalten. Zudem sollte der Einstellbereich der Zerkleinerungswirkung im Rahmen der maschinentechnischen Möglichkeiten vergrößert werden. Dies kann beispielsweise mit einer größeren Drehzahlspreizung des Rotors durch ein zweistufig schaltbares Getriebe geschehen. Damit kann die gewünschte Rotordrehzahl (aktuell 1900 U/min für intensive Zerkleinerung, zukünftig zusätzlich 1500 U/min für gröberes Material) bei 1000 U/min Zapfwellendrehzahl erreicht werden und so die Leistungsreserven des Traktors so besser genutzt werden.

Im Rahmen dieses Projektes stand vor dem Hintergrund des Energie- und Ressourcenschonenden Arbeitens die passive Materialförderung ohne zusätzliche, den Leistungsbedarf sowie den Fertigungsaufwand weiter erhöhende Förder- und Verteilelemente im Vordergrund. Sollten zukünftig, beispielsweise für größere Arbeitsbreiten oder alternative Zerkleinerungsprozesse aktive Elemente notwendig werden, muss der Leistungsbedarf der Mulch-/ Zerkleinerungsarbeit selbst deutlich reduziert werden. Die Ergebnisse dieses Projektes, mit der definierten Maschinenschnittstelle zum Materialaustrag, sowie den Untersuchungen zu Wurf- und Verteilungseigenschaften des Mulchmaterials können hierfür auch zukünftig weiterverwendet werden.

Die Zielsetzung, mit dem Funktionsmuster eine technische Basis für die pflanzenbauliche Untersuchung des Pflug-Mulch-Verfahrens zu entwickeln, wurde erreicht. Durch Verschließen der Auswurföffnung mit einer Klappe bleibt die Funktion als Standardmulcher erhalten. Die Maschine hat den technischen Status eines Funktionsmusters / Prototyps und kann mit weiterer technischer (Serien-) Entwicklung unter Berücksichtigung zukünftiger pflanzenbaulicher Erkenntnisse weiterentwickelt werden.

7.1.3 Verfahren

Die grundlegenden Verfahrenstechnischen Ziele wurden erreicht und eine funktionsfähige Maschinenkombination aus Frontmulcher, Traktor und Pflug als Pflug-Mulch-System zusammengestellt, die auch die avisierten Flächenleistungsdaten erreichte. Gleichfalls konnten mit Aufwüchsen aus Zwischenfrüchten als auch mit Luzerne in Hauptfruchtstellung Bodenbedeckungsgrade bis 95 % realisiert werden, als wichtige Voraussetzung für den Erosionsschutz. Allerdings stellte sich die Abbaugeschwindigkeit der Mulchauflage durch biogene Prozesse als zu hoch für einen andauernden Bodenschutz heraus. Außerdem baute schon allein eine Saatbereitung für die folgende Hauptfrucht, die Bodenbedeckung nahezu vollständig ab. Dadurch waren zwar alle Arbeitsgänge nach dem PMS uneingeschränkt möglich, aber ein im Jahresverlauf durchgängiger Bodenschutz wurde nicht erreicht.

Als Hauptursache für die geringe Haltbarkeitsdauer der Mulchauflage wurde der hohe Grad der Zerkleinerung des Grünmaterials im Mulcher identifiziert, zudem blieben die biogenen Abbauprozesse im überdurchschnittlich milden Winter 2019/2020 in einem aktiven Zustand, sodass etwa im Laufe des Februars im Jahr 2020, die Bodenbedeckungsgrade auch im günstigsten Fall unter die 30 %-Grenze abfielen.

Aus den Analysedaten zu den Folgen für den Pflanzenbau lassen sich auch auf Grund der Umstände des schnellen Mulchabbaus und der eingeschränkten Versuchsdauer nicht alle angestrebten Aussagen sicher treffen. Mit Ergänzungen aus Literaturdaten festigen sich einige Trends. Es muss damit gerechnet werden, dass die erreichbaren Bodenbedeckungsgrade keinen sicheren Beitrag zur Unkrautunterdrückung bieten werden. Trotzdem birgt das PMS ein gewichtiges Potenzial bei der Einsparung von Herbiziden, weil es auf dem Prinzip der Pflugarbeit beruht. Als vollständige Alternative zu Mulchsaatverfahren kommt das PMS jedoch nur in Frage, wenn der Abbau des Mulchmaterials an der Bodenoberfläche zukünftig deutlich reduziert werden kann.

Die Stickstofffreisetzung aus dem fein aufgearbeiteten Mulchmaterial an der Bodenoberfläche kann gegenüber dem vollständigen Einpflügen des Mulchmaterials möglicherweise schneller erfolgen. An diesem Punkt muss zukünftig auch der Einfluss der Zerkleinerung des Grüngutes umfangreicher untersucht werden.

Ökonomisch beurteilt, hat das Pflug-Mulch-System mit den aktuellen Leistungsdaten eine Chance sich als Bodenbewirtschaftungssystem zu etablieren.

Bei der Analyse des Erosionsschutzes der derzeit verbreitet eingesetzten landwirtschaftlichen Methoden wurden noch erhebliche Wirkungslücken identifiziert, die eine Weiterentwicklung des PMS als sinnvoll und notwendig erscheinen lassen.

Eine zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht vermutete Problematik betrifft das Etablieren von Zwischenfruchtbeständen, die genügend Biomasse bilden. In Jahren mit ausgeprägten Trockenperioden gestaltet es sich auf Grund von Wassermangel schwierig, ausreichende Bestände, nach zum Beispiel Getreide, zu etablieren. Als Alternative dazu, könnte auch eine hohe Strohstoppel (Hochschnitt) genutzt werden. Damit stünde dem Pflug-Mulch-System Stroh zum Mulchen zu Verfügung.

Im Hinblick auf die Weiterentwicklung des Pflug-Mulch-Verfahrens ist zunächst eine Quantifizierung des Abbauverhaltens von verschiedenen Arten von Mulchmaterial auf gepflügten Bodenoberflächen zu leisten. An diese Ergebnisse muss dann die Arbeitsweise des Frontmulchers angepasst werden.

7.2 Zusammenarbeit der Kooperationspartner, externe Kooperation

Innerhalb des Projektkonsortiums gelang die arbeitsteilige Bearbeitung der Arbeitspakete sehr gut. Der Austausch der Teilergebnisse und die Diskussion des erreichten Arbeitsstandes erfolgte seit Projektbeginn in 6 größeren, gemeinsamen Arbeitsberatungen ergänzt um kleinere Arbeitstreffen oder Telefonkonferenzen zu einzelnen Arbeiten oder die Planung der Feld- und Laborversuche. Ein gemeinsamer Projektabschluss wurde am 09.06.2020 in einer Videokonferenz mit Teilnahme aller Projektpartner durchgeführt. Die Lieferung der vereinbarten Maschinenkomponenten sowie die technische und konstruktive Unterstützung insbesondere bei der Entwicklung und Optimierung des Versuchsmusters sowie die Bereitstellung unterschiedlicher Rotor- und Werkzeugvarianten durch die Fa. Müthing GmbH & Co. KG geschah umfassend und fristgerecht. Die umfassende pflanzenbauliche Betreuung und Auswertung der Praxisversuche durch die Bioland Beratung GmbH ermöglichte eine abschließende Bewertung des Pflug-Mulch Verfahrens.

Der interdisziplinäre Ansatz mit der Kombination von Funktions- /Produktentwicklung und landwirtschaftlicher Verfahrensforschung ermöglichte sowohl eine erste Bewertung der entwickelten Maschine, als auch Ergebnisse zur Einschätzung des Pflug-Mulch-Verfahrens.

Die Projektpartner sind einer Fortführung des Projektes gegenüber positiv eingestellt. Derzeit werden verschiedene Szenarien zur weiteren Entwicklung und Untersuchung des Pflug-Mulch-Systems diskutiert.

8 Öffentlichkeitsarbeit

In der letzten Projektphase wurden mehrfach Ergebnisse veröffentlicht. Bei den Öko-Feldtagen 2019 wurde das Funktionsmuster an beiden Ausstellungstagen vorgeführt und anschließend auf dem Stand der TU-Dresden Agrarsystemtechnik präsentiert. Dazu wurde auch Informationsmaterial erstellt. Mit Landwirten wurde das neue Verfahren mit seinen Chancen und Risiken diskutiert. Die Rückmeldungen wurden dokumentiert und flossen in die praxisorientierte Befragung ein.

Zusätzlich wurde das Verfahren und die Ergebnisse neben diversen Präsentationen auf Fachkonferenzen auch in mehreren Artikeln in Fachzeitschriften veröffentlicht. Auch hier zeigen die Rückmeldungen einen Bedarf an der beschriebenen Maschinen- und Verfahrenstechnik.



Abbildung 26 Stand der Professur Agrarsystemtechnik auf den Ökofeldtagen 2019

Im Folgenden ist eine Auflistung der bisherigen Veröffentlichungen dargestellt:

Konferenzbeiträge:

Geißler, S., Hänsel, M., Schlegel, P., Winter, K. (2020): Pflug-Mulch-System. Veranstalter: Pfeiffer und Langen GmbH & Co. KG, Videokonferenz am 11.08.2020.

Geißler, S.; Müthing, M.; Hänsel, M. (2018) Pflug-Mulch-Verfahren
76. Internationale Tagung Land.Technik des VDI, Fachkonferenz 03.11.2018.

Hänsel, M. (2019): Pflügen und Mulchtransfer in einem Arbeitsgang. Veranstalter: Südzucker AG. - Kuratorium für Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau, Vortrag am 5.12.2019, Offenau.

Hänsel, M. (2020): Pflügen und Mulchtransfer in einem Arbeitsgang – eine Chance für den Bodenschutz. Vereinigung zur Förderung der biologisch-dynamischen Landwirtschaft in Ostdeutschland e.V., Wintertagung 25.1. und 26.1.2020, Limbach.

Hänsel, M. (2020): Pflug-Mulch-System – Mulchtransfer und Pflügen in einem Arbeitsgang. Gäa e.V. Wintertagung 30.1. bis 31.01.2020, Limbach.

Fachzeitschriften:

Becker, Karsten, (2019): Pflügen und Mulchen in einem Arbeitsgang. Landwirtschaftliches Wochenblatt, Heft 28, S. 14.

Geißler, S.; Herlitzius, T.; Hänsel, M.; Winter, K., Schlegel, P. (2020): Bodenbedeckung trotz Bearbeitung. Lumbrico, Heft 7, S. 25 – 29.

Hänsel M., Schlegel, P., Winter, K. (2019): Mit Mulch den Boden halten. Bauernzeitung, Sonderheft Ratgeber Ökolandbau 2019, S. 7 – 9.

Hänsel, M. & Winter K., (2019): Pflug-Mulch-System: Zwei Fliegen mit einer Klappe. Top agrar, (Österreich), Heft 11, S. 28 – 30.

Hänsel, M. & Winter K., (2020): Pflug-Mulch-System: Zwei Fliegen mit einer Klappe. Landfreund (Schweiz), Heft 1, S. 38 – 41.

Hänsel, M. & Winter K., (2019): Mulchen, Werfen, Pflügen. Bioland, Heft Juli, S. 24 – 26.

Vorführung:

Öko-Feldtage 2019, 3. und 4. 7. 2019, Kassel, Hessische Staatsdomäne Domäne Frankenhausen; Veranstalter: FiBL Projekte GmbH.

9 Fazit

Auch weiterhin gibt es am Markt keine Maschinen- und Verfahrenslösung, die das Problem des Erosionsschutzes bei tiefer Grundbodenbearbeitung lösen kann. Sowohl die Verfahrenskombination von Bewuchsmanagement (Mulcharbeit) und Grundbodenbearbeitung (Pflügen) in einem Arbeitsgang als auch die technische Umsetzung als Frontanbaumulcher ist weiterhin neu. Die Problematik des Erosionsschutzes und der Zielkonflikt Bodenbearbeitung – Erosionsschutz bleibt weiterhin aktuell.

Ausgehend von einem zusätzlichen Bedarf an Erosionsschutzmaßnahmen bei der Bodenbearbeitung im Ackerbau wurde eine Maschinenkombination aus Frontmulcher, Traktor und Pflug entwickelt, mit dem Ziel die Pflugfurche gleichzeitig mit dem Pflügen wieder mit einer Mulchbedeckung zu versehen und somit die Erosionsdeposition der Fläche gering zu halten. Neben einer geeigneten Maschinenkombination, waren dafür auch geeignete Pflanzenbestände auf der zu pflügenden Fläche erforderlich.

Die Vorgehensweise, mit grundlegenden Voruntersuchungen das Technik- (Maschinenentwicklung) und Verfahrenskonzept (Umsetzung im Feldbau) zu entwickeln, hat sich bewährt. Damit konnte das technische Entwicklungsrisiko begrenzt und durch Spezifizierung von Maschinenparametern als Einflussgrößen auf das Verfahren der Einsatz und der Versuchsumfang für das Funktionsmuster besser geplant werden.

Bei den Praxisversuchen mit dem Funktionsmuster konnten Bodenbedeckungsgrade von bis zu 95 % aus dem vorhandenen Zwischenfruchtmaterial erzielt werden. Allerdings waren die Abbauraten der Mulchauflage durch nachfolgende Arbeitsgänge der Bodenbearbeitung und durch biogene Faktoren so hoch, dass der erhöhte Erosionsschutz im Zeitverlauf nicht aufrechterhalten werden konnte. Als wesentliche Ursache für den schnellen Abbau des gemulchten Pflanzenmaterials wird auch der hohe Zerkleinerungsgrad im Mulcher angesehen.

Indes wurden keine technischen Einschränkungen für die Einsatzabfolge der nachfolgenden Arbeitsgänge festgestellt. Für den Pflanzenbau wurden die Parameter N_{\min} -Entwicklung, Aspekte der Unkrautregulierung und Pflanzenertrag erfasst bzw. bearbeitet sowie eine betriebswirtschaftliche Einordnung dieses Verfahrens ausgearbeitet.

Um das aktuelle Funktionsmuster weiter zu entwickeln, sind zukünftig die Abbauraten von Mulchmaterial unterschiedlicher Häcksellänge auf Ackeroberflächen zu quantifizieren und die Arbeit des Mulchers auf diese Anforderungen abzustimmen.

Auf Grund des weiterhin bestehenden Bedarfs an erosionsmindernden Verfahren der Bodenbearbeitung im Ackerbau, wird der Fortführung dieser Entwicklungsarbeit eine große Bedeutung beigemessen.

10 Literaturverzeichnis

- Domsch, M. (1960): Überlegungen zur Frühjahrsbestellung. *Agrartechnik*, 10. Jahrgang, Heft 3, S. 91 – 94.
- Leurs, Kristina (2005): Einfluss von Häcksellänge, Aufbereitungsgrad und Sorte auf die Siliereigenschaften von Mais. Diss. Uni Bonn, 180 S.
- LfULG (Hrsg.) (2009): Erosionsminderung in der Landwirtschaft. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Schriftenreihe Heft 2, S. 40 – 72.
- LfULG (Hrsg.) (2013): Optimierung der Stoppelbearbeitung. Sächsische Landesanstalt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Schriftenreihe Heft 19, 49 S.
- LfULG (Hrsg.) (2014): Entwicklung von Konzepten zur Wassererosionsminderung auf Kartoffelflächen mit Hilfe des Modells EROSION-3D. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Schriftenreihe Heft 4, 81 S.
- Oldeman, L.R. (1994): The global extent of soil degradation. In: Greenland D.J. und Szabolcs I. (Hg.), *Soil resilience and sustainable land use*. CAB International, Wallingford, S. 99-118
- Pallutt, B. (2000): Unkrautunterdrückung und -bekämpfung durch Fruchtfolgegestaltung, Bodenbearbeitung, Aussaatzeit, Saatmenge und Stickstoffversorgung. *Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* 72, Saphir Verlag, S. 35-46.
- Pekrun, C., Schneider, N., Wüst, C., Jauss, F., Claupein, W. (2003) Einfluss reduzierter Bodenbearbeitung auf Ertragsbildung, Unkrautdynamik und Regenwurmpopulationen im Ökologischen Landbau. Abgerufen am 12.03.2020 <https://www.orgprints.org/1259/>
- Pforte, F. (2010): Entwicklung eines Online-Messverfahrens zur Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades bei der Stoppelbearbeitung zu Mulchsaatverfahren. Diss. Univ. Kassel/Witzenhausen.
- Prochnow, A.; Kleinke, M.; Streßmann, U. (2000): Zersetzung von Grünlandaufwuchs nach dem Mulchen. *Agrartechnische Forschung* 6, Heft 3, S. 46-53.
- Riegler-Nurscher, P., J. Prankl, T. Bauer, P. Strauss & H. Prankl (2016): An integrated Image Analysis System for the Estimation of Soil Cover. CIGR-AgEng conference, Aarhus, Denmark, S. 1-8.
- Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G., Hartge, K.-H.; Schwermann, U. (1989): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Verlag Ferdinand Enke, Stuttgart, 491 S.
- Schindewolf, M. (2010): Prozessbasierte Modellierung von Erosion, Deposition und partikelgebundenem Nähr- und Schadstofftransport in der Einzugsgebiets- und Regionalskala. Diss. TU Freiberg, S. 173
- Umweltbundesamt.de (2020): abgerufen am 20.07.2020: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/bodenbelastungen/erosion#welche-gebiete-sind-besonders-von-bodenerosion-durch-wasser-gefährdet>
- Wilhelm, B. & Hensel O. (2009): Förderung der Mulchsaat im Ökolandbau – das Auflaufverhalten von Zwischenfrüchten. In: Meyer et al. (2009): *Tagungsband der 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*. Verlag Dr. Köster. S. 384-387
- Winnige, B.; Corzelius, U.; Frielinghaus, M. (1998): Indikation der aktuellen Erosionsgefährdung mit Hilfe der Bodenbedeckung. *Mitteil. der Deutschen Bodenkundl. Ges.*, 88, S. 569-572.
- Zimmerling, B. (2004): Beregnungsversuche zum Infiltrationsverhalten von Ackerböden nach Umstellung der konventionellen auf konservierende Bodenbearbeitung. In *Horizonte*: Bd. 15, Dissertation Universität Hannover, Fachbereich Geowissenschaften und Geographie, Anhang S. 110-111

11 Anlagen

- Anlage 1 Übersicht Versuchsergebnisse der Praxisversuche (Kurzprotokolle)
- Anlage 2 Bildersammlung zu den Versuchsreihen
- Anlage 3 Bodendaten der Versuchsflächen

Anlage 1.1 Übersicht Versuchsergebnisse der Feldversuche

TU DRESDEN
Agrarsystemtechnik



Kurzübersicht Feldversuchsprotokoll Pflug-Mulch-Verfahren

Maschine: MU-PM

Standort: Taucha

Bearbeiter: Geißler, Przybyla, Hänsel,
Winter, Schlegel

Datum: 09./10.10.2020

V. Nr.	Versuchsinhalt	Bedingungen/ Konfiguration	Ergebnisse	Besonderheiten/Maßnahmen
Fläche 01	Maschineneinstellfahrten / Freimulchen der Testparzelle	Luzerne, 4. Standjahr Inhomogener Bestand 75-100cm (Auf Kuppe teilweise nur 40cm) v=7km/h, s=20mm, n=1000 U/min	verstopfen der beiden rechten Auswurfkrümmer (9 und 10), intensive Zerkleinerung	Öffnen der Krümmer auf 110°, Schneidspalt auf s=30mm, Drehzahlreduzierung auf 850 U/min
	Flächenanlage	v=7km/h	Traktor schmiert am Hang mit Pflug ab	absetziges Anlegen der Parzelle
	Flächenanlage	Spaltweite Gegenschneide: s=30mm, v=7 km/h	intensive Zerkleinerung, teilweise sehr wenig Aufwuchs	
Fläche 06	Maschineneinstellfahrten	Raps, sehr nass Bestand ca. 30-40cm v=7km/h, s=30mm, n=850 U/min	problemloser Auswurf, gleichmäßiges Arbeitsbild, intensive Zerkleinerung, starker Wasseraustrag	weitere Drehzahlreduktion auf 750 U/min vom Traktor nicht umsetzbar (Grenze des Verstellbereichs des CVT, Selbstschutz)
	Flächenanlage	v=7km/h	Pflug-Mulchen möglich, sehr hoher Bedeckungsgrad, gleichmäßiges Arbeitsergebnis	
Fläche 04	Maschineneinstellfahrten	Senf-Phacelia-Ramtkraut Bestand ca. 120-140cm v=7km/h, s=30mm, n=850 U/min	intensive Zerkleinerung	weitere Drehzahlreduktion auf 750 U/min vom Traktor nicht umsetzbar (Grenze des Verstellbereichs des CVT, Selbstschutz), Variation des Schneidspaltes (s=40mm)
	Flächenanlage	v=7km/h s=40mm	Maschine kann nicht in Schwimmstellung laufen – undefinierte Luftströmung sehr ungleichmäßiges Arbeitsbild (Mulchergehäuse scheint zu klein für den hohen Durchsatz (70t/h)	absetziges Verfahren, Mulchen neben der Furche

Anlage 1.1 Übersicht Versuchsergebnisse der Feldversuche

TU DRESDEN
Agrarsystemtechnik



Kurzübersicht Feldversuchsprotokoll Pflug-Mulch-Verfahren

Maschine: MU-PM

Standort: Taucha

Bearbeiter: Geißler, Przybyla, Hänsel,
Winter, Schlegel

Datum: 22./24.10.2020

V. Nr.	Versuchsinhalt	Bedingungen/ Konfiguration	Ergebnisse	Besonderheiten/Maßnahmen
Fläche 05	Maschineneinstellfahrten / Freimulchen der Testparzelle	Senf-Phacelia-Ramtkillkraut- Gartenkresse Bestand ca. 130-140cm v=7km/h ,s=30mm, n=850 U/min	besserer Auswurf durchgeschweißte Auswurfkrümmer, hoher Durchsatz, intensive Zerkleinerung	anschließend Leistungsmessung
	Flächenanlage	v=7km/h	Pflug-Mulchen möglich, hoher Bedeckungsgrad, gleichmäßiges Arbeitsergebnis	
Fläche 02	Maschineneinstellfahrten	Senf-Phacelia Bestand ca. 70-120cm teilweise inhomogen v=7km/h ,s=30mm, n=850 U/min	gleichmäßiges Arbeitsbild, intensive Zerkleinerung, starker Wasseraustrag	
	Flächenanlage	v=7km/h	Pflug-Mulchen möglich, hoher Bedeckungsgrad, gleichmäßiges Arbeitsergebnis	
Fläche 03	Maschineneinstellfahrten	Luzerne Bestand ca. 45-65cm v=7km/h ,s=30mm, n=850 U/min	sicherer Auswurf trotz zähfasrigem Material, hohe Wurfweite möglich, gleichmäßiges Arbeitsergebnis,	Anpassung der Wurfweite
	Flächenanlage	v=7km/h	hoher Bedeckungsgrad, gleichmäßiges Arbeitsergebnis	Test Verfahren – 1. Richtung Mulchen, 2. Richtung pflügen als absetziges Verfahren mit einer Maschine



Auswurfkrümmer mit Blechen zur Gutstromaufteilung



Frontmulcher mit Sichtfenster zur Gutstromuntersuchung



Arbeitsergebnis mit geänderten Auswurfkrümmern - weiterhin ungleichmäßig



Leistungsmessung auf schweren Böden



Kraftmessdreieck im Heckanbau zwischen Zugmaschine und Pflug



Fertigung Auswurf V3 in Dresden



Funktionstest V3 in Heidenau in Weizenstoppel und Luzerne (geringer Aufwuchs)



Anlage 2 Bildersammlung zu Feldversuchen

TU DRESDEN
Agrarsystemtechnik



Kurzübersicht
Feldversuchsprotokoll
Pflug-Mulch-Verfahren

Maschine: MU-PM
Standort: Muschau

Bearbeiter: Geißler, Przybyla, Hänsel,
Winter, Schlegel
Datum: 09.-10-10.2019



Fläche_01_Übersicht



Fläche 06_Übersicht



Fläche_04_Übersicht



Fläche_01_Arbeitsergebnis



Fläche_06_Arbeitsergebnis



Fläche_04_Arbeitsergebnis

Anlage 2 Bildersammlung zu Feldversuchen

TU DRESDEN
Agrarsystemtechnik



**Kurzübersicht
Feldversuchsprotokoll
Pflug-Mulch-Verfahren**

Maschine: MU-PM

Bearbeiter: Geißler, Przybyla, Hänsel,
Winter, Schlegel

Standort: Grauschwitz/Cunnen Datum: 22./24.10.2019



Fläche_05_Übersicht



Fläche_02_Übersicht



Fläche_03_Übersicht



Fläche_05_Arbeitsergebnis



Fläche_02_Arbeitsergebnis



Fläche_03_Arbeitsergebnis



Flächenanlage Fläche 03



Flächenanlage Fläche 05



Anlegen der Vergleichsparzelle Fläche 05



Maschinenkombination Fläche 02



Verfahrensübersicht Fläche 05



Ermittlung des Bedeckungsgrades Fläche 03

Anlage 3 Bodendaten der Versuchsfelder

Ort	Parameter	Versuchsparzelle			Spannweite	Mittelwert
		1	2	3		
Muschau (Fläche 01)	Neigung %	17	17		0	17
	Sand %	14	31		18	22
	Schluff %	66	54		12	60
	Ton %	21	15		6	18
	Bodenart	Ut4	Uls			
	P mg/100 g	7	5		1	6
	K mg/100 g	11	9		2	10
	Mg mg/100 g	23	26		3	25
	pH	5,9	6,1			6,0
Doberquitz1 (Fläche 02)	Neigung %	5	5	5	0	5
	Sand %	18	5	3	15	9
	Schluff %	71	80	84	13	78
	Ton %	11	16	13	5	13
	Bodenart	Ut2	Ut3	Ut3		
	Humus %	1,8	2,7	2,1	0,9	2,2
	P mg/100 g	5	7	5	2	5
	K mg/100 g	5	10	9	6	8
	Mg mg/100 g	7	9	9	2	8
	pH	5,6	5,5	5,3		5,5
Doberquitz2 (Fläche 03)	Neigung %	8	8		1	8
	Sand %	4	2		1	3
	Schluff %	76	77		1	76
	Ton %	21	21		0	21
	Bodenart	Ut4	Ut4			
	Humus %	2,0	2,0		0,0	2,0
	P mg/100 g	3	4		1	3
	K mg/100 g	8	9		0	8
	Mg mg/100 g	13	11		2	12
	pH	7	7			6,8

Anlage 3 Bodendaten der Versuchsflächen

Grauschwitz (Fläche 05)	Neigung %	10	10	11	1	10
	Sand %	1	14	5	13	7
	Schluff %	88	74	79	14	80
	Ton %	11	12	16	5	13
	Bodenart	Ut2	Ut3	Ut3		
	P mg/100 g	11	12	14	3	13
	K mg/100 g	72	69	81	12	74
	Mg mg/100 g	15	19	17	4	17
	pH	6,8	6,8	6,9		6,8
Dürrweitzschen (Fläche 06)	Neigung %	9	8	6	3	8
	Sand %	15	8	2	14	9
	Schluff %	69	80	83	15	77
	Ton %	16	12	15	4	14
	Bodenart	Ut3	Ut3	Ut3		
	Humus %	4,0	2,7	3,1	1,3	3,2
	P mg/100 g	10	6	8	4	8
	K mg/100 g	50	23	51	28	41
	Mg mg/100 g	15	14	12	3	14
	pH	5,9	5,7	5,9		5,8