

**Möglichkeiten zur Nutzung der Koppelprodukte von Erbsen
und Ackerbohnen in Biogasanlagen und deren Effekte auf
die Folgekultur Winterweizen**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktorin der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

Karoline Röper

aus

Lippstadt

Bonn 2021

Referent: Prof. Dr. Ralf Pude

Korreferenten: Dir. & Prof. Dr. Bernhard C. Schäfer
Prof. Dr. Harald Laser

Tag der mündlichen Prüfung: 01.03.2021

Angefertigt mit Genehmigung der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn

Zusammenfassung

Wegen der steigenden Anforderungen an Biogasanlagenbetreiber durch das EEG 2017 werden alternative, kostengünstige Substrate gesucht, die die Flächenkonkurrenz zwischen Nahrungs- bzw. Futtermittelproduktion und der Bioenergieproduktion entschärfen. Koppelprodukte aus der Landwirtschaft stellen ein bisher weitestgehend ungenutztes Potential dar, welches diese Anforderungen erfüllen kann. In der vorliegenden Dissertation wurde untersucht, inwieweit Ackerbohnen- und Erbsenstroh Silomais substituieren kann und welche Effekte diese Nutzung innerhalb der Fruchtfolge hat.

Zu diesem Zweck wurden in zwei Jahren an jeweils zwei Standorten Feldversuche mit je drei Ackerbohnen- und Erbsensorten angelegt. Die Versuche wurden zu mehreren Terminen von beginnender Druschreife bis zur Totreife geerntet; die Konservierung des Materials erfolgte als Stroh oder Strohsilage. Die Proben wurden hinsichtlich der Inhaltsstoffe untersucht und aus diesen die theoretische Biogas- und Methanausbeute berechnet. Eine Auswahl an Proben wurde mittels Biogasertragstest geprüft, wobei der Methangehalt des Biogases durch ein externes Labor ermittelt wurde. Zu allen Terminen wurden die Korn- und Stroherträge sowie deren Trockenmassegehalte bestimmt.

Zur Überprüfung einer möglichen Nachwirkung der Strohnutzung wurden an jeweils zwei Standorten auf Erbsen- und Ackerbohenschlägen Teilflächen vom Stroh geräumt und in der Folgekultur Feldversuche mit einer Stickstoffsteigerung angelegt.

Bei einem mittleren Strohertrag von etwa 40 dt/ha wurden Biogasausbeuten von etwa 530 l/kg TM und Methanausbeuten von etwa 265 l/kg TM berechnet. Trotz zunehmender Gerüstsubstanzen bei fortschreitender Seneszenz bewirkte weder diese noch die Form der Konservierung Änderungen in den Gasausbeuten. Die gemessenen Ausbeuten lagen jedoch zum Teil bis zu 60% unter den theoretischen Ausbeuten, während die Stroherträge je nach Erntetermin um 25% vom Gesamtmittelwert abwichen. Das Potential für eine Nutzung des Strohs in Biogasanlagen ist daher abhängig von den dafür gewählten Faktoren. Die Nachwirkung stellte sich für die beiden Vorfrüchte differenziert dar. Nach Vorfrucht Ackerbohne wurden keine Effekte festgestellt, nach Vorfrucht Erbse gab es zu verschiedenen Entwicklungsstadien Effekte der Strohbergung, die jedoch nicht ertragswirksam waren.

Abstract

Due to the increasing demands on biogas plant operators as a result of the EEG 2017, alternative, cost-effective substrates are being searched that will reduce the competition for land between food and feed production and bioenergy production. Co-products from agriculture represent a so far largely unused potential that can meet these requirements. In the present dissertation was investigated to what extent field bean and pea straw can substitute silage maize and what effects this use has within crop rotation.

For this purpose, field trials with three field bean and three pea varieties in two years at two locations each were set up. The trials were harvested at several dates from the beginning of threshing maturity to dead maturity, the material was conserved as straw or straw silage. The samples were analysed in regard to the ingredients and the theoretical biogas and methane gas yield was calculated. A selection of samples was tested by biogas yield test, and an external laboratory determined the methane content of the biogas. The grain and straw yields and their dry matter contents were determined on all dates.

In order to test the possible effect of straw use, pea and field bean fields were cleared of straw at two locations each, and field trials were carried out in the subsequent crop with a nitrogen increase.

With an average straw yield of about 40 dt/ha, biogas yields of about 530 l/kg DM and methane gas yields of about 265 l/kg DM were calculated. Despite the increase in structural substances as senescence progressed, neither this nor the form of conservation caused changes in the gas yields. However, the measured yields were in some cases up to 60% below the theoretical yields and the straw yields deviated by 25% from the total mean value, depending on the harvest date. The potential for using straw in biogas plants therefore depends on the factors selected for this purpose. The after-effect was different for the two previous crops. No effects were observed after the preceding crop field bean; after the preceding crop pea, there were effects of straw salvage at different stages of development, which, however, did not affect the yield.

Vorwort

Diese Arbeit entstand innerhalb des Projekts „Möglichkeiten zur Nutzung von Koppelprodukten des Ackerbohnen- und Erbsenanbaus in Biogasanlagen“ an der Fachhochschule Südwestfalen, Standort Soest, das durch das Förderprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“ im Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) finanziert wurde, Förderkennzeichen: 22401316. Projektträger war die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Teile der Ergebnisse dieser Arbeit sind daher im Abschlussbericht des Projekts (RÖPER et al., 2020a) sowie in einem Beitrag im Journal für Kulturpflanzen (RÖPER et al., 2020b) zu finden. Des Weiteren wurden Zwischenergebnisse auf einer Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften (RÖPER et al., 2019a & 2019b) präsentiert.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	ii
Vorwort	iii
Inhaltsverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xiv
1 Einleitung	1
2 Stand des Wissens	4
2.1 Charakterisierung von Körnerleguminosenstroh und dessen Anwendung	4
2.2 Lignozellulosereiche Substrate in Biogasanlagen	10
2.2.1 Aufbau des Lignozellulosekomplexes	10
2.2.2 Möglichkeiten der Aufbereitung lignozellulosereicher Substrate	12
2.2.3 Grenzen des Einsatzes lignozellulosereicher Substrate.....	14
2.3 Berechnung von theoretischen Biogaspotentialen	15
2.4 Wirkungen von Körnerleguminosen und Strohnutzungen in der Fruchtfolge ..	19
2.5 Arbeitshypothesen.....	23
3 Material und Methoden	24
3.1 Ernteterminversuche	24
3.1.1 Feldversuche.....	24
3.1.1.1 Standortwahl.....	24
3.1.1.2 Faktoren und Faktorstufen.....	26
3.1.1.3 Versuchsaufbau und -durchführung.....	30
3.1.2 Laboranalysen.....	32
3.1.2.1 Silagenbewertung	32
3.1.2.2 Inhaltsstoffanalysen	33

3.1.2.3 Gasertragstests.....	35
3.1.3 Berechnung der theoretischen Gasausbeute	39
3.2 Untersuchungen zur Nachwirkung der Strohbergung auf die Folgekultur Winterweizen.....	40
3.2.1 Feldversuche.....	40
3.2.1.1 Standortwahl.....	40
3.2.1.2 Faktoren und Faktorstufen.....	41
3.2.1.3 Versuchsaufbau und -durchführung.....	42
3.2.2 Qualitätsanalysen.....	47
3.3 Statistik.....	47
4 Ergebnisse	49
4.1 Ernteterminversuche	49
4.1.1 Feldversuche.....	49
4.1.2 Laboranalysen.....	55
4.1.2.1 Silagenbewertungen	55
4.1.2.2 Inhaltsstoffanalysen	59
4.1.2.3 Gasertragstests.....	75
4.1.3 Theoretische Gasausbeuten	83
4.2 Untersuchungen zur Nachwirkung der Strohbergung auf die Folgekultur Winterweizen.....	88
4.2.1 Feldversuche.....	88
4.2.1.1 N _{min} -Ergebnisse	88
4.2.1.2 NDVI-Werte	90
4.2.1.3 Erträge	95
4.2.2 Qualitätsanalysen.....	96
5 Diskussion	115
5.1 Ernteterminversuche	115
5.1.1 Erträge und Inhaltsstoffe der Körnerleguminosen	115
5.1.2 Effekt der Silierung auf die Inhaltsstoffe und die Biogasausbeute.....	120
5.1.3 Diskrepanz zwischen den Gasausbeuten von internem und externem Labor	121
5.1.4 Diskrepanz zwischen gemessenen und berechneten Biogasausbeuten	123

5.2 Untersuchungen zur Nachwirkung der Strohbergung auf die Folgekultur Winterweizen.....	125
5.3 Gesamtbeurteilung der Koppelproduktnutzung	130
6 Literaturverzeichnis.....	134
Danksagung	148
Anhang	149
Abbildungsverzeichnis des Anhangs	149
Tabellenverzeichnis des Anhangs	149
Ernteterminversuche	153
Feldversuche.....	153
Laboranalysen.....	158
Theoretische Gasausbeuten	167
Untersuchungen zur Nachwirkung der Strohbergung auf die Folgekultur Winterweizen.....	171
Feldversuche.....	171
Qualitätsanalysen.....	181

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lignozellulosekomplex nach KÄMPFER, 2002.	11
Abbildung 2:	Monatliche Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen des Standorts Soester Börde während der Vegetationszeit von Erbsen und Ackerbohnen 2017 und 2018.	25
Abbildung 3:	Monatliche Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen des Standorts Ostwestfalen-Lippe während der Vegetationszeit von Erbsen und Ackerbohnen 2017 und 2018.	26
Abbildung 4:	Abreifedifferenzierung verschiedener Erbsensorten im Jahr 2016, Haus Düsse.	27
Abbildung 5:	Abreifedifferenzierung verschiedener Ackerbohnenorten (BA=Nummer Bundessortenamt) im Jahr 2016, Haus Düsse.	28
Abbildung 6:	Entwicklungsrückstand der Sorte Respect am Standort Soester Börde am 07.05.2018 (links) und zur Blüte am 28.05.2018 (rechts).	30
Abbildung 7:	Versuchsplan der Ernteterminversuche mit den Großparzellen ,Erntetermin‘ und den Kleinparzellen ,Sorte‘, exemplarisch für eine Wiederholung (R=Randparzellen).	31
Abbildung 8:	Monatliche Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen des Standorts Soester Börde während der Vegetationszeit von Winterweizen 2017/2018 und 2018/2019.	41
Abbildung 9:	Exemplarischer Versuchsplan mit den Großparzellen ,Strohbergung‘ und den Kleinparzellen ,Düngestufen‘, exemplarisch für zwei Wiederholungen (R=Randparzellen).	42
Abbildung 10:	GreenSeeker®-Einsatz (links) und sichtbare N-Düngestufen innerhalb der Parzellen (rechts). Beide Aufnahmen nach Vorfrucht Erbse am Standort Haarstrang.	46
Abbildung 11:	Lineare Regression und Bestimmtheitsmaß der Hemizellulose zwischen Erbsenstrohsilage und Erbsenstroh (n=88).	65
Abbildung 12:	Lineare Regression und Bestimmtheitsmaß der Zellulose zwischen Erbsenstrohsilage und Erbsenstroh (n=88).	65
Abbildung 13:	Lineare Regression und Bestimmtheitsmaß des Lignins zwischen Erbsenstrohsilage und Erbsenstroh (n=88).	66
Abbildung 14:	Lineare Regression und Bestimmtheitsmaß der Hemizellulose zwischen Ackerbohnenstrohsilage und Ackerbohnenstroh (n=132).	73
Abbildung 15:	Lineare Regression und Bestimmtheitsmaß der Zellulose zwischen Ackerbohnenstrohsilage und Ackerbohnenstroh (n=132).	73

Abbildung 16:	Lineare Regression und Bestimmtheitsmaß des Lignins zwischen Ackerbohnenstrohsilage und Ackerbohnenstroh (n=132).....	74
Abbildung 17:	Biogasausbeuten (l/kg oTM) der getesteten Erbsensorten des Standorts Ostwestfalen-Lippe im Jahr 2017, im Vergleich zu Silomais.....	76
Abbildung 18:	Biogasausbeuten (l/kg oTM) der getesteten Erbsensorten beider Standorte im Jahr 2018, im Vergleich zu Silomais.	77
Abbildung 19:	Biogasausbeuten (l/kg oTM) der getesteten Ackerbohnen Sorten des Standorts Ostwestfalen-Lippe im Jahr 2017, im Vergleich zu Silomais.....	77
Abbildung 20:	Biogasausbeuten (l/kg oTM) der getesteten Ackerbohnen Sorten des Standorts Ostwestfalen-Lippe im Jahr 2018, im Vergleich zu Silomais.....	78
Abbildung 21:	Biogasausbeuten (l/kg oTM) der getesteten Ackerbohnen Sorten des Standorts Soester Börde im Jahr 2018, im Vergleich zu Silomais.....	78
Abbildung 22:	Lineare Regressionen und Bestimmtheitsmaße von Biogasausbeute und Inhaltsstoffen des Erbsenstrohs (n=18).	79
Abbildung 23:	Lineare Regressionen und Bestimmtheitsmaße von Biogasausbeute und Inhaltsstoffen der Erbsenstrohsilagen (n=6).....	79
Abbildung 24:	Lineare Regressionen und Bestimmtheitsmaße von Biogasausbeute und Inhaltsstoffen des Ackerbohnenstrohs (n=30).....	80
Abbildung 25:	Lineare Regressionen und Bestimmtheitsmaße von Biogasausbeute und Inhaltsstoffen der Ackerbohnenstrohsilagen (n=20).....	80
Abbildung 26:	Einfluss des Erntetermins auf Biogas- und Methanausbeute (l/kg oTM) sowie Methananteil (%) im Biogas von Ackerbohnen- (Fuego, Taifun) und Erbsenstroh (Navarro) sowie Strohsilagen, am Standort Soester Börde im Erntejahr 2017.....	81
Abbildung 27:	Einfluss des Erntetermins auf Biogas- und Methanausbeute (l/kg oTM) sowie Methananteil (%) im Biogas von Ackerbohnen- (Fuego, Taifun) und Erbsenstroh (Navarro) sowie Strohsilagen, am Standort Soester Börde im Erntejahr 2018.....	82
Abbildung 28:	Lineare Regressionen und Bestimmtheitsmaße zwischen theoretischen (x-Achse l/kg TM) und gemessenen Gasausbeuten (y-Achse l/kg oTM).....	87
Abbildung 29:	N _{min} -Gehalte (kg N/ha) der verschiedenen Bodentiefen in Abhängigkeit von Vorfrucht, Jahr und Zeitpunkt der Entnahme (Mittel über Strohbergung und Standort).....	89

Abbildung 30:	Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (2018: n=36 / 2019: n=48).....	99
Abbildung 31:	Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (2018: n=36 / 2019: n=48).....	100
Abbildung 32:	Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (n=48).	101
Abbildung 33:	Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (n=48).....	102
Abbildung 34:	Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (n=48).	103
Abbildung 35:	Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (n=48).	104
Abbildung 36:	Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (n=48).	105
Abbildung 37:	Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (n=48).....	106
Abbildung 38:	Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (2018: n=36 / 2019: n=48).....	107
Abbildung 39:	Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (2018: n=36 / 2019: n=48).	108
Abbildung 40:	Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (n=48).	109
Abbildung 41:	Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (n=48).....	110

- Abbildung 42: Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (n=48)..... 111
- Abbildung 43: Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (n=48). 112
- Abbildung 44: Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (n=48). ... 113
- Abbildung 45: Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (n=48). 114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Inhaltsstoffe verschiedener Ackerbohnenresiduen (% in Trockenmasse).	8
Tabelle 2:	Inhaltsstoffe verschiedener Erbsenresiduen (% in Trockenmasse).	9
Tabelle 3:	Theoretische Gasausbeuten nach BASERGA, 1998.	16
Tabelle 4:	Durchschnittswerte von Ernterückständen verschiedener Feldfrüchte und zu erwartende Humusbilanz (dt/ha) bei einer unterstellten Abbaurate des Humus im Boden von 40 dt/ha/Jahr. ..	22
Tabelle 5:	Faktoren und Faktorstufen der Ernteterminversuche.	26
Tabelle 6:	Erntetermine der Erbse beider Standorte, 2017 und 2018.	28
Tabelle 7:	Erntetermine der Ackerbohne beider Standorte, 2017 und 2018. ...	29
Tabelle 8:	BBCH-Stadien der Erbsen zu den verschiedenen Erntezeitpunkten.	29
Tabelle 9:	BBCH-Stadien der Ackerbohnen zu den verschiedenen Erntezeitpunkten.	29
Tabelle 10:	Untersuchungsvarianten im Glaskolbentest.	38
Tabelle 11:	Faktoren und Faktorstufen der Nachwirkungsversuche nach Erbsen und Ackerbohnen.	42
Tabelle 12:	Termine zur Ermittlung der NDVI-Werte und BBCH-Stadien des Weizens.	45
Tabelle 13:	Stroherträge (dt TM/ha) der Erbsen.	49
Tabelle 14:	Kornerträge (dt/ha) der Erbsen, bezogen auf 14% Feuchte.	50
Tabelle 15:	TM-Gehalte (%) des Erbsenstrohs.	50
Tabelle 16:	TM-Gehalte (%) des Erbsenkorns.	50
Tabelle 17:	Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit und p-Werte von Erträgen und TM-Gehalten bei Erbsenstroh und -korn (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).	51
Tabelle 18:	Stroherträge (dt TM/ha) der Ackerbohnen.	52
Tabelle 19:	Kornerträge (dt/ha) der Ackerbohnen, bezogen auf 14% Feuchte.	52
Tabelle 20:	TM-Gehalte (%) des Ackerbohnenstrohs.	53
Tabelle 21:	TM-Gehalte (%) des Ackerbohnenkorns.	53
Tabelle 22:	Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit sowie p- Werte von Erträgen und TM-Gehalten bei Ackerbohnenstroh und -korn (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).	54
Tabelle 23:	Bewertung der Erbsenstrohsilagen im Erntejahr 2017.	55
Tabelle 24:	Bewertung der Erbsenstrohsilagen im Erntejahr 2018.	56

Tabelle 25:	Vergleich der TM-Gehalte (%) vor und nach der Silierung des Erbsenstrohs.	56
Tabelle 26:	Bewertung der Ackerbohnenstrohsilagen im Erntejahr 2017.	57
Tabelle 27:	Bewertung der Ackerbohnenstrohsilagen im Erntejahr 2018.	58
Tabelle 28:	Vergleich der TM-Gehalte (%) vor und nach der Silierung des Ackerbohnenstrohs.	58
Tabelle 29:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohproteingehalt des Erbsenstrohs (% in TM).....	59
Tabelle 30:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf die Gerüstsubstanzen des Erbsenstrohs (% in TM).	60
Tabelle 31:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohaschegehalt des Erbsenstrohs (% in TM).	61
Tabelle 32:	Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in % in TM und p-Werte der Inhaltsstoffe von Erbsenstroh (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).	61
Tabelle 33:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohproteingehalt der Erbsenstrohsilagen (% in TM).....	62
Tabelle 34:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf die Gerüstsubstanzen der Erbsenstrohsilagen (% in TM).	63
Tabelle 35:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohaschegehalt der Erbsenstrohsilagen (% in TM).	64
Tabelle 36:	Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in % in TM und p-Werte der Inhaltsstoffe von Erbsenstrohsilagen (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).	64
Tabelle 37:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohproteingehalt des Ackerbohnenstrohs (% in TM).	67
Tabelle 38:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf die Inhaltsstoffe des Ackerbohnenstrohs (% in TM).	68
Tabelle 39:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohaschegehalt des Ackerbohnenstrohs (% in TM).	69
Tabelle 40:	Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in % in TM und p-Werte der Inhaltsstoffe von Ackerbohnenstroh (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).	69
Tabelle 41:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohproteingehalt der Ackerbohnenstrohsilagen (% in TM).	70
Tabelle 42:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf die Gerüstsubstanzen der Ackerbohnenstrohsilagen (% in TM).	71
Tabelle 43:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohaschegehalt der Ackerbohnenstrohsilagen (% in TM).	72
Tabelle 44:	Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in % in TM und p-Werte der Inhaltsstoffe von Ackerbohnenstrohsilagen (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).	72
Tabelle 45:	Theoretische Gasausbeuten des Erbsenstrohs (l/kg TM).	83

Tabelle 46:	Theoretische Gasausbeuten der Erbsenstrohsilagen (l/kg TM).	84
Tabelle 47:	Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in l/kg TM und p-Werte der theoretischen Gasausbeuten von Erbsenstroh und Erbsenstrohsilagen (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).....	84
Tabelle 48:	Theoretische Gasausbeuten des Ackerbohnenstrohs (l/kg TM).....	85
Tabelle 49:	Theoretische Gasausbeuten der Ackerbohnenstrohsilagen (l/kg TM).	86
Tabelle 50:	Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in l/kg TM und p-Werte der theoretischen Gasausbeuten von Ackerbohnenstroh und Ackerbohnenstrohsilagen (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).	86
Tabelle 51:	N_{\min} -Werte des Weizens (0–90 cm) (kg N/ha).....	88
Tabelle 52:	Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in kg N/ha und p-Werte der N_{\min} -Werte (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).	89
Tabelle 53:	NDVI-Werte nach Vorfrucht Erbse im Jahr 2018.....	90
Tabelle 54:	NDVI-Werte nach Vorfrucht Erbse im Jahr 2019.....	91
Tabelle 55:	NDVI-Werte nach Vorfrucht Ackerbohne im Jahr 2018.....	92
Tabelle 56:	NDVI-Werte nach Vorfrucht Ackerbohne im Jahr 2019.....	93
Tabelle 57:	Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit und p-Werte der NDVI-Werte (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).....	94
Tabelle 58:	Weizenerträge (dt/ha) nach Vorfrucht Erbse, bezogen auf 14% Feuchte.	95
Tabelle 59:	Weizenerträge (dt/ha) nach Vorfrucht Ackerbohne, bezogen auf 14% Feuchte.	95
Tabelle 60:	Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in dt/ha, bezogen auf 14% Feuchte und p-Werte der Weizenerträge (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).	96
Tabelle 61:	Tausendkornmasse (g) des Weizens nach Vorfrucht Erbse.	96
Tabelle 62:	Tausendkornmasse (g) des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne.	97
Tabelle 63:	Rohproteingehalt (%) des Weizens nach Vorfrucht Erbse.	97
Tabelle 64:	Rohproteingehalt (%) des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne.....	98
Tabelle 65:	Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit und p-Werte der Parameter aus den Qualitätsanalysen des Weizens (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).	98

Abkürzungsverzeichnis

ADF	Säure-Detergenzfaser (Acid Detergent Fibre)
ADL	Acid Detergent Lignin
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FM	Frischmasse
H	Hemizellulose
KAS	Kalkammonsalpeter
L	Lignin
NDF	Neutral-Detergenzfaser (Neutral Detergent Fibre)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIRS	Nahinfrarotspektroskopie
NN	Normalnull
n.s.	nicht signifikant
oTM	organische Trockenmasse
R²	Bestimmtheitsmaß
TKM	Tausendkornmasse
TM	Trockenmasse
TM-Gehalt	Trockenmasse-Gehalt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V.
XA	Rohasche
XL	Rohfett
XP	Rohprotein
Z	Zellulose

1 Einleitung

Im Jahr 2018 wurden in Deutschland 224.738 Gigawattstunden (GWh) Bruttostrom durch erneuerbare Energien erzeugt, was 37,8% des Verbrauchs entspricht (BMWl, 2019). Hiervon entfielen 18,5% auf Windenergie und 7,7% auf Photovoltaik, während Biogas mit 4,9% den drittgrößten Anteil an erneuerbaren Energien hatte (BMWl, 2019). Diese Energie wurde von über 9.400 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von 4.953 MW produziert (FACHVERBAND BIOGAS E.V., 2019). Damit sind Biogasanlagen ein bedeutender und im Gegensatz zu Wind- und Solarenergie ein weitestgehend witterungsunabhängiger Faktor im Bereich der erneuerbaren Energien. Der Stoffeinsatz für die Biomethanherzeugung bestand im Jahr 2018, bei energiebezogener Betrachtung, zu 86,6% aus nachwachsenden Rohstoffen (VÖLLER & REINHOLZ, 2019). Hierzu wurden über 1,4 Mio. ha Flächen zur Bereitstellung nachwachsender Rohstoffe genutzt, wovon etwa 71% auf Silomaisanbau entfielen (FACHVERBAND BIOGAS E.V., 2019). Dies liegt mitunter daran, dass bei rein ökonomischer Betrachtung der Einsatz von Silomais am wirtschaftlichsten ist und Silomais eine hohe Energiekonzentration und Ertragsfähigkeit aufweist (MIEDANER, 2014).

Obwohl die erneuerbaren Energien weiter ausgebaut werden sollen und eine zentrale Säule der Energiewende darstellen (BMWl, 2020), werden die Sicherheit von Biogasanlagen und deren Wirkung auf die Umwelt zunehmend kritisch hinterfragt (FENDLER et al., 2019). Der Einsatz von Getreidekorn oder Mais als Substrat für die Biogasanlage wird außerdem zukünftig durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) schrittweise auf maximal 44% begrenzt (EEG, 2017, § 39h). Dies gilt sowohl für Mais als Gesamtpflanze als auch für Korn-Spindel-Gemisch, Körnermais und Lischkolbenschrot. Zusätzlich hierzu wird bei den meisten bestehenden und neuen Anlagen die Festvergütung entfallen, was eine weitere Herausforderung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Substraten darstellt. Aus diesem Grund werden alternative, kostengünstige Substrate gesucht, die die Flächenkonkurrenz zwischen Nahrungs- bzw. Futtermittelproduktion und der Bioenergieproduktion entschärfen und außerdem den Anforderungen des EEG entsprechen. Eine bereits etablierte Substratalternative zu Silomais sind Getreideganzpflanzensilagen, die maisbetonte Fruchtfolgen auflockern, dabei jedoch ein deutlich geringeres Ertragspotential aufweisen (AIGNER et al., 2012). Als weitere mögliche Substratalternativen zu Silomais sind daher

insbesondere Kulturen mit hohem Biomasseertrag von Bedeutung wie Miscanthus (DICKEDUISBERG, 2017; KIESEL & LEWANDOWSKI, 2017) oder Durchwachsene Silphie (STOLZENBURG et al., 2016; CUMPLIDO-MARIN et al., 2020). Aber auch andere Kulturen, die zeitgleich ökosystemare Zwecke erfüllen, wie Blümmischungen aus Wildpflanzen (DEGENBECK, 2015; SCHRÖER et al., 2019) oder ungenutzte Potentiale wie Landschaftspflegegras (BLOKHINA et al., 2009; LEIBLE et al., 2015) sind denkbar. Diese Kulturen können jedoch, mit Ausnahme von Landschaftspflegegras und Teilen von Blümmischungen, nicht die genannte Flächenkonkurrenz verbessern. Koppelprodukte aus der Landwirtschaft stellen ein bisher weitestgehend ungenutztes Potential dar, welches diese Anforderungen erfüllen kann.

Bei der Anbauentscheidung für Körnerleguminosen spielte der Vorfruchtwert bisher eine entscheidende Rolle. Hinzu kommen die Auflockerung der Fruchtfolge, die Stickstofffixierung und die Verbesserung der Bodenstruktur (ZERHUSEN-BLECHER et al., 2016). Das Stroh von Körnerleguminosen ist zwar im Gegensatz zum Getreidestroh mengenmäßig von geringer Bedeutung, jedoch könnte mit einer zusätzlichen Nutzung dieses Koppelprodukts ein weiterer Anbaureiz geschaffen und die Wirtschaftlichkeit von Körnerleguminosen verbessert werden. Allerdings stehen bisher keine ausreichenden Daten zum energetischen sowie dem technischen und theoretischen Potential von Körnerleguminosenstroh bei der Nutzung in Biogasanlagen zur Verfügung (BROSOWSKI et al., 2015).

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung von Körnerleguminosenstroh in Biogasanlagen anhand von Futtererbsen und Ackerbohnen aufzuzeigen sowie eine Auswirkung dieser Nutzung auf die Folgekultur zu prüfen. Hierfür wurden zweijährige Feldversuche an je zwei Standorten mit anschließenden Laboranalysen durchgeführt.

In den ‚Ernteterminversuchen‘ wurden jeweils drei Genotypen der Arten Futtererbse und Ackerbohne in Feldversuchen an zwei Standorten angebaut, zu verschiedenen Terminen geerntet und hinsichtlich des Ertrags und der Trockenmasse getestet, um Entwicklungen bezüglich der Seneszenz abschätzen zu können. Die Ernteresiduen wurden als Stroh und/oder Silage konserviert und im Labor hinsichtlich ihrer Inhaltsstoffe analysiert, anhand deren theoretische Biogasausbeuten berechnet wurden. Zusätzlich zu diesen Untersuchungen wurden ausgewählte Proben mittels Biogasertragstest geprüft, um mögliche Tendenzen hinsichtlich der tatsächlichen

Biogasausbeute zu erkennen.

Mit den ‚Nachwirkungsversuchen‘ wurden mögliche Auswirkungen der Nutzung auf die Folgekultur anhand von Feldversuchen an der Kultur Winterweizen untersucht. Hierfür wurden an jeweils zwei Standorten auf Ackerbohnen- und Erbsenschlägen die Ernteresiduen auf Teilflächen entfernt, während sie auf anderen Teilflächen verblieben. Ein Düngeversuch mit einer Stickstoffsteigerung in Form von Kleinparzellen wurde innerhalb dieser Teilflächen angelegt. Die Überprüfung der Auswirkung erfolgte zunächst anhand der Einflussgröße N_{\min} -Gehalt des Bodens. Zu diesem Zweck wurden zu Vegetationsende und Vegetationsbeginn Proben gezogen und durch die LUFA untersucht. Der Wert des *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) als Maß für die Bestandsentwicklung wurde mehrfach mittels *GreenSeeker®* während der Jugendentwicklung und der Abreife aufgezeichnet. Abschließend wurden an ausgewählten Ertrags- und Qualitätsparametern weitere Auswirkungen geprüft.

Diese Arbeit kann keine Betrachtung der sozioökonomischen Effekte, wie der Auswirkung der Substitution von Maissilage durch Bestäuberpflanzen für Insekten auf die Akzeptanz von Biogas innerhalb der Bevölkerung, oder der ökologischen Effekte, wie der langjährigen Wirkung der Strohabfuhr auf den Humusgehalt des Bodens, leisten. Außerdem kann weder eine Betrachtung der Ökonomie einer Nutzung von Ackerbohnen- und Erbsenstroh in Biogasanlagen mit verschiedenen Szenarien und Risikoabschätzungen erbracht werden, noch kann diese Arbeit einen Vergleich verschiedener Berechnungen zur Biogasausbeute liefern, da die Anzahl der im Biogasertragstest untersuchten Proben zu gering war, um eine Abschätzung der Tauglichkeit einer Formel zur Berechnung zu bieten.

Auf Grund der untersuchten Parameter kann jedoch eine erste umfassende Abschätzung des Körnerleguminosenstrohs als Alternative zur Maissilage erfolgen. Die ermittelten Daten stellen die Grundlage für weitere Untersuchungen dar, die die genannten Fragestellungen klären können.

2 Stand des Wissens

2.1 Charakterisierung von Körnerleguminosenstroh und dessen Anwendung

Körnerleguminosen zählen zu den Hülsenfrüchten und finden sowohl in der Human- als auch in der Tierernährung Anwendung. Die Verwendung der Samen umfasst die Fütterung von Wiederkäuern, Schweinen, Pferden und Geflügel bis hin zur Herstellung menschlicher Nahrung – eine Nutzung des Strohs hingegen ist wenig verbreitet. Voraussetzung für eine korrekte Nutzung von Korn und Stroh sind fundierte Erkenntnisse für die einzelnen Arten hinsichtlich der Zusammensetzung der Inhaltsstoffe und deren Nährwert sowie der sekundären Inhaltsstoffe, die positiven oder auch negativen Einfluss auf die Gesundheit bei Mensch und Tier haben können (JEROCH et al., 2016). Von wirtschaftlicher Bedeutung sind insbesondere bei den Bohnen die Arten Gartenbohne (*Phaseolus vulgaris*), Ackerbohne (*Vicia faba*), Sojabohne (*Glycine max*) und Mungobohne (*Vigna radiata*). Bei den Erbsen sind Saat- bzw. Felderbsen (*Pisum sativum* und *Pisum sativum* subsp. *arvense*), Saatplatterbsen (*Lathyrus sativus*) und Kichererbsen (*Cicer arietinum*) von Bedeutung (JEROCH et al., 2016). Die Anbaufläche von Hülsenfrüchten zur Körnergewinnung in Deutschland bestand im Jahr 2019 zu 38% (74.600 ha) aus Futtererbsen, gefolgt von 25% (49.200 ha) Ackerbohnen, 15% (28.900 ha) Sojabohnen, 11% (21.000 ha) Süßlupinen und 11% (22.000 ha) andere Hülsenfrüchte und Mischkulturen (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2019). In der vorliegenden Arbeit wurde daher mit den wirtschaftlich bedeutenden Arten *Vicia faba* und *Pisum sativum* gearbeitet. Da es sich bei Stroh um ein Futtermittel handelt, welches zu einem hohen Anteil aus Gerüstsubstanzen (Hemizellulose, Zellulose und Lignin) besteht (JEROCH, 2008), wird im Folgenden besonders auf die Rohfaser bzw. auf die pflanzlichen Gerüstsubstanzen eingegangen. Bei der Rohfaseranalyse allein wird ein großer Teil der Gerüstsubstanzen falsch zugeordnet (JEROCH, 2008).

Sowohl für die Futtererbse als auch für die Ackerbohne liegen Untersuchungen vor, in denen die Inhaltsstoffe des Strohs analysiert wurden. Diese Ergebnisse sind als Übersicht in Tabelle 1 und Tabelle 2 zusammengefasst.

Bei den vorliegenden Untersuchungen ging es zumeist um eine Nutzung als Futtermittel. BRUNO-SOARES et al. (2000) untersuchten Leguminosenstroh in einem Futtermittelversuch an Wiederkäuern, wobei sowohl Ackerbohlenstroh als auch

Erbsenstroh getestet wurde. In der Studie fiel auf, dass Letzteres höhere Rohproteinwerte und niedrigere Anteile an Gerüstsubstanzen gegenüber den anderen Leguminosenstrohartarten aufwies. Ebenso wurden beide Arten von ABREU & BRUNO-SOARES (1998) im Vergleich zu Raps- und Reisstroh untersucht, um als Futtermittel für Wiederkäuer eingesetzt zu werden, wobei die Verdaulichkeit des Strohs beider Arten als vergleichbar mit der von Getreidestroh angegeben wurde. Die Rohproteingehalte waren auch in dieser Studie bei Erbsenstroh höher als bei Ackerbohnenstroh und der Anteil an Gerüstsubstanzen geringer. Den gleichen Hintergrund hatte die Untersuchung von HADJIPANAYIOTOU et al. (1985), die verschiedene Arten von Körnerleguminosenstroh gegeneinander testeten, wobei keine Erbsen geprüft wurden. Die Ergebnisse zeigten einen höheren Nährwert des Körnerleguminosenstrohs im Vergleich zu Getreidestroh. Entgegen der häufigen Prüfung als Futtermittel für Wiederkäuer untersuchten ASAR et al. (2010) Ackerbohnenstroh als Faserkomponente in Futtermischungen mit *Corn-Cob Mix* oder Gerste als Energiekomponente für Kaninchen. Die Mischung aus den Komponenten Ackerbohnenstroh und *Corn-Cob Mix* war gleichwertig mit dem Standardfuttermittel. Ob und in welchem Ausmaß die Zusammensetzung des Strohs verschiedener Ackerbohnenarten einen Einfluss auf die Inhaltsstoffe hat, wurde von ALKHTIB et al. (2016) getestet: Geprüft wurden Stängel, Hülse und Blatt, die Zusammensetzung dieser Fraktionen unterschied sich hinsichtlich der Sorten. Ebenso divergierte die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe der einzelnen Strohfraktionen. Die gleichen Ackerbohnenarten wurden von WEGI et al. (2018) hinsichtlich des Einsatzes als Futtermittel für Wiederkäuer geprüft. Die Sorten unterschieden sich in Bezug auf den Strohertrag und die Verdaulichkeit.

Unabhängig von den Prüfungen als Futtermittel gibt es Untersuchungen im Hinblick auf andere Nutzungsformen. So wurde von GÓMEZ et al. (2017) der Einfluss verschiedener Produktionssysteme und Aussaattermine von Ackerbohnen auf deren Potential für die Biotreibstoffproduktion überprüft. Beim Vergleich von Freiland- und Gewächshausanbau wurden im Freiland höhere Zellulosegehalte erzielt, die einen höheren Verzuckerungsgrad zur Folge hatten. Mit späterer Aussaat stiegen zunächst die Biomasseerträge in beiden Produktionssystemen, bevor sie zum letzten Termin abfielen. Das Potential von Ackerbohnenstroh für die Bioethanol- und -gasproduktion im Vergleich zu Winterroggen- und Rapsstroh wurde von PETERSSON et al. (2007) untersucht. Das getestete Ackerbohnenstroh erzielte Methanausbeuten von 440 m³/t organische Trockenmasse (oTM). SAUERMAN (2012) untersuchte ebenfalls die

Möglichkeiten der Nutzung von Ackerbohnenstroh in Biogasanlagen und stellte Methanausbeuten in Höhe von 200 m³/t Trockenmasse (TM) fest.

Die Nutzung von Erbsenstroh als Futtermittel ist verbreiteter, weshalb für diese Art Nährwerte und Inhaltsstoffe in den DLG-Futterwerttabellen ausgewiesen sind und sich die im Folgenden genannten Untersuchungen auf eine Prüfung als Futtermittel, in den meisten Fällen für Wiederkäuer, beziehen. LÓPEZ et al. (2005) stellten beim Vergleich von Erbsen- und Getreidestroh fest, dass Ersteres mehr Rohprotein- und weniger Faseranteile enthält. BASTIDA GARCIA et al. (2011) untersuchten, inwieweit früh geerntetes Erbsenstroh Haferstroh in Futtrationen ersetzen kann. Es handelte sich um Erbsenstroh nach der zweiten Hülsenernte, das von den Autoren als Futtermittel von mittlerer Qualität beurteilt wurde. Die Futteraufnahme wurde dabei nicht beeinflusst. Die Qualität von früh geerntetem Erbsenstroh nach der dritten und letzten Hülsenernte testeten GONZÁLEZ GARCÍA et al. (2011), wobei ebenfalls keine negativen Effekte des Erbsenheus auf die Futteraufnahme festgestellt wurden. Wie bei Ackerbohnenstroh gibt es auch für Erbsenstroh Untersuchungen hinsichtlich einer möglichen Auswirkung verschiedener Sorten und der Zusammensetzung des Strohs (WAMATU et al., 2017). Die Autoren stellten eine große Variabilität hinsichtlich der Inhaltsstoffe zwischen den geprüften Sorten fest. Die Zusammensetzung des Strohs ergab, dass die Blätter einen höheren Nährwert im Vergleich zu den Stängeln aufwiesen. Eine große Zahl an verschiedenen Futtermitteln, inklusive Erbsenstroh, untersuchten LARDY & ANDERSON (2009). Die Autoren weisen darauf hin, dass die Inhaltsstoffe des Erbsenstrohs erheblich variieren und vor einer Nutzung daher eine Analyse erfolgen muss. Welche Unterschiede zwischen Erbsenstroh und anderen Koppelprodukten bestehen, wurde von WADHWA & BAKSHI (2005) dargestellt, wobei das Erbsenstroh im Vergleich zu den anderen getesteten Koppelprodukten, wie Zuckerrübenblättern, die geringste Verdaulichkeit der organischen Masse und der *Neutral Detergent Fibre* (NDF) aufwies. Im Gegensatz zu den bisher genannten Analysen des Erbsenstrohs, in denen es um eine Wiederkäuerfütterung ging, war der Hintergrund in den Untersuchungen von HASSAN et al. (2012) die Fütterung von Kaninchen, bei der das Erbsenstroh Kleeheu ersetzen sollte. Es wurden keine negativen Effekte festgestellt.

Den Einsatz von Erbsenstroh in Biogasanlagen untersuchten STINNER et al. (2009) in den Jahren 2002 bis 2005. Die Methanausbeuten des Erbsenstrohs lagen bei

188 l/kg oTM und damit im gleichen Bereich wie beim untersuchten Winter- und Sommerweizenstroh. In Untersuchungen von WALLA & SCHNEEBERGER (2006) wurde eine Methanausbeute des Erbsenstrohs von 300 m³/ha festgestellt.

Für eine Nutzung ist der Strohertrag ein weiterer wichtiger Parameter. AUFHAMMER et al. (1994) stellten in ihren Untersuchungen abhängig von Standort, Reihenweiten und Sorten Ackerbohnenstroherträge in einem Bereich von 2,5–4,5 t TM/ha fest. Ebenso ermittelten WEGI et al. (2018) einen Effekt der Sorten auf den Strohertrag von Ackerbohnen. Die fünf getesteten Sorten erzielten Erträge von 3,3 t/ha bis 5,1 t/ha. In der Studie von MANNHEIM et al. (1997) wurde der Ertrag des Ackerbohnenstrohs mit 3,7 t TM/ha ermittelt. Auch SAUERMAN (2012) untersuchte Ackerbohnen, die Stroherträge lagen im Durchschnitt bei 3 t TM/ha, wobei zwischen den Jahren eine Spanne von 2,5 t TM/ha bis 3,5 t TM/ha Strohertrag festgestellt wurde. Auch zu Erbsen liegen Literaturwerte zum Strohertrag vor. Verhältnismäßig geringe Stroherträge der Erbse von 2 t TM/ha stellten WALLA & SCHNEEBERGER (2006) fest. Einen Gegensatz dazu bilden die Untersuchungen von GRUBER & THAMM (2007), deren Ergebnisse im Mittel bei 3,2 t TM/ha lagen, bei einer Schwankung von 2,0–4,1 t TM/ha zwischen den Jahren. STEVENSON & VAN KESSEL (1997) fanden in Abhängigkeit vom Standort einen mittleren Ertrag von ebenfalls rund 3,2 t/ha, bei einer Schwankung von 2,7–3,7 t TM/ha. SCHAUSS et al. (2006) ermittelten Erbsenstroherträge von 2,1–3,9 t TM/ha.

Tabelle 1: Inhaltsstoffe verschiedener Ackerbohnenresiduen (% in Trockenmasse).

Material	TM	XP	CF	H.	Z.	Lignin	NDF	ADF	ADL	Quelle
Ackerbohnenstroh	*	6,8	*	*	*	*	69,1	52,3	12,8	BRUNO-SOARES et al., 2000
Ackerbohnenstroh	*	6,6	46,7	*	*	*	72,3	55,4	11,6	ABREU & BRUNO-SOARES, 1998
Ackerbohnenstroh	90,0	9,8	27,2	*	*	6,0	44,0	36,0	*	HADJIPANAYIOTOU et al., 1985
Ackerbohnenstroh	90,7	8,0	32,0	*	*	*	*	*	*	ASAR et al., 2010
Ackerbohnenstroh	89,9	5,1	*	*	*	*	79,2	67,0	13,4	Verändert nach: WEGI et al., 2018
Ackerbohnenblatt	89,2	13,0	*	*	*	*	33,8 ⁺	30,3 ⁺	7,3	Verändert nach: ALKHTIB et al., 2016
Ackerbohnenhülsen	89,0	8,0	*	*	*	*	43,2 ⁺	38,3 ⁺	7,8	
Ackerbohnenstängel	90,4	3,9	*	*	*	*	73,4 ⁺	68,0 ⁺	13,7	
Ackerbohnenstroh	*	*	*	13,9	46,0	15,3	*	*	*	GÓMEZ et al., 2017
Ackerbohnenstroh	92,1	*	*	14,0	28,0	*	*	*	*	PETERSSON et al., 2007

TM=Trockenmasse, XP=Rohprotein, CF=Crude Fibre, H.=Hemizellulose, Z.=Zellulose, NDF=Neutral Detergent Fibre, ADF=Acid Detergent Fibre, ADL=Acid Detergent Lignin, *=nicht angegeben, +=nicht auf Trockenmasse bezogen.

Tabelle 2: Inhaltsstoffe verschiedener Erbsenresiduen (% in Trockenmasse).

Material	TM	XP	CF	H.	Z.	Lignin	NDF	ADF	ADL	Quelle
Erbsenstroh	*	9,6	*	*	*	*	58,0	40,3	8,2	BRUNO-SOARES et al., 2000
Erbsenstroh	*	9,7	34,2	*	*	*	58,0	40,0	8,3	ABREU & BRUNO-SOARES, 1998
Erbsenstroh	86,0	8,1 ⁺	35,2 ⁺	*	*	*	*	*	*	Verändert nach: DLG, 2005
Erbsenstroh	89,7	6,5	*	*	*	6,0	54,8	38,4	*	Verändert nach: LÓPEZ et al., 2005
Erbsenstroh	89,0	16,0	*	*	*	*	51,8	39,3	19,1	Verändert nach: BASTIDA GARCIA et al., 2011
Erbsenstroh	91,0	8,0	*	*	*	*	63,6	*	*	Verändert nach: GONZÁLEZ GARCÍA et al., 2011
Erbsenblatt	88,2	13,4	*	*	*	*	43,9	40,1	8,6	Verändert nach: WAMATU et al., 2017
Erbsenstängel	90,7	4,5	*	*	*	*	75,2	65,1	12,0	
Erbsenstroh	89,0	8,5	*	*	*	*	*	38,0	*	LARDY & ANDERSON, 2009
Erbsenstroh	*	8,5	*	10,0	36,8	*	60,0	49,9	*	WADHWA & BAKSHI, 2005
Erbsenstroh	90,0	13,8	23,8	*	*	*	42,7	34,5	7,7	HASSAN et al., 2012

TM=Trockenmasse, XP=Rohprotein, CF=*Crude Fibre*, H.=Hemizellulose, Z.=Zellulose, NDF=*Neutral Detergent Fibre*, ADF=*Acid Detergent Fibre*, ADL=*Acid Detergent Lignin*, *=nicht angegeben, +=nicht auf Trockenmasse bezogen.

2.2 Lignozellulosereiche Substrate in Biogasanlagen

Um strohartige und damit lignozellulosereiche Substrate erfolgreich in Biogasanlagen einzusetzen, ist es notwendig, Daten zu deren Biogaspotential zu erheben. Die mengenmäßig bedeutendste Fraktion von biogenen Reststoffen aus der Landwirtschaft ist das Getreidestroh (BROSOWSKI et al., 2015). LASER et al. (2018) stellten ein hohes Biogaspotential von Getreidestroharten nach deren Aufschluss durch eine Silierung fest. Nach Reis- und Weizenstroh ist Maisstroh mengenmäßig das drittbedeutendste Koppelprodukt; GANAL (2018) ermittelte eine Methanausbeute, die 90% der Ausbeute von Silomais erreichte. Um die Einsatzmöglichkeiten lignozellulosereicher Substrate in Biogasanlagen zu verstehen, müssen der Aufbau und die Möglichkeiten des Aufschlusses dieses Komplexes betrachtet werden.

2.2.1 Aufbau des Lignozellulosekomplexes

Ein Hauptbestandteil der pflanzlichen Zellwand, die sich aus verschiedenen Schichten zusammensetzt, ist die Zellulose, die aus D-Glucose-Molekülen besteht, die in β -glykosidischer 1,4-Bindung vorliegen und langgestreckte, unverzweigte Fadenstrukturen bilden (NULTSCH, 1977). Bei der Bildung neuer Zellen entsteht zunächst die Primärwand, die zu Beginn nur einen geringen Zelluloseanteil enthält, der dann auf bis zu 30% anwächst (BORGMANN, 2006). Maßgeblich mehr Zellulose enthält die gegen Ende der Zellvergrößerung aufgelagerte Sekundärwand, deren Zellulosegehalt bis zu 94% betragen kann (BORGMANN, 2006). Die Zellulosemoleküle legen sich zur Stabilisierung der Zellwand zum Teil zu Mikrofibrillen zusammen, in denen sie in kristalliner Struktur vorliegen, jedoch werden überwiegend amorphe Bereiche gebildet (KÄMPFER, 2002).

Ein weiterer Bestandteil der pflanzlichen Zelle ist die Hemizellulose. Sie dient als Verbindung zwischen Zellulose und Lignin, was den Zellwänden zusätzliche Stabilität verleiht (LEIBLE et al., 2015). Der Aufbau der verschiedenen Arten von Hemizellulose, von denen in Stroh hauptsächlich Xylose vorkommt, ist stark verzweigt und amorph, weshalb sie hydrophil und damit leicht abbaubar ist (LEIBLE et al., 2015).

Das Lignin ist der Pflanzenbestandteil, der am langsamsten und nur von spezialisierten Mikroorganismen im Cometabolismus abgebaut wird, ohne den mikrobiellen Stoffwechsel zu durchlaufen (HAIDER & GRÖBLINGHOFF, 1990; SCHLEGEL, 1992). Dies

liegt daran, dass Lignin im Gegensatz zur Hemizellulose ein stark vernetztes Polymer bildet, welches hydrophob und damit schwer abbaubar ist (LEIBLE et al., 2015). Während des Wachstums von Pflanzen wird es zunehmend in die Zellwände eingelagert, was zur sogenannten Verholzung der Pflanze führt (MAURER & WINKLER, 1982). Der Ligninanteil der Pflanze nimmt also mit zunehmender Abreife zu (HENDRICKSON et al., 1997), wobei der Anteil in älterem Pflanzenmaterial höher als in jungem Pflanzenmaterial ist (CHEN et al., 2002). Ebenso nehmen im Verlauf der morphologischen Entwicklung die Anteile an Hemizellulose und Zellulose zu (OMBABI et al., 2001). Zwischen Lignin, Zellulose und Hemizellulose entstehen Verknüpfungen, die zur Bildung eines Lignozellulosekomplexes führen, genannt Lignozellulose (KÄMPFER, 2002). Die Darstellung eines solchen Komplexes ist in Abbildung 1 zu sehen:

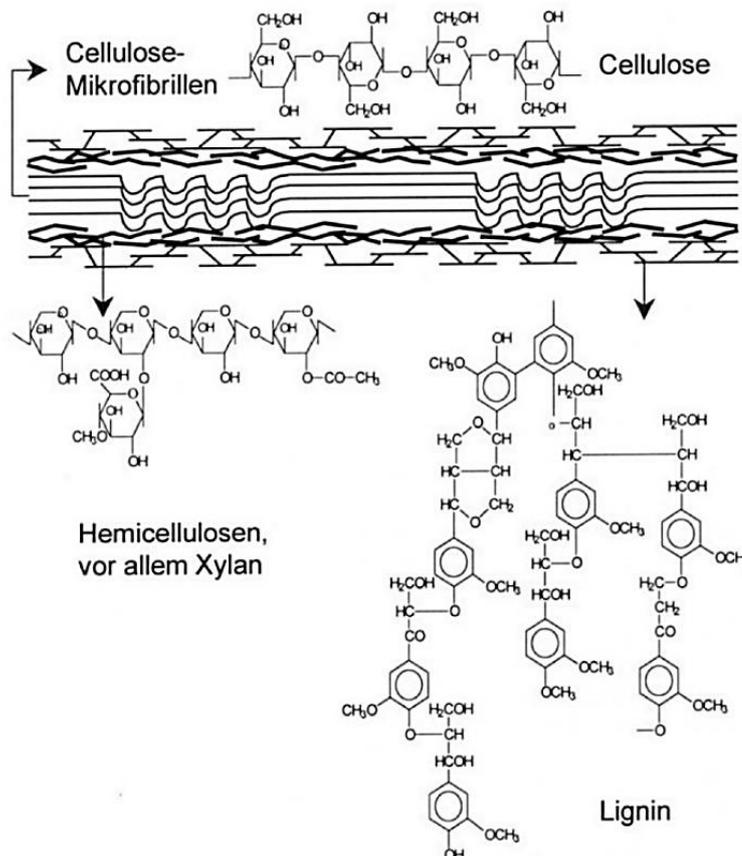


Abbildung 1: Lignozellulosekomplex nach KÄMPFER, 2002.

Mit steigendem Ligningehalt werden die biochemischen Abbauprozesse zunehmend erschwert, da das Lignin in diesen Komplex stark eingebunden ist (BEKKER, 2007) und damit den Zugang der Mikroorganismen zu abbaubaren Bestandteilen verhindert (STANGL, 2011). Eine Vergärung von Substraten mit hohem Lignozelluloseanteil

verläuft daher meist nur langsam und unvollständig (SCHIEDER et al., 2009). Auch MUKENGELE et al. (2006) stellten fest, dass sich mit zunehmendem Faseranteil der Abbauprozess verlangsamt.

LI et al. (2018) untersuchten die Biogaspotentiale der einzelnen Fraktionen sowie deren Kombination. Es wurde festgestellt, dass das Methanpotential von Zellulose über dem von Hemizellulose liegt, diese jedoch schneller hydrolysiert wird. Die Vergärung von Lignin war nicht möglich, Mischungen von Lignin und Hemizellulose sowie Lignin und Zellulose wirkten sich negativ auf die Biogaspotentiale aus. Die Autoren empfehlen einen Voraufschluss oder die Entfernung des Lignins vor der Vergärung.

2.2.2 Möglichkeiten der Aufbereitung lignozellulosereicher Substrate

Da die Vorgänge in einer Biogasanlage im weitesten Sinne mit dem Pansen eines Wiederkäuers verglichen werden können (MAURER & WINKLER, 1982) und dort durch die inkrustierenden Substanzen die Verdaulichkeit von Zellwandkohlenhydraten begrenzt ist (JEROCH, 2008), muss auch bei einer Biogasanlage von einer begrenzten Abbaubarkeit des Lignozellulosekomplexes ausgegangen werden. Sowohl KIESEL & LEWANDOWSKI (2017) als auch DICKEDUISBERG (2017) stellten einen negativen Effekt durch den mit fortgeschrittener Abreife zunehmenden Ligninanteil auf die Methanausbeute von Riesenweizengras fest. Eine Aufbereitung des Materials erscheint sinnvoll. Da die Vergärung im Fermenter kaum beschleunigt werden kann, muss ein Zellulose- oder Ligninaufschluss in einem vorgeschalteten Schritt erfolgen (SCHOLWIN et al., 2009). Zahlreiche verschiedene Verfahren wurden hinsichtlich einer Möglichkeit, die biochemischen Abbauprozesse zu unterstützen oder einen Voraufschluss zu erzielen, untersucht. Hierbei wird zwischen physikalischen, chemischen und biologischen Verfahren unterschieden.

Die physikalischen Verfahren können in mechanische oder thermische Aufschlüsse unterteilt werden. Bei beiden geht es um die Vergrößerung der spezifischen Oberfläche des Substrats. Mechanische Verfahren betreffen beispielsweise die Bearbeitung mit Mühlen, Querstromzerspanern oder einem Extrusor. HAEFFNER et al. (2010) stellten fest, dass durch die Feinstzerkleinerung des Substrats in Mühlen eine kürzere Verweilzeit, ein höherer Abbaugrad sowie höhere Methanausbeuten erreicht werden konnten. Ebenfalls positive Resultate erzielten FRIEDRICH et al. (2010) mit der

Extrusion von Stroh für die Nassfermentation; der Energieaufwand für die Extrusion lag unterhalb des Energiegehalts der Methanausbeute. Bei der untersuchten Querstromzerspannung von LEIBLE et al. (2015) wurden hingegen keine wesentlichen Steigerungen der Biogasausbeute festgestellt. Ein thermisches Verfahren zur Aufbereitung stellt die *Steam Explosion* dar, bei der das Material unter Druck mit Wasserdampf behandelt wird, bevor es zu einer schlagartigen Entspannung und damit Zerkleinerung des Materials kommt. Die Folge davon ist die Möglichkeit zur Zersetzung des Lignozellulosekomplexes durch Mikroorganismen (LINDORFER et al., 2010).

Ein chemischer Aufschluss erfolgt durch Säuren, Laugen oder Oxidationsmittel. Obwohl dieser Aufschluss eine sehr hohe Wirksamkeit zeigt, ist wegen der erheblichen Anforderungen an Technik und Arbeitssicherheit sowie möglicher Korrosions- und Entsorgungsprobleme ein Einsatz in landwirtschaftlichen Biogasanlagen kritisch zu sehen (SCHWARZ et al., 2009).

Biologische Aufschlüsse werden durch Enzyme oder Mikroorganismen bewirkt. Die Zugabe von Ersteren zum Gärversuch bei Roggensilage bewirkte in der Untersuchung von BRULÉ et al. (2008) sowie bei Maissilage und Grüngut (SCHIEDER et al., 2009) keine höheren Biogasausbeuten. Ein Aufschluss hingegen über Enzyme, die von Pilzen freigesetzt wurden, kann zu positiven Effekten führen (VALASKOVA et al., 2007; PONNUSAMY et al., 2019). Eine weitere Möglichkeit zum Voraufschluss bietet die Silierung, bei der über Milchsäurebakterien leicht verdauliche Kohlenhydrate wie die Hemizellulose abgebaut werden und sodann als gelöste Nährstoffe vorliegen (STEINHÖFEL & JEROCH, 2008). Die übrigen Nährstoffe werden nur bei intensiveren Verderbprozessen oder Saftaustritt negativ beeinflusst (STEINHÖFEL, 2008). Positive Ergebnisse mit dem Voraufschluss durch Silierung erzielten LASER et al. (2018) bei Getreidestroh. Dieses Verfahren hat gegenüber anderen Möglichkeiten zum Voraufschluss unter anderem die Vorteile, dass hohe Investitions- und Betriebsmittelkosten vermieden werden können und das Wissen dafür bereits in landwirtschaftlichen Betrieben vorhanden ist (LASER et al., 2020). Eine hohe Trockenmasse, wie sie bei Stroh gegeben ist, erschwert jedoch die Silierung (SCHWARZ, 2011). Bei Untersuchungen von SAUERMAN (2012) schwankten die Trockenmassegehalte des Ackerbohnenstrohs von unproblematischen 34–37% TM bis zu nicht mehr silierbaren 62–73% TM. Grundsätzlich wäre eine Anpassung des Feuchtegehalts über eine Kosilierung mit anderen Substraten, wie Zuckerrüben, oder

ein Anfeuchten des Materials möglich (LASER et al., 2018).

2.2.3 Grenzen des Einsatzes lignozellulosereicher Substrate

Wegen der geringen Dichte von Stroh, bedingt durch hohe Trockenmassegehalte, ist nicht nur die Silierfähigkeit stark eingeschränkt, sondern es ergeben sich auch weitere Probleme im Prozessablauf, wie die fehlende Pumpfähigkeit des Substrats und die vermehrte Neigung des Substrats zur Bildung von Schwimmschichten im Fermenter (SCHWARZ et al., 2017).

Zusätzlich zu den Aufbereitungsmöglichkeiten von Stroh, um die Zugänglichkeit zu abbaubaren Substratanteilen zu verbessern, muss daher bei der Vergärung von Stroh als lignozellulosereiches Substrat die Bildung von Schwimmschichten verhindert werden. Für eine Monovergärung müssen Flüssigkeiten zugeführt werden (REINHOLD & FRIEDRICH, 2012). Hier eignen sich Prozesswässer aus der Gärrestbehandlung oder eine Kovergärung mit Wirtschaftsdüngern (SCHWARZ et al., 2017).

Andere Möglichkeiten sind die Kosilierung von Stroh mit anderen Substraten wie Zuckerrüben (LASER et al., 2018), die Vermeidung von Schwimmschichten durch spezielle Rührsysteme, die Wassersättigung des Strohs durch Behandlung mit Wasserdampf oder in temperierten Anmaischbehältern sowie die Pelletierung des Strohs (SCHWARZ et al., 2017).

Beim Einsatz von Körnerleguminosen muss außerdem berücksichtigt werden, dass mit einem höheren Proteingehalt zu rechnen ist. Bei der Vergärung von proteinreichen Substraten entsteht während der Methanbildung Ammoniak, welches ab einer bestimmten Konzentration toxisch auf die Bakterien wirkt (MIEDANER, 2014).

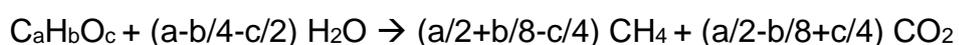
2.3 Berechnung von theoretischen Biogaspotentialen

Für die Ermittlung von Biogaspotentialen gibt es verschiedene Verfahren: Zum einen besteht die Möglichkeit, anhand der verschiedenen Inhaltsstoffe im Substrat die theoretische Gasausbeute zu berechnen, zum anderen kann mittels Gasertragstests die Gasausbeute eines Substrats direkt erfasst werden. Obwohl Gasertragstests nach der VDI-Richtlinie 4630 durchgeführt werden, gibt es erhebliche Differenzen zwischen den gemessenen Gaserträgen (WULF & DÖHLER, 2009; HEUWINKEL et al., 2009; TILLMANN & BAETZEL, 2010; AMON et al., 2015; WEINRICH et al., 2020). RATH et al. (2016) stellten in ihren Untersuchungen fest, dass ein siebentägiges Ausgären des Inokulums den Laborfehler deutlich verringerte. KAISER (2007) beschrieb einen weiteren Kritikpunkt: Für eine korrekte Schätzung von Biogasausbeuten sei die Betrachtung des C/N-Verhältnisses sowie des pH-Werts notwendig, da diese Parameter die Bakterienkultur des Inokulums direkt beeinflussen und damit hemmend oder verstärkend auf die Biogasproduktion wirken können. MITTWEG et al. (2012) untersuchten Applikationstypen aus Holz und Metall für die Einwaage des Substrats und stellten fest, dass bereits diese Auswahl des Applikatorstyps, wegen der elektrostatischen Ladung des Metalls, einen Einfluss auf die Biogasausbeute der Proben hat. Es besteht hinsichtlich der Durchführung und der Standardisierung von Biogasertragstests daher weiterer Handlungsbedarf, weshalb sich eine Berechnung des Biogaspotentials empfiehlt und an dieser Stelle auf die verschiedenen Möglichkeiten zur Berechnung von theoretischen Biogasausbeuten eingegangen wird.

Berechnung nach Buswell & Mueller

BUSWELL & MUELLER (1952) entwickelten bereits früh eine Formel, die es ermöglichen sollte, die Methan- und Biogasproduktion von Bakterien mit einer Genauigkeit von bis zu 95% abschätzen zu können. Es handelt sich hierbei um eine stöchiometrische Berechnung, bei der die Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff berücksichtigt werden. Für eine Berechnung nach BUSWELL & MUELLER (1952) muss die Anzahl der Atome, die Summenformel der genannten Elemente bekannt sein.

Für N-freie Verbindungen ergibt sich die Formel:

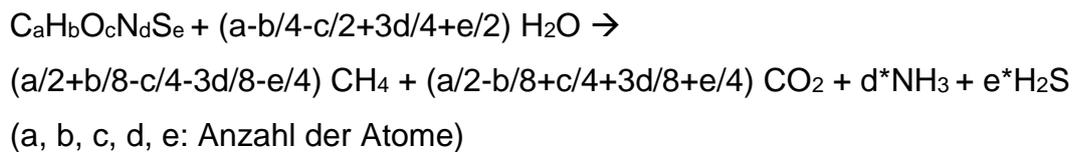


(a, b, c: Anzahl der Atome)

Berechnung nach Boyle

BOYLE (1976) erweiterte die von BUSWELL & MUELLER (1952) entwickelte Formel um die Elemente Stickstoff und Schwefel, um eine Abschätzung der Methan- und Biogasproduktion für N-haltige Verbindungen zu ermöglichen. Es handelt sich ebenfalls um eine stöchiometrische Berechnung, bei der die Atomanzahl der Elemente bekannt sein muss.

Für N-haltige Verbindungen gilt die Formel:



Sowohl für die Gleichung von BUSWELL & MUELLER (1952) als auch für die Gleichung von BOYLE (1976) muss berücksichtigt werden, dass zunächst von einer kompletten Umsetzung ausgegangen wird. Um die Gleichungen praxisnah zu nutzen und korrekte Ergebnisse zu erhalten, muss die Anwendung auf den fermentierbaren, also tatsächlich biologisch abbaubaren Anteil begrenzt und außerdem um den Anteil reduziert werden, der von den Bakterien zur Selbsterhaltung genutzt wird und deshalb nicht zur Gasproduktion zu Verfügung steht (WEIßBACH, 2008, 2009a).

Berechnung nach Baserga

Anders als bei den bisher vorgestellten Möglichkeiten, die sich auf stöchiometrische Berechnungen stützen, bezog sich BASERGA (1998) bei seinen Untersuchungen auf die einzelnen Stoffgruppen zur Ermittlung des Biogaspotentials.

Die von BASERGA (1998) ermittelten Werte sind in Tabelle 3 dargestellt:

Tabelle 3: Theoretische Gasausbeuten nach BASERGA, 1998.

Stoffgruppe	Biogasertrag (l*(kg) ⁻¹)	CH ₄ (Vol.-%)
Rohprotein	700	71
Rohfett	1.250	68
Kohlenhydrate	790	50

An der Vorgehensweise von BASERGA (1998) wird kritisiert, dass er zur Ermittlung seiner Daten jeweils nur eine Modellsubstanz genommen hat, mit Hilfe derer auf stöchiometrischem Wege die Biogasausbeute kalkuliert und dabei nicht berücksichtigt wird, dass andere zur Stoffgruppe gehörende Substanzen andere Verdaulichkeiten aufweisen und nicht mit der genutzten Modellsubstanz gleichgesetzt werden können, was die Allgemeingültigkeit dieser Werte zweifelhaft erscheinen lässt (KAISER, 2007;

WEILAND, 2001).

Eine Betrachtung des Biogaspotentials anhand von Stoffgruppen, wie sie bei der Weender Futtermittelanalyse erfasst werden, erscheint jedoch sinnvoll, da die Prozesse in einer Biogasanlage im weitesten Sinne mit denen eines Pansens verglichen werden können (MAURER & WINKLER, 1982).

Berechnung nach Weißbach

Sowohl bei den stöchiometrischen Berechnungen als auch bei der Berechnung nach BASERGA (1998) wird kritisiert, dass nicht berücksichtigt wird, dass nur die fermentierbaren Anteile des Substrats zu Biogas umgewandelt werden können (WEIßBACH, 2008) und ein Teil des Substrats von den Bakterien zur Selbsterhaltung genutzt wird (WEIßBACH, 2009a). Ein weiterer Kritikpunkt wurde von MUKENGELE & OECHSNER (2007) aufgeworfen. Diese kritisieren, dass die durch die Silierung entstandenen, flüchtigen Fettsäuren während der Trocknung verloren gehen und so die Bezugsgröße ‚organische Trockenmasse einer Silage‘ nicht identisch ist mit der Bezugsgröße ‚organische Trockenmasse von frischem Material‘. Diesen Kritikpunkten trug WEIßBACH Rechnung, indem er Korrekturformeln für den Trockensubstanzgehalt entwickelte (WEIßBACH & STRUBELT, 2008a, 2008b, 2008c) und eine Schätzformel für das Gasbildungspotential des fermentierbaren organischen Trockensubstanzgehalts erstellte, die er aus Ergebnissen von Verdauungsversuchen an Schafen ableitete (WEIßBACH, 2008) und in einer eigenen Studie validierte (WEIßBACH, 2009b). Es wurden für verschiedene Substrate einzelne Formeln entwickelt. Bei der allgemeinen Schätzformel nach WEIßBACH (2009a) werden im Vorfeld diese, für das jeweilige Substrat gültigen, Formeln berücksichtigt und sind unabhängig vom Gehalt an den drei Nährstofffraktionen Kohlenhydrate, Fette und Proteine. Die allgemeine Schätzformel bezieht sich auf übliche Halm- und Körnerfrüchte sowie deren Silagen.

Die allgemeinen Schätzformeln nach WEIßBACH (2009a) für Biogas und Methan lauten:

Biogas (Normliter $kg^{-1}TS_k$)=0,800 FoTS (g $kg^{-1}TS_k$)

und

Methan (Normliter $kg^{-1}TS_k$)=0,420 FoTS (g $kg^{-1}TS_k$)

(TS_k =korrigierte Trockensubstanz, FoTS=fermentierbare organische Trockensubstanz)

Berechnung nach Kaiser

Eine Korrektur um die flüchtigen Inhaltsstoffe wird bei KAISER (2007) nicht durchgeführt, weshalb es auch bei der dort erstellten Formel zu einer Unterschätzung von Silagen kommt. Jedoch werden die Stoffgruppen genauer betrachtet und gewertet. Durch die Vergärung von 206 Substraten, bestehend aus verschiedenen Arten von Nachwachsenden Rohstoffen, inklusive einer Untersuchung mittels Weender Futtermittelanalyse und zusätzlich der Erweiterung nach van Soest, wurden neue Schätzformeln erstellt, bei denen erstmals die Gehalte an Gerüstsubstanzen berücksichtigt werden können.

Für die Biogasausbeute ergibt sich folgende Formel in Bezug auf g Inhaltsstoffe pro kg Frischmasse (FM):

$$y(\text{I/kg}) = 0,307 \cdot XP(\text{g/kg}) + 0,781 \cdot XL(\text{g/kg}) + 0,627 \cdot OR(\text{g/kg}) \\ + 0,938 \cdot H(\text{g/kg}) + 0,691 \cdot Z(\text{g/kg}) - 0,358 \cdot ADL(\text{g/kg})$$

(y=Biogasausbeute, XP=Rohprotein, XL=Rohfett, OR=organischer Rest, H=Hemizellulose, Z=Zellulose, ADL=Acid Detergent Lignin)

Für die Berechnung der theoretischen Methanausbeute ergibt sich folgende Formel, ebenfalls in Bezug auf g Inhaltsstoffe pro kg FM:

$$y(\text{I/kg}) = 0,147 \cdot XP(\text{g/kg}) + 0,560 \cdot XL(\text{g/kg}) + 0,289 \cdot OR(\text{g/kg}) \\ + 0,459 \cdot H(\text{g/kg}) + 0,382 \cdot Z(\text{g/kg}) - 0,271 \cdot ADL(\text{g/kg})$$

(y=Methanausbeute, XP=Rohprotein, XL=Rohfett, OR=organischer Rest, H=Hemizellulose, Z=Zellulose, ADL=Acid Detergent Lignin)

KAISER (2007) selbst kritisiert, dass für eine korrekte Schätzung von Biogasausbeuten die Betrachtung des C/N-Verhältnisses sowie des pH-Werts notwendig sei, da diese Parameter die Bakterienkultur des Inokulums direkt beeinflussen und damit hemmend oder verstärkend auf die Biogasproduktion wirken können.

Berechnung nach Rath et al.

Durch RATH et al. (2016) wurde eine weitere Methode zur Berechnung von Biogasausbeuten veröffentlicht. Für den dort publizierten Ansatz wurde mittels verschiedener Maissubstrate unterschiedlicher Herkunft und Genetik sowie divergierendem Erntezeitpunkt eine Schätzformel entwickelt und diese anhand weiterer Datensätze von Maissubstraten validiert. Durch diese Vorgehensweise wurde festgestellt, dass für eine korrekte Abschätzung der Biogasausbeute die Parameter

Lignin, Rohfett, Hemizellulose und reduzierende Zucker berücksichtigt werden müssen, woraus sich folgende Formel zur Abschätzung ergibt:

$$\mathbf{BGA (In/kg oTM)=106,41 - 64,24 ADL + 33,89 H + 97,15 XL - 28,45 XZ}$$

(BGA=Biogasausbeute, ADL=Acid Detergent Lignin, H=Hemizellulose, XL=Rohfett, XZ=reduzierende Zucker; alle Inhaltsstoffe in Prozent der TM)

2.4 Wirkungen von Körnerleguminosen und Strohnutzungen in der Fruchtfolge

Körnerleguminosen können verschiedene positive Effekte innerhalb von Anbausystemen haben (PEOPLES et al., 2009; JENSEN et al., 2010a). So hat die Integration von Körnerleguminosen in die Fruchtfolge im Gegensatz zu anderen Fruchtfolgesystemen positive ökonomische Effekte (SCHÄFER & LÜTKE ENTRUP, 2009) und bewirkt eine Entzerrung von Arbeitsspitzen sowie eine Verbesserung der Bodenstruktur je nach Wurzelmasse (ALPMANN & SCHÄFER, 2014). Insbesondere der Anbau von Ackerbohnen hat eine gute Bodenstruktur in der Krume zur Folge (KAHNT, 2008). Ebenso zu berücksichtigen sind phytosanitäre Aspekte. Bei vielfältigen Fruchtfolgen kommt es zur Unterbrechung von Infektionszyklen, was den Krankheitsdruck der einzelnen Fruchtarten reduziert und die Einsparung von Pflanzenschutzmitteln ermöglicht. Bei einem Einsatz von Sommerungen ist zusätzlich die mechanische Bekämpfung von Gräsern nach einer Getreidevorfrucht möglich. Die Fixierung von Luftstickstoff ermöglicht es, auf mineralische und organische Düngung beim Anbau von Körnerleguminosen zu verzichten und in der Folgekultur durch den positiven Vorfruchtwert der Kultur Mehrerträge zu generieren (ARSHAD et al., 2002; PAFFRATH, 2005; PREISSEL et al., 2015). GRUBER & THAMM (2007) stellten außerdem die besten Qualitäten im Weizen nach Vorfrucht Erbse fest. Die Fixierung von Luftstickstoff ermöglicht es, einheimische Eiweißfuttermittel zu produzieren, die nicht gentechnisch verändert sind (RÜHL et al., 2009) und damit die Importabhängigkeit zu mindern (ALPMANN & SCHÄFER, 2014). KÖPKE & NEMECEK (2010) sowie RECKLING et al. (2016) stellten positive Umwelteffekte von Körnerleguminosen fest. Jedoch können die hohen N-Restmengen, die nach dem Anbau von Körnerleguminosen durch Wurzelrückstände und Stroh auf der Fläche verbleiben, auch negative Effekte haben (JENSEN & HAUGGAARD-NIELSEN, 2003). Während Ammoniakemissionen aus Ernterückständen von Ackerbohnen in einer Studie von MANNHEIM et al. (1997) eine

unbedeutende Rolle spielten, sind Nitratauswaschungen sehr wohl von Bedeutung (FIEGENBAUM et al., 1994). Eine Möglichkeit zur Minderung von Auswaschungen sind Untersaaten. AUFHAMMER et al. (1995) untersuchten die Möglichkeit, Winterraps oder Wintergerste als Untersaat zu etablieren. Die Autoren berichten von einer problematischen Bestandsentwicklung. In den Fällen, in denen diese erfolgreich war, konnte der Nitratgehalt des Bodens gesenkt werden, es kam jedoch zu Ertragseinbußen bei Winterraps und Wintergerste. Solche stellten ebenfalls GRÖBLINGHOFF et al. (2001) in ihrer Studie fest, in der Grasuntersaaten in Ackerbohnenbeständen etabliert wurden. Auch hier konnte die Nitratauswaschung vermindert werden, jedoch wurde durch die Bindung des Stickstoffs im Gras nur ein Teil zur direkten Folgefrucht freigesetzt. Erst zu späteren Kulturen erfolgte die weitere Freisetzung, die dort noch ertragswirksam wurde.

Da in der vorliegenden Studie die Nutzung von Stroh angestrebt wird, sind insbesondere die Effekte auf den Vorruchtwert sowie die Frage, inwieweit eine Abfuhr des Strohs den Mineralisationsprozess beeinflusst, von Bedeutung. In der Studie von FIEGENBAUM et al. (1994) gab es erhebliche Unterschiede bei der Abfuhr des Strohs. Hinsichtlich des N- und des Ertragsoptimums der Folgefrucht wurde bei Untersuchungen von ROTHARDT et al. (2018) keine signifikante Beeinflussung durch die Abfuhr des Ackerbohnenstrohs festgestellt. In Untersuchungen zum Ertrag von Weizen bei Abfuhr des Erbsenstrohs stellten URBATZKA et al. (2016) fest, dass mit Stroh ein Mehrertrag des Weizens vorlag, es kam jedoch nicht zu einer Beeinflussung der Qualität durch die Strohabfuhr.

Körnerleguminosen hinterlassen der Folgefrucht Stickstoff. Dies geschieht über das Stroh, die Wurzelmasse sowie die Blattmasse, die bereits vor dem Drusch abfällt und bei Ackerbohnen bis zu 50% der vegetativen Pflanzenmasse betragen kann (AUFHAMMER et al., 1994). Diese Fraktionen unterscheiden sich in ihrem N-Gehalt (ALKHTIB et al., 2016; WAMATU et al., 2017) und damit hinsichtlich ihres C/N-Verhältnisses, was sich auf die Mineralisierbarkeit auswirkt (AUFHAMMER et al., 1994). GRUBER & THAMM (2007) stellten bei ihren Untersuchungen einen N-Gehalt des Erbsenstrohs von 0,8–1,4% fest. Der Abbau der organischen Substanz und damit der mineralisierten N-Menge ist umso höher, je enger das C/N-Verhältnis ist (OEHMICHEN & WEYER, 2006). Dasjenige von Körnerleguminosenstroh ist zwar enger als das von Getreidestroh (STEVENSON & VAN KESSEL, 1997; SCHAUSS et al., 2006), lag jedoch in

diesen Studien trotzdem über dem Optimum von 15–20 : 1, wodurch der Stickstoff zunächst immobilisiert und erst während des weiteren Vegetationsverlaufs freigesetzt wurde (OEHMICHEN & WEYER, 2006). KOEPF (1956) stellte jedoch C/N-Verhältnisse von 17,8 : 1 für Ackerbohnenstroh und von 13,3 : 1 für Erbsenstroh bei N-Gehalten von 2,22% bzw. 3,15% fest. Bei STEVENSON & VAN KESSEL (1997) lagen die N-Gehalte des Erbsenstrohs zwischen 1,8% und 2,2%. SCHAUSS et al. (2006) stellten C/N-Verhältnisse des Erbsenstrohs von 38–58 : 1 fest. Verantwortlich für die erhebliche Varianz innerhalb der Ergebnisse der Studien sind sowohl Standort- als auch Jahreseffekte.

Der Verbleib des Strohs auf der Fläche dient der Humusbildung bzw. dessen Erhalt. In Tabelle 4 sind die Humusbilanzen verschiedener Feldfrüchte aufgeführt. Die der Ackerbohne ist für Blatt und Stroh positiv ausgewiesen, was sich durch eine Nutzung ändert. In der vorliegenden Studie wurde unterstellt, dass diese negativen Effekte nach der Nutzung des Strohs in Biogasanlagen durch die Rückführung von Gärresten ausgeglichen werden können. Bei dieser angestrebten Rückführung ändert sich das C/N-Verhältnis: Die Nährstoffgehalte und damit auch die C/N-Verhältnisse von Gärresten sind stark vom eingesetzten Substrat abhängig (LICHTI et al., 2012). SENSEL et al. (2009) ermittelten in ihrer Studie enge C/N-Verhältnisse der untersuchten Gärprodukte, die auf eine gute Stickstoffverfügbarkeit hinweisen. Im Gegensatz hierzu stellten DEUKER et al. (2005) fest, dass durch die Vergärung betriebseigener Kofermente der mobile N-Düngerpool um 70% gesteigert wurde, dies jedoch keine Auswirkungen auf die Produktivität des Gesamtsystems hatte. Die Autoren geben das weite C/N-Verhältnis des festen Gärrests als mögliche Begründung hierfür an.

Die Wirkung von Gärresten auf den Humusgehalt wird kontrovers diskutiert und ist mitunter abhängig davon, was als Vergleich genutzt wird. DOMINIK et al. (2009) beurteilen die Humusreproduktion von Gärresten aus nachwachsenden Rohstoffen im Vergleich zu Stallmist negativ. Einen Gegensatz hierzu bildet sowohl die Studie von HOFFMANN (2018) über einen Versuchszeitraum von sechs Jahren als auch die von BECK & BRANDHUBER (2012) über einen Versuchszeitraum von drei Jahren. In beiden Arbeiten wurden keine Unterschiede zwischen den organischen Düngern sowie eine positive Wirkung auf den Humusgehalt festgestellt. Jedoch wird von den Autoren angegeben, dass die untersuchte Zeitspanne zu kurz sei, um allgemeingültige Aussagen zu treffen. SZERENCSITS & ERHART (2015) stellten in ihrer Untersuchung eine

etwas höhere Humusreproduktion von Zwischenfrüchten fest, wenn diese zuerst fermentiert und in Form von Biogasgülle rückgeführt wurden, statt als Gründüngung direkt eingearbeitet zu werden.

Tabelle 4: Durchschnittswerte von Ernterückständen verschiedener Feldfrüchte und zu erwartende Humusbilanz (dt/ha) bei einer unterstellten Abbaurate des Humus im Boden von 40 dt/ha/Jahr.

Feldfrucht	Ernterückstände		Humusbilanz	
	Wurzel/Stoppel	Blatt/Stroh	Wurzel/Stoppel	zusätzlich Blatt/Stroh
Zuckerrüben	5-10	40-70	-35	+40
Kartoffeln	5-10	20-30		+/-0
Winterraps	15-20	45-55		+30
Ackerbohnen	15-20	30-50		+30
Körnermais	15-20	50-60	-20	+30
Silomais	15-20	abgeerntet	-20	-
Getreide	15-25	50-70	-20	+30
Kleegras 1-jährig	30-40	abgeerntet	+/-0	-
Kleegras 2-jährig	55-60	abgeerntet	+20	-
Zwischenfrucht	20-25	20-40	-20	+20
Gründüngung	zusammen mit Deckfrucht Getreide			
Untersaat	20-25	20-40		+30
Stoppelsaaten, früh	bis 10	30-35		+25
Stoppelsaaten, spät	bis 6	25		+10

Quelle: BUCHNER, 1991; OEHMICHEN, 1986; geändert; zitiert aus BUCHNER, 2006.

Aus dem dargestellten Wissensstand ergaben sich folgende Hypothesen für die vorliegende Studie:

2.5 Arbeitshypothesen

1. Die durchschnittlichen Erträge von 30 dt/ha TM aus der Literatur sind sowohl für Ackerbohnen als auch für Erbsen realistisch.
2. Die Gerüstsubstanzen nehmen mit fortschreitender Abreife zu und haben einen negativen Effekt auf die Biogas- und Methanausbeuten.
3. Der Voraufschluss durch die Silierung hat positive Effekte auf die Biogas- und Methanausbeuten.
4. Die gewählten Sorten unterscheiden sich hinsichtlich Strohertrag und Gasausbeute.
5. Die Abfuhr des Stroh ändert den Vorfruchtwert der Kulturen und bewirkt eine veränderte Stickstoffdynamik in der Folgefrucht.

3 Material und Methoden

3.1 Ernteterminversuche

Die Ernteterminversuche dienen dem Zweck, Veränderungen der Pflanze hinsichtlich ihrer Erträge, TM-Gehalte und Inhaltsstoffe während der Abreife durch Ernten zu verschiedenen Terminen zu erfassen.

3.1.1 Feldversuche

3.1.1.1 Standortwahl

Die Ernteterminversuche mit Ackerbohnen und Erbsen wurden an zwei Standorten durchgeführt. Ein Versuch wurde in der Soester Börde auf dem Versuchsgut Merklingsen der Fachhochschule Südwestfalen angelegt, der zweite Standort war in Ostwestfalen-Lippe in Hovedissen.

Standort Soester Börde

Der Versuchsstandort Soester Börde befindet sich im gleichnamigen Naturraum und liegt ca. 80 m über NN, die Niederschläge betragen im langjährigen Mittel ca. 750 mm bei einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 9°C. Der Bodentyp ist eine Pseudogley-Parabraunerde mit einem Humusgehalt im Ap-Horizont von meist über 2%. Bei den Versuchsflächen handelt es sich um einen lehmigen Schluff mit einer Bonität von 70–75 Bodenpunkten (STEMANN et al., 2019).

Im ersten Versuchsjahr 2017 lagen die Niederschläge mit 784 mm, bei einer Durchschnittstemperatur von 10°C, geringfügig über dem langjährigen Mittel, während im zweiten Versuchsjahr die Niederschläge mit 518 mm und einer Durchschnittstemperatur von 11°C deutlich unterdurchschnittlich waren.

Die Erntezeit 2017 belief sich auf den Zeitraum vom 17.07.2017 bis zum 30.07.2017 für die Erbsen und auf den 30.07.2017 bis zum 28.08.2017 für die Ackerbohnen sowie im Jahr 2018 auf den Zeitraum vom 03.07.2018 bis zum 17.07.2018 für die Erbsen und auf den 19.07.2018 bis zum 31.07.2018 für die Ackerbohnen. Insbesondere im Jahr 2018 fielen während dieser Zeit kaum Niederschläge.

Abbildung 2 zeigt die Daten der Wetterstation des Versuchsguts Merklingsen mit den monatlichen Durchschnittstemperaturen und Niederschlagssummen während des Erbsen- und Ackerbohnenwachstums des Standorts Soester Börde für beide

Versuchsjahre. Im Jahr 2017 lagen die Niederschlagssummen mit Ausnahme des Junis oberhalb derer des Jahres 2018, bei gleichzeitig geringeren Temperaturen.

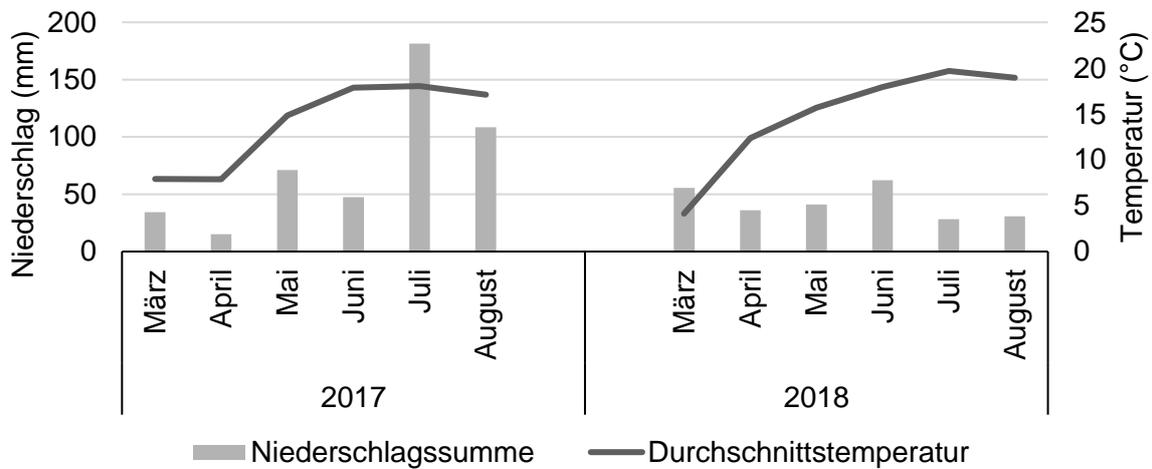


Abbildung 2: Monatliche Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen des Standorts Soester Börde während der Vegetationszeit von Erbsen und Ackerbohnen 2017 und 2018.

Standort Ostwestfalen-Lippe

Der Versuchsstandort Ostwestfalen-Lippe befindet sich im Naturraum Ravensberger Mulde und liegt ca. 110 m über NN; bei einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 9,5°C fallen jährlich ca. 804 mm Niederschlag. Der Bodentyp ist eine Parabraunerde, die Versuchsflächen bestehen aus sandigem Lehm mit 70 Bodenpunkten (LEHBRINK, 2019).

Wie am Standort Soester Börde waren auch am Standort Ostwestfalen-Lippe die Niederschläge im ersten Versuchsjahr über dem langjährigen Mittel, während sie im zweiten Versuchsjahr deutlich unterdurchschnittlich waren. Im Versuchsjahr 2017 fielen 908 mm Niederschlag bei einer durchschnittlichen Temperatur von 10°C, während im Versuchsjahr 2018 521 mm Niederschlag fielen bei einer durchschnittlichen Temperatur von 11°C.

Die Erntezeiten waren an beiden Standorten nahezu gleich, mit Ausnahme der Ackerbohnen am Standort Ostwestfalen-Lippe 2018, die aufgrund der weniger weit fortgeschrittenen Abreife später geerntet wurden als die am Standort Soester Börde. Dadurch dauerte die Ackerbohnenbohnernte insgesamt vom 23.07.2018 bis zum 07.08.2018. Auch in Ostwestfalen-Lippe fielen insbesondere 2018 kaum Niederschläge während der Erntezeit.

Abbildung 3 zeigt die Daten der privaten Wetterstation Krentruperhagen (FUHRMANN,

2020) zu monatlichen Durchschnittstemperaturen und Niederschlagssummen während des Erbsen- und Ackerbohnenwachstums des Standorts Ostwestfalen-Lippe für beide Versuchsjahre. Wie am Standort Soester Börde lagen auch hier die Niederschlagssummen im Jahr 2017 mit Ausnahme des Aprils oberhalb derer des Jahres 2018, bei gleichzeitig geringeren Temperaturen.

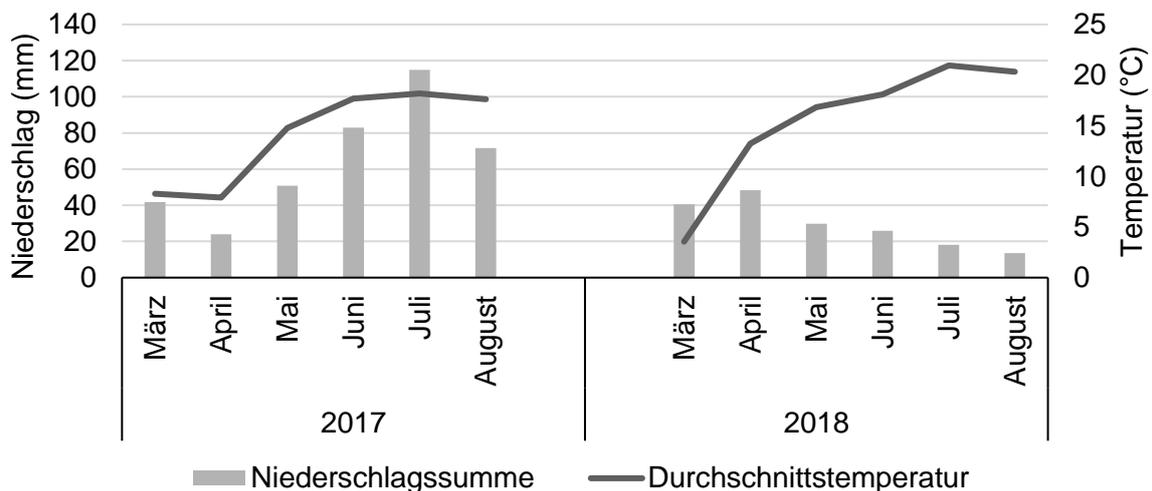


Abbildung 3: Monatliche Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen des Standorts Ostwestfalen-Lippe während der Vegetationszeit von Erbsen und Ackerbohnen 2017 und 2018.

3.1.1.2 Faktoren und Faktorstufen

Die Versuche wurden an beiden Standorten in vierfacher Wiederholung angelegt; die Faktoren sind mit entsprechenden Faktorstufen in Tabelle 5 dargestellt:

Tabelle 5: Faktoren und Faktorstufen der Ernteterminversuche.

Faktor	Zahl der Faktorstufen	Faktorstufen
Jahr	2	1. 2017 2. 2018
Ort	2	1. Soester Börde 2. Ostwestfalen-Lippe
Art	2	1. Erbse 2. Ackerbohne
Sorte	3	Erbse: Ackerbohnen: 1. <i>Navarro</i> 1. <i>Fuego</i> 2. <i>Respect</i> 2. <i>Tiffany</i> 3. <i>Astronaute</i> 3. <i>Taifun</i>
Erntetermin	4	1. frühe Druschreife 2. zur Druschreife (3–5 Tage später) 3. späte Druschreife (10 Tage nach 1, Stroh weitgehend abgereift) 4. Totreife (Stroh vollständig abgereift)
Wiederholungen	4	n=4

Um die Auswirkungen der Seneszenz auf die Biogasausbeuten und die Inhaltsstoffe zu prüfen, war es notwendig, das Material zu verschiedenen Terminen zu ernten und zu verarbeiten. Ebenso sollte überprüft werden, inwieweit sich unterschiedliche Sorten auf die oben genannten Parameter auswirken. Im Juli und August 2016 erfolgte aufgrund einer für Korn und Stroh getrennten Abreifebonitur im Vorfeld die Sortenwahl in den Landessortenversuchen am Standort Haus Düsse, um gezielt Sorten auszuwählen, bei denen das Stroh möglichst zeitlich versetzt zu einem späteren Zeitpunkt abreift als das Korn. Eine niedrige Boniturnote bedeutet eine geringe Ausprägung eines Merkmals, eine hohe Boniturnote eine starke Ausprägung. Bei den Erbsen waren die Sortenunterschiede sehr gering. Die Sortenwahl orientierte sich daher an weiteren Kriterien wie Pflanzenlänge und Lagerneigung; gewählt wurden die Sorten *Navarro*, *Respect* und *Astronaute* (Abbildung 4).

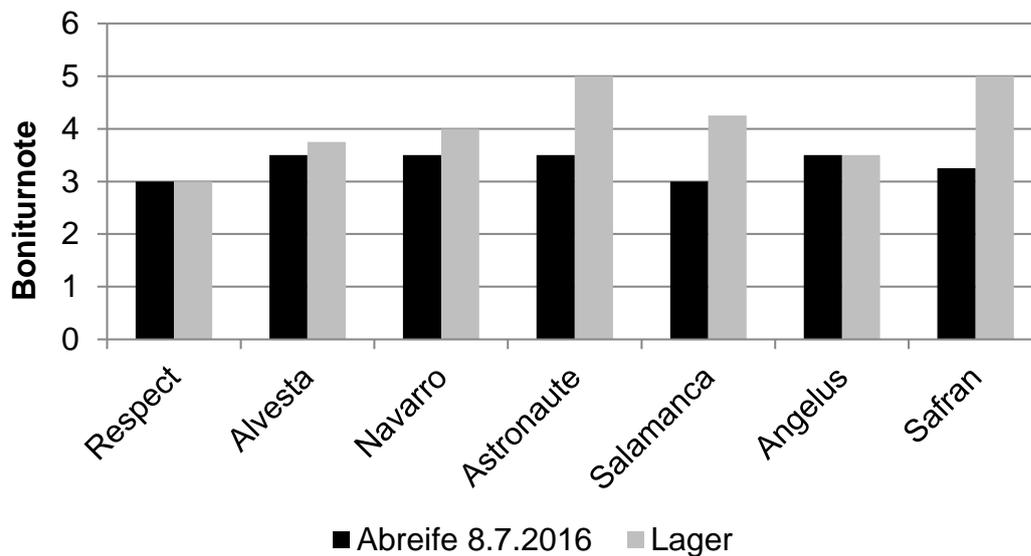


Abbildung 4: Abreifedifferenzierung verschiedener Erbsensorten im Jahr 2016, Haus Düsse.

Bei den Ackerbohnen ergaben sich ebenfalls geringe Sortenunterschiede; aufgrund dieser Daten wurden die Sorten *Fuego*, *Tiffany* sowie die tanninfreie Sorte *Taifun* gewählt (Abbildung 5).

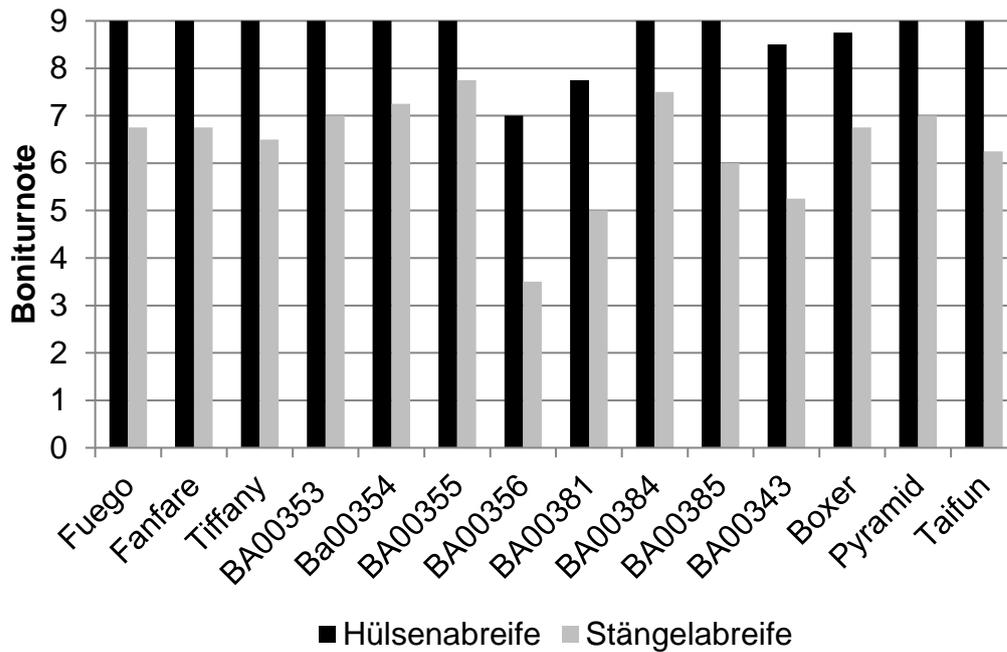


Abbildung 5: Abreifedifferenzierung verschiedener Ackerbohnenarten (BA=Nummer Bundessortenamt) im Jahr 2016, Haus Düsse.

Die Erntetermine sollten die Zeitspanne von einer frühen Druschreife (BBCH 84–89), zur Druschreife (BBCH 89–94) und späten Druschreife (BBCH 96–98) bis hin zur vollständigen Totreife (BBCH 99) abdecken. Die Zeitangaben sind dabei eine ungefähre Angabe, da die Abreife maßgeblich vom Faktor Wetter beeinflusst wird und in jedem Jahr unterschiedlich verläuft. Da die Abreifedynamik von Korn und Stroh bei der Erbse nahezu identisch ist und da die Erbse noch dazu an beiden Standorten, in beiden Jahren durch einen starken Niederschlag nach dem zweiten Erntetermin ins Lager ging, konnten für diese Kultur nur drei der geplanten vier Termine in beiden Jahren realisiert werden und zwar die Termine 1, 2 und 4. Die Erntetermine beider Jahre und Standorte sind für Erbse und Ackerbohne in Tabelle 6 und Tabelle 7 sowie die BBCH-Stadien der einzelnen Sorten zu den Ernteterminen in Tabelle 8 und Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 6: Erntetermine der Erbse beider Standorte, 2017 und 2018.

Jahr	Erntetermine		
	frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
2017	17.07. +2 Tage	19.07. +10/11 Tage	29./30.07 ⁺
2018*	03.07. +2 Tage	05.07. +12 Tage	17.07.

⁺29.07. Ernte in Ostwestfalen-Lippe, 30.07. Ernte in Soester Börde; *Erntetermine gelten nicht für die Sorte *Respect* am Standort Soester Börde.

Tabelle 7: Erntetermine der Ackerbohne beider Standorte, 2017 und 2018.

Jahr	Erntetermine						
	frühe Druschreife		zur Druschreife		späte Druschreife		Totreife
2017	29./30.07 ⁺	+3/4 Tage	02.08.	+5 Tage	07.08.	+21 Tage	28.08.
2018 ^o	23.07.	+3 Tage	26.07.	+5 Tage	31.07.	+7 Tage	07.08.
2018 ^s	19.07.	+4 Tage	23.07.	+3 Tage	26.07.	+5 Tage	31.07.

⁺29.07. Ernte in Ostwestfalen-Lippe, 30.07. Ernte in Soester Börde; ^o=Ostwestfalen-Lippe, ^s=Soester Börde.

Tabelle 8: BBCH-Stadien der Erbsen zu den verschiedenen Erntezeitpunkten.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
			frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	87	88	99
		<i>Respect</i>	87	88	99
		<i>Astronaut</i>	86	88	99
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	87	88	99
		<i>Respect</i>	87	88	99
		<i>Astronaut</i>	86	88	99
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	85	85	99
		<i>Respect</i>	85	85	99
		<i>Astronaut</i>	84	84	99
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	87	88	99
		<i>Respect</i>	87	88	99
		<i>Astronaut</i>	87	88	99

Tabelle 9: BBCH-Stadien der Ackerbohnen zu den verschiedenen Erntezeitpunkten.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin			
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	88	91	97	99
		<i>Tiffany</i>	86	92	97	99
		<i>Taifun</i>	84	92	97	99
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	89	96	96	99
		<i>Tiffany</i>	89	94	96	98
		<i>Taifun</i>	89	94	97	99
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	87	89	95	99
		<i>Tiffany</i>	87	89	96	99
		<i>Taifun</i>	86	90	96	99
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	89	95	96	99
		<i>Tiffany</i>	89	94	96	99
		<i>Taifun</i>	89	95	98	99

Eine weitere Problematik waren die unzureichenden Saataufgänge der Erbsensorte *Respect* im Versuchsjahr 2018 am Standort Soester Börde, bedingt durch eine schlechte Saatgutpartie oder die niedrigen Temperaturen, die zur Aussaat Bodenfröste bewirkten. Die Sorte *Respect* wurde nachgesät, um die Konkurrenzeffekte der

Parzellen aufrecht zu erhalten und Randeffekte zu vermeiden. Wegen der durch die Nachsaat entstandenen Entwicklungsrückstände und der damit fehlenden Vergleichbarkeit wurde die Sorte *Respect* 2018 am Standort Soester Börde von der Auswertung der Ergebnisse ausgeschlossen. Die unterschiedlichen Entwicklungsstadien sind in Abbildung 6 zu sehen. Um jahresunabhängig eine einheitliche Aussage bezüglich der Entwicklung treffen zu können, wurden zu jedem Erntetermin die Entwicklungsstadien erfasst.

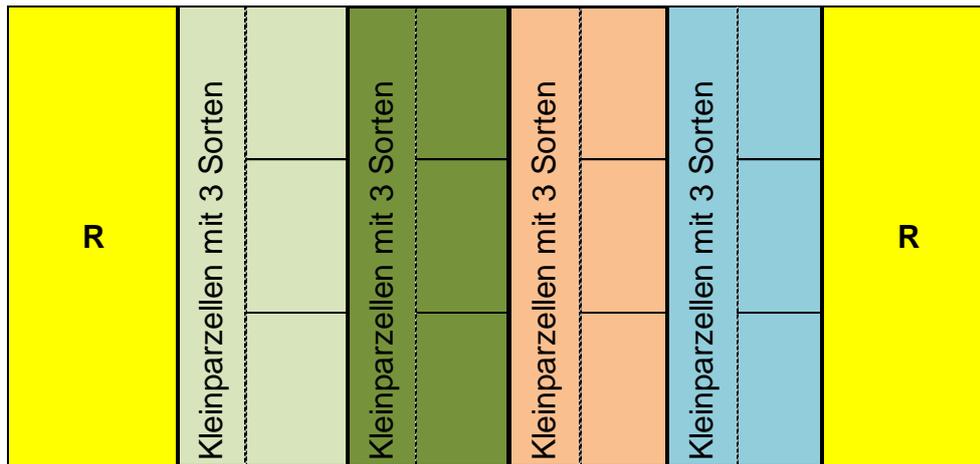


Abbildung 6: Entwicklungsrückstand der Sorte Respect am Standort Soester Börde am 07.05.2018 (links) und zur Blüte am 28.05.2018 (rechts).

3.1.1.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Im Jahr 2017 wurden die Parzellen an beiden Standorten am gleichen Tag, am 15.03.2017 gesät, während im Jahr 2018 die Parzellen am Standort Soester Börde am 06.03.2018 und am Standort Ostwestfalen-Lippe am 09.04.2018 gedrillt wurden.

Die Ernteterminversuche wurden als Spaltanlagen aufgebaut, da zunächst davon ausgegangen wurde, dass das Material zur Erleichterung der Arbeitsabläufe maschinell geerntet werden kann. Die Erntetermine stellen die Großteilstücke und, innerhalb dieser, die Sorten die Kleinteilstücke dar; die Sorten wurden vollständig randomisiert (Abbildung 7).



Großparzellen:

	1. Erntetermin
	2. Erntetermin
	3. Erntetermin
	4. Erntetermin

Abbildung 7: Versuchsplan der Ernteterminversuche mit den Großparzellen ‚Erntetermin‘ und den Kleinparzellen ‚Sorte‘, exemplarisch für eine Wiederholung (R=Randparzellen).

Wegen der hohen Feuchtigkeit zu den ersten Ernteterminen wurde von dieser Planung abgewichen und das Material per Hand geerntet. Zunächst wurde an jedem Termin am Standort Ostwestfalen-Lippe der Pflanzenaufwuchs einer Parzelle mittels Sense geerntet und in beschrifteten *Bigpacks* zum Standort Soester Börde transportiert. Im Anschluss erfolgte dort die Ernte nach dem gleichen Prinzip.

Das Material jeder Parzelle wurde am nächsten Tag mit einem Parzellendrescher der Firma Wintersteiger vom Typ *Nurserymaster Elite*, gedroschen, die Zufuhr zum Mähdrescher erfolgte per Hand. Stroh- und Kornertrag wurden erfasst, indem zusätzlich das Stroh komplett aufgefangen und durch Siebung nicht ausgedroschene oder nicht von den Sieben erfasste Körner vom Stroh getrennt wurden. Körner und Stroh wurden getrennt gewogen.

Das Stroh wurde im Anschluss mit einem Cutter der Firma DMS Maschinensysteme gehäckselt. Es folgte die Ermittlung des Trockenmassegehalts (TM-Gehalt) von Stroh und Körnern durch Trocknung bei 105°C über Nacht in Trockenschränken der Firma Heraeus TU100/150 und Memmert Model 600; hierfür wurde folgende Formel angewandt:

$$g_{(A)}/g_{(E)}*100=TM\text{-Gehalt}$$

($g_{(A)}$ =Ausgangsgewicht; $g_{(E)}$ =Eingangsgewicht)

Parallel erfolgte die Weiterverarbeitung des Strohs zu Silagen bzw. die Vortrocknung des Strohs bis zur Lagerstabilität für die weiteren Laboranalysen durch eine Flächentrocknung mittels eines 3kW Heugebläses.

Die Laborsilagen wurden mit einem Silageverdichter der Fachhochschule Südwestfalen in WECK®-Einkochgläsern mit 2,5 l Volumen erstellt und mit WECK®-Glasdeckeln und Klammern verschlossen. Als Dichtmittel dienten Einkochringe RR 100 mm derselben Firma.

Sowohl die Trockenmasseermittlung als auch die Trocknung der Strohproben bis zur Lagerstabilität erfolgten in *Crispacs*-Beuteln der Firma Baumann-Saatzuchtbedarf, 305 x 450 mm; Super Micro Lochung mit 0,5 mm Lochdurchmesser.

Die Korn- und Stroherträge wurden auf dt/ha umgerechnet, um den unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Parzellenbeerntung Rechnung zu tragen. Beim Stroh erfolgte die Umrechnung auf 100% TM, beim Korn wurde auf die üblichen 86% TM umgerechnet.

3.1.2 Laboranalysen

Die im Feldversuch erfassten Proben wurden auf verschiedene Parameter untersucht. Die Bewertung der Silagequalität erfolgte nach der DLG-Sinnenprüfung (DLG, 2004); in Teilen wurde die Weender Futtermittelanalyse, erweitert nach van Soest in Anlehnung an das VDLUFA Methodenbuch III (1993 & 2012), sowie Gasertragstests in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4630 (2006) durchgeführt. Zusätzlich wurde der Landesbetrieb Hessisches Landeslabor für eine Auswahl an Proben zur Ermittlung des Biogaspotentials und zur Bestimmung des Methananteils im Biogas beauftragt.

3.1.2.1 Silagenbewertung

Die erstellten Laborsilagen wurden nach Erliegen des Siliervorgangs mittels der Grobfutterbewertung Teil A – DLG-Schlüssel zur Bewertung von Grünfütter, Silage und Heu mit Hilfe der Sinneprüfung untersucht (DLG, 2004). Bei dieser Untersuchung wurde mittels optischer und sensitiver Prüfung eine Bewertung vorgenommen, die Rückschlüsse auf den Erfolg der Silierung und die Qualität der Silage zulässt. Für

Abzüge in der Qualität wurden in allen betrachteten Parametern Punkte vergeben, die bezüglich der Wirkung als Qualitätsminderung gewichtet sind. Diese wurden für die abschließende Bewertung der Silage aufsummiert. Teil dieser Sinnenprüfung war die Bestimmung des pH-Wertes, der mit einer Messelektrode Knick *pH-Meter 761 Calimatic* gemessen wurde. Ein niedriger pH-Wert einer Silage war ein Indiz für den Erfolg der Silierung und die Lagerstabilität und diente als Prüfung auf ausreichende Säurebildung. Der maximal zulässige pH-Wert bis zum Qualitätsabzug war abhängig vom TM-Gehalt der Silage. Bei zunehmendem Gehalt stieg der zu tolerierende pH-Wert. Für TM-Gehalte über 45% galt ein pH-Wert bis 5,0 nicht als Qualitätsminderung. Eine Silagebeurteilung war auch ohne die Bestimmung des pH-Werts möglich. Hierzu wurden der Geruch, die Farbe und das Gefüge beurteilt. Der Geruch konnte ebenso wie der pH-Wert über die in der Silage vornehmlich vorhandenen Säuren und über mögliche Fehlgärungen, Erwärmungen, Hefen- oder Schimmelbildungen Aufschluss geben; die hierbei berücksichtigten Säuren waren Buttersäure und Essigsäure. Zusätzlich zu pH-Wert und Geruch wurde die Farbe der Silage beurteilt; im Fall von Bräunung und Vergilbung bei der Silierung von Stroh war die Ausgangsfarbe des silierten Produkts für die Beurteilung zu berücksichtigen. Bei der Beurteilung des Gefüges handelte es sich um eine Prüfung der Pflanzenteile auf mikrobielle Zersetzung und Schimmel, die durch angegriffene Pflanzenteile zu erkennen und nach der Ausprägung der Zersetzung zu bewerten waren. Der TM-Gehalt der Silagen wurde nach dem bereits genannten Prinzip erfasst.

3.1.2.2 Inhaltsstoffanalysen

Alle erfassten Proben wurden mittels der Weender Futtermittelanalyse auf ihre Inhaltsstoffe untersucht. Die Untersuchungen erfolgten in Anlehnung an VDLUFA, Methodenbuch III (2012) für die erweiterte Faseranalyse sowie VDLUFA, Methodenbuch III (1993) für die Rohproteinanalyse. Für diese Untersuchungen wurden die Proben mit einer Mühle Retsch SM 200 auf 1 mm Größe vermahlen. Erfasst wurden die Parameter TM-Gehalt, Rohasche (XA), Rohprotein (XP), Hemizellulose, Zellulose und Lignin. Für deren Bestimmung wurde die nach VAN SOEST (1991) erweiterte Faseranalyse genutzt.

Trockenmasse und Rohasche

Die Bestimmung von TM-Gehalt und XA erfolgte in aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten. Es wurden etwa 3 g des Materials in Tiegel eingewogen, diese

wurden bei 105°C über Nacht mit Rückwaage am Folgetag getrocknet. Abschließend wurden die getrockneten Proben bei 550°C im Muffelofen über Nacht verascht. Der TM-Gehalt wurde nach dem bereits genannten Prinzip berechnet; dieses wurde auch für die Berechnung der XA angewandt:

$$g_{(A)}/g_{(E)}*100=XA$$

($g_{(A)}$ =Ausgangsgewicht; $g_{(E)}$ =Eingangsgewicht)

Rohproteinbestimmung nach Kjeldahl

Die Bestimmung des Rohproteins erfolgte für die Proben des Jahres 2017 mit dem *Vapodest 50* und bei einem Großteil der Proben des Jahres 2018 mit dem *Vapodest 500*. Beides sind Geräte der Firma Gerhardt. Die Proben wurden in Doppelbestimmung untersucht, daher konnten Fehler in der Analyse erkannt und die entsprechenden Proben wiederholt werden. Für die Bestimmung des Stickstoffgehaltes nach Kjeldahl musste die Probe im ersten Schritt mit siedender, hochkonzentrierter Schwefelsäure oxidativ zerstört werden, sodass der zuvor gebundene Stickstoff vollständig als anorganischer Ammoniumstickstoff vorlag. Dafür wurden etwa 1 g des Probenmaterials eingewogen und mit 20 ml 98%iger H_2SO_4 und einer Katalysatortablette versetzt. Die Reagenzien wurden mit einem Heizblock auf 400°C erhitzt und über zweieinhalb Stunden hinweg aufgeschlossen. Daran schloss sich die Destillation der Proben an. In diesem Schritt wurde der anorganische Ammoniumstickstoff mit konzentrierter Natronlauge versetzt und so Ammoniak freigesetzt, welcher in Borsäure aufgefangen und hier als Ammoniumborat gebunden wurde. Die Borsäure wurde titriert und aus der genutzten Menge an Maßlösung zur Titration wurde der Stickstoffgehalt berechnet. Die Destillation und Titration der Proben sowie die Berechnung des Stickstoffgehalts wurden sowohl durch das *Vapodest 50* als auch durch das *Vapodest 500* vollautomatisch durchführt. Die Stickstoffgehalte wurden mit dem Faktor 6,25 multipliziert, um den Rohproteingehalt auszuweisen.

Faseranalytik nach van Soest

Bei der erweiterten Faseranalyse nach VAN SOEST (1991) handelt es sich um aufeinander folgende Arbeitsschritte, bei denen etwa 1 g des Materials in verschiedenen Lösungen gekocht bzw. mit Schwefelsäure versetzt wurde, um die einzelnen Fraktionen in Lösung zu bringen und auszuwaschen. An diese Arbeitsschritte schloss sich das Waschen der Proben an, um diese von den genutzten Chemikalien zu trennen. Die Ermittlung der einzelnen Fraktionen erfolgte rechnerisch,

weshalb nach jedem Arbeitsschritt die Probe über Nacht getrocknet und am Folgetag zurückgewogen wurde. Genutzt wurde hierfür die manuelle *FibreBag*-Technologie der Firma Gerhardt. Hierzu wurde das gewogene Material in einen *FibreBag* gefüllt, welcher mit einem Spreizfinger zur Stabilisierung versehen wurde. Jeweils sechs *FibreBags* wurden inklusive Spreizfinger in ein Karussell gestellt, wodurch eine sichere Handhabung gewährleistet wurde. Die Proben wurden zunächst in NDF-Lösung eine Stunde lang unter Zugabe von je 2 ml α -Amylase pro *FibreBag* gekocht. NDF steht hierbei für *Neutral Detergent Fibre* und für die Bestandteile des Materials, die nach der Bearbeitung der Probe mit dieser Chemikalie noch enthalten sind. Dies trifft auf die Zellwandgerüstsubstanzen Hemizellulose, Zellulose und Lignin zu. Danach erfolgte das einstündige Kochen der Probe in ADF-Lösung. ADF bedeutet *Acid Detergent Fibre* und steht für die nach diesem Schritt noch enthaltenen Substanzen Zellulose und Lignin. Die Zellulose wurde im Anschluss durch Zugabe und dreistündige Einwirkung von 72%iger Schwefelsäure herausgelöst. Die Probe enthielt danach noch das Rohlignin. Da die Proben von unterschiedlicher Qualität und teils stark verschmutzt waren, wurde an die Behandlung der Probe mit Schwefelsäure eine Veraschung angeschlossen, sodass der Rohligningehalt um die Asche korrigiert und Beeinträchtigungen durch Verschmutzungen somit reduziert werden konnten.

Aus dem beschriebenen Verfahren ergaben sich folgende Gleichungen für die Berechnung der Gerüstsubstanzen:

$$\text{Hemizellulose} = \alpha\text{NDF} - \text{ADF}$$

$$\text{Zellulose} = \text{ADF} - \text{ADL}$$

$$\text{Lignin} = \text{ADL} - \text{Asche}$$

Auch diese Untersuchungen wurden in Doppelbestimmung durchgeführt.

3.1.2.3 Gasertragstests

Die Gasertragstests an der Fachhochschule Südwestfalen wurden in Anlehnung an den Hohenheimer Futterwerttest und die VDI-Richtlinie 4630 (2006) durchgeführt.

Wie für die Futtermittelanalysen wurde das zu prüfende Material zunächst bei 55°C getrocknet und im Anschluss auf 1 mm Größe vermahlen. 0,5 g des Substrates wurden eingewogen und mit etwa 30 ml des Inokulums in einem 100 ml fassenden Kolbenprober vermischt und jedes Substrat in dreifach Bestimmung geprüft. Das Inokulum wurde für alle Untersuchungen aus dem gleichen Fermenter einer mit

Maissilage betriebenen Biogasanlage entnommen und vor Testbeginn gesiebt, um organische Rückstände zu entfernen. Es folgte zusätzlich ein drei Tage langes Ausgären des Inokulums, um zu gewährleisten, dass nicht abgeseiebtes Substrat von den Bakterien zu Biogas umgewandelt wurde, sodass der Untersuchungsverlauf im Weiteren möglichst nicht beeinträchtigt wird. Da trotzdem weiterhin durch das Inokulum Gas produziert wurde, wurden in jedem Durchlauf zwei Kolbenprober mit Inokulum als ausschließlichem Inhalt als Blindprobe getestet. Als Referenz wurde Maissilage eingesetzt. Die Kolbenprober waren an der Vorderseite mit einer Klemme sowie einem etwa 8 cm langen Plastikschlauch und an der Rückseite über den mit Exikatorfett behandelten, gasdichten Kolben abgedichtet. Ein Trockenschrank (Fa. Heraeus), Typ 8 6060 E; ID 7300102, betrieben auf 37°C, mit eingebautem Ventilator und drehbaren Doppelscheiben aus Holz zur Aufnahme der Kolbenprober diente als Biogasreaktor und sorgte für gleichmäßige Durchmischung. Die Gasausbeute wurde regelmäßig über die Skala des Kolbenprobers abgelesen. Um Gasmengen vorzubeugen, die das Volumen des Kolbenprobers überschreiten, wurde das Gas über die Klemme nach dem Ablesen des Füllstandes entfernt. Um eine Beeinträchtigung der Gasmenge durch die Temperatur zu vermeiden, wurde vor dem Ablesen ein Temperatúrausgleich ermöglicht.

Die Gasausbeute wurde auf Normgas umgerechnet, hierfür wurde folgende Formel angewandt:

$$V_{0^{tr}} = V((p - p_w)T_0 / p_0T)$$

Wobei: $V_{0^{tr}}$ =Volumen des trockenen Gases im Normzustand in ml_N;

V =abgelesenes Volumen in ml;

p =Druck der Gasphase;

p_w =Dampfdruck des Wassers in Abh. der Umgebungs-T in hPa;

T_0 =Normtemperatur (273 K);

p_0 =Normdruck (1013 hPa);

T =Temperatur des Gases oder der Umgebung,

Da das Volumen konstant ist, kann man aus der allgemeinen Gasgleichung $pV=nRT$ – wobei p =Druck (PA), V =Volumen (m³), n =Stoffmenge (mol), R =allgemeine Gaskonstante und T =Temperatur (K) – ableiten, dass durch den Temperatúrausgleich auch ein Druckausgleich stattfand ($p_1/T_1=p_2/T_2$) und für p der Umgebungsdruck angenommen werden kann (HARTEN, 2017). Dieser wurde mit einem Barometer

abgelesen. Die kumulierte Normgasausbeute der Varianten wurde im Anschluss an den Versuch um die Eigengasproduktion des Inokulums korrigiert und die spezifische Faulgasproduktion, bezogen auf l_N/kg_{GV} , also die Gasproduktion in l pro kg organische Trockenmasse, ausgewiesen:

$$V_s = (\Sigma V_N \cdot 10^4) / (m \cdot w_T \cdot w_V)$$

Wobei: V_s =spezifische, auf die Glühverlustmasse bezogene Faulgasproduktion während der Versuchszeit in l_N/kg_{GV} ;

ΣV_N =Netto-Gasvolumen des Substrats oder des Referenzsubstrats für die betrachtete Versuchsdauer in ml_N ;

m =Masse des eingewogenen Substrats oder Referenzsubstrats in g;

w_T =Trockenrückstand der Probe oder des Vergleichschlammes in %;

w_V =Glühverlust (GV) der Trockenmasse der Probe oder des Vergleichschlammes in %.

Wegen der hohen Nutzungsfrequenz des Gasertragstests und der Dauer der Durchführung konnte nur eine Auswahl an Proben untersucht werden (Tabelle 10). In insgesamt fünf Durchgängen wurden beide Arten, alle Erntetermine, Sorten und Konservierungen berücksichtigt, um die gesamte Variation des Datensatzes zu berücksichtigen, wobei jedoch immer nur eine der vier Wiederholungen geprüft werden konnte. Hierbei handelte es sich immer um die erste Wiederholung einer Variante und in vier der fünf Durchgänge um den Standort Ostwestfalen-Lippe.

Weitere Proben wurden extern durch den Landesbetrieb Hessisches Landeslabor geprüft, wobei auch der Methananteil des Biogases bestimmt wurde. Es handelte sich dabei ausschließlich um Proben der ersten Wiederholung der Erbsensorte *Navarro* sowie der Ackerbohnsorten *Fuego* und *Taifun*, sämtlich Proben des Standorts Soester Börde. Alle Erntetermine wurden bei der Auswahl berücksichtigt.

Tabelle 10: Untersuchungsvarianten im Glaskolbentest.

Jahr	Standort	Art	Konser- vierung	Sorte	Erntetermin
2017	Ostwestfalen-Lippe	Ackerbohne	Silage	<i>Fuego</i>	1–3
2017	Ostwestfalen-Lippe	Ackerbohne	Silage	<i>Tiffany</i>	1–3
2017	Ostwestfalen-Lippe	Ackerbohne	Silage	<i>Taifun</i>	1–3
2017	Ostwestfalen-Lippe	Ackerbohne	Stroh	<i>Fuego</i>	1–4
2017	Ostwestfalen-Lippe	Ackerbohne	Stroh	<i>Tiffany</i>	1–4
2017	Ostwestfalen-Lippe	Ackerbohne	Stroh	<i>Taifun</i>	1–4
2017	Ostwestfalen-Lippe	Erbse	Silage	<i>Navarro</i>	1 & 2
2017	Ostwestfalen-Lippe	Erbse	Stroh	<i>Navarro</i>	1, 2 & 4
2017	Ostwestfalen-Lippe	Erbse	Stroh	<i>Respect</i>	1, 2 & 4
2017	Ostwestfalen-Lippe	Erbse	Stroh	<i>Astronaute</i>	1, 2 & 4
2018	Ostwestfalen-Lippe	Ackerbohne	Silage	<i>Fuego</i>	1–3
2018	Ostwestfalen-Lippe	Ackerbohne	Silage	<i>Tiffany</i>	1–3
2018	Ostwestfalen-Lippe	Ackerbohne	Silage	<i>Taifun</i>	1–3
2018	Ostwestfalen-Lippe	Ackerbohne	Stroh	<i>Fuego</i>	1–4
2018	Ostwestfalen-Lippe	Ackerbohne	Stroh	<i>Tiffany</i>	1–4
2018	Ostwestfalen-Lippe	Ackerbohne	Stroh	<i>Taifun</i>	1–4
2018	Ostwestfalen-Lippe	Erbse	Silage	<i>Navarro</i>	1 & 2
2018	Ostwestfalen-Lippe	Erbse	Stroh	<i>Navarro</i>	1, 2 & 4
2018	Ostwestfalen-Lippe	Erbse	Stroh	<i>Respect</i>	1, 2 & 4
2018	Soester Börde	Ackerbohne	Silage	<i>Fuego</i>	1–3
2018	Soester Börde	Ackerbohne	Stroh	<i>Fuego</i>	1–4
2018	Soester Börde	Ackerbohne	Stroh	<i>Taifun</i>	1 & 4
2018	Soester Börde	Erbse	Silage	<i>Navarro</i>	1 & 2
2018	Soester Börde	Erbse	Stroh	<i>Navarro</i>	1, 2 & 4

3.1.3 Berechnung der theoretischen Gasausbeute

Die Berechnung der theoretischen Gasausbeuten erfolgte nach KAISER (2007), da es sich bei den untersuchten Proben um Stroh bzw. Strohsilagen handelte, bei denen mit einem erhöhten Ligningehalt zu rechnen war und KAISER (2007) in seiner Formel die Gehalte an Lignin, Zellulose und Hemizellulose berücksichtigt.

Folgende Formel wurde zur Berechnung der Biogasausbeute genutzt, in Bezug auf g/kg FM:

$$y(l/kg) = 0,307 * XP(g/kg) + 0,781 * XL(g/kg) + 0,627 * OR(g/kg) + 0,938 * H(g/kg) + 0,691 * Z(g/kg) - 0,358 * ADL(g/kg)$$

(y=Biogasausbeute, XP=Rohprotein, XL=Rohfett, OR=organischer Rest, H=Hemizellulose, Z=Zellulose, ADL=Acid Detergent Lignin)

Des Weiteren erfolgte, ebenfalls nach KAISER (2007), die Berechnung der theoretischen Methanausbeute nach folgender Formel:

$$y(l/kg) = 0,147 * XP(g/kg) + 0,560 * XL(g/kg) + 0,289 * OR(g/kg) + 0,459 * H(g/kg) + 0,382 * Z(g/kg) - 0,271 * ADL(g/kg)$$

(y=Methanausbeute, XP=Rohprotein, XL=Rohfett, OR=organischer Rest, H=Hemizellulose, Z=Zellulose, ADL=Acid Detergent Lignin)

Für den Rohfettgehalt wurden Angaben der DLG-Futterwerttabellen genutzt, die sich mit Angaben aus der Literatur decken (DLG, 2005; HADJIPANAYIOTOU et al., 1985; ASAR et al., 2010). Als TM-Gehalte wurden für das Stroh die Werte nach der Trocknung bis zum Zeitpunkt der Lagerstabilität angenommen und für die Silagen die TM-Gehalte unmittelbar nach dem Öffnen, da das Material in einer Biogasanlage mit diesen TM-Gehalten genutzt würde. Diese lagen, bedingt durch die Konservierung, über bzw. unter den TM-Gehalten direkt nach der Ernte.

Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Substraten wurden die theoretischen Gasausbeuten anschließend von FM auf TM umgerechnet.

3.2 Untersuchungen zur Nachwirkung der Strohbergung auf die Folgekultur Winterweizen

Die Nachwirkungsversuche dienten dem Zweck, die Effekte der Strohbergung innerhalb einer Fruchtfolge zu überprüfen, in diesem Fall begrenzt auf die unmittelbare Folgefrucht Winterweizen.

3.2.1 Feldversuche

3.2.1.1 Standortwahl

Die Nachwirkungsversuche wurden an zwei Standorten angelegt. Ein Standort war die Soester Börde (Versuchsgut Merklingsen, Fachhochschule Südwestfalen), an dem jeweils ein Versuch mit der Vorfrucht Erbse und einer mit der Vorfrucht Ackerbohne angelegt wurden. Für den zweiten Standort erfolgten Nutzungsvereinbarungen mit Landwirten, die ihre Flächen nach der Ernte der Erbsen bzw. Ackerbohnen für die Versuche zur Verfügung stellten. Die Anlage der Parzellen sowie deren Düngung und Ernte wurde durch Mitarbeiter der Fachhochschule durchgeführt; sonstige Maßnahmen wurden von den Landwirten selbstständig und angepasst an die Restfläche ausgeführt. Im Folgenden werden die Außenstandorte am Haarstrang in Altenmellrich, Vorfrucht Erbse, und Ense-Bittingen, Vorfrucht Ackerbohne, genauer beschrieben. Die Standortbeschreibung Soester Börde ist unter 3.1.1 Feldversuche zu finden.

Standort Haarstrang (Altenmellrich und Ense-Bittingen)

Die Standorte Altenmellrich (Vorfrucht Erbse) und Ense-Bittingen (Vorfrucht Ackerbohne) liegen im Naturraum Haarstrang, etwa 240 m über NN, und weisen als Bodentyp eine Pseudogley-Braunerde auf, bestehend aus 0–30 (-50) cm lehmiger Schluff-schluffiger Lehm, darunter bis ca. 1,2 m toniger Lehm (steinig), darunter Kalk- und Kalkmergelgestein (ERKWOH, 1986). Die Versuche im Jahr 2019 lagen etwa 200 m über NN, bei gleichen Bodenbedingungen. Die Witterungsbedingungen waren wegen der räumlichen Nähe zum Versuchsgut Merklingsen als ähnlich anzusehen, allerdings waren beide Standorte wegen der größeren Höhenlage etwa 1,2°C kühler. Im Jahr 2019 fielen in der Region 693 mm Niederschlag bei einer Durchschnittstemperatur von 11°C, was unter bzw. über dem langjährigen Mittel von 750 mm Niederschlag und 9°C Temperatur liegt.

Abbildung 8 zeigt die Daten der Wetterstation des Versuchsguts Merklingsen zu

monatlichen Durchschnittstemperaturen und Niederschlagssummen für beide Versuchsjahre während des Winterweizenwachstums des Standorts Soester Börde, der vergleichbar für die Region Haarstrang war. Im Vegetationsjahr 2017/2018 waren nach ergiebigen Niederschlägen im Januar die Niederschlagssummen unterhalb derer des Vegetationsjahres 2018/2019, bei gleichzeitig höheren Temperaturen.

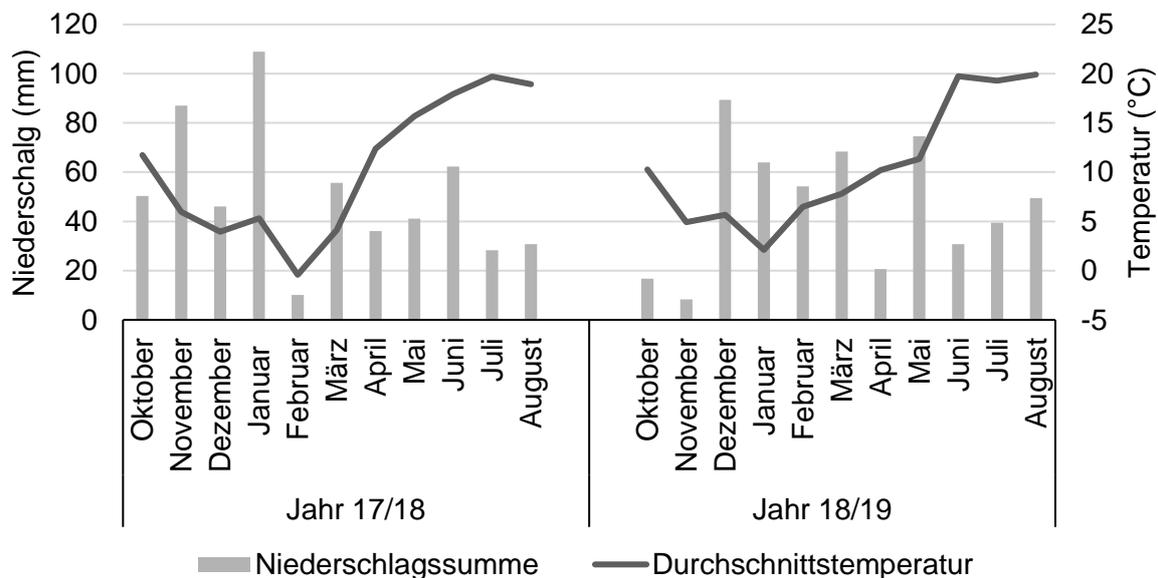


Abbildung 8: Monatliche Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen des Standorts Soester Börde während der Vegetationszeit von Winterweizen 2017/2018 und 2018/2019.

3.2.1.2 Faktoren und Faktorstufen

Die Auswirkung einer möglichen Nutzung des Strohs in Biogasanlagen auf die Folgefrucht wurde am Beispiel Winterweizen untersucht. Hierfür mussten Teilflächen von Stroh geräumt werden, um eine Nutzung zu simulieren. Innerhalb dieser Großparzellen wurden Kleinparzellen mit verschiedenen Düngeintensitäten angelegt. Die Versuche wurden an zwei Standorten in vierfacher Wiederholung angelegt, wobei im Jahr 2018 die vierte Wiederholung am Standort Soester Börde, nach Vorfrucht Erbse, aufgrund eines Versuchsfehlers nicht genutzt werden konnte. Die Faktoren mit entsprechenden Faktorstufen sind in Tabelle 11 dargestellt.

Die Düngeintensitäten sollten die Auswirkung einer möglichen N-Nachlieferung abdecken und wurden daher steigend als Ergänzungsdüngung mit sechs Stufen appliziert. Die Stufen begannen mit einer Nullvariante ohne Düngung und steigerten sich von -60 kg über -30 kg unter Sollwert auf den Sollwert und darüber hinaus über

+30 kg auf +60 kg über Sollwert. Als Grundlage der Berechnung der Düngermengen wurde das Sollwertsystem der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen genutzt. Hierbei wird eine N-Bedarfsermittlung durchgeführt, bei der ein Sollwert mit einer Düngermenge festgelegt wird, von dem Vorfruchtwert, N_{min}-Gehalt des Bodens und organische Düngungen der Vorjahre abgezogen werden, um die zu düngende Menge Stickstoff zu erhalten.

Tabelle 11: Faktoren und Faktorstufen der Nachwirkungsversuche nach Erbsen und Ackerbohnen.

Faktor	Zahl der Faktorstufen	Faktorstufen
Jahr	2	1. 2018 2. 2019
Ort	2	1. Soester Börde 2. Haarstrang
Art	2	1. Vorfrucht Erbse 2. Vorfrucht Ackerbohne
Strohbergung	2	1. mit Strohbergung 2. ohne Strohbergung
N-Düngung	6	1. keine N-Düngung 2. -60 kg/ha N 3. -30 kg/ha N 4. N-Bedarfsermittlung (Sollwert) 5. +30 kg/ha N 6. +60 kg/ha N
Wiederholungen	4	n=4

3.2.1.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Nachwirkungsversuche wurden als Spaltanlage angelegt, wobei die Strohbergung die Großparzellen darstellt und innerhalb dieser die Düngestufen als Kleinparzellen angelegt wurden (Abbildung 9):

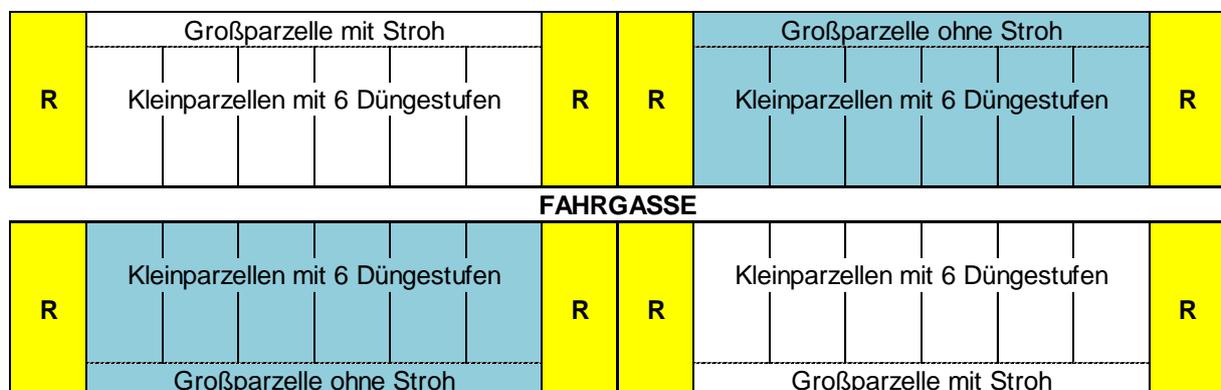


Abbildung 9: Exemplarischer Versuchsplan mit den Großparzellen ‚Strohbergung‘ und den Kleinparzellen ‚Düngestufen‘, exemplarisch für zwei Wiederholungen (R=Randparzellen).

Die Strohbergung wurde im Anschluss an die Ernte der Erbsen und Ackerbohnen per Hand durchgeführt sowie die Großparzellen festgelegt und eingemessen. Die Strohbergung erfolgte durch Harken der Fläche, ohne eine Nachbearbeitung durch Laubbläser oder ähnliches, um eine möglichst praxisnahe Entfernung zu simulieren, was geringe Strohreste auf der Fläche zur Folge hatte. Am Standort Soester Börde erfolgte die Einmessung der Parzellengrenzen über GPS-Koordinaten, während an den Standorten am Haarstrang mit Fixpunkten gearbeitet wurde. Um die geräumten und nicht geräumten Flächen im darauffolgenden Weizen ungehindert nutzen und Parzellen anlegen zu können, wurden die Großteilstücke links und rechts der Fahrgasse platziert. Ein weiterer Grund für die Anlage der Parzellen entlang der Fahrgassen war die Möglichkeit für die Landwirte, bei Düngemaßnahmen die Versuchsfläche ohne Beeinträchtigung der Restfläche aussparen zu können. Um innerhalb dieses Bereichs zu bleiben, mussten am Standort Ense-Bittingen die Parzellen auf 4 m gekürzt und stattdessen als Doppelparzellen (Gesamtbreite 3 m) angelegt werden, um eine ausreichende Parzellengröße zu sichern. Die Doppelparzellen waren durch eine Längstrennung gespalten, um eine Ernte mit der vorhandenen Versuchstechnik zu ermöglichen. Die Kleinparzellenmaße innerhalb der Versuche am Standort Soester Börde und Altenmellrich waren gleich. Das Parzellendesign ist im Anhang dargestellt (Abbildung A1).

Abweichend hiervon wurde für die Standorte am Haarstrang ein 1 m breiter Stirnrand gewählt, um Problemen durch breite Fahrzeugbereifung vorzubeugen. Da in Altenmellrich der Versuch nur in zwei Blöcken und die Kleinparzellen in Ense-Bittingen bereits gekürzt angelegt wurden, war dies ohne Konflikte mit weiteren Fahrgassen möglich. Für die Anlage der Weizenversuche am Standort Soester Börde stand die versuchsguteigene Technik zur Verfügung. Für die Standorte am Haarstrang musste der Versuch anhand der Fixpunkte eingemessen und die Trennungen zur Anlage der Parzellen per Hand zum BBCH-Stadium 10 des Weizens gespritzt werden.

Durch die über die Strohräumung vorgegebene Fläche entlang der Fahrgasse der Vorfrucht Erbse konnten im Jahr 2019 am Standort Altenmellrich die Parzellen nicht plangemäß angelegt werden, da durch die Sätechnik des Landwirtes die Fahrgasse im Winterweizen verschoben wurde. Um in den vorgegebenen Großparzellen zu bleiben, mussten im zweiten Block die Ernteparzellen in Wiederholung 3 um einen Meter auf sechs Meter und in Wiederholung 4 um zwei Meter auf fünf Meter gekürzt

werden. Dies wurde bei der Berechnung der Düngermengen und Erträge berücksichtigt. Da die ermittelten Parzellenergebnisse keine Auffälligkeiten aufwiesen, wurden sie genutzt.

Nach der Anlage der Versuche erfolgte im Herbst zu Vegetationsende die erste N_{\min} -Beprobung der Flächen, im Versuchsjahr 2018 am 06. und 07.12.2017 und im Versuchsjahr 2019 am 12., 13. und 14.11.2018. Zu diesem Zweck wurden in jeder Großparzelle acht Proben in den Tiefen 0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm mittels Göttinger Bohrbesteck genommen, gesiebt und als Mischprobe bis zur Untersuchung gekühlt aufbewahrt. Um die Auswaschung über den Winter beurteilen zu können, wurde im Frühjahr zu Vegetationsbeginn erneut nach gleichem Prinzip eine Bodenprobenentnahme durchgeführt, im Versuchsjahr 2018 am 14. und 16.02.2018 und im Versuchsjahr 2019 am 14., 15. und 18.02.2019.

Die Düngung der Kleinparzellen erfolgte auf Grundlage des Düngeplans und unter Berücksichtigung der durch die Bodenproben für jede Großparzelle ermittelten N_{\min} -Werte zu Vegetationsbeginn, weshalb für jede Großparzelle die Düngermenge einzeln berechnet wurde. Die erste Düngergabe erfolgte zur Förderung der Bestockung kurz nach Vegetationsbeginn, die zweite Gabe erfolgte zum Schossen. Im Jahr 2018 erfolgte die erste Gabe am 08. und 09.03. und die zweite am 24.04.; im Jahr 2019 erfolgte die erste Gabe am 27. und 28.02. und die zweite am 25.04. Im zweiten Versuchsjahr musste, wegen der hohen N_{\min} -Werte am Standort Soester Börde in der niedrigen Düngeintensität –60 kg auf eine Aufspaltung der Düngermenge auf zwei Teilgaben verzichtet werden, da eine gleichmäßige Verteilung über die Parzelle andernfalls nicht gewährleistet gewesen wäre. Die vollständige Gabe erfolgte in diesen Fällen zum Schossen. Düngemittel war Kalkammonsalpeter (KAS) mit 27% Stickstoffanteil. Es wurde auf eine Nutzung der Versuchstechnik verzichtet, da es sich um unterschiedliche Parzellenmaße handelte. Die Ausbringung des Düngers erfolgte per Hand, um alle Flächen der gleichen Vorgehensweise zu unterziehen. Am Standort Ense-Bittingen wurde zu Vegetationsbeginn, am Tag der geplanten Düngung der Kleinparzellen 2019, die Fläche mit Ammonsulfatsalpeter gedüngt und in diesem Zuge irrtümlich zwei Kleinparzellen des Versuchs mitgedüngt. Die auszubringende Menge KAS konnte um die irrtümlich durch den Landwirt verabreichte N-Menge reduziert und die Parzellen somit weiter genutzt werden.

Zur weiteren Beobachtung der Stickstoffdynamik sind Untersuchungen mittels Multispektralmessungen geeignet (WRIGHT et al., 2005). Berechnet wurde der *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), der sich aus der Differenz der Reflexionswerte von Nahinfrarot- und Rotlicht ergibt und daher Rückschlüsse auf Blattmasse, Chlorophyllgehalt und damit auch die Stickstoffversorgung zulässt, da die Pflanze den sichtbaren roten Wellenlängenbereich absorbiert, die Nahinfrarotstrahlung jedoch reflektiert. Genutzt wurde hierfür ein *GreenSeeker®*, bis bei diesem durch die Zunahme des *Leaf Area Index* während des Schossens eine Sättigung des NDVI (LILIENTHAL, 2014) erreicht wurde und damit keine Unterschiede mehr erkennbar waren. Die Untersuchungen wurden zur Abreife wiederaufgenommen, weil aufgrund der Seneszenz die NDVI-Werte kontinuierlich absanken (THAPA et al., 2019) und unterhalb der Sättigung lagen. Zusätzlich wurden zu den einzelnen Terminen die BBCH-Stadien des Bestands anhand von Pflanzen der betriebsüblich bewirtschafteten Restfläche bestimmt, um die Parzellen nicht zu schädigen. Die Restfläche entsprach dem Sollwert. Abweichungen hiervon aufgrund der Düngestufen wurden nicht erfasst. Die BBCH-Stadien und die Untersuchungstermine sind in Tabelle 12 aufgeführt:

Tabelle 12: Termine zur Ermittlung der NDVI-Werte und BBCH-Stadien des Weizens.

Jahr	Termine NDVI-Messungen						
	BBCH-Stadien zu den Terminen						
2018	06.04.	17.04.	27.04.	07.05.	02.07.	09.07.	
	30	31	32	34	83	85	
2019	29.03.	08.04.	23.04.	02.05.	13.05.	01.07.	09.07.
	29	30/29*	32/31*	33/32*	34/33*	77	83

* BBCH-Stadium am Standort Altenmellrich.

Für die Untersuchung mittels *GreenSeeker®* sprach, dass hierbei die vollständige Parzelle getestet wurde (Abbildung 10). Hierfür wurden jeweils zwei Kleinparzellen mit einer Geschwindigkeit von etwa 4 km/h überfahren und währenddessen der NDVI mit etwa 80 Messungen pro Parzelle, bezogen auf 7 m Nettolänge, in einem angeschlossenen Laptop als Mittelwert erfasst. Für die gekürzten Parzellen in Enselbittungen ergaben sich etwa 40 Messungen pro Parzelle, aus den Doppelparzellen wurden Mittelwerte gebildet. Wichtig für die korrekte Funktionsweise des *GreenSeeker®* war ein trockener Bestand (WESTERSCHULTE, 2013).



Abbildung 10: GreenSeeker®-Einsatz (links) und sichtbare N-Düngestufen innerhalb der Parzellen (rechts). Beide Aufnahmen nach Vorfrucht Erbse am Standort Haarstrang.

Die Ernte der Parzellen erfolgte im Jahr 2018 im Zeitraum vom 21. bis 25.07. an allen Standorten mit dem Parzellendrescher des Versuchsguts. Dabei handelte es sich um einen Haldrup C85 mit Schlingmann-Wiegesystem und Liebherr-Feuchtebestimmung. Im Versuchsjahr 2019 (30.07. bis 08.08.) wurden die Versuche am Standort Soester Börde und Ense-Bittingen ebenfalls mit diesem Gerät gedroschen. Der Versuch in Altenmellrich wurde durch die Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen geerntet, ebenfalls mit einem Haldrup-Drescher mit automatischem Wiegesystem. Die Feuchte wurde im Labor durch Trocknung über Nacht in einem Trockenschrank bestimmt (siehe 3.1.1.3 Versuchsaufbau und -durchführung). Die weitere Verarbeitung der Proben erfolgte in den Laboren in Merklingsen und Soest. Im Jahr 2019 kam es am Standort Ense-Bittingen zu Schädigungen einiger Kleinparzellen durch Schwarzwild. Die Schäden wurden ausgemessen und die Parzellenflächen für die Berechnung der Erträge entsprechend korrigiert.

3.2.2 Qualitätsanalysen

Zur Überprüfung der Auswirkung von Düngeintensität, Strohbergung und Vorfrucht wurde von jeder Kleinparzelle eine Kornprobe erfasst und hinsichtlich der Qualitätsparameter Tausendkornmasse (TKM) und Rohproteingehalt (XP) untersucht.

Tausendkornmasse

Zur Ermittlung der Tausendkornmasse wurden die Proben im Labor des Versuchsguts zunächst mit einem Retsch-Steigsichter gereinigt und im Anschluss daran zweimal 250 Körner mit einem Pfeuffer *Contador* abgezählt, woraus die Tausendkornmasse berechnet wurde.

NIRS-Analytik

Für die Ermittlung des Rohproteingehalts stand im Soester Labor ein Nahinfrarotspektrometer FOSS NIRSystems Model 5000 zur Verfügung. Hierfür wurden die Proben im Versuchsgut mit einer *Laboratory Mill 3100* auf 1 mm Größe vermahlen. Bei der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) wurden die vermahlenden Proben in Quarzglasküvetten gefüllt und in dreifacher Bestimmung mit kurzwelligem Infrarotlicht in Wellenlängen von 1100–2400 nm bestrahlt. Anhand der Absorption des Lichts wurde mit Hilfe von Kalibrationsgleichungen der Gehalt an XP geschätzt (DIETERLE et al., 2003). Die genutzte Kalibrationsgleichung war wz2004.eqa.

3.3 Statistik

Die Ernteterminversuche waren über zwei Jahre an zwei Standorten als dreifaktorielle Spaltanlagen aufgebaut, wobei die Erntetermine die Großteilstücke waren, innerhalb deren die Sorten zufällig angeordnet waren. Die Faktoren Jahr, Standort, Erntetermin, Sorte und Wiederholung sowie die Interaktion aller Faktoren wurde mittels Varianzanalyse auf Signifikanz getestet. Hierbei wurde jeweils eine eigenständige Varianzanalyse für die beiden Arten sowie für die Art der Konservierungen gerechnet. Die 2018 nachgesäten Kleinparzellen am Standort Soester Börde wurden wegen der fehlenden Vergleichbarkeit nicht in der Varianzanalyse berücksichtigt. Um die Zusammenhänge einzelner Parameter hinsichtlich Stroh und Silage zu bewerten, wurden Korrelationen der Gerüstsubstanzen berechnet. Da es sich bei den im Glaskolbentest geprüften Varianten um einzelne Wiederholungen handelt, ist es nicht

zulässig, für die Ergebnisse eine Varianzanalyse zu rechnen. Es wurde die Korrelation zwischen den gemessenen und den theoretischen Gasausbeuten sowie zwischen den Inhaltsstoffen und den gemessenen Gasausbeuten berechnet.

Die Nachwirkungsversuche waren ebenfalls über zwei Jahre an zwei Standorten als dreifaktorielle Spaltanlagen aufgebaut, wobei die Strohbergung die Großteilstücke waren, innerhalb deren die Düngeintensitäten zufällig angeordnet waren. Die Faktoren Jahr, Standort, Strohbergung, Düngeintensität und Wiederholung sowie die Interaktion aller Faktoren wurde mittels einer Varianzanalyse auf Signifikanz getestet. Hierbei wurde, mit Ausnahme der N_{\min} -Untersuchungen, jeweils eine eigenständige Varianzanalyse für die beiden Vorfrüchte Ackerbohne und Erbse gerechnet. Wegen der fehlenden Unabhängigkeit der einzelnen Untersuchungstermine wurde für die NDVI-Untersuchungen jeder Termin einzeln betrachtet. Für diese wurden getrennt nach Standort und Jahr jeweils Korrelationen zwischen NDVI und Ertrag bzw. NDVI und XP berechnet, um zu prüfen, inwieweit sich verschiedene Zeitpunkte beim Vegetationsindex zu Aussagen hinsichtlich Ertrag und XP eignen. Hierbei wurde der erste Termin im Jahr 2019 nicht berücksichtigt, da kein vergleichbarer Termin des ersten Versuchsjahres vorlag.

Die Daten wurden mit dem Statistikprogramm IBM SPSS Version 21 analysiert. Es handelte sich um einen multiplen Mittelwertvergleich mit einem Signifikanzniveau von 95%.

Die Grenzdifferenz zur Feststellung der signifikant unterschiedlichen Mittelwerte wurde nach folgender Formel, abgewandelt nach SCHUSTER & LOCHOW (1979), berechnet:

$$\text{GD 5\%} = \sqrt{2} * \text{Standardfehler} * \text{t-Wert (FG Fehler)}$$

4 Ergebnisse

4.1 Ernteterminversuche

4.1.1 Feldversuche

In den Feldversuchen wurden die Stroh- und Kornerträge von Erbsen und Ackerbohnen sowie deren TM-Gehalte zu allen Ernteterminen bestimmt. In Tabelle 13 bis Tabelle 16 sind die Ergebnisse der Ertragsermittlung sowie der Bestimmung des TM-Gehalts der Erbsen dargestellt. Tabelle 13 zeigt den Strohertrag der Erbsen. Die Erträge nahmen mit zunehmender Abreife ab; eine Ausnahme hiervon bildete der letzte Erntetermin am Standort Soester Börde im Jahr 2017. Die Kornerträge der Erbsen sind in Tabelle 14 dargestellt. Diese nahmen in den meisten Fällen mit zunehmender Abreife zu; teilweise stagnierten die Erträge auf einem Niveau. In seltenen Fällen kam es zur Abnahme des Ertrags mit fortschreitender Seneszenz. Die TM-Gehalte des Strohs (Tabelle 15) nahmen mit fortschreitender Abreife zu. Im Jahr 2017 waren die TM-Gehalte am Standort Soester Börde meist höher als die in Ostwestfalen-Lippe, im Jahr 2018 zeigte sich ein gegenteiliges Bild. Die TM-Gehalte des Korns (Tabelle 16) nahmen ebenfalls mit fortschreitender Abreife zu. In beiden Jahren waren die TM-Gehalte in der Soester Börde meist höher als am Standort Ostwestfalen-Lippe, zudem erfolgte in der Soester Börde eine größere Zunahme der TM-Gehalte zwischen den einzelnen Ernteterminen. Tabelle 17 schließlich zeigt die Grenzdifferenzen und p-Werte der signifikanten Wechselwirkungen.

Tabelle 13: Stroherträge (dt TM/ha) der Erbsen.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
			frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	41,00	47,47	34,43
		<i>Respect</i>	53,93	47,26	39,13
		<i>Astronaute</i>	47,39	42,30	32,90
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	58,53	45,75	76,83
		<i>Respect</i>	63,56	54,35	83,03
		<i>Astronaute</i>	56,99	48,41	64,23
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	49,08	42,73	38,03
		<i>Respect</i>	52,62	42,00	44,08
		<i>Astronaute</i>	59,40	46,33	39,84
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	47,22	47,58	35,38
		<i>Respect</i>	50,64	53,29	33,84
		<i>Astronaute</i>	50,64	53,29	33,84

Tabelle 14: Kornerträge (dt/ha) der Erbsen, bezogen auf 14% Feuchte.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
			frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	44,87	46,75	47,41
		<i>Respect</i>	46,35	45,69	42,38
		<i>Astronaut</i>	49,30	45,10	49,23
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	49,18	52,50	55,58
		<i>Respect</i>	60,06	58,55	57,37
		<i>Astronaut</i>	46,97	50,05	45,10
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	32,56	40,41	44,28
		<i>Respect</i>	34,22	39,26	45,90
		<i>Astronaut</i>	28,34	36,58	47,54
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	46,47	49,13	56,15
		<i>Respect</i>	46,47	49,13	56,15
		<i>Astronaut</i>	55,90	53,23	59,00

Tabelle 15: TM-Gehalte (%) des Erbsenstrohs.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
			frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	54,09	56,29	76,11
		<i>Respect</i>	49,86	49,99	76,39
		<i>Astronaut</i>	57,76	66,89	85,21
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	60,92	73,71	87,36
		<i>Respect</i>	51,93	70,50	88,56
		<i>Astronaut</i>	58,91	82,18	86,87
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	43,48	44,30	74,83
		<i>Respect</i>	41,18	44,70	76,69
		<i>Astronaut</i>	31,87	44,01	78,46
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	37,42	40,47	74,20
		<i>Respect</i>	37,42	40,47	74,20
		<i>Astronaut</i>	48,88	52,93	87,38

Tabelle 16: TM-Gehalte (%) des Erbsenkorns.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
			frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	74,86	76,35	79,62
		<i>Respect</i>	77,39	78,36	78,27
		<i>Astronaut</i>	70,30	77,97	80,98
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	72,99	82,02	85,49
		<i>Respect</i>	76,21	81,27	85,90
		<i>Astronaut</i>	67,75	81,67	85,18
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	58,45	61,26	82,57
		<i>Respect</i>	55,22	64,53	82,89
		<i>Astronaut</i>	44,13	59,37	81,98
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	68,84	74,64	86,23
		<i>Respect</i>	68,84	74,64	86,23
		<i>Astronaut</i>	72,71	75,65	87,28

In Tabelle 17 sind die Grenzdifferenzen und p-Werte der signifikanten Haupt- und Wechselwirkungen der Erträge und TM-Gehalte der Erbsen ausgewiesen. Die jeweils höchsten Wechsel- sowie alle Hauptwirkungen sind im Anhang dargestellt.

Tabelle 17: Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit und p-Werte von Erträgen und TM-Gehalten bei Erbsenstroh und -korn (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).

Faktoren	Strohertrag		Kornertrag		TM-Stroh		TM-Korn	
	GD*	p	GD*	p	GD*	p	GD*	p
O	2,2	0,000	0,7	0,000	2,6	0,001	1,4	0,000
J	2,2	0,003	0,7	0,000	2,6	0,000	1,4	0,000
T	2,9	0,008	0,9	0,000	3,3	0,000	1,8	0,000
S	2,7	0,017	0,9	0,000	3,1	0,015	1,7	0,027
T*S	n.s.		1,5	0,009	n.s.		3,0	0,041
O*T	3,9	0,001	1,2	0,010	n.s.		n.s.	
O*J	3,2	0,000	1,0	0,000	n.s.		2,0	0,000
J*S	3,9	0,044	1,2	0,001	n.s.		n.s.	
J*T	3,9	0,003	1,2	0,000	4,9	0,003	2,4	0,000
S*O	n.s.		1,2	0,000	n.s.		n.s.	
O*J*S	n.s.		1,7	0,000	6,3	0,007	3,4	0,018
O*J*T	5,5	0,001	1,7	0,001	n.s.		n.s.	
O*T*S	n.s.		2,1	0,004	n.s.		n.s.	
J*T*S	n.s.		2,1	0,043	n.s.		n.s.	
O*J*T*S	n.s.		3,0	0,038	n.s.		n.s.	

* Angabe in dt TM/ha bei Strohertrag und dt/ha bezogen auf 14% Feuchte bei Kornertrag,

+ Angabe in %, GD=Grenzdifferenz, O=Standort, J=Jahr, T=Erntetermin, S=Sorte, n.s.=nicht signifikant.

In Tabelle 18 bis Tabelle 21 sind die Ergebnisse der Ertragsermittlung sowie der Trockenmassebestimmung der Ackerbohnen dargestellt. Tabelle 18 zeigt die Stroherträge der Ackerbohnen. Der Strohertrag war im Jahr 2017 am Standort Soester Börde niedriger als in Ostwestfalen-Lippe, im Jahr 2018 war das Gegenteil der Fall. Unabhängig hiervon kam es durch die Abreife zur Abnahme des Strohertrags. Die Sorte *Taifun* erzielte geringere Stroherträge als die anderen Sorten. Der Kornertrag (Tabelle 19) stieg am Standort Ostwestfalen-Lippe im Jahr 2017 zunächst an, bevor es zum Termin Totreife zu einer Abnahme kam. Der Ertrag am Standort Soester Börde stagnierte während der ersten drei Erntetermine und fiel dann ab. 2018 kam es nicht zu Ertragseinbußen zum letzten Termin; die Erträge stagnierten oder nahmen zu. Die Höhe des Ertrags blieb in Ostwestfalen-Lippe 2018 deutlich unter dem des Jahres 2017, am Standort Soester Börde waren die Ertragsunterschiede zwischen den Jahren abhängig vom Erntetermin. Die TM-Gehalte des Strohs (Tabelle 20) stiegen mit zunehmender Abreife und waren im Jahr 2017, mit Ausnahme des Termins Totreife, niedriger als 2018. In beiden Jahren waren zu den ersten beiden Terminen die TM-

Gehalte am Standort Soester Börde höher, bevor der Anstieg der TM in Ostwestfalen-Lippe den der Soester Börde überstieg und die TM-Gehalte in der Folge in Ostwestfalen-Lippe im Jahr 2017 höher und im Jahr 2018 auf gleichem Niveau waren.

Tabelle 18: Stroherträge (dt TM/ha) der Ackerbohnen.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin			Totreife
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	51,07	49,99	43,72	34,03
		<i>Tiffany</i>	48,89	45,13	42,41	31,29
		<i>Taifun</i>	42,20	37,82	38,84	28,35
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	52,29	32,16	29,95	26,41
		<i>Tiffany</i>	45,68	32,02	31,92	28,17
		<i>Taifun</i>	44,48	26,79	27,08	27,36
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	37,58	34,13	27,34	25,02
		<i>Tiffany</i>	36,08	35,88	28,09	29,49
		<i>Taifun</i>	28,33	27,70	23,66	24,72
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	63,72	38,11	42,97	42,66
		<i>Tiffany</i>	64,32	43,28	49,64	47,77
		<i>Taifun</i>	52,73	35,58	40,17	39,04

Tabelle 19: Kornerträge (dt/ha) der Ackerbohnen, bezogen auf 14% Feuchte.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin			Totreife
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	46,66	54,44	63,81	52,46
		<i>Tiffany</i>	47,38	48,76	57,67	48,17
		<i>Taifun</i>	46,19	47,99	53,39	44,88
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	49,84	49,67	48,47	41,57
		<i>Tiffany</i>	49,80	49,41	53,73	47,66
		<i>Taifun</i>	46,04	42,68	46,07	43,45
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	21,17	23,69	26,15	25,41
		<i>Tiffany</i>	20,98	23,30	25,36	29,78
		<i>Taifun</i>	21,96	24,32	26,77	25,36
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	54,94	49,37	55,63	53,22
		<i>Tiffany</i>	59,25	54,40	57,07	59,05
		<i>Taifun</i>	53,71	49,06	46,15	52,71

Tabelle 20: TM-Gehalte (%) des Ackerbohnenstrohs.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin			Totreife
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	35,82	46,52	65,39	83,10
		<i>Tiffany</i>	32,58	43,42	64,80	83,83
		<i>Taifun</i>	26,97	47,82	64,91	83,83
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	47,16	52,97	60,13	77,90
		<i>Tiffany</i>	38,09	50,94	51,42	69,88
		<i>Taifun</i>	39,87	48,09	54,21	80,00
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	40,76	58,54	71,28	81,26
		<i>Tiffany</i>	40,46	55,99	71,97	82,60
		<i>Taifun</i>	43,67	62,11	75,99	85,93
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	55,14	64,12	69,28	81,22
		<i>Tiffany</i>	53,29	58,13	68,90	79,40
		<i>Taifun</i>	49,27	67,89	78,74	81,80

Tabelle 21 zeigt die TM-Gehalte des Korns. Diese waren in beiden Jahren am Standort Soester Börde zunächst höher als in Ostwestfalen-Lippe, glichen sich jedoch mit dem Anstieg durch die Seneszenz im Verlauf der Erntetermine an. Die TM-Gehalte des Korns waren bei den Sorten *Tiffany* und *Fuego* häufig höher als bei *Taifun*, insbesondere zu den frühen Ernteterminen.

In Tabelle 22 sind die Grenzdifferenzen und p-Werte aller signifikanten Haupt- und Wechselwirkungen aufgeführt; die Darstellungen der Haupt- und jeweils höchsten Wechselwirkungen befinden sich im Anhang.

Tabelle 21: TM-Gehalte (%) des Ackerbohnenkorns.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin			Totreife
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	62,01	78,15	80,69	83,52
		<i>Tiffany</i>	60,82	78,70	80,82	83,43
		<i>Taifun</i>	55,61	78,54	80,76	83,20
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	81,80	83,37	82,04	85,38
		<i>Tiffany</i>	81,32	83,71	81,88	85,25
		<i>Taifun</i>	80,46	82,72	80,95	85,58
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	65,61	79,56	85,48	88,77
		<i>Tiffany</i>	68,53	79,60	85,62	88,52
		<i>Taifun</i>	66,95	80,12	85,79	89,08
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	80,49	85,58	87,21	88,55
		<i>Tiffany</i>	83,02	86,07	87,49	88,65
		<i>Taifun</i>	78,37	86,21	87,49	88,14

Tabelle 22: Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit sowie p-Werte von Erträgen und TM-Gehalten bei Ackerbohnenstroh und -korn (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).

Faktoren	Strohertrag		Kornertrag		TM-Stroh		TM-Korn	
	GD*	p	GD*	p	GD+	p	GD+	p
O	1,2	0,000	1,2	0,000	n.s.		0,5	0,000
J	n.s.		1,2	0,000	1,6	0,000	0,5	0,000
T	1,8	0,000	1,8	0,001	2,4	0,000	0,8	0,000
S	1,5	0,000	1,6	0,000	2,0	0,007	0,7	0,035
T*S	n.s.		n.s.		n.s.		1,6	0,018
O*T	2,8	0,000	2,8	0,000	3,6	0,000	1,2	0,000
O*S	n.s.		2,3	0,003	n.s.		n.s.	
O*J	1,8	0,000	1,8	0,000	2,4	0,020	0,8	0,001
J*S	2,3	0,009	n.s.		3,0	0,016	n.s.	
J*T	2,8	0,002	2,8	0,001	3,6	0,000	1,2	0,001
O*J*T	4,6	0,026	n.s.		n.s.		1,9	0,000

* Angabe in dt TM/ha bei Strohertrag und dt/ha bezogen auf 14% Feuchte bei Kornertrag,

+ Angabe in %, GD=Grenzdifferenz, O=Standort, J=Jahr, T=Erntetermin, S=Sorte, n.s.=nicht signifikant.

4.1.2 Laboranalysen

4.1.2.1 Silagenbewertungen

Tabelle 23 bis Tabelle 28 zeigen die Beurteilungsergebnisse der Strohsilagen beider Kulturen mittels DLG-Sinnenprüfung sowie den Vergleich der TM-Gehalte vor und nach der Silierung. Aufgrund der bereits sehr hohen TM-Gehalte konnten zu den letzten Ernteterminen keine Laborsilagen mehr hergestellt werden. Wegen der fehlenden Vergleichbarkeit, bedingt durch unterschiedliche Siliererfolge und Abreifen, können die beiden Jahre nicht direkt miteinander verglichen werden.

Tabelle 23 und Tabelle 24 zeigen die Ergebnisse der DLG-Sinnenprüfung der Erbsenstrohsilagen.

Tabelle 23 zeigt die Ergebnisse aus dem Jahr 2017. Trotz des geringen Zeitraums von zwei Tagen zwischen den Ernteterminen wurden die Ergebnisse der Sinnprüfung durch die Abreife beeinflusst, was durch eine Zunahme des pH-Werts sowie einen Anstieg der Schimmelbelastung, insbesondere am Standort Soester Börde, ersichtlich wurde. Die Silagen des zweiten Termins an diesem Standort mussten als ‚nicht mehr stabil unter Praxisbedingungen‘ bezeichnet werden.

Tabelle 23: Bewertung der Erbsenstrohsilagen im Erntejahr 2017.

Standort	Termin	Sorte	Ger.	Gef.	F.	Sch.	Erw.	H.	pH-Wert
Ostwestfalen-Lippe	frühe Druschreife	<i>Navarro</i>	0,50	0,25	0,50	0,00	0,00	0,50	4,93
		<i>Respect</i>	0,25	0,25	0,75	0,00	0,00	0,25	4,63
		<i>Astronaut</i>	1,25	0,25	0,50	0,75	0,00	0,00	5,48
	zur Druschreife	<i>Navarro</i>	1,00	0,25	3,00	1,75	0,00	1,00	5,80
		<i>Respect</i>	1,25	0,00	2,50	1,75	0,00	1,25	5,22
		<i>Astronaut</i>	1,75	0,00	0,75	0,75	0,00	1,00	6,22
Soester Börde	frühe Druschreife	<i>Navarro</i>	1,50	0,75	1,25	0,00	0,00	1,25	5,11
		<i>Respect</i>	1,00	0,25	0,25	0,00	0,00	0,25	4,73
		<i>Astronaut</i>	1,25	0,25	0,50	0,75	0,00	0,50	5,40
	zur Druschreife	<i>Navarro</i>	3,50	0,00	3,50	6,75	0,00	0,00	6,24
		<i>Respect</i>	4,50	0,00	5,25	9,75	0,00	0,00	6,19
		<i>Astronaut</i>	3,00	0,00	0,25	3,00	0,00	0,00	7,38

Ger.=Geruch, Gef.=Gefüge, F.=Farbe, Sch.=Schimmel, Erw.=Erwärmung, H.=Hefen.

Tabelle 24 zeigt die Ergebnisse der DLG-Sinnenprüfung für die Erbsenstrohsilagen des Jahres 2018. Termin und Sorten unterschieden sich nur gering, der pH-Wert war in der Soester Börde in den meisten Fällen höher als am Standort Ostwestfalen-Lippe. Eine deutliche Steigerung des pH-Werts vom ersten zum zweiten Erntetermin wie im

ersten Versuchsjahr wurde nicht festgestellt. Änderungen des Gefüges, Schimmelbefall oder Erwärmungen traten nicht auf.

Tabelle 24: Bewertung der Erbsenstrohsilagen im Erntejahr 2018.

Standort	Termin	Sorte	Ger.	Gef.	F.	Sch.	Erw.	H.	pH-Wert
Ostwestfalen-Lippe	frühe Druschreife	Navarro	2,00	0,00	1,00	0,00	0,00	2,00	4,95
		Respect	1,00	0,00	0,50	0,00	0,00	1,00	4,74
		Astronaute	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,14
	zur Druschreife	Navarro	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	5,11
		Respect	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	4,71
		Astronaute	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	5,04
Soester Börde	frühe Druschreife	Navarro	0,75	0,00	0,25	0,00	0,00	0,25	5,31
		Astronaute	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,19
	zur Druschreife	Navarro	2,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,22
		Astronaute	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	4,96

Ger.=Geruch, Gef.=Gefüge, F.=Farbe, Sch.=Schimmel, Erw.=Erwärmung, H.=Hefen.

Tabelle 25 zeigt den Vergleich der TM-Gehalte vor und nach der Silierung des Erbsenstrohs. In beiden Jahren gab es Unterschiede zwischen den Terminen, Standorten und Sorten. Auffällig waren die hohen TM-Gehalte am Standort Soester Börde im ersten Versuchsjahr.

Tabelle 25: Vergleich der TM-Gehalte (%) vor und nach der Silierung des Erbsenstrohs.

Jahr	Standort	Sorte	frühe Druschreife		zur Druschreife	
			Originalsubstanz	Silage	Originalsubstanz	Silage
2017	Ostwestfalen-Lippe	Navarro	54,1	47,4	56,3	49,6
		Respect	49,9	43,9	50,0	51,1
		Astronaute	57,8	61,0	66,9	65,4
	Soester Börde	Navarro	60,9	49,4	73,7	70,2
		Respect	51,9	47,0	70,5	73,6
		Astronaute	58,9	66,0	82,2	81,4
2018	Ostwestfalen-Lippe	Navarro	43,5	39,7	44,3	38,5
		Respect	41,2	38,2	44,7	43,9
		Astronaute	31,9	27,8	44,0	40,7
	Soester Börde	Navarro	37,4	32,9	40,5	34,8
		Astronaute	48,9	41,7	52,9	49,1

In Tabelle 26 und Tabelle 27 sind die Ergebnisse der DLG-Sinnenprüfung der Ackerbohnenstrohsilagen dargestellt.

Tabelle 26 zeigt die Ergebnisse der DLG-Sinnenprüfung für die Ackerbohnenstrohsilagen des Jahres 2017. Die Silagen des ersten Erntetermins waren ausnahmslos frei von Fehlgärungen, auch die Silagen der späteren Termine hatten einen niedrigen pH-Wert und nur in seltenen Fällen Fehlgärungen durch Hefen. Veränderungen in Farbe und Gefüge oder durch Erwärmung wurden in keiner Silage festgestellt und nur eine Variante war von Schimmel betroffen.

Tabelle 26: Bewertung der Ackerbohnenstrohsilagen im Erntejahr 2017.

Standort	Termin	Sorte	Ger.	Gef.	F.	Sch.	Erw.	H.	pH-Wert
Ostwestfalen-Lippe	frühe Druschreife	<i>Fuego</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,89
		<i>Tiffany</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,49
		<i>Taifun</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,45
	zur Druschreife	<i>Fuego</i>	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,70
		<i>Tiffany</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,64
		<i>Taifun</i>	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	4,69
	späte Druschreife	<i>Fuego</i>	1,75	0,00	0,00	0,00	0,00	1,75	5,10
		<i>Tiffany</i>	1,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,25	5,27
		<i>Taifun</i>	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	5,02
Soester Börde	frühe Druschreife	<i>Fuego</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,49
		<i>Tiffany</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,46
		<i>Taifun</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,30
	zur Druschreife	<i>Fuego</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,77
		<i>Tiffany</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,63
		<i>Taifun</i>	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	4,68
	späte Druschreife	<i>Fuego</i>	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	4,80
		<i>Tiffany</i>	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	4,44
		<i>Taifun</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,57

Ger.=Geruch, Gef.=Gefüge, F.=Farbe, Sch.=Schimmel, Erw.=Erwärmung, H.=Hefen.

Tabelle 27 zeigt die Ergebnisse der Ackerbohnenstrohsilagen des Jahres 2018. Wegen der bereits stark erhöhten TM-Gehalte wurden zum dritten Erntetermin am Standort Soester Börde keine Strohsilagen mehr erstellt. Die vorhandenen Unterschiede wurden ausnahmslos durch den Erntetermin verursacht. Die Parameter Geruch, Schimmel, Hefen sowie der pH-Wert nahmen mit zunehmender Abreife tendenziell zu.

Tabelle 27: Bewertung der Ackerbohnenstrohsilagen im Erntejahr 2018.

Standort	Termin	Sorte	Ger.	Gef.	F.	Sch.	Erw.	H.	pH-Wert
Ostwestfalen-Lippe	frühe Druschreife	<i>Fuego</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,01
		<i>Tiffany</i>	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	4,82
		<i>Taifun</i>	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	4,85
	zur Druschreife	<i>Fuego</i>	1,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	4,92
		<i>Tiffany</i>	0,75	0,25	0,00	0,00	0,00	0,25	4,85
		<i>Taifun</i>	1,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	5,06
	späte Druschreife	<i>Fuego</i>	1,25	0,00	0,00	0,75	0,00	0,50	5,17
		<i>Tiffany</i>	1,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,25	5,12
		<i>Taifun</i>	1,50	0,00	0,00	0,75	0,00	0,75	5,28
Soester Börde	frühe Druschreife	<i>Fuego</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,92
		<i>Tiffany</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,02
		<i>Taifun</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,73
	zur Druschreife	<i>Fuego</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,21
		<i>Tiffany</i>	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,86
		<i>Taifun</i>	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	5,14

Ger.=Geruch, Gef.=Gefüge, F.=Farbe, Sch.=Schimmel, Erw.=Erwärmung, H.=Hefen.

Tabelle 28 zeigt den Vergleich der TM-Gehalte vor und nach der Silierung des Ackerbohnenstrohs. Wie beim Erbsenstroh gab es Unterschiede in beiden Jahren sowie zwischen den Terminen, Standorten und Sorten.

Tabelle 28: Vergleich der TM-Gehalte (%) vor und nach der Silierung des Ackerbohnenstrohs.

Jahr	Standort	Sorte	frühe Druschreife		zur Druschreife		späte Druschreife	
			O.	S.	O.	S.	O.	S.
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	35,8	30,0	46,5	41,8	65,4	64,5
		<i>Tiffany</i>	32,6	27,2	43,4	41,0	64,8	64,4
		<i>Taifun</i>	27,0	24,4	47,8	46,5	64,9	64,2
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	47,2	46,4	53,0	51,1	60,1	58,5
		<i>Tiffany</i>	38,1	41,4	50,9	48,4	51,4	49,3
		<i>Taifun</i>	39,9	42,3	48,1	45,4	54,2	52,6
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	40,8	38,2	58,5	58,6	71,3	72,0
		<i>Tiffany</i>	40,5	37,5	56,0	53,5	72,0	72,3
		<i>Taifun</i>	43,7	39,6	62,1	60,4	76,0	77,2
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	55,1	48,4	64,1	58,4	69,3	*
		<i>Tiffany</i>	53,3	47,0	58,1	54,9	68,9	*
		<i>Taifun</i>	49,3	43,8	67,9	68,4	78,7	*

O.=TM-Gehalte der Originalsubstanz, S.=TM-Gehalte der Silagen, *=keine Silage, wegen erhöhter TM-Gehalte.

4.1.2.2 Inhaltsstoffanalysen

Tabelle 29 bis Tabelle 31 zeigen die Ergebnisse für das Erbsenstroh. Alle Gehalte an Rohprotein und Gerüstsubstanzen waren im Jahr 2017 höher als 2018 (Tabelle 29 und Tabelle 30). Das Stroh der Soester Börde enthielt mehr Rohprotein, Hemizellulose und Lignin. Die Gerüstsubstanzen nahmen mit fortschreitender Seneszenz zu, der Rohproteingehalt sank. Durch die Sorten wurden der Rohprotein- und Hemizellulosegehalt signifikant beeinflusst. Die Rohaschegehalte (Tabelle 31) nahmen im ersten Jahr mit fortschreitender Abreife kontinuierlich ab, während im zweiten Jahr keine Abnahme, sondern in Einzelfällen eine Zunahme des Aschegehalts vorlag. Zusätzlich hierzu gab es sowohl Standort- als auch Sortenunterschiede.

Signifikante Wechselwirkungen ergaben sich mit Ausnahme des Lignins für alle Inhaltsstoffe, die Hauptwirkungen waren fast alle signifikant (Tabelle 32). Die Darstellung der Haupt- und jeweils höchsten Wechselwirkungen erfolgt im Anhang.

Tabelle 29: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohproteingehalt des Erbsenstrohs (% in TM).

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
			frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	6,71	7,01	5,69
		<i>Respect</i>	5,90	6,15	5,58
		<i>Astronaut</i>	6,23	6,21	5,51
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	8,31	7,41	6,49
		<i>Respect</i>	6,77	7,50	5,55
		<i>Astronaut</i>	8,46	8,18	7,02
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	6,07	6,19	5,21
		<i>Respect</i>	6,04	5,63	4,90
		<i>Astronaut</i>	8,35	6,02	4,74
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	8,11	7,30	6,13
		<i>Respect</i>	7,95	6,94	5,54
		<i>Astronaut</i>	7,95	6,94	5,54

Tabelle 30: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf die Gerüstsubstanzen des Erbsenstrohs (% in TM).

Inhaltsstoff	Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
				frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
Hemi- zellulose	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Navarro</i>	16,83	16,92	17,59
			<i>Respect</i>	16,67	17,82	18,31
			<i>Astronaut</i>	15,83	17,33	18,05
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	16,65	18,48	19,00
			<i>Respect</i>	17,82	18,70	19,67
			<i>Astronaut</i>	17,05	18,24	17,90
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Navarro</i>	16,08	16,55	17,60
			<i>Respect</i>	14,35	15,67	17,91
			<i>Astronaut</i>	14,12	15,35	17,72
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	16,36	16,77	17,95
			<i>Astronaut</i>	16,78	16,94	18,32
Zellulose	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Navarro</i>	38,96	40,83	45,15
			<i>Respect</i>	39,64	41,49	46,28
			<i>Astronaut</i>	40,03	43,22	46,07
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	38,76	42,89	45,20
			<i>Respect</i>	39,79	41,07	46,86
			<i>Astronaut</i>	38,29	41,63	47,07
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Navarro</i>	33,41	33,75	40,12
			<i>Respect</i>	33,04	33,68	39,54
			<i>Astronaut</i>	30,95	32,58	39,90
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	32,76	33,51	39,74
			<i>Astronaut</i>	32,66	33,50	43,13
Lignin	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Navarro</i>	9,43	9,76	11,70
			<i>Respect</i>	9,89	10,49	12,49
			<i>Astronaut</i>	9,75	11,01	12,55
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	11,46	11,52	13,17
			<i>Respect</i>	10,82	11,53	13,55
			<i>Astronaut</i>	11,14	11,41	14,02
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Navarro</i>	6,83	6,91	8,51
			<i>Respect</i>	7,31	7,61	9,14
			<i>Astronaut</i>	6,48	6,80	8,76
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	7,61	7,77	10,10
			<i>Astronaut</i>	7,64	7,75	10,20

Tabelle 31: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohaschegehalt des Erbsenstrohs (% in TM).

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
			frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	Navarro	11,03	9,19	7,81
		Respect	8,47	6,96	5,79
		Astronaut	11,09	9,11	6,52
	Soester Börde	Navarro	11,57	8,12	5,26
		Respect	10,25	7,41	4,50
		Astronaut	13,15	8,47	5,25
2018	Ostwestfalen-Lippe	Navarro	9,27	9,56	9,87
		Respect	7,21	7,65	7,63
		Astronaut	8,21	9,79	9,14
	Soester Börde	Navarro	10,28	10,58	9,32
		Respect	9,97	11,21	8,24
		Astronaut			

Tabelle 32: Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in % in TM und p-Werte der Inhaltsstoffe von Erbsenstroh (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).

Faktoren	Rohprotein		Hemizellulose		Zellulose		Lignin		Rohasche	
	GD	p	GD	p	GD	p	GD	p	GD	p
O	0,26	0,000	0,20	0,000	n.s.		0,29	0,000	n.s.	
J	0,26	0,013	0,20	0,000	0,66	0,000	0,29	0,000	0,34	0,003
T	0,34	0,000	0,25	0,000	0,85	0,000	0,37	0,000	0,44	0,000
S	0,32	0,006	0,24	0,016	n.s.		n.s.		0,42	0,000
O*T	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		0,59	0,001
O*J	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		0,48	0,017
J*S	n.s.		0,34	0,044	n.s.		n.s.		n.s.	
J*T	n.s.		0,34	0,003	1,14	0,017	n.s.		0,59	0,000
O*T*S	n.s.		0,59	0,014	n.s.		n.s.		n.s.	
O*J*S	0,65	0,012	0,48	0,006	1,62	0,029	n.s.		n.s.	
O*J*T	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.	

GD=Grenzdifferenz, O=Standort, J=Jahr, T=Erntetermin, S=Sorte, n.s.=nicht signifikant.

Ein ähnliches Bild wie das Erbsenstroh zeigen die Ergebnisse der Erbsenstrohsilagen (Tabelle 33 bis Tabelle 35). Auch hier unterschieden sich alle Inhaltsstoffe hinsichtlich der Jahre voneinander, wobei der Rohproteingehalt (Tabelle 33) nur am Standort Ostwestfalen-Lippe im Jahr 2018 höher war. Zeitgleich waren die Gehalte an Zellulose und Lignin (Tabelle 34) geringer als 2017, während dies bei der Hemizellulose nicht immer der Fall war. Auch die Standorte wichen mit Ausnahme der Zellulose voneinander ab; die Werte der Soester Börde lagen über denen in Ostwestfalen-Lippe. Die Erntetermine differierten nur hinsichtlich der Hemizellulose im Jahr 2017 am Standort Soester Börde, hier nahm die Hemizellulose mit fortschreitender Seneszenz zu. Bei den Sorten unterschied sich *Respect* bezüglich des Rohprotein- und Ligningehalts von den anderen Sorten. Der Hemizellulosegehalt der Strohsilagen war niedriger als der des Strohs, die Abnahme durch die Silierung war jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Rohaschegehalte (Tabelle 35) nahmen im ersten Jahr vom ersten zum zweiten Termin hin ab, im zweiten Jahr verhielt es sich umgekehrt.

In Tabelle 36 sind die Grenzdifferenzen und p-Werte aller signifikanten Haupt- und Wechselwirkungen aufgeführt.

Tabelle 33: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohproteingehalt der Erbsenstrohsilagen (% in TM).

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin	
			frühe Druschreife	zur Druschreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	6,03	6,04
		<i>Respect</i>	6,31	6,04
		<i>Astronaute</i>	6,40	6,37
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	7,86	7,57
		<i>Respect</i>	7,13	7,84
		<i>Astronaute</i>	7,52	7,97
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	7,80	7,00
		<i>Respect</i>	7,60	6,87
		<i>Astronaute</i>	9,92	7,15
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	7,77	7,97
		<i>Respect</i>	7,77	7,97
		<i>Astronaute</i>	6,97	7,82

Tabelle 34: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf die Gerüstsubstanzen der Erbsenstrohsilagen (% in TM).

Inhaltsstoff	Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin	
				frühe Druschreife	zur Druschreife
Hemizellulose	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Navarro</i>	14,69	14,54
			<i>Respect</i>	15,29	15,17
			<i>Astronaute</i>	15,33	15,68
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	14,32	17,27
			<i>Respect</i>	15,47	18,21
			<i>Astronaute</i>	15,64	17,45
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Navarro</i>	14,75	14,39
			<i>Respect</i>	14,42	14,44
			<i>Astronaute</i>	13,71	13,94
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	15,44	15,27
			<i>Respect</i>	15,44	15,27
			<i>Astronaute</i>	15,61	14,70
Zellulose	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Navarro</i>	41,03	41,93
			<i>Respect</i>	40,97	41,76
			<i>Astronaute</i>	41,38	41,24
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	38,61	41,06
			<i>Respect</i>	40,70	40,29
			<i>Astronaute</i>	40,80	41,14
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Navarro</i>	35,48	35,83
			<i>Respect</i>	35,41	35,16
			<i>Astronaute</i>	34,75	35,17
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	36,41	36,09
			<i>Respect</i>	36,41	36,09
			<i>Astronaute</i>	37,29	34,19
Lignin	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Navarro</i>	10,41	10,68
			<i>Respect</i>	10,44	11,17
			<i>Astronaute</i>	10,52	11,24
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	12,59	11,31
			<i>Respect</i>	12,56	11,92
			<i>Astronaute</i>	11,69	11,51
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Navarro</i>	7,62	7,26
			<i>Respect</i>	8,12	7,79
			<i>Astronaute</i>	7,91	7,39
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	8,49	8,63
			<i>Respect</i>	8,49	8,63
			<i>Astronaute</i>	8,91	7,69

Tabelle 35: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohaschegehalt der Erbsenstrohsilagen (% in TM).

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin	
			frühe Druschreife	zur Druschreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	Navarro	12,13	10,77
		Respect	9,17	8,80
		Astronaute	11,67	10,41
	Soester Börde	Navarro	13,48	9,65
		Respect	11,33	8,68
		Astronaute	11,20	8,84
2018	Ostwestfalen-Lippe	Navarro	10,20	10,87
		Respect	8,06	8,57
		Astronaute	9,67	10,80
	Soester Börde	Navarro	10,94	11,45
		Astronaute	10,96	11,77

Tabelle 36: Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in % in TM und p-Werte der Inhaltsstoffe von Erbsenstrohsilagen (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).

Faktoren	Rohprotein		Hemizellulose		Zellulose		Lignin		Rohasche	
	GD	p	GD	p	GD	p	GD	p	GD	p
O	0,22	0,004	0,28	0,001	n.s.		0,18	0,000	n.s.	
J	0,22	0,003	0,28	0,003	0,92	0,001	0,18	0,000	n.s.	
T	n.s.		0,29	0,010	n.s.		0,19	0,022	n.s.	
S	0,27	0,027	n.s.		n.s.		0,22	0,034	4,69	0,049
O*T	0,31	0,003	0,40	0,010	n.s.		0,26	0,011	n.s.	
O*S	0,38	0,023	n.s.		n.s.		0,32	0,042	n.s.	
O*J	0,31	0,002	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.	
J*S	n.s.		0,49	0,022	n.s.		n.s.		n.s.	
J*T	n.s.		0,40	0,007	n.s.		0,26	0,042	1,34	0,032
O*T*S	0,54	0,028	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.	
O*J*S	0,54	0,032	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.	
O*J*T	0,44	0,007	0,56	0,008	n.s.		0,36	0,028	n.s.	
J*T*S	n.s.		n.s.		n.s.		0,45	0,027	n.s.	
O*J*T*S	n.s.		n.s.		n.s.		0,63	0,045	n.s.	

GD=Grenzdifferenz, O=Standort, J=Jahr, T=Erntetermin, S=Sorte, n.s.=nicht signifikant.

Um zu überprüfen, ob der Voraufschluss durch die Silierung einen Effekt auf die Gerüstsubstanzen hat, wurden hinsichtlich dieser Inhaltsstoffe Korrelationen zwischen Stroh und Silage berechnet. Eine positive Korrelation und ein hohes Bestimmtheitsmaß zeigen in diesem Fall einen geringen Einfluss der Silierung auf die Inhaltsstoffe. Für die Erbsen ergab sich bezüglich der Hemizellulose ein geringes Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,472^{***}$, für die Zellulose $R^2=0,710^{***}$ und für das Lignin $R^2=0,860^{***}$ (Abbildung 11 bis Abbildung 13).

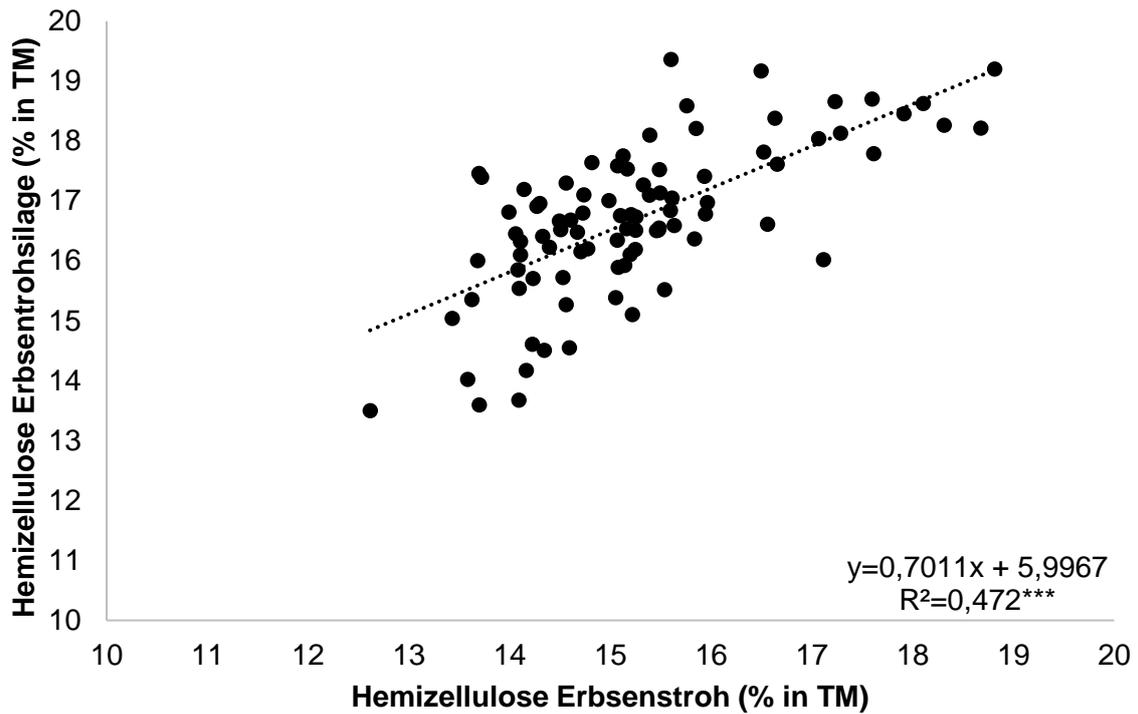


Abbildung 11: Lineare Regression und Bestimmtheitsmaß der Hemizellulose zwischen Erbsenstrohsilage und Erbsenstroh (n=88).

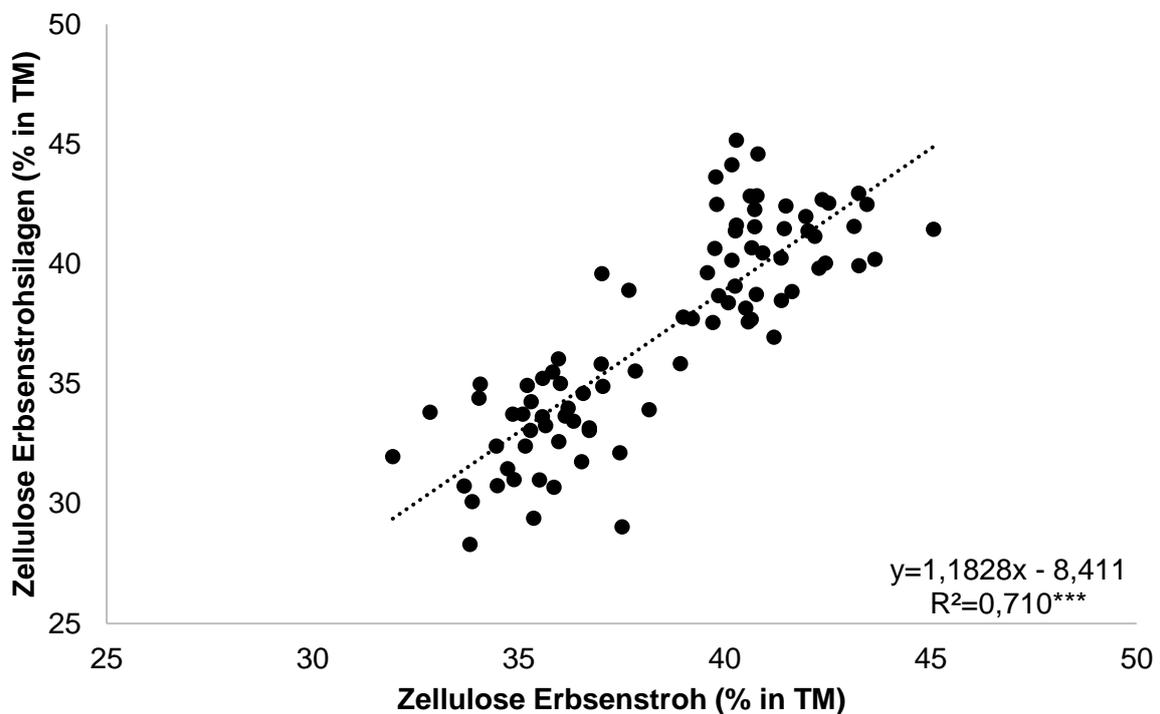


Abbildung 12: Lineare Regression und Bestimmtheitsmaß der Zellulose zwischen Erbsenstrohsilage und Erbsenstroh (n=88).

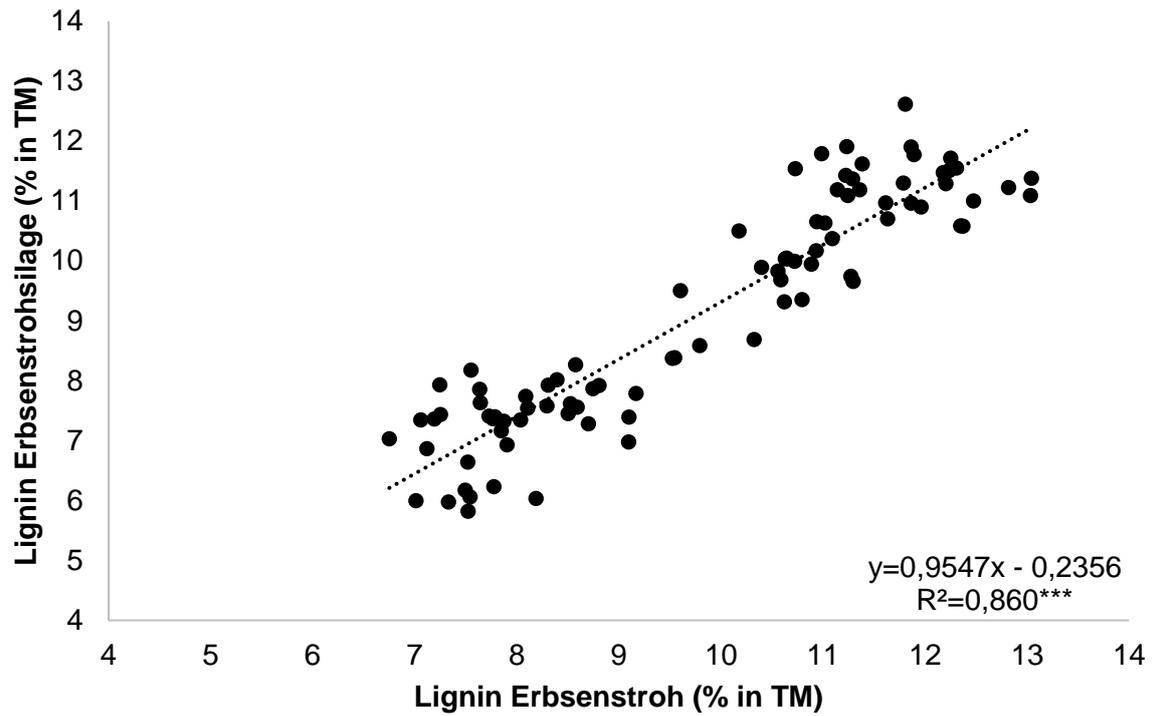


Abbildung 13: Lineare Regression und Bestimmtheitsmaß des Lignins zwischen Erbsenstrohsilage und Erbsenstroh (n=88).

Tabelle 37 bis Tabelle 39 zeigen die Inhaltsstoffe des Ackerbohnenstrohs. In der Soester Börde lagen im Jahr 2017 die Gehalte des Rohproteingehalts (Tabelle 37) meist unter denen des Standorts Ostwestfalen-Lippe und der an Gerüstsubstanzen (Tabelle 38) meist darüber, wobei dies insbesondere zum ersten Erntetermin der Fall war und die Unterschiede sich in den nachfolgenden Terminen relativierten. Für das Jahr 2018 kann keine solche Aussage hinsichtlich einer Standortauswirkung gemacht werden. Im Verlauf der Erntetermine wurde der Rohproteingehalt geringer, während Zellulose- und Ligningehalt zunahm. Dabei fiel die Zunahme des Ligningehalts im Jahr 2018 deutlich geringer aus als im Vorjahr. Der Hemizellulosegehalt stieg und sank im Verlauf der Erntetermine, weshalb sich diesbezüglich keine klare Aussage treffen lässt. Die Sorten unterschieden sich: *Fuego* wies meist die höchsten Rohprotein- und Ligningehalte auf und *Tiffany* die höchsten Zellulosegehalte. Der Rohaschegehalt (Tabelle 39) nahm mit fortschreitender Seneszenz ab, jedoch kam es vereinzelt auch zu Zunahmen zwischen zwei Ernteterminen.

Die signifikanten Haupt- und Wechselwirkungen sind als Übersicht mit Grenzdifferenzen und p-Werten in Tabelle 40 dargestellt.

Tabelle 37: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohproteingehalt des Ackerbohnenstrohs (% in TM).

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin			
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	9,04	7,42	6,58	5,63
		<i>Tiffany</i>	8,94	6,55	7,09	4,65
		<i>Taifun</i>	8,27	7,25	6,36	5,29
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	6,33	7,44	6,91	7,01
		<i>Tiffany</i>	6,23	6,40	6,75	5,70
		<i>Taifun</i>	6,78	6,84	6,86	5,75
2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	6,89	8,12	5,89	7,19
		<i>Tiffany</i>	6,24	7,72	6,09	5,42
		<i>Taifun</i>	6,23	6,55	5,39	5,94
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	6,49	5,77	5,55	5,08
		<i>Tiffany</i>	5,29	4,99	5,08	4,53
		<i>Taifun</i>	5,63	5,03	5,05	5,17

Tabelle 38: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf die Inhaltsstoffe des Ackerbohlenstrohs (% in TM).

Inh.	Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin			Totreife
				frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
Hemizellulose	2017	Ostwestfalen -Lippe	<i>Fuego</i>	15,14	17,66	16,31	16,77
			<i>Tiffany</i>	14,72	18,42	16,38	16,29
			<i>Taifun</i>	16,61	17,71	16,41	16,41
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	17,03	17,73	16,83	16,46
			<i>Tiffany</i>	17,02	18,02	16,99	16,92
			<i>Taifun</i>	17,32	17,62	17,87	16,37
	2018	Ostwestfalen -Lippe	<i>Fuego</i>	14,25	14,60	15,16	14,85
			<i>Tiffany</i>	14,99	14,12	14,85	14,30
			<i>Taifun</i>	15,32	14,90	15,30	16,06
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	15,03	14,85	15,16	15,25
			<i>Tiffany</i>	14,55	14,99	14,81	14,99
			<i>Taifun</i>	14,96	14,76	15,03	15,76
Zellulose	2017	Ostwestfalen -Lippe	<i>Fuego</i>	36,21	37,53	39,52	50,63
			<i>Tiffany</i>	36,99	39,69	41,48	53,43
			<i>Taifun</i>	36,65	40,16	40,47	52,44
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	40,21	37,37	39,93	43,91
			<i>Tiffany</i>	40,46	39,08	39,28	48,79
			<i>Taifun</i>	37,32	39,00	39,57	48,04
	2018	Ostwestfalen -Lippe	<i>Fuego</i>	38,59	34,73	38,08	36,50
			<i>Tiffany</i>	36,97	35,27	38,64	40,68
			<i>Taifun</i>	37,85	36,19	38,25	38,31
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	37,14	39,12	38,31	41,75
			<i>Tiffany</i>	38,99	40,10	39,61	41,80
			<i>Taifun</i>	37,00	38,81	38,81	39,33
Lignin	2017	Ostwestfalen -Lippe	<i>Fuego</i>	8,91	10,32	10,30	14,00
			<i>Tiffany</i>	8,71	9,65	10,54	13,69
			<i>Taifun</i>	8,73	9,70	9,57	12,32
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	10,32	9,97	10,94	12,73
			<i>Tiffany</i>	9,76	9,68	10,38	12,92
			<i>Taifun</i>	9,02	9,84	10,20	12,12
	2018	Ostwestfalen -Lippe	<i>Fuego</i>	9,32	7,81	8,85	8,31
			<i>Tiffany</i>	8,28	7,65	8,32	8,50
			<i>Taifun</i>	8,42	7,90	7,80	8,26
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	9,62	9,82	9,70	10,59
			<i>Tiffany</i>	9,29	9,51	9,22	9,58
			<i>Taifun</i>	8,66	8,46	8,68	8,92

Inh.=Inhaltsstoff

Tabelle 39: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohaschegehalt des Ackerbohnenstrohs (% in TM).

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin			
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	8,67	8,64	7,96	4,32
		<i>Tiffany</i>	8,80	8,93	8,06	4,14
		<i>Taifun</i>	8,76	9,53	8,56	4,21
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	7,53	7,72	7,93	5,79
		<i>Tiffany</i>	7,84	7,11	9,23	4,72
		<i>Taifun</i>	9,13	7,90	9,32	4,45
2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	8,10	8,32	7,65	7,68
		<i>Tiffany</i>	8,04	8,15	7,70	7,19
		<i>Taifun</i>	8,07	8,40	7,99	7,62
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	10,34	10,03	9,79	9,09
		<i>Tiffany</i>	10,96	9,74	9,77	9,74
		<i>Taifun</i>	11,17	10,60	10,24	10,35

Tabelle 40: Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in % in TM und p-Werte der Inhaltsstoffe von Ackerbohnenstroh (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).

Faktoren	Rohprotein		Hemizellulose		Zellulose		Lignin		Rohasche	
	GD	p	GD	p	GD	p	GD	p	GD	p
O	0,20	0,000	0,21	0,002	n.s.		0,17	0,000	0,16	0,000
J	0,20	0,000	0,21	0,000	0,65	0,000	0,17	0,000	0,16	0,000
T	0,28	0,000	0,30	0,001	0,92	0,000	0,24	0,000	0,22	0,000
S	0,25	0,000	0,26	0,013	0,79	0,007	0,21	0,000	0,19	0,000
O*T	0,40	0,000	n.s.		1,30	0,009	n.s.		0,32	0,000
O*J	0,28	0,000	0,30	0,025	0,92	0,000	0,24	0,000	0,22	0,000
J*T	0,40	0,000	0,42	0,000	1,30	0,000	0,34	0,000	0,32	0,000
O*J*T	0,57	0,000	0,60	0,005	1,83	0,000	0,47	0,000	0,45	0,000
J*T*S	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		0,55	0,023
O*J*T*S	n.s.		n.s.		n.s.		0,82	0,046	0,77	0,030

GD=Grenzdifferenz, O=Standort, J=Jahr, T=Erntetermin, S=Sorte, n.s.=nicht signifikant.

Tabelle 41 bis Tabelle 43 zeigen die Ergebnisse der Inhaltsstoffanalysen der Ackerbohnenstrohsilagen. Mit Ausnahme der Hemizellulose wurden die Inhaltsstoffe durch die Jahre beeinflusst; der Standort bewirkte Unterschiede aller Inhaltsstoffe. Im Jahr 2017 waren die Gehalte an Rohprotein (Tabelle 41) und Gerüstsubstanzen (Tabelle 42) häufig höher als 2018; in der Soester Börde waren die Gehalte an Gerüstsubstanzen meist höher als in Ostwestfalen-Lippe, für den Rohproteingehalt zeigte sich ein gegenteiliges Bild. Die Seneszenz bewirkte eine Abnahme des Rohproteingehalts, Zellulose- und Ligningehalt sanken vom ersten zum zweiten Erntetermin und stiegen zum dritten. Die Hemizellulose unterschied sich vom ersten zum zweiten Erntetermin nicht und nahm zum dritten hin zu. Alle Inhaltsstoffe unterschieden sich zudem hinsichtlich der Sorten. Der Rohaschegehalt (Tabelle 43) war am Standort Soester Börde im Jahr 2018 höher als im Jahr 2017, während in Ostwestfalen-Lippe meist die Gehalte im Jahr 2017 höher waren. Die Wirkung der Seneszenz auf die Rohaschegehalte war nicht gleichgerichtet, teilweise nahmen die Gehalte mit fortschreitender Abreife ab und teilweise auch zu oder es kam zu keinerlei Veränderung.

Alle signifikanten Haupt- und Wechselwirkungen sind in Tabelle 44 als Übersicht dargestellt.

Tabelle 41: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohproteingehalt der Ackerbohnenstrohsilagen (% in TM).

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	11,50	10,02	6,42
		<i>Tiffany</i>	10,11	9,20	6,97
		<i>Taifun</i>	9,89	7,60	7,07
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	8,03	8,27	7,47
		<i>Tiffany</i>	7,76	7,49	7,27
		<i>Taifun</i>	8,21	8,18	7,36
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	10,63	11,25	6,82
		<i>Tiffany</i>	9,15	9,54	6,70
		<i>Taifun</i>	8,74	9,01	5,97
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	8,73	7,08	*
		<i>Tiffany</i>	7,00	6,29	*
		<i>Taifun</i>	7,68	5,88	*

*=keine Silage wegen erhöhter TM-Gehalte.

Tabelle 42: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf die Gerüstsubstanzen der Ackerbohnenstrohsilagen (% in TM).

Inhaltsstoff	Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
				frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife
Hemi- zellulose	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	13,03	12,97	15,35
			<i>Tiffany</i>	13,13	12,42	14,52
			<i>Taifun</i>	13,02	14,36	16,03
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	14,56	14,12	14,90
			<i>Tiffany</i>	13,74	13,67	13,89
			<i>Taifun</i>	14,35	14,18	14,88
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	13,27	12,84	14,62
			<i>Tiffany</i>	13,21	12,79	14,51
			<i>Taifun</i>	14,80	12,91	15,25
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	13,34	14,27	*
			<i>Tiffany</i>	14,05	13,72	*
			<i>Taifun</i>	14,24	15,12	*
Zellulose	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	36,24	36,05	40,69
			<i>Tiffany</i>	38,89	37,99	41,71
			<i>Taifun</i>	37,26	38,43	38,89
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	39,22	38,54	40,79
			<i>Tiffany</i>	39,26	39,37	40,01
			<i>Taifun</i>	37,41	36,69	39,07
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	34,46	30,79	36,86
			<i>Tiffany</i>	36,66	35,58	36,81
			<i>Taifun</i>	35,85	32,62	37,13
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	36,56	35,83	*
			<i>Tiffany</i>	38,21	38,28	*
			<i>Taifun</i>	36,80	36,41	*
Lignin	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	9,75	10,02	10,50
			<i>Tiffany</i>	9,77	9,78	10,45
			<i>Taifun</i>	8,62	9,38	9,51
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	10,91	10,36	11,55
			<i>Tiffany</i>	10,13	9,53	10,55
			<i>Taifun</i>	9,67	9,32	10,42
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	8,45	7,20	8,36
			<i>Tiffany</i>	8,61	7,78	7,71
			<i>Taifun</i>	8,32	7,10	7,42
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	9,32	8,95	*
			<i>Tiffany</i>	9,18	8,88	*
			<i>Taifun</i>	8,50	8,08	*

* = keine Silage wegen erhöhter TM-Gehalte.

Tabelle 43: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohaschegehalt der Ackerbohnenstrohsilagen (% in TM).

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	9,76	9,06	9,27
		<i>Tiffany</i>	9,96	9,27	8,94
		<i>Taifun</i>	10,56	9,31	9,70
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	8,65	8,52	8,44
		<i>Tiffany</i>	9,30	8,37	9,76
		<i>Taifun</i>	10,05	9,06	9,47
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	9,11	9,19	8,15
		<i>Tiffany</i>	8,93	8,39	8,30
		<i>Taifun</i>	8,79	9,95	8,96
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	11,13	10,92	*
		<i>Tiffany</i>	11,24	10,39	*
		<i>Taifun</i>	11,63	11,38	*

*=keine Silage wegen erhöhter TM-Gehalte.

Tabelle 44: Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in % in TM und p-Werte der Inhaltsstoffe von Ackerbohnenstrohsilagen (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).

Faktoren	Rohprotein		Hemizellulose		Zellulose		Lignin		Rohasche	
	GD	p	GD	p	GD	p	GD	p	GD	p
O	0,27	0,000	0,30	0,012	0,33	0,000	0,15	0,000	0,30	0,002
J	0,27	0,008	n.s.		0,33	0,000	0,15	0,000	0,30	0,006
T	0,33	0,000	0,39	0,000	0,43	0,000	0,19	0,000	0,37	0,050
S	0,35	0,001	0,35	0,003	0,39	0,000	0,17	0,000	0,39	0,019
T*S	n.s.		n.s.		0,74	0,010	n.s.		n.s.	
O*T	0,047	0,001	0,67	0,005	0,74	0,008	n.s.		n.s.	
O*S	n.s.		n.s.		0,57	0,005	0,26	0,013	n.s.	
O*J	0,039	0,018	n.s.		0,52	0,001	0,23	0,012	0,43	0,000
J*S	n.s.		n.s.		0,57	0,011	n.s.		n.s.	
J*T	n.s.		n.s.		0,74	0,013	0,33	0,002	n.s.	
O*T*S	n.s.		n.s.		1,28	0,033	n.s.		n.s.	
O*J*S	n.s.		n.s.		0,91	0,042	n.s.		n.s.	
O*J*T	0,67	0,001	0,67	0,016	0,74	0,004	0,33	0,001	n.s.	
J*T*S	n.s.		n.s.		1,28	0,014	n.s.		n.s.	
O*J*T*S	n.s.		1,17	0,032	1,28	0,050	n.s.		n.s.	

GD=Grenzdifferenz, O=Standort, J=Jahr, T=Erntetermin, S=Sorte, n.s.=nicht signifikant.

Wie bei den Erbsen wurden auch für die Ackerbohnen die Korrelationen zwischen Stroh und Silage berechnet, um den Effekt der Silierung auf die Gerüstsubstanzen zu prüfen. Die Bestimmtheitsmaße waren deutlich geringer als bei den linearen Regressionen der Erbsen. Die Korrelation der Inhaltsstoffe zwischen Stroh und Silage für die Ackerbohnen ergaben ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,005$ für die Hemizellulose, für die Zellulose $R^2=0,223^{***}$ und für das Lignin $R^2=0,628^{***}$ (Abbildung 14 bis Abbildung 16).

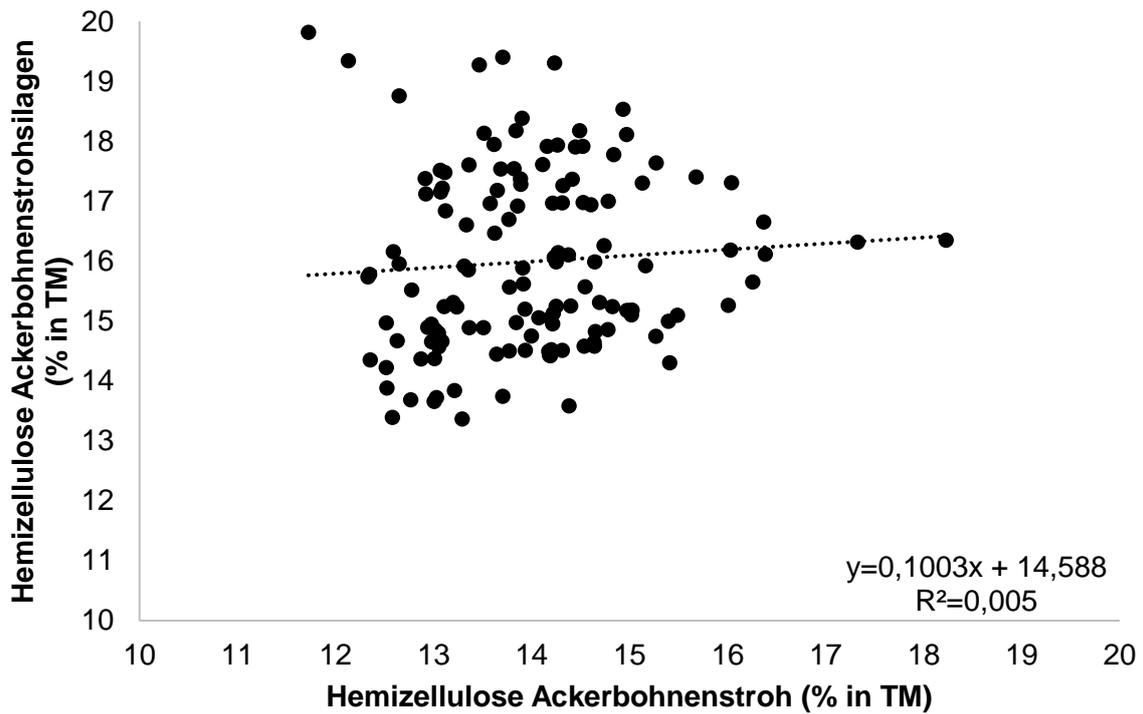


Abbildung 14: Lineare Regression und Bestimmtheitsmaß der Hemizellulose zwischen Ackerbohnenstrohsilage und Ackerbohnenstroh ($n=132$).

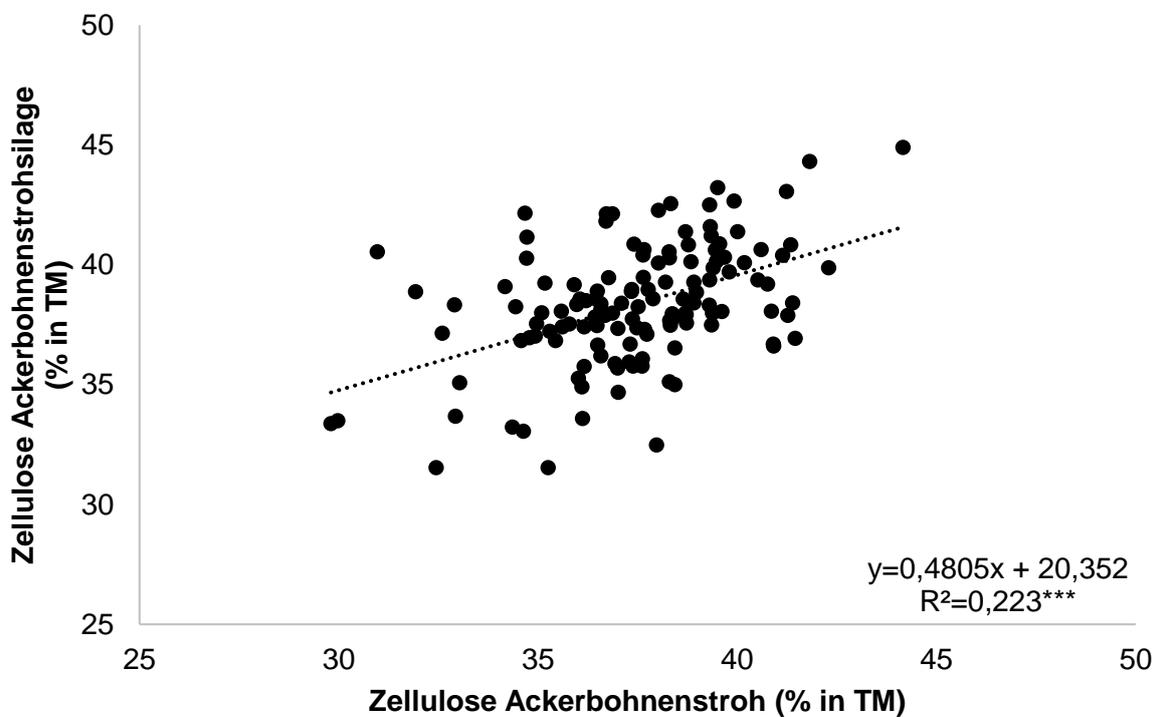


Abbildung 15: Lineare Regression und Bestimmtheitsmaß der Zellulose zwischen Ackerbohnenstrohsilage und Ackerbohnenstroh ($n=132$).

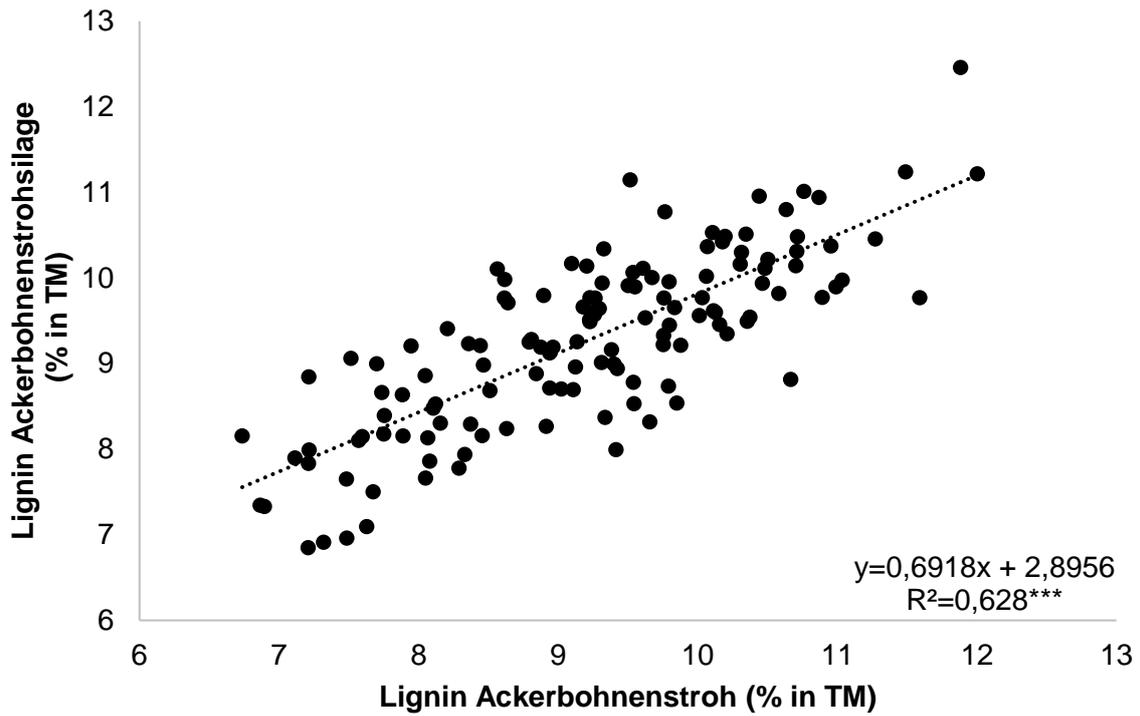


Abbildung 16: Lineare Regression und Bestimmtheitsmaß des Lignins zwischen Ackerbohnenstrohsilage und Ackerbohnenstroh (n=132).

4.1.2.3 Gasertragstests

Gasertragstests der Fachhochschule Südwestfalen

Bei den Gasertragstests im Labor der Fachhochschule Südwestfalen konnte nur eine geringe Auswahl an Proben untersucht werden, die nicht ausreichend für eine statistische Auswertung waren. Außerdem war es nicht möglich, Methanausbeuten zu bestimmen; es konnten nur Biogasausbeuten ausgewiesen werden. Die Darstellung erfolgt im Vergleich zum parallel mitgetesteten Mais, der eine Biogasausbeute von 673 l/kg oTM im Mittel über alle Durchgänge hatte.

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse des Biogasertragstests der untersuchten Erbsensorten des Standorts Ostwestfalen-Lippe im Jahr 2017 im Vergleich zur Maisreferenz. Die höchsten Ausbeuten erzielte die Sorte *Astronaut*, die beim frühen Druschtermin ca. 2/3 der Biogasausbeuten der Maisreferenz erreichte, absteigend gefolgt von *Respect* und *Navarro*, die nur noch knapp 50% der Referenz erreichten. Mit Ausnahme der Sorte *Navarro* sanken die Ausbeuten mit zunehmender Abreife – die Ausbeuten der Sorte *Navarro* sanken zunächst und stiegen dann wieder an und die Strohsilagen erzielten höhere Ausbeuten als das Stroh.

In Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Gasertragstests der geprüften Erbsensorten beider Standorte aus dem Jahr 2018 im Vergleich zur Maisreferenz zu sehen. Die Sorte *Navarro* erzielte höhere Ausbeuten als die Sorte *Respect* und lag in Ostwestfalen-Lippe über den Ergebnissen der Soester Börde. Eine sichere Aussage zur Wirkung des Erntetermins ist anhand dieser Ergebnisse nicht möglich.

Abbildung 19 zeigt die Biogasausbeuten der getesteten Ackerbohnsorten des Standorts Ostwestfalen-Lippe im Jahr 2017 im Vergleich zur Maisreferenz. Mit zunehmender Abreife kam es beim Stroh zu einer Abnahme der Biogasausbeute, während die Strohsilagen unspezifisch schwankten. Das Stroh der Sorte *Tiffany* erzielte die höchsten Gasausbeuten – diese lagen über ihren Strohsilagen, während bei den Strohsilagen die Sorte *Taifun* die höchsten Ausbeuten erreichte und über den Ausbeuten des Strohs dieser Sorte lag. Mit der Sorte *Fuego* wurden die geringsten Ausbeuten erreicht; das Stroh lag zum ersten Erntetermin über den Ergebnissen der entsprechenden Strohsilage, im Anschluss daran zeigte sich jedoch ein gegenteiliges Bild. Die Ausbeuten der Ackerbohnenvarianten waren insgesamt höher als diejenigen der Erbsenvarianten.

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die Ergebnisse der getesteten Ackerbohnsorten des Jahres 2018, Abbildung 20 für Ostwestfalen-Lippe und Abbildung 21 für die Soester Börde. An ersterem Standort erzielte die Sorte *Taifun* die höchsten Biogasausbeuten, absteigend gefolgt von den Sorten *Fuego* und *Tiffany*. Fast alle Strohvarianten erzielten höhere Ausbeuten als die entsprechenden Strohsilagen, mit Ausnahme der späten Druschreife bei den Sorten *Tiffany* und *Taifun*. Die Wirkung des Erntetermins reichte von der Zunahme der Ausbeuten bis hin zu deren Abnahme oder unspezifischen Schwankungen. Auch am Standort Soester Börde lassen die Ergebnisse keine eindeutige Aussage bezüglich der Wirkung des Erntetermins zu. Die Sorte *Taifun* erzielte höhere Ausbeuten als die Sorte *Fuego*, wobei die erzielten Gasausbeuten unter denen des Standorts Ostwestfalen-Lippe lagen. Abbildung 22 bis Abbildung 25 zeigen die linearen Regressionen von Gasausbeuten und Inhaltsstoffen getrennt nach Erbsen und Ackerbohnen sowie der Art der Konservierung. Während bei XP kein und bei Hemizellulose nur ein schwacher linearer Zusammenhang zur gemessenen Gasausbeute festgestellt werden konnte, korrelierten Zellulose und Lignin negativ mit der Gasausbeute. Diese negative Korrelation wurde durch die Silierung abgemildert, wodurch sie in diesen Fällen, mit Ausnahme des Lignins bei den Erbsenstrohsilagen, nicht mehr signifikant war.

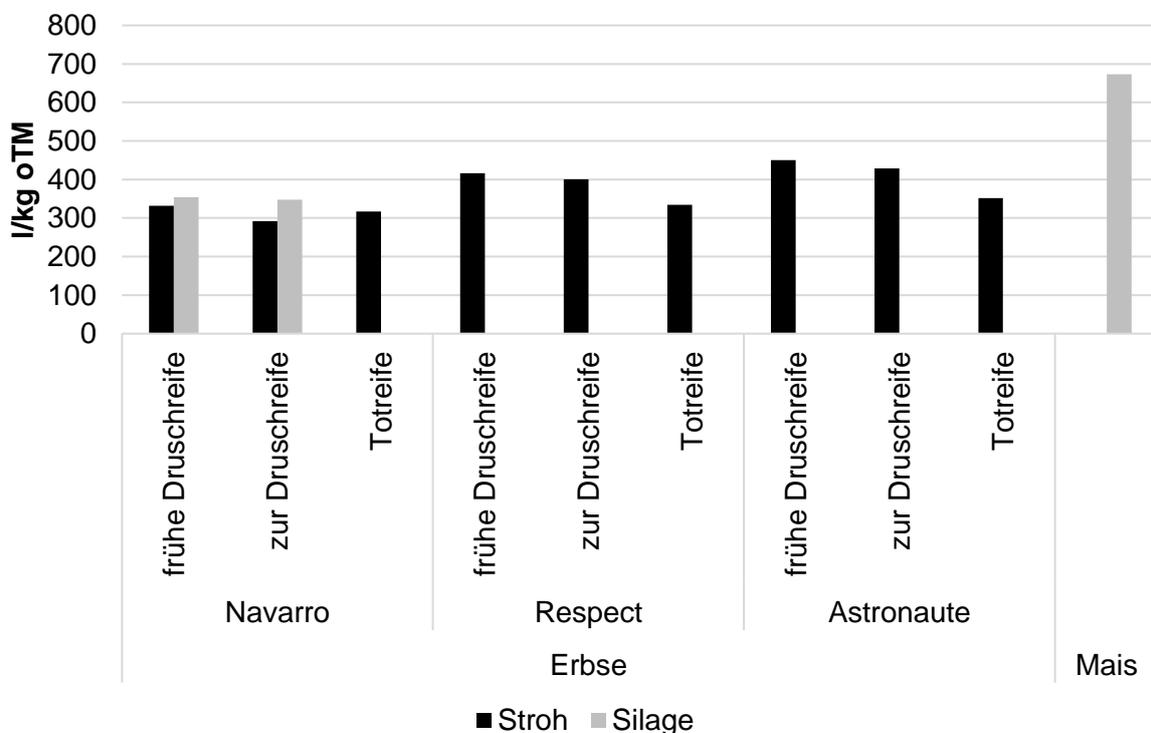


Abbildung 17: Biogasausbeuten (I/kg oTM) der getesteten Erbsensorten des Standorts Ostwestfalen-Lippe im Jahr 2017, im Vergleich zu Silomais.

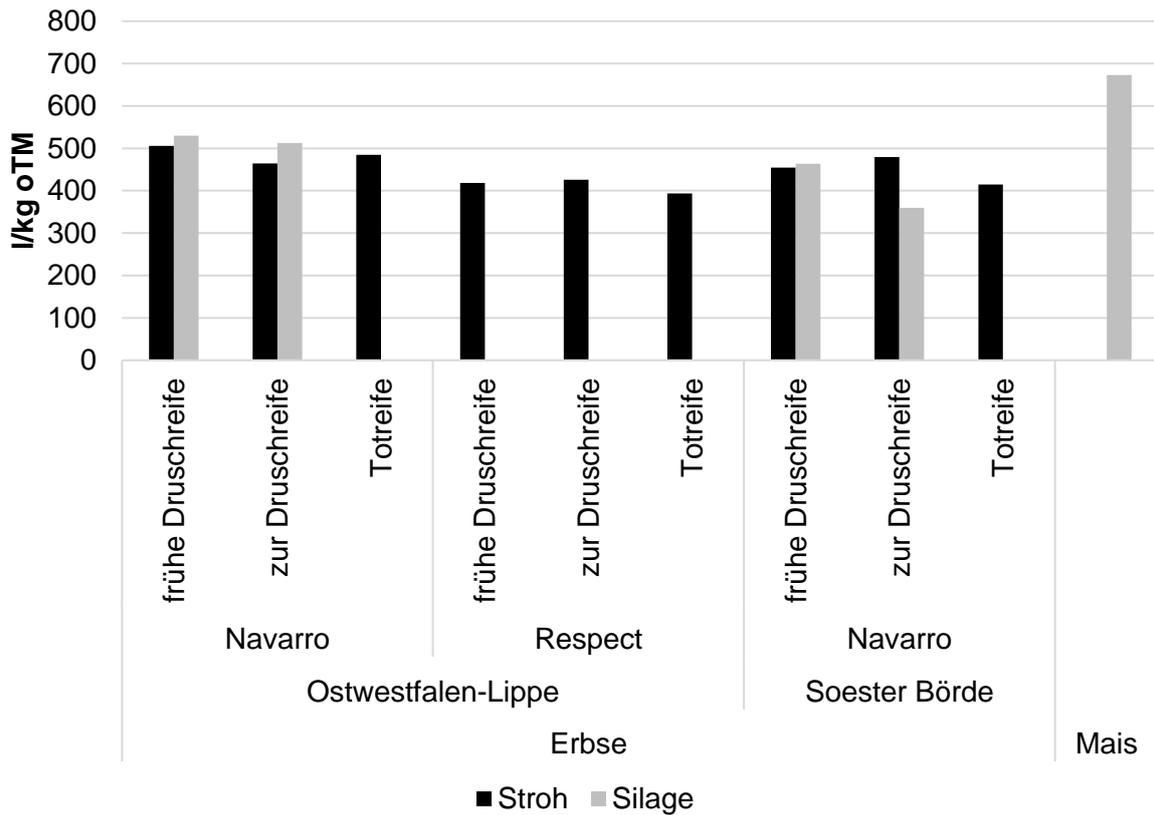


Abbildung 18: Biogasausbeuten (I/kg oTM) der getesteten Erbsensorten beider Standorte im Jahr 2018, im Vergleich zu Silomais.

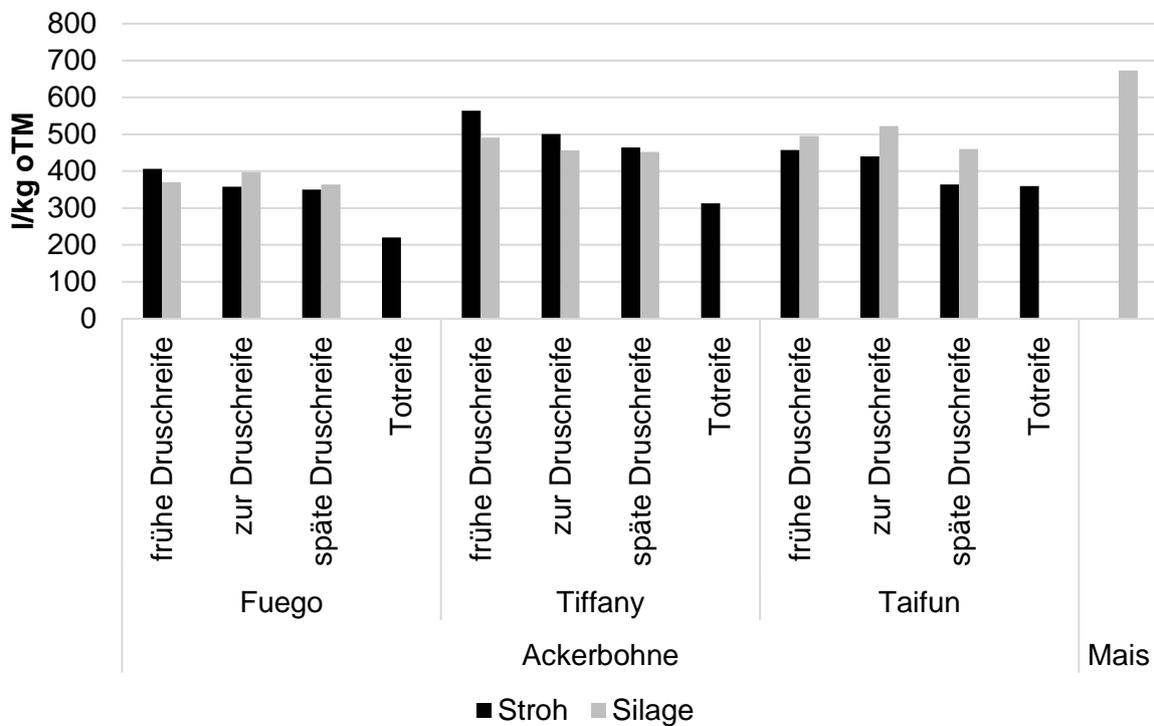


Abbildung 19: Biogasausbeuten (I/kg oTM) der getesteten Ackerbohnen des Standorts Ostwestfalen-Lippe im Jahr 2017, im Vergleich zu Silomais.

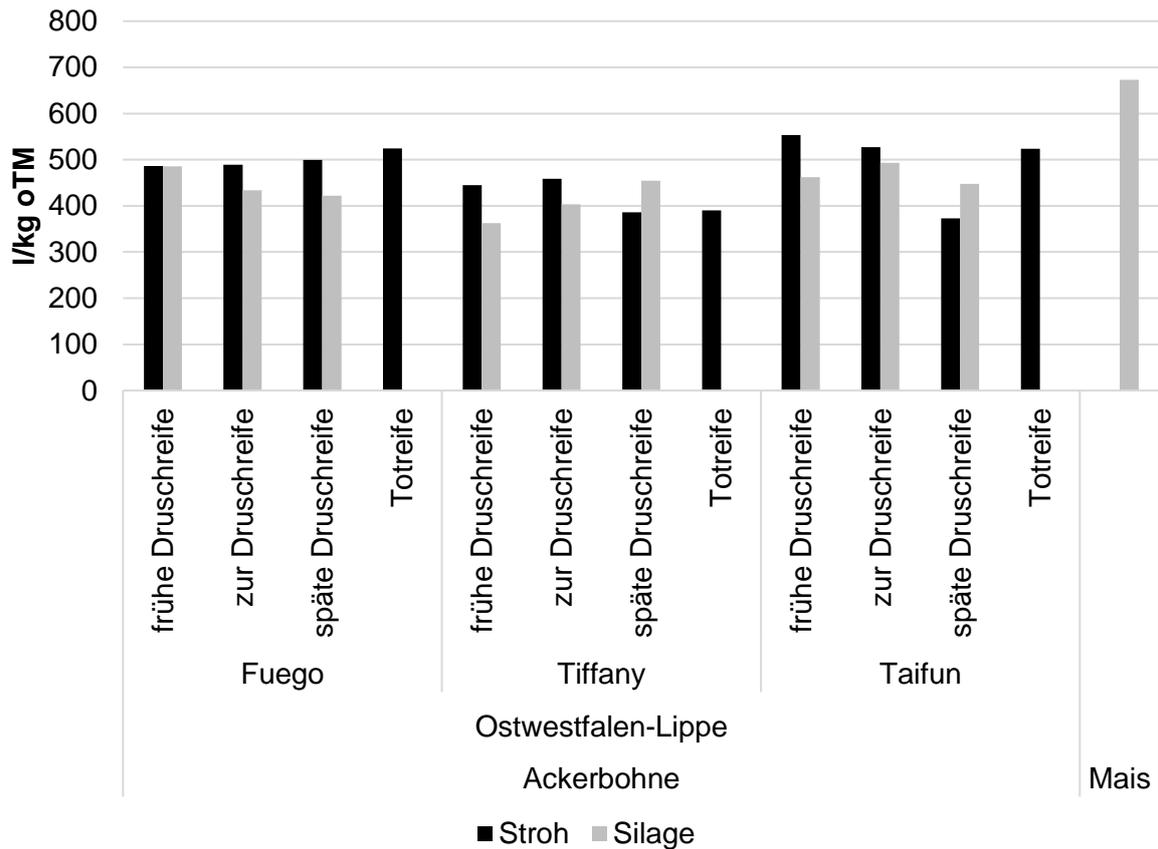


Abbildung 20: Biogasausbeuten (I/kg oTM) der getesteten Ackerbohnenarten des Standorts Ostwestfalen-Lippe im Jahr 2018, im Vergleich zu Silomais.

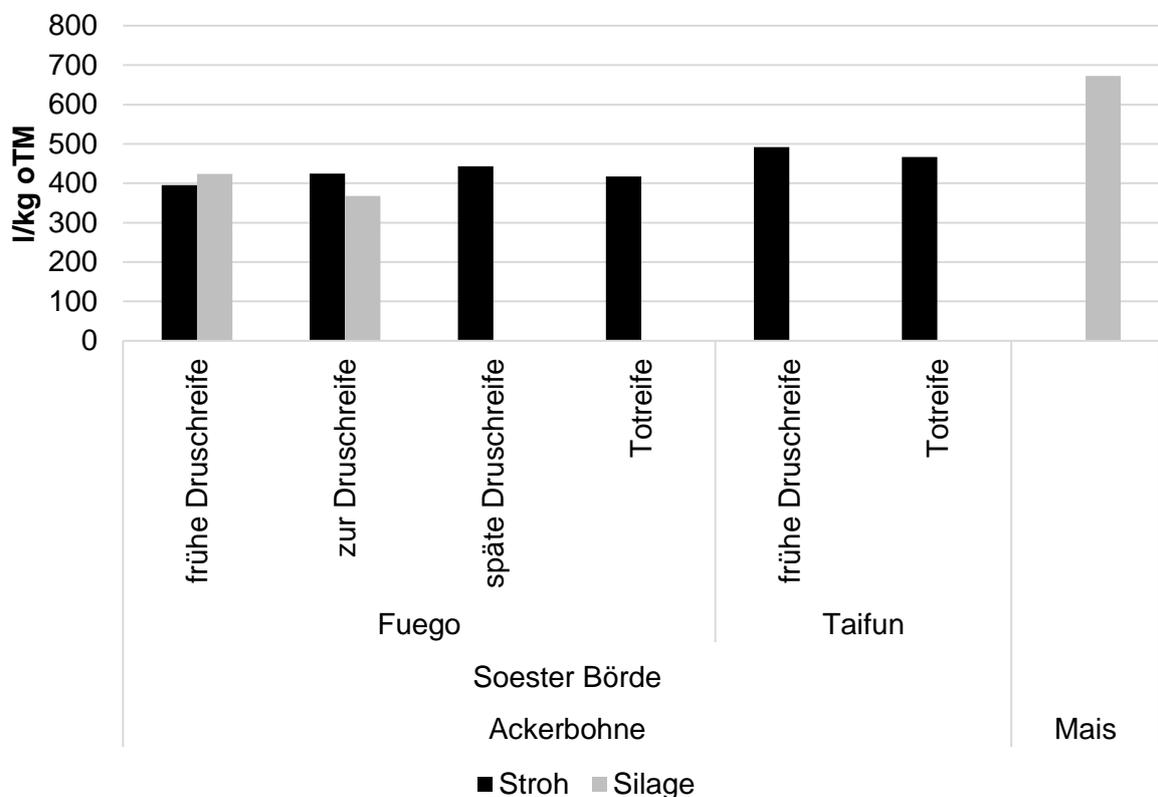


Abbildung 21: Biogasausbeuten (I/kg oTM) der getesteten Ackerbohnenarten des Standorts Soester Börde im Jahr 2018, im Vergleich zu Silomais.

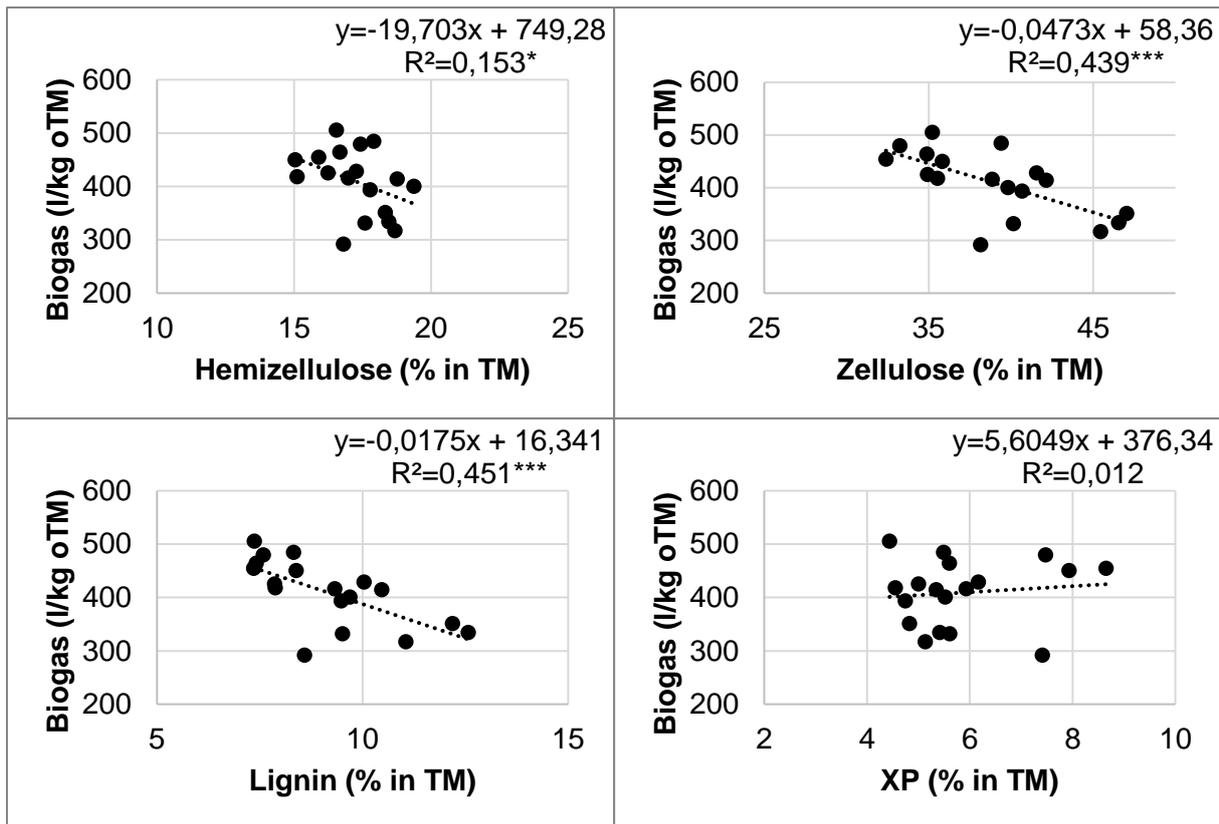


Abbildung 22: Lineare Regressionen und Bestimmtheitsmaße von Biogasausbeute und Inhaltsstoffen des Erbsenstrohs ($n=18$).

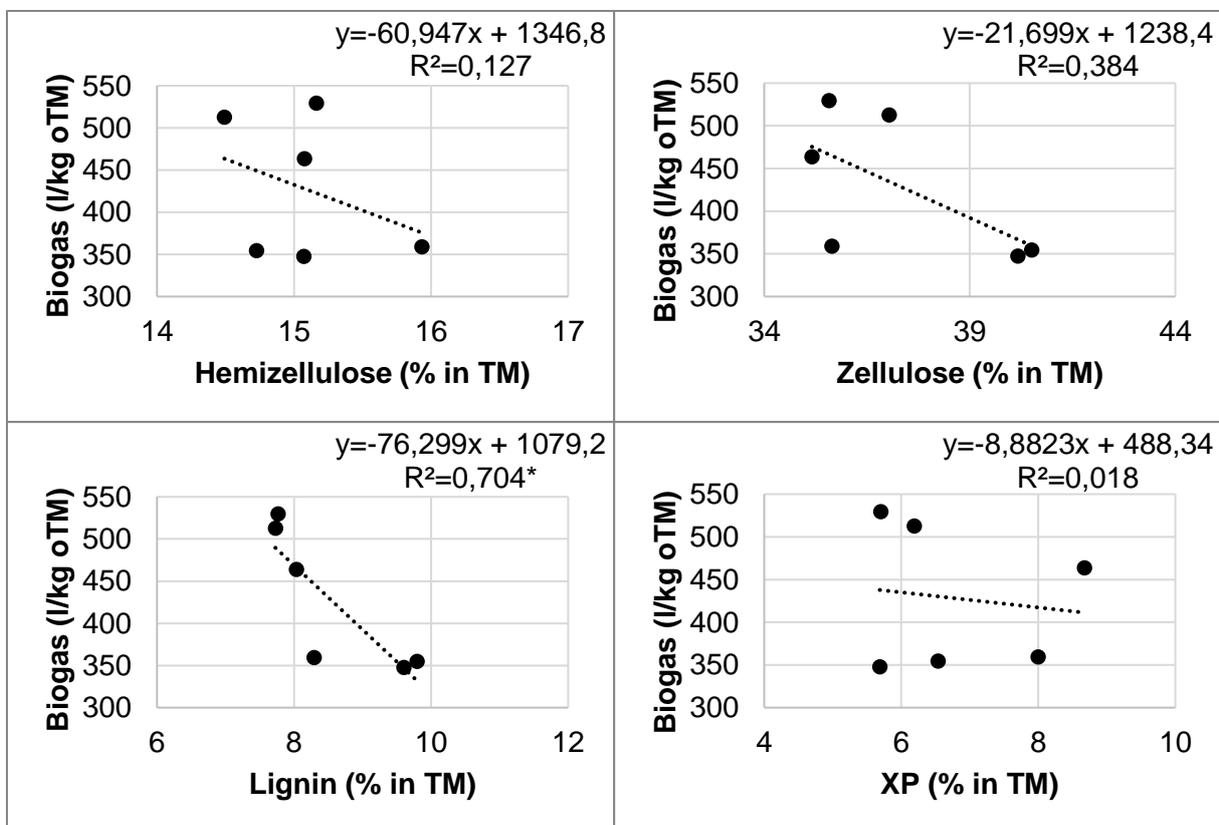


Abbildung 23: Lineare Regressionen und Bestimmtheitsmaße von Biogasausbeute und Inhaltsstoffen der Erbsenstrohsilagen ($n=6$).

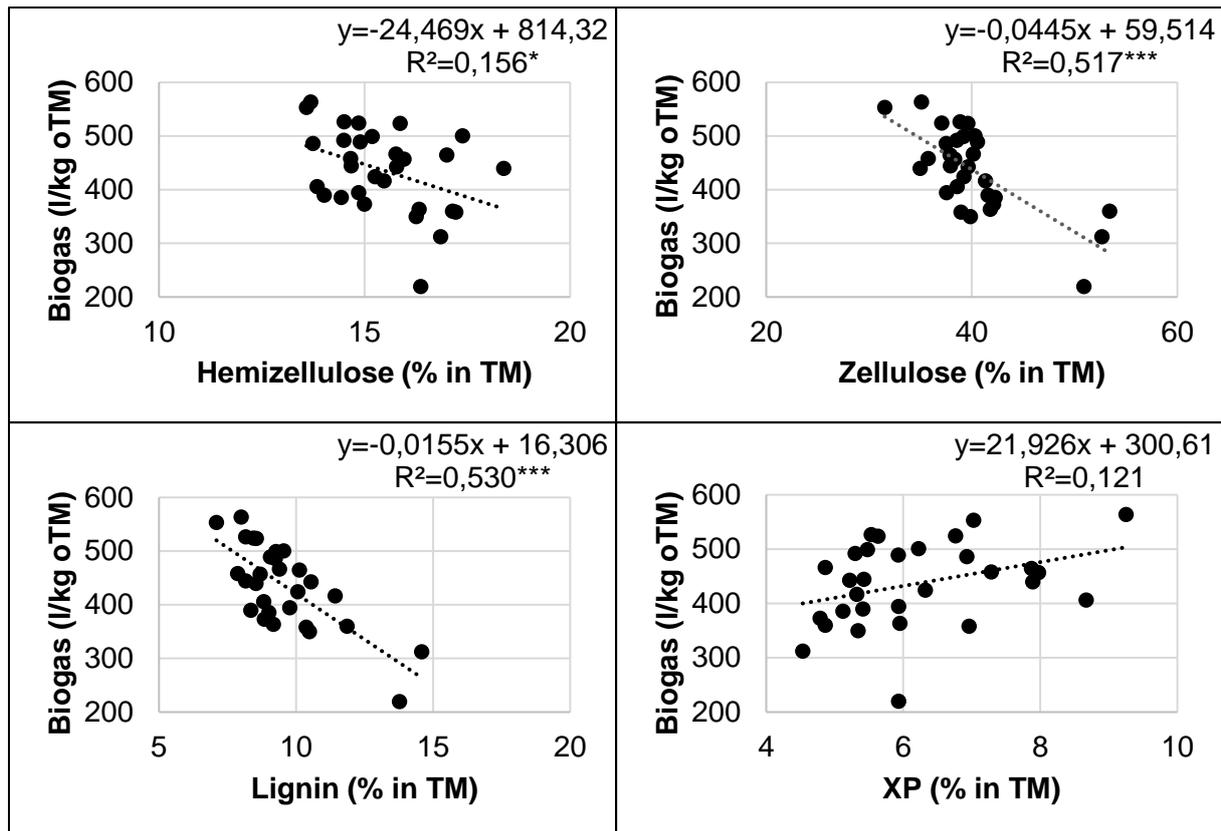


Abbildung 24: Lineare Regressionen und Bestimmtheitsmaße von Biogasausbeute und Inhaltsstoffen des Ackerbohnenstrohs ($n=30$).

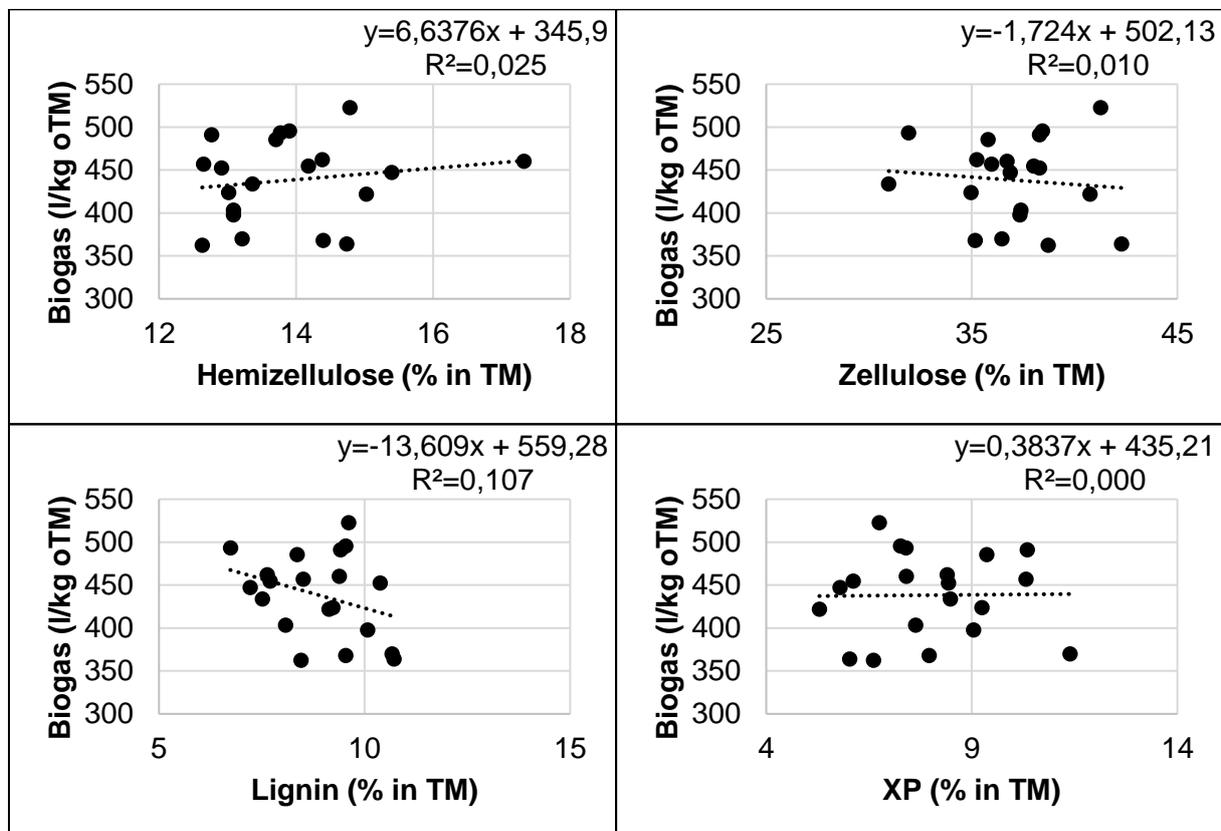


Abbildung 25: Lineare Regressionen und Bestimmtheitsmaße von Biogasausbeute und Inhaltsstoffen der Ackerbohnenstrohsilagen ($n=20$).

Extern durchgeführte Gasertragstests

Sowohl im Erntejahr 2017 als auch im Erntejahr 2018 wurde eine Auswahl an Proben durch den Landesbetrieb Hessisches Landeslabor hinsichtlich der Biogasausbeute und des Methananteils analysiert.

In Abbildung 26 sind die Ergebnisse der Biogas- und Methanuntersuchungen aus dem Erntejahr 2017 dargestellt. Untersucht wurde eine Auswahl an Proben mit den Kriterien Erntetermin, Pflanzenart, Verarbeitung und Tanningehalt. Alle Proben wurden am Standort Soester Börde gewonnen. Es konnte jeweils nur eine Wiederholung geprüft werden, weshalb die Ergebnisse nicht statistisch abgesichert sind. Bei den Erbsen handelte es sich um die Sorte *Navarro*, bei den Ackerbohnen um die Sorte *Fuego* und um die tanninfreie Sorte *Taifun*. Die Erbsenstrohsilagen erzielten höhere Biogas- und Methanausbeuten als das Erbsenstroh; bei den Ackerbohnen ist diese Aussage nicht zutreffend. Die späteren Erntezeitpunkte hatten sowohl bei Erbsen als auch bei Ackerbohnen abnehmende Biogas- und Methanausbeuten zur Folge. Bei den Ackerbohnen erzielte die tanninfreie Sorte *Taifun* höhere Biogas- und Methanausbeuten als die tanninhaltige Sorte *Fuego*. Der Methananteil im Biogas reichte von 49% bis zu 59%, wobei die Strohsilagen einen höheren Methananteil aufwiesen als das Stroh.

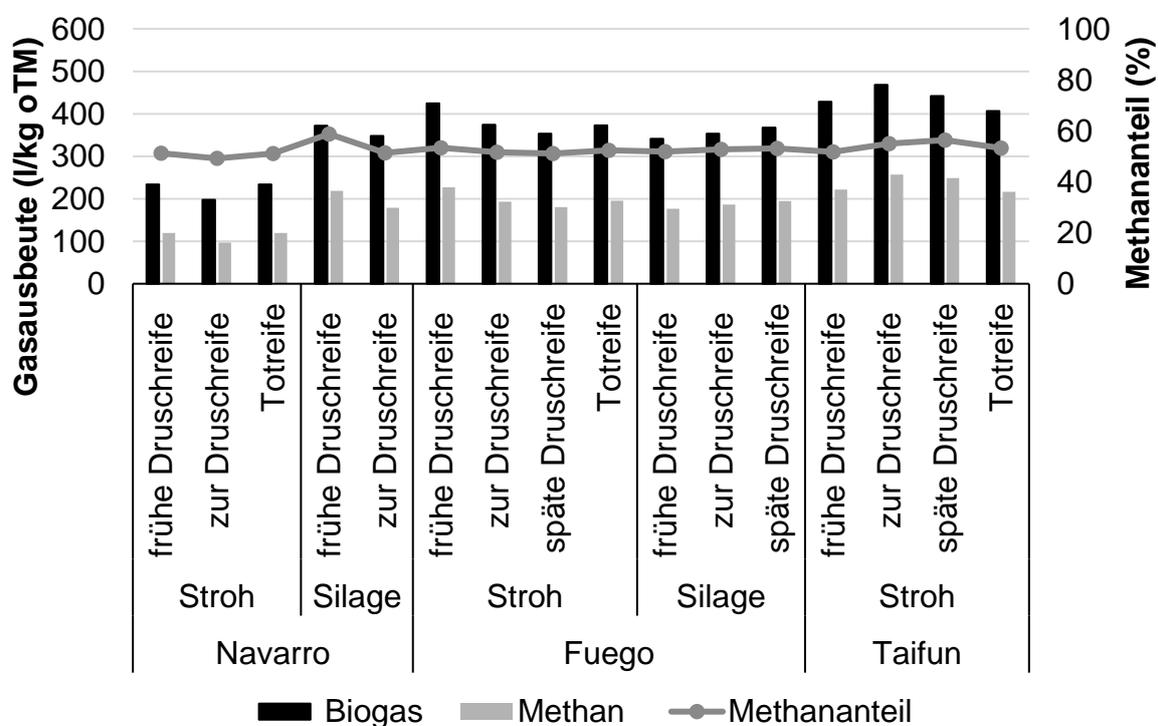


Abbildung 26: Einfluss des Erntetermins auf Biogas- und Methanausbeute (l/kg oTM) sowie Methananteil (%) im Biogas von Ackerbohnen- (Fuego, Taifun) und Erbsenstroh (Navarro) sowie Strohsilagen, am Standort Soester Börde im Erntejahr 2017.

In Abbildung 27 sind die Ergebnisse der Biogas- und Methanuntersuchungen aus dem Erntejahr 2018 dargestellt. Die Auswahl der Proben erfolgte nach den gleichen Kriterien wie im Erntejahr 2017. Die Erbsen- und Ackerbohnenstrohsilagen erzielten höhere Biogas- und Methanausbeuten als das korrespondierende Stroh, auch der Methananteil im Biogas war bei den Strohsilagen wieder höher als beim Stroh – insgesamt wurden meist über 50% und bis zu 60% Methananteil im Biogas festgestellt. Die späteren Erntezeitpunkte hatten bei den Strohsilagen sowohl bei Erbsen als auch bei Ackerbohnen abnehmende Biogas- und Methanausbeuten zur Folge. Beim untersuchten Stroh zeigte sich kein solch eindeutiger Effekt. Im Gegensatz zum Jahr 2017 konnte die tanninfreie Sorte im Jahr 2018 nicht zu allen untersuchten Terminen die tanninhaltige übertreffen. Die Biogasausbeuten im Jahr 2018 sind beim Ackerbohnenstroh geringer als die des Jahres 2017; für die Erbsenstrohsilagen, das Erbsenstroh und die Ackerbohnenstrohsilagen zeigte sich ein gegenteiliges Bild.

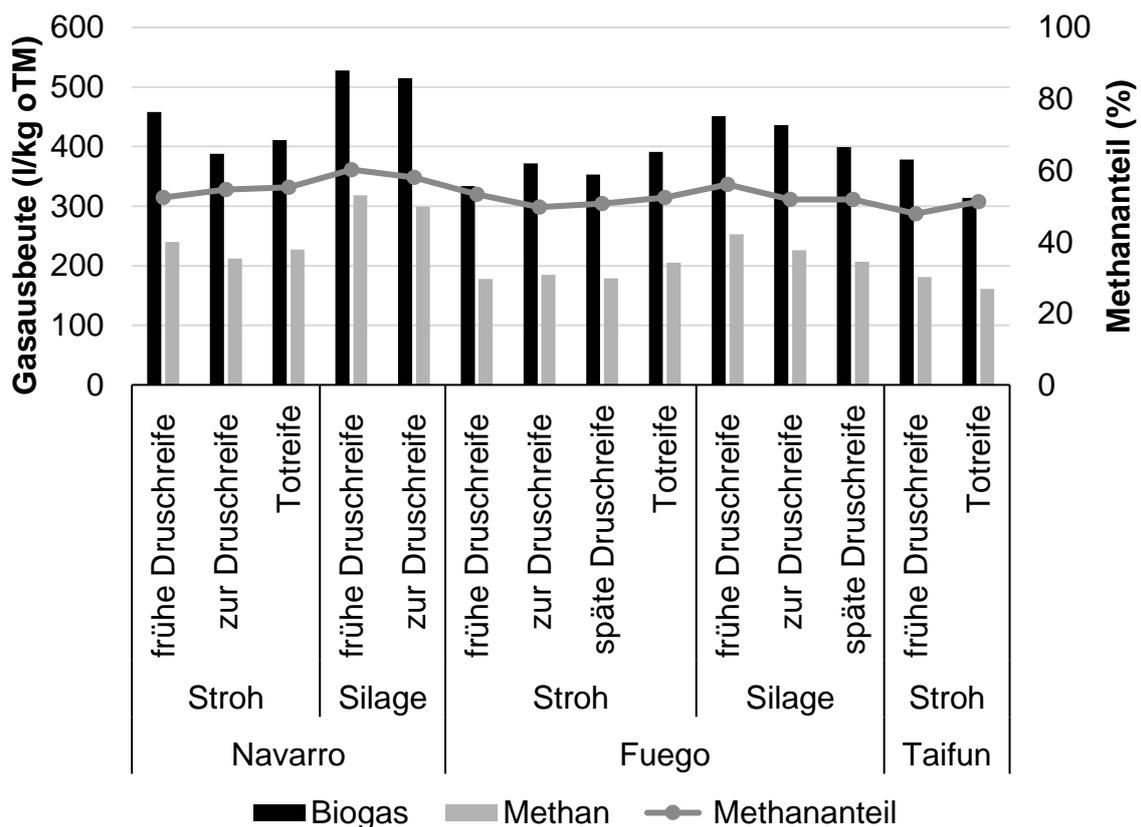


Abbildung 27: Einfluss des Erntetermins auf Biogas- und Methanausbeute (l/kg oTM) sowie Methananteil (%) im Biogas von Ackerbohnen- (Fuego, Taifun) und Erbsenstroh (Navarro) sowie Strohsilagen, am Standort Soester Börde im Erntejahr 2018.

4.1.3 Theoretische Gasausbeuten

Die theoretischen Gasausbeuten wurden nach KAISER (2007) berechnet und sind in Tabelle 45 und Tabelle 46 für die Erbse und in Tabelle 48 und Tabelle 49 für die Ackerbohne dargestellt. Die signifikanten Haupt- und Wechselwirkungen sind in Tabelle 47 für die Erbse und in Tabelle 50 für die Ackerbohne mit Grenzdifferenz und p-Wert aufgeführt.

Hinsichtlich der Biogas- und Methanausbeuten des Erbsenstrohs (Tabelle 45) überstiegen die Werte von 2018 die von 2017 und die Gasausbeute war in Ostwestfalen-Lippe höher als in der Soester Börde. Im Jahr 2017 stieg die Gasausbeute mit fortschreitender Abreife, während im Jahr 2018 nur unwesentliche Unterschiede zwischen den Ernteterminen auftraten. Die Sorten *Navarro* und *Astronaut* erzielten oft ähnliche Ergebnisse, die unter denen der Sorte *Respect* lagen.

Tabelle 45: Theoretische Gasausbeuten des Erbsenstrohs (l/kg TM).

Gas	Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
				frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
Biogas	2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	523,1	531,9	530,4
			<i>Respect</i>	537,2	544,7	538,7
			<i>Astronaut</i>	518,7	525,4	532,8
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	493,9	526,1	533,9
			<i>Respect</i>	517,7	529,7	541,0
			<i>Astronaut</i>	487,6	521,1	521,6
	2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	555,5	554,5	547,3
			<i>Respect</i>	558,6	558,6	556,8
			<i>Astronaut</i>	551,0	550,3	551,2
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	535,7	536,6	533,1
			<i>Astronaut</i>	539,1	534,6	544,0
Methan	2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	263,7	268,7	268,8
			<i>Respect</i>	270,1	274,4	272,6
			<i>Astronaut</i>	261,7	265,9	269,6
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	248,0	265,9	269,2
			<i>Respect</i>	260,6	266,4	273,3
			<i>Astronaut</i>	245,3	262,8	263,6
	2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	277,7	277,5	276,7
			<i>Respect</i>	277,9	278,3	280,1
			<i>Astronaut</i>	274,0	274,5	278,1
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	267,5	268,3	268,4
			<i>Astronaut</i>	269,0	267,3	275,5

Tabelle 46 zeigt die Ergebnisse der Erbsenstrohsilagen. Im Jahr 2017 sowie am Standort Soester Börde waren die Biogas- und Methanausbeuten der Strohsilagen

häufig niedriger als im Jahr 2018 und in Ostwestfalen-Lippe. Die Differenzen zwischen den Ernteterminen waren, mit Ausnahme der Zunahme der Gasausbeuten vom ersten zum zweiten Termin am Standort Soester Börde im Jahr 2017, unwesentlich. Die Sorte *Respect* erzielte meist höhere Gasausbeuten als die anderen Sorten. Insgesamt waren die Gasausbeuten des Strohs höher als die der Strohsilagen, der Methananteil betrug in allen Varianten 50%.

Tabelle 46: Theoretische Gasausbeuten der Erbsenstrohsilagen (l/kg TM).

Gas	Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin	
				frühe Druschreife	zur Druschreife
Biogas	2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	503,3	509,3
			<i>Respect</i>	522,5	518,7
			<i>Astronaut</i>	506,2	508,1
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	464,9	513,2
			<i>Respect</i>	485,9	514,8
			<i>Astronaut</i>	494,7	515,6
	2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	533,9	534,9
			<i>Respect</i>	541,9	544,3
			<i>Astronaut</i>	523,9	531,7
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	523,6	517,5
			<i>Respect</i>	523,0	522,4
			<i>Astronaut</i>	523,0	522,4
Methan	2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	254,3	257,3
			<i>Respect</i>	263,2	261,1
			<i>Astronaut</i>	255,9	256,0
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	232,7	258,7
			<i>Respect</i>	244,0	258,5
			<i>Astronaut</i>	249,1	259,7
	2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	267,9	268,8
			<i>Respect</i>	270,9	272,2
			<i>Astronaut</i>	262,4	266,7
		Soester Börde	<i>Navarro</i>	263,0	259,8
			<i>Respect</i>	262,8	261,7
			<i>Astronaut</i>	262,8	261,7

Tabelle 47: Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in l/kg TM und p-Werte der theoretischen Gasausbeuten von Erbsenstroh und Erbsenstrohsilagen (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).

Faktoren	Biogas Stroh		Methan Stroh		Biogas Silage		Methan Silage	
	GD	p	GD	p	GD	p	GD	p
O	3,14	0,000	1,51	0,000	7,6	0,020	4,1	0,020
J	3,14	0,000	1,51	0,000	7,6	0,003	4,1	0,005
T	4,02	0,003	1,93	0,000	7,9	0,039	4,3	0,048
S	3,85	0,001	1,85	0,002	n.s.		n.s.	
J*T	5,44	0,002	2,61	0,002	n.s.		n.s.	
O*T	5,44	0,015	2,61	0,015	n.s.		n.s.	
J*O*T	7,70	0,032	3,70	0,021	15,1	0,046	8,2	0,043

GD=Grenzdifferenz, O=Standort, J=Jahr, T=Erntetermin, S=Sorte, n.s.=nicht signifikant.

Tabelle 48 und Tabelle 49 zeigen die theoretischen Gasausbeuten der Ackerbohnen – die Unterschiede waren deutlich geringer als bei den Erbsen. Die Gasausbeuten des Strohs (Tabelle 48) waren höher als die der Strohsilagen, schwankten jedoch unspezifisch zwischen den Ernteterminen. Im Jahr 2017 waren die Ausbeuten am Standort Soester Börde zunächst höher, dies relativierte sich jedoch mit fortschreitender Abreife. Im Jahr 2018 waren die Gasausbeuten in Ostwestfalen-Lippe höher. Bei den Strohsilagen (Tabelle 49) waren in der Soester Börde die Ausbeuten in beiden Jahren vergleichbar, im Jahr 2017 waren sie zu den ersten Ernteterminen höher und im Jahr 2018 niedriger als die Gasausbeuten des Standorts Ostwestfalen-Lippe. Mit fortschreitender Abreife stiegen die Gasausbeuten. Die Sorte *Fuego* hatte die geringsten Gasausbeuten, gefolgt von den Sorten *Tiffany* und *Taifun*. Die Differenzierungen der Sorten waren beim Stroh vergleichbar. Der Methananteil betrug wie bei den Erbsen bei beiden Konservierungsarten 50%.

Tabelle 48: Theoretische Gasausbeuten des Ackerbohnenstrohs (l/kg TM).

G.	Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin			Totreife
				frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
Biogas	2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	528,3	528,6	532,9	530,8
			<i>Tiffany</i>	529,2	540,0	529,6	538,4
			<i>Taifun</i>	537,1	531,5	537,8	549,2
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	538,9	537,8	527,6	524,5
			<i>Tiffany</i>	542,9	549,9	525,6	538,0
			<i>Taifun</i>	539,3	540,7	529,3	545,3
	2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	533,6	541,9	546,9	545,8
			<i>Tiffany</i>	547,6	544,6	550,5	553,7
			<i>Taifun</i>	547,7	547,3	557,2	555,6
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	519,5	522,5	526,3	525,9
			<i>Tiffany</i>	522,3	530,9	532,4	532,7
			<i>Taifun</i>	526,1	534,1	535,1	534,2
Methan	2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	264,6	264,7	267,5	269,8
			<i>Tiffany</i>	265,6	272,1	267,0	275,2
			<i>Taifun</i>	269,5	268,3	271,2	281,1
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	270,9	269,2	264,8	263,9
			<i>Tiffany</i>	273,5	276,2	264,1	273,1
			<i>Taifun</i>	270,7	271,6	266,4	276,7
	2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Fuego</i>	267,8	270,9	274,3	273,3
			<i>Tiffany</i>	274,5	272,5	276,7	279,1
			<i>Taifun</i>	275,0	274,2	280,2	279,3
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	260,2	262,6	264,0	265,0
			<i>Tiffany</i>	262,8	267,4	268,0	269,2
			<i>Taifun</i>	264,1	269,1	269,4	269,2

G.=Gas

Tabelle 49: Theoretische Gasausbeuten der Ackerbohnenstrohsilagen (l/kg TM).

Gas	Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
				frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife
Biogas	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	499,0	505,2	521,0
			<i>Tiffany</i>	504,1	508,3	519,9
			<i>Taifun</i>	510,9	523,5	527,0
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	512,3	516,0	511,2
			<i>Tiffany</i>	514,2	526,7	509,7
			<i>Taifun</i>	513,3	522,2	515,1
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	518,3	524,4	543,1
			<i>Tiffany</i>	523,7	532,2	548,6
			<i>Taifun</i>	533,3	529,2	552,2
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	504,6	517,3	*
			<i>Tiffany</i>	514,2	523,8	*
			<i>Taifun</i>	515,9	529,8	*
Methan	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	249,8	252,1	262,3
			<i>Tiffany</i>	253,7	254,9	262,3
			<i>Taifun</i>	257,0	263,0	265,2
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	256,8	258,5	256,7
			<i>Tiffany</i>	258,3	264,7	256,3
			<i>Taifun</i>	257,4	261,3	258,5
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	259,0	260,7	272,1
			<i>Tiffany</i>	262,6	266,6	275,3
			<i>Taifun</i>	267,2	264,0	277,6
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	253,0	258,9	*
			<i>Tiffany</i>	258,7	263,3	*
			<i>Taifun</i>	259,4	266,1	*

*=keine Silage wegen erhöhter TM-Gehalte.

Tabelle 50: Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in l/kg TM und p-Werte der theoretischen Gasausbeuten von Ackerbohnenstroh und Ackerbohnenstrohsilagen (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).

Faktoren	Biogas Stroh		Methan Stroh		Biogas Silage		Methan Silage	
	GD	p	GD	p	GD	p	GD	p
O	1,90	0,000	1,00	0,000	2,35	0,006	1,26	0,017
J	1,90	0,012	n.s.		2,35	0,000	1,26	0,000
T	2,69	0,006	1,42	0,000	2,88	0,000	1,54	0,000
S	2,33	0,000	1,23	0,000	3,01	0,001	1,61	0,001
T*S	4,66	0,032	2,45	0,025	n.s.		n.s.	
O*T	3,81	0,002	2,00	0,001	4,08	0,001	2,18	0,001
O*J	2,69	0,000	1,42	0,000	3,33	0,000	1,78	0,001
J*T	3,81	0,000	2,00	0,000	n.s.		n.s.	
J*O*T	5,38	0,035	2,83	0,008	n.s.		n.s.	
J*T*S	6,59	0,033	3,47	0,018	n.s.		n.s.	

GD=Grenzdifferenz, O=Standort, J=Jahr, T=Erntetermin, S=Sorte, n.s.=nicht signifikant.

Die Korrelationen zwischen den gemessenen Ausbeuten im Biogasertragstest und den dazugehörigen theoretischen Gasausbeuten wiesen, mit Ausnahme der Erbsenstrohsilagen, geringe Bestimmtheitsmaße auf und waren mit Ausnahme der Erbsenstrohsilage nicht signifikant (Abbildung 28).

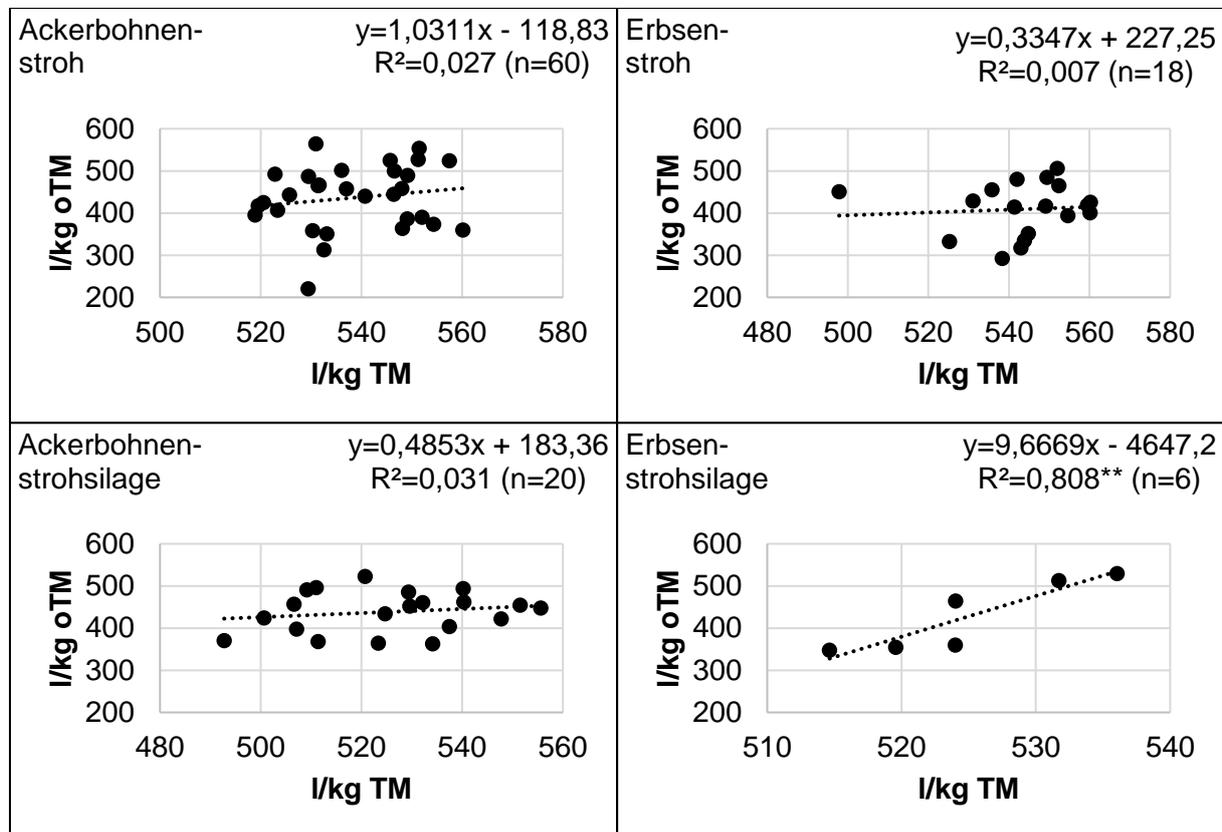


Abbildung 28: Lineare Regressionen und Bestimmtheitsmaße zwischen theoretischen (x-Achse I/kg TM) und gemessenen Gasausbeuten (y-Achse I/kg oTM).

4.2 Untersuchungen zur Nachwirkung der Strohbergung auf die Folgekultur Winterweizen

4.2.1 Feldversuche

4.2.1.1 N_{min}-Ergebnisse

Um die Stickstoffdynamik im ersten Halbjahr zu erfassen und die Düngemenge zu bestimmen, wurden nach der Weizenaussaat jeweils zu Vegetationsende und -beginn N_{min}-Untersuchungen durchgeführt; die Ergebnisse sind in Tabelle 51 dargestellt. Insgesamt unterschieden sich die Zeitpunkte der Probenahme ebenso wie die Standorte, die Jahre und die Vorfrucht in den meisten Fällen voneinander, während die Strohbergung keine Unterschiede bewirkte. Die N_{min}-Gehalte waren im Versuchsjahr 2018/2019, unabhängig vom Zeitpunkt der Entnahme, höher als im Versuchsjahr 2017/2018. Die Verluste über den Winter waren teilweise vergleichbar und teilweise im Versuchsjahr 2018/2019 höher. Eine Übersicht über die signifikanten Haupt- und Wechselwirkungen mit Grenzdifferenz und p-Wert befindet sich in Tabelle 52.

Tabelle 51: N_{min}-Werte des Weizens (0–90 cm) (kg N/ha).

Vorfrucht	Jahr	Standort	Strohbergung	Vegetations- ende	Vegetations- beginn
Erbse	2017/2018	Haarstrang	mit Stroh	125,75	80,25
			ohne Stroh	140,50	77,25
	2018/2019	Soester	mit Stroh	162,00	74,75
			ohne Stroh	154,00	77,50
	2018/2019	Börde	mit Stroh	159,50	84,25
			ohne Stroh	155,75	78,25
	2018/2019	Soester	mit Stroh	175,75	122,50
			ohne Stroh	189,25	139,50
Ackerbohne	2017/2018	Haarstrang	mit Stroh	97,75	76,50
			ohne Stroh	107,75	76,50
	2018/2019	Soester	mit Stroh	89,25	49,50
			ohne Stroh	80,25	45,00
	2018/2019	Börde	mit Stroh	162,75	99,00
			ohne Stroh	162,75	99,00
	2018/2019	Soester	mit Stroh	197,00	140,00
			ohne Stroh	210,75	140,25

Die Verteilung des Gesamt N_{min}-Gehalts von 0–90 cm Tiefe auf die Tiefen 0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm ist in Abbildung 29 in Abhängigkeit der Faktoren Vorfrucht, Jahr und Zeitpunkt der Entnahme dargestellt. Während der Gesamt N_{min}-Gehalt zum Vegetationsende grundsätzlich höher war als zu Vegetationsbeginn, trifft dies nicht für

die einzelnen Tiefen zu. Insbesondere im Versuchsjahr 2018/2019 ist die Verlagerung des Stickstoffs von der Bodentiefe 0–30 cm in die tiefere Schicht von 60–90 cm erkennbar. Außerdem war in diesem Versuchsjahr zu Vegetationsbeginn der Hauptanteil des Stickstoffs in der obersten Bodenschicht vorhanden, während sich im Versuchsjahr 2017/2018 ein gegenteiliges Bild zeigte.

Tabelle 52: Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in kg N/ha und p-Werte der N_{min} -Werte (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).

Faktoren	Gesamt N_{min}	
	GD	p
O	8,6	0,009
J	8,6	0,000
V	8,6	0,032
St	n.s.	
Z	8,6	0,000
O*J	12,1	0,003
V*J	12,1	0,003
V*Z	12,1	0,043
O*V*J	17,1	0,037
V*Z*J	17,1	0,044

GD=Grenzdifferenz, O=Standort, J=Jahr, V=Vorfrucht, St=Strohbergung, Z=Zeitpunkt, n.s.=nicht signifikant.

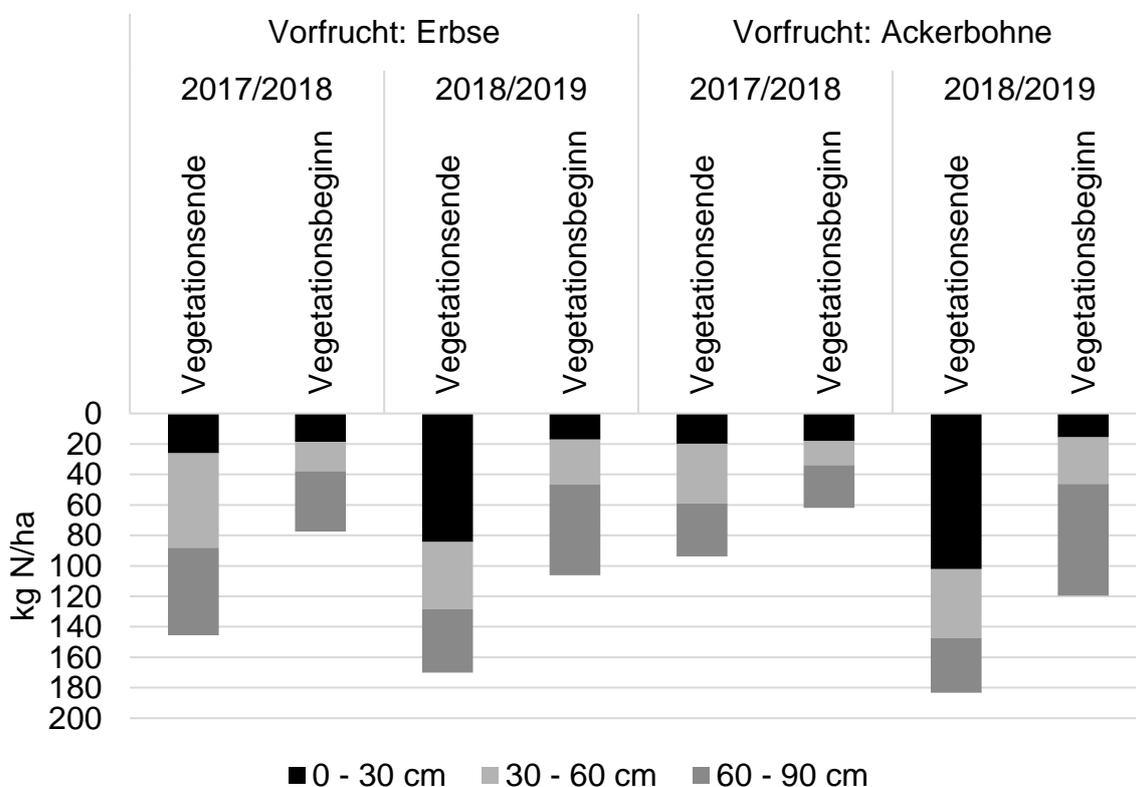


Abbildung 29: N_{min} -Gehalte (kg N/ha) der verschiedenen Bodentiefen in Abhängigkeit von Vorfrucht, Jahr und Zeitpunkt der Entnahme (Mittel über Strohbergung und Standort).

4.2.1.2 NDVI-Werte

Im Anschluss an die N_{min}-Untersuchungen schlossen sich Messungen zum Vegetationsindex NDVI zur Beschreibung der Bestandsentwicklung an. Hierbei nimmt der NDVI zunächst während der Jugendentwicklung durch die sich bildende Blattmasse und durch steigende Chlorophyllgehalte des Winterweizens zu, während der sinkende Chlorophyllgehalt zur Abreife eine Abnahme des NDVI bewirkt. Dadurch können Rückschlüsse auf die Stickstoffversorgung der Pflanzen gezogen werden. Die Ergebnisse der NDVI-Messungen sind in Tabelle 53 bis Tabelle 56 abgebildet. Auch bei diesen Untersuchungen gab es keine signifikanten Unterschiede in Haupt- und nur vereinzelt in den Wechselwirkungen der Strohabfuhr (Tabelle 57). In Tabelle 53 sind die NDVI-Werte nach Vorfrucht Erbse im Jahr 2018 und in Tabelle 54 diejenigen des Jahres 2019 dargestellt.

Tabelle 53: NDVI-Werte nach Vorfrucht Erbse im Jahr 2018.

Termin	Standort	Stroh- bergung	N-Düngestufe					
			1	2	3	4	5	6
06.04.	Haarstrang	mit Stroh	0,340	0,342	0,342	0,359	0,350	0,344
		ohne Stroh	0,353	0,375	0,353	0,353	0,365	0,369
	Soester Börde	mit Stroh	0,736	0,760	0,763	0,775	0,758	0,755
		ohne Stroh	0,730	0,772	0,731	0,747	0,761	0,755
17.04.	Haarstrang	mit Stroh	0,507	0,577	0,597	0,629	0,618	0,602
		ohne Stroh	0,524	0,628	0,611	0,617	0,640	0,647
	Soester Börde	mit Stroh	0,766	0,837	0,811	0,842	0,862	0,833
		ohne Stroh	0,777	0,833	0,804	0,825	0,844	0,850
27.04.	Haarstrang	mit Stroh	0,686	0,754	0,774	0,806	0,790	0,786
		ohne Stroh	0,677	0,794	0,762	0,783	0,795	0,812
	Soester Börde	mit Stroh	0,779	0,871	0,839	0,867	0,885	0,861
		ohne Stroh	0,813	0,865	0,830	0,841	0,873	0,878
07.05.	Haarstrang	mit Stroh	0,569	0,698	0,734	0,779	0,760	0,760
		ohne Stroh	0,556	0,744	0,720	0,747	0,762	0,791
	Soester Börde	mit Stroh	0,742	0,848	0,826	0,860	0,875	0,847
		ohne Stroh	0,743	0,844	0,813	0,832	0,862	0,862
02.07.	Haarstrang	mit Stroh	0,416	0,552	0,577	0,615	0,612	0,632
		ohne Stroh	0,430	0,553	0,597	0,625	0,610	0,646
	Soester Börde	mit Stroh	0,295	0,489	0,496	0,551	0,574	0,575
		ohne Stroh	0,292	0,446	0,485	0,524	0,573	0,591
09.07.	Haarstrang	mit Stroh	0,220	0,326	0,373	0,416	0,418	0,427
		ohne Stroh	0,227	0,342	0,368	0,391	0,419	0,459
	Soester Börde	mit Stroh	0,156	0,254	0,244	0,283	0,316	0,313
		ohne Stroh	0,161	0,222	0,246	0,262	0,301	0,328

N-Düngestufen: 1=keine N-Düngung, 2=Sollwert -60 kg, 3=Sollwert -30 kg, 4=Sollwert, 5=Sollwert +30 kg, 6=Sollwert +60 kg.

Zur Jugendentwicklung war der NDVI am Standort Soester Börde in beiden Jahren höher, wobei dieser Unterschied mit fortschreitender Entwicklung geringer wurde. Eine Ausnahme hiervon bildete die Düngestufe 1 – keine N-Düngung. Mit steigender N-Düngung stiegen auch die NDVI-Werte. Zu den Untersuchungsterminen der Abreife waren im ersten Jahr die NDVI-Werte in der Soester Börde geringer, während sich im zweiten Versuchsjahr ein gegenteiliges Bild zeigte.

Tabelle 54: NDVI-Werte nach Vorfrucht Erbse im Jahr 2019.

Termin	Standort	Stroh- bergung	N-Düngestufe					
			1	2	3	4	5	6
29.03.	Haarstrang	mit Stroh	0,455	0,569	0,599	0,602	0,601	0,629
		ohne Stroh	0,476	0,569	0,595	0,620	0,627	0,610
	Soester Börde	mit Stroh	0,673	0,683	0,755	0,763	0,781	0,794
		ohne Stroh	0,677	0,687	0,742	0,763	0,764	0,782
08.04.	Haarstrang	mit Stroh	0,481	0,648	0,685	0,711	0,718	0,736
		ohne Stroh	0,505	0,646	0,689	0,714	0,737	0,740
	Soester Börde	mit Stroh	0,698	0,711	0,785	0,784	0,817	0,829
		ohne Stroh	0,704	0,715	0,764	0,788	0,794	0,820
23.04.	Haarstrang	mit Stroh	0,424	0,614	0,677	0,708	0,738	0,763
		ohne Stroh	0,454	0,620	0,683	0,711	0,745	0,764
	Soester Börde	mit Stroh	0,743	0,753	0,808	0,805	0,841	0,849
		ohne Stroh	0,754	0,766	0,799	0,815	0,815	0,846
02.05.	Haarstrang	mit Stroh	0,515	0,709	0,763	0,793	0,810	0,844
		ohne Stroh	0,558	0,718	0,759	0,798	0,816	0,836
	Soester Börde	mit Stroh	0,761	0,790	0,828	0,823	0,850	0,863
		ohne Stroh	0,774	0,793	0,818	0,835	0,838	0,857
13.05.	Haarstrang	mit Stroh	0,613	0,782	0,818	0,837	0,851	0,883
		ohne Stroh	0,648	0,788	0,802	0,851	0,875	0,869
	Soester Börde	mit Stroh	0,815	0,853	0,854	0,839	0,882	0,885
		ohne Stroh	0,819	0,848	0,847	0,858	0,858	0,884
01.07.	Haarstrang	mit Stroh	0,383	0,508	0,575	0,605	0,622	0,640
		ohne Stroh	0,409	0,522	0,566	0,604	0,629	0,645
	Soester Börde	mit Stroh	0,583	0,643	0,692	0,712	0,741	0,735
		ohne Stroh	0,583	0,619	0,667	0,700	0,706	0,751
09.07.	Haarstrang	mit Stroh	0,227	0,284	0,357	0,400	0,448	0,486
		ohne Stroh	0,234	0,283	0,346	0,393	0,444	0,492
	Soester Börde	mit Stroh	0,307	0,354	0,415	0,437	0,471	0,472
		ohne Stroh	0,307	0,334	0,376	0,438	0,444	0,484

N-Düngeufen: 1=keine N-Düngung, 2=Sollwert –60 kg, 3=Sollwert –30 kg, 4=Sollwert, 5=Sollwert +30 kg, 6=Sollwert +60 kg.

In Tabelle 55 sind die NDVI-Werte nach Vorfrucht Ackerbohne im Jahr 2018 und in Tabelle 56 diejenigen für das Jahr 2019 dargestellt, in denen keinerlei Effekte hinsichtlich der Strohabfuhr festgestellt wurden. Wie nach der Vorfrucht Erbse zeigte sich ein deutlicher Effekt der Düngestufen, mit deren Anstieg ebenfalls die NDVI-Werte anstiegen. Ein Standortunterschied lag nur im Jahr 2018 zum ersten Untersuchungstermin und ansonsten vereinzelt bei der niedrigsten Düngestufe vor – in diesen Fällen war der NDVI-Wert am Haarstrang geringer als in der Soester Börde. Nach beiden Vorfrüchten zeigte sich demnach das hohe N-Mineralisationspotential der Soester Börde.

Tabelle 55: NDVI-Werte nach Vorfrucht Ackerbohne im Jahr 2018.

Termin	Standort	Stroh- bergung	N-Düngestufe					
			1	2	3	4	5	6
06.04.	Haarstrang	mit Stroh	0,447	0,470	0,492	0,476	0,487	0,480
		ohne Stroh	0,445	0,472	0,481	0,473	0,482	0,480
	Soester Börde	mit Stroh	0,608	0,707	0,717	0,728	0,730	0,734
		ohne Stroh	0,622	0,713	0,702	0,712	0,720	0,726
17.04.	Haarstrang	mit Stroh	0,579	0,736	0,775	0,764	0,791	0,786
		ohne Stroh	0,582	0,744	0,765	0,769	0,780	0,782
	Soester Börde	mit Stroh	0,561	0,752	0,752	0,786	0,799	0,797
		ohne Stroh	0,592	0,775	0,752	0,782	0,791	0,812
27.04.	Haarstrang	mit Stroh	0,639	0,811	0,824	0,841	0,834	0,848
		ohne Stroh	0,638	0,807	0,830	0,841	0,851	0,847
	Soester Börde	mit Stroh	0,612	0,807	0,792	0,832	0,849	0,850
		ohne Stroh	0,662	0,811	0,786	0,826	0,841	0,865
07.05.	Haarstrang	mit Stroh	0,528	0,788	0,822	0,829	0,836	0,843
		ohne Stroh	0,531	0,795	0,812	0,827	0,840	0,841
	Soester Börde	mit Stroh	0,573	0,805	0,790	0,829	0,844	0,835
		ohne Stroh	0,612	0,821	0,790	0,821	0,831	0,851
02.07.	Haarstrang	mit Stroh	0,245	0,300	0,301	0,315	0,317	0,336
		ohne Stroh	0,244	0,316	0,308	0,319	0,318	0,317
	Soester Börde	mit Stroh	0,195	0,274	0,312	0,360	0,395	0,412
		ohne Stroh	0,204	0,293	0,326	0,378	0,393	0,436
09.07.	Haarstrang	mit Stroh	0,165	0,212	0,232	0,253	0,266	0,291
		ohne Stroh	0,166	0,231	0,233	0,264	0,276	0,272
	Soester Börde	mit Stroh	0,134	0,172	0,175	0,209	0,229	0,237
		ohne Stroh	0,140	0,176	0,194	0,214	0,222	0,251

N-Düngestufen: 1=keine N-Düngung, 2=Sollwert –60 kg, 3=Sollwert –30 kg, 4=Sollwert, 5=Sollwert +30 kg, 6=Sollwert +60 kg.

Tabelle 56: NDVI-Werte nach Vorfrucht Ackerbohne im Jahr 2019.

Termin	Standort	Stroh- bergung	N-Düngestufe					
			1	2	3	4	5	6
29.03.	Haarstrang	mit Stroh	0,632	0,688	0,705	0,722	0,735	0,716
		ohne Stroh	0,614	0,685	0,690	0,717	0,730	0,733
	Soester	mit Stroh	0,638	0,644	0,722	0,733	0,760	0,754
		Börde	ohne Stroh	0,647	0,642	0,722	0,746	0,757
08.04.	Haarstrang	mit Stroh	0,625	0,701	0,724	0,751	0,763	0,774
		ohne Stroh	0,608	0,698	0,720	0,751	0,767	0,783
	Soester	mit Stroh	0,654	0,655	0,729	0,743	0,783	0,785
		Börde	ohne Stroh	0,656	0,651	0,726	0,761	0,781
23.04.	Haarstrang	mit Stroh	0,599	0,677	0,721	0,755	0,773	0,779
		ohne Stroh	0,590	0,678	0,708	0,745	0,769	0,802
	Soester	mit Stroh	0,691	0,697	0,759	0,775	0,804	0,807
		Börde	ohne Stroh	0,698	0,682	0,761	0,797	0,809
02.05.	Haarstrang	mit Stroh	0,667	0,750	0,785	0,814	0,824	0,820
		ohne Stroh	0,656	0,743	0,782	0,802	0,819	0,845
	Soester	mit Stroh	0,712	0,728	0,794	0,793	0,828	0,832
		Börde	ohne Stroh	0,719	0,708	0,789	0,817	0,837
13.05.	Haarstrang	mit Stroh	0,694	0,790	0,822	0,844	0,853	0,856
		ohne Stroh	0,688	0,786	0,825	0,836	0,850	0,864
	Soester	mit Stroh	0,788	0,780	0,847	0,826	0,851	0,840
		Börde	ohne Stroh	0,769	0,753	0,830	0,860	0,852
01.07.	Haarstrang	mit Stroh	0,498	0,600	0,663	0,711	0,720	0,688
		ohne Stroh	0,493	0,611	0,648	0,688	0,697	0,725
	Soester	mit Stroh	0,561	0,592	0,638	0,668	0,681	0,696
		Börde	ohne Stroh	0,545	0,569	0,628	0,670	0,685
09.07.	Haarstrang	mit Stroh	0,306	0,377	0,440	0,517	0,507	0,490
		ohne Stroh	0,303	0,384	0,466	0,471	0,468	0,512
	Soester	mit Stroh	0,287	0,312	0,343	0,379	0,398	0,406
		Börde	ohne Stroh	0,291	0,298	0,334	0,381	0,401

N-Düngestufen: 1=keine N-Düngung, 2=Sollwert -60 kg, 3=Sollwert -30 kg, 4=Sollwert, 5=Sollwert +30 kg, 6=Sollwert +60 kg.

Die signifikanten Haupt- und Wechselwirkungen sind in Tabelle 57 aufgeführt. Die signifikante Wechselwirkung Strohabfuhr*Standort kam nur nach Vorfrucht Erbse vor und entstand 2018 dadurch, dass in der Soester Börde der NDVI mit und ohne Stroh gleich und am Haarstrang der NDVI ohne Stroh gesichert höher war (Tabelle A46). Im Jahr 2019 kam es zu einer signifikanten Wechselwirkung Strohabfuhr*Standort zu einem der letzten Untersuchungstermine während der Abreife (Tabelle A50); hier war in der Soester Börde der NDVI mit Stroh gesichert höher, während er am Haarstrang ohne Stroh gesichert höher war. Anders als im Jahr 2018 zeigten sich keine signifikanten Wechselwirkungen während der Jugendentwicklung. In der Hauptwirkung und den anderen Wechselwirkungen war die Strohabfuhr nicht signifikant.

Tabelle 57: Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit und p-Werte der NDVI-Werte (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).

Termin	Faktoren	Erbse 2018		Erbse 2019		AB 2018		AB 2019	
		GD	p	GD	p	GD	p	GD	p
1	O	0,010	0,000	0,009	0,000	0,004	0,000	0,005	0,000
	N	n.s.		0,015	0,000	0,008	0,000	0,009	0,000
	N*O	n.s.		0,021	0,001	0,009	0,000	0,013	0,000
	St*O	0,014	0,009	n.s.		n.s.		n.s.	
2	O	0,013	0,000	0,009	0,000	n.s.		n.s.	
	N	0,023	0,000	0,016	0,000	0,016	0,000	0,012	0,000
	N*O	n.s.		0,022	0,000	n.s.		0,017	0,000
	St*O	0,018	0,017	n.s.		n.s.		n.s.	
3	O	0,016	0,000	0,009	0,000	n.s.		0,011	0,000
	N	0,029	0,000	0,016	0,000	0,019	0,000	0,019	0,000
	N*O	n.s.		0,023	0,000	n.s.		0,027	0,004
4	O	0,015	0,000	0,010	0,000	0,007	0,047	n.s.	
	N	0,027	0,000	0,017	0,000	0,016	0,000	0,023	0,000
	N*O	0,036	0,026	0,025	0,000	0,018	0,000	n.s.	
5	O	0,015	0,000	0,016	0,000	0,008	0,000	n.s.	
	N	0,028	0,000	0,028	0,000	0,017	0,000	0,023	0,000
	N*O	n.s.		0,039	0,000	0,020	0,000	0,032	0,003
6	O	0,011	0,000	0,007	0,000	0,006	0,000	n.s.	
	N	0,020	0,000	0,012	0,000	0,013	0,000	0,035	0,000
	N*O	0,026	0,036	0,017	0,000	n.s.		n.s.	
	St*O	n.s.		0,010	0,010	n.s.		n.s.	
7	O			0,007	0,000			0,023	0,000
	N			0,012	0,000			0,039	0,000
	N*O			0,017	0,000			n.s.	

AB=Ackerbohne, GD=Grenzdifferenz, O=Standort, N=N-Düngestufe, St=Strohbergung, n.s.=nicht signifikant.

4.2.1.3 Erträge

Die Parzellenerträge sind in Tabelle 58 nach Vorfrucht Erbse und in Tabelle 59 nach Vorfrucht Ackerbohne dargestellt. Die signifikanten Haupt- und Wechselwirkungen sind in Tabelle 60 dargestellt; weder nach Vorfrucht Erbse noch nach Vorfrucht Ackerbohne waren diese hinsichtlich der Strohabfuhr signifikant. Die Erträge nach Vorfrucht Erbse waren im ersten Jahr am Standort Haarstrang höher als in der Soester Börde, im zweiten Jahr war das Gegenteil der Fall. Die Erträge am Haarstrang stiegen mit Erhöhung der N-Düngergabe, dieser Effekt war in der Soester Börde nur zwischen der Düngestufe 1 (keine N-Düngung) und den anderen Stufen vorhanden.

Tabelle 58: Weizenerträge (dt/ha) nach Vorfrucht Erbse, bezogen auf 14% Feuchte.

Jahr	Standort	Stroh- bergung	N-Düngestufe					
			1	2	3	4	5	6
2018	Haar- strang	mit Stroh	76,42	95,22	94,51	104,01	102,21	109,80
		ohne Stroh	75,08	95,20	99,54	101,04	107,34	106,72
	Soester Börde	mit Stroh	88,85	92,48	93,75	92,18	92,38	91,32
		ohne Stroh	85,05	90,60	95,04	96,39	94,19	91,65
2019	Haar- strang	mit Stroh	60,44	85,96	86,48	95,77	95,54	95,61
		ohne Stroh	60,83	85,23	87,68	93,39	97,21	98,15
	Soester Börde	mit Stroh	98,48	101,25	107,59	103,36	100,70	102,51
		ohne Stroh	96,24	100,77	100,36	100,71	101,44	101,92

N-Düngestufen: 1=keine N-Düngung, 2=Sollwert -60 kg, 3=Sollwert -30 kg, 4=Sollwert, 5=Sollwert +30 kg, 6=Sollwert +60 kg.

Nach Vorfrucht Ackerbohne waren die Erträge des Standorts Haarstrang im Jahr 2018 ausnahmslos deutlich geringer als die in der Soester Börde. Im zweiten Versuchsjahr waren die Erträge ebenfalls niedriger, jedoch war die Differenz zwischen den Erträgen der beiden Standorte geringer und trat nicht bei allen Düngestufen auf.

Tabelle 59: Weizenerträge (dt/ha) nach Vorfrucht Ackerbohne, bezogen auf 14% Feuchte.

Jahr	Standort	Stroh- bergung	N-Düngestufe					
			1	2	3	4	5	6
2018	Haar- strang	mit Stroh	53,24	58,48	56,00	56,37	53,66	54,44
		ohne Stroh	53,57	57,25	54,68	54,09	54,60	52,66
	Soester Börde	mit Stroh	65,57	90,07	91,85	93,47	94,42	94,97
		ohne Stroh	66,03	88,54	90,72	92,52	94,24	93,93
2019	Haar- strang	mit Stroh	79,28	88,06	96,40	98,97	97,41	93,75
		ohne Stroh	79,28	88,82	94,48	95,35	95,41	94,69
	Soester Börde	mit Stroh	95,52	98,11	97,93	102,49	103,33	103,14
		ohne Stroh	99,07	96,46	98,81	102,60	102,27	101,39

N-Düngestufen: 1=keine N-Düngung, 2=Sollwert -60 kg, 3=Sollwert -30 kg, 4=Sollwert, 5=Sollwert +30 kg, 6=Sollwert +60 kg.

Tabelle 60: Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit in dt/ha, bezogen auf 14% Feuchte und p-Werte der Weizenerträge (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).

Faktoren	VF: Erbse		VF: Ackerbohne	
	GD	p	GD	p
O	1,39	0,000	1,37	0,000
J	n.s.		1,37	0,000
N	2,49	0,000	2,38	0,000
St	n.s.		n.s.	
N*O	3,41	0,000	3,36	0,012
N*J	n.s.		3,36	0,019
J*O	1,97	0,000	1,94	0,000
J*O*N	n.s.		4,75	0,000

VF=Vorfrucht, GD=Grenzdifferenz, O=Standort, J=Jahr, N=N-Düngung, St=Strohbergung, n.s.=nicht signifikant.

4.2.2 Qualitätsanalysen

Für die Qualitätsanalyse wurden die Parameter Tausendkornmasse und Rohproteingehalt erfasst; die Ergebnisse sind in Tabelle 61 bis Tabelle 64 dargestellt. Die signifikanten Haupt- und Wechselwirkungen zeigt Tabelle 65. Die Tausendkornmasse nach Vorfrucht Erbse war am Haarstrang in beiden Jahren höher als in der Soester Börde. Die Düngestufen hatten, mit Ausnahme der Variante ohne Düngung am Standort Soester Börde in 2018, keinen Einfluss auf die TKM. Nach Vorfrucht Ackerbohne waren im ersten Jahr die Werte am Haarstrang höher als in der Soester Börde, im zweiten Jahr war es Gegenteil. Auch hier hatte die Düngestufe nur geringe Effekte – einzige Ausnahme war die Düngestufe 1 am Standort Haarstrang in 2018, die im Vergleich zu den übrigen Düngestufen eine niedrigere TKM aufwies.

Tabelle 61: Tausendkornmasse (g) des Weizens nach Vorfrucht Erbse.

Jahr	Standort	Stroh- bergung	N-Düngestufe					
			1	2	3	4	5	6
2018	Haarstrang	mit Stroh	43,73	42,78	43,71	42,98	43,47	43,02
		ohne Stroh	43,82	43,03	43,78	43,59	43,37	41,97
	Soester Börde	mit Stroh	44,00	40,39	38,68	39,11	38,47	37,73
		ohne Stroh	42,99	40,91	39,25	39,73	39,11	37,85
2019	Haarstrang	mit Stroh	38,76	42,94	41,72	42,12	43,26	43,69
		ohne Stroh	39,90	42,69	41,12	41,72	43,32	43,51
	Soester Börde	mit Stroh	40,39	39,60	40,03	39,89	39,18	39,23
		ohne Stroh	41,47	40,22	40,05	39,29	39,12	38,79

N-Düngestufen: 1=keine N-Düngung, 2=Sollwert -60 kg, 3=Sollwert -30 kg, 4=Sollwert, 5=Sollwert +30 kg, 6=Sollwert +60 kg.

Tabelle 62: Tausendkornmasse (g) des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne.

Jahr	Standort	Stroh- bergung	N-Düngestufe					
			1	2	3	4	5	6
2018	Haarstrang	mit Stroh	41,49	35,27	33,07	33,55	31,96	31,80
		ohne Stroh	41,53	34,77	33,83	32,53	32,02	31,91
	Soester Börde	mit Stroh	39,96	38,34	37,64	37,74	37,13	36,83
		ohne Stroh	40,49	39,04	37,15	37,20	37,82	36,36
2019	Haarstrang	mit Stroh	46,13	45,05	44,45	43,04	42,66	41,40
		ohne Stroh	46,01	45,84	43,26	43,57	41,44	40,10
	Soester Börde	mit Stroh	41,10	41,04	40,58	40,47	39,38	39,42
		ohne Stroh	41,58	40,77	40,31	40,09	38,82	39,18

N-Düngestufen: 1=keine N-Düngung, 2=Sollwert -60 kg, 3=Sollwert -30 kg, 4=Sollwert, 5=Sollwert +30 kg, 6=Sollwert +60 kg.

Als zweiter Parameter wurde der Rohproteingehalt bestimmt. Nach Vorfrucht Erbse (Tabelle 63) kam es zu einer Steigerung des Rohproteingehalts mit zunehmender Düngergabe. Die Gehalte am Standort Haarstrang waren in beiden Jahren niedriger als in der Soester Börde. Die Strohbergung hatte in der Hauptwirkung einen geringen, aber signifikanten Effekt auf den Rohproteingehalt, der bei Verbleib des Strohs auf der Fläche 0,07% höher war als bei dessen Abfuhr.

Nach Vorfrucht Ackerbohne (Tabelle 64) kam es zu keinen Effekten durch die Strohbergung, jedoch kam es ebenfalls zu einer Steigerung des Rohproteingehalts mit zunehmenden Düngergaben. Die Unterschiede zwischen den Standorten waren geringer als nach Vorfrucht Erbse.

Tabelle 63: Rohproteingehalt (%) des Weizens nach Vorfrucht Erbse.

Jahr	Standort	Stroh- bergung	N-Düngestufe					
			1	2	3	4	5	6
2018	Haarstrang	mit Stroh	9,14	9,65	10,10	10,42	10,60	10,76
		ohne Stroh	9,15	9,84	10,37	10,45	10,18	10,79
	Soester Börde	mit Stroh	10,29	11,75	11,99	12,38	12,63	12,66
		ohne Stroh	10,07	11,36	11,78	12,14	12,36	12,45
2019	Haarstrang	mit Stroh	7,95	8,73	9,41	9,92	10,26	10,69
		ohne Stroh	8,17	8,87	9,30	9,77	10,05	10,52
	Soester Börde	mit Stroh	9,91	10,51	10,87	10,98	11,77	11,88
		ohne Stroh	9,74	10,29	10,75	11,27	11,47	11,69

N-Düngestufen: 1=keine N-Düngung, 2=Sollwert -60 kg, 3=Sollwert -30 kg, 4=Sollwert, 5=Sollwert +30 kg, 6=Sollwert +60 kg.

Tabelle 64: Rohproteingehalt (%) des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne.

Jahr	Standort	Stroh- bergung	N-Düngestufe					
			1	2	3	4	5	6
2018	Haarstrang	mit Stroh	8,76	9,77	10,29	10,83	11,25	11,39
		ohne Stroh	8,82	9,77	10,15	10,88	11,21	11,44
	Soester Börde	mit Stroh	8,61	9,91	10,83	11,13	11,76	11,75
		ohne Stroh	8,55	10,03	10,90	11,42	11,72	11,92
2019	Haarstrang	mit Stroh	8,80	9,29	9,68	10,37	10,78	11,27
		ohne Stroh	8,57	9,14	9,94	10,25	10,93	11,53
	Soester Börde	mit Stroh	9,91	10,18	10,31	10,66	11,05	11,49
		ohne Stroh	10,00	9,91	10,30	10,95	11,16	11,33

N-Düngestufen: 1=keine N-Düngung, 2=Sollwert -60 kg, 3=Sollwert -30 kg, 4=Sollwert, 5=Sollwert +30 kg, 6=Sollwert +60 kg.

Tabelle 65: Grenzdifferenzen bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit und p-Werte der Parameter aus den Qualitätsanalysen des Weizens (multipler t-Test, $p \leq 0,05$).

Faktoren	TKM, VF: Erbse		XP, VF: Erbse		TKM, VF: AB		XP, VF: AB	
	GD*	p	GD*	p	GD*	p	GD*	p
O	0,40	0,000	0,07	0,000	n.s.		0,06	0,000
J	0,40	0,005	0,07	0,000	0,45	0,000	0,06	0,000
N	n.s.		0,12	0,000	0,79	0,000	0,11	0,000
St	n.s.		0,07	0,014	n.s.		n.s.	
N*O	0,92	0,000	n.s.		1,11	0,000	0,16	0,037
N*J	0,92	0,001	0,17	0,001	1,11	0,001	0,16	0,000
O*J	0,53	0,024	0,10	0,002	0,64	0,000	0,09	0,002
N*J*O	n.s.		0,24	0,008	1,57	0,040	0,22	0,000

*=Angabe in g, +=Angabe in %, TKM=Tausendkornmasse, VF=Vorfrucht, XP=Rohprotein, AB=Ackerbohne, O=Standort, J=Jahr, N=N-Düngestufe, St=Strohbergung, n.s.=nicht signifikant.

Die Korrelationen zwischen NDVI und Ertrag sowie NDVI und XP sind in Abbildung 30 bis Abbildung 45 dargestellt und ergaben in Abhängigkeit von Vorfrucht, Jahr und Standort verschiedene Signifikanzen. Die Korrelationen nach Vorfrucht Erbse hinsichtlich NDVI und Ertrag waren in der Soester Börde (Abbildung 30 und Abbildung 31), mit Ausnahme von zwei Terminen zur Jugendentwicklung im Jahr 2018 sowie zur Abreife, nicht signifikant und extrem gering, während die Korrelationen am Haarstrang (Abbildung 32 und Abbildung 33) in beiden Jahren, mit Ausnahme des ersten Untersuchungstermins im Jahr 2018, hochsignifikant waren. Nach Vorfrucht Ackerbohne ergaben sich im ersten Jahr für den Standort Soester Börde (Abbildung 34 und Abbildung 35) hochsignifikante Korrelationen, während am Haarstrang (Abbildung 36 und Abbildung 37) bei keinem der Untersuchungstermine signifikante Korrelationen festgestellt wurden. Im zweiten Untersuchungsjahr zeigte sich am Haarstrang ein gegenteiliges Bild, während am Standort Soester Börde die Korrelationen wieder signifikant waren, jedoch mit deutlich geringeren Bestimmtheitsmaßen.

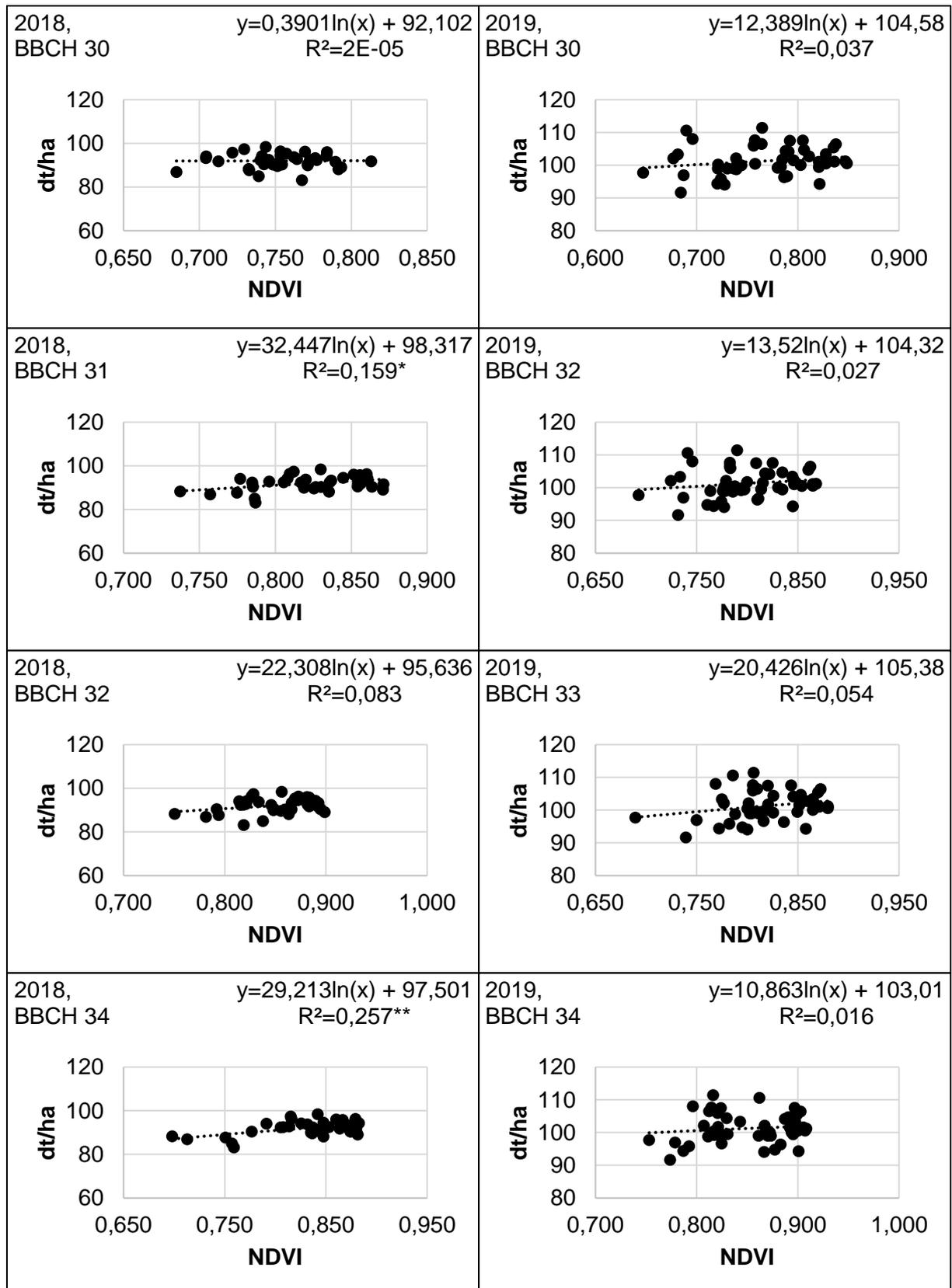


Abbildung 30: Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (2018: n=36 / 2019: n=48).

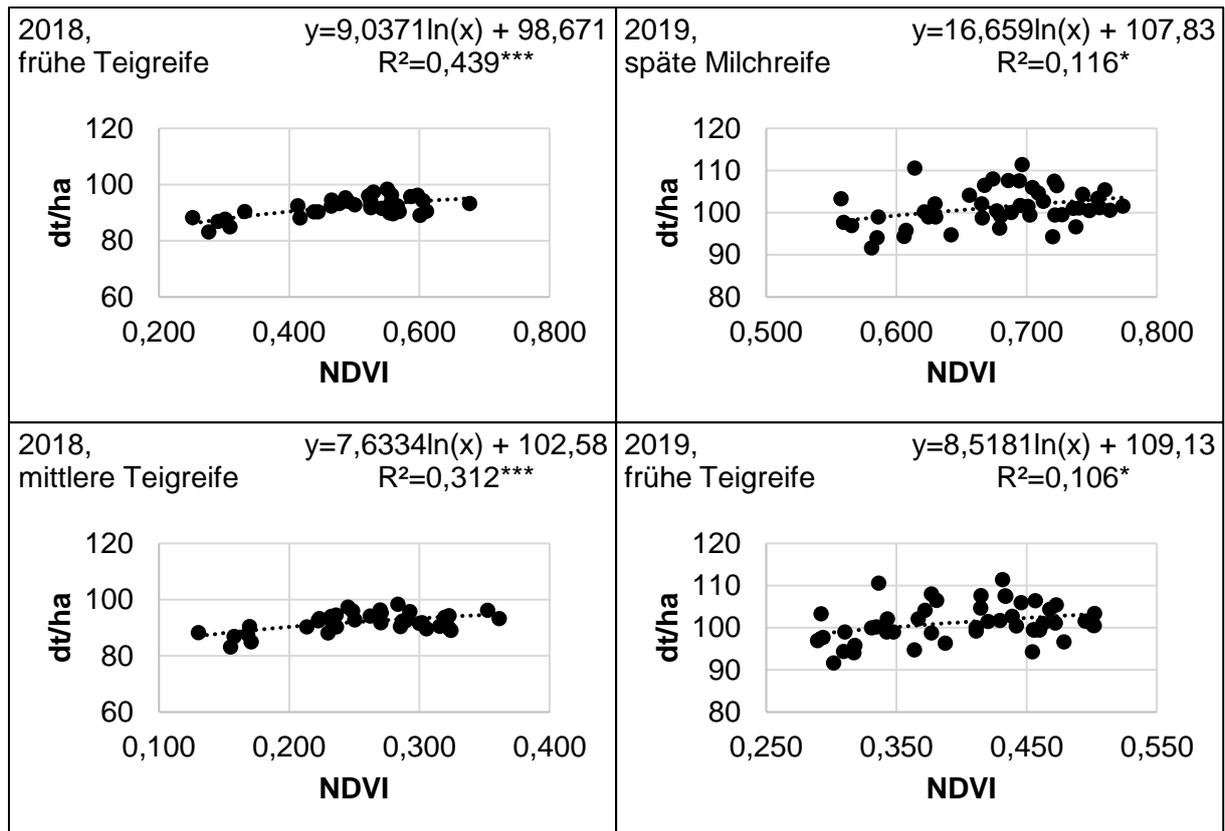


Abbildung 31: Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (2018: n=36 / 2019: n=48).

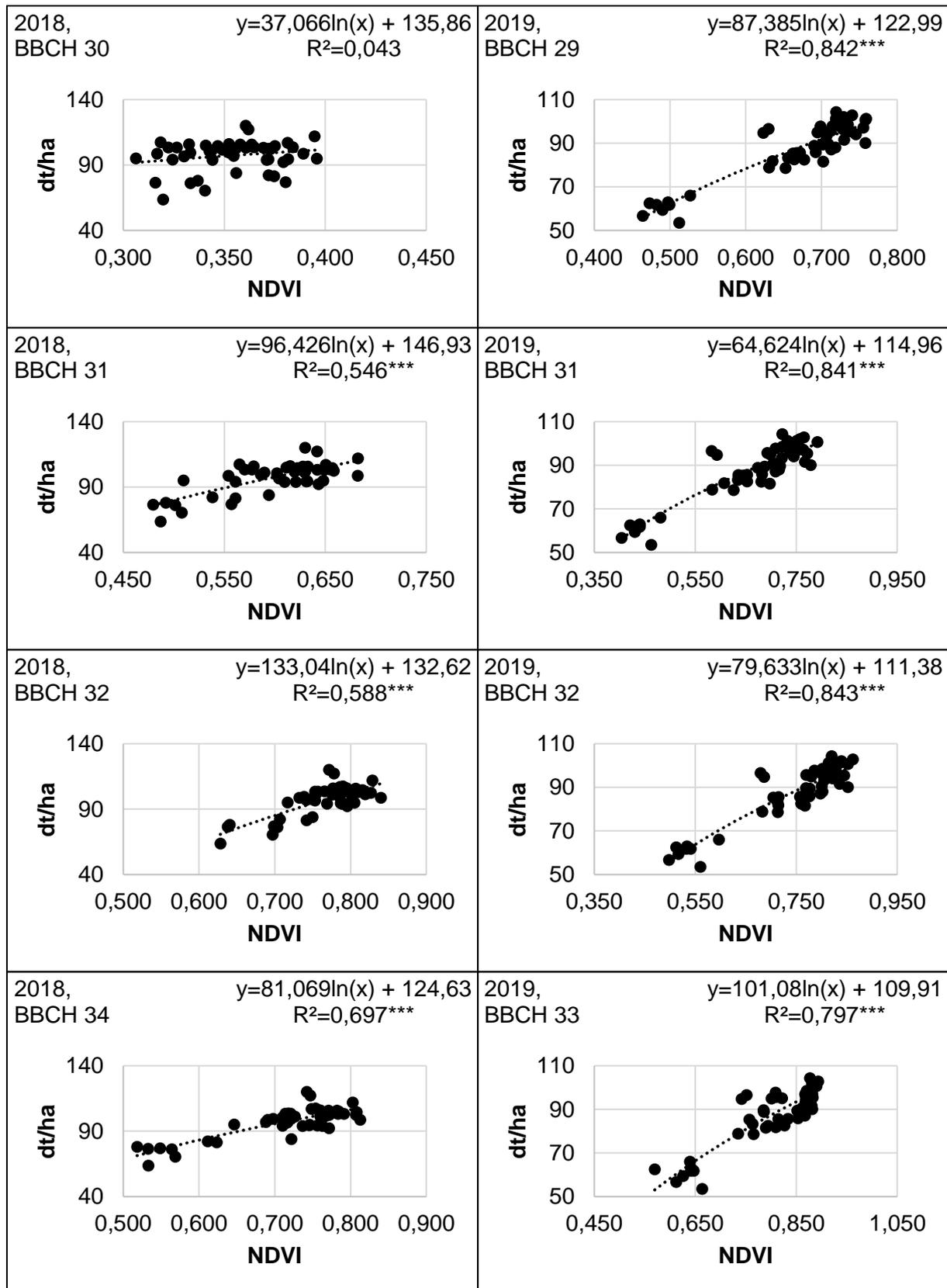


Abbildung 32: Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (n=48).

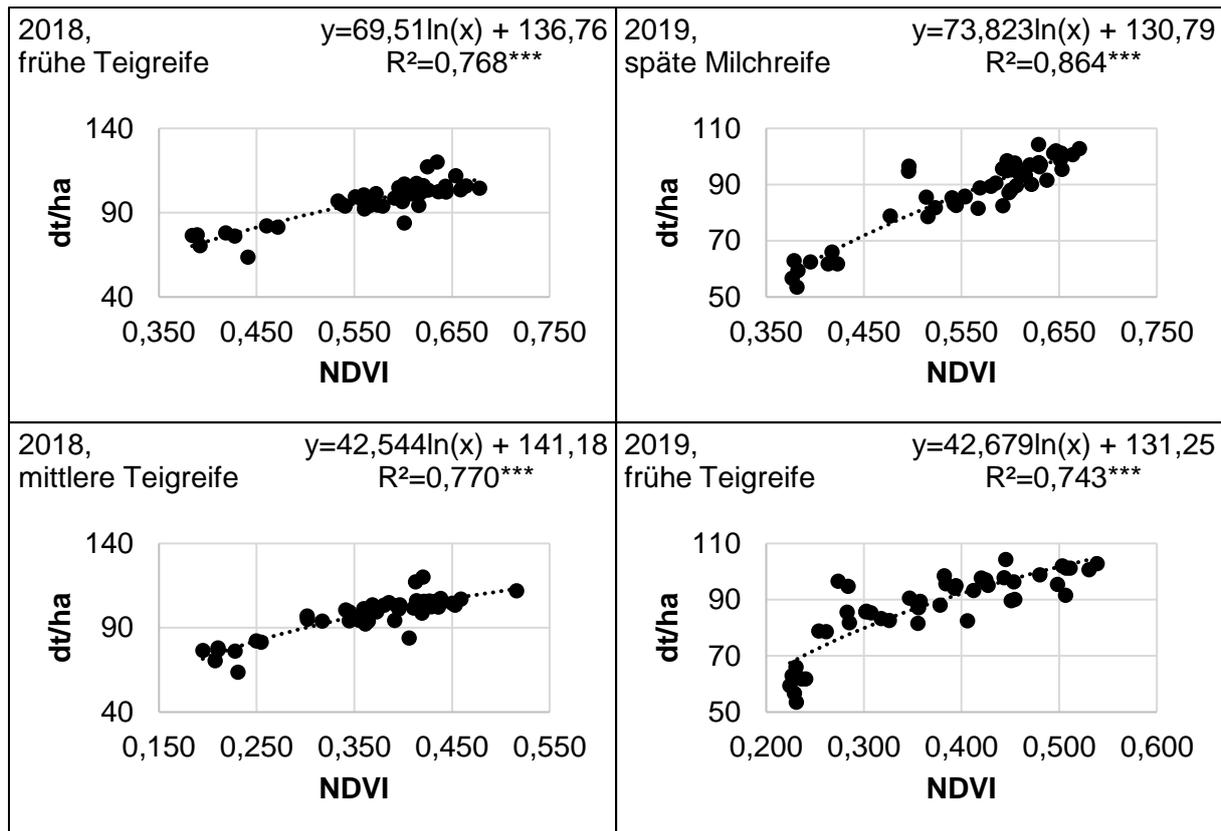


Abbildung 33: Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (n=48).

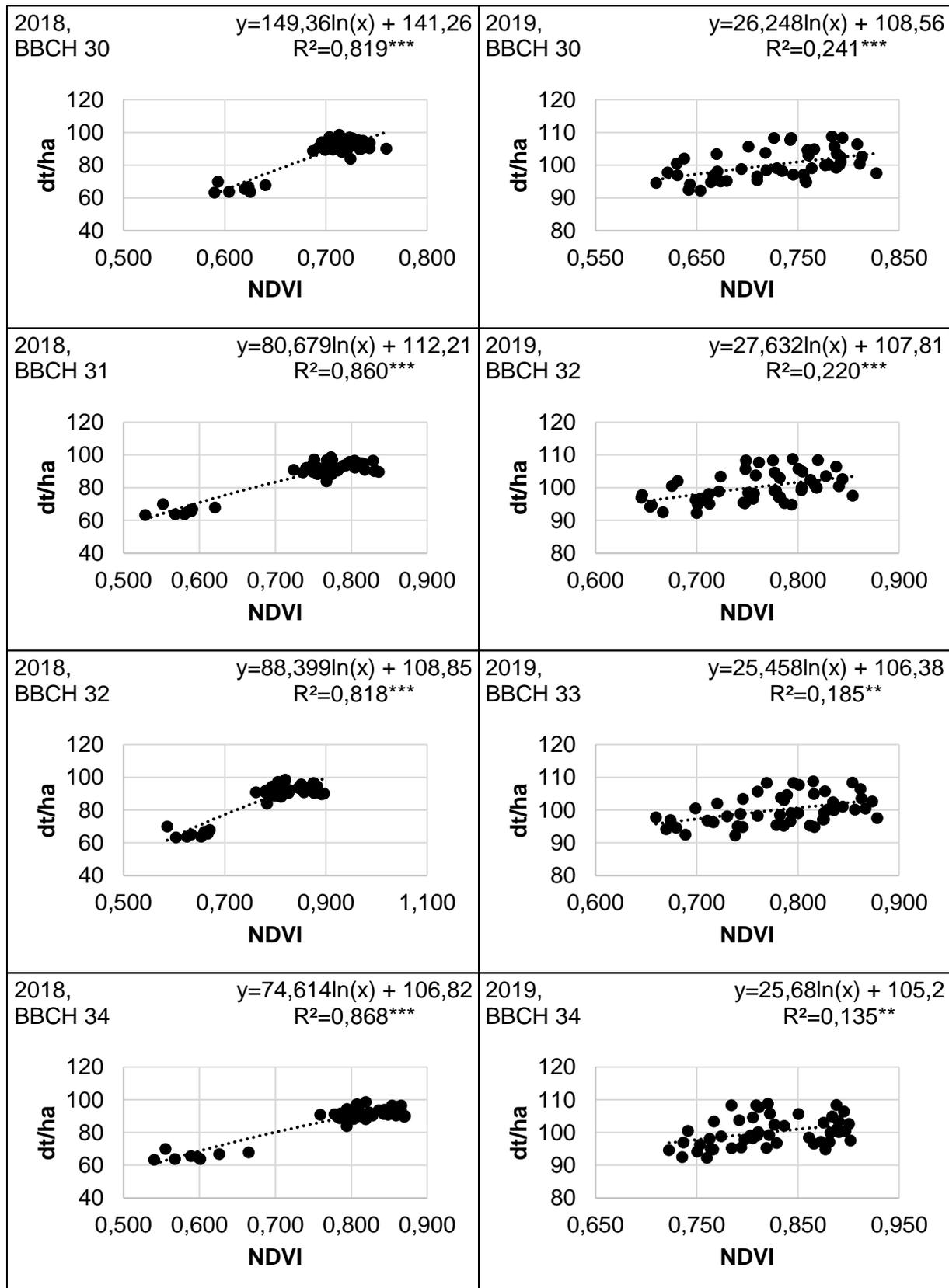


Abbildung 34: Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens ($n=48$).

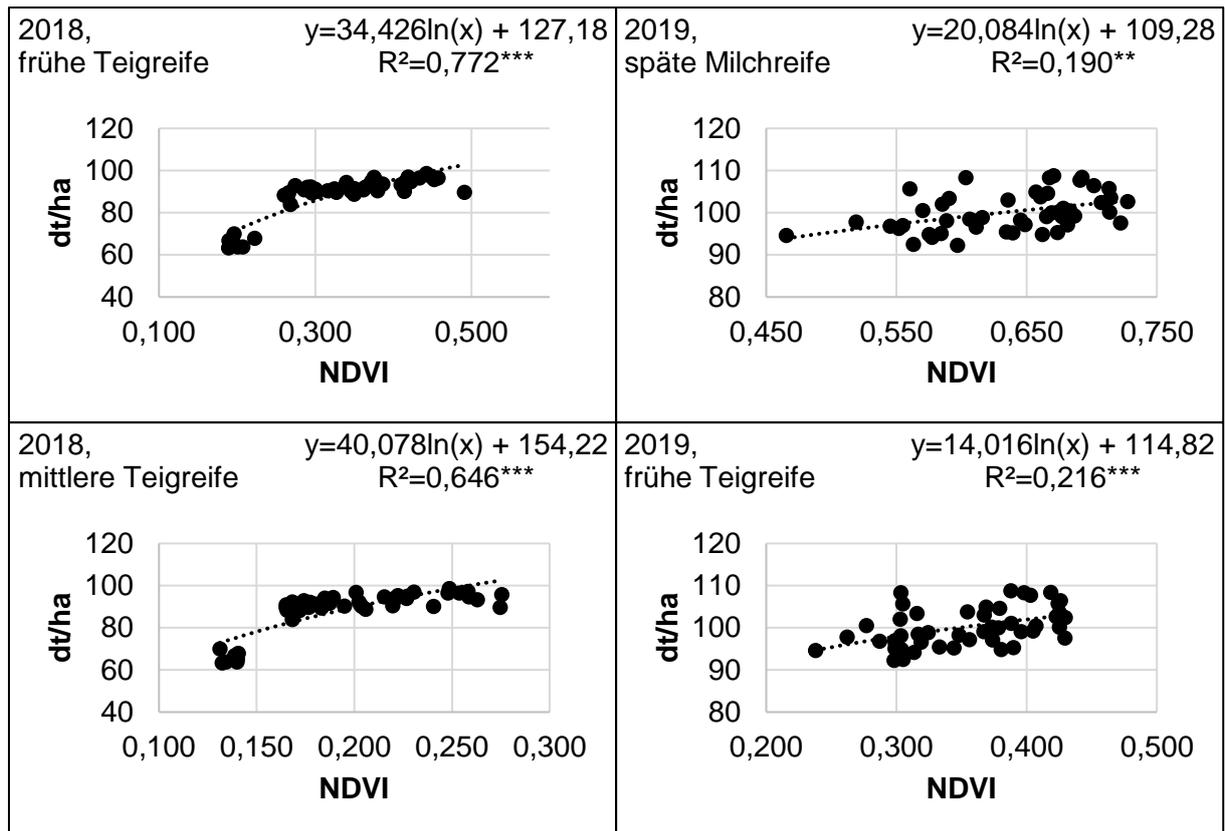


Abbildung 35: Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (n=48).

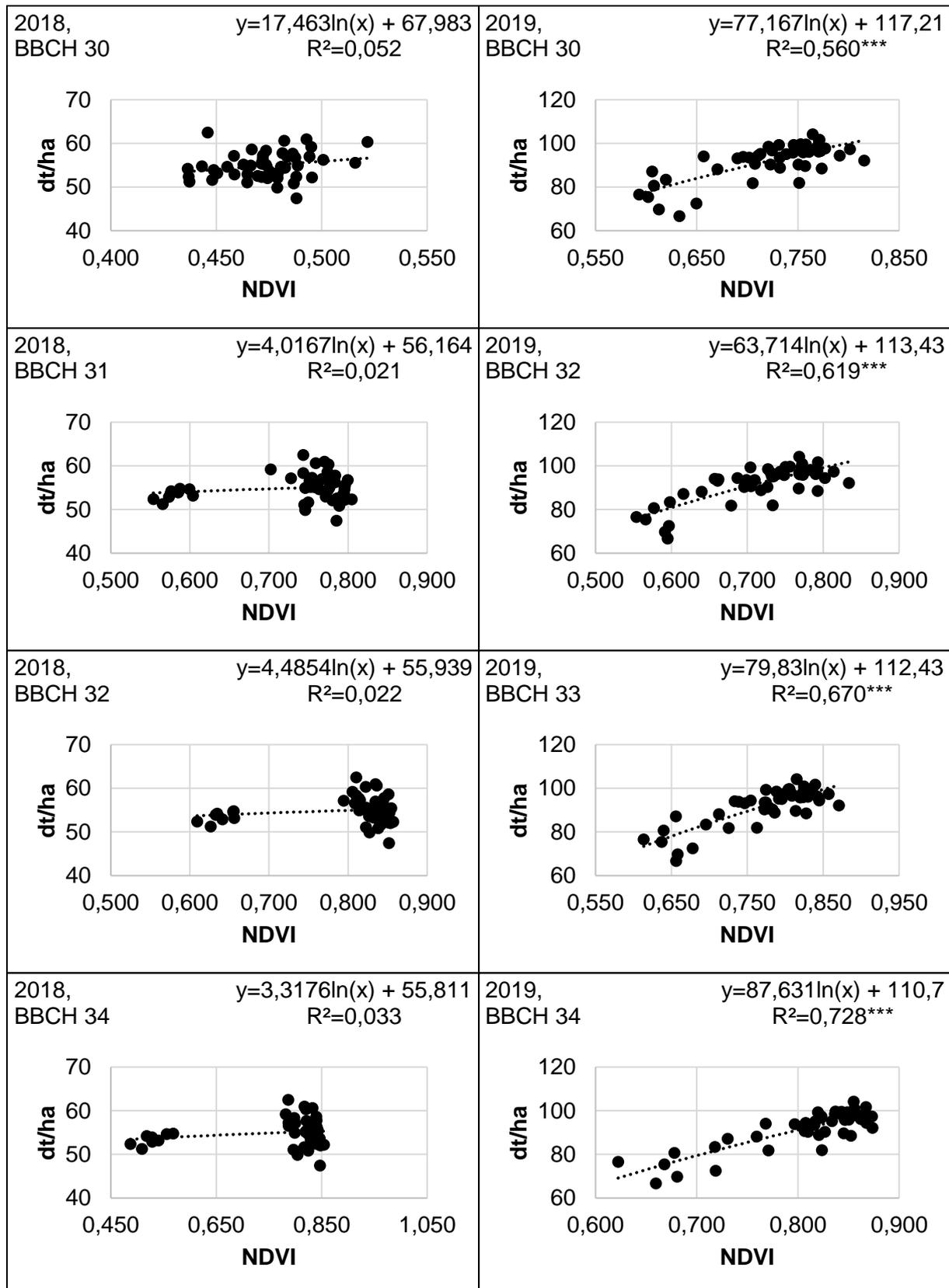


Abbildung 36: Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens ($n=48$).

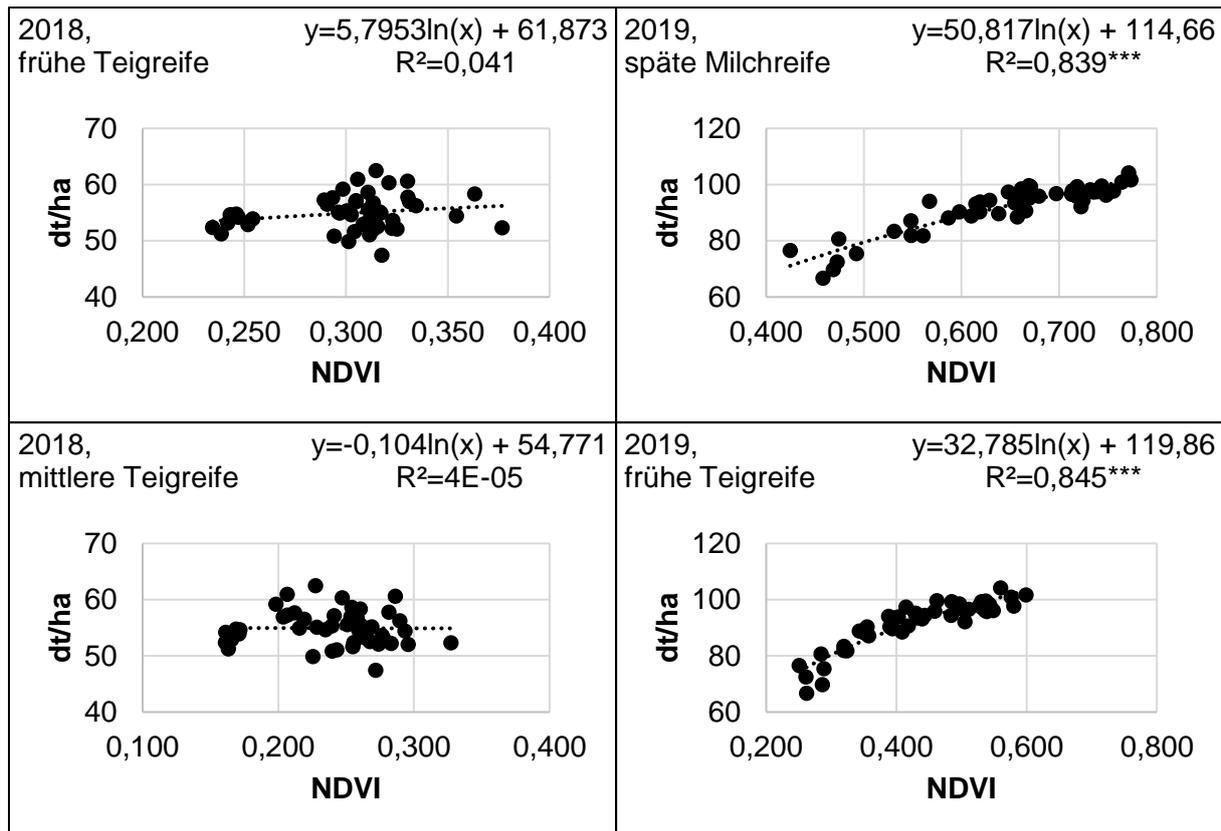


Abbildung 37: Logarithmische Regressionen von NDVI und Ertrag nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife ($n=48$).

Abbildung 38 bis Abbildung 45 zeigen die logarithmischen Regressionen von NDVI und XP getrennt nach Untersuchungsterminen, Vorfrucht, Jahren und Standorten. Mit wenigen Ausnahmen bei den Untersuchungsterminen zur Jugendentwicklung waren die Korrelationen hinsichtlich NDVI und XP unabhängig von Vorfrucht, Jahr und Standort hochsignifikant.

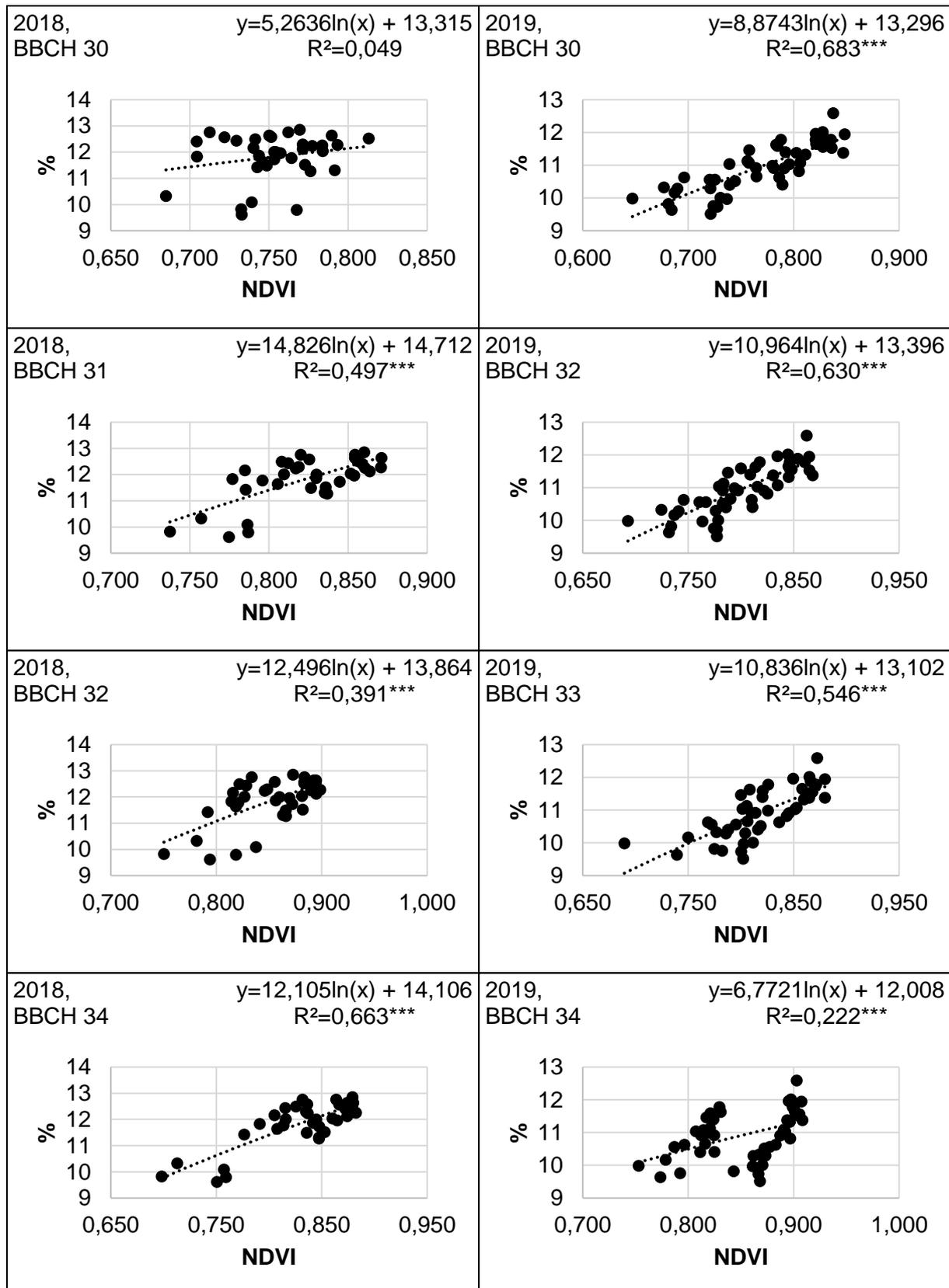


Abbildung 38: Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Erbsen in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (2018: n=36 / 2019: n=48).

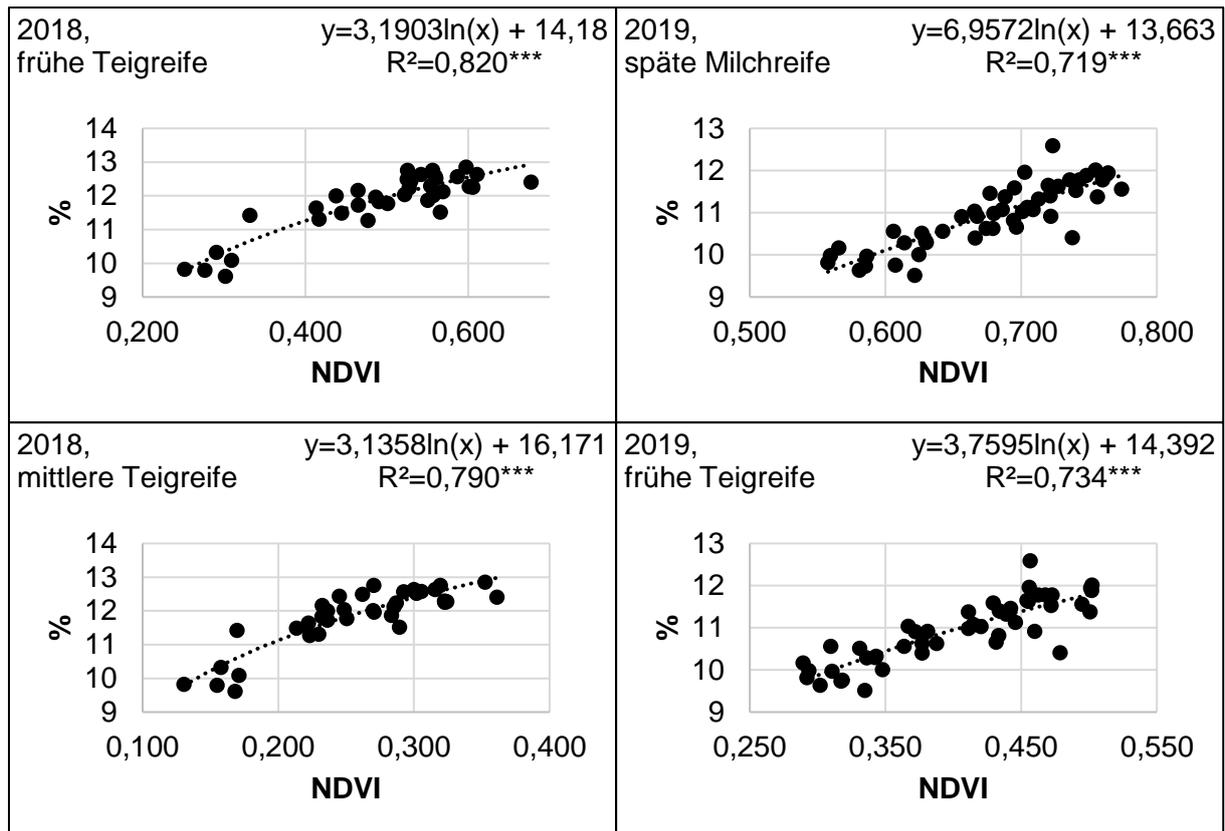


Abbildung 39: Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (2018: n=36 / 2019: n=48).

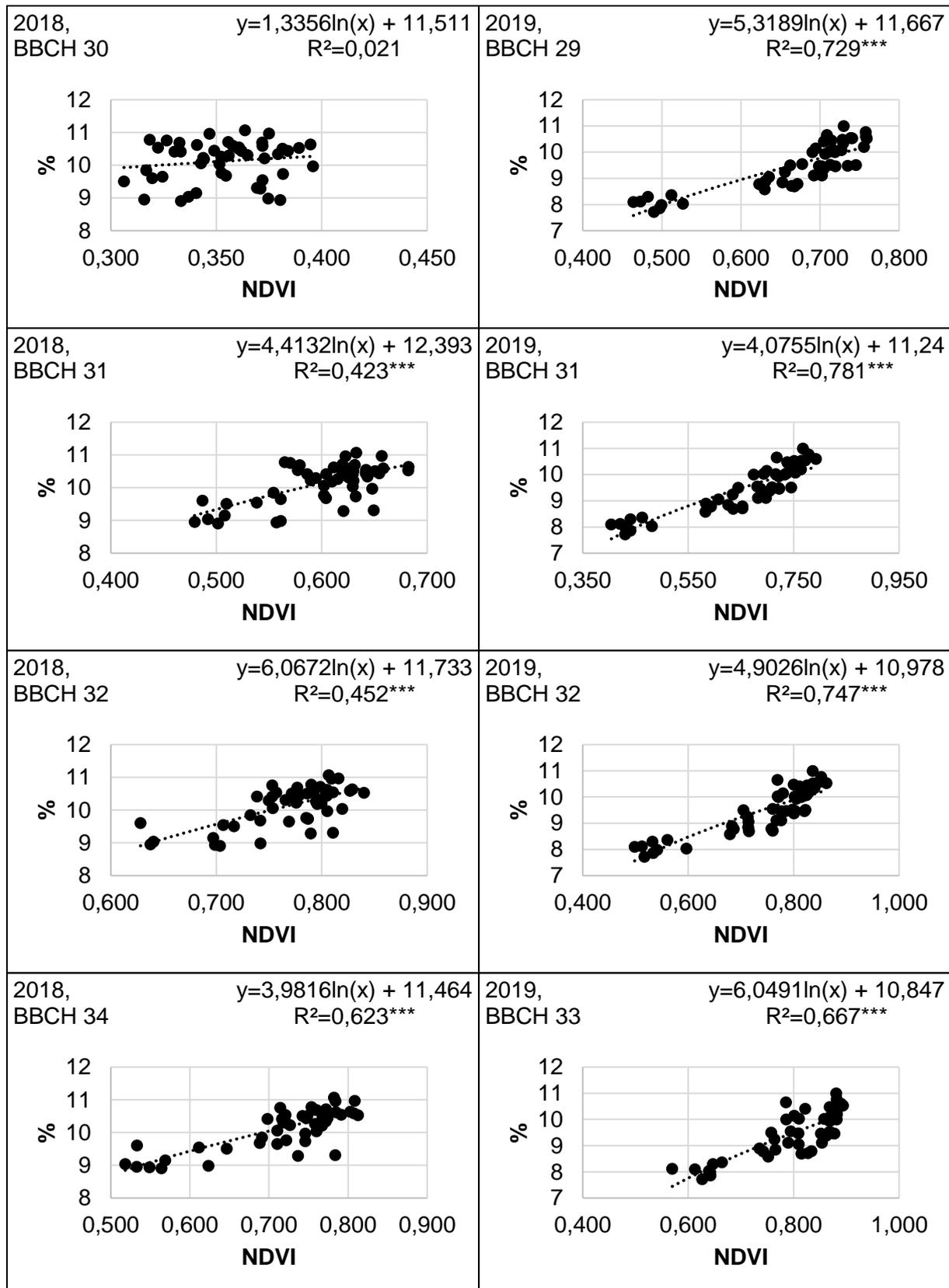


Abbildung 40: Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Erbsen in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (n=48).

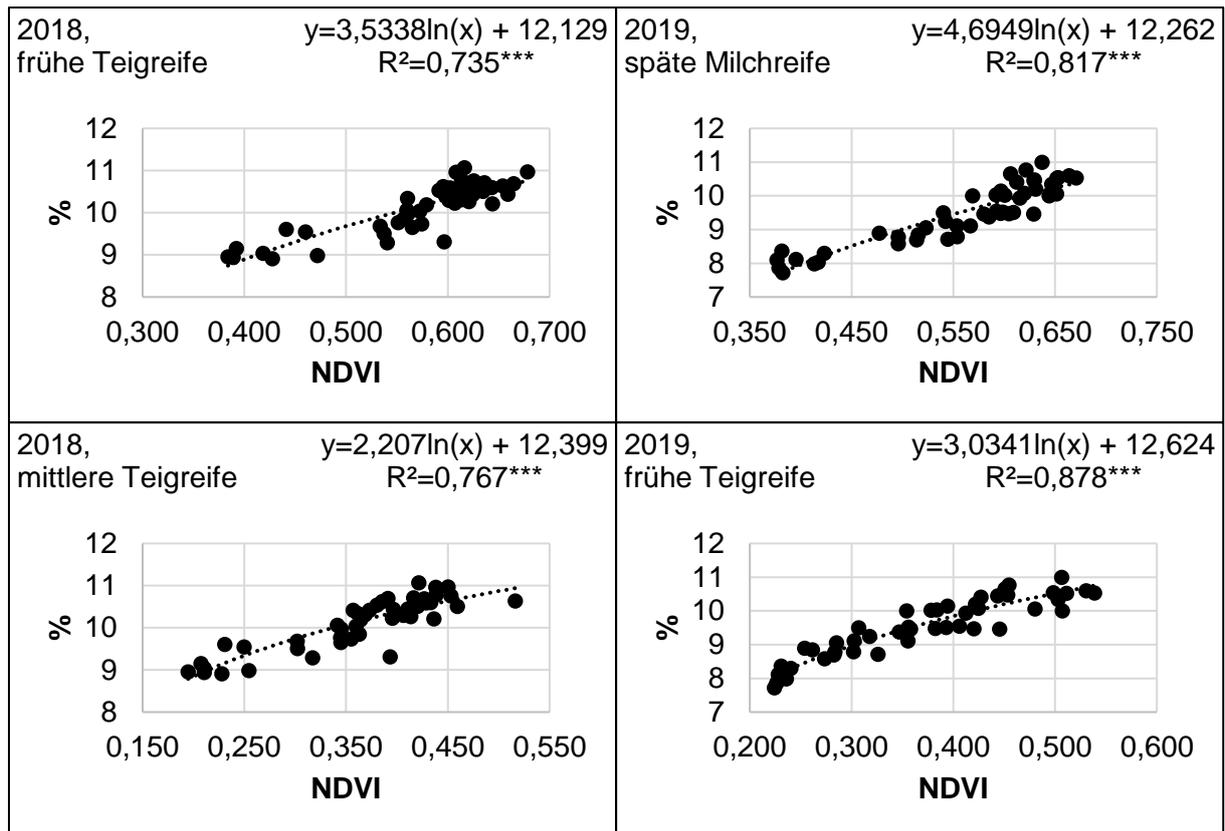


Abbildung 41: Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Erbse in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (n=48).

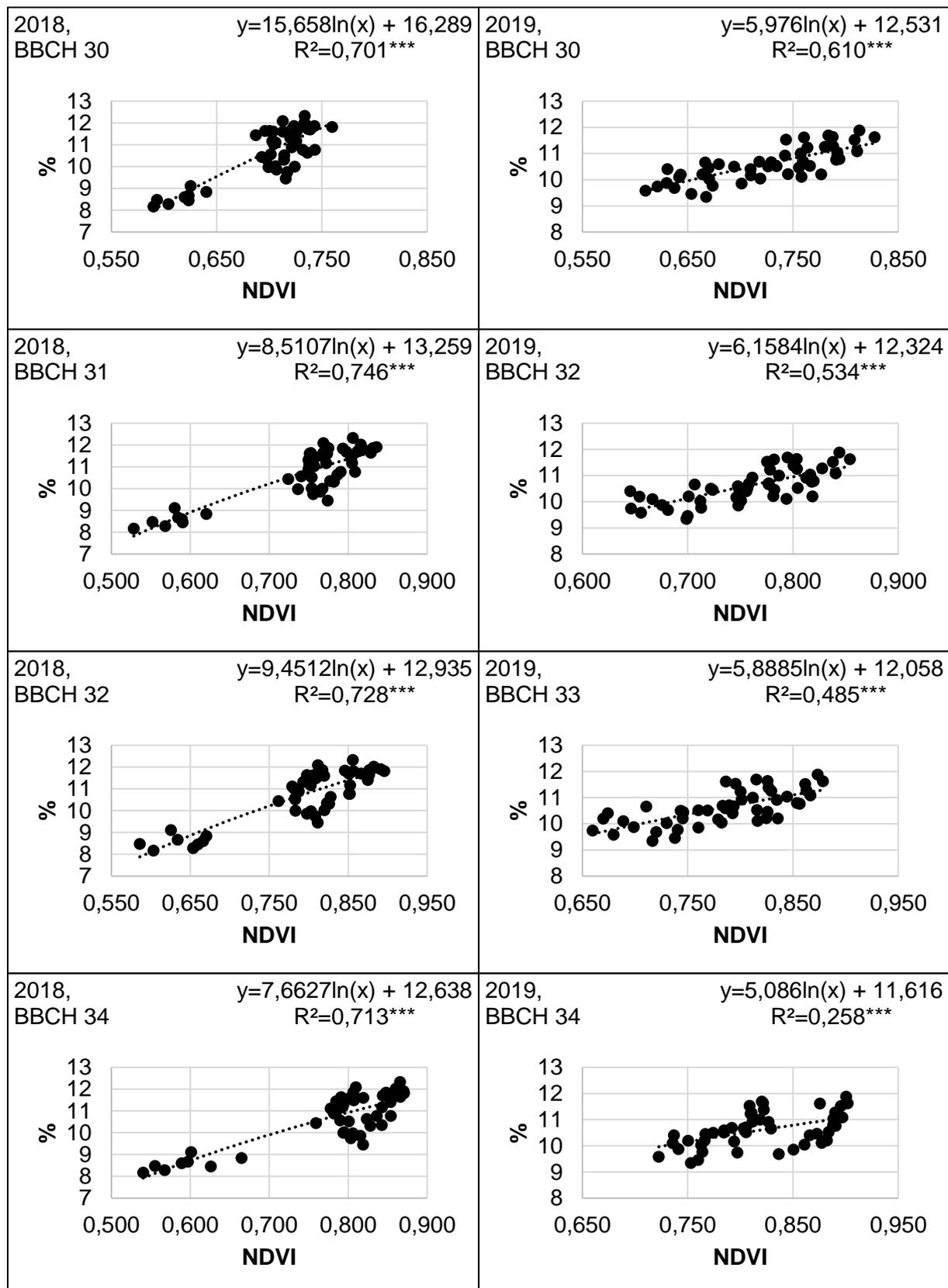


Abbildung 42: Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (n=48).

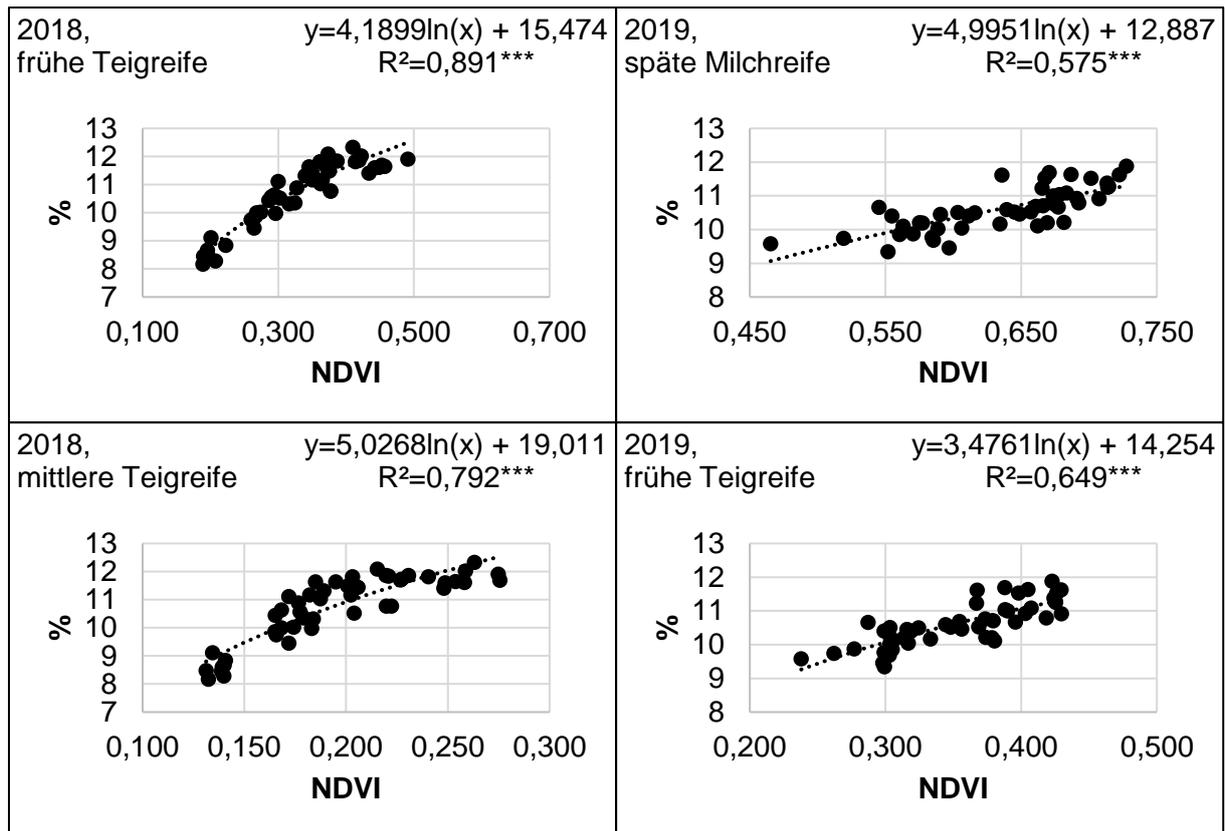


Abbildung 43: Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Soester Börde zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (n=48).

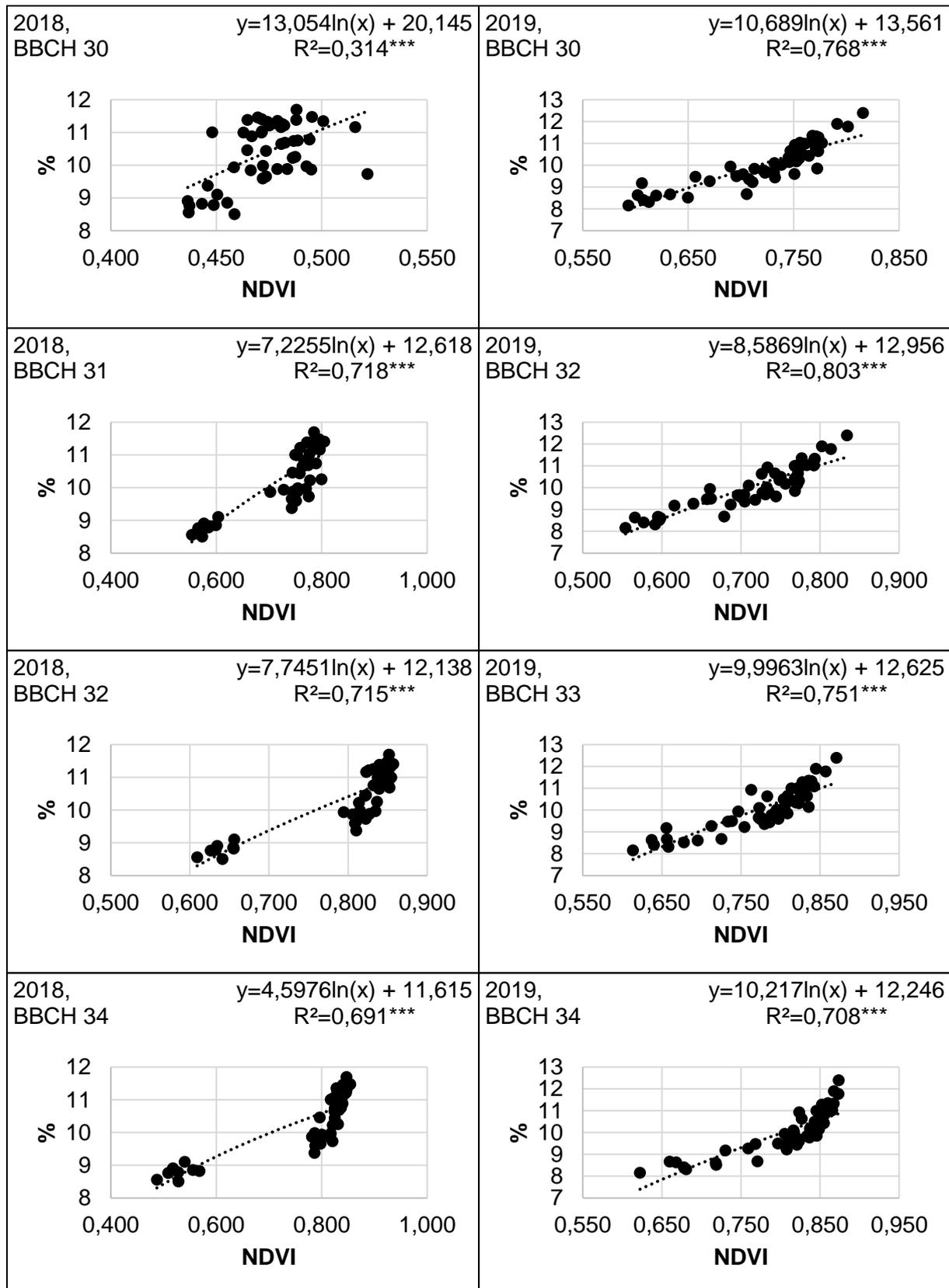


Abbildung 44: Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Schossens (n=48).

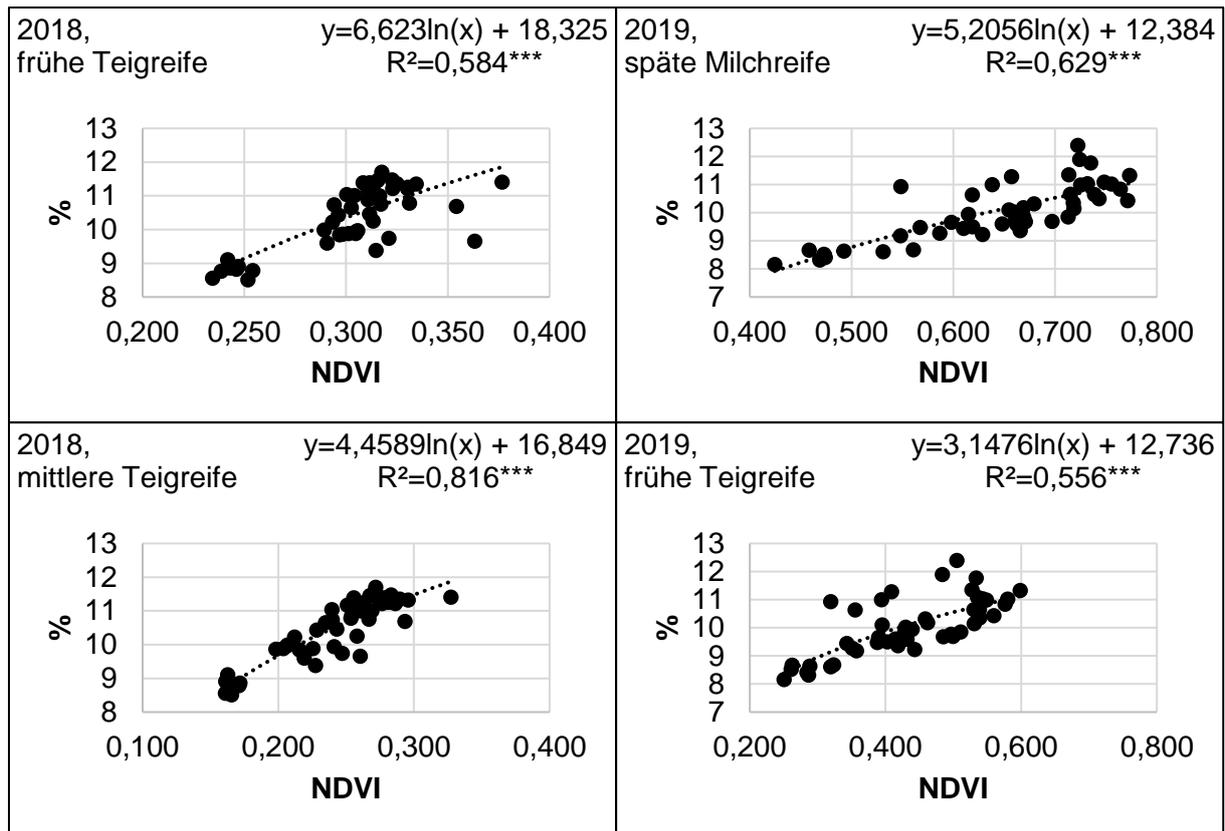


Abbildung 45: Logarithmische Regressionen von NDVI und XP nach Vorfrucht Ackerbohne in beiden Versuchsjahren am Standort Haarstrang zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Abreife (n=48).

5 Diskussion

5.1 Ernteterminversuche

5.1.1 Erträge und Inhaltsstoffe der Körnerleguminosen

Die Erträge der Körnerleguminosen waren von den Ernteterminen abhängig. Während bei den Erbsen die Stroherträge mit fortschreitender Abreife sanken, stiegen die Kornerträge. Verantwortlich hierfür waren nicht ausgedroschene Hülsen, die zu den frühen Ernteterminen, wegen der fehlenden Reife, fälschlicherweise dem Strohertrag zugeordnet wurden und so höhere Erträge des Stroh bewirkten. Zu den späteren Ernteterminen sank der Strohertrag, zum einen aufgrund der beschriebenen Problematik und zum anderen infolge von Bröckelverlusten bei trockenem Erntegut. Die Kornerträge stiegen bei der Erbse mit fortschreitender Abreife, während bei den Ackerbohnen zunächst ein Anstieg und zum letzten Termin eine Abnahme des Kornertrags wegen aufgeplatzter Hülsen zu beobachten war. Auffällig war die Wechselwirkung Jahr*Standort*Erntetermin des Erbsenstrohertrags (Tabelle A2), die zeigt, dass die Abnahme des Ertrags für den Standort Soester Börde im Jahr 2017 nicht zutraf. Hier kam es vom ersten zum zweiten Termin zu einer Abnahme, im Anschluss daran jedoch zu einer deutlichen Zunahme des Strohertrags, die mit den vorliegenden Daten nicht erklärt werden kann. Der Strohertrag unterschied sich zwar hinsichtlich der Sorten, die Wechselwirkung Jahr*Sorte zeigt jedoch, dass dieser Unterschied nur für das erste Versuchsjahr gilt. Die Wechselwirkung Jahr*Sorte*Standort ist nicht signifikant, weshalb diese Differenz nicht mit den fehlenden Parzellen am Standort Soester Börde im Jahr 2018 begründet werden kann. Die Wechselwirkung Jahr*Standort*Erntetermin beim Ackerbohnenstroh (Tabelle A9) zeigte deutliche Ertragsunterschiede an den beiden Standorten hinsichtlich der Jahre, gleiches zeigte sich beim Kornertrag (Tabelle A12). Die erheblichen, jahr- und standortbedingten Schwankungen der Stroherträge von Körnerleguminosen wurden auch von anderen Autoren beschrieben (AUFHAMMER et al., 1994; STEVENSON & VAN KESSEL, 1997; GRUBER & THAMM, 2007; SAUERMAN, 2012). Zusätzlich wurde bei den Ackerbohnen ein Sorteneffekt auf den Strohertrag ermittelt (Tabelle A10) – auch dies deckt sich mit den Ergebnissen von AUFHAMMER et al. (1994) und WEGI et al. (2018), die ebenfalls erhebliche Ertragsunterschiede zwischen den geprüften Sorten feststellten. Gründe hierfür können regional unterschiedliche Witterungsbedingungen sein (Abbildung 2 und Abbildung 3) und am Standort Ostwestfalen-Lippe die

Konkurrenz aufgrund einer Spätverunkrautung der Ackerbohnenparzellen mit Weißem Gänsefuß (*Chenopodium album* L.).

Die chemische Zusammensetzung des Erbsenstrohs und der daraus hergestellten Silagen unterschied sich hinsichtlich der Jahre und Standorte signifikant voneinander (Tabelle A17 und Tabelle A23). Dies lag daran, dass das zweite Jahr mit einer extremen Trockenheit – die Niederschläge betragen 518 mm am Standort Soester Börde und 521 mm in Ostwestfalen-Lippe – ein Ausnahmejahr darstellte, in dem die Abreife in einer ungewöhnlichen Dynamik verlief. Dies zeigte sich dadurch, dass zwar die TM zunahm, die Inhaltsstoffe sich aber im Verlauf der Erntetermine häufig nicht so stark veränderten wie im ersten Jahr, trotz vergleichbarer Zeitabstände zwischen den Terminen. Eine Auswirkung von Trockenstress auf die Inhaltsstoffe wurde im Grasland bereits beschrieben. DUMONT et al. (2015) ermittelten in ihrer Metaanalyse mit 19 Studien, die die Auswirkung von Trockenheit auf den Rohproteingehalt und zehn Studien, die die Auswirkung auf den NDF-Gehalt untersuchten, dass Trockenheit zu einer Erhöhung der Rohprotein- und einer Reduktion der NDF-Gehalte führt. Zu dem gleichen Ergebnis kamen MEISSER et al. (2015) ebenso wie JENSEN et al. (2010b), bei deren Studie sich jedoch die NDF-Gehalte nicht beeinflusst zeigten. Auch DELÉGLISE et al. (2015) stellten in ihren Untersuchungen keinen Effekt von Trockenstress auf die NDF-Gehalte fest, jedoch wurden sinkende Rohproteingehalte bei zunehmender Trockenheit beobachtet. HENDRICKSON et al. (1997) ermittelten in ihrem ersten Untersuchungsjahr steigende Ligningehalte während der Abreife, während diese im zweiten Jahr schwankten, was mit der dort herrschenden Trockenheit begründet wurde. Da es sich bei den genannten Studien um Grasland handelt, in denen die Artzusammensetzung auf die Effekte von Trockenstress einen Einfluss hat (SKINNER et al., 2004) und auch die Tiefe der Wurzeln einer Pflanze maßgeblich ist für deren Toleranz gegenüber Trockenheit, ist nicht abschließend geklärt, ob es sich bei den beobachteten Unterschieden tatsächlich um einen Effekt der extremen Trockenheit handelt. Hierfür müssten Untersuchungen durchgeführt werden, in denen Hülsenfrüchte bewusst Trockenstress ausgesetzt werden, beispielsweise mittels Rainout Shelter-Versuchen.

Zusätzlich hierzu konnte im zweiten Versuchsjahr nicht der exakte Erntezeitpunkt des Vorjahres getroffen werden, womit die Abreife differiert und entsprechende Unterschiede bewirkt (Tabelle 8 und Tabelle 9). Im Jahr 2018 waren die Kulturen,

insbesondere am Standort Ostwestfalen-Lippe, noch nicht so weit abgereift. Ebenso wurden im Jahr 2018 die Ackerbohnen und Erbsen dort später gesät als in der Soester Börde, die Erbsen aber zum gleichen Zeitpunkt geerntet (Tabelle 6). Dies bewirkte den signifikanten Unterschied in der Hauptwirkung der Standorte. Die Wechselwirkungen hinsichtlich der Jahre, Standorte und Erntetermine waren ebenfalls Effekt dieser Vorgehensweise sowie der extremen Unterschiede zwischen den Witterungsverhältnissen der Jahre. Die Zunahme der Gerüstsubstanzen durch die fortschreitende Seneszenz beim Erbsenstroh war eben diesem Alterungseffekt geschuldet. Bei den Erbsenstrohsilagen war dieser Effekt nur bei der Hemizellulose und dem Lignin signifikant. Hier ist der Effekt der Konservierung auf den Hemizellulosegehalt zu erkennen, der durch die Silierung von den Bakterien aufgeschlossen wird und folglich absinkt (STEINHÖFEL & JEROCH, 2008). Ein ähnlicher Effekt des Silierens wurde bereits für angefeuchtete Getreidestrohartarten festgestellt (LASER et al., 2018). Als Resultat daraus nehmen teilweise die Anteile der anderen Inhaltsstoffe relativ zu. Auch bei den Sorten wurden signifikante Unterschiede festgestellt, jedoch ist zu berücksichtigen, dass die Sorte *Respect* am Standort Soester Börde im Jahr 2018 nicht ausgewertet werden konnte. Dies muss sowohl bei der Hauptwirkung als auch bei Wechselwirkungen, die den Faktor Sorte betreffen, berücksichtigt werden. Bei der Betrachtung der Wechselwirkungen bezüglich der Sorten wird jedoch deutlich, dass auch die Sorte *Astronaute* bei den Erbsenstrohsilagen Unterschiede bewirkte und signifikant verschieden zu den anderen Sorten abschnitt. Beim Vergleich der TM der Originalsubstanz mit derjenigen der Silagen (Tabelle 25) wird deutlich, dass die Sorte *Astronaute* in vielen Werten auffällig war. Im Jahr 2017 waren an beiden Standorten die TM-Gehalte dieser Sorte zum ersten Termin nach der Silierung höher als die der Originalsubstanz. Im Jahr 2018 war die Sorte *Astronaute* zum ersten Erntetermin am Standort Ostwestfalen-Lippe die mit dem geringsten TM-Gehalt, woraus sich ersehen lässt, dass die TM-Gehalte der Sorten variieren. Dies lässt auf Differenzen in der Abreife schließen, wodurch auch die Inhaltsstoffe differieren, da mit fortschreitender Abreife vermehrt Lignin eingelagert wird (MAURER & WINKLER, 1982). Des Weiteren wird deutlich, dass der optimale TM-Gehalt für die aerobe Stabilität einer Silage von 30–40% (STEINHÖFEL, 2008) oft überschritten wird, da die Gärprozesse im wässrigen Milieu ablaufen. Ebenso häufig überschritten wird der maximale TM-Gehalt von 50%, bei dessen Überschreitung nicht mehr sichergestellt ist, dass die Gärprozesse überhaupt eintreten und darüber hinaus

eine gute Verdichtbarkeit des Materials möglich ist (HARTMANN, 2009). So kann bei fehlendem Luftabschluss die Unterdrückung unerwünschter Mikroben wie Schimmelpilzen nur begrenzt erfolgen (STEINHÖFEL, 2008). Bei der Betrachtung der Mittelwerte (Tabelle A17 und Tabelle A23) ist auffällig, dass mit zunehmender Abreife der Ligningehalt im Stroh steigt und nur die Hauptwirkung signifikant ist, während in den Strohsilagen ein umgekehrter Effekt auftritt. Bei Betrachtung der Wechselwirkung Standort*Jahr*Sorte*Erntetermin (Tabelle A27) wird deutlich, dass hierfür der Standort Soester Börde im zweiten Versuchsjahr maßgebend ist. Eine mögliche Ursache hierfür wäre, dass durch die hohe TM (Tabelle 25) und den daraus resultierenden unzureichenden Luftabschluss Schimmelpilze aktiv wurden und das Lignin zersetzten. Hauptverantwortlich für die Zersetzung von Lignin sind Basidiomyceten (SCHLEGEL, 1992) und einige wenige Vertreter der Ascomyceten (SCHOLZ et al., 2005). FERRAZ & DURÁN (1995) fanden heraus, dass der Schimmelpilz *Chrysonilia sitophila*, der zu den Ascomyceten gehört, Lignin zersetzen kann. Es wurde im Rahmen der DLG-Sinnenprüfung (2004) bei den Silagen des Standorts Soester Börde im Jahr 2017 Schimmelbefall festgestellt (Tabelle 23), aber es wurde nicht bestimmt, um welche Gattung oder Art es sich handelt. Zudem ist der langsame Verlauf eines Abbaus zu berücksichtigen, der sich über mehrere Monate oder sogar Jahre hinziehen kann (SCHLEGEL, 1992). Zwischen dem Erstellen und dem Öffnen der Silagen lagen fünf Monate.

Wie die Erbsen unterschieden sich auch die Inhaltsstoffe des Ackerbohnenstrohs und der Ackerbohnenstrohsilagen hinsichtlich der Jahre und Standorte, was mit der gleichen Erklärung wie bei den Erbsen zu begründen ist. Die geringeren Unterschiede entstanden dadurch, dass die Ackerbohnen am Standort Ostwestfalen-Lippe wegen der durch die Saatzeit verursachten späteren Abreife im Jahr 2018 zeitlich versetzt zu den Ackerbohnen in der Soester Börde geerntet wurden (Tabelle 7). Die Inhaltsstoffe wurden durch die Erntetermine beeinflusst. Als Wirkung der Seneszenz konnte festgestellt werden, dass Gerüstsubstanzen zunahmen und der Rohproteingehalt abnahm. Die Wechselwirkungen zeigten jedoch, dass diese zu erwartenden Effekte in einzelnen Varianten gegenteilig ausfielen. Insbesondere die Abnahme des Zellulose- und Ligningehalts im Jahr 2018 in Ostwestfalen-Lippe, die sowohl beim Stroh als auch bei der Silage vorhanden waren, widersprachen den Erwartungen. Diese Abnahme lässt sich weder durch das Jahr noch durch die anderen Inhaltsstoffe erklären, da der Effekt nur am Standort Ostwestfalen-Lippe auftrat und bei den restlichen untersuchten

Inhaltsstoffen nur der Rohproteingehalt mit einer signifikanten Zunahme auffällig war. Insgesamt spricht der geringe Anteil an Zellulose und Lignin für junges Pflanzenmaterial (BORGSMANN, 2006). Dies widerspricht dem Effekt der Seneszenz, jedoch kann nicht sicher ausgeschlossen werden, dass es im Jahr 2018 am Standort Ostwestfalen-Lippe zu einer Verunreinigung der Proben durch artfremdes Material kam, da auf der Fläche eine Spätverunkrautung der Ackerbohnenparzellen mit Weißem Gänsefuß vorlag. Beim Ackerbohnenstroh stieg der Hemizellulosegehalt zunächst wie erwartet, nahm dann jedoch wieder ab. Die signifikante Wechselwirkung Erntetermin*Jahr*Ort (Tabelle A30) belegt, dass dies durch die Ergebnisse des Jahres 2017 am Standort Ostwestfalen-Lippe verursacht wurde, in dem die Unterschiede zwischen den Ernteterminen signifikant waren, während sich die Ergebnisse im Jahr 2018 nicht signifikant voneinander unterschieden. Eine Abnahme ist außerdem am Standort Soester Börde vom dritten zum vierten Erntetermin des Jahres 2017 vorhanden. Eine mögliche Ursache hierfür sind die zeitgleich ansteigenden Zellulose- und Ligningehalte, die eine relative Abnahme anderer Inhaltsstoffe bewirken können. Die Rohproteingehalte wurden teils stärker durch den Standort als durch den Erntetermin beeinflusst; in Ostwestfalen-Lippe waren im Gegensatz zur Soester Börde deutliche Abnahmen zu jedem Erntetermin vorhanden. Ursache hierfür könnte die unterschiedliche Abreifedynamik der Standorte sein; höhere Rohproteingehalte lassen darauf schließen, dass die Translokation aus vegetativen in generative Organe unvollständig war (AUFHAMMER et al., 1994). Insgesamt liegen die Rohproteingehalte des Körnerleguminosenstrohs über denen von Getreidestroh. Dies deckt sich mit den Werten aus den DLG-Futterwerttabellen (2005). Aus der Formel von KAISER (2007) wird jedoch deutlich, dass der Rohproteingehalt für die Gasausbeute im Vergleich zu anderen Inhaltsstoffen von untergeordneter Bedeutung ist. Auch RATH et al. (2016) ermittelten bei ihren Untersuchungen einen geringen Korrelationskoeffizienten zwischen Rohproteingehalt und spezifischer Biogasausbeute, was mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie übereinstimmt (Abbildung 22 bis Abbildung 25). Bei der Betrachtung ausgewählter Silagen von Halm- und Körnerfrüchten wurde außerdem festgestellt, dass die Bildung von Biogas von der fermentierbaren organischen Trockenmasse abhängt und dabei unabhängig von dem Gehalt der Nährstofffraktionen Kohlenhydrate, Fette und Proteine ist (WEIßBACH, 2009a).

Bei den Ackerbohnen wurden ebenfalls die TM-Gehalte vor und nach der Silierung verglichen (Tabelle 28). Wie bei den Erbsen wird auch hier deutlich, dass mit erhöhten

TM-Gehalten deren prozentuale Veränderung abnimmt. Die TM-Unterschiede der Sorten verdeutlichen, dass es auch bei den Ackerbohnen geringe Abreifedifferenzen gab, und dass auch bei den Ackerbohnen in den meisten Fällen der TM-Gehalt außerhalb des Optimums zur Silierung lag. Bei beiden Kulturen nahmen überdies die Rohaschegehalte mit fortschreitender Abreife ab, was mit dem zunehmenden TM-Gehalt erklärt werden kann (RESCH, 2015).

5.1.2 Effekt der Silierung auf die Inhaltsstoffe und die Biogasausbeute

Die Erkenntnis aus dem Projekt „Biomasseaufwertung und Silierung lignocellulosereicher Koppelprodukte zur Optimierung der Methanausbeute (BASiliKOM)“, dass eine Silierung als Voraufschluss höhere Biogasausbeuten bewirkt (LASER et al., 2018), wie auch STINNER (2020) feststellte, konnte in dieser Studie nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse differieren unspezifisch und lassen keine eindeutige Aussage hinsichtlich des Effekts der Silierung zu. Durch die linearen Regressionen von Inhaltsstoffen und gemessener Gasausbeute (Abbildung 22 bis Abbildung 25) wird jedoch ersichtlich, dass der negative Effekt von Zellulose und Lignin durch den Voraufschluss der Silierung abgemildert wird. Für Hemizellulose und Gasausbeute sowie Rohprotein und Gasausbeute ergab sich ein geringer bzw. kein linearer Zusammenhang. Die Korrelationen der Inhaltsstoffe zwischen Stroh und Silage (Abbildung 11 bis Abbildung 16) zeigen ebenso, dass eine Wirkung der Silierung insbesondere auf den Gehalt der Hemizellulose vorhanden ist, diese nimmt durch die Silierung ab, jedoch nicht gleichgerichtet. Das geringste Bestimmtheitsmaß hatten die Korrelationen der Hemizellulosen, was dafür spricht, dass dieser Inhaltsstoff durch die Silierung am stärksten beeinflusst wurde. Mögliche Erklärungen hierfür sind die unterschiedlichen Trockenmassegehalte und damit Qualitäten der Silagen, die bewirken, dass unerwünschte Nebeneffekte wie Fehlgärungen durch Hefen aufgrund eines zu hohen pH-Werts oder Schimmelbildung bei der Silierung auftreten und die Biogasausbeute sowie den Voraufschluss beeinflussen. Mit zunehmendem Trockenmassegehalt wird außerdem die Verdichtung des Materials durch dessen Rückfederung erheblich erschwert. Da es sich bei diesem Projekt um eine Betrachtung handelte, die möglichst nah an der praktischen Landwirtschaft orientiert sein sollte, musste auf eine Anpassung des Feuchtigkeitsgehalts, wie es im Projekt BASiliKOM Standardvorgehensweise war, verzichtet werden, da dies in der praktischen Landwirtschaft nicht üblich ist. Für die Anpassung des Feuchtigkeitsgehalts wäre die

Nutzung von Prozesswassern aus der Biogasanlage (STINNER, 2020) oder die Mischung mit Material aus dem Fermenter oder Nachfermenter (HÖCKNER, 2020) denkbar. Grundsätzlich wäre eine Anpassung des Feuchtegehalts auch über eine Kossilierung mit anderen Substraten, wie Zuckerrüben, oder ein Anfeuchten des Materials möglich (LASER et al., 2018). Dies würde den Voraufschluss verbessern, jedoch erscheint dieses Vorgehen aufgrund mangelnder möglicher Kosubstrate, die zur Erntezeit von Erbsen und Ackerbohnen zur Verfügung stehen, schwierig. Denkbar wäre ein Grasschnitt mit hohem Feuchtigkeitsgehalt. Ein weiterer positiver Effekt einer Silierung des Materials oder dessen Silierung mit Kosubstraten wäre die Absenkung des TM-Gehalts, was der Bildung von Schwimmschichten im Fermenter entgegenwirkt. Um das Körnerleguminosenstroh ohne Voraufschluss zu nutzen und dabei die Bildung von Schwimmschichten zu vermeiden, wäre auch eine Kovergärung im Fermenter mit Wirtschaftsdüngern denkbar (REINHOLD & FRIEDRICH, 2012; SCHWARZ et al., 2017). In diesem Bereich besteht weiterer Forschungsbedarf.

Was in dieser Studie nicht untersucht wurde, sind sekundäre Inhaltsstoffe wie das Tannin. Die Auswahl der Proben, die extern hinsichtlich Biogas- und Methanausbeute untersucht wurden, umfasste zwar sowohl eine tanninhaltige als auch eine tanninfreie Ackerbohnenart, jedoch wurde die Menge des Tannins nicht untersucht. WIEGAND (2013) stellte in ihren Testreihen fest, dass einzelne sekundäre Inhaltsstoffe wie das Tannin möglicherweise die Methanausbeute eines Substrats negativ beeinflussen. In den Ergebnissen der externen Labors ist der Methananteil im Gas unabhängig von der Sorte und damit vom Tanningehalt, jedoch ist die geringe Anzahl der Proben kaum aussagekräftig. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

5.1.3 Diskrepanz zwischen den Gasausbeuten von internem und externem Labor

Die intern durchgeführten Untersuchungen zur Biogasausbeute lassen sich nur bedingt mit denen des externen Labors vergleichen. Hauptgrund hierfür ist, dass die eigene Maissilage nicht im externen Labor geprüft wurde und damit nicht als Referenz der dort untersuchten Proben zur Verfügung stand. Darüber hinaus nimmt das Labor der Fachhochschule Südwestfalen nicht an Ringversuchen teil und kann so nicht mit anderen Laboren verglichen werden. Unbeeinflusst von diesen Differenzen sind Aussagen innerhalb eines Durchgangs bezüglich der Wirkung von Kulturart und Erntetermin; allerdings kann die Höhe der Biogasausbeute aus den Analysen des

externen Labors nicht mit den eigenen Ausbeuten verglichen und gleichgesetzt werden.

Der Ablauf der Batchversuche an der Fachhochschule ist standardisiert und erfolgt in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4630 (2006). Das Inokulum wird immer von der gleichen, mit Maissilage beschickten Biogasanlage geholt, durch Siebung von den noch vorhandenen Feststoffen weitestgehend befreit und im Anschluss daran über drei Tage hinweg ausgegoren. Um in den eigenen Batchversuchen die einzelnen Durchgänge miteinander vergleichen zu können, wurde immer die gleiche Maissilage als Referenz genutzt und ein Mittelwert der Gasausbeute dieser Maissilage von allen Durchgängen berechnet. Trotz standardisierter Vorgehensweise gab es im Vergleich der Durchgänge bei den eigenen Versuchen eine Abweichung von +/- 10% vom Mittelwert der Maissilage. Für den Vergleich der einzelnen Durchgänge wurden ausgehend vom Mittelwert der Referenz die Gasausbeuten der einzelnen Durchgänge an diesen angepasst. Eine Variante des Versuchs wurde in zwei Durchgängen untersucht; trotz der Anpassung der einzelnen Ausbeuten mit Hilfe des Mittelwerts der Referenz betrug der Unterschied 20%. Diese beobachtete Problematik stärkerer Schwankungen von Gasausbeuten deckt sich mit den Erkenntnissen von WULF & DÖHLER (2009), HEUWINKEL et al. (2009), TILLMANN & BAETZEL (2010), AMON et al. (2015) sowie WEINRICH et al. (2020). Es besteht hinsichtlich der Durchführung und der Standardisierung von Batchversuchen weiterer Optimierungsbedarf. RATH et al. (2016) stellten in ihren Untersuchungen fest, dass ein siebentägiges Ausgären des Inokulums den Laborfehler deutlich verringerte. MITTWEG et al. (2012) ermittelten Differenzen bei der Einwaage durch elektrostatische Ladungen des Materials mit einem Wägeschiffchen aus Holz und einem aus Metall. An der Fachhochschule wird weder ein siebentägiges Ausgären, noch eine Einwaage mit einem Applikator, der nicht elektrostatisch aufladbar ist, praktiziert. Daher sind dies mögliche Fehlerquellen, die bei künftigen Untersuchungen berücksichtigt werden sollten, um die Vergleichbarkeit mit anderen Laboren zu verbessern. Jedoch ist zu beachten, dass eine solche Änderung nur dann den gewünschten Erfolg bringt, wenn es sich dabei um eine vorgeschriebene Standardvorgehensweise in allen Laboren handelt.

5.1.4 Diskrepanz zwischen gemessenen und berechneten Biogasausbeuten

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben erhebliche Differenzen zwischen den berechneten und den tatsächlich gemessenen Biogasausbeuten. Die berechneten theoretischen Biogasausbeuten ergaben eine mäßige Zunahme der Gasausbeute mit zunehmender Abreife. Dies wird dadurch bewirkt, dass zwar das Lignin als limitierender Faktor in der Formel nach KAISER (2007) berücksichtigt ist, die weiteren Gerüstsubstanzen jedoch in ihrer für die Biogasausbeute positiven Wirkung höher bewertet sind als die negative Wirkung des Lignins. Typischerweise nehmen mit der Abreife nicht nur Lignin, sondern auch die anderen Gerüstsubstanzen zu. Werden diese entsprechend höher bewertet, kommt es trotz Erhöhung des Ligninanteils zu einer Zunahme der Biogasausbeute. Die lineare Regression von Inhaltsstoffen und gemessenen Gasausbeuten ergab jedoch hinsichtlich der Zellulose ein gegenteiliges Bild (Abbildung 22 bis Abbildung 25); die Gasausbeute wurde durch die Zellulose negativ beeinflusst. Eine mögliche Erklärung hierfür sind die zeitgleich ebenfalls hohen Ligningehalte und damit ein hoher Anteil an Lignozellulose. LI et al. (2018) stellten in ihren Untersuchungen ebenso einen negativen Effekt auf die Methanausbeute der Zellulose bei Zugabe von Lignin fest. RATH et al. (2016) verglichen in einer Studie fünf verschiedene Formeln zur Berechnung von theoretischen Biogasausbeuten mit den tatsächlich gemessenen Ausbeuten und stellten fest, dass zwar alle berechneten Ausbeuten positiv mit den gemessenen korrelierten, jedoch keine Formel hinreichend genau war, um die Biogasausbeute zu kalkulieren. Zum gleichen Ergebnis kam FRITZ (2008), der in seiner Studie drei verschiedene Formeln zur Berechnung der Gasausbeuten mit den tatsächlichen Ausbeuten verglich, ohne annähernd genaue Ergebnisse zu erzielen. Diese Erkenntnisse spiegeln sich durch den fehlenden linearen Zusammenhang und geringe Bestimmtheitsmaße zwischen gemessener und theoretischer Gasausbeute auch in dieser Studie wider (Abbildung 28). Einzige Ausnahme bildete die Erbsenstrohsilage, bei der durch den geringen Zeitabstand zwischen den Ernteterminen sowohl theoretisch als auch gemessen keine großen Differenzen in den Gasausbeuten feststellbar waren. Auch TILLMANN & BAETZEL (2010) stellten beim Versuch, Biogasausbeuten anhand von NIRS Untersuchungen zu schätzen, sehr geringe Bestimmtheitsmaße fest und gaben als Begründung die starken Schätzfehler bei Batchversuchen an.

Die Silagen werden sowohl in den Batchversuchen als auch bei den berechneten theoretischen Biogasausbeuten unterschätzt. MUKENGELE & OECHSNER (2007) kritisierten, dass die durch die Silierung entstandenen, flüchtigen Fettsäuren während der Trocknung verloren gehen und so die Bezugsgröße ‚organische Trockenmasse einer Silage‘ nicht identisch mit der Bezugsgröße ‚organische Trockenmasse von frischem Material‘ ist. Diesem Kritikpunkt trug WEIßBACH (2008 & 2009a) Rechnung. Seiner Korrekturformel liegt jedoch der Rohfaseranteil zu Grunde, weshalb sie in dieser Studie nicht genutzt wurde, da hier die Gerüstsubstanzen im Vordergrund standen.

In den intern durchgeführten Biogastests konnte die Zunahme der Biogasausbeute mit zunehmender Abreife nicht bestätigt werden. Die Ausbeuten schwankten teilweise unspezifisch, manche Varianten nahmen jedoch mit zunehmender Abreife kontinuierlich ab, eine kontinuierliche Zunahme konnte nur in einem Fall beobachtet werden. Wegen der geringen Kapazität konnte jedoch immer nur eine Wiederholung der jeweiligen Variante untersucht werden, besonders im Bereich der Silagen kann bei möglichen Fehlgärungen das Ergebnis erheblich beeinflusst werden. Für eine statistische Absicherung der Ergebnisse hätten alle vier Wiederholungen untersucht werden müssen.

Grundsätzlich ist bei den durchgeführten Messungen im Biogasertragstest, zusätzlich zu den in Abschnitt 5.1.3 Diskrepanz zwischen den Gasausbeuten von internem und externem Labor beschriebenen Schwankungen zu berücksichtigen, dass die sehr geringe Einwaage von 0,5 g nicht geeignet ist, um fundierte Rückschlüsse hinsichtlich des Einsatzes in praktischen Biogasanlagen zu ziehen. Grund hierfür ist die Partikelgröße von Substraten, die in Biogasanlagen die des Materials im Batchversuch um ein Vielfaches übersteigt, und dass die Durchmischung des Substrats mit dem Inokulum in einem größeren Maßstab erschwert ist. Dadurch können Substrate mittels Batchversuch miteinander verglichen, die Ergebnisse jedoch nicht auf die großtechnische Anlagenpraxis übertragen werden, da hier die Biogasausbeute durch Parameter der Anlagentechnik wie Verweilzeit, Raumbelastung, Durchmischung oder Prozessstabilität beeinflusst wird (WEINRICH et al., 2020).

5.2 Untersuchungen zur Nachwirkung der Strohbergung auf die Folgekultur Winterweizen

Die Wirkung der Nährstoffabfuhr über das Körnerleguminosenstroh stellte sich für die beiden untersuchten Arten unterschiedlich dar. Ein möglicher Grund hierfür sind die Trockenmasseerträge des Strohs und sein Stickstoffgehalt. Das Erbsenstroh erzielte im Mittel über alle Faktoren 4,8 t TM (1,1% N), das Ackerbohnenstroh 3,9 t TM (1,0% N). Daraus ergibt sich für die Erbsen eine Masse von 52,8 kg N/ha, die mit dem Stroh entzogen wurden, und für die Ackerbohne eine Masse von 39 kg N/ha. Die höheren N-Gehalte des Erbsenstrohs im Vergleich zum Ackerbohnenstroh decken sich mit den Untersuchungsergebnissen von ABREU & BRUNO-SOARES (1998) sowie BRUNO-SOARES et al. (2000).

Wegen des kurzen Untersuchungszeitraums von zwei Jahren konnten keine Tests hinsichtlich einer Wirkung der Strohabfuhr auf den Humusgehalt des Bodens durchgeführt werden. Jedoch wurden verschiedene andere Parameter geprüft, um die kurzfristige Wirkung abschätzen zu können.

Als erster Prüffaktor während der Vegetationsperiode stand der N_{\min} -Wert im Fokus der Untersuchungen. Die Strohabfuhr hatte bei keiner Vorfrucht und an keinem Standort, weder zu Vegetationsende noch zu Vegetationsbeginn, einen signifikanten Einfluss auf den N_{\min} -Gehalt im Boden. Ebenso wenig gab es signifikante Wechselwirkungen. Die Zeitpunkte der Probenahme unterschieden sich, bedingt durch Verluste an pflanzenverfügbarem Stickstoff, durch die Auswaschung und Denitrifikation über den Winter, weshalb die Werte zum Vegetationsende höher waren als zu Vegetationsbeginn. Gleiches stellten FIEGENBAUM et al. (1994) fest, der dort zusätzlich vorhandene Unterschied zwischen den Varianten mit und ohne Stroh konnte durch die vorliegende Studie jedoch nicht bestätigt werden. Ebenso wie die Zeitpunkte unterschieden sich die Standorte voneinander, wobei die Werte der Soester Börde durch das hohe N-Mineralisationspotential meist höher waren als die am Haarstrang. Eine Ausnahme bildet das Jahr 2017/18 nach Vorfrucht Ackerbohne, hier waren die N_{\min} -Werte am Haarstrang höher, was mit den vorliegenden Daten nicht erklärt werden kann.

Abhängig von der Vorfrucht kam es im weiteren Vegetationsverlauf zu Auswirkungen der Strohbergung. Während im Winterweizen nach der Vorfrucht Ackerbohne keine

signifikanten Haupt- oder Wechselwirkungen hinsichtlich der Strohabfuhr auftraten, waren nach der Vorfrucht Erbse sowohl die Hauptwirkung Strohabfuhr beim Rohproteingehalt als auch die Wechselwirkung Strohabfuhr*Standort zu einzelnen Terminen der NDVI Bestimmung signifikant.

Im Jahr 2018 war die Wechselwirkung zwischen den NDVI-Werten in der Jugendentwicklung des Weizens darauf zurückzuführen, dass am Haarstrang der NDVI ohne Stroh gesichert höher war als der mit Stroh, während am Standort Soester Börde kein gesicherter Unterschied vorlag. Das bedeutet, dass der Weizen am Haarstrang in seiner Jugendentwicklung in der Variante ohne Erbsenstroh weiter fortgeschritten war als in den Varianten mit Stroh. Im Jahr 2019 trat dieser signifikante Unterschied zur Abreife in der Soester Börde auf, während es keinen gesicherten Unterschied am Haarstrang gab. In der Soester Börde war der NDVI mit Stroh signifikant höher als der ohne Stroh. Dies bedeutet, dass in der Variante ohne Stroh der Weizen bereits weiter abgereift war und deshalb die NDVI-Werte niedriger waren als in der Variante mit Stroh. Durch das weite C/N-Verhältnis des Erbsen- bzw. Ackerbohnenstrohs ist damit zu rechnen, dass der darin gebundene Stickstoff erst im späteren Vegetationsverlauf freigesetzt wird. Die Stoppeln und Wurzeln, die bei Abfuhr des Strohs auf dem Feld verbleiben, haben ein engeres C/N-Verhältnis als die vollständigen Ernteresiduen (SCHAUSS et al., 2006). Das bedeutet, dass bei Abfuhr des Strohs Stickstoff zu einem früheren Zeitpunkt pflanzenverfügbar vorliegt, was die signifikanten Unterschiede hinsichtlich der NDVI-Werte während der Jugendentwicklung des Weizens erklärt. Der Standort Soester Börde hat ein hohes N-Mineralisationspotential, wodurch der Effekt der Strohabfuhr hier nicht zum Tragen kommt und nicht die Hauptwirkung Strohabfuhr, sondern die Wechselwirkung Strohabfuhr*Standort signifikant ist (Tabelle A46). Die Mineralisation von Stickstoff ist nicht nur vom Standort, sondern maßgeblich auch von der Bodenfeuchte und noch mehr von der Temperatur abhängig (CURTIN et al., 2012). Im Versuchsjahr 2018/19 waren die N_{\min} -Werte insgesamt zu beiden Entnahmezeitpunkten höher als im Versuchsjahr 2017/18. Die Witterungsbedingungen nach der Ernte 2017 begünstigten mit hohen Niederschlagssummen und hohen Temperaturen eine Mineralisierung, aber auch bereits eine frühzeitige Verlagerung des Stickstoffs in tiefere Bodenschichten. Die trockenen Bedingungen nach der Ernte 2018 wirkten einer Auswaschung entgegen, während die hohen Temperaturen jedoch die Mineralisation begünstigten. Ein Beleg hierfür sind die Stickstoffgehalte der einzelnen Bodenschichten (Abbildung

29). Im Versuchsjahr 2017/2018 waren die N_{\min} -Gehalte in der obersten Bodenschicht deutlich geringer als in den tieferen Bodenschichten, während im Versuchsjahr 2018/2019 in der obersten Bodenschicht deutlich höhere N_{\min} -Gehalte vorhanden waren als in den tieferen Bodenschichten, was sich erst durch die Auswaschung über den Winter änderte. Durch die hohen N_{\min} -Gehalte zu Vegetationsbeginn im Versuchsjahr 2018/2019 wurde der Effekt der Strohabfuhr nicht relevant. Die signifikante Wechselwirkung Strohabfuhr*Standort im Jahr 2019 (Tabelle A50) hinsichtlich des NDVI zur Abreife war nur in der Soester Börde zu beobachten – signifikant höher war der NDVI mit Stroh. Das wiederum spricht dafür, dass in dieser Versuchsvariante der Stickstoff aus dem Stroh zu einem späteren Zeitpunkt freigesetzt wurde. Dieser Effekt trat am Haarstrang nicht auf, obwohl hier die Böden von geringerer Qualität sind und es dementsprechend schneller zu einem Nährstoffmangel und somit zu einem Effekt des zusätzlichen Stickstoffs durch das Stroh kommen sollte. Im Jahr 2018 war wegen der extremen Wetterbedingungen (Abbildung 8) zu den Untersuchungsterminen der Abreife diese insgesamt weiter fortgeschritten (Tabelle 12) und verlief daher deutlich dynamischer als im Folgejahr, wodurch mögliche Effekte der Strohabfuhr nicht erfasst werden konnten.

Die Signifikanzen sowie die Signifikanzniveaus der Korrelationen zwischen NDVI und Ertrag sowie NDVI und Rohprotein waren abhängig von Vorfrucht, Jahr und Standort. Die Korrelationen nach Vorfrucht Erbse hinsichtlich NDVI und Ertrag waren in der Soester Börde (Abbildung 30 und Abbildung 31) mit Ausnahme von zwei Terminen zur Jugendentwicklung im Jahr 2018 sowie zur Abreife nicht signifikant und extrem gering, während die Korrelationen am Standort Haarstrang (Abbildung 32 und Abbildung 33) in beiden Jahren, mit Ausnahme des ersten Untersuchungstermins im Jahr 2018, hochsignifikant waren. Ein möglicher Grund ist wiederum das hohe N-Mineralisationspotential der Soester Börde, welches Effekte der Stickstoffdüngung relativiert und die geringeren N-Gaben der niedrigen Düngestufen ausgleicht. Einen Kontrast hierzu stellen die Korrelationen nach Vorfrucht Ackerbohne dar. Hier ergaben sich im ersten Jahr für die Soester Börde (Abbildung 34 und Abbildung 35) hochsignifikante Korrelationen, während am Standort Haarstrang (Abbildung 36 und Abbildung 37) bei keinem der Untersuchungstermine signifikante Korrelationen festgestellt wurden. Im zweiten Untersuchungsjahr zeigte sich dort ein gegenteiliges Bild. Am Standort Soester Börde waren die Korrelationen wieder signifikant, jedoch mit deutlich geringeren Bestimmtheitsmaßen. Zu begründen ist dies mit der extremen

Trockenheit des Versuchsjahres 2018 (Abbildung 8), durch deren limitierende Wirkung die Verluste im Ertrag entstanden sind. Durch die Düngergaben konnte dieser Effekt nicht verhindert werden, auch wenn diese durch Abstufungen des NDVI sichtbar wurden. Auch THAPA et al. (2019) stellten in ihren Untersuchungen fest, dass der NDVI bei extremer Trockenheit zur Bestandsansprache ungeeignet ist. Am Standort Soester Börde ist die nutzbare Feldkapazität der Böden mit > 200 mm sehr hoch (STEMANN et al., 2019), was in Trockenperioden positive Auswirkungen auf die Vegetation hat. Im Gegensatz dazu liegt am Standort Haarstrang eine mittlere nutzbare Feldkapazität der Böden von 90–140 mm vor (ERKWOH, 1986). Dort kam es 2018 nach Vorfrucht Erbse während der Kornbildungsphase zu einigen ergiebigen Niederschlägen, weshalb an diesem Standort kein Trockenstress vorlag (KEMPER, 2018). Die Unterschiede hinsichtlich der Vorfrucht in der Soester Börde sind darauf zurückzuführen, dass nach Vorfrucht Erbse mehr Stickstoff im Boden verbleibt, was den Effekt der Düngestufen reduziert.

Mit wenigen Ausnahmen zu den Untersuchungsterminen zur frühen Jugendentwicklung waren die Korrelationen hinsichtlich NDVI und Rohprotein unabhängig von Vorfrucht, Jahr und Standort hochsignifikant (Abbildung 38 bis Abbildung 45). Die Differenz der Bestimmtheitsmaße zwischen NDVI und Ertrag sowie NDVI und Rohprotein beruht darauf, dass der Rohproteingehalt vornehmlich durch das N-Angebot bestimmt wird und der Ertrag im Gegensatz dazu von vielen weiteren Faktoren limitiert werden kann.

Insgesamt eigneten sich alle Termine, um ausgehend vom NDVI Aussagen zu Ertrag und Qualität zu machen, was sowohl den Ergebnissen von BIJAY-SINGH et al. (2011) entspricht, die die höchsten Übereinstimmungen zum Schossen feststellten, als auch den Ergebnissen von THAPA et al. (2019), die die Messungen nach der Blüte als idealen Untersuchungszeitraum benannten. In der vorliegenden Studie waren Aussagen hinsichtlich des Ertrags jedoch stark vom Standort und den vorliegenden extremen Witterungsbedingungen abhängig. So wurden hochsignifikante Korrelationen nur unter Begebenheiten festgestellt, in denen Wachstumsparameter wie Nährstoffzufuhr und Wasserversorgung limitiert waren, bis hin zu dem Punkt, an dem aufgrund erheblicher Mängel in Nährstoffzufuhr und Wasserversorgung kein Zusammenhang zwischen NDVI und Ertrag mehr festgestellt werden konnte.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von URBATZKA et al. (2016) konnten in der vorliegenden Studie keine Effekte der Strohbergung auf den Ertrag des Winterweizens festgestellt werden; dies deckt sich mit den Ergebnissen von ROTHARDT et al. (2018). Die Erträge im Jahr 2018 waren nach Vorfrucht Ackerbohne sowie nach Vorfrucht Erbse am Standort Soester Börde geringer als im Jahr 2019 (Tabelle 58 und Tabelle 59), was durch die extreme Trockenheit des Jahres 2018 bewirkt wurde. Dass Trockenstress (MIRBAHAR et al., 2009) und insbesondere die Kombination aus Trocken- und Hitzestress (GRIGOROVA et al., 2011; LOPES & REYNOLDS, 2012; PRADHAN et al., 2012; QASEEM et al., 2019) bei Weizen Mindererträge verursacht, ist vielfach nachgewiesen. Grund hierfür ist das Verschließen der Stomata bei Wassermangel, wodurch aufgrund der fehlenden Transpiration Wasser eingespart, durch die fehlende Verdunstungskälte jedoch zeitgleich Hitzestress gefördert wird (BRENNICKE & SCHOPFER, 2010). Der Jahreseffekt war am Standort Haarstrang nach Vorfrucht Ackerbohne mit Abstand am größten. Hier zeigte sich der Effekt der dünnen Oberbodenschicht, bei der die Wasserhaltekapazität im Gegensatz zu den tiefgründigen Böden der Soester Börde deutlich verringert war.

In der Hauptwirkung nach Vorfrucht Erbse bewirkte die Strohabfuhr einen signifikant geringeren Rohproteingehalt. Der um 0,07% nur geringfügig aber dennoch signifikant höhere Rohproteingehalt bei Verbleib des Stroh auf der Fläche kann mit den durchgeführten Untersuchungen nicht erklärt werden. Wenn diese Hauptwirkung mit dem durch das Stroh auf der Fläche verbleibenden Stickstoff begründet werden könnte, müsste es eine Wechselwirkung hinsichtlich N-Düngestufe und Strohabfuhr geben. Die Steigerungen der Düngergaben über den Sollwert hinaus sollten den Zweck erfüllen, mögliche Effekte durch einen Nährstoffüberschuss auszugleichen. Da die Düngergaben jedoch zu Zeitpunkten erfolgten, zu denen sie der Ertragssteigerung dienten (SCHILLING, 2000), müssten zur Überprüfung weitere Untersuchungen mit Düngergaben zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, die der Qualitätsverbesserung dienen. Hier besteht weiter Forschungsbedarf. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass der geringe Unterschied nicht dazu führte, dass der Weizen einer anderen Qualitätsgruppe zuzuordnen war, und der Unterschied daher vernachlässigbar erscheint.

5.3 Gesamtbeurteilung der Koppelproduktnutzung

Ob eine Koppelproduktnutzung für landwirtschaftliche Betriebe attraktiv ist, ist von der Ökonomie abhängig, welche unter anderem von den Substratkosten bestimmt wird (BLOKHINA et al., 2009). Je nach Anlagengröße können diese ein Drittel bis zur Hälfte der Jahreskosten ausmachen (DÖHLER, 2020). Eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit mit verschiedenen Szenarien wurde in dieser Studie nicht durchgeführt. Jedoch berechneten RÖPER et al. (2020a) die Kosten je m³ Methan hinsichtlich der Arten und Erntetermine im Vergleich zu Maissilage und stellten fest, dass die Wirtschaftlichkeit stark von den erzielten Stroherträgen und Gasausbeuten abhängig ist und bei Verringerung dieser das Körnerleguminosenstroh keine Alternative zu Silomais darstellt.

Vorteilhaft stellte sich für die Erbsen nur eine Nutzung des vollständig abgereiften Stroh dar, da andernfalls hohe Trocknungskosten beim Korn nicht gedeckt werden konnten. Erschwerend käme bei einem früheren Nutzungszeitpunkt hinzu, dass bei Kornfeuchten von über 19% beim Drusch vermehrt Schädigungen des Korns entstehen (SCHÄFER, 2011), die Hülsen teilweise nicht ausgedroschen werden können und die Ernte durch die Feuchte des Erntegutes grundsätzlich erschwert wird, was wiederum zu Verlusten führt.

Bei den Ackerbohnen erfolgt die Abreife von Stroh und Hülsen zeitlich versetzt, wobei die Hülsen früher abreifen als das Stroh. Dadurch ergibt sich eine größere Zeitspanne für die Nutzung. Als vorteilhaft erwies sich ein Erntetermin zur Druschreife oder späten Druschreife, da auch hier die arbeitstechnischen Aspekte hinsichtlich des idealen Feuchtegehalts des Korns zum Drusch zwischen 17% und 20% (FEIFFER, 2003) berücksichtigt werden. Darüber hinaus können höhere Bröckelverluste beim Stroh sowie erhöhte Kornverluste durch aufgeplatzte Hülsen und Bruchkorn bei Abwarten bis zur Totreife vermieden werden. Bei den ermittelten TM-Gehalten zwischen 60% und 70% wäre eine Nutzung in Form einer Silage noch möglich, jedoch empfiehlt sich wegen fehlender Kosubstrate für eine Silage zu dieser Vegetationszeit die Nutzung als Stroh (s. 5.1.2 Effekt der Silierung auf die Inhaltsstoffe und die Biogasausbeute).

Als Ursachen für die wirtschaftliche Anfälligkeit wurden die Biogasausbeute und der Strohertrag genannt. Für beide Faktoren ergaben sich aus den Versuchsergebnissen teils erhebliche Differenzen, bei den Biogasausbeuten zwischen gemessenen und

berechneten Werten und beim Strohertrag zwischen den Standorten. Daraus ergibt sich eine hohe Planungsunsicherheit für Landwirte, die erwägen, das Stroh von Erbsen und Ackerbohnen in ihren Biogasanlagen einzusetzen, was trotz des theoretisch guten Potentials der geprüften Koppelprodukte ein erhebliches Hemmnis darstellt. Wegen der durch die hohen Trockenmassegehalte bedingten, geringen Dichte des Strohs ergeben sich zudem weitere Probleme im Prozessablauf wie die fehlende Pumpfähigkeit des Substrats und dessen vermehrte Neigung zur Bildung von Schwimmschichten im Fermenter (SCHWARZ et al., 2017). Notwendig wäre daher eine Vergärung als Kosubstrat anstelle einer Monovergärung, wie in Kapitel 2.2.3 Grenzen des Einsatzes lignozellulosereicher Substrate beschrieben, was auch aufgrund des geringen Mengenangebots von Ackerbohnen und Erbsenstroh sinnvoll ist. Eine solche Kovergärung war jedoch nicht Teil dieser Studie, weshalb keine Aussagen hinsichtlich möglicher Gasausbeuten und -zusammensetzungen gemacht werden können und weiterer Forschungsbedarf besteht.

Die Nachwirkung einer Strohbergung stellte sich für die beiden Vorfrüchte unterschiedlich dar, wurde jedoch in keinem Fall ertragswirksam, was positiv zu bewerten ist. Mögliche langfristige Auswirkungen konnten, ebenso wie die Wirkung auf den Rohproteingehalt, nicht geprüft bzw. geklärt werden. Aufgrund der langen Anbaupausen bei Körnerleguminosen stellt sich die Untersuchung eines langfristigen Effekts der Strohbergung erschwert dar.

Der Vergleich mit anderen Substratalternativen zu Mais wie Getreide-Ganzpflanzensilage, Blümmischungen aus Wildpflanzen, Durchwachsene Silphie, Miscanthus oder Landschaftspflegegras zeigt, dass Alternativen vorhanden sind, die einen höheren Biomasseertrag gewährleisten als Erbsen- und/oder Ackerbohnenstroh. Die Methanausbeuten dieser Alternativen waren dabei vergleichbar (AIGNER et al., 2012; STOLZENBURG et al., 2016; DICKEDUISBERG, 2017) oder leicht verringert (DEGENBECK, 2015; KIESEL & LEWANDOWSKI, 2017; SCHRÖER et al., 2019) im Vergleich zu den in dieser Studie getesteten Koppelprodukten, wobei die Ausbeuten des Landschaftspflegematerials stärker schwankten (BLOKHINA et al., 2009; LEIBLE et al., 2015) und sowohl unterhalb als auch oberhalb der Methanausbeuten des Erbsen- und Ackerbohnenstrohs lagen. Die genannten Alternativen können Teile des Maissubstrats substituieren und damit zu einer Verringerung der Anbaufläche bei Mais führen, sie können jedoch, mit Ausnahme von Landschaftspflegegras und Teilen von

Blühmischungen, nicht die Flächenkonkurrenz zwischen Futter- und Nahrungsmitteln auf der einen und Energiepflanzen auf der anderen Seite entschärfen, da es sich nicht um Koppelprodukte handelt. Durch die geringe Anbaufläche kann jedoch auch das Leguminosenstroh nur in sehr unwesentlichem Umfang dazu beitragen. Insgesamt bieten alle Alternativen Vorteile durch eine steigende Biodiversität und durch die Auflockerung von maisbetonten Fruchtfolgen. Als Bestäuberpflanzen haben Körnerleguminosen, Blühmischungen und Durchwachsene Silphie außerdem einen zusätzlichen Mehrwert im Vergleich zu Mais, während Miscanthus und Getreide-Ganzpflanzensilage im Gegensatz zu Mais auf erosionsgefährdeten Flächen angebaut werden können und hier einen Schutz bieten. Der Anbau mehrjähriger Kulturen wie Miscanthus bietet zudem die Möglichkeit, CO₂ zu binden (EMMERLING & PUDE, 2017).

Die zu Beginn aufgestellten Hypothesen können wie folgt beantwortet werden:

1. Der mittlere Strohertrag der Körnerleguminosen von etwa 40 dt/ha TM liegt über den Angaben aus der Literatur. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Erträge von den Ernteterminen und Standorten abhängig waren. Außerdem wurden aufgrund der Erntetechnik Verluste minimiert, sodass der Ertrag aus den Literaturangaben von 30 dt/ha TM unter Praxisbedingungen realistisch ist. Die von anderen Autoren festgestellten Schwankungen konnten auch in der vorliegenden Studie bestätigt werden.
2. Die Gerüstsubstanzen nahmen mit fortschreitender Abreife zu. Deren Effekt auf die Gasausbeute stellte sich differenziert dar. Während die theoretischen Gasausbeuten mit zunehmender Seneszenz ebenso mäßig zunahmten wie die Gerüstsubstanzen, schwankten die gemessenen Gasausbeuten teilweise unspezifisch. Manche Varianten nahmen jedoch mit zunehmender Abreife kontinuierlich ab; eine kontinuierliche Zunahme konnte nur in einem Fall beobachtet werden.
3. Ein positiver Effekt der Silierung auf die Gasausbeute konnte bei den theoretischen Gasausbeuten nicht festgestellt werden; die Ausbeuten der Silagen lagen in den meisten Fällen unterhalb der Ausbeuten des Strohs. Die gemessenen Ausbeuten lagen teilweise über und teilweise unter denen des Strohs. Die Differenzen zwischen Strohsilage und Stroh waren bei den theoretischen Gasausbeuten geringer als bei den gemessenen.
4. Ein Sorteneffekt auf Gasausbeute und Strohertrag konnte bei der Erbse nicht abschließend geklärt werden, da eine der Sorten nicht vollständig geprüft

werden konnte. Die Ackerbohnsensorten unterschieden sich hinsichtlich des Strohertrags und der Gasausbeute signifikant, wobei die Unterschiede aber sehr gering ausfielen.

5. Die Nachwirkung der Strohbergung stellte sich für die beiden Vorfrüchte differenziert dar: Nach der Vorfrucht Ackerbohne wurden keine Effekte festgestellt, während nach der Vorfrucht Erbse zu verschiedenen Entwicklungsstadien Effekte der Strohbergung festgestellt wurden. Die weiter fortgeschrittene Jugendentwicklung des Weizens im ersten Versuchsjahr am Standort Haarstrang in der Variante ohne Stroh ist positiv zu bewerten. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass dieser Effekt nur in dem Versuchsjahr auftrat, in dem weniger N_{\min} im Boden enthalten war, und nur an dem Standort mit dem im Vergleich zur Soester Börde schlechteren Boden. Die Hauptwirkung auf den Rohproteingehalt, der in der Variante ohne Stroh mit einer Reduktion um 0,07% zwar nur wenig, aber dennoch signifikant geringer war als in der Variante mit Stroh, ist negativ zu bewerten. Die Effekte der Strohbergung waren jedoch nicht ertragswirksam.

6 Literaturverzeichnis

- ABREU, J. M. F. & BRUNO-SOARES, A. M.; 1998: Characterization and utilization of rice, legume and rape straws. In: Antongiovanni M. (ed.). *Exploitation of Mediterranean roughage and by-products*. Zaragoza: CIHEAM, 39 – 51 (Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches; n.17)
- AIGNER, A.; BIERTÜMPEL, A.; CONRAD, M.; DEIGLMAYR, K.; DIEPOLDER, M.; EDER, B.; EDER, J.; FORMOWITZ, B.; FRITZ, M.; GEHRING, K.; HARTMANN, A.; HARTMANN, S.; HEIERMANN, M.; HERRMANN, C.; HOFMANN, D.; IDLER, C.; KAWASCH, M.; KORNATZ, P.; LICHTI, F.; NEHRING, A.; SALZEDER, G.; SCHAFFNER, S.; STICKSEL, E.; STOCKMANN, F.; VETTER, A.; VOLLRATH, B.; VON BUTTLAR, C.; WENDLAND, M.; WILLMS, M.; WOLF, G.; ZEISE, K.; 2012: Energiepflanzen für Biogasanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 116 S., Bestellnr. 558
- ALKHTIB, A. S.; WAMATU, J. A.; WEGI, T.; RISCHKOWSKY, B. A.; 2016: Variation in the straw traits of morphological fractions of faba bean (*Vicia faba* L.) and implications for selecting for food-feed varieties. *Animal Feed Science and Technology*, 222, 122 – 131
- ALPMANN, D. & SCHÄFER, B. C.; 2014: Der Wert von Körnerleguminosen im Betriebssystem. *UFOP Praxisinformation*
- AMON, T.; BISCHOFF, M.; CLEMENS, J.; HEUWINKEL, H.; KEYMER, U.; MEIßBAUER, G.; OECHSNER, H.; REINHOLD, G.; SCHELLE, H.; WEILAND, P.; WELSCH, W.; ZERR, W.; 2015: Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. *KTBL-Heft 107*, 3. Auflage, Druckerei Silber Druck oHG, Niestetal
- ARSHAD, M. A.; SOON, Y. K.; AZOOZ, R. H.; 2002: Modified no-till and crop sequence effects on spring wheat production in northern Alberta, Canada. *Soil & Tillage Research*, 65, 29 – 36
- ASAR, M. A.; OSMAN, M.; YAKOUT, H. M.; SAFOAT, A.; 2010: Utilization of corn-cob meal and faba bean straw in growing rabbit diets and their effects on performance, digestibility and economical efficiency. *Egypt. Poult. Sci.*, Vol (30) (II), 415 – 442
- AUFHAMMER, W., FIEGENBAUM, A.; KÜBLER, E.; 1994: Zur Problematik der Stickstoffrückstände von Ackerbohnen (*Vicia faba* L.) Teil 1: Stickstoffakkumulation und Stickstoffrückstände von Ackerbohnen. *Die Bodenkultur*, 45, 239 – 251
- AUFHAMMER, W., FIEGENBAUM, A.; KÜBLER, E.; 1995: Zur Problematik der Stickstoffrückstände von Ackerbohnen (*Vicia faba* L.) Teil 3: Nutzung und Sicherung von Nitratstickstoff im Boden nach Ackerbohnen durch Untersaaten. *Die Bodenkultur*, 46, 25 – 37
- BASERGA, U.; 1998: Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen – Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras. *FAT-Berichte Nr. 512*, 1 – 11
- BASTIDA GARCIA, J. L.; GONZÁLEZ-RONQUILLO, M.; DOMÍNGUEZ VARA, I. A.; ROMERO-BERNAL, J.; CASTELÁN ORTEGA, O.; 2011: Effect of field pea (*Pisum sativum* L.) level on intake, digestion, ruminal fermentation and *in vitro* gas production in sheep fed maintenance diets. *Animal Science Journal*, 82, 654 – 662

- BECK, R. & BRANDHUBER, R.; 2012: Effekte der Gärrestdüngung auf Humus und Bodenstruktur – Zwischenbilanz. LfL Schriftenreihe 11, Düngung mit Biogasgärresten effektiv-umweltfreundlich-bodenschonend, Tagungsband 10. Kulturlandschaftstag, 15.11.2012, Weichering
- BEKKER, M.; 2007: Charakterisierung der anaeroben Abbaubarkeit von spezifischen organischen Stoffen. Dissertation Universität Karlsruhe. Verlag Siedlungswasserwirtschaft, Schriftenreihe SWW, Band 125, Karlsruhe, 134 S.
- BIJAY-SINGH; SHARMA, R. K.; JASPREET-KAUR; JAT, M. L.; MARTIN, K. L.; YADVINGER-SINGH; VARINDERPAL-SINGH; CHANDNA, P.; CHOUDHARY, O. P.; GUPTA, R. K.; THIND, H. S.; JAGMOHAN-SINGH; UPPAL, H. S.; KHURANA, H. S.; AJAY-KUMAR; UPPAL, R. K.; VASHISTHA, M.; RAUN, W. R.; GUPTA, R.; 2011: Assessment of the nitrogen management strategy using an optical sensor for irrigated wheat. *Agronomy Sust. Developm.* 31: 589 – 603
- BLOKHINA, Y.; PROCHNOW, A.; PLÖCHL, M.; LUCKHAUS, C.; HEIERMANN, M.; 2009: Ökonomische Bewertung der Biogaserzeugung: Erfahrungen mit Landschaftspflegeaufwuchs des Nationalparks Unteres Odertal. *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 41 (3), 83 – 88
- BRENNICKE, A. & SCHOPFER, P.; 2010: Das Blatt als photosynthetisches System. In: *Pflanzenphysiologie*, Spektrum Akademischer Verlag
- BRULÉ, M.; LEMMER, A.; OECHSNER, H.; JUNGBLUTH, T.; SCHIMPF, U.; 2008: Einfluss der Zugabe von faserspaltenden Enzymen auf die Methanausbeute von Roggensilage. *Landtechnik* 3/2008, 178 – 179a
- BRUNO-SOARES, A. M.; ABREU, J. M. F.; GUEDES, C. V. M.; DIAS-DA-SILVA, A. A.; 2000: Chemical composition, DM, NDF degradation kinetics in rumen of seven legume straws. *Animal Feed Science and Technology*, 83, 75 – 80
- BROSOWSKI, A.; ADLER, P.; ERDMANN, G.; STINNER, W.; THRÄN, D.; MANTAU, U.; BLANKE, C.; MAHRO, B.; HERING, T.; REINHOLDT, G.; 2015: Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen – Status quo in Deutschland. *Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe* Nr. 36, Gülzow
- BORGMANN, F.; 2006: Biologische Grundlagen des Pflanzenbaus. In: *Lehrbuch des Pflanzenbaus Band 1: Grundlagen*. Lütke-Entrup, N. & Oehmichen, J. (Hrsg.), AgroConcept, 3. Auflage, Bonn
- BOYLE, W. C.; 1976: Energy recovery from sanitary landfills – a review. In: *Microbial Energy Conversion*. Schlegel, H. G. & Barnea, S. (Hrsg.), Pergamon Press, Oxford
- BUCHNER, W.; 2006: Fruchtfolge. In: *Lehrbuch des Pflanzenbaus Band 1: Grundlagen*. Lütke Entrup, N.; Oehmichen, J. (Hrsg.) AgroConcept GmbH, 3. Auflage, Bonn
- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi); 2019: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (Stand: Dezember 2019)

- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi); 2020: Erneuerbare Energien. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html> besucht am: 07.10.2020
- BUSWELL, A. M. & MUELLER, H. F.; 1952: Mechanism of Methane Fermentation. *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 44, No. 3, S. 550 – 552
- CHEN, L.; AUH, C.; CHEN, F.; CHENG, X.; ALJOE, H.; DIXON, R. A.; WANG, Z.; 2002: Lignin Deposition and Associated Changes in Anatomy, Enzyme Activity, Gene Expression, and Ruminal Degradability in Stems of Tall Fescue at Different Developmental Stages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 5558 – 5565
- CUMPLIDO-MARIN, L.; GRAVES, A. R.; BURGESS, P. J.; MORHART, C.; PARIS, P.; JABLONOWSKI, N. D.; FACCIOTTO, G.; BURY, M.; MARTENS, R.; NAHM, M.; 2020: Two Novel Energy Crops: *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby and *Silphium perfoliatum* L.— State of Knowledge. *Agronomy*, 10, 928, 1 – 66
- CURTIN, D.; BEARE, M. H.; HERNANDEZ-RAMIREZ, G.; 2012: Temperature and Moisture Effects on Microbial Biomass and Soil Organic Matter Mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 76, 2055 – 2067
- DEGENBECK, M.; 2015: Nachhaltige Biogaserzeugung aus Wildpflanzen: Mehr Vielfalt im Energiepflanzenanbau durch artenreiche Wildpflanzenmischungen. *SUB 3/2015*, 34 – 39
- DELÉGLISE, C.; MEISSER, M.; MOSIMANN, E.; SPIEGELBERGER, T.; SIGNARBIEUX, C.; JEANGROS, B.; BUTTLER, A.; 2015: Drought-induced shifts in plant traits, yields and nutritive value under realistic grazing and mowing managements in a mountain grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 213, 94 – 104
- DEUKER, A.; MÖLLER, K.; LEITHOLD, G.; 2005: Vergleich der pflanzenbaulichen Systemwirkungen vergorener und unvergorener Wirtschaftsdünger und Vergärung von pflanzlichen Koppelprodukten in einem Betriebssystem der ökologischen Landwirtschaft mit Viehhaltung. [Comparison of system effects from fermented and unfermented organic fertilizers and fermentation of vegetal by-products on plant production in an organic farming system with husbandry.] In: Heß, J. & Rahmann, G (Hrsg.) *Ende der Nische, Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*, kassel university press GmbH, Kassel.
- DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT E.V. 2004: Grobfutterbewertung Teil A – DLG-Schlüssel zur Bewertung von Grünfutter, Silage und Heu mit Hilfe der Sinnenprüfung, DLG-Information 1/2004. Aktualisierter Nachdruck
- DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT E.V.; 2005: Kleiner Helfer für die Berechnung von Futterrationen: Wiederkäuer und Schweine. DLG-Verlag GmbH, 11. Auflage, Frankfurt am Main
- DICKEDUISBERG, M.; 2017: Management and drought effects on growth and herbage yield of Tall Wheatgrass (*Agropyron elongatum*) for biogas production in Central Europe. Dissertation, Fakultät für Agrarwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen

- DIETERLE, P.; ENGLING, F.-P.; HORST, H.; PAUL, C.; ROBOWSKY, K.-D.; TILLMANN, P.; 2003: Die Anwendung der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) bei der Untersuchung von Futtermitteln und pflanzlichen Produkten. Standpunkt VDLUFA
- DÖHLER, H.; 2020: Ökonomische Bewertung bei der Biogasgewinnung aus Stroh und Gülle. Tagungsband „Stroh, Gras → Biogas- Innovative Verfahren zur Nutzung von Enteresten in Biogasanlagen“. Tagungsband 2020, 51 – 53
- DOMINIK, P.; JÄGER, N.; SÄNGER, A.; FLESSA, H.; 2009: Wie wirken NaWaRo-Gärreste auf den organischen Bodenkohlenstoff?. Gülzower Fachgespräche, Band 32, Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven, 210 – 222
- DUMONT, B.; ANDUEZA, D.; NIDERKORN, V.; LÜSCHER, A.; PORQUEDDU, C.; PICON-COCHARD, C.; 2015: A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. Grass and Forage Science 70, 239 – 254
- ERNEUERBARE-ENERGIEN-GESETZ (EEG), 2017: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017), https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf, besucht am 13.03.2020
- EMMERLING, C. & PUDE, R.; 2017: Introducing Miscanthus to the greening measures of the EU Common Agricultural Policy. Global Change Biology Bioenergy, 9, 274 – 279
- ERKWOH, F.-D.; 1986: Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen, Blatt L4514 Soest. Hrsg.: Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld
- FACHVERBAND BIOGAS E.V.; 2019: Branchenzahlen 2018 und Prognose der Branchenentwicklung 2019. [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/19-07-12_Biogas_Branchenzahlen-2018_Prognose-2019.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/19-07-12_Biogas_Branchenzahlen-2018_Prognose-2019.pdf), besucht am 13.03.2020
- FEIFFER, A.; 2003: Öl- und Proteinpflanzen besser dreschen. Fachverlag Feiffer/Klüßendorf GbR, Sondershausen, 87 Seiten, zitiert aus: Lehrbuch des Pflanzenbaus Band 2: Kulturpflanzen. Lütke Entrup, N.; Schäfer, B.C. (Hrsg.) AgroConcept GmbH, 3. Auflage, S. 645
- FENDLER, R.; HERMANN, T.; REUTER, M.; 2019: Biogasanlagen: Sicherheitstechnische Aspekte und Umweltauswirkungen. Umweltbundesamt (Hrsg.)
- FERRAZ, A. & DURÁN, N.; 1995: Lignin degradation during softwood decaying by the ascomycete *Chrysonilia sitophila*. Biodegradation 6, 265 – 274
- FIGENBAUM, A.; AUFHAMMER, W., KÜBLER, E.; 1994: Zur Problematik der Stickstoffrückstände von Ackerbohnen (*Vicia faba* L.) Teil 2: Verlauf der N_{min}-Gehalte im Boden nach Ackerbohrendrusch. Die Bodenkultur, 45, 319 – 331
- FRIEDRICH, E.; FRIEDRICH, H.; LINCKE, M.; SCHWARZ, B.; WUFKA, A.; FABAUER, B.; 2010: Verbesserte Konvertierbarkeit lignocellulosehaltiger Substrate in der Nassfermentation – Extrusion von Stroh. Chemie Ingenieur Technik 82(8), 1177 – 1180

- FRITZ, T.; 2008: Entwicklung, Implementierung und Validierung eines praxisnahen Verfahrens zur Bestimmung von Biogas- und Methanerträgen. Dissertation, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Universität Rostock, Rostock
- FUHRMANN, R.; 2020: Jahresstatistiken Wetterstation Krentrupershagen 2017 & 2018. www.krentrupershagen.de/stat_jahr.php, besucht am 19.08.2020
- GANAL, M.; 2018: Feldexperimentelle Analysen pflanzenbaulicher und technologischer Potenziale von Körnermaisstroh für die Biogasproduktion. Dissertation, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, TU München, München
- GÓMEZ, L. D.; AMALFITANO, C.; ANDOLFI, A.; SIMISTER, R.; SOMMA, S.; RAFFAELA ERCOLANO, M.; BORRELI, C.; MCQUEEN-MASON, S. J.; FRUSCIANTE, L.; CUCINIELLO, A.; CARUSO, G.; 2017: Valorising faba bean residual biomass: Effect of farming system and planting time on the potential for biofuel production. *Biomass and Bioenergy*, 107, 227 – 232
- GONZÁLEZ GARCÍA, U. A.; GONZÁLEZ RONQUILLO, M.; ESTRADA FLORES, J. G.; LUISBASTIDA GARCÍA J.; PECADOR SALAS, N.; SALEM, A.-F. Z. M.; 2011: Inclusion of field pea hay (*Pisum sativum* L.) and in vitro gas production in diets for growing lambs. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 989 – 997
- GRIGOROVA, B.; VASEVA, I.; DEMIREVSKA, K.; FELLER, U.; 2011: Combined drought and heat stress in wheat: changes in some heat shock proteins. *Biologia Plantarum* 55 (1), 105 – 111
- GRÖBLINGHOFF, F.-F.; LÜTKE ENTRUP, N.; SCHLAUTMANN, C.; STEMANN, G.; 2001: Ackerbohnenanbau mit Grasuntersaaten – Ertragsleistung, Stickstofffixierung und Nachwirkung in verschiedenen Anbausystemen. DLG-Ausschuss Gräser, Klee und Zwischenfrüchte, Jahrestagung, 6.-7.12.2001 Fulda. Tagungsband
- GRUBER, H. & THAMM, U.; 2007: Einfluss legumer Vorfrüchte auf Ertrag und Qualität von Winterweizen im ökologischen Landbau. Abschlussbericht Fo.-Nr.: 4/05
- HADJIPANAYIOTOU, M.; ECONIMIDES, S.; KOUMAS, A.; 1985: Chemical composition, digestability and energy content of leguminous grains and straws grown in a Mediterranean region. *Ann. Zootech.*, 34(1), 23 – 30
- HAEFFNER, B.; NIED, C.; VOIGT, J.; SOMMER, K.; 2010: Verweilzeitverkürzung bei der Biogasentstehung durch Zerkleinerung von lignocellulosehaltigen Substraten. *Chemie Ingenieur Technik* 82(8), 1261 – 1264
- HAIDER, K. & GRÖBLINGHOFF, F.-F.; 1990: Biochemische Umsetzungen und Humusbildung in Böden unterschiedlicher Bewirtschaftung. *Kali-Briefe (Büntehof)*, 20 (1), 31 – 48
- HARTEN, U.; 2017: Physik: Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 7. Auflage, Springer Vieweg, Berlin
- HARTMANN, H.; 2009: Transport, Lagerung, Konservierung und Trocknung. In: *Energie aus Biomasse*. Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.), Springer-Verlag, 2. Auflage, Berlin Heidelberg

- HASSAN, F. A.; ZAZA, G. H.; IBRAHIM, M. R. M.; ALI M. A.; 2012: Impact of using pea vines as non-conventional feedstuff on growth performance of rabbits. World Rabbit Science Association, Proceedings 10th World Rabbit Congress – September 3 – 6, 2012 – Sharm El- Sheikh – Egypt, 525 – 529
- HENDRICKSON, J. R.; MOSER, L. E.; MOORE, K. J.; WALLER, S. S.; 1997: Leaf nutritive value related to tiller development in warm-season grasses. *Journal of Range Management*, 50, 116 – 122
- HEUWINKEL, H.; ASCHMANN, A.; GERLACH, R.; GRONAUER, A.; 2009: Die Genauigkeit der Messung des Gasertragspotentials von Substraten mit der Batchmethode. In: Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009 Band 1, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), S. 95 – 104
- HOFFMANN, M.; 2018: Effekte der Düngung mit Gärresten auf Bodenfruchtbarkeit und Pflanzen. Dissertation, Lebenswissenschaftliche Fakultät, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin
- HÖCKNER, J.; 2020: Praktische Erfahrungen mit Maisstrohvergärung. Biogas aus Stroh, Gülle und Co., Heiden digital, 16.09.2020
- JENSEN, E. S. & HAUGGAARD-NIELSEN, H.; 2003: How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment?. *Plant and Soil*, 252, 177 – 186
- JENSEN, E. S.; PEOPLES, M. B.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; 2010a: Faba bean in cropping systems. *Field Crops Research* 115, 203 – 216
- JENSEN, K. B.; WALDRON, B. L.; PEEL, M. D.; ROBINS, J. G.; 2010b: Nutritive value of herbage of five semi-irrigated pasture species across an irrigation gradient. *Grass and Forage Science* 65, 92 – 101
- JEROCH, H.; 2008: Stroh. In: Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere. Jeroch, H.; Drochner, W.; Simon, O. (Hrsg.), DLG-Verlag GmbH, 2. Auflage, Frankfurt am Main, S.184 – 186
- JEROCH, H.; LIPIEC, A.; ABEL, H.; ZENTEK, J.; GRELA, E. R.; BELLOF, G.; 2016: Körnerleguminosen als Futter- und Nahrungsmittel. DLG-Verlag GmbH, 1. Auflage, Frankfurt am Main
- KAHNT, G.; 2008: Leguminosen im konventionellen und ökologischen Anbau. DLG-Verlag GmbH, 1. Auflage, Frankfurt am Main
- KAISER, F. L.; 2007: Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren. Dissertation, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, TU München, München
- KÄMPFER, P.; 2002: Biologie der Kompostierung. In: Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.), ATV-Handbuch, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin

- KEMPER, M.; 2018: Niederschläge am Versuchsstandort. Versuchsansteller, Mündliche Mitteilung am 25.07.2018
- KIESEL, A. & LEWANDOWSKI, I.; 2017: Miscanthus as biogas substrate – cutting tolerance and potential for anaerobic digestion. *GCB Bioenergy*, 9, 153 – 167
- KOEPF, H.; 1956: Zur Dynamik des Abbaues organischer Substanzen in verschiedenen Böden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, Band 73, Heft 1, 48 – 59
- KÖPKE, U. & NEMECEK, T.; 2010: Ecological services of faba bean. *Field Crops Research* 115, 217 – 233
- LARDY, G. P. & ANDERSON, V. L.; 2009: Alternative Feeds for Ruminants. AS-1182
- LASER, H.; BOELHAUVE, M.; GARMEISTER, R.; 2018: Biomasseaufwertung und Silierung lignocellulosereicher Koppelprodukte zur Optimierung der Methanausbeute (BASiliKOM). ISBN (print): 978-3-940956-75-0. ISBN (elektr): 978-3-940956-76-7, 91 S., FNR Projekt, Förderkennzeichen: 22400715
- LASER, H.; BOELHAUVE, M.; GARMEISTER, R.; 2020: Biomasseaufwertung und Silierung lignocellulosereicher Koppelprodukte zur Optimierung der Methanausbeute. Tagungsband „Stroh, Gras → Biogas- Innovative Verfahren zur Nutzung von Enteresten in Biogasanlagen“. Tagungsband 2020, 37 – 44
- LEHBRINK, M.; 2019: schriftliche Mitteilung vom 27.11.2019
- LEIBLE, L.; KÄLBER, S.; KAPPLER, G.; OECHSNER, H.; MÖNCH-TEGEDER, M.; 2015: Biogas aus Landschaftspflegegras. Möglichkeiten und Grenzen. *KIT Scientific Reports* 7691, Karlsruhe
- LI, W.; KHALID, H.; ZHU, Z.; ZHANG, R.; LIU, G.; CHEN, C.; THORIN, E.; 2018: Methane production through anaerobic digestion: Participation and digestion characteristics of cellulose, hemicellulose and lignin. *Applied Energy*, 2018/226, 1219 – 1228
- LICHTI, F.; WENDLAND, M.; SCHMIDHALTER, U.; OFFENBERGER, K.; 2012: Die Nährstoffwirkung von Biogasgärresten. *LfL Schriftenreihe* 11, Düngung mit Biogasgärresten effektiv-umweltfreundlich-bodenschonend, Tagungsband 10. Kulturlandschaftstag, 15.11.2012, Weichering
- LILIENTHAL, H.; 2014: Optische Sensoren in der Landwirtschaft: Grundlagen und Konzepte. *Journal für Kulturpflanzen* 66 (2), 34 – 41
- LINDORFER, J., STEINMÜLLER, H.; AUER, W.; JÄGER, A.; EDER, A.; 2010: Untersuchung der Vorhydrolyse von Lignocellulose Rohstoffen mittels Steam Explosion. *Chemie Ingenieur Technik* 82(8), 1169 – 1176
- LOPES, M. S. & REYNOLDS, M. P.; 2012: Stay-green in spring wheat can be determined by spectral reflectance measurements (normalized difference vegetation index) independently from phenology. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 63, No. 10, 3789 – 3798

- LÓPEZ, S.; DAVIES, D. R.; JAVIER GIRALDEZ, F.; DHANOA, MS.; DIJKSTRA, J.; FRANCE, J.; 2005: Assessment of nutritive value of cereal and legume straw based on chemical composition and *in vitro* digestibility. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 1550 – 1557
- MANNHEIM, T.; BRASCHKAT, J.; MARSCHNER, H.; 1997: Ammoniakemissionen aus alternden Pflanzen und bei der Zersetzung von Ernterückständen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 160, 125 – 132
- MAURER, M. & WINKLER, J.-P.; 1982: *Biogas – Theoretische Grundlagen, Bau und Betrieb von Anlagen*. Verlag C. F. Müller, 2. Auflage, Karlsruhe
- MEISSER, M.; DELÉGLISE, C.; STÉVENIN, L.; MOSIMANN, E.; 2015: Auswirkung von Trockenperioden auf Wiesen. *Agrarforschung Schweiz* 6 (9), 400 – 407
- MIEDANER, T.; 2014: *Optimale Substrate für Biogas: Methanertrag maximieren – Fruchtfolge verbessern*. DLG-Verlag GmbH, 1. Auflage, Frankfurt am Main
- MIRBAHAR, A. A.; MARKHAND, G. S.; MAHAR, A. R.; ABRO, S. A.; KANHAR, N. A.; 2009: Effect of water stress on yield and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Pak. J. Bot.* 41 (3), 1303 – 1310
- MITTWEG, G.; OECHSNER, H.; HAHN, V.; LEMMER, A.; REINHARDT-HANISCH, A.; 2012: Repeatability of a laboratory batch method to determine the specific biogas and methane yields. *Engineering in Life Science*, 12, No. 3, 270 – 278
- MUKENGELE, M.; BRULÉ, M.; OECHSNER, H.; 2006: Einfluss der Substratmischung aus Energiepflanzen auf Abbaukinetik und Methanertrag. *Landtechnik* 1/2006, 26 – 27
- MUKENGELE, M. & OECHSNER, H.; 2007: Einfluss der Silierung auf den spezifischen Methanertrag bei Mais. *Landtechnik* 1/2007, 20 – 21
- NULTSCH, W.; 1977: *Allgemeine Botanik*. Georg Thieme Verlag, 6. Auflage, Stuttgart
- OEHMICHEN, J. & WEYER, T.; 2006: *Bodenkunde*. In: *Lehrbuch des Pflanzenbaus Band 1: Grundlagen*. Lütke Entrup, N.; Oehmichen, J. (Hrsg.) AgroConcept GmbH, 3. Auflage, Bonn
- OMBABI, A.; SÜDEKUM, K.-H.; TAUBE, F.; 2001: Untersuchungen am Primäraufwuchs zweier Weidelgräser zur Dynamik der Veränderungen in der Verdaulichkeit und der Futteraufnahme durch Schafe. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 85, Issue 11 – 12, 385 – 405
- PAFFRATH, A.; 2005: Einfluss von Ackerbohnen, Körnererbsen, Buschbohnen und Rotkleegras auf die Folgefrucht Kartoffeln. In: Heß, J & Rahmann, G (Hrsg.) *Ende der Nische, Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*, kassel university press GmbH, Kassel.
- PEOPLES, M. B.; BROCKWELL, J.; HERRIDGE, D. F.; ROCHESTER, I. J.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; DAKORA, F. D.; BHATTARAI, S.; MASKEY, S. L.; SAMPET, C.; RERKASEM, B.; KHAN, D. F.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; JENSEN, E. S.; 2009: The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis* 48, 1 – 17.

- PETERSSON, A.; THOMSEN, M. H.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; THOMSEN, A.-B.; 2007: Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean. *Biomass & Bioenergy*, 31, 812 – 819
- PONNUSAMY, V. K.; NGUYEN, D. D.; DHARMARAJA, J.; SHOBANA, S.; BANU, J. R.; SARATALE, R. G.; CHANG, S. W.; KUMAR, G.; 2019: A review on lignin structure, pretreatments, fermentation reactions and biorefinery potential. *Bioresource Technology* 271, 462 – 472
- PRADHAN, G. P.; VARA PRASAD, P. V.; FRITZ, A. K.; KIRKHAM, M. B.; GILL, B. S.; 2012: Effects of drought and high temperature stress on synthetic hexaploid wheat. *Functional Plant Biology*, 39, 190 – 198
- PREISSEL, S.; RECKLING, M.; SCHLÄFKE, N.; ZANDER, P.; 2015: Magnitude and farm-economic value of grain legume pre-crop benefits in Europe: A review. *Field Crops Research*, 175, 64 – 79
- QASEEM, M. F.; RAHMATULLAH, Q.; SHAHEEN, H.; 2019: Effects of Pre-Anthesis Drought, Heat and Their Combination on the Growth, Yield and Physiology of diverse Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes Varying in Sensitivity to Heat and drought stress. *Scientific Reports*, 9:6955, 1 – 11
- RATH, J.; HERRMANN, A.; HEUWINKEL, H.; DANDIKAS, V.; LICHTI, F.; 2016: Welcher Maissortentyp für die Biogasanlage?. *Sonderdruck Mais* 4, 1 – 6
- RECKLING, M.; HECKER, J.-M.; BERGKVIST, G.; WATSON, C. A.; ZANDER, P.; SCHLÄFKE, N.; STODDARD, F. L.; EORY, V.; TOPP, C. F. E.; MAIRE, J.; BACHINGER, J.; 2016: A cropping system assessment framework – Evaluating effects of introducing legumes into crop rotations. *European Journal of Agronomy*, 76, 186 – 197
- REINHOLD, G. & FRIEDRICH, E.; 2012: Vergärung von Stroh: Stand und Perspektiven. 2. Internationale Strohtagung, 29. – 30. März 2012, Berlin
- RESCH, R., 2015: Herausforderungen der Gärfutterproduktion im Hinblick auf erdige Futtermittelverschmutzung. 42. Viehwirtschaftliche Fachtagung, 1 – 11
- RÖPER, K.; PUDE, R.; GRÖBLINGHOFF, F.-F.; SCHÄFER, B. C.; 2019a: Differenzierung der Inhaltsstoffe von Körnerleguminosenstroh durch die Seneszenz als Einflussfaktoren für die Nutzung des Strohs in Biogasanlagen. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 31, 137 – 138
- RÖPER, K.; PUDE, R.; GRÖBLINGHOFF, F.-F.; SCHÄFER, B. C.; 2019b: Auswirkung der Strohnutzung von Körnerleguminosen auf den Vorfruchtwert bei Winterweizen. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 31, 77 – 78
- RÖPER, K.; GRÖBLINGHOFF, F.-F.; LASER, H.; SCHÄFER, B. C.; 2020a: Möglichkeiten zur Nutzung von Koppelprodukten des Ackerbohnen- und Erbsenanbaus in Biogasanlagen. Abschlussbericht, FNR Projekt, Förderkennzeichen: 22401316
- RÖPER, K.; GRÖBLINGHOFF, F.-F.; LASER, H.; PUDE, R.; SCHÄFER, B. C.; 2020b: Einfluss der Seneszenz auf die Differenzierung der Inhaltsstoffe von Körnerleguminosenstroh als Grundlage für die Berechnung theoretischer Biogaspotentiale. *Journal für Kulturpflanzen* 72 (10 – 11), 510 – 526

- ROTHARDT, S.; PAHLMANN, I.; KAGE, H.; 2018: INPLAMINT Increasing agricultural nutrient-use efficiency by optimizing plant–soil-microorganism interactions. Schlussbericht. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- RÜHL, G.; BRAMM, A.; GREEF, J.; 2009: Aspekte des Anbaus von Körnerleguminosen. *Journal für Kulturpflanzen*, 61 (9), 312 – 317
- SAUERMAN, W.; 2012: Zweitnutzung des Stroh über Biogas. *Bauernblatt* 17.3.2012
- SCHÄFER, B. C. & LÜTKE ENTRUP, N.; 2009: Ökonomische Bewertung von Bodenbearbeitungssystemen in Fruchtfolgen mit Körnerleguminosen. *Journal für Kulturpflanzen*, 61 (9), 309 – 311
- SCHÄFER, B. C.; 2011: Körnerleguminosen. In: *Lehrbuch des Pflanzenbaus Band 2: Kulturpflanzen*. AgroConcept GmbH, 3. Auflage, Bonn, S. 626 – 656
- SCHAUSS, K.; RATERING, S.; STINNER, W.; DEUKER, A.; MÖLLER, K.; SCHNELL, S.; 2006: Auswirkungen auf die bodenbürtigen Distickstoffoxid- und Methanemissionen. In: *Auswirkung der Fermentation biogener Rückstände in Biogasanlagen auf Flächenproduktivität und Umweltverträglichkeit im Ökologischen Landbau – Pflanzenbauliche, ökonomische und ökologische Gesamtbewertung im Rahmen typischer Fruchtfolgen viehhaltender und viehloser ökologisch wirtschaftender Betriebe (Endbericht: DBU – AZ 15074)*. Möller, K.; Leithold, G.; Michel, J.; Schnell, S.; Stinner, W.; Weiske, A. (Hrsg.)
- SCHIEDER, D.; ELLENRIEDER, J.; FAULSTICH, M.; 2009: Kombinierte mechanische-enzymatische Vorbehandlung zum verbesserten Substrataufschluss bei der Vergärung nachwachsender Rohstoffe. *Schriftenreihe Biogas Science 2009, Band 1*, Erding, 105 – 119
- SCHILLING, G.; 2000: *Pflanzenernährung und Düngung*. Verlag Eugen Ulmer GmbH und Co., 1. Auflage, Stuttgart
- SCHLEGEL, H. G.; 1992: *Allgemeine Mikrobiologie*. Georg Thieme Verlag KG, 7. Auflage, Stuttgart
- SCHOLWIN, F.; LIEBETRAU, J.; EDELMANN, W.; 2009: Biogaserzeugung und –nutzung Grundlagen. In: *Energie aus Biomasse*. Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.), Springer-Verlag, 2. Auflage, Berlin Heidelberg
- SCHOLZ, V.; IDLER, C.; DARIES, W.; EGERT, J.; 2005: Lagerung von Feldholzhackgut: Verluste und Schimmelpilzbefall. *Agrartechnische Forschung* 11, Heft 4, 100 – 113
- SCHRÖER, J.; HÖGEMANN, J.; ROTTMANN-MEYER, M.-L., KÖNNING, C.; 2019: Monitoring zur Nährstofffixierung durch mehrjährige Wildpflanzen auf Praxisflächen in Niedersachsen. Abschlussbericht, 42 S., Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Fördervorhaben im Bereich Nachwachsender Rohstoffe, Az. 105.2-3234/1-5-282
- SCHUSTER, W. & v. LOCHOW, J.; 1979: *Anlage und Auswertung von Feldversuchen*, 2. Auflage, DLG-Verlag GmbH, Frankfurt am Main

- SCHWARZ, B., FRIEDRICH, E.; FRIEDRICH, H.; JOBST, K.; LINCKE, M.; 2009: Desintegrationsverfahren – Aufwand und Nutzen für die Biogaserzeugung. Gülzower Fachgespräche: Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Weimar, Band 32, 278 – 288
- SCHWARZ, B.; FLESCHHUT, M.; BAYE, D.; 2017: Einsatz von strohartigen Biomassen in Biogasanlagen – Stand und Perspektiven. KTBL-Schrift 512, 167 – 175
- SCHWARZ, F. J.; 2011: Rinderfütterung. In: Tierernährung. Kirchgeßner, M. (Hrsg.) DLG-Verlag GmbH, 13. Auflage, Frankfurt am Main
- SENSEL, K.; WRAGGE, V.; ELLMER, F.; 2009: Pflanzenbauliche Nutzung von Gärprodukten. Gülzower Fachgespräche, Band 30, Gärrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzung – Stand und F+E-Bedarf, 117 – 132
- SKINNER, R. H.; GUSTINE, D. L.; SANDERSON, M. A.; 2004: Growth, Water Relations, and Nutritive Value of Pasture Species Mixtures under Moisture Stress. *Crop Science*, Vol. 44, 1361 – 1369
- STANGL, G. I.; 2011: Die Nährstoffe und ihr Stoffwechsel. In: Tierernährung. Kirchgeßner, M. (Hrsg.) DLG-Verlag GmbH, 13. Auflage, Frankfurt am Main
- STATISTISCHES BUNDESAMT; 2019: Ackerland nach Hauptfruchtgruppen und Fruchtarten, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Tabellen/ackerland-hauptfruchtgruppen-fruchtarten.html> (19.11.2019)
- STEINHÖFEL, O. & JEROCH, H.; 2008: Grünfütter und Grünfütterkonservate. In: Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere. Jeroch, H.; Drochner, W.; Simon, O. (Hrsg.), DLG-Verlag GmbH, 2. Auflage, Frankfurt am Main
- STEINHÖFEL, O.; 2008: Konservierung von Futtermitteln. In: Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere. Jeroch, H.; Drochner, W.; Simon, O. (Hrsg.), DLG-Verlag GmbH, 2. Auflage, Frankfurt am Main
- STEMANN, G.; HÜNNIES, S.; JENSCHKE, D., 2019: Versuchsfeldführer 2019. 1. Auflage, 137 S.
- STEVENSON, F. C. & VAN KESSEL, C.; 1997: Nitrogen Contribution of Pea Residue in a Hummonocky Terrain. *Soil Science Society of America Journal*, 61 (2), 494 – 503
- STINNER, W.; MAJER, S.; DANIEL-GROMKE, J.; DEUKER, A.; MÖLLER, K.; SCHOLWIN, F.; LEITHOLD, G.; 2009: Energieertragspotenzial und Klimawirkungen durch Biogaserzeugung aus pflanzlichen Koppelprodukten. Schriftenreihe Biogas Science 2009, Band 3, Erding, 501 – 515
- STINNER, W.; 2020: Potentiale und Kosten der Strohvergärung. Biogas aus Stroh, Gülle und Co., Heiden digital, 16.09.2020
- STOLZENBURG, K.; BRUNS, H.; MONKOS, A.; OTT, J.; SCHICKLER, J.; 2016: Produktion von Kosubstraten für die Biogasanlage: Ergebnisse der Versuche mit Durchwachsener Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) in Baden-Württemberg. Informationen für die Pflanzenproduktion 4-2016

- SZERENCSITS, M. & ERHART, E.; 2015: Biogaserzeugung ohne Flächenkonkurrenz auf Basis von Zwischenfrüchten, Klee gras und Reststoffen. 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, 17. - 20. März 2015
- THAPA, S.; RUDD, J. C.; XUE, Q.; BHANDARI, M.; REDDY, S. K.; JESSUP, K. E.; LIU, S.; DEVKOTA, R. N.; BAKER, J.; BAKER, S.; 2019: Use of NDVI for characterizing winter wheat response to water stress in a semi-arid environment. Journal of Crop Improvement
- TILLMANN, P. & BAETZEL, R.; 2010: Entwicklung von NIRS-Kalibrierungen an getrocknetem Material und Umsetzung der NIRS Untersuchungen unter praktischen Bedingungen. Abschlussbericht des Verbundvorhabens „Bewertung nachwachsender Rohstoffe zur Biogaserzeugung für die Pflanzenzüchtung“ Teilprojekt IV, FNR-FKZ: 22001906
- URBATZKA, P.; REHM, A.; SALZEDER, G.; 2016: Bestimmung der Vorfruchtwirkung verschiedener Erbsentypen unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus. Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften 28, 238 – 239
- VALASKOVA, V.; SNAJDR, J.; BITTNER, B., CAJTHAML, T.; MERHAUTOVA, V.; HOFRICHTER, M.; BALDRIAN, P.; 2007: Production of lignocellulose-degrading enzymes and degradation of leaf litter by saprotrophic basidiomycetes isolated from a *Quercus petraea* forest. Soil Biology & Biochemistry 39, 2651 – 2660
- VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A.; 1991: Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. Journal of Dairy Science Vol. 74, No. 10, 3583 – 3597
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2006: Guideline VDI 4630 – Fermentation of Organic Materials Characterisation of the Substrate, Sampling, Collection of Material Data, Fermentation Tests. Beuth-Verlag GmbH, Düsseldorf
- VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN E.V. (VDLUFA) 1993: Methodenbuch III: Futtermitteluntersuchung, Rohprotein 4.1.1. Darmstadt, VDLUFA-Verlag
- VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN E.V. (VDLUFA) 2012: Methodenbuch III: Futtermittelbestimmung aNDF, 6.5.1, ADF, 6.5.2, ADL, 6.5.3. Darmstadt, VDLUFA-Verlag
- VÖLLER, K. & REINHOLZ, T.; 2019: dena ANALYSE Branchenbarometer Biomethan 2019. Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.)
- WADHWA, M. & BAKSHI, M. P. S.; 2005: Vegetable wastes – a potential source of nutrients for ruminants. Indian Journal of Animal Nutrition, Volume 22, Issue 2, 70 – 76
- WALLA, C. & SCHNEEBERGER, W.; 2006: Energieproduktion in viehlosen Betrieben. Berichte über Landwirtschaft, Band 84 (3), 425 – 437

- WAMATU, J.; ALKHTIB, A.; ABATE, D.; KEMAL, S. A.; RISCHKOWSKY, B.; 2017: Nutritive value of field pea (*Pisum sativum* L.) straw as influenced by variety, season, botanical fractions and urea pretreatment. *Animal Feed Science and Technology*, 225, 54 – 61
- WEGI, T.; TOLERA, A.; WAMATU, J.; ANIMUT, G.; RISCHKOWSKY, B.; 2018: Effects of feeding different varieties of faba bean (*Vicia faba* L.) straws with concentrate supplement on feed intake, digestability, body weight gain and carcass characteristics of Arsi-Bale sheep. *Asian-Australasian Journal of Animal Science*, 31, No. 8: 1221 – 1229
- WEILAND, P.; 2001: Grundlagen der Methanvergärung – Biologie und Substrate. VDI-Berichte Nr. 1620, 19 - 32
- WEIßBACH, F.; 2008. Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. *Landtechnik* 63 (6), 356 – 358
- WEIßBACH, F.; 2009a. Die Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen für die Biogasgewinnung. Teil I: Das Gasbildungspotenzial der fermentierbaren Nährstoffe. *Pflanzenbauwissenschaften* 13 (2), 72 – 85
- WEIßBACH, F.; 2009b. Ausnutzungsgrad von Nawaros bei der Biogasgewinnung. *Landtechnik* 64 (1), 18 – 21
- WEIßBACH, F. & STRUBELT, C.; 2008a. Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Maissilagen als Substrat für Biogasanlagen. *Landtechnik* 63 (2), S. 2 – 4
- WEIßBACH, F. & STRUBELT, C.; 2008b. Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Grassilagen als Substrat für Biogasanlagen. *Landtechnik* 63 (4), S. 210 – 211a
- WEIßBACH, F. & STRUBELT, C.; 2008c. Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Zuckerrübensilagen als Substrat für Biogasanlagen. *Landtechnik* 63 (6), S. 354 – 355a
- WEINRICH, S.; PATERSON, M.; ROTH, U.; 2020: Leitfaden zur Substrat- und Effizienzbewertung an Biogasanlagen. DBFZ Report Nr. 35, 68 S.
- WESTERSCHULTE, M.; 2013: Einsatz von Reflexionssensoren zur Beschreibung von Pflanzenzuständen in Feldversuchen am Beispiel der Sommergerste (*Hordeum vulgare* L.). Masterarbeit, Fachbereich Agrarwirtschaft, Fachhochschule Südwestfalen, Standort Soest
- WIEGAND, S.; 2013: Qualitätsbestimmende Merkmale von perennierenden Gräser-Leguminosen-Mischungen und Zwischenfrüchten für optimierte Biogaserträge. Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotrophologie und Umweltmanagement, Justus-Liebig-Universität Gießen, Gießen
- WRIGHT, D. L.; RASMUSSEN, V. P.; RAMSEY, R. D.; 2005: Comparing the Use of Remote Sensing with Traditional Techniques to Detect Nitrogen Stress in Wheat. *Geocarto International*, Vol. 20, No. 1, 63 – 68

- WULF, S. & DÖHLER, H.; 2009: Messung von Biogaserträgen – Methoden und Übertragbarkeit auf Praxisanlagen. In: Optimierung des Futterwertes von Mais und Maisprodukten, Schwarz, F. J.; Meyer, U. (Hrsg.) Sonderheft 331, S. 75 – 86
- ZERHUSEN-BLECHER, P; KRAMPS-ALPMANN, D.; ROHN, S.; BRAUN, J.; SCHÄFER, B. C.; 2016: LeguAN – Innovative und ganzheitliche Wertschöpfungskonzepte für funktionelle Lebens- und Futtermittel aus heimischen Körnerleguminosen vom Anbau bis zur Nutzung (Arbeitspakete 2 und 7). Forschungsberichte des Fachbereichs Agrarwirtschaft Soest, Nr. 41.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Pude dafür, dass er es mir ermöglicht hat, als externe Doktorandin an der Universität Bonn zu promovieren und sich immer die Zeit genommen hat, Fragen ausführlich mit mir zu diskutieren.

Außerdem möchte ich mich bei Prof. Dr. Schäfer für die Überlassung des Projekts, die gute Betreuung vor Ort und seine stete Unterstützung sowie Anregungen speziell in der Schlussphase des Schreibens bedanken. Ebenso möchte ich Prof. Dr. Laser für die Übernahme des Projekts und die interessanten Diskussionen danken.

Mein größter Dank gilt Dr. Franz-Ferdinand Gröblinghoff für seine Hilfe bei der statistischen Auswertung des Versuchs, seine stets kritische Prüfung meiner Arbeits- und Vorgehensweise, seine Hilfe bei der Umsetzung des Projekts sowie seine persönliche Unterstützung in allen Höhen und Tiefen einer Doktorandenzeit. Seine Hilfe hat maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen und Freunden für ihre Unterstützung in zahlreichen Stunden auf dem Versuchsgut Merklingsen und im Feld und außerdem ganz besonders für die persönliche Unterstützung bedanken. Katrin, Jonas, Doro, Dirk, Albrecht, Ina und ganz besonders Carmen und Franz, ohne Euch hätte ich niemals alle Proben bearbeiten können und hätte nicht bis zum Ende durchgehalten! Für die Hilfe und fachliche Unterstützung bei den Laboranalysen danke ich Ira und Eileen.

Bei den Mitarbeitern des Versuchsguts Merklingsen möchte ich mich für die stets freundliche, große Unterstützung in allen Belangen bedanken. Ganz besonders bei Herrn Günter Stemann, der mir immer bei allen Fragen und Problemen zu praxisnahen Lösungen verhelfen konnte.

Außerdem gilt mein Dank meinen studentischen Hilfskräften Arthur, Simon, Simone und Luciana, die fleißig und ohne sich zu beklagen bei allen Arbeiten tatkräftig mitgewirkt haben.

Zum Schluss möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die immer bereit war, mich bei allen Arbeiten ohne zu zögern zu unterstützen.

Anhang

Abbildungsverzeichnis des Anhangs

Abbildung A1: Kleinparzellendesign der Versuche am Standort Soester Börde... 171

Tabellenverzeichnis des Anhangs

Tabelle A1:	Erträge und TM-Gehalte von Stroh und Korn der Erbsen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.	153
Tabelle A2:	Einfluss von Jahr, Standort und Erntetermin auf den Strohertrag (dt TM/ha) der Erbsen (Mittel über Sorten).....	153
Tabelle A3:	Einfluss von Jahr und Sorte auf den Strohertrag (dt TM/ha) der Erbsen (Mittel über Standorte und Erntetermine).....	153
Tabelle A4:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Kornertrag (dt/ha) der Erbsen, bezogen auf 14% Feuchte.....	154
Tabelle A5:	Einfluss von Jahr, Standort und Sorte auf die TM-Gehalte (%) bei Stroh und Korn der Erbse (Mittel über Erntetermine).	154
Tabelle A6:	Einfluss von Jahr und Erntetermin auf die TM-Gehalte (%) von Stroh und Korn der Erbse (Mittel über Sorten und Standorte).....	154
Tabelle A7:	Einfluss von Sorte und Erntetermin auf die TM-Gehalte (%) des Erbsenkorns (Mittel über Standorte und Jahre).....	155
Tabelle A8:	Erträge und TM-Gehalte von Stroh und Korn der Ackerbohnen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.	155
Tabelle A9:	Einfluss von Jahr, Standort und Erntetermin auf den Strohertrag (dt TM/ha) der Ackerbohnen (Mittel über Sorten).....	155
Tabelle A10:	Einfluss von Jahr und Sorte auf den Strohertrag (dt TM/ha) der Ackerbohnen (Mittel über Standorte und Erntetermine).	156
Tabelle A11:	Einfluss von Erntetermin und Standort sowie Erntetermin und Jahr auf den Kornertrag (dt/ha) der Ackerbohnen, bezogen auf 14% Feuchte (Mittel über Sorten und Jahre bzw. Sorten und Standorte).	156
Tabelle A12:	Einfluss von Standort und Jahr sowie Standort und Sorte auf den Kornertrag (dt/ha) der Ackerbohnen, bezogen auf 14% Feuchte (Mittel über Sorten und Erntetermine bzw. Erntetermine und Jahre).	156
Tabelle A13:	Einfluss von Erntetermin und Standort sowie Erntetermin und Jahr auf den TM-Gehalt (%) des Ackerbohlenstrohs (Mittel über Sorten und Jahre bzw. Sorten und Standorte).	156
Tabelle A14:	Einfluss von Jahr und Standort sowie Jahr und Sorte auf den TM-Gehalt (%) des Ackerbohlenstrohs (Mittel über Sorten und Erntetermine bzw. Erntetermine und Standorte).	157

Tabelle A15:	Einfluss von Jahr, Standort und Erntetermin auf den TM-Gehalt (%) des Ackerbohnenkorns (Mittel über Sorten).	157
Tabelle A16:	Einfluss von Sorte und Erntetermin auf den TM-Gehalt (%) des Ackerbohnenkorns (Mittel über Standorte und Jahre).	157
Tabelle A17:	Inhaltsstoffe des Erbsenstrohs (% in TM), unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.	158
Tabelle A18:	Einfluss von Jahr, Standort und Sorte auf Rohprotein- (% in TM), Hemizellulose- (% in TM) und Zellulosegehalt (% in TM) des Erbsenstrohs (Mittel über Erntetermine).	158
Tabelle A19:	Einfluss von Standort, Sorte und Erntetermin auf den Hemizellulosegehalt (% in TM) des Erbsenstrohs (Mittel über Jahre).	159
Tabelle A20:	Einfluss von Erntetermin und Jahr auf Hemizellulose- (% in TM) und Zellulosegehalt (% in TM) des Erbsenstrohs (Mittel über Sorten und Standorte).	159
Tabelle A21:	Einfluss von Erntetermin und Standort sowie Erntetermin und Jahr auf den Rohaschegehalt (% in TM) des Erbsenstrohs (Mittel über Sorten und Standorte, bzw. Jahre).	159
Tabelle A22:	Einfluss von Jahr und Standort auf den Rohaschegehalt (% in TM) des Erbsenstrohs (Mittel über Sorten und Erntetermine).	159
Tabelle A23:	Inhaltsstoffe der Erbsenstrohsilagen (% in TM), unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.	160
Tabelle A24:	Einfluss von Erntetermin, Jahr und Standort auf Rohprotein- (% in TM) und Hemizellulosegehalt (% in TM) der Erbsenstrohsilagen (Mittel über Sorten).	160
Tabelle A25:	Einfluss von Erntetermin, Standort und Sorte sowie Jahr, Standort und Sorte auf den Rohproteingehalt (% in TM) der Erbsenstrohsilagen (Mittel über Jahre bzw. Erntetermine).	161
Tabelle A26:	Einfluss des Jahres und der Sorte auf den Hemizellulosegehalt (% in TM) der Erbsenstrohsilagen (Mittel über Standorte und Erntetermine).	161
Tabelle A27:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Ligningehalt (% in TM) der Erbsenstrohsilagen.	161
Tabelle A28:	Einfluss von Jahr und Erntetermin auf den Rohaschegehalt (% in TM) der Erbsenstrohsilagen (Mittel über Standorte und Sorten).	162
Tabelle A29:	Inhaltsstoffe des Ackerbohnenstrohs (% in TM), unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.	162
Tabelle A30:	Einfluss von Erntetermin, Jahr und Standort auf den Rohprotein- (% in TM) Hemizellulose- (% in TM) und Zellulosegehalt (% in TM) des Ackerbohnenstrohs (Mittel über Sorten).	163

Tabelle A31:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Ligningehalt (% in TM) des Ackerbohlenstrohs.....	163
Tabelle A32:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohaschegehalt (% in TM) des Ackerbohlenstrohs.	164
Tabelle A33:	Inhaltsstoffe der Ackerbohlenstrohsilagen (% in TM), unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.	164
Tabelle A34:	Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf Hemizellulose- (% in TM) und Zellulosegehalt (% in TM) der Ackerbohlenstrohsilagen.....	165
Tabelle A35:	Einfluss von Erntetermin, Jahr und Standort auf Rohprotein- (% in TM) und Ligningehalt (% in TM) der Ackerbohlenstrohsilagen (Mittel über Sorten).	166
Tabelle A36:	Einfluss von Standort und Sorte auf den Ligningehalt (% in TM) von Ackerbohlenstrohsilagen (Mittel über Jahre und Erntetermine).	166
Tabelle A37:	Einfluss von Jahr und Standort auf den Rohaschegehalt (% in TM) der Ackerbohlenstrohsilagen (Mittel über Sorten und Erntetermine).	166
Tabelle A38:	Theoretische Gasausbeuten (l/kg TM) des Erbsenstrohs und der Erbsenstrohsilagen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.	167
Tabelle A39:	Einfluss von Jahr, Standort und Erntetermin auf die theoretischen Gasausbeuten (l/kg TM) des Erbsenstrohs (Mittel über die Sorten).....	167
Tabelle A40:	Einfluss von Jahr, Standort und Erntetermin auf die theoretischen Gasausbeuten (l/kg TM) der Erbsenstrohsilagen (Mittel über die Sorten).	168
Tabelle A41:	Theoretische Gasausbeuten (l/kg TM) des Ackerbohlenstrohs und der Ackerbohlenstrohsilagen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten. ...	168
Tabelle A42:	Einfluss von Jahr, Standort und Erntetermin auf die theoretischen Gasausbeuten (l/kg TM) des Ackerbohlenstrohs (Mittel über die Sorten).	169
Tabelle A43:	Einfluss von Jahr, Sorte und Erntetermin auf die theoretischen Gasausbeuten (l/kg TM) des Ackerbohlenstrohs (Mittel über die Standorte).	169
Tabelle A44:	Einfluss von Standort und Erntetermin, bzw. Standort und Jahr auf die theoretischen Gasausbeuten (l/kg TM) der Ackerbohlenstrohsilagen (Mittel über Sorte und Jahr bzw. Sorte und Erntetermin).....	170
Tabelle A45:	Einfluss von Jahr, Vorfrucht und Zeitpunkt, bzw. Jahr, Vorfrucht und Standort auf die N _{min} Ergebnisse (kg N/ha) unter Winterweizen in 0–90 cm Tiefe (Mittel über Strohbergung und Standorte, bzw. Strohbergung und Zeitpunkt).	172

Tabelle A46:	Einfluss von Strohabfuhr und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Erbse 2018 (Mittel über Dünge­stufen)....	172
Tabelle A47:	Einfluss von N-Düngung und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Erbse 2018 (Mittel über Strohbergung). .	173
Tabelle A48:	Einfluss von Strohabfuhr und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne 2018 (Mittel über Dünge­stufen).....	174
Tabelle A49:	Einfluss von N-Düngung und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne 2018 (Mittel über Strohbergung).	175
Tabelle A50:	Einfluss von Strohabfuhr und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Erbse 2019 (Mittel über Dünge­stufen)....	176
Tabelle A51:	Einfluss von N-Düngung und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Erbse 2019 (Mittel über Strohbergung). .	177
Tabelle A52:	Einfluss von Strohabfuhr und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne 2019 (Mittel über Dünge­stufen).....	178
Tabelle A53:	Einfluss von N-Düngung und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne 2019 (Mittel über Strohbergung).	179
Tabelle A54:	Einfluss von Standort und Dünge­stufe bzw. Standort und Jahr auf die Weizen­erträge (dt/ha, bei 14% Feuchte) nach Vorfrucht Erbse (Mittel über Strohbergung und Jahre bzw. Strohbergung und Dünge­stufen).....	180
Tabelle A55:	Einfluss von Jahr, Dünge­stufe und Standort auf die Weizen­erträge (dt/ha, bei 14% Feuchte) nach Vorfrucht Ackerbohne (Mittel über die Strohbergung).....	180
Tabelle A56:	Einfluss von Dünge­stufe und Standort, Dünge­stufe und Jahr sowie Jahr und Standort auf die Tausend­korn­masse (g) des Weizens nach Vorfrucht Erbse (Mittel über Strohbergung und Jahre, bzw. Standort, bzw. Dünge­stufen).....	181
Tabelle A57:	Einfluss von Jahr, Dünge­stufe und Standort auf die Tausend­korn­masse (g) des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne (Mittel die Strohbergung).....	181
Tabelle A58:	Einfluss der Strohbergung auf den Roh­proteingehalt (%) des Weizens nach Vorfrucht Erbse (Mittel über Jahr, Standort und Dünge­stufe).....	182
Tabelle A59:	Einfluss von Jahr, Dünge­stufe und Standort auf den Roh­proteingehalt (%) des Weizens nach Vorfrucht Erbse (Mittel über die Strohbergung).	182
Tabelle A60:	Einfluss von Jahr, Dünge­stufe und Standort auf den Roh­proteingehalt (%) des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne (Mittel über die Strohbergung).....	182

Ernteterminversuche**Feldversuche**

Tabelle A1: Erträge und TM-Gehalte von Stroh und Korn der Erbsen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.

	Strohertrag	Kornertrag	TM Stroh	TM Korn
Jahre				
2017	52,08 ^b	49,58 ^b	68,53 ^b	78,48 ^b
2018	45,47 ^a	44,60 ^a	54,72 ^a	70,39 ^a
Standort				
Ostwestfalen-Lippe	44,44 ^a	42,56 ^a	58,45 ^a	71,36 ^a
Soester Börde	54,64 ^b	53,02 ^b	66,81 ^b	78,92 ^b
Erntetermine				
frühe Druschreife	52,76 ^b	44,93 ^a	48,75 ^a	67,17 ^a
zur Druschreife	47,04 ^a	47,02 ^b	56,91 ^b	73,92 ^b
Totreife	47,43 ^a	49,99 ^c	81,10 ^c	83,31 ^c
Sorten				
Navarro	47,00 ^a	47,11	60,27 ^a	75,28 ^{ab}
Respect	53,33 ^b	47,75	61,09 ^a	75,56 ^b
Astronauta	47,96 ^a	47,19	65,11 ^b	73,75 ^a
Gesamt	49,08	47,31	62,25	74,80

Angaben in dt TM/ha für Strohertrag, dt/ha bei 14% Feuchte für Kornertrag und in % für TM-Gehalte.

Tabelle A2: Einfluss von Jahr, Standort und Erntetermin auf den Strohertrag (dt TM/ha) der Erbsen (Mittel über Sorten).

Jahr	Standort	Erntetermin		
		frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	47,44	45,68	35,49
	Soester Börde	59,69	49,50	74,70
2018	Ostwestfalen-Lippe	53,70	43,69	40,65
	Soester Börde	48,93*	50,44*	34,61*
Grenzdifferenz 5%			5,46	

*=Sorte Respect am Standort Soester Börde nur in 2017 erfasst

Tabelle A3: Einfluss von Jahr und Sorte auf den Strohertrag (dt TM/ha) der Erbsen (Mittel über Standorte und Erntetermine).

Sorte	Jahr	
	2017	2018
Navarro	50,67	43,34
Respect	56,88	46,24*
Astronauta	48,70	47,23
Grenzdifferenz 5%:	3,86	

*=Sorte Respect nur am Standort Ostwestfalen-Lippe erfasst

Tabelle A4: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Kornertrag (dt/ha) der Erbsen, bezogen auf 14% Feuchte.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
			frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	Navarro	44,87	46,75	47,41
		Respect	46,35	45,69	42,38
		Astronaut	49,30	45,10	49,23
	Soester Börde	Navarro	49,18	52,50	55,58
		Respect	60,06	58,55	57,37
		Astronaut	46,97	50,05	45,10
2018	Ostwestfalen-Lippe	Navarro	32,56	40,41	44,28
		Respect	34,22	39,26	45,90
		Astronaut	28,34	36,58	47,54
	Soester Börde	Navarro	46,47	49,13	56,15
		Respect	46,47	49,13	56,15
		Astronaut	55,90	53,23	59,00
Grenzdifferenz 5%:			3,00		

Tabelle A5: Einfluss von Jahr, Standort und Sorte auf die TM-Gehalte (%) bei Stroh und Korn der Erbse (Mittel über Erntetermine).

Jahr	Standort	Sorte	TM-Gehalt Stroh	TM-Gehalt Korn
2017	Ostwestfalen-Lippe	Navarro	62,17	76,94
		Respect	58,75	78,00
		Astronaut	69,95	76,42
	Soester Börde	Navarro	73,99	80,17
		Respect	70,33	81,13
		Astronaut	75,99	78,20
2018	Ostwestfalen-Lippe	Navarro	54,20	67,43
		Respect	54,19	67,55
		Astronaut	51,45	61,83
	Soester Börde	Navarro	50,70	76,57
		Respect	50,70	76,57
		Astronaut	63,06	78,55
Grenzdifferenz 5%:			6,29	3,44

Tabelle A6: Einfluss von Jahr und Erntetermin auf die TM-Gehalte (%) von Stroh und Korn der Erbse (Mittel über Sorten und Standorte).

Jahr	Erntetermin	TM-Gehalt Stroh	TM-Gehalt Korn
2017	frühe Druschreife	55,58	73,25
	zur Druschreife	66,59	79,61
	Totreife	83,42	82,57
2018	frühe Druschreife	40,57*	59,87*
	zur Druschreife	45,28*	67,09*
	Totreife	78,31*	84,19*
Grenzdifferenz 5%:		4,45	2,43

*=ohne die Sorte Respect am Standort Soester Börde

Tabelle A7: Einfluss von Sorte und Erntetermin auf die TM-Gehalte (%) des Erbsenkorns (Mittel über Standorte und Jahre).

Sorte	Erntetermin		
	frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
Navarro	68,8	73,6	83,5
Respect	69,6*	74,7*	82,4*
Astronaut	63,7	73,7	83,9
Grenzdifferenz 5%:	2,98		

*=Sorte Respect am Standort Soester Börde nur in 2017 erfasst

Tabelle A8: Erträge und TM-Gehalte von Stroh und Korn der Ackerbohnen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.

	Strohertrag	Kornertrag	TM Stroh	TM Korn
Jahre				
2017	37,52	49,23 ^b	55,99 ^a	79,13 ^a
2018	38,25	39,12 ^a	65,74 ^b	82,95 ^b
Standort				
Ostwestfalen-Lippe	35,49 ^a	37,75 ^a	60,40	77,91 ^a
Soester Börde	40,31 ^b	50,61 ^b	61,38	84,22 ^b
Erntetermine				
frühe Druschreife	47,28 ^d	43,16 ^a	41,92 ^a	72,08 ^a
zur Druschreife	36,55 ^c	43,09 ^a	54,71 ^b	81,86 ^b
späte Druschreife	35,48 ^b	46,69 ^b	66,42 ^c	83,85 ^c
Totreife	32,13 ^a	43,65 ^a	80,91 ^d	86,53 ^d
Sorten				
Fuego	39,45 ^b	44,78 ^b	61,91 ^b	81,14 ^{ab}
Tiffany	40,00 ^b	45,73 ^b	59,11 ^a	81,46 ^b
Taifun	34,16 ^a	41,90 ^a	61,66 ^b	80,54 ^a
Gesamt	37,89	44,15	60,89	81,05

Angaben in dt TM/ha für Strohertrag, dt/ha bei 14% Feuchte für Kornertrag und in % für TM-Gehalte.

Tabelle A9: Einfluss von Jahr, Standort und Erntetermin auf den Strohertrag (dt TM/ha) der Ackerbohnen (Mittel über Sorten).

Jahr	Standort	Erntetermin			Totreife
		frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
2017	Ostwestfalen-Lippe	47,39	44,31	41,66	31,22
	Soester Börde	47,48	30,32	29,65	27,31
2018	Ostwestfalen-Lippe	34,00	32,57	26,36	26,41
	Soester Börde	60,26	38,99	44,26	43,16
Grenzdifferenz 5%		3,31			

Tabelle A10: Einfluss von Jahr und Sorte auf den Strohertrag (dt TM/ha) der Ackerbohnen (Mittel über Standorte und Erntetermine).

Sorte	Jahr	
	2017	2018
Fuego	39,95	38,94
Tiffany	38,19	41,82
Taifun	34,33	33,99
Grenzdifferenz 5%:	2,03	

Tabelle A11: Einfluss von Erntetermin und Standort sowie Erntetermin und Jahr auf den Kornertrag (dt/ha) der Ackerbohnen, bezogen auf 14% Feuchte (Mittel über Sorten und Jahre bzw. Sorten und Standorte).

Erntetermin	Standort		Jahr	
	Ostwestfalen-Lippe	Soester Börde	2017	2018
frühe Druschreife	34,06	52,26	47,65	38,67
zur Druschreife	37,08	49,10	48,82	37,36
späte Druschreife	42,19	51,19	53,86	39,52
Totreife	37,68	49,88	46,49	40,92
Grenzdifferenz 5%:	2,35		2,35	

Tabelle A12: Einfluss von Standort und Jahr sowie Standort und Sorte auf den Kornertrag (dt/ha) der Ackerbohnen, bezogen auf 14% Feuchte (Mittel über Sorten und Erntetermine bzw. Erntetermine und Jahre).

Standort	Jahr		Sorte		
	2017	2018	Fuego	Tiffany	Taifun
Ostwestfalen-Lippe	50,98	24,52	39,23	37,67	36,36
Soester Börde	47,45	53,71	50,34	53,80	47,61
Grenzdifferenz 5%:	1,66		2,03		

Tabelle A13: Einfluss von Erntetermin und Standort sowie Erntetermin und Jahr auf den TM-Gehalt (%) des Ackerbohnenstrohs (Mittel über Sorten und Jahre bzw. Sorten und Standorte).

Erntetermin	Standort		Jahr	
	Ostwestfalen-Lippe	Soester Börde	2017	2018
frühe Druschreife	36,71	47,14	36,75	47,10
zur Druschreife	52,40	57,02	48,30	61,13
späte Druschreife	69,06	63,78	60,14	72,69
Totreife	83,42	78,30	79,75	82,03
Grenzdifferenz 5%:	3,02		3,02	

Tabelle A14: Einfluss von Jahr und Standort sowie Jahr und Sorte auf den TM-Gehalt (%) des Ackerbohnenstrohs (Mittel über Sorten und Erntetermine bzw. Erntetermine und Standorte).

Jahr	Standort		Sorte		
	Ostwestfalen-Lippe	Soester Börde	Fuego	Tiffany	Taifun
2017	56,58	55,38	58,62	54,37	54,93
2018	64,21	67,26	65,20	63,84	68,18
Grenzdifferenz 5%:	2,14		2,62		

Tabelle A15: Einfluss von Jahr, Standort und Erntetermin auf den TM-Gehalt (%) des Ackerbohnenkorns (Mittel über Sorten).

Jahr	Standort	Erntetermin			Totreife
		frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
2017	Ostwestfalen-Lippe	59,48	78,46	80,76	83,38
	Soester Börde	81,20	83,27	81,62	85,39
2018	Ostwestfalen-Lippe	67,03	79,76	85,63	88,79
	Soester Börde	80,63	85,95	87,40	88,45
Grenzdifferenz 5%		1,39			

Tabelle A16: Einfluss von Sorte und Erntetermin auf den TM-Gehalt (%) des Ackerbohnenkorns (Mittel über Standorte und Jahre).

Sorte	Erntetermin			Totreife
	frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
Fuego	72,48	81,66	83,86	86,56
Tiffany	73,42	82,02	83,95	86,46
Taifun	70,35	81,90	83,75	86,56
Grenzdifferenz 5%:	1,21			

Laboranalysen

Tabelle A17: Inhaltsstoffe des Erbsenstrohs (% in TM), unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.

	XA	XP	H	Z	L
Jahre					
2017	8,3 ^a	6,70 ^b	17,71 ^b	42,40 ^b	11,43 ^b
2018	9,2 ^b	6,34 ^a	16,56 ^a	35,48 ^a	7,96 ^a
Standort					
Ostwestfalen-Lippe	8,6	6,01 ^a	16,71 ^a	38,81	9,19 ^a
Soester Börde	8,9	7,18 ^b	17,77 ^b	39,79	10,65 ^b
Erntetermine					
frühe Druschreife	10,0 ^c	7,17 ^c	16,23 ^a	36,21 ^a	8,94 ^a
zur Druschreife	8,9 ^b	6,78 ^b	17,16 ^b	38,01 ^b	9,32 ^b
Totreife	7,2 ^a	5,67 ^a	18,18 ^c	43,55 ^c	11,29 ^c
Sorten					
<i>Navarro</i>	9,3 ^b	6,72 ^b	17,23 ^b	38,75	9,56
<i>Respect</i>	7,3 ^a	6,00 ^a	17,44 ^{bc}	40,15	10,31
<i>Astronaut</i>	9,2 ^b	6,76 ^b	16,97 ^a	39,09	9,79
Gesamt	10,4	6,54	17,19	39,26	9,85

XA=Rohasche, XP=Rohprotein, H=Hemizellulose, Z=Zellulose, L=Lignin

Tabelle A18: Einfluss von Jahr, Standort und Sorte auf Rohprotein- (% in TM), Hemizellulose- (% in TM) und Zellulosegehalt (% in TM) des Erbsenstrohs (Mittel über Erntetermine).

Jahr	Standort	Sorte	Rohprotein	Hemizellulose	Zellulose
2017	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	6,47	17,11	41,65
		<i>Respect</i>	5,88	17,60	42,47
		<i>Astronaut</i>	5,98	17,07	43,11
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	7,40	18,04	42,28
		<i>Respect</i>	6,61	18,73	42,57
		<i>Astronaut</i>	7,89	17,73	42,33
2018	Ostwestfalen-Lippe	<i>Navarro</i>	5,82	16,74	35,76
		<i>Respect</i>	5,53	15,98	35,42
		<i>Astronaut</i>	6,37	15,73	34,48
	Soester Börde	<i>Navarro</i>	7,18	17,02	35,33
		<i>Respect</i>	*	*	*
		<i>Astronaut</i>	6,81	17,34	36,43
Grenzdifferenz 5%:			0,65	0,48	1,62

*=Sorte *Respect* am Standort Soester Börde nur in 2017 erfasst

Tabelle A19: Einfluss von Standort, Sorte und Erntetermin auf den Hemizellulosegehalt (% in TM) des Erbsenstrohs (Mittel über Jahre).

Standort	Sorte	Erntetermin		
		frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
Ostwestfalen-Lippe	Navarro	16,45	16,74	17,59
	Respect	15,51	16,75	18,11
	Astronaute	14,97	16,34	17,88
Soester Börde	Navarro	16,50	17,62	18,47
	Respect	17,82*	18,70*	19,67*
	Astronaute	16,91	17,59	18,11
Grenzdifferenz 5%:		0,59		

*=Sorte Respect am Standort Soester Börde nur in 2017 erfasst

Tabelle A20: Einfluss von Erntetermin und Jahr auf Hemizellulose- (% in TM) und Zellulosegehalt (% in TM) des Erbsenstrohs (Mittel über Sorten und Standorte).

Erntetermin	Jahr	Hemizellulose	Zellulose
frühe Druschreife	2017	16,81	39,25
	2018	15,54*	32,56*
zur Druschreife	2017	17,92	41,85
	2018	16,26*	33,40*
Totreife	2017	18,42	46,10
	2018	17,90*	40,49*
Grenzdifferenz 5%:		0,34	1,14

*=Sorte Respect am Standort Soester Börde nur in 2017 erfasst

Tabelle A21: Einfluss von Erntetermin und Standort sowie Erntetermin und Jahr auf den Rohaschegehalt (% in TM) des Erbsenstrohs (Mittel über Sorten und Standorte, bzw. Jahre).

Erntetermin	Standort		Jahr	
	Ostwestfalen-Lippe	Soester Börde	2017	2018
frühe Druschreife	9,21	11,05*	10,93	8,99*
zur Druschreife	8,71	9,16*	8,21	9,76*
Totreife	7,79	6,51*	5,86	8,84*
Grenzdifferenz 5%:		0,59	0,59	

*=Sorte Respect am Standort Soester Börde nur in 2017 erfasst

Tabelle A22: Einfluss von Jahr und Standort auf den Rohaschegehalt (% in TM) des Erbsenstrohs (Mittel über Sorten und Erntetermine).

Jahr	Standort	
	Ostwestfalen-Lippe	Soester Börde
2017	8,44	8,22
2018	8,70	9,93*
Grenzdifferenz 5%:		0,48

*=Sorte Respect am Standort Soester Börde nur in 2017 erfasst

Tabelle A23: Inhaltsstoffe der Erbsenstrohsilagen (% in TM), unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.

	XA	XP	H	Z	L
Jahre					
2017	10,5	6,93 ^a	15,76 ^b	40,91 ^b	11,34 ^b
2018	10,3	7,69 ^b	14,67 ^a	35,58 ^a	7,98 ^a
Standort					
Ostwestfalen-Lippe	10,1	6,96 ^a	14,70 ^a	38,34	9,21 ^a
Soester Börde	10,8	7,64 ^b	15,94 ^b	38,66	10,53 ^b
Erntetermine					
frühe Druschreife	10,8	7,39	14,97 ^a	38,44	9,93 ^b
zur Druschreife	10,1	7,15	15,55 ^b	38,53	9,69 ^a
Sorten					
Navarro	11,2 ^b	7,26 ^b	15,08	38,30	9,62 ^a
Respect	9,1 ^a	6,97 ^a	15,50	39,05	10,33 ^b
Astronaut	10,7 ^b	7,52 ^b	15,26	38,25	9,61 ^a
Gesamt	8,7	7,27	15,26	38,49	9,81

XA=Rohasche, XP=Rohprotein, H=Hemizellulose, Z=Zellulose, L=Lignin

Tabelle A24: Einfluss von Erntetermin, Jahr und Standort auf Rohprotein- (% in TM) und Hemizellulosegehalt (% in TM) der Erbsenstrohsilagen (Mittel über Sorten).

Inhaltsstoff	Jahr	Standort	Erntetermin	
			frühe Druschreife	zur Druschreife
Rohprotein	2017	Ostwestfalen-Lippe	6,25	6,15
		Soester Börde	7,50	7,80
	2018	Ostwestfalen-Lippe	8,44	7,01
		Soester Börde	7,37*	7,89*
Grenzdifferenz 5%: Rohprotein			0,44	
Hemizellulose	2017	Ostwestfalen-Lippe	15,10	15,13
		Soester Börde	15,14	17,64
	2018	Ostwestfalen-Lippe	14,29	14,25
		Soester Börde	15,53*	14,99*
Grenzdifferenz 5%: Hemizellulose			0,56	

*=Sorte Respect am Standort Soester Börde nur in 2017 erfasst

Tabelle A25: Einfluss von Erntetermin, Standort und Sorte sowie Jahr, Standort und Sorte auf den Rohproteingehalt (% in TM) der Erbsenstrohsilagen (Mittel über Jahre bzw. Erntetermine).

Standort	Sorte	Erntetermin		Jahr	
		frühe Druschreife	zur Druschreife	2017	2018
Ostwestfalen-Lippe	Navarro	6,92	6,52	6,04	7,40
	Respect	6,96	6,46	6,18	7,23
	Astronaut	8,16	6,76	6,39	8,56
Soester Börde	Navarro	7,82	7,77	7,72	7,87
	Respect	7,13*	7,85*	7,49	*
	Astronaut	7,24	7,89	7,74	7,39
Grenzdifferenz 5%:		0,54		0,54	

*=Sorte Respect am Standort Soester Börde nur in 2017 erfasst

Tabelle A26: Einfluss des Jahres und der Sorte auf den Hemizellulosegehalt (% in TM) der Erbsenstrohsilagen (Mittel über Standorte und Erntetermine).

Sorte	Jahr	
	2017	2018
Navarro	15,21	14,96
Respect	16,03	14,43*
Astronaut	16,03	14,49
Grenzdifferenz 5%:		0,49

*=Sorte Respect am Standort Soester Börde nur in 2017 erfasst

Tabelle A27: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Ligningehalt (% in TM) der Erbsenstrohsilagen.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin	
			frühe Druschreife	zur Druschreife
2017	Ostwestfalen-Lippe	Navarro	10,41	10,68
		Respect	10,44	11,17
		Astronaut	10,52	11,24
	Soester Börde	Navarro	12,59	11,31
		Respect	12,56	11,92
		Astronaut	11,69	11,51
2018	Ostwestfalen-Lippe	Navarro	7,62	7,26
		Respect	8,12	7,79
		Astronaut	7,91	7,39
	Soester Börde	Navarro	8,49	8,63
		Respect	*	*
		Astronaut	8,91	7,69
Grenzdifferenz 5%:			0,63	

*=Sorte Respect am Standort Soester Börde nur in 2017 erfasst

Tabelle A28: Einfluss von Jahr und Erntetermin auf den Rohaschegehalt (% in TM) der Erbsenstrohsilagen (Mittel über Standorte und Sorten).

Erntetermin	Jahr	
	2017	2018
frühe Druschreife	11,50	9,97*
zur Druschreife	9,53	10,69*
Grenzdifferenz 5%:	1,34	

*=Sorte *Respect* am Standort Soester Börde nur in 2017 erfasst

Tabelle A29: Inhaltsstoffe des Ackerbohnenstrohs (% in TM), unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.

	XA	XP	H	Z	L
Jahre					
2017	7,5 ^a	6,75 ^b	16,87 ^b	41,59 ^b	10,60 ^b
2018	9,0 ^b	5,89 ^a	14,95 ^a	38,37 ^a	8,81 ^a
Standort					
Ostwestfalen-Lippe	7,7 ^a	6,70 ^b	15,73 ^a	39,80	9,41 ^a
Soester Börde	8,8 ^b	5,95 ^a	16,10 ^b	40,15	10,00 ^b
Erntetermine					
frühe Druschreife	8,9 ^a	6,86 ^c	15,58 ^a	37,87 ^a	9,09 ^a
zur Druschreife	8,8 ^{ab}	6,67 ^c	16,28 ^c	38,09 ^a	9,19 ^a
späte Druschreife	8,7 ^b	6,13 ^b	15,92 ^b	39,33 ^b	9,54 ^b
Totreife	6,6 ^a	5,61 ^a	15,87 ^{ab}	44,63 ^c	10,99 ^c
Sorten					
<i>Fuego</i>	8,1 ^a	6,71 ^b	15,82 ^a	39,35 ^a	10,09 ^c
<i>Tiffany</i>	8,1 ^a	6,10 ^a	15,77 ^a	40,70 ^b	9,73 ^b
<i>Taifun</i>	8,5 ^b	6,15 ^a	16,15 ^b	39,87 ^a	9,29 ^a
Gesamt	8,2	6,32	15,91	39,98	9,70

XA=Rohasche, XP=Rohprotein, H=Hemizellulose, Z=Zellulose, L=Lignin

Tabelle A30: Einfluss von Erntetermin, Jahr und Standort auf den Rohprotein- (% in TM) Hemizellulose- (% in TM) und Zellulosegehalt (% in TM) des Ackerbohlenstrohs (Mittel über Sorten).

Inh.	Jahr	Standort	Erntetermin			Totreife
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
Roh- protein	2017	Ostwestfalen-Lippe	8,75	7,07	6,68	5,19
		Soester Börde	6,45	6,89	6,84	6,16
	2018	Ostwestfalen-Lippe	6,45	7,46	5,79	6,19
		Soester Börde	5,80	5,26	5,23	4,93
Grenzdifferenz 5%: Rohprotein			0,57			
Hemi- zellulose	2017	Ostwestfalen-Lippe	15,49	17,93	16,36	16,49
		Soester Börde	17,13	17,79	17,23	16,58
	2018	Ostwestfalen-Lippe	14,85	14,54	15,10	15,07
		Soester Börde	14,85	14,86	15,00	15,33
Grenzdifferenz 5%: Hemizellulose			0,60			
Zellulose	2017	Ostwestfalen-Lippe	36,62	39,13	40,49	52,16
		Soester Börde	39,33	38,48	39,59	46,91
	2018	Ostwestfalen-Lippe	37,80	35,40	38,32	38,50
		Soester Börde	37,71	39,34	38,91	40,96
Grenzdifferenz 5%: Zellulose			1,83			

Inh.=Inhaltsstoff

Tabelle A31: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Ligningehalt (% in TM) des Ackerbohlenstrohs.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin			Totreife
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	8,91	10,32	10,30	14,00
		<i>Tiffany</i>	8,71	9,65	10,54	13,69
		<i>Taifun</i>	8,73	9,70	9,57	12,32
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	10,32	9,97	10,94	12,73
		<i>Tiffany</i>	9,76	9,68	10,38	12,92
		<i>Taifun</i>	9,02	9,84	10,20	12,12
2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	9,32	7,81	8,85	8,31
		<i>Tiffany</i>	8,28	7,65	8,32	8,50
		<i>Taifun</i>	8,42	7,90	7,80	8,26
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	9,62	9,82	9,70	10,59
		<i>Tiffany</i>	9,30	9,51	9,22	9,58
		<i>Taifun</i>	8,66	8,46	8,68	8,92
Grenzdifferenz 5%:			0,82			

Tabelle A32: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf den Rohaschegehalt (% in TM) des Ackerbohlenstrohs.

Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin			
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	Totreife
2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	8,67	8,64	7,96	4,32
		<i>Tiffany</i>	8,80	8,93	8,06	4,14
		<i>Taifun</i>	8,76	9,53	8,56	4,21
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	7,53	7,72	7,93	5,79
		<i>Tiffany</i>	7,84	7,11	9,23	4,72
		<i>Taifun</i>	9,13	7,90	9,32	4,45
2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	8,10	8,32	7,65	7,68
		<i>Tiffany</i>	8,04	8,15	7,70	7,19
		<i>Taifun</i>	8,07	8,40	7,99	7,62
	Soester Börde	<i>Fuego</i>	10,34	10,03	9,79	9,09
		<i>Tiffany</i>	10,96	9,74	9,77	9,74
		<i>Taifun</i>	11,17	10,60	10,24	10,35
Grenzdifferenz 5%:			0,77			

Tabelle A33: Inhaltsstoffe der Ackerbohlenstrohsilagen (% in TM), unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.

	XA	XP	H	Z	L
Jahre					
2017	9,3 ^a	8,27 ^b	14,06	38,69 ^b	10,01 ^b
2018	9,8 ^b	8,03 ^a	13,93	35,92 ^a	8,26 ^a
Standort					
Ostwestfalen-Lippe	9,2 ^a	8,70 ^b	13,83 ^a	36,83 ^a	8,82 ^a
Soester Börde	9,9 ^b	7,51 ^a	14,20 ^b	38,16 ^b	9,69 ^b
Erntetermine					
frühe Druschreife	9,9 ^c	8,95 ^c	13,73 ^a	37,23 ^b	9,27 ^b
zur Druschreife	9,5 ^b	8,32 ^b	13,61 ^a	36,38 ^a	8,87 ^a
späte Druschreife	9,0 ^a	6,89 ^a	14,88 ^b	39,11 ^c	9,61 ^c
Sorten					
<i>Fuego</i>	9,3 ^a	8,75 ^b	13,93 ^a	36,91 ^a	9,58 ^c
<i>Tiffany</i>	9,4 ^a	7,95 ^a	13,60 ^a	38,43 ^b	9,31 ^b
<i>Taifun</i>	9,9 ^b	7,78 ^a	14,47 ^b	36,96 ^a	8,76 ^a
Gesamt	9,5	8,16	14,00	37,44	9,21

XA=Rohasche, XP=Rohprotein, H=Hemizellulose, Z=Zellulose, L=Lignin

Tabelle A34: Einfluss von Jahr, Standort, Sorte und Erntetermin auf Hemizellulose- (% in TM) und Zellulosegehalt (% in TM) der Ackerbohnenstrohsilagen.

Inhaltsstoff	Jahr	Standort	Sorte	Erntetermin		
				frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife
Hemizellulose	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	13,03	12,97	15,35
			<i>Tiffany</i>	13,13	12,42	14,52
			<i>Taifun</i>	13,02	14,36	16,03
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	14,56	14,12	14,90
			<i>Tiffany</i>	13,74	13,67	13,89
			<i>Taifun</i>	14,35	14,19	14,88
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	13,27	12,84	14,62
			<i>Tiffany</i>	13,21	12,79	14,51
			<i>Taifun</i>	14,80	12,91	15,25
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	13,34	14,27	*
			<i>Tiffany</i>	14,05	13,72	*
			<i>Taifun</i>	14,24	15,12	*
Grenzdifferenz 5%: Hemizellulose				1,17		
Zellulose	2017	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	36,24	36,05	40,70
			<i>Tiffany</i>	38,89	37,99	41,71
			<i>Taifun</i>	37,26	38,43	38,89
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	39,22	38,54	40,79
			<i>Tiffany</i>	39,26	39,37	40,01
			<i>Taifun</i>	37,41	36,69	39,07
	2018	Ostwestfalen- Lippe	<i>Fuego</i>	34,46	30,79	36,86
			<i>Tiffany</i>	36,66	35,58	36,81
			<i>Taifun</i>	35,85	32,62	37,13
		Soester Börde	<i>Fuego</i>	36,56	35,83	*
			<i>Tiffany</i>	38,21	38,28	*
			<i>Taifun</i>	36,80	36,41	*
Grenzdifferenz 5%: Zellulose				1,28		

*=keine Silage, wegen erhöhter TM-Gehalte

Tabelle A35: Einfluss von Erntetermin, Jahr und Standort auf Rohprotein- (% in TM) und Ligningehalt (% in TM) der Ackerbohnenstrohsilagen (Mittel über Sorten).

Inhaltsstoff	Jahr	Standort	Erntetermin		
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife
Rohprotein	2017	Ostwestfalen-Lippe	10,50	8,94	6,82
		Soester Börde	8,00	7,98	7,37
	2018	Ostwestfalen-Lippe	9,51	9,93	6,50
		Soester Börde	7,80	6,42	*
Grenzdifferenz 5%: Rohprotein			0,67		
Lignin	2017	Ostwestfalen-Lippe	9,38	9,73	10,15
		Soester Börde	10,24	9,73	10,84
	2018	Ostwestfalen-Lippe	8,46	7,36	7,83
		Soester Börde	9,00	8,64	*
Grenzdifferenz 5%: Lignin			0,33		

*=keine Silage, wegen erhöhter TM-Gehalte

Tabelle A36: Einfluss von Standort und Sorte auf den Ligningehalt (% in TM) von Ackerbohnenstrohsilagen (Mittel über Jahre und Erntetermine).

Sorte	Standort	
	Ostwestfalen-Lippe	Soester Börde
<i>Fuego</i>	9,04	10,22*
<i>Tiffany</i>	9,02	9,65*
<i>Taifun</i>	8,39	9,20*
Grenzdifferenz 5%:		0,23

*=2018 zum Termin späte Druschreife keine Silage, wegen erhöhter TM-Gehalte

Tabelle A37: Einfluss von Jahr und Standort auf den Rohaschegehalt (% in TM) der Ackerbohnenstrohsilagen (Mittel über Sorten und Erntetermine).

Jahr	Standort	
	Ostwestfalen-Lippe	Soester Börde
2017	9,54	9,07
2018	8,86	11,12*
Grenzdifferenz 5%:		0,43

*=2018 zum Termin späte Druschreife keine Silage, wegen erhöhter TM-Gehalte

Theoretische Gasausbeuten

Tabelle A38: Theoretische Gasausbeuten (l/kg TM) des Erbsenstrohs und der Erbsenstrohsilagen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.

	Stroh		Strohsilage	
	Biogas	Methan	Biogas	Methan
Jahre				
2017	525,3 ^a	265,0 ^a	504,8 ^a	254,2 ^a
2018	547,1 ^b	274,0 ^b	529,7 ^b	265,6 ^b
Standort				
Ostwestfalen-Lippe	542,6 ^b	272,8 ^b	523,2 ^b	263,0 ^b
Soester Börde	526,4 ^a	264,7 ^a	507,6 ^a	255,0 ^a
Erntetermine				
frühe Druschreife	528,9 ^a	265,0 ^a	511,3 ^a	256,9 ^a
zur Druschreife	537,6 ^b	270,0 ^b	521,0 ^b	261,9 ^b
Totreife	539,2 ^b	272,4 ^c		
Sorten				
Navarro	533,5 ^a	268,3 ^a	512,6	257,8
Respect	542,6 ^b	272,6 ^b	521,4	261,7
Astronaut	531,5 ^a	267,3 ^a	515,7	259,3
Gesamt	535,2	269,1	516,1	259,4

Tabelle A39: Einfluss von Jahr, Standort und Erntetermin auf die theoretischen Gasausbeuten (l/kg TM) des Erbsenstrohs (Mittel über die Sorten).

Gas	Jahr	Standort	Erntetermin		
			frühe Druschreife	zur Druschreife	Totreife
Biogas	2017	Ostwestfalen-Lippe	526,3	534,0	534,0
		Soester Börde	499,8	525,7	532,2
	2018	Ostwestfalen-Lippe	555,0	554,5	551,8
		Soester Börde	537,4	535,6	538,5
Grenzdifferenz 5%: Biogas			7,7		
Methan	2017	Ostwestfalen-Lippe	265,2	269,6	270,3
		Soester Börde	251,3	265,0	268,7
	2018	Ostwestfalen-Lippe	276,5	276,8	278,3
		Soester Börde	268,3	267,8	271,9
Grenzdifferenz 5%: Methan			3,7		

Tabelle A40: Einfluss von Jahr, Standort und Erntetermin auf die theoretischen Gasausbeuten (l/kg TM) der Erbsenstrohsilagen (Mittel über die Sorten).

Gas	Jahr	Standort	Erntetermin	
			frühe Druschreife	zur Druschreife
Biogas	2017	Ostwestfalen-Lippe	510,7	512,0
		Soester Börde	481,8	514,5
	2018	Ostwestfalen-Lippe	533,2	536,9
		Soester Börde	523,3	520,0
Grenzdifferenz 5%: Biogas			15,1	
Methan	2017	Ostwestfalen-Lippe	257,8	258,1
		Soester Börde	242,0	259,0
	2018	Ostwestfalen-Lippe	267,1	269,2
		Soester Börde	262,9	260,8
Grenzdifferenz 5%: Methan			8,2	

Tabelle A41: Theoretische Gasausbeuten (l/kg TM) des Ackerbohlenstrohs und der Ackerbohlenstrohsilagen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Spalten.

	Stroh		Strohsilage	
	Biogas	Methan	Biogas	Methan
Jahre				
2017	535,6 ^a	269,9	514,4 ^a	258,3 ^a
2018	538,1 ^b	270,4	527,4 ^b	264,3 ^b
Standort				
Ostwestfalen-Lippe	541,1 ^b	272,3 ^b	523,5 ^b	262,5 ^b
Soester Börde	532,6 ^a	268,0 ^a	516,4 ^a	259,2 ^a
Erntetermine				
frühe Druschreife	534,4 ^a	268,3 ^a	513,7 ^a	257,7 ^a
zur Druschreife	537,5 ^{bc}	269,9 ^b	521,5 ^b	261,2 ^b
späte Druschreife	535,9 ^{ab}	269,5 ^{ab}	527,5 ^c	265,1 ^c
Totreife	539,5 ^c	272,9 ^c		
Sorten				
Fuego	532,0 ^a	267,1 ^a	515,7 ^a	258,2 ^a
Tiffany	538,0 ^b	271,1 ^b	520,5 ^b	261,5 ^b
Taifun	540,5 ^c	272,3 ^c	524,7 ^c	263,3 ^c
Gesamt	536,8	270,1	520,3	261,0

Tabelle A42: Einfluss von Jahr, Standort und Erntetermin auf die theoretischen Gasausbeuten (l/kg TM) des Ackerbohlenstrohs (Mittel über die Sorten).

Gas	Jahr	Standort	Erntetermin			Totreife
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
Biogas	2017	Ostwestfalen-Lippe	531,6	533,4	533,4	539,5
		Soester Börde	540,4	542,8	527,5	535,9
	2018	Ostwestfalen-Lippe	543,0	544,6	551,5	551,7
		Soester Börde	522,6	529,2	531,3	531,0
Grenzdifferenz 5%: Biogas			5,4			
Methan	2017	Ostwestfalen-Lippe	266,6	268,4	268,6	275,3
		Soester Börde	271,7	272,3	265,1	271,2
	2018	Ostwestfalen-Lippe	272,4	272,5	277,1	277,2
		Soester Börde	262,4	266,3	267,1	267,8
Grenzdifferenz 5%: Methan			2,8			

Tabelle A43: Einfluss von Jahr, Sorte und Erntetermin auf die theoretischen Gasausbeuten (l/kg TM) des Ackerbohlenstrohs (Mittel über die Standorte).

Gas	Jahr	Sorte	Erntetermin			Totreife
			frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	
Biogas	2017	<i>Fuego</i>	533,6	533,2	530,2	527,7
		<i>Tiffany</i>	536,1	545,0	527,6	538,2
		<i>Taifun</i>	538,2	536,1	533,6	547,3
	2018	<i>Fuego</i>	526,6	532,2	536,6	535,9
		<i>Tiffany</i>	535,0	537,8	541,4	543,2
		<i>Taifun</i>	536,9	540,7	546,1	544,9
Grenzdifferenz 5%: Biogas			6,6			
Methan	2017	<i>Fuego</i>	267,8	266,9	266,2	266,8
		<i>Tiffany</i>	269,5	274,2	265,5	274,1
		<i>Taifun</i>	270,1	270,0	268,8	278,9
	2018	<i>Fuego</i>	264,0	266,7	269,1	269,2
		<i>Tiffany</i>	268,6	269,9	272,4	274,2
		<i>Taifun</i>	269,6	271,7	274,8	274,3
Grenzdifferenz 5%: Methan			3,5			

Tabelle A44: Einfluss von Standort und Erntetermin, bzw. Standort und Jahr auf die theoretischen Gasausbeuten (l/kg TM) der Ackerbohnenstrohsilagen (Mittel über Sorte und Jahr bzw. Sorte und Erntetermin).

Gas	Standort	Erntetermin			Jahr	
		frühe Druschreife	zur Druschreife	späte Druschreife	2017	2018
Biogas	Ostwestfalen-Lippe	514,9	520,4	535,3	513,2	533,9
	Soester Börde	512,4	522,6	512,0	515,6	517,6
Grenzdifferenz 5%: Biogas			4,1		3,3	
Methan	Ostwestfalen-Lippe	258,2	260,2	269,1	257,8	267,2
	Soester Börde	257,3	262,2	257,2	258,7	259,9
Grenzdifferenz 5%: Methan			2,2		1,8	

Untersuchungen zur Nachwirkung der Strohbewegung auf die Folgekultur Winterweizen

Feldversuche

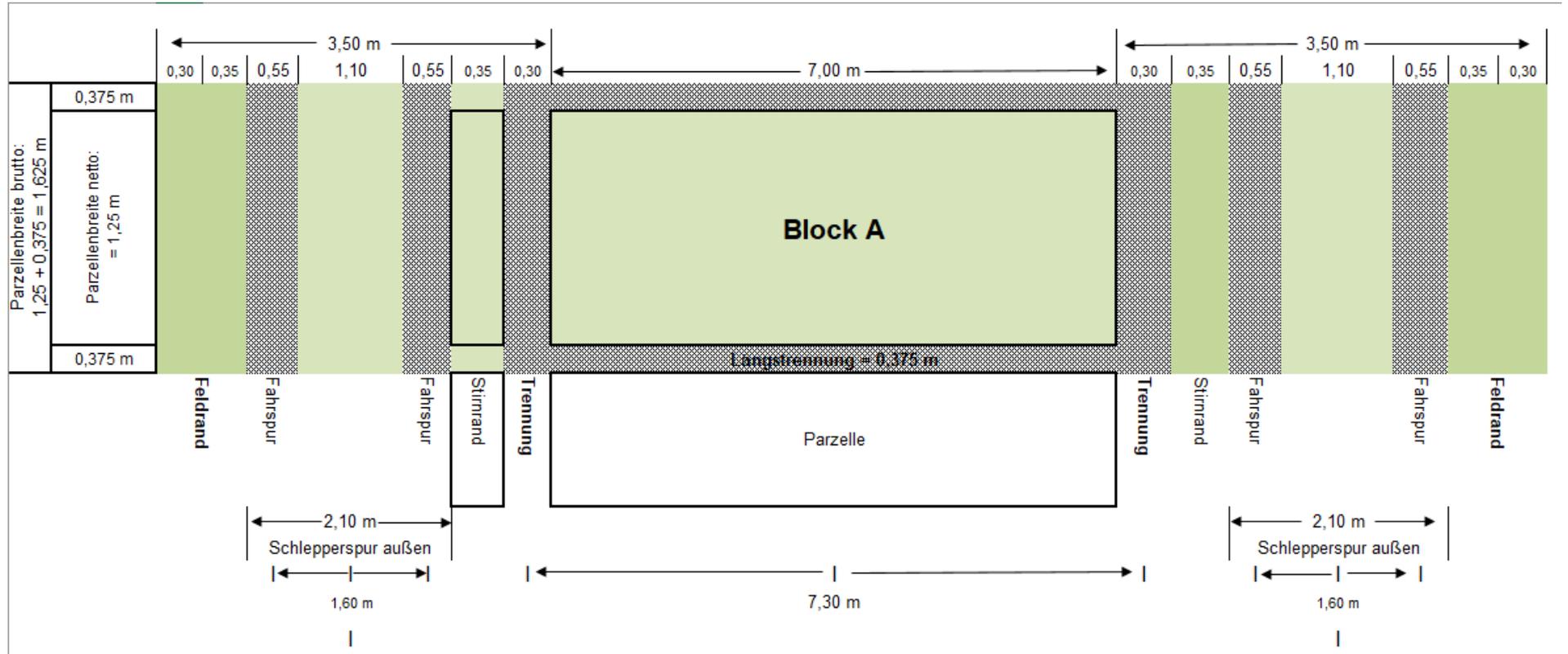


Abbildung A1: Kleinparzellendesign der Versuche am Standort Soester Börde.

Quelle: Verändert nach STEMANN et al., 2019

Tabelle A45: Einfluss von Jahr, Vorfrucht und Zeitpunkt, bzw. Jahr, Vorfrucht und Standort auf die N_{min} Ergebnisse (kg N/ha) unter Winterweizen in 0–90 cm Tiefe (Mittel über Strohbergrung und Standorte, bzw. Strohbergrung und Zeitpunkt).

Jahr	Vorfrucht	Vegetations- ende	Vegetations- beginn	Soester Börde	Haarstrang
2018	Erbse	145,56	77,44	117,06	105,94
	Ackerbohne	93,75	61,88	66,00	89,63
2019	Erbse	170,06	106,13	156,75	119,44
	Ackerbohne	183,31	119,56	172,00	130,88
Grenzdifferenz 5%:		17,1		17,1	

Tabelle A46: Einfluss von Strohabfuhr und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Erbse 2018 (Mittel über Düngestufen).

Termin	Standort	Strohabfuhr	NDVI	GD 5% Strohabfuhr*Standort
06.04.2018	Soester Börde	mit Stroh	0,758	0,014
		ohne Stroh	0,749	
	Haarstrang	mit Stroh	0,346	
		ohne Stroh	0,361	
17.04.2018	Soester Börde	mit Stroh	0,825	0,021
		ohne Stroh	0,822	
	Haarstrang	mit Stroh	0,588	
		ohne Stroh	0,611	
27.04.2018	Soester Börde	mit Stroh	0,850	n.s.
		ohne Stroh	0,850	
	Haarstrang	mit Stroh	0,766	
		ohne Stroh	0,770	
07.05.2018	Soester Börde	mit Stroh	0,833	n.s.
		ohne Stroh	0,826	
	Haarstrang	mit Stroh	0,717	
		ohne Stroh	0,720	
02.07.2018	Soester Börde	mit Stroh	0,497	n.s.
		ohne Stroh	0,485	
	Haarstrang	mit Stroh	0,568	
		ohne Stroh	0,577	
09.07.2018	Soester Börde	mit Stroh	0,261	n.s.
		ohne Stroh	0,253	
	Haarstrang	mit Stroh	0,363	
		ohne Stroh	0,368	

GD=Grenzdifferenz

Tabelle A47: Einfluss von N-Düngung und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Erbse 2018 (Mittel über Strohbergung).

Termin	N-Düngung	Standort		GD 5%
		Soester Börde	Haarstrang	
06.04.2018	Keine N-Düngung	0,733	0,347	n.s.
	Sollwert -60 kg	0,766	0,358	
	Sollwert -30 kg	0,747	0,348	
	Sollwert	0,761	0,356	
	Sollwert +30 kg	0,760	0,358	
	Sollwert +60 kg	0,755	0,356	
17.04.2018	Keine N-Düngung	0,771	0,515	n.s.
	Sollwert -60 kg	0,835	0,603	
	Sollwert -30 kg	0,807	0,604	
	Sollwert	0,834	0,623	
	Sollwert +30 kg	0,853	0,629	
	Sollwert +60 kg	0,841	0,624	
27.04.2018	Keine N-Düngung	0,796	0,682	n.s.
	Sollwert -60 kg	0,868	0,774	
	Sollwert -30 kg	0,834	0,768	
	Sollwert	0,854	0,795	
	Sollwert +30 kg	0,879	0,792	
	Sollwert +60 kg	0,869	0,799	
07.05.2018	Keine N-Düngung	0,742	0,562	0,036
	Sollwert -60 kg	0,846	0,721	
	Sollwert -30 kg	0,820	0,727	
	Sollwert	0,846	0,763	
	Sollwert +30 kg	0,868	0,761	
	Sollwert +60 kg	0,855	0,775	
02.07.2018	Keine N-Düngung	0,293	0,423	n.s.
	Sollwert -60 kg	0,468	0,553	
	Sollwert -30 kg	0,490	0,587	
	Sollwert	0,538	0,620	
	Sollwert +30 kg	0,574	0,611	
	Sollwert +60 kg	0,583	0,639	
09.07.2018	Keine N-Düngung	0,159	0,223	0,026
	Sollwert -60 kg	0,238	0,334	
	Sollwert -30 kg	0,245	0,371	
	Sollwert	0,272	0,404	
	Sollwert +30 kg	0,308	0,418	
	Sollwert +60 kg	0,321	0,443	

GD=Grenzdifferenz

Tabelle A48: Einfluss von Strohabfuhr und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne 2018 (Mittel über Düngestufen).

Termin	Standort	Strohabfuhr	NDVI	GD 5% Strohabfuhr*Standort
06.04.2018	Soester Börde	mit Stroh	0,704	n.s.
		ohne Stroh	0,699	
	Haarstrang	mit Stroh	0,475	
		ohne Stroh	0,472	
17.04.2018	Soester Börde	mit Stroh	0,741	n.s.
		ohne Stroh	0,751	
	Haarstrang	mit Stroh	0,739	
		ohne Stroh	0,737	
27.04.2018	Soester Börde	mit Stroh	0,790	n.s.
		ohne Stroh	0,799	
	Haarstrang	mit Stroh	0,799	
		ohne Stroh	0,802	
07.05.2018	Soester Börde	mit Stroh	0,779	n.s.
		ohne Stroh	0,788	
	Haarstrang	mit Stroh	0,775	
		ohne Stroh	0,774	
02.07.2018	Soester Börde	mit Stroh	0,325	n.s.
		ohne Stroh	0,338	
	Haarstrang	mit Stroh	0,302	
		ohne Stroh	0,304	
09.07.2018	Soester Börde	mit Stroh	0,193	n.s.
		ohne Stroh	0,199	
	Haarstrang	mit Stroh	0,237	
		ohne Stroh	0,240	

GD=Grenzdifferenz

Tabelle A49: Einfluss von N-Düngung und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne 2018 (Mittel über Strohbergung).

Termin	N-Düngung	Standort		GD 5%
		Soester Börde	Haarstrang	
06.04.2018	Keine N-Düngung	0,615	0,446	0,009
	Sollwert -60 kg	0,710	0,471	
	Sollwert -30 kg	0,710	0,486	
	Sollwert	0,720	0,474	
	Sollwert +30 kg	0,725	0,485	
	Sollwert +60 kg	0,730	0,480	
17.04.2018	Keine N-Düngung	0,577	0,581	n.s.
	Sollwert -60 kg	0,764	0,740	
	Sollwert -30 kg	0,752	0,770	
	Sollwert	0,784	0,767	
	Sollwert +30 kg	0,795	0,786	
	Sollwert +60 kg	0,805	0,784	
27.04.2018	Keine N-Düngung	0,637	0,639	n.s.
	Sollwert -60 kg	0,809	0,809	
	Sollwert -30 kg	0,789	0,827	
	Sollwert	0,829	0,841	
	Sollwert +30 kg	0,845	0,842	
	Sollwert +60 kg	0,857	0,847	
07.05.2018	Keine N-Düngung	0,592	0,529	0,018
	Sollwert -60 kg	0,813	0,791	
	Sollwert -30 kg	0,790	0,817	
	Sollwert	0,825	0,828	
	Sollwert +30 kg	0,837	0,838	
	Sollwert +60 kg	0,843	0,842	
02.07.2018	Keine N-Düngung	0,199	0,245	0,020
	Sollwert -60 kg	0,284	0,308	
	Sollwert -30 kg	0,319	0,304	
	Sollwert	0,369	0,317	
	Sollwert +30 kg	0,394	0,318	
	Sollwert +60 kg	0,424	0,326	
09.07.2018	Keine N-Düngung	0,137	0,166	n.s.
	Sollwert -60 kg	0,174	0,221	
	Sollwert -30 kg	0,184	0,232	
	Sollwert	0,211	0,258	
	Sollwert +30 kg	0,226	0,271	
	Sollwert +60 kg	0,244	0,281	

GD=Grenzdifferenz

Tabelle A50: Einfluss von Strohabfuhr und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Erbse 2019 (Mittel über Düngestufen).

Termin	Standort	Strohabfuhr	NDVI	GD 5% Strohabfuhr*Standort
29.03.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,742	n.s.
		ohne Stroh	0,736	
	Haarstrang	mit Stroh	0,576	
		ohne Stroh	0,583	
08.04.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,771	n.s.
		ohne Stroh	0,764	
	Haarstrang	mit Stroh	0,663	
		ohne Stroh	0,672	
23.04.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,800	n.s.
		ohne Stroh	0,799	
	Haarstrang	mit Stroh	0,654	
		ohne Stroh	0,663	
02.05.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,819	n.s.
		ohne Stroh	0,819	
	Haarstrang	mit Stroh	0,739	
		ohne Stroh	0,747	
13.05.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,855	n.s.
		ohne Stroh	0,852	
	Haarstrang	mit Stroh	0,797	
		ohne Stroh	0,806	
01.07.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,684	0,010
		ohne Stroh	0,671	
	Haarstrang	mit Stroh	0,555	
		ohne Stroh	0,562	
09.07.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,409	n.s.
		ohne Stroh	0,397	
	Haarstrang	mit Stroh	0,367	
		ohne Stroh	0,365	

GD=Grenzdifferenz

Tabelle A51: Einfluss von N-Düngung und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Erbse 2019 (Mittel über Strohbergung).

Termin	N-Düngung	Standort		GD 5%
		Soester Börde	Haarstrang	
29.03.2019	Keine N-Düngung	0,675	0,466	0,021
	Sollwert -60 kg	0,685	0,569	
	Sollwert -30 kg	0,749	0,597	
	Sollwert	0,763	0,611	
	Sollwert +30 kg	0,773	0,614	
	Sollwert +60 kg	0,788	0,620	
08.04.2019	Keine N-Düngung	0,701	0,493	0,022
	Sollwert -60 kg	0,713	0,647	
	Sollwert -30 kg	0,774	0,687	
	Sollwert	0,786	0,713	
	Sollwert +30 kg	0,806	0,728	
	Sollwert +60 kg	0,825	0,738	
23.04.2019	Keine N-Düngung	0,748	0,439	0,023
	Sollwert -60 kg	0,760	0,617	
	Sollwert -30 kg	0,804	0,680	
	Sollwert	0,810	0,709	
	Sollwert +30 kg	0,828	0,741	
	Sollwert +60 kg	0,848	0,764	
02.05.2019	Keine N-Düngung	0,768	0,536	0,025
	Sollwert -60 kg	0,792	0,714	
	Sollwert -30 kg	0,823	0,761	
	Sollwert	0,829	0,795	
	Sollwert +30 kg	0,844	0,813	
	Sollwert +60 kg	0,860	0,840	
13.05.2019	Keine N-Düngung	0,817	0,630	0,039
	Sollwert -60 kg	0,851	0,785	
	Sollwert -30 kg	0,851	0,810	
	Sollwert	0,848	0,844	
	Sollwert +30 kg	0,870	0,863	
	Sollwert +60 kg	0,885	0,876	
01.07.2019	Keine N-Düngung	0,583	0,396	0,017
	Sollwert -60 kg	0,631	0,515	
	Sollwert -30 kg	0,679	0,571	
	Sollwert	0,706	0,604	
	Sollwert +30 kg	0,723	0,625	
	Sollwert +60 kg	0,743	0,643	
09.07.2019	Keine N-Düngung	0,307	0,231	0,017
	Sollwert -60 kg	0,344	0,284	
	Sollwert -30 kg	0,396	0,352	
	Sollwert	0,438	0,397	
	Sollwert +30 kg	0,457	0,446	
	Sollwert +60 kg	0,478	0,489	

GD=Grenzdifferenz

Tabelle A52: Einfluss von Strohabfuhr und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne 2019 (Mittel über Düngestufen).

Termin	Standort	Strohabfuhr	NDVI	GD 5% Strohabfuhr*Standort
29.03.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,709	n.s.
		ohne Stroh	0,713	
	Haarstrang	mit Stroh	0,700	
		ohne Stroh	0,695	
08.04.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,725	n.s.
		ohne Stroh	0,729	
	Haarstrang	mit Stroh	0,723	
		ohne Stroh	0,721	
23.04.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,755	n.s.
		ohne Stroh	0,761	
	Haarstrang	mit Stroh	0,717	
		ohne Stroh	0,715	
02.05.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,781	n.s.
		ohne Stroh	0,786	
	Haarstrang	mit Stroh	0,776	
		ohne Stroh	0,774	
13.05.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,822	n.s.
		ohne Stroh	0,820	
	Haarstrang	mit Stroh	0,810	
		ohne Stroh	0,808	
01.07.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,639	n.s.
		ohne Stroh	0,633	
	Haarstrang	mit Stroh	0,647	
		ohne Stroh	0,644	
09.07.2019	Soester Börde	mit Stroh	0,354	n.s.
		ohne Stroh	0,353	
	Haarstrang	mit Stroh	0,440	
		ohne Stroh	0,434	

GD=Grenzdifferenz

Tabelle A53: Einfluss von N-Düngung und Standort auf den NDVI-Wert des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne 2019 (Mittel über Strohbergung).

Termin	N-Düngung	Standort		GD 5%
		Soester Börde	Haarstrang	
29.03.2019	Keine N-Düngung	0,642	0,623	0,013
	Sollwert -60 kg	0,643	0,686	
	Sollwert -30 kg	0,722	0,697	
	Sollwert	0,740	0,720	
	Sollwert +30 kg	0,758	0,732	
	Sollwert +60 kg	0,759	0,724	
08.04.2019	Keine N-Düngung	0,655	0,616	0,017
	Sollwert -60 kg	0,653	0,700	
	Sollwert -30 kg	0,727	0,722	
	Sollwert	0,752	0,751	
	Sollwert +30 kg	0,782	0,765	
	Sollwert +60 kg	0,792	0,779	
23.04.2019	Keine N-Düngung	0,695	0,594	0,027
	Sollwert -60 kg	0,689	0,677	
	Sollwert -30 kg	0,760	0,714	
	Sollwert	0,786	0,750	
	Sollwert +30 kg	0,807	0,771	
	Sollwert +60 kg	0,814	0,791	
02.05.2019	Keine N-Düngung	0,715	0,661	n.s.
	Sollwert -60 kg	0,718	0,746	
	Sollwert -30 kg	0,792	0,783	
	Sollwert	0,805	0,808	
	Sollwert +30 kg	0,833	0,821	
	Sollwert +60 kg	0,838	0,832	
13.05.2019	Keine N-Düngung	0,778	0,691	0,032
	Sollwert -60 kg	0,766	0,788	
	Sollwert -30 kg	0,839	0,823	
	Sollwert	0,843	0,840	
	Sollwert +30 kg	0,851	0,851	
	Sollwert +60 kg	0,849	0,860	
01.07.2019	Keine N-Düngung	0,553	0,496	n.s.
	Sollwert -60 kg	0,580	0,605	
	Sollwert -30 kg	0,633	0,655	
	Sollwert	0,669	0,700	
	Sollwert +30 kg	0,683	0,708	
	Sollwert +60 kg	0,698	0,707	
09.07.2019	Keine N-Düngung	0,289	0,305	n.s.
	Sollwert -60 kg	0,305	0,380	
	Sollwert -30 kg	0,338	0,453	
	Sollwert	0,380	0,494	
	Sollwert +30 kg	0,399	0,488	
	Sollwert +60 kg	0,410	0,501	

GD=Grenzdifferenz

Tabelle A54: Einfluss von Standort und Dünge­stufe bzw. Standort und Jahr auf die Weizenerträge (dt/ha, bei 14% Feuchte) nach Vorfrucht Erbse (Mittel über Strohbergung und Jahre bzw. Strohbergung und Dünge­stufen).

Dünge­stufe/Jahr	Standort	
	Soester Börde	Haarstrang
Keine N-Düngung	92,90	68,19
Sollwert –60 kg	96,95	90,40
Sollwert –30 kg	99,87	92,05
Sollwert	98,71	98,55
Sollwert +30 kg	97,73	100,58
Sollwert +60 kg	97,62	102,57
GD 5%: Dünge­stufe*Standort	3,41	
2018	91,99	97,26
2019	101,28	86,86
GD 5%: Jahr*Standort	1,97	

GD=Grenzdifferenz

Tabelle A55: Einfluss von Jahr, Dünge­stufe und Standort auf die Weizenerträge (dt/ha, bei 14% Feuchte) nach Vorfrucht Ackerbohne (Mittel über die Strohbergung).

Jahr	Dünge­stufe	Standort	
		Soester Börde	Haarstrang
2018	Keine N-Düngung	65,80	53,41
	Sollwert –60 kg	89,30	57,86
	Sollwert –30 kg	91,28	55,34
	Sollwert	93,00	55,23
	Sollwert +30 kg	94,33	54,13
	Sollwert +60 kg	94,45	53,55
2019	Keine N-Düngung	97,29	79,28
	Sollwert –60 kg	97,29	88,44
	Sollwert –30 kg	98,37	95,44
	Sollwert	102,55	97,16
	Sollwert +30 kg	102,80	96,41
	Sollwert +60 kg	102,26	94,22
Grenzdifferenz 5%:		4,75	

Qualitätsanalysen

Tabelle A56: Einfluss von Dünge­stufe und Standort, Dünge­stufe und Jahr sowie Jahr und Standort auf die Tausend­korn­masse (g) des Weizens nach Vorfrucht Erbse (Mittel über Strohbergung und Jahre, bzw. Standort, bzw. Dünge­stufen).

Dünge­stufe/Jahr	Standort		Jahr	
	Soester Börde	Haarstrang	2018	2019
Keine N-Düngung	42,03	41,55	43,65	40,13
Sollwert –60 kg	40,23	42,86	41,94	41,36
Sollwert –30 kg	39,58	42,58	41,69	40,73
Sollwert	39,52	42,60	41,63	40,75
Sollwert +30 kg	38,99	43,35	41,43	41,22
Sollwert +60 kg	38,49	43,05	40,48	41,31
GD 5% Dünge­stufe*Standort und Dünge­stufe*Jahr:	0,92		0,92	
2018	39,85	43,27		
2019	39,77	42,06		
GD 5%: Jahr*Standort	0,53			

GD=Grenzdifferenz

Tabelle A57: Einfluss von Jahr, Dünge­stufe und Standort auf die Tausend­korn­masse (g) des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne (Mittel die Strohbergung).

Jahr	Dünge­stufe	Standort		
		Soester Börde	Haarstrang	
2018	Keine N-Düngung		40,22	41,51
	Sollwert –60 kg		38,69	35,02
	Sollwert –30 kg		37,39	33,45
	Sollwert		37,47	33,04
	Sollwert +30 kg		37,48	31,99
	Sollwert +60 kg		36,59	31,85
2019	Keine N-Düngung		41,34	46,07
	Sollwert –60 kg		40,90	45,44
	Sollwert –30 kg		40,44	43,86
	Sollwert		40,28	43,30
	Sollwert +30 kg		39,10	42,05
	Sollwert +60 kg		39,30	40,75
Grenzdifferenz 5%:			1,57	

Tabelle A58: Einfluss der Strohbergung auf den Rohproteingehalt (%) des Weizens nach Vorfrucht Erbse (Mittel über Jahr, Standort und Düngestufe).

Strohbergung	
mit Stroh	ohne Stroh
10,55	10,46
Grenzdifferenz 5%:	
0,07	

Tabelle A59: Einfluss von Jahr, Düngestufe und Standort auf den Rohproteingehalt (%) des Weizens nach Vorfrucht Erbse (Mittel über die Strohbergung).

Jahr	Düngestufe	Standort	
		Soester Börde	Haarstrang
2018	Keine N-Düngung	10,18	9,14
	Sollwert –60 kg	11,55	9,74
	Sollwert –30 kg	11,89	10,23
	Sollwert	12,26	10,44
	Sollwert +30 kg	12,50	10,39
	Sollwert +60 kg	12,56	10,78
2019	Keine N-Düngung	9,83	8,06
	Sollwert –60 kg	10,40	8,80
	Sollwert –30 kg	10,81	9,35
	Sollwert	11,13	9,84
	Sollwert +30 kg	11,62	10,15
	Sollwert +60 kg	11,78	10,60
Grenzdifferenz 5%:		0,24	

Tabelle A60: Einfluss von Jahr, Düngestufe und Standort auf den Rohproteingehalt (%) des Weizens nach Vorfrucht Ackerbohne (Mittel über die Strohbergung).

Jahr	Düngestufe	Standort	
		Soester Börde	Haarstrang
2018	Keine N-Düngung	8,58	8,79
	Sollwert –60 kg	9,97	9,77
	Sollwert –30 kg	10,86	10,22
	Sollwert	11,27	10,85
	Sollwert +30 kg	11,74	11,23
	Sollwert +60 kg	11,83	11,41
2019	Keine N-Düngung	9,95	8,69
	Sollwert –60 kg	10,05	9,22
	Sollwert –30 kg	10,30	9,81
	Sollwert	10,81	10,31
	Sollwert +30 kg	11,11	10,85
	Sollwert +60 kg	11,41	11,40
Grenzdifferenz 5%:		0,22	