



Standortangepasste Anbau- systeme für Energiepflanzen

Schriftenreihe, Heft 25/2014



Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche
Produktion von Energiepflanzen zur Biogasproduktion unter verschiedenen
Standortbedingungen Deutschlands – Phase II
(EVA II)

Teilprojekt 1: Entwicklung und Optimierung von standort- angepassten Anbausystemen für Energie- pflanzen im Fruchtfolgeregime auf D-Süd-Standorten

Jana Grunewald

Projektleitung:

Dr. habil. Christian Röhrich (bis 12/2009)

Dr. Kerstin Jäkel (ab 01/2010)

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucher-
schutz durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. Gülzow gefördert.

Inhalt

1	Einleitung	10
2	Methodik	11
2.1	Charakteristik des Versuchsstandortes	11
2.2	Witterungsverlauf	12
2.3	Versuchsdurchführung	17
2.3.1	Versuchsaufbau	17
2.3.2	Anbautechnik.....	21
2.3.3	Datenerhebung.....	23
2.3.4	Berechnungs- und Bewertungsgrundlagen	25
2.3.4.1	Theoretische Ausbeuten sowie Hektarerträge von Biogas und Methan (nach BASERGA).....	25
2.3.4.2	Biogas- und Methanausbeuten auf Grundlage der „ATB-Biogasmatrix“	26
2.3.4.3	Deckungsbeitragsanalysen (Kosten-Ertrags-Relationen)	27
2.3.4.4	Nährstoffbilanzierung (N, P, K, Mg)	28
2.3.4.5	Humusbilanzierung	28
2.3.4.6	Wasserhaushalt.....	30
2.3.4.7	Nitratausträge.....	30
2.3.4.8	Energie- und Treibhausgasbilanzierung	31
3	Ergebnisse	34
3.1	Frisch- und Trockenmasseerträge.....	34
3.2	TS-Gehalte	38
3.3	Erträge und fruchtfolgeabhängige Auswirkungen auf das Abschlussfruchtfolgeglied Winterroggen	39
3.4	Zweikulturnutzung	42
3.5	Bonituren	44
3.6	Gasausbeuten, -gehalte und -hektarerträge	47
3.7	Ökonomische Bewertung	51
3.8	Ökologische Nachhaltigkeitsbewertungen.....	56
3.8.1	Nährstoffhaushalt (N, P, K, Mg).....	56
3.8.2	Humushaushalt	59
3.8.3	Wasserhaushalt.....	63
3.8.3.1	Bodenfeuchte	63
3.8.3.2	Wasserverbrauch und Wassernutzungseffizienz.....	65
3.8.4	Nitratausträge.....	68
3.8.5	Energie- und Treibhausgasbilanzen	72
3.8.5.1	Treibhausgasemissionen.....	72
3.8.5.2	Energiebilanz/Energieeffizienz	77
3.8.6	Zusammenfassende Übersicht der ökologischen Bewertungsgrößen.....	81
4	Diskussion und Schlussfolgerungen	82
5	Anbauempfehlungen	85
6	Zusammenfassung	87
7	Literaturverzeichnis	90
	Anhang I – Tabellen	93
	Anhang II – Öffentlichkeitsarbeit	138

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gesamtkonzept des Verbundprojektes EVA II (Quelle: FNR, TLL).....	11
Abbildung 2:	Lage des Versuchsstandortes Trossin in Sachsen und Zuordnung zum Boden-Klima-Raum 104 (hellgelb) – trocken-warme diluviale Böden des ostdeutschen Tieflandes (Kartenquelle: LfULG 2012)	12
Abbildung 3:	Monatliche Mittel der Lufttemperatur (2 m Höhe, in °C):	13
Abbildung 4:	Monatliche Niederschlagssummen (in mm):	13
Abbildung 5:	Monatsmittel der Globalstrahlung (in W/m ²):.....	14
Abbildung 6:	EVA-Blockparzellenanlage in Trossin, links: Anlage 3 (Mai 2010), rechts: Spiegelvariante (Juli 2010)	20
Abbildung 7:	EVA II-Versuchsfläche – randomisierte Block-Parzellenanlage auf der Versuchsstation der Biochem agrar GmbH in Trossin (links: Spiegelvariante [Anlage 4] mit 8 Prüfgliedern x 4 Wiederholungen/32 Parzellen; Beginn: 2010; rechts: Grundversuch mit 10 Prüfgliedern x 4 Wiederholungen/40 Parzellen; Beginn: 2009 [Prüfglieder 9 und 10 werden vorerst nicht für Versuche im Rahmen des EVA-Projektes genutzt)	20
Abbildung 8:	Ernte der Futterhirse (Zweitfrucht, GPS) am 19.10.2010 mit Hilfe des Feldhäckslers Hege 212 auf der Anlage 3 in Trossin (links); Ernte vom Weidelgras (SZF) am 17.09.2012 (Anlage 4) mit Hilfe des Frontmähers (rechts).....	23
Abbildung 9:	Kartoffelernte am 6. September 2011 in Trossin (Anlage 3): MTS 50 + 1-reihiger Siebkettenroder	23
Abbildung 10:	Kumulative Frischmasse-Erträge [dt/ha] der im EVA-Projekt angebauten Fruchtarten der Anlagen 3 ab 2009 (AIII) und 4 ab 2010 (AIV) aller Versuchsjahre, Versuchsstandort Trossin, n = 4 je Fruchtart, ohne Abschlussfrucht Winterroggen und Gründümpflanzungen. WZF = Winterzwischenfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht, ZF = Zweitfrucht	34
Abbildung 11:	Kumulative Trockenmasse-Erträge [dt/ha] der im EVA-Projekt angebauten Fruchtarten der Anlagen 3 ab 2009 (AIII) und 4 ab 2010 (AIV) aller Versuchsjahre, Versuchsstandort Trossin, n = 4 je Fruchtart, ohne Abschlussfrucht Winterroggen und Gründümpflanzungen. WZF = Winterzwischenfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht, ZF = Zweitfrucht	35
Abbildung 12:	Ertragsniveau [dt TM/ha] der am Versuchsstandort Trossin angebauten Fruchtarten im Mittel der Jahre 2009–2012	36
Abbildung 13:	TS-Gehalt (in %) der EVA-Fruchtarten am Standort Trossin im Mittel der Jahre 2009–2012. Optimalbereich des TS-Gehaltes hellgrau dargestellt. H = Herbstschnitt, I = 1. Schnitt, II = 2. Schnitt, ZF = Zweitfrucht. * = nur Wert von 2011, weil 2012 aufgrund von Personalmangel sehr lange Lagerung erfolgte	39
Abbildung 14:	Trockenmasseerträge [dt/ha] und TS-Gehalte [%] von Mais (blau-grün) und Sorghumhirsen (Sudangrashybrid [SG] – schwarz-grün; Futterhirse [FH] – grün) in Hauptfruchtstellung und Zweitfruchtstellung nach einer Winterzwischenfrucht (Grünroggen [GR] oder Landsberger Gemenge [LG]) am Versuchsstandort Trossin, Versuchsjahre 2010–2012 (Jahresmittelwerte).....	43
Abbildung 15:	Streudiagramm der Regression mit geringer linearer Abhängigkeit zwischen BASERGA- und ATB-Werten (SPSS 17.0).....	48
Abbildung 16:	Methanausbeuten [l/kg oTS] und Methangehalte [Vol-%] der EVA-Fruchtarten vom Standort Trossin, grün: berechnet nach BASERGA (B), frisches Erntegut (FNR 2005); grün-schraffiert: korrigierte ATB-Messwerte (Batch-Versuche) bzw. bei fehlendem Batch-Wert ermittelt über ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013), Mittelwerte der Jahre 2009–2012 I = 1. Schnitt, II = 2. Schnitt, III = 3. Schnitt. * = Matrix von Sommergerste verwendet, d. h. keine Berücksichtigung der Untersaat	49
Abbildung 17:	Kumulative Methangas-Hektarerträge [m ³ /ha] der im EVA-Projekt untersuchten Fruchtarten von Anlage 3 (AIII) ab 2009 und Anlage 4 (AIV) ab 2010, aufsummiert nach Fruchtfolgen, ohne Abschlussfruchtfolgeglied Winterroggen, Marktfrüchte und Gründümpflanzungen. Ermittlung der Werte über ATB-Biogas-Matrix (HERRMANN et al. 2013). * = CH ₄ -Ausbeute ausschließlich von Sommergerste, ohne Untersaat. WZF = Winterzwischenfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht, ZF = Zweitfrucht	50
Abbildung 18:	Methan-Hektarerträge [m ³ /ha] nach Fruchtarten im Mittel der Jahre 2009–2012, Standort Trossin, Ermittlung über ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013). * = Aufsummierung aller Schnitte pro Jahr – Jahresdurchschnittsertrag.....	51

Abbildung 19:	Jährliches Mittel der Nährstoffzufuhren, -abfuhren und -bilanzen für N, P, K und Mg (in kg/ha ⁻¹ a ⁻¹) im Energiepflanzenversuch EVA II für die Fruchtfolgen 1–8 (FF1-8) der Anlage 3 + 4, Standort Trossin, Versuchsjahre 2009–2013 (Gelbsenf und <i>Phacelia</i> in FF 1 und 8 sind Gründüngungspflanzen, d. h. es erfolgt kein Nährstoffentzug durch Erntegut, weil keine Beerntung), Aufstellung von M. Willms (ZALF).....	57
Abbildung 20:	Jährlicher Verbrauch der Nährstoffe N, P, K und Mg (in kg/[ha*a]) der EVA-Fruchtarten im Mittel der Versuchsjahre 2009–2013 beider Versuchsanlagen am Standort Trossin. WiTri = Wintertriticale, WiRo = Winterroggen, GrünRo = Grünroggen, LG = Landsberger Gemenge, WG = Einj. Weidelgras. HF = Hauptfrucht, ZF = Zweitfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht, WZF = Winterzwischenfrucht, GPS = Ganzpflanzensilage.....	58
Abbildung 21:	Humushaushalt (in kg Humus-C/ha) der am Standort Trossin erprobten Fruchtfolgen 1–8 Anlage 3.....	60
Abbildung 22:	Humussalden (in kg Humus-C/ha, Mittelwerte) der im EVA II-Projekt angebauten Fruchtarten der Jahre 2009-2013 am Standort Trossin, ermittelt aus Humusbedarf einer Fruchtart (Humusverbrauch nach VDLUFA [2004], unterer Wert) und der Reproduktionsleistung organischer Stoffe (Humuszufuhr) ohne Gärrestrückführung (linke Säule) und Szenario „Kreislauf“ bei voller Gärrestrückführung der geernteten Biomasse (Ausnahme: Druschfrüchte, Kartoffeln und Gründüngungspflanzen, rechte Säule). Berechnungen von M. Willms (ZALF). HF = Hauptfrucht, ZF = Zweitfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht, WZF = Winterzwischenfrucht.	62
Abbildung 23:	Bodenfeuchtegehalte (in Vol-%) bis zu 60 cm Tiefe der acht untersuchten Fruchtfolgen am Standort Trossin, Grundanlage, Versuchsjahr 2009–2012, Bestimmung gravimetrisch durch Trocknung von Bodenproben bei 105 °C. *Aufgrund technischer Defekte war keine Probenahme im Herbst 2010 möglich.....	64
Abbildung 24:	Bodenfeuchte-Tageswertmodell (in Vol-%) der Zweikulturnutzung – Variante „Grünroggen-Mais“ (grün) im Vergleich mit „Mais-Brache-Mais“ (schwarz) am Standort Trossin, Grundanlage, 2009–2011, erstellt mit dem Programm METVER des DWD aus gravimetrisch bestimmten Bodenfeuchtwerten (105 °C-Trocknung, in Vol-%) der Tiefe 0–90 cm zu Vegetationsbeginn, Vegetationsende und zu den Ernten (BÖTTCHER, DWD).	65
Abbildung 25:	Jährliche Wasserverbräuche [mm ha ⁻¹ a ⁻¹] und Wassernutzungseffizienzen [WNE, Werte in grün, kg TM ha ⁻¹ mm ⁻¹ a ⁻¹] auf Grundlage von Evapotranspirationsprozessen der untersuchten Fruchtfolgen inkl. Brachezeiten am warm-trockenen Standort Trossin (Su3), Versuchsdauer: 2009–2013, Mittel aus 2 Anlagen, Berechnungen von PRESCHER (ZALF) mit Hilfe des MONICA-Modells. *keine MONICA-Parametrisierung für die Fruchtarten Sonnenblume und Rübe erfolgt	66
Abbildung 26:	Wasserverbräuche [mm ha ⁻¹ a ⁻¹] und Wassernutzungseffizienzen [WNE, Werte in grün, kg TM ha ⁻¹ mm ⁻¹ a ⁻¹] auf Grundlage von Evapotranspirationsprozessen der untersuchten und Modell-parametrisierten Fruchtarten am warm-trockenen Standort Trossin (Su3), Versuchsdauer: 2009–2013, Mittel aus 2 Anlagen, Berechnungen von PRESCHER (ZALF) mit Hilfe des MONICA-Modells.	67
Abbildung 27:	N _{min} -Gehalte (in kg/ha) in den Bodentiefen 0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm nach der Ernte einer Fruchtart und im Herbst (Mittelwert aus 4 Parzellen) im Verlauf der Fruchtfolgen 1–8 zur Abschätzung des Nitratverlagerungsrisikos. Anlage 3 (2009–2012). *Reparaturen am Probenahmegerät = keine N _{min} -Beprobung erfolgt.....	69
Abbildung 28:	Flächenbezogene Emissionsbelastung von Treibhausgasen (in t CO ₂ -Äq/ha), aufgeschlüsselt nach Produktionskategorien, der im EVA II-Projekt untersuchten Fruchtfolgen beider Versuchsanlagen (Aussaat bis Ernte/Silage), Berücksichtigung aller angebauten Fruchtarten, Anbaujahre 2009–2013, Versuchsstandort Trossin. Bilanzierung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), Berechnungen durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF	74
Abbildung 29:	Flächenbezogene Treibhausgasemissionen (in kg CO ₂ -Äq/ha) einzelner Energiepflanzen, Marktfrüchte und Gründüngungspflanzen von der Aussaat bis zur Ernte/Silage unter Beachtung der Fruchtfolgestellung (Hauptfrucht, Zweitfrucht oder Zwischenfrucht), die im Projekt EVA II am Standort Trossin erprobt wurden, Versuchsjahre 2009–2013, Mittelwerte aus zwei Anlagen. Bilanzierung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), Berechnungen durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF.....	75
Abbildung 30:	Produktbezogene Treibhausgasemissionen (in kg CO ₂ -Äq/[GJ CH ₄]), aufsummiert nach Fruchtfolgen beider Anlagen, am Versuchsstandort Trossin, Versuchsjahre 2009–2012, nur Energiepflanzen. Als	

	Leistung eines Systems wurde der Energiegehalt des Methans definiert, der aus dem Silagegut gewonnen wurde (Gasausbeuten nach ATB-Biogasmatrix, HERRMANN et al. 2013). Bilanzierung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), Berechnungen durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF	76
Abbildung 31:	Produktbezogene Treibhausgasemissionen (in kg CO ₂ -Äq/[GJ CH ₄]) einzelner Energiepflanzen unter Beachtung der Fruchtfolgestellung (Hauptfrucht [HF], Zweitfrucht [ZF] oder Zwischenfrucht [SZF, WZF]), die im Projekt EVA II am Standort Trossin erprobt wurden, Versuchsjahre 2009–2013, Mittelwerte aus zwei Anlagen. Als Leistung eines Systems wurde der Energiegehalt des Methans definiert, der aus dem Silagegut gewonnen wurde (Gasausbeuten nach ATB-Biogasmatrix, HERRMANN et al. 2013). Bilanzierung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), Berechnungen durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF	76
Abbildung 32:	Energiebilanz (Energieertrag des produzierten Methans – Energieverbrauch durch Maschineneinsatz und Herstellung von Saatgut, Pflanzenschutzmitteln, Düngemitteln sowie Stromverbrauch, in GJ/ha) der acht untersuchten Fruchtfolgen am Standort Trossin, nur Energiepflanzen, Versuchsjahre 2009–2012. Bilanzierung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), Berechnungen durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF; Gasausbeuten über ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013).	77
Abbildung 33:	Kumulierter Energieaufwand (KEA in GJ/ha) durch Maschineneinsatz und Herstellung von Saatgut, Pflanzenschutzmitteln, Düngemitteln sowie Stromverbrauch bei der Produktion aller Fruchtarten (inkl. Abschlussfrucht) in den Fruchtfolgen 1-8 beider Anlagen am Versuchsstandort Trossin, Versuchsjahre 2009–2013. Erstellt mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture) von PETER & WILLMS, ZALF	78
Abbildung 34:	Energiebilanzen (CH ₄ -Energieertrag - Energieverbrauch in GJ/ha) der im Projekt EVA II am Standort Trossin angebauten Energiepflanzen im Vergleich mit Marktfrüchten und Zwischenfrüchten zur Gründüngung (Bewertung der Kartoffel als Marktfrucht), Versuchsjahre 2009–2013, Mittelwerte aus 2 Anlagen. Bilanzierung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), Berechnungen durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF, Gasausbeuten über ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013)	79
Abbildung 35:	Energieeffizienz der im EVA II-Projekt am Standort Trossin angebauten Fruchtfolgen beider Anlagen, ausgedrückt als EROI-(energy return on investment-)Faktor als Summe der produzierten Energie aus Methangas (Output) im Verhältnis zur Summe des Verbrauchs an Primärenergieträgern (Input), Versuchsjahre 2009–2012, nur Energiepflanzen. Berechnung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF, Gasausbeuten über ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013)	80
Abbildung 36:	Energieeffizienz der im EVA II-Projekt am Standort Trossin angebauten Energiepflanzen als Mittelwert beider Anlagen, ausgedrückt als EROI-(energy return on investment-)Faktor als Summe der produzierten Energie aus Methangas (Output) im Verhältnis zur Summe des Verbrauchs an Primärenergieträgern (Input), Versuchsjahre 2009–2012. Berechnung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF, Gasausbeuten über ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013)	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bewertung der Witterung der einzelnen Versuchsjahre am Standort Trossin.....	16
Tabelle 2:	Acht Fruchtfolgesysteme (mit Angabe von Erntejahr, Nutzung und Fruchtfolgestellung der angebauten Kulturarten), die im Rahmen des Projektes EVA II (2009–2013) am Versuchsstandort Trossin (Sachsen) untersucht wurden. Erntejahr: Anlage 3/Anlage 4 (Spiegelung); Nutzung: GPS = Ganzpflanzensilage, GD = Gründüngung; US = Untersaat; Fruchtfolgestellung: SZF = Sommerzwischenfrucht, WZF = Winterzwischenfrucht, ZF = Zweitfrucht.....	19
Tabelle 3:	Erhobene Daten im Energiefuchtfolgeversuch am Standort Trossin (nach TLL 2009)	24
Tabelle 4:	Faktor- und Produktpreise als Annahmen zur Berechnung der variablen Kosten bei Deckungsbeitragsanalysen im EVA II-Verbund (Quelle: KORNATZ, Universität Gießen, schriftl. Mitteilung)...	28
Tabelle 5:	Tolerierbare Herbst-N _{min} -Gehalte im Boden (in kg/ha) in Abhängigkeit von Bodenart und Sickerwassermenge eines Standorts (nach HENNINGS & SCHEFFER 2000)	31
Tabelle 6:	Durchschnittserträge (in dt TM/ha) der EVA-Fruchtarten in Trossin in den einzelnen Versuchsjahren. ZF = Zweitfrucht, WZF = Winterzwischenfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht.....	38
Tabelle 7:	Trockenmasseerträge (Korn- und Strohertrag in dt TM/ha bei 105 °C Trocknung) und Korn : Stroh-Verhältnis des Abschlussfruchtfolgegliedees Winterroggen bei den acht erprobten Anbauvarianten im Fruchtfolgeversuch mit Energiepflanzen zur Biogasproduktion am Versuchsstandort Trossin (AZ 31), Anlage 3, Versuchsjahr 2012	40
Tabelle 8:	Trockenmasseerträge (Korn- und Strohertrag in dt TM/ha bei 105 °C-Trocknung) und Korn : Stroh-Verhältnis des Abschlussfruchtfolgegliedees Winterroggen bei den acht erprobten Anbauvarianten im Fruchtfolgeversuch mit Energiepflanzen zur Biogasproduktion am Versuchsstandort Trossin (AZ 31), Spiegelanlage 4, Versuchsjahr 2013	40
Tabelle 9:	Bestandesaufnahmeprotokoll der angebauten Feldfrüchte – Getreide, C ₄ -Pflanzen, Regionalkulturen und Zwischenfrüchte – in den Versuchsjahren 2009–2013 des Versuchsstandortes Trossin	45
Tabelle 10:	Deckungsbeitragsanalyse (DB in €/ha) mit Gegenüberstellung von Produktionskosten [€/ha] und Erlös [€/ha] auf Basis des CH ₄ -Ertrags [m ³ /ha] für die Fruchtarten und Fruchtfolgen des EVA-Versuchs – Anlage 3 – in Trossin, Versuchsjahre 2009–2012, berechnet von P. Kornatz & J. Müller (Universität Gießen). PSM = Pflanzenschutzmaßnahmen, ArEr = Arbeitserledigungskosten	52
Tabelle 11:	Deckungsbeitragsanalyse (DB in €/ha) mit Gegenüberstellung von Produktionskosten [€/ha] und Erlös [€/ha] auf Basis des CH ₄ -Ertrags [m ³ /ha] für die Fruchtarten und Fruchtfolgen des EVA-Versuchs – Anlage 4 – in Trossin, Versuchsjahre 2010–2013, berechnet von P. Kornatz & J. Müller (Universität Gießen). PSM = Pflanzenschutzmaßnahmen, ArEr = Arbeitserledigungskosten	54
Tabelle 12:	Jährliche Nitratkonzentration (in mg/l) im Sickerwasser der acht angebauten Fruchtfolgen in Abhängigkeit von Nitrataustrag (in kg N/ [ha*a]) und Sickerwassermenge (in mm/a), Standort Trossin, Mittelwerte aus 2 Anlagen.....	72
Tabelle 13:	Zusammenfassende ökologische Bewertung der 8 Fruchtfolgen des Energiefuchtfolgeversuchs am Standort Trossin (Erläuterung der FF siehe Tabelle 2, inkl. Abschlussfrucht, 2009–2013, Su3, AZ 31, warm-trocken). Grün = aus ökologischer Sicht besonders gut zu bewertende FF, Rot = in Hinsicht auf Indikator schlechteste Fruchtfolge.	81
Tabelle 14:	Anbaueignung (--, -, +, ++) verschiedener Energiepflanzen als Biogassubstrat auf leichten Böden bei periodischem Wassermangel auf Grundlage der EVA-Versuchsergebnisse	86

Abkürzungsverzeichnis

A III	EVA-Versuchsanlage des Grundversuchs
A IV	zeitlich versetzte EVA-Spiegelanlage des Grundversuchs
ADF	Säure (Acid)-Detergentien-Fasern = Lignocellulosekomplex
ADL	Säure (Acid)-Detergentien-Lignin = Lignin
ATB	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V.
Äq	Äquivalent
AZ	Ackerwertzahl
BBCH	Skala zur Beschreibung des Entwicklungsstadiums von Pflanzen anhand phänologischer Merkmale
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CAL	Calcium-Acetat-Lactat
CC	Cross Compliance
CH ₄	Methangas (chemische Formel)
CO ₂ -Äq	Kohlendioxid-Äquivalent, Maß für die Treibhausgasemission
D	Diluvial
DB	Deckungsbeitrag [€/ha]
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DWD	Deutscher Wetterdienst
EG	Europäische Gemeinschaft
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz, Energie-Einspeise-Gesetz
ET _a	aktuelle Evapotranspiration (Boden- und Blattverdunstung)
EU	Europäische Union
EVA	Abkürzung für den Projekttitle „ <u>E</u> ntwicklung und <u>V</u> ergleich von <u>A</u> nbausystemen ...“
EROI	Energy Return On Investment, Faktor für die Energieeffizienz (Energieertrag/Energieverbrauch)
FF	Fruchtfolge
FM	Frischmasse [Gewichtseinheit pro Hektar]
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow
GAP	Gemeinsame Agrar-Politik
GD	Gründüngung
GLÖZ	Guter landwirtschaftlicher und ökologischer Zustand
GPS	Ganzpflanzensilage
HF	Hauptfrucht
K	Kalium
kWh	Kilowattstunde, Maßeinheit der Energie
KEA	Kumulierter Energieaufwand [GJ/ha]
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
lfd. m	laufender Meter
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Lu-Kl	Luzerne-Klee gras
MF	Marktfrucht
Mg	Magnesium

MONICA	vom ZALF entwickeltes Simulationsmodell, das den Transport und die biochemische Umsetzung von Kohlenstoff, Stickstoff und Wasser in Agrarökosystemen beschreibt
N	Stickstoff
NawaRo	Nachwachsender Rohstoff
NH ₃ /NH ₄ ⁺	Ammoniak/Ammonium
N _{min}	mineralischer, pflanzenverfügbare und auswaschungsgefährdeter Stickstoff des Bodens (Nitrat + Ammonium)
NO ₃ ⁻	Nitrat
NDF	Neutrale Detergentien-Fasern – Gesamtheit der Strukturkohlenhydrate Cellulose, Hemicellulose und Lignin
NfE	N-freie Extraktstoffe
NS	Niederschlag [mm]
oTS	organische Trockensubstanz [%]
oTM	organische Trockenmasse [Gewichtseinheit]
P	Phosphor
RF	Rohfaser
RL	Rohlipid, Rohfett
RP	Rohprotein
<i>S. b.</i>	<i>Sorghum bicolor</i> (Futter-/Zuckerhirsen)
<i>S. b. x s.</i>	<i>Sorghum bicolor x sudanense</i> (Sudangrashybride)
SMUL	Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
<i>Sorghum</i> sp.	taxonomische Bezeichnung auf Gattungsebene, wenn mehrere Arten in Frage kommen (sp. = species)
SZF	Sommerzwischenfrucht
T	Temperatur [° C]
THG	Treibhausgas
TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
TM	Trockenmasse [Gewichtseinheit pro Hektar]
TS	Trockensubstanz [%]
US	Untersaat
WNE	Wassernutzungseffizienz [kg TM ha ⁻¹ mm ⁻¹]
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WZF	Winterzwischenfrucht
ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung Müncheberg
ZF	Zweitfrucht

1 Einleitung

Unter den Bedingungen Mitteleuropas steht prinzipiell eine Vielzahl von Fruchtarten zur Verfügung, die für eine energetische Nutzung geeignet sind. Es existierten aber Unsicherheiten hinsichtlich der Einbindung alternativer Energiepflanzen in Fruchtfolgesysteme und deren Gesamtproduktivität. Die wichtigste Zielsetzung dieses Projektes war es folglich, durch vielfältige Anbausysteme zu einer Diversifizierung landwirtschaftlicher Produktionsmuster und zur Aufweitung von Fruchtfolgen beizutragen. Anbausysteme, die mit einer weiten Ausnutzung der Vegetationszeit und hohen Bodenbedeckungsgraden verbunden sind, können nicht nur in ertraglicher Hinsicht interessant sein. Sie bieten auch Ansätze für den vorbeugenden Boden- und Gewässerschutz. Eine möglichst gute Faktoreffizienz ist daher neben den erzielbaren Energieerträgen je Flächeneinheit entscheidendes Kriterium für eine ökonomische und ökologische Bewertung von Fruchtfolgen zur Gewinnung energetisch nutzbarer Substrate. Vor diesem Hintergrund wurde im Jahr 2005 ein bundesweiter Fruchtfolgeversuch konzipiert, der durch Landesanstalten, Landesforschungsanstalten, Landwirtschaftskammern und Landesämter aus acht Bundesländern in ackerbaulich sehr unterschiedlich geprägten Regionen umgesetzt und betreut wurde. Zur Gestaltung von nachhaltigen und produktiven Anbausystemen wurde neben der Einbindung von Hauptfrüchten auch auf den Anbau von Zwischenfrüchten, mehrjährigen Ackerfutmischungen und Zweikultursystemen, in welchen sowohl Sommer- als auch Winterkulturen vergleichbare Ertragsmengen zum Jahresertrag beisteuern sollen, Wert gelegt. Der Energiefruchtfolge-Grundversuch im Teilprojekt 1 wurde durch eine Reihe zusätzlicher Teil- und Satellitenprojekte begleitet, die eine Vielzahl an Fragestellungen hinsichtlich einer nachhaltigen Fruchtfolge- und Anbaugestaltung aufgegriffen haben (FNR 2010). Das Gesamtkonzept des EVA-Verbundes zeigt Abbildung 1.

Mit der zweiten Projektphase von EVA (EVA II) wurde im Jahr 2009 ein wichtiges Kapitel in der Anbauforschung für Energiepflanzen fortgeschrieben. Mit Fortsetzung des umfangreichen Energiefruchtfolgeversuches sollten in erster Linie Ergebnisse aus EVA I bestätigt, abgesichert und weiterentwickelt werden. Die Erkenntnisse aus den EVA-Untersuchungen sollen für den Praktiker geeignete pflanzliche Substrate zur Biogasproduktion mit hohen Trockenmasse- sowie Gaserträgen bei Beachtung ökologischer und ökonomischer Nachhaltigkeitskriterien aufzeigen.

In diesem Abschlussbericht werden die Ergebnisse des Energiefruchtfolgeversuches (Teilprojekt 1) vom Standort Trossin, einem leichten D-Süd-Standort im mitteldeutschen Trockengebiet, vorgestellt. Neben der Ertragsleistung (Frisch- und Trockenmasse-Ertrag, TS-Gehalt) der angebauten Fruchtarten wird auf Gasbildungspotenziale, ökologische Bilanzen und Kosten-Ertrags-Relationen eingegangen.

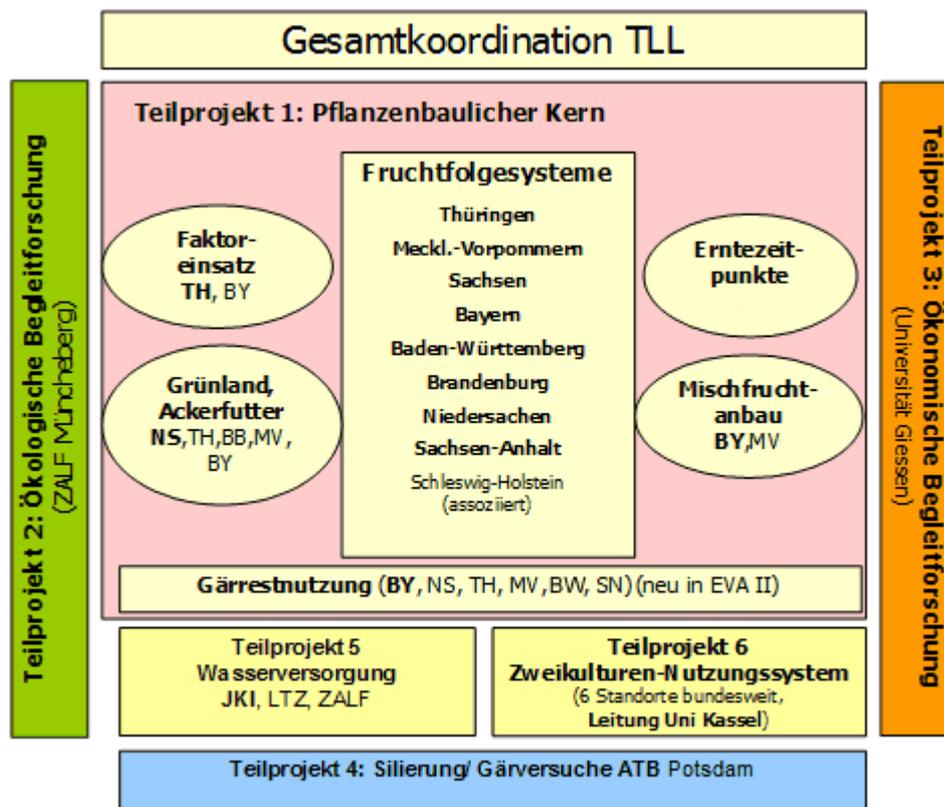


Abbildung 1: Gesamtkonzept des Verbundprojektes EVA II (Quelle: FNR, TLL)

2 Methodik

2.1 Charakteristik des Versuchsstandortes

Der Fruchtfolgeversuch wurde auf einem leichten, mittelschluffigen Sandboden (Su3 – Ap-Horizont: 67 % Sand, 27 % Schluff, 6 % Ton) in Trossin (Dübener Heide) im Landkreis Nordsachsen angelegt (Bänderparabraunerde mit der Ackerwertzahl 31). Der Diluvial-Standort liegt 120 m ü. NN und ist charakterisiert durch eine Jahresdurchschnittstemperatur von 8,9° C sowie einem 30-jährigen Niederschlagsmittel von 554 mm (DWD 1961–1990). An der nächstgelegenen Wetterstation des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) in Spröda wurden 9,8 °C und 463 mm Niederschlag im Mittel der Jahre 1994 bis 2008 gemessen. Trossin zeichnet sich durch eine ausgeprägte Vorsommertrockenheit und eine geringe Wasserspeicherkapazität des Bodens aus. Die Nährstoffversorgung der Grundnährstoffe P, K und Mg ist gut bis sehr gut, der pH-Wert liegt bei 5,7. Trossin gilt als repräsentativ für die südlichen Gebiete der Fahlerdebodengesellschaften der Moränengebiete im mitteldeutschen Trockengebiet. Die Produktionsschwerpunkte liegen im Anbau von Winterroggen, Kartoffeln und Mais sowie in der Tierproduktion und Forstwirtschaft (Winterroggen-Kartoffel-Region). Trossin wird dem Boden-Klima-Raum 104 – trocken-warme diluviale Böden des ostdeutschen Tieflandes – zugeordnet (Abbildung 2).

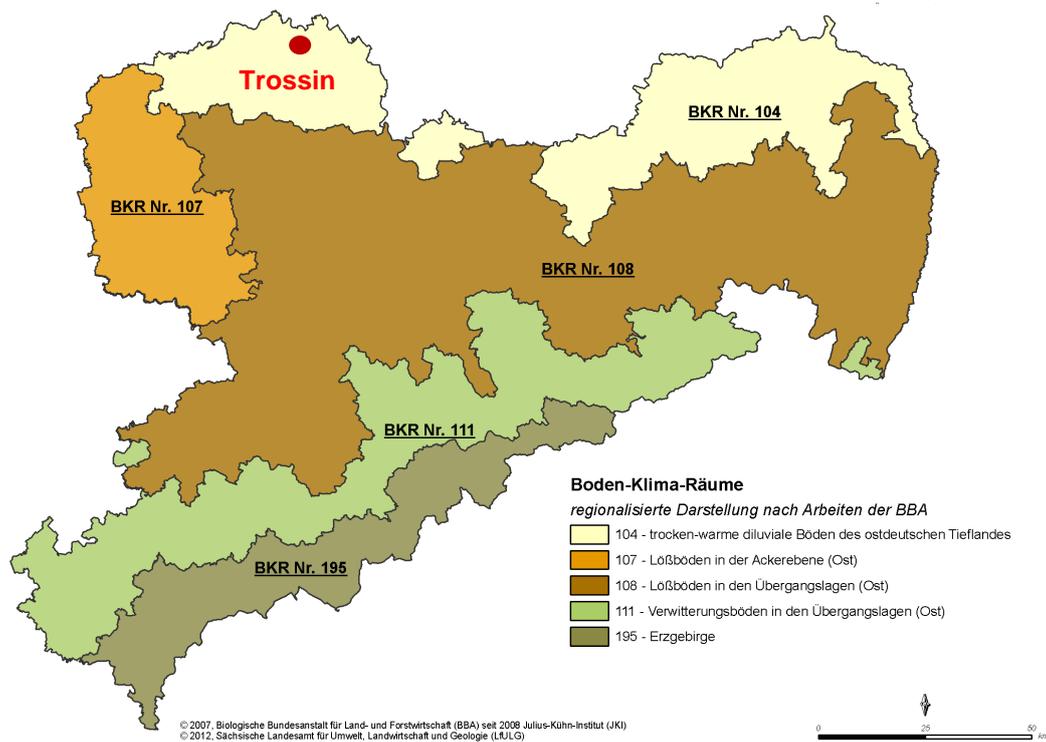


Abbildung 2: Lage des Versuchsstandortes Trossin in Sachsen und Zuordnung zum Boden-Klima-Raum 104 (hellgelb) – trocken-warme diluviale Böden des ostdeutschen Tieflandes (Kartenquelle: LfULG 2012)

2.2 Witterungsverlauf

Die Witterungsparameter Lufttemperatur in 2 m Höhe [$^{\circ}$ C], Niederschlagsmenge [mm] und Globalstrahlung [W/m^2] für den Versuchsstandort Trossin (Datenquelle: Wetterstation Spröda des LfULG) der Versuchsjahre 2009–2013 (Auswertung bis 31. Juli 2013 – Ernte der Abschlussfrucht auf der Spiegelanlage) sind im Vergleich zum 30-jährigen (Datenquelle: Deutscher Wetterdienst 1961–1990) und 15-jährigen Mittel (Wetterstation Spröda 1994–2008) in den Abbildungen 3 bis 5 dargestellt. Die agrarmeteorologische Messstation Spröda befindet sich im gleichen klimatischen Raum wie Trossin (Boden-Klima-Raum 104: trocken-warme diluviale Böden des ostdeutschen Tieflandes).

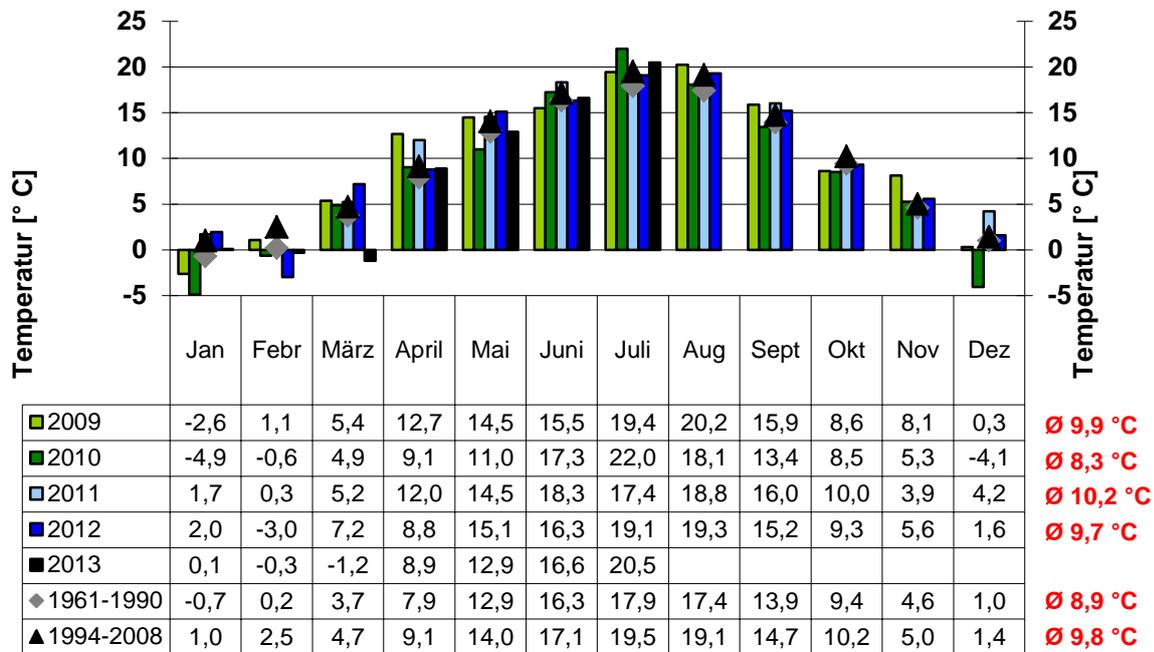


Abbildung 3: Monatliche Mittel der Lufttemperatur (2 m Höhe, in °C):

- hellgrün: Versuchsjahr 2009, Trossin (Wetterstation Spröda des LfULG)
- dunkelgrün: Versuchsjahr 2010, Trossin
- hellblau: Versuchsjahr 2011, Trossin
- dunkelblau: Versuchsjahr 2012, Trossin
- schwarz: Versuchsjahr 2013 (bis 31.07.), Trossin
- graues Viereck: 30-jähriges Temperatur-Monatsmittel (1961–1990), Mittelwerte von Torgau und Oschatz (Deutscher Wetterdienst)
- schwarzes Dreieck: Lufttemperatur-Monatsmittel des Zeitraums 1994–2008, Trossin (Wetterstation Spröda)

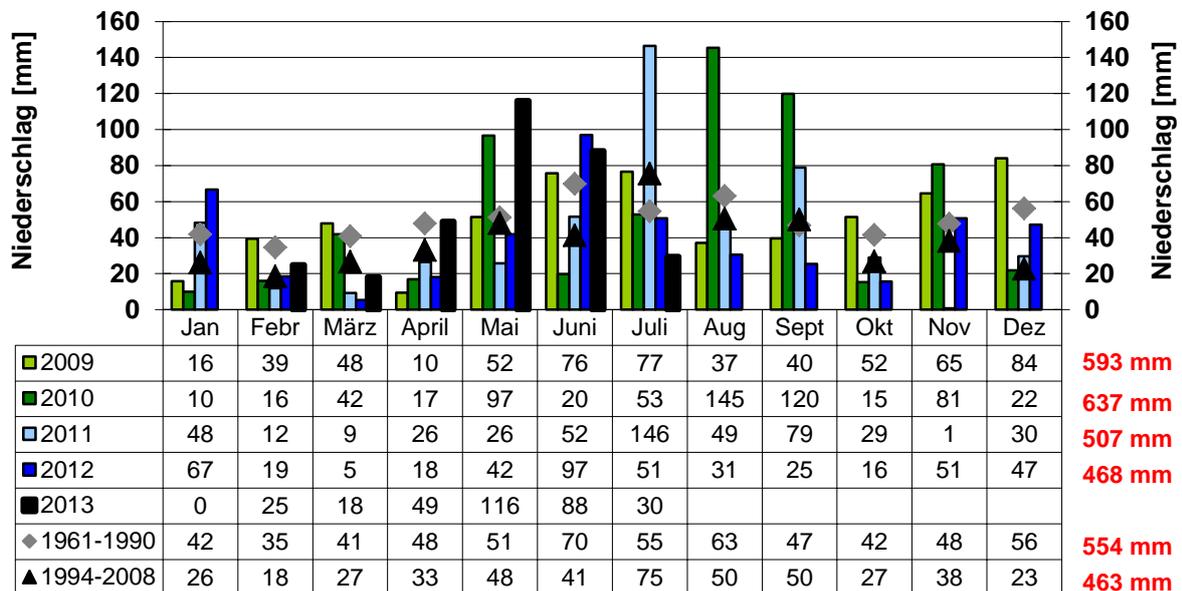


Abbildung 4: Monatliche Niederschlagssummen (in mm):

- hellgrün: Versuchsjahr 2009, Trossin (Wetterstation Spröda des LfULG)
- dunkelgrün: Versuchsjahr 2010, Trossin
- hellblau: Versuchsjahr 2011, Trossin
- dunkelblau: Versuchsjahr 2012, Trossin
- schwarz: Versuchsjahr 2013 (bis 31.07.), Trossin
- graues Viereck: monatliche Niederschlagssummen im Mittel der Jahre 1961–1990, Mittelwerte von Torgau und Oschatz (Deutscher Wetterdienst)
- schwarzes Dreieck: monatliche Niederschlagssummen im Mittel der Jahre 1994–2008, Trossin (Wetterstation Spröda)

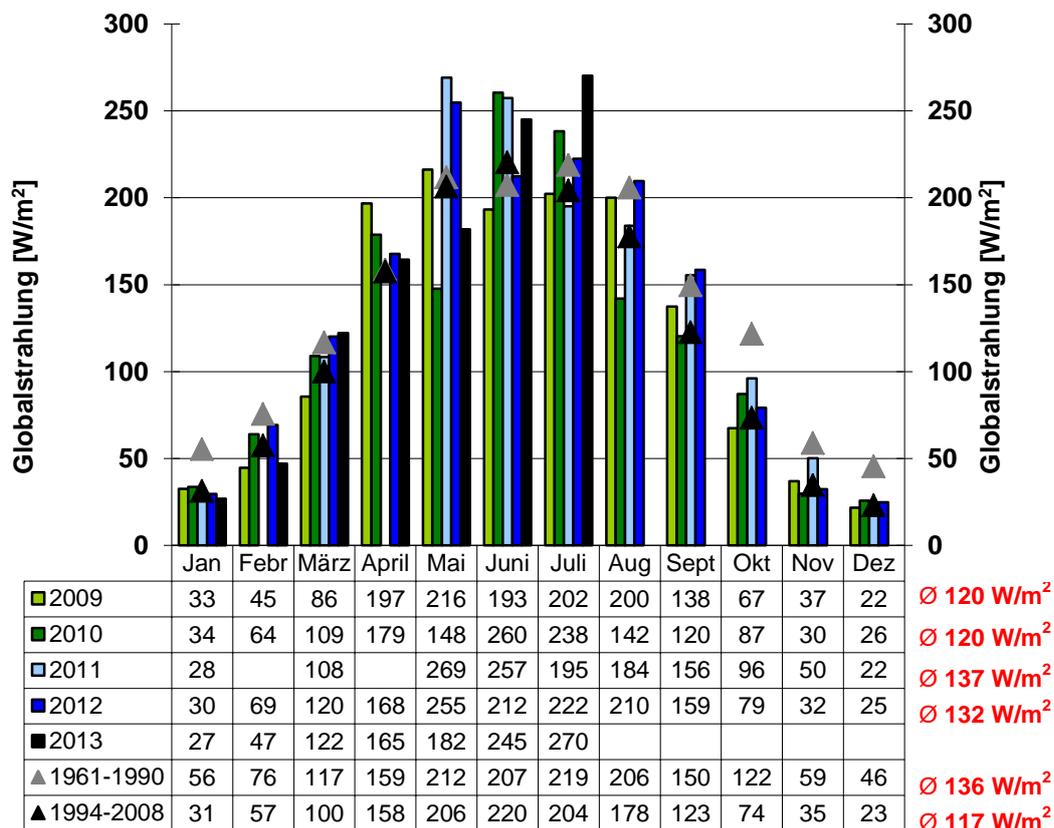


Abbildung 5: Monatsmittel der Globalstrahlung (in W/m²):

- hellgrün: Versuchsjahr 2009, Trossin (Wetterstation Spröda des LfULG)
- dunkelgrün: Versuchsjahr 2010, Trossin
- hellblau: Versuchsjahr 2011, Trossin
- dunkelblau: Versuchsjahr 2012, Trossin
- schwarz: Versuchsjahr 2013 (bis 31.07.), Trossin
- graues Viereck: 30-jähriges Globalstrahlung-Monatsmittel (1961–1990), Mittelwerte von Torgau und Oschatz (Deutscher Wetterdienst)
- schwarzes Dreieck: Globalstrahlung-Monatsmittel der Jahre 1994–2008, Trossin (Wetterstation Spröda)

Das Jahr 2009 war mit einer Durchschnittstemperatur von 9,9 °C am Versuchsstandort Trossin ein Grad wärmer im Vergleich zum langjährigen Mittel (DWD 1961–1990). In den letzten Jahren (1994–2008) zeichnete sich jedoch bereits ein erheblicher Temperaturanstieg von durchschnittlich 0,9 °C ab (Wetterstation Spröda). Die mittlere Niederschlagssumme von 554 mm (DWD 1961–1990) bzw. 463 mm (Wetterstation Spröda 1994–2008) wurde im Jahr 2009 mit 593 mm Niederschlag überschritten. Das Jahr begann mit einem sehr kalten, frostigen Januar (Ø -2,6 °C) und starken Schneefällen im Februar (39 mm Niederschlag). Es folgte ein warmes Frühjahr (März–Mai) mit ausgeglichenen Niederschlägen in den Monaten März und Mai. Von Bedeutung für die bereits angebauten Getreidekulturen war der außergewöhnlich warme (Ø 12,7 °C) und sonnenscheinreiche (Ø 197 W/m²), aber auch wasserarme April (9,5 mm Niederschlag). Der Sommer (Juni) startete zunächst sehr kühl und wechselhaft (Ø 15,5 °C, 76 mm Niederschlag), was eine zögerliche bzw. langsame Bestandesentwicklung der C4-Pflanzen, insbesondere der Sorghumhirsen, zur Folge hatte. Im weiteren Verlauf war er warm (Juli/August: Ø 19,4/20,2 °C) mit schlechter Wasserversorgung der Bestände im August (nur 37 mm Niederschlag). Einen positiven Einfluss auf das Wachstum der Sorghumhirsen hatte der sehr warme (Ø 15,9 °C), sonnige (Ø 138 W/m²) und relativ niederschlagsarme (39,5 mm Niederschlag) September. Die letzten drei Monate brachten nasse Witterung (Oktober: 51,5 mm, November: 65 mm, Dezember: 84 mm Nie-

derschlag). Nach einem etwas zu kalten Oktober ($\bar{\varnothing}$ 8,6 °C) war der November mit durchschnittlich 8,1 °C deutlich zu mild.

Das Jahr 2010 war mit einer Durchschnittstemperatur von 8,3 °C am Versuchsstandort Trossin 0,6 °C kühler im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961–1990). Bei Vergleich der Jahresdurchschnittstemperaturwerte der Jahre 1994 bis 2010 war dieses Jahr das zweitkälteste nach 1996 mit durchschnittlich 7,4 °C. Die mittlere Niederschlagssumme von 554 mm (1961–1990) bzw. 463 mm (1994–2008) wurde mit 637 mm Niederschlag im Jahr 2010 erheblich überschritten. Mit einer durchschnittlichen Strahlung von 120 W/m² pro Monat und einer Jahressumme von 1.437 kWh/m² entsprach die Globalstrahlung den Werten der letzten Jahre. Das Jahr (Januar und Februar) begann sehr kalt und frostig mit Durchschnittswerten im Minusbereich. Die geringen Niederschlagsmengen von 10 bzw. 16 mm fielen in Form von Schnee. Das Frühjahr verlief sehr wechselhaft. Nach einer winterlichen, schneereichen ersten Märzhälfte verbunden mit starker Bodennässe, welche die Aussaat des Sommergetreides verzögerte, folgte eine milde (5–15 °C), sonnige, aber sehr trockene Phase bis Ende April. Viel zu kühle Temperaturen im Mai ($\bar{\varnothing}$ 11 °C) und kalte Nächte führten zu einem erschwerten Aufgang der wärmeliebenden C4-Pflanzen sowie lückenhaften Beständen. Mit knapp 100 mm Niederschlag fiel in diesem Monat die doppelte Regenmenge wie standortüblich. Trotz optimaler Wachstumstemperaturen im Juni konnten die C4-Pflanzen aufgrund starken Wassermangels ihre Bestände nur wenig vergrößern und verdichten ($\bar{\varnothing}$ 17 °C, 20 mm Niederschlag). Der Juli war durch große Hitze ($\bar{\varnothing}$ 22 °C), vielfach mit Temperaturen über 30 °C, und einem anhaltenden starken Wasserdefizit des Bodens gekennzeichnet. Die Trockenperiode wurde durch Starkregenfälle Ende Juli und im August abgelöst. Im August wurde eine für diesen Standort untypisch hohe Niederschlagssumme von 145 mm erfasst. Zum Vergleich fielen in diesem Monat im Mittel der Jahre 1961–1990 durchschnittlich 63 mm Niederschlag und im Mittel der Jahre 1994–2008 ca. 50 mm Niederschlag. Die durch den Regen aufgefüllten Bodenwasservorräte, verbunden mit den günstigen Temperaturen ($\bar{\varnothing}$ 18 °C), hatten einen positiven Einfluss auf das Wachstum vieler Sommerkulturen. Die Vegetationsperiode 2010 endete mit einem etwas zu kühlen ($\bar{\varnothing}$ 13,4 °C) und viel zu nassem September. Im September wurden 120 mm Niederschlag, ca. die 2,5-fache Menge verglichen mit den Mitteln der Jahre 1961–1990 und 1994–2008, gemessen. Die sich fortsetzenden zu kühlen Temperaturen im Monat Oktober ($\bar{\varnothing}$ 8,5 °C) bestimmten den Erntetermin der Sorghumhirsen Anfang Oktober maßgeblich.

Das Jahr 2011 war mit einer Durchschnittstemperatur von 10,2 °C am Versuchsstandort Trossin 1,3 °C wärmer im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961–1990), aber nur 0,4 °C wärmer im Vergleich zum Mittel der letzten Jahre (1994–2008). Mit einem Jahresniederschlag von 507 mm wurden die für den Standort relativ hohen Niederschlagssummen der Vorjahre 2009 bzw. 2010 und die mittlere Niederschlagssumme von 554 mm (1961–1990) unterschritten. Auf einen milden Jahresbeginn (Januar und Februar) mit Durchschnittstemperaturen im Plus-Bereich und wenigen Frosttagen folgte, wie schon in den beiden Vorjahren, ein warmer, sonniger, aber sehr trockener Frühling. Zu Sommerbeginn (Juni) setzten sich die überdurchschnittlich warmen und niederschlagsarmen Witterungsverhältnisse fort. Der Rest des Sommers (Mitte Juni–August) war geprägt von wechselhaften Wetterlagen. Auf kurze warme bis heiße Phasen folgten kühle Tage mit Starkregenfällen. Das Wasserdefizit der Vormonate wurde im Juli mit 146 mm Niederschlag ausgeglichen. Negativ zu bewerten waren die vielen relativ kühlen Sommernächte. An diese verregnete Zeit schloss sich ein goldener Herbst mit überdurchschnittlich milden, teilweise sogar sommerlichen Temperaturen und nur wenigen, dann aber starken Niederschlägen an. Die Oktober-Temperatur von 10 °C lag aufgrund eines kräftigen Temperatursturzes in der zweiten Dekade allerdings nicht über dem Normalwert. Nach einem extrem wasserarmen November ($\bar{\varnothing}$ nur 1 mm Niederschlag) endete das Jahr 2011 mit einem deutlich zu warmen und sehr windigen Dezember.

Der sehr milde und nasse Beginn des Jahres 2012 mit einem Temperaturplus von 2 °C wurde durch einen sehr frostigen ($\bar{\varnothing}$ -3 °C), trockenen und schneearmen Februar aufgehoben. Das Frühjahr (März–Mai) ist warm,

mit Ausnahme einzelner Kaltluftvorstöße im April, und sonnenscheinreich ausgefallen. Die für diese Region charakteristische Vorsommertrockenheit beeinflusste auch in diesem Jahr das Wachstum der Winterungen und Auflaufen vieler Sommerhauptfrüchte erheblich. Obwohl die Temperaturen der Sommermonate laut der Wetterstations-Aufzeichnungen insgesamt als durchschnittlich einzustufen sind, mussten die Kulturpflanzen auf dem Acker aufgrund vieler kühler Tage bis Mitte Juli ein Wärmedefizit in Kauf nehmen. Ende Mai und Juni häuften sich Starkregenfälle (Ø 100 mm). Erst Anfang August stellte sich eine warme, sonnige, dafür aber auch, mit nur der Hälfte der durchschnittlichen Niederschlagssumme, sehr trockene Witterungsphase ein. Im Herbst wechselten sich wärmere, trockenere, sonnenscheinreiche und kühlere, feuchtere Abschnitte ab. Mit Ausnahme von Ende November und Anfang–Mitte Dezember (kalt, Schneefall) begann der Winter sehr mild und regenreich.

Das Jahr 2013 war geprägt durch einen relativ milden Winter, der jedoch von Frostperioden, größtenteils ohne schützende Schneedecke, unterbrochen wurde. Die von Mitte März bis Mitte April andauernde Kälte brachte einen Vegetationsrückstand der Abschlussfrucht von ca. 2 Wochen. Nach ein paar sonnenscheinreichen Sommertagen Ende April blieb das Frühjahr 2013 insgesamt im durchschnittlichen Temperaturbereich. Extreme Dauerniederschläge bis hin zu Starkregeneignissen prägten den Vorsommer. Vom Hochwasser war die Versuchsfläche jedoch nicht betroffen. Auf die Nässe folgten Hitze und Trockenheit verbunden mit geringfügigen Blattschäden am Winterroggen. Die wenigen Niederschläge im Juli (Ø 30 mm) traten in der letzten Monatswoche in Form von Gewittern auf.

Zusammenfassend zeichnet sich, unter Ausschluss des sehr kühlen Versuchsjahres 2010, eine Temperaturerhöhung auf Jahresdurchschnittswerte > 9,5 °C ab. Diese Werte liegen weit über dem DWD-Standortmittel von 8,9 °C für den Zeitraum 1961–1990. Temperaturaufnahmen seit 1994 bekräftigen diese Vermutung (1994–2008: Ø 9,8 °C). Der Versuchsstandort Trossin ist demnach interessant bei Fragestellungen zum Energiepflanzenanbau unter Beeinflussungen des Klimawandels (Globale Erwärmung).

Eine Zusammenfassung der Witterung der einzelnen Versuchsjahre und eine Bewertung für das pflanzliche Wachstum sind in Tabelle 1 aufgezeigt.

Tabelle 1: Bewertung der Witterung der einzelnen Versuchsjahre am Standort Trossin

Jahr	Ø-Temperatur/ Niederschlagssumme	Witterung	Auffälligkeiten	Bewertung für Pflanzenwachstum
2009	T = 9,9 °C NS = 593 mm	warm/feucht	April Trockenheit	günstige Wachstumsbedingungen
2010	T = 8,3 °C NS = 637 mm	kühl/feucht	Vorsommertrockenheit (April, Juni) kalte Mainächte günstiger Sommer	günstig für an gemäßigten Klimaraum adaptierte Kulturen erschwerter Aufgang und Wachstum von C4-Pflanzen

Jahr	Ø-Temperatur/ Niederschlagssumme	Witterung	Auffälligkeiten	Bewertung für Pflanzenwachstum
2011	T = 10,2 °C NS = 507 mm	warm/durchschn.	plötzlicher Wintereinbruch Vorsommertrockenheit (März- Mai) goldener Herbst	Frostschäden mgl. Auflauf- und Etablierungsprobleme, vor allem für Zweitfruchtbestände
2012	T = 9,7 °C NS = 468 mm	warm/trocken	April-trockenheit viele zu kühle Frühjahrs- und Sommer-nächte Spätsommertrockenheit	Auflauf- und Etablierungsprobleme der Sommerungen Entwicklungsdefizite im Frühsommer Trockenschäden im Spätsommer
2013	(bis 31.07.)	durchschnittl.	Frostperioden ohne schützende Schneedecke Starkregen im Frühsommer Trockenheit im Spätsommer	verspäteter Vegetationsbeginn günstige Wachstumsbedingungen für C3-Kulturen geringfügige Trockenschäden im Spät- sommer
Ø	Mittel der Jahre 1961-1990 (DWD) Temperatur: 8,9 °C Niederschlag: 554 mm		Mittel der Jahre 1994-2008 (LfULG) Temperatur: 9,8 °C Niederschlag: 463 mm	

2.3 Versuchsdurchführung

2.3.1 Versuchsaufbau

Die Versuchsfläche befindet sich auf der Versuchsstation der Biochem Agrar GmbH in Trossin. Es handelt sich um eine randomisierte Blockparzellenanlage (Länge: 160 m, Breite: 40 m), bestehend aus zwei Versuchsanlagen (eine Anlage mit 10 Prüfgliedern mal vier Wiederholungen = 40 Parzellen [für den EVA-Fruchtfolgeanbau wurden nur 8 x 4 Prüfglieder = 32 Parzellen genutzt] und um ein Jahr zeitlich versetzt angelegte Spiegelvariante mit 8 Prüfgliedern/Fruchtfolgen mal vier Wiederholungen = 32 Parzellen). Die Durchführung des Energiefruchtfolgeversuches begann im Herbst 2008/Frühjahr 2009 mit Anlage 3, bei der Spiegelung (Anlage 4) erfolgte die erste Aussaat im Herbst 2009 bzw. Frühjahr 2010. Der Fruchtfolgeversuch des Projektes EVA II baut auf Vorversuche des Projektes EVA der Jahre 2005 bis 2009 (Anlage 1 und 2) auf. Die Größe einer Anlageparzelle beträgt 36 m² (6 m x 6 m), geerntet wurden 18 m² (3 m x 6 m). Die Versuchsanlage zeigt Abbildung 6 und Abbildung 7.

Beim vierjährigen Energiefruchtfolgeversuch wurden acht verschiedene Varianten untersucht (siehe Tabelle 2). Sie berücksichtigen sowohl traditionelle Kulturpflanzen mit langjähriger Anbauerfahrung wie Mais und Getreidepflanzen als auch neue Arten wie Futterhirsen und Sudangrashybriden (Sorghumhirsen). Weiterhin wur-

de die Kombination von Energiepflanzen und Marktfrüchten (u. a. Winterraps) geprüft. Zur Erhöhung der Biodiversität sind mit Luzerne-Kleegras, Kartoffel, Rübe und Sonnenblume weitere, für die Energiepflanzenproduktion interessante Kulturen in die Fruchtfolgen aufgenommen worden. Mit dem Ziel, im Anbausystem eine möglichst ganzjährige Bodenbedeckung zu sichern, um der Wind-/Wassererosion und Nährstoffauswaschung vorzubeugen sowie zur Ausnutzung der gesamten Vegetationszeit, kommt den Zwischenfrüchten (Sommer- als auch Winterkulturen) und dem Zweikultur-Nutzungssystem eine große Bedeutung zu.

Die Fruchtfolgesysteme 1 bis 5 wurden an allen Standorten der am Verbundprojekt (Teilprojekt 1) beteiligten Partner angebaut. Die Fruchtfolgen 1 bis 3 bestehen aus einer Kombination von C4- (Sorghumhirsen, Mais) und C3-Pflanzen (Getreideganzpflanzen). In der Getreide-Raps-Fruchtfolge 4 ist ein verstärkter Anbau von Marktfrüchten das Hauptmerkmal. Die Variante 5 ist ein mehrjähriges, N- und humusmehrendes Ackergras-Leguminosen-System (Luzerne-Kleegras). Die Anbausysteme 6 bis 8 sind regionalspezifische Fruchtfolgen. Es wurden für leichte Standorte typische Pflanzenarten, z. B. Kartoffeln, Sonnenblumen und Landsberger Gemenge (Zwischenfrucht), gewählt. Im Vergleich zu EVA I wurde der Hanf in Fruchtfolge 8 durch die Biogasrübe (massenbetonte Zuckerrübe) ersetzt.

Die Fruchtfolgevarianten schließen einheitlich mit dem Anbau von Winterroggen zur Kornnutzung ab (auf den leichten Böden in Trossin wurde, im Vergleich zu den anderen Versuchsstandorten im Bundesgebiet, der pflanzenbaulich anspruchsvolle Winterweizen durch Roggen ersetzt).

Um die Fruchtfolgesysteme unter verschiedenen Witterungsbedingungen am Versuchsstandort zu prüfen, wurde der Versuch in Anlage 3 (A III, Beginn: 2009) um ein Jahr versetzt als Spiegelvariante (Anlage 4, A IV – Beginn: 2010) erneut durchgeführt.

Tabelle 2: Acht Fruchtfolgesysteme (mit Angabe von Erntejahr, Nutzung und Fruchtfolgestellung der angebauten Kulturarten), die im Rahmen des Projektes EVA II (2009–2013) am Versuchsstandort Trosin (Sachsen) untersucht wurden. Erntejahr: Anlage 3/Anlage 4 (Spiegelung); Nutzung: GPS = Ganzpflanzensilage, GD = Gründüngung; US = Untersaat; Fruchtfolgestellung: SZF = Sommerzwischenfrucht, WZF = Winterzwischenfrucht, ZF = Zweitfrucht

FF	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013
1	Wintergerste (GPS) <i>Sorghum b.</i> (GPS, SZF)	Mais (GPS)	Wintertriticale (GPS) <i>Phacelia</i> (GD, SZF)	Winterroggen (Korn)
2	<i>Sorghum b. x s.</i> (GPS)	Grünroggen (GPS, WZF) Mais (GPS, ZF)	Wintertriticale (Korn, [GPS])	Winterroggen (Korn)
3	Mais (GPS)	Grünroggen (GPS, WZF) <i>Sorghum b. x s.</i> (GPS, ZF)	Wintertriticale (GPS) Weidelgras (GPS, SZF)	Winterroggen (Korn)
4	Hafersortenmischung (GPS)	Wintertriticale (GPS)	Winterraps (Korn)	Winterroggen (Korn)
5	Sommergerste mit US Luzerne-Klee gras (GPS)	Luzerne-Klee gras (GPS)	Luzerne-Klee gras (GPS)	Winterroggen (Korn)
6	Wintergerste (GPS)	Winterraps (GPS)	Landsb.Gem. (GPS, WZF) <i>Sorghum b. x s.</i> (GPS, ZF)	Winterroggen (Korn)
7	Mais (GPS)	Grünroggen (GPS, WZF) <i>Sorghum b.</i> (GPS, ZF)	Kartoffel (Knollen)	Winterroggen (Korn)
8	Wintergerste (GPS) Gelbsenf (GD, SZF)	Sonnenblume (GPS) <i>Phacelia</i> (GD, SZF)	Rübe (GPS)	Winterroggen (Korn)



Abbildung 6: EVA-Blockparzellenanlage in Trossin, links: Anlage 3 (Mai 2010), rechts: Spiegelvariante (Juli 2010)

Spiegelvariante – Anlage 4 (ab 2010)

5·d _α	3·d _α	8·d _α	2·d _α	7·d _α	4·d _α	6·d _α	1·d _α
4·c _α	7·c _α	1·c _α	6·c _α	8·c _α	2·c _α	3·c _α	5·c _α
6·b _α	8·b _α	5·b _α	7·b _α	3·b _α	1·b _α	4·b _α	2·b _α
1·a _α	2·a _α	3·a _α	4·a _α	5·a _α	6·a _α	7·a _α	8·a _α

Anlage 3 (ab 2009)

10·d _α	6·d _α	4·d _α	7·d _α	1·d _α	8·d _α	2·d _α	3·d _α	9·d _α	5·d _α
2·c _α	1·c _α	9·c _α	3·c _α	5·c _α	7·c _α	8·c _α	10·c _α	4·c _α	6·c _α
5·b _α	6·b _α	4·b _α	7·b _α	2·b _α	8·b _α	1·b _α	3·b _α	9·b _α	10·b _α
1·a _α	2·a _α	9·a _α	3·a _α	7·a _α	5·a _α	6·a _α	10·a _α	4·a _α	8·a _α

Abbildung 7: EVA II-Versuchsfläche – randomisierte Block-Parzellenanlage auf der Versuchsstation der Biochem agrar GmbH in Trossin (links: Spiegelvariante [Anlage 4] mit 8 Prüfgliedern x 4 Wiederholungen/32 Parzellen; Beginn: 2010; rechts: Grundversuch mit 10 Prüfgliedern x 4 Wiederholungen/40 Parzellen; Beginn: 2009 [Prüfglieder 9 und 10 werden vorerst nicht für Versuche im Rahmen des EVA-Projektes genutzt])

2.3.2 Anbautechnik

Hauptkriterium für einen erfolgreichen Energiepflanzenanbau ist der Trockenmasseertrag der oberirdischen Pflanzenteile, weil dieser bei den meisten Kulturarten mit dem Biogas/Methangas- bzw. Bruttoenergieertrag korreliert (RÖHRICHT et al. 2008; STOLZENBURG 2008). Geeignete Biogaspflanzen müssen sich weiterhin durch eine gute Silier- und Vergärbarkeit auszeichnen, wobei der TS-Gehalt des Erntegutes eine große Rolle spielt. Aus diesem Grund wurden an den Standort angepasste (leichte Böden, geringe Wasserspeicherkapazität des Bodens, geringe Niederschläge) Sorten gewählt, die hohe Mengen an Biomasse (Trockenmasse) für die Biogasproduktion bereitstellen sowie eine möglichst rasche Jugendentwicklung und ein günstiges Abreifeverhalten aufweisen. Angaben zu den angebauten Sorten sind Tabelle A1 im Anhang zu entnehmen.

Die agronomischen Maßnahmen erfolgten nach den Prinzipien der guten fachlichen Praxis.

Die Anhangtabellen A2 und A6 a/b (Abschlussfrucht) geben die Aussaat- und Aufgangsdaten sowie Saatstärken der einzelnen Fruchtfolgeglieder des Fruchtfolgeversuches wieder. Bei allen Fruchtarten wurde ein standortüblicher Aussaattermin gewählt. Im Versuchsjahr 2010 konnte das Sommergetreide (Sommergerste und Hafer) aufgrund starker Bodenvernässung im März erst relativ spät (Ende März) in den Boden gebracht werden. Infolge sehr niederschlagsarmer Witterungsverhältnisse im Frühjahr 2011 und 2012 sind die Mitte Mai gedrillten Sorghumhirsen in Zweitfruchtstellung nicht aufgegangen. Mitte Juni 2011 bzw. 2012 wurde deshalb umgebrochen und jeweils erneut ausgesät.

Die Berechnung der Aufwandmenge an Gesamtstickstoff für die einzelnen Pflanzenarten erfolgte mit Hilfe des Programms BEFU (FÖRSTER et al. 2009, 2010, 2011, 2012). Dieses Programm berücksichtigt den mineralischen Nährstoffgehalt des Bodens (N_{\min} -Gehalt) vor der Düngung im Frühjahr und die Ertragserwartung der Fruchtart (Nährstoffentzug bei der Ernte). In Tabelle A3 und A6 a/b sind die Düngermengen für mineralischen Stickstoff angegeben. Im Jahr 2009 erfolgte die N-Düngergabe mittels KAS (Kalkammonsalpeter aus 13,5 % Nitratstickstoff, 13,5 % Ammoniumstickstoff und 22 % Calciumcarbonat). Aufgrund relativ niedriger S_{\min} -Werte des Bodens im Frühjahr der Jahre 2010 bis 2013 wurde ein Stickstoffdünger mit wasserlöslichem Schwefel (Piamon 33 S) verwendet (Ausnahme: Düngung von Kartoffel und Rübe im Jahr 2012 mit KAS).

Die Grunddüngung aller Prüfglieder wurde vor der Aussaat der Kulturen mit einem Zweinährstoffdünger aus Calcium- und Magnesiumcarbonaten durchgeführt, im Jahre 2010 mit einer Kombination aus Kalium, Magnesium, Natrium und Phosphor und zu Vegetationsende 2011/Vegetationsbeginn 2012 mit Kalium, Calcium, Magnesium und Phosphor:

Anlage 3

- 28.08.2008: Dolokorn (Ca, Mg) – 10 dt/ha
- 10.11.2010: Kornkali (K, Mg, Na) – 60-150 kg/ha
- 10.11.2010: Triple-Superphosphat (P) – 20 kg/ha
- 17.11.2011: 60er Kali (K, Mg) – 100 kg/ha
- 17.11.2011: Triple-Superphosphat (P) – 30 kg/ha
- 06.03.2012: Kohlensäurer Magnesiumkalk (Ca, Mg) – 15 dt/ha

Anlage 4

- 10.11.2010: Kornkali (K, Mg, Na) – 60-150 kg/ha

- 10.11.2010: Triple-Superphosphat (P) – 20 kg/ha
- 17.11.2011: 60er Kali (K, Mg) – 100 kg/ha
- 17.11.2011: Triple-Superphosphat (P) – 30 kg/ha
- 06.03.2012: Kohlensaurer Magnesiumkalk (Ca, Mg) – 15 dt/ha

Weil Energiepflanzen im Vergleich zu Marktfrüchten nicht vollkommen „rein“ (ohne Unkräuter) geerntet werden müssen, ist der exzessive Einsatz von Pflanzenschutzmitteln unnötig. Je nach Pflanzenart und Unkrautwachstum bzw. Schädlingsbefall wurde eine niedrige bis mittlere Behandlungsintensität gewählt. Gegen einkeim- und zweikeimblättrige Schadkräuter kamen jeweils für die Pflanzenart zugelassene und empfohlene Herbizide zum Einsatz. Zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Pilzkrankheiten und zur Bekämpfung von beißenden sowie saugenden Insekten wurden verschiedene Fungizide bzw. Insektizide verwendet. Eine Auflistung gibt Tabelle A4 und Tabelle A6 (Abschlussfruchtfolgeglied). Wachstumsregler wurden in den Getreidebeständen mit Ausnahme der Abschlussfrucht (Winterroggen zur Kornnutzung) nicht benötigt. Kurz vor der Ernte wurde das Kraut der Kartoffeln mit Hilfe von Reglone (2,5 l/ha) im Jahr 2011 bzw. Basta (2,0 l/ha) im Jahr 2012 abgetötet.

Die Ganzpflanzen-Ernte der Kernparzelle (3 m x 6 m = 18 m²) erfolgte mit Hilfe des Parzellenhäckslers Hege 212 (Abbildung 8, links) bzw. des Frontmähers (Sommergerste mit Untersaat, Luzerne-Kleegrass, Raps, Sonnenblume, *Phacelia*, Weidelgras, Gelbsenf, Örettich und Landsberger Gemenge, Abbildung 8, rechts). Das mit Hilfe des Frontmähers geerntete Material wurde in einem Tischhäcksler von Hege weiter zerkleinert. Die Rüben wurden per Hand geerntet und anschließend mit Hilfe einer Handsichel entblattet. Die Zerkleinerung erfolgte in einem Tisch-Rübenhäcksler vom Agrarhandel Spreeau. Im Jahr 2012 musste eine 10-wöchige Lagerung der Rüben (ohne Blatt) aufgrund von Personalmangel in Kauf genommen werden. Die Bergung der Kartoffeln erfolgte manuell nach Rodung mit Hilfe des 1-reihigen Siebkettensrodgers (Abbildung 9). Bei Beerntung der Marktfrüchte mit Hilfe des Parzellenmähers (Stoppelhöhe: 10 cm) erfolgte die Strohablage im Schwad und die Auswaage des geborgenen Stroh manuell. Das Stroh wurde auf den Acker zurückgeführt und mit den Getreidestoppeln in den Boden eingearbeitet (gescheibt, gepflügt, 2 x gegrubbert). Im Jahr 2011 konnten aufgrund eines Defekts beim Mähdrescher Wintertriticale und Winterrops nicht wie im Versuchsplan vorgesehen gedroschen werden, sondern wurden bereits im Stadium der Teigreife als GPS vom Feld gefahren. Die genauen Erntangaben sind im Anhang in den Tabellen A5 und A6 (Abschlussfrucht) nachzulesen.

Bei der Wahl des Erntetermins wurde das Entwicklungsstadium der Pflanzen (BBCH-Stadium), insbesondere aber die technologische Reife (Trockensubstanz[TS-]Gehalt) berücksichtigt. Dazu wurden regelmäßig Proben in der Randparzelle durchgeführt.

Aus dem frischen Erntegut mit einer Häcksellänge von 1 cm wurde Probenmaterial für die Inhaltsstoffanalysen, die Batchversuche (Silagen) sowie zur Bestimmung des Trockenmasse-Ertrages und TS-Gehaltes gewonnen. Die Sommerzwischenfrüchte Gelbsenf und *Phacelia* in den Fruchtfolgen 1 und 8 wurden aufgrund eines zu geringen Aufwuchses zur Gründüngung in den Boden eingearbeitet (mit Hege 80 PNI mit Kreiselegge). Ertragsdaten dieser Bestände konnten nur eingeschränkt, d. h. in einzelnen Versuchsjahren (Gelbsenf: 2011; *Phacelia*: 2011 und 2012) erhoben werden.



Abbildung 8: Ernte der Futterhirse (Zweitfrucht, GPS) am 19.10.2010 mit Hilfe des Feldhäckslers Hege 212 auf der Anlage 3 in Trossin (links); Ernte vom Weidelgras (SZF) am 17.09.2012 (Anlage 4) mit Hilfe des Frontmähers (rechts)



Abbildung 9: Kartoffelernte am 6. September 2011 in Trossin (Anlage 3): MTS 50 + 1-reihiger Siebkettenroder

2.3.3 Datenerhebung

Beim Fruchtfolgeversuch wurden umfangreiche Bonituren und Messungen erhoben, die als Datengrundlage zur vernetzenden Auswertung in Kooperation mit Versuchspartnern anderer Teilprojekte dienen, z. B. für Studien zu biotischen und abiotischen Folgewirkungen des Energiepflanzenanbaus sowie für ökonomische Bewertungen. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die aufgenommenen Prüfmerkmale am Standort Trossin.

Analytische Untersuchungen zur Bestimmung von Boden- und Pflanzeninhaltsstoffparametern wurden von der Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft durchgeführt. Die Batch-Gärtests liefen am ATB Potsdam-Bornim.

Tabelle 3: Erhobene Daten im Energiefruchtfolgeversuch am Standort Trossin (nach TLL 2009)

Prüfmerkmal	Beschreibung
Wetterdaten	Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, Luftfeuchte - Trossin, LfULG-Wetterstation Spröda
Boden	NO ₃ -N, NH ₄ -N, N _{min} , S _{min} , P, K, Mg, Corg, pH, Bodenwassergehalt Bodentiefen: 0-30, 30-60, 60-90 cm Termine: vor Anlage, Vegetationsbeginn, Ernte, Vegetationsende
Bestandesstruktur	Aufgang, Bestandesdichte, Bodenbedeckung, Bestandeshöhe, Unkrautbesatz, Lagerneigung, Mängelbonituren, Krankheiten und Schädlinge
Biomasseschnitte (abiotische Folgewirkungen)	Ertrag: FM, TM, TS Analyse: N-Gehalte Bodenproben: N _{min} , NO ₃ -N, NH ₄ -N, Bodenwassergehalt
Erntegut	FM-Ertrag, TM-Ertrag, TS-Gehalt, Makro- und Mikronährstoffe, Stärke, Gesamtzucker, WEENDER-Analyse, ADF, NDF, ADL
Silierung und Gasausbeute	Berechnung nach BASERGA (oTS, Biogas- und Methanausbeute, Methan-gehalt) Silier- und Batch-Tests (ATB Potsdam) - Biogasmatrix
Wirtschaftlichkeit	Arbeitsgänge, Betriebsmittel

Nachfolgend wird nur auf Methoden der Datenerhebung eingegangen, die zur Ergebnisdarstellung in diesem Bericht relevant sind.

Ertragsdatierung

Für jede Fruchtart der acht untersuchten Fruchtfolgen, teilweise mit Einschränkungen bei den Gründungspflanzen *Phacelia* und Gelbsenf in FF 1 und 8, wurden der Frisch- und Trockenmasseertrag sowie TS-Gehalt zum Zeitpunkt der Ernte erfasst. Der Frischmasseertrag einer Fruchtart wurde bei Beerntung einer Parzelle durch den Feldhäcksler Hege 212 mit integrierter Waage bzw. per Handwaage bei Ernte mit dem Frontmäher ermittelt. Aus der Erntemasse wurden parzellenweise repräsentative Proben für die Trockenmassebestimmung durch Trocknung bei 60 °C (vorläufiger Trockenmasseertrag) und 105 °C (absoluter Trockenmasseertrag) im Trockenschrank gezogen. Der Trockensubstanzgehalt (in %) ist das Verhältnis aus Trockenmasse und Frischmasse. Weil jede Kulturart auf 4 Parzellen angebaut wurde, wurde der Mittelwert aus 4 Proben berechnet (n = 4).

Pflanzeninhaltsstoffanalytik

Die mengenmäßige Bestimmung der Inhaltsstoffe Rohasche, Rohfett, Rohprotein, Rohfaser (schwer verdauliche Kohlenhydrate) und N-freie Extraktstoffe (leicht verdauliche Kohlenhydrate) in der Trockenmasse des Erntegutes (60 °C-Proben) erfolgte über Methoden der Weender-Futtermittelanalyse (nasschemische Untersuchung) gemäß VDLUFA-Methodenbuch III der Futtermitteluntersuchung (VDLUFA 1998). Die Verdaulichkeit der Rohfaser ist allerdings vom Anteil der einzelnen Gerüstsubstanzen abhängig, die über die Werte von NDF (neutrale Detergentien-Fasern – Gesamtheit der Strukturkohlenhydrate Cellulose, Hemicellulose und Lignin), ADF (Säure[acid]-Detergentien-Fasern – Lignocellulosekomplex) und ADL (Säure[acid]-Detergentien-Lignin – Lignin) ausgedrückt werden (Erweiterte Weender-Analyse nach van Soest). Der Stärke- und Gesamtzuckergehalt wurde polarimetrisch ermittelt. Um die Nährstoffentzüge (in kg/ha) durch die angebauten Energiepflanzen aus dem Boden in Abhängigkeit vom Trockenmasseertrag berechnen zu können, wurden

weiterhin die Mineralstoffgehalte der wichtigsten Makro- und Mikronährstoffe (in %, bezogen auf die Trockenmasse) im anorganischen Verbrennungsrückstand, der Rohasche, analysiert.

Bodenanalytik

Es wurden Bodenproben maschinell mit Hilfe eines Leichtfahrzeugs (John Deere), welches mit Schlaghammer und Bohrstock (Entnahmerille von 18 cm) ausgestattet ist, aus 3 Tiefen (0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm) im Frühjahr, nach der Ernte und im Herbst gezogen. Pro Parzelle wurden 2 bis 3 Einstiche gemacht. Der N_{\min} -Gehalt pro Bodenschicht [kg/ha] wurde nach VDLUFA (1997), A 6.1.4.1 analysiert. Die Bestimmung der löslichen N-Anteile (Nitrat- und Ammoniumstickstoff in kg/ha) erfolgte über fraktionierte Destillation nach VDLUFA-Methodenhandbuch I, A 6.1.3.2 (VDLUFA 1997). Phosphor und Kalium [mg/100 g] wurden in einem Calcium-Acetat-Lactat-(CAL-)Auszug (VDLUFA 1997, Methode I, A 6.2.1.1) und Magnesium [mg/100 g] in einer Calciumchloridlösung über Atomabsorption erfasst (VDLUFA 1997, Band I, A 6.2.4.1). Zur pH-Untersuchung mit Hilfe des Radiometers wurde der Boden mit einer Calciumchloridlösung versetzt. Bodenfeuchten (in Vol-%) konnten durch Trocknung der Bodenproben bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz ermittelt werden ($[\text{Auswaage}/\text{Einwaage} * 100]$).

Batch-Tests

Zur Untersuchung der Vergärbarkeit ausgewählter Energiepflanzen wurden Batchversuche mit frischem und siliertem Erntematerial nach der VDI-Richtlinie 4630 vom ATB in Potsdam-Bornim durchgeführt (Auflistung siehe Tabelle A8). Dafür wurde eine Mischprobe des gehäckselten Erntegutes (Häcksellänge: 10 mm) aller 4 Ernteparzellen eines Prüfgliedes zur Silierung in 1,5-l-Weckgläsern und zur Herstellung von Frostproben verwendet. Die Weckgläser wurden 90 Tage bei 25 °C (keine Verwendung von Siliermitteln) gelagert. Die Batch-Versuche erfolgten unter kontrollierten mesophilen Bedingungen über eine Dauer von 30 Tagen. 2-l-Faulflaschen aus Kunststoff wurden mit 50 g des zu untersuchenden Silage-Probenmaterials und zur Gewährleistung eines stabilen Gärprozesses mit 1,5 kg ausgefauter Gülle als Impfmateriale beschickt. Die gebildete Gasmenge (Verwendung einer Kontrolle je Versuchsansatz zur Erfassung möglicher Gasbildung aus dem Impfmateriale) wurde mit einer kalibrierten Gasmaus täglich erfasst (Korrektur des Gasertrages auf Standardbedingungen: 20 °C, 1.016 mbar). Der Methangehalt wurde mit einem Deponiegasmonitor bestimmt.

2.3.4 Berechnungs- und Bewertungsgrundlagen

2.3.4.1 Theoretische Ausbeuten sowie Hektarerträge von Biogas und Methan (nach BASERGA)

Um Aussagen über die Eignung bestimmter Energiepflanzen als Biogassubstrat treffen zu können, ist die Biogas- bzw. Methanausbeute und der ertragsabhängige Biogas- bzw. Methanhektarertrag entscheidend. Die Berechnung der theoretischen Biogas- und Methanausbeuten (in l/kg oTS) erfolgte anhand der über die Weender-Futtermittelanalyse bestimmten Inhaltsstoffe Rohprotein, Rohfaser, Rohfett, Rohasche und N-freie Extraktstoffe sowie deren Verdaulichkeiten mit Hilfe der Anleitung in der „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ (FNR 2005). Die Verdaulichkeitskoeffizienten wurden der DLG-Futterwerttabelle für Wiederkäuer (Tabelle 1 – frisches Erntegut; Universität Hohenheim 1997) entnommen und sind in Tabelle A7 (Anhang) zusammengefasst. Für die einzelnen Kulturarten wurde das dem Entwicklungsstadium zur Ernte (BBCH) nächste DLG-Stadium ausgewählt. Für Zuckerhirse wurden die Werte von Sudangras verwendet. Weil auch von Wintertriticale keine Angaben vorlagen, bildeten die mittleren Verdaulichkeitskoeffizienten von Winterweizen und Winterroggen die Berechnungsgrundlage. Bei der Luzerne-Klee gras-Mischung QA 10 in Fruchtfolge 5 ging Luzerne zu 25 % und Klee gras zu 75 % in die Ermittlung der Gesamtgasausbeute ein. Mit Deckfrucht (Sommergerste + Untersaat Luzerne-Klee gras) wurde ein Gasbildungsverhältnis von 60 % Sommergerste, 15 % Luzerne und 25 % Klee gras angenommen. Unter Einbeziehung des TM-Ertrages [dt/ha] und des oTS-Gehaltes [%] wurden die Hektarerträge an Biogas und Methan [m^3/ha] für die einzelnen Fruchtfolgeglieder bestimmt.

2.3.4.2 Biogas- und Methanausbeuten auf Grundlage der „ATB-Biogasmatrix“

Mit Hilfe der am ATB Potsdam-Bornim aus Batch-Versuchen mit Silagen gewonnenen Gasausbeuten (Methodik der Batch-Versuche siehe Kap.2.3.3) aller Versuchsstandorte der Jahre 2005 bis 2011 wurde eine ATB-Biogasmatrix erstellt. Diese enthält Richtwerte für oTS-Methanausbeuten (Relativwerte in %) von Silagen verschiedener Fruchtarten im Verhältnis zu Mais (Mais - Hauptfrucht = 100 % [338 l/kg_{oTS} nach KTBL], Stand: 07.12.2012). Die „ATB-Biogasmatrix“ ist in Tabelle A8 (Anhang) zu finden (HERRMANN et al. 2013). Silierverluste wurden in dieser nicht berücksichtigt.

Die Methan- und Biogasausbeuten [l/kg_{oTS}] der in Trossin angebauten Energiepflanzen wurden auf Grundlage dieser Matrix wie folgt berechnet:

$$\text{Methanausbeute} = \text{Methanausbeute relativ}_{\text{ATB}} * \text{Referenzwert}_{\text{KTBL}} \text{ Mais}$$

$$\text{Referenzwert}_{\text{KTBL}} \text{ Mais} = 338 \text{ l/kg}_{\text{oTS}}$$

Beispiel: Berechnung der Methanausbeute für Winterroggen-Hauptfrucht
Relativwert zu Mais-Hauptfrucht = 91 % (Tabelle A7)
Methanausbeute_{WiRoggen} = 0,91 * 338 l/kg_{oTS}
Methanausbeute_{WiRoggen} = 307,6 l/kg_{oTS}

Weil das LfULG mit Probenlieferungen an der Erstellung der ATB-Biogasmatrix beteiligt war, wurde bei Vorliegen eines Batch-Messwertes für ein Prüfglied folgendermaßen verfahren:

$$\text{Methanausbeute} = \text{Methanausbeute Batch PG}_{\text{ATB}} * \text{Referenzwert}_{\text{KTBL}} / \text{Methanausbeute Batch}_{\text{ATB}} \text{ Mais}$$

$$\begin{aligned} \text{Referenzwert}_{\text{KTBL}} \text{ Mais} &= 338 \text{ l/kg}_{\text{oTS}} \\ \text{Methanausbeute Batch}_{\text{ATB}} \text{ Mais} &= 355 \text{ l/kg}_{\text{oTS}} \end{aligned}$$

Beispiel: Berechnung der Methanausbeute für WiTriticale 2011, FF/PG 4, geerntet am 9. Juni 2011
Methanausbeute_{PG4 2011 Trossin} = 374,5 l/kg_{oTS} * 338 l/kg_{oTS} / 355 l/kg_{oTS}
Methanausbeute_{PG4 2011 Trossin} = 356,6 l/kg_{oTS}

Mit Hilfe des Methangehaltes einer Fruchtart (Vol-%, Matrix-Werte siehe Tabelle A7 oder gemessener Batch-Wert eines Prüfgliedes) kann die Biogasausbeute [l/kg_{oTS}] ermittelt werden.

$$\text{Biogasausbeute} = \text{Methanausbeute}_{\text{oben berechnet}} / \text{Methangehalt}_{\text{Matrix bzw. Batch-Wert PG ATB}}$$

Beispiel: Berechnung der Biogasausbeute für WiTriticale 2011, FF/PG 4, geerntet am 9. Juni 2011
Methangehalt dieses PG im Batch-Versuch am ATB ermittelt = 55,8 Vol%
Biogasausbeute_{PG 4 2011 Trossin} = 356,6 l/kg_{oTS} / 0,558
Biogasausbeute_{PG4 2011 Trossin} = 639,1 l/kg_{oTS}

2.3.4.3 Deckungsbeitragsanalysen (Kosten-Ertrags-Relationen)

Der Deckungsbeitrag [Euro/ha] wird durch Gegenüberstellung der Leistung einer Fruchtart als Biogassubstrat und dessen Produktionskosten ermittelt. Die im EVA-Projekt verwendete Definition des Deckungsbeitrages ist vergleichbar mit der nach DLG-Betriebszweigabrechnung für Nachkalkulationen üblichen Definition der Direkt- und Arbeitskosten freien Leistungen (DAL). Hierbei werden nur variable Parameter berücksichtigt. Flächenprämien und -nutzungskosten (Pachtzins, Grundsteuer usw.) sind fixe Leistungen und wurden demnach in dieser Analyse nicht erfasst.

Die Leistung einer Fruchtart als Biogassubstrat basiert auf dem nach der ATB-Biogasmatrix, unter Einbeziehung des absoluten TM-Ertrages [dt/ha] und oTS-Gehaltes [%], berechneten Methanhektarertrages [m^3/ha] bei Lagerverlusten von 12 % (Methodik siehe Kap. 2.3.4.2). Neben einer großen Menge leicht verdaulicher Inhaltsstofffraktionen (Rohfett, Rohprotein und leicht abbaubare Kohlenhydrate) zur Erzeugung hoher Methanausbeuten, zählt in größtem Maße der Trockenmasseertrag zu den ökonomisch wertbestimmenden Biogas-Substrateigenschaften. Ein Kubikmeter Methan wurde mit 0,33 Euro vergütet (Erlös). Zur Festsetzung der Methanvergütung wurde angenommen, dass der Silomais nur dann angebaut wird, wenn damit der gleiche Deckungsbeitrag generiert werden kann wie durchschnittlich mit dem Anbau von Winterweizen erzielt wird (Winterweizen: 192,50 €/t – Mittelwert der Jahre 2010–2012 nach DESTATIS 2013). Auf dieser Basis wurde zunächst ein Preis in Höhe von 33,50 € pro t Silomais bei einem TS-Gehalt von 35 % ermittelt (Indifferenzpreis), der anschließend durch den mittleren Methanhektarertrag von Mais dividiert wurde. Marktfurchtpreise wurden durch Multiplikation der mittleren Preisindizes der Jahre 2010–2012 (DESTATIS 2013) mit den mittleren Erzeugerpreisen des Jahres 2005 abgeleitet (KORNATZ et al. 2013).

Die variablen Kosten umfassen sämtliche Werkstoff- (Saatgut, Düngemittel, Pflanzenschutzmittel) und Arbeitsleistungskosten (Maschinen- und Arbeitskosten). Pflanzenschutzmittelpreise entstammen der Auflistung von BayWa (2012), Saatgutpreise den Aufstellungen nach Fruchtarten des KTBL (2010). Zur Ermittlung der Düngemittelkosten wurde unterstellt, dass Grundnährstoffe vollständig aus dem anfallenden Gärrest nachgeliefert werden. N-Verluste wurden über den Bedarf einer Fruchtart mit mineralischen Düngergaben in Form von Kalkammonsalpeter ausgeglichen, wobei ein Mineräldüngeräquivalent des zurückgeführten Gärrests von 50 % (70 %ige N-Wirksamkeit – 20 % Lager- und Ausbringungsverluste) veranschlagt wurde. Beim Marktfruchtanbau wurde eine vollständige mineralische Düngung unterstellt. Die Berechnung von Arbeits- und Maschinenkosten erfolgte mit Hilfe des Online-Feldarbeitsrechners der KTBL, wobei von einer mittleren Feldstückgröße von 10 ha, einer mittleren Hof-Feld-Entfernung von 5 km und einer Mechanisierung mit einem 120-kW-Traktor ausgegangen wurde. Es handelt sich um Vollkosten der Arbeitserledigung mit Einbeziehung von Zinsen, Abschreibung und Versicherungen. Weitere Annahmen zeigt Tabelle 4.

Bei mehrjährigen Anbausystemen (Fruchtfolge 5) wurden die Produktionskosten auf die Hauptnutzungsjahre umgelegt. Lagerhaltungskosten für Gärsubstrate wurden nicht berücksichtigt, weil angenommen wurde, dass die Produkte nach Ernte direkt zur Biogasanlage geliefert wurden. Somit hat auch der Trockensubstanzgehalt erhebliche Auswirkungen auf die Transportkosten des Erntegutes und wurde deshalb bei Berechnung der Arbeitserledigungskosten berücksichtigt.

Weitere Informationen zu Deckungsbeitragsanalysen im EVA-Verbund sind im ökonomischen Endbericht der 2. Projektphase nachzulesen (KORNATZ et al. 2013).

Tabelle 4: Faktor- und Produktpreise als Annahmen zur Berechnung der variablen Kosten bei Deckungsbeitragsanalysen im EVA II-Verbund (Quelle: KORNATZ, Universität Gießen, schriftl. Mitteilung)

Kostenpunkt	Einheit	Wert
Lohn	€/Akh	15,00
Diesel	€/l	1,33
Zinssatz	%	5,00
Heizöl (Trocknung)	€/l	0,53
N	€/kg	1,25

2.3.4.4 Nährstoffbilanzierung (N, P, K, Mg)

Eine Nährstoffbilanz ist eine Gegenüberstellung von zugeführten und abgeführten Nährstoffmengen unter Zugrundelegung einer Bezugsebene (Betrieb, Schlag) und eines Bilanzzeitraumes (Fruchtfolge). Sie dient als Instrument zur Überprüfung des Nährstoffeinsatzes und zur Beurteilung der Nährstoffeffizienz eines Landnutzungssystems (KOLBE 2007).

$$\begin{array}{l}
 \text{Nährstoffsaldo} \\
 * \text{ N, P, K, Mg}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 \text{Nährstoffzufuhr} \\
 * \text{ mineralische Düngung} \\
 * \text{ N}_2\text{-Fixierung Leguminosen}
 \end{array}
 -
 \begin{array}{l}
 \text{Nährstoffentzug} \\
 * \text{ Ernte}
 \end{array}$$

Als Zufuhrgrößen gingen die mineralische Düngung und die Fixierung des Luftstickstoffs durch Leguminosen ein (nach den Richtwerten zur Umsetzung der Düngeverordnung). Die Nährstoffabfuhr entspricht dem Nährstoffentzug durch den Pflanzenbestand bei der Ernte. Atmosphärische Depositionen, NO₃-Auswaschungen und die N₂-Bindung durch frei lebende Bakterien wurden in die Bilanzierungen nicht einbezogen. Nährstoffe, die in Pflanzenresten auf der Fläche verblieben, z. B. Strohdüngung bei Druschfrüchten, Wurzeln, Mulch und Gründüngung (Gelbsenf, *Phacelia*) wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Zur Darstellung der Salden-Mittelwerte (in kg Nährstoff ha⁻¹ a⁻¹) je Fruchtfolge wurden die Nährstoffsalden der einzelnen Fruchtfolgeglieder beider Anlagen (Anhangtabelle A14) aufsummiert und durch die Anzahl der Jahre (n = 8) geteilt. Mindestens ausgeglichene bis leicht positive Salden sollten angestrebt werden.

2.3.4.5 Humusbilanzierung

Die Humusbilanzierung dient dazu, bewirtschaftungsbedingte Veränderungen des Boden-Humusgehaltes abzuschätzen, um mit Zufuhr von organischen Stoffen zum Erhalt des Humus und zum Schutz der Bodenstruktur bzw. Bodenfruchtbarkeit reagieren zu können. Der Humussaldo (in kg Humus-C/ha*Jahr) wird aus der kulturspezifischen Veränderung des Humusvorrates (Humusbedarf) und der Humusreproduktion durch Erntereste, Gründüngung, humusmehrende Fruchtarten (z. B. Zwischenfrüchte, mehrjährige Leguminosen-Ackergrasmischungen) und organische Dünger, z. B. Gärreste, ermittelt. Der Saldo sollte im Bereich zwischen -75 kg und +100 kg C/ha und Jahr (Gruppe C – Optimalwerte) liegen.

Humussaldo	=	Humuszufuhr	-	Humusbedarf
Veränderung Humusvorrat des Bodens		Reproduktionsleistung organischer Stoffe: * organische Dünger (Gülle, Gärrest) * Ernterückstände * Gründümpflanzen * Humusmehrende Fruchtarten		Abnahme org. Bodenmasse: * Humuszehrer * Anbauverfahren

Die Berechnung der Humusbilanz erfolgte nach Cross Compliance, wobei zur Quantifizierung der Humuser-satzleistung die unteren Werte der Humusäquivalente [kg Humus-C/ha] aus der VDLUFA-Methode verwendet wurden (VDLUFA 2004). Die unteren Werte geben den Bedarf an organischer Masse an, der für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit erforderlich ist. Die oberen Werte sind bei erhöhten Anforderungen an den Boden zu verwenden, z. B. zur Erzielung einer verbesserten Bodenstruktur. Für einige Energiepflanzen fehlten Koeffi-zienten. Weil keine Algorithmen zur Ermittlung neuer Koeffizienten für diese Humusbilanzmethode bekannt sind, wurden Humusäquivalente „neuartigerer“ Kulturen von „VDLUFA-bekanntem“ Pflanzen per Analogie-schluss abgeleitet. Für die Sorghumhirsen wurde ein Humusbedarf zwischen dem von Mais und Getreide angenommen. Ganzpflanzengetreide, welches zur Milch- bis Teigreife geerntet wurde, wurde mit Getreide zur Körnernutzung gleichgestellt, weil die TM-Produktion zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen ist. Für Zweitfruchtstellungen von Mais und Sorghumhirsen wurden Werte analog der Hauptfruchtstellung einbezo-gen. Stroh ging mit einem Koeffizienten von 100 kg Humus-C je Tonne in die Berechnungen ein. Für die auf die Biogasproduktion ausgerichteten Fruchtfolgeglieder ist unterstellt worden, dass die Gärreste vollständig wieder zur jeweiligen Fruchtart auf die Anbaufläche ausgebracht wurden, mit Ausnahme der Kartoffel (Verkauf als Marktf Frucht, keine Vergärung). Die je nach Fruchtart und Ertrag anfallenden Gärreste wurden wie folgt ermittelt:

- Berechnung der Biogasausbeute [l/kg oTS] einer Kulturart nach der ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013, Methodik siehe Kap. 2.3.4.2)
- Umrechnung in kg Biogas/kg organischer Trockensubstanz (oTS)
- Berechnung der Biogasausbeute in kg Biogas je kg Trockensubstanz (TS)
- Ermittlung der Gärrestmenge in kg Gärrest je kg TS durch Abzug der Biogasmenge je kg TS
- Bestimmung des Ertrages an TM je Fruchtart unter Beachtung von 15 % Siliiverlusten
- Gärrestmenge je Hektar = kg Gärrest/kg TS * TS je Hektar
- Gärrest-FM [t/ha] = Standardisierung der Gärrestmenge auf 10 % TS zur Ermittlung der spezifischen Hu-musreproduktionsleistung nach VDLUFA (2004)

Weitere Einzelheiten zur Humusbilanzierung im EVA-Versuch sind bei WILLMS et al. (2009) und ZALF (2013) nachzulesen.

2.3.4.6 Wasserhaushalt

Das Modell MONICA (model for nitrogen and carbon in agro-ecosystems) ist ein dynamisches, prozessorientiertes Agrarökosystemmodell, das den Transport und die biochemische Umsetzung von Kohlenstoff, Stickstoff und Wasser in landwirtschaftlichen Systemen beschreibt (NENDEL et al. 2011; ZALF 2013). Anwendungshinweise sind im Endbericht des Teilprojektes 2 „Ökologische Folgewirkungen des Energiepflanzenanbaus“ beschrieben (ZALF 2013). Es wurden in Tagesschritten die wichtigsten Prozesse im Boden sowie in der Pflanze abgebildet und unter Berücksichtigung von Maßnahmen wie Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngung und Ernte die Indikatoren Wasserverbrauch, Sickerwassermenge (Grundwasserneubildung) und Wassernutzungseffizienz für alle Prüfglieder des Fruchtfolgeversuchs quantifiziert (durchgeführt von Matthias Willms und Anne-Katrin Prescher, ZALF Müncheberg). Der *Wasserverbrauch* [mm/a] einer Kultur wurde aus der Transpiration der Pflanze und der Evaporation des Bodens zusammengefasst. Die *Wassernutzungseffizienz* (WNE in kg TM/[ha*mm]) gibt an, wie viel Biomasse pro verbrauchtem Millimeter Wasser gebildet werden konnte. Sie stellt die gebildete Biomasse dem Wasserverbrauch während des Wachstums gegenüber. Zur Berechnung der WNE wurde ausschließlich die aktuelle Evapotranspiration (ET_a) zwischen Saat- und Erntezeitpunkt eines Bestandes zur Quantifizierung des Wasserverbrauchs verwendet. Grundwasser wird aus Sickerwasser bereichert (*Grundwasserneubildung*). *Sickerwasser* ist Wasser, welches die hydraulische Wasserscheide im Boden passiert hat, also nicht mehr durch kapillaren Aufstieg oder Pflanzenwurzeln in Anspruch genommen wird. Es hat daher eine fortwährend abwärts gerichtete Fließbewegung (ZALF 2013). Die hydraulische Wasserscheide ist bei sandigeren Böden wie am Versuchsstandort Trossin etwa bei 1,2 m Tiefe. Wasser, welches die Schicht von 1,2 m Tiefe unterschreitet, ging somit in die Sickerwasserbewertung ein.

Zur Beurteilung des Bodenwasserhaushaltes bei der ganzjährigen Nutzung der Ackerfläche durch zwei Kulturen führte der Deutsche Wetterdienst Modellierungen auf Basis von Bodenfeuchtemessungen während des Untersuchungszeitraums 2009–2011 am Versuchsstandort durch. Für die Berechnungen kam das agrarmeteorologische Bodenwasserhaushaltsmodell METVER zum Einsatz (JUNGHÄNEL 2010; KAYSER 2002; MÜLLER 1987). Bodenphysikalische Kardinalwerte (Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität, permanenter Welkepunkt und Trockenrohdichte) wurden vom Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung erhoben. Das Wasserspeichervermögen des mittelschluffigen Sandbodens (Su3) wurde mit 25 Vol % angesetzt. Die Parametrisierung für die angebauten Kulturarten basierte auf phänologischen Merkmalen und der Durchwurzelungstiefe in Abhängigkeit vom Vegetationsfortschritt (KUTSCHERA et al. 2009). Mittels METVER erfolgten Kalkulationen der Bodenfeuchte auf Tageswertbasis für die Varianten „Mais nach Mais“ (Brache außerhalb der Mais-Vegetationszeit) und Mais als Zweitfrucht nach der Winterzwischenfrucht Grünroggen (Zweikultursystem mit ganzjähriger Bodenbedeckung).

2.3.4.7 Nitrat austräge

Für Aussagen zum Gefährdungspotenzial bezüglich der Verlagerung von Stickstoff bzw. Nitrat wurden Herbst- N_{min} -Gehalte im Boden und Nitratkonzentrationen im Sickerwasser in Abhängigkeit von Sickerwassermengen und Stickstoffausträgen betrachtet.

Grenzwerte für Herbst- N_{min} -Gehalte (in kg/ha) in Bezug zur Bodenart und Sickerwassermenge eines Standorts zur Einhaltung der EG-Nitratrichtlinie (50 mg NO_3^- je l Trinkwasser) sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Tolerierbare Herbst-N_{min}-Gehalte im Boden (in kg/ha) in Abhängigkeit von Bodenart und Sickerwassermenge eines Standorts (nach HENNINGS & SCHEFFER 2000)

Bodenart	Sickerwasserrate [mm/a]			
	< 100	100-200	200-300	> 300
S, Su	15	20	30	40
St, Sl	30	30	35	40
Ul, Ls, Lu, Lt, Tu, T	40	40	40	40

Jährliche Sickerwassermengen [mm/a] und Nitratausträge [kg N ha⁻¹ a⁻¹] wurden für den Versuchsstandort Trossin unter Eingabe standort- und fruchtfolgespezifischer Daten vom landwirtschaftlichen Simulationsmodell MONICA des ZALF ausgegeben (Funktionsweise siehe ZALF 2013, Bearbeiter: Matthias Willms und Christiane Peter).

Nitratkonzentrationen im Sickerwasser [mg/l] wurden mit nachfolgender Gleichung berechnet:

$$\text{Potenzielle NO}_3^- \text{-Konzentration Im Sickerwasser} = \frac{\text{NO}_3^- \text{-Austrag [kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}]}{\text{Sickerwassermenge [mm a}^{-1}]} \times 443 \text{ (SCHMIDT et al. o. A.)}$$

2.3.4.8 Energie- und Treibhausgasbilanzierung

Seit den 1970er-Jahren wurden kontinuierlich neue Methoden entwickelt, um Produktionssysteme ökologisch zu bewerten. Um jedoch eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Studien über gleiche Produkte zu gewährleisten, gab es seit 1993 auf nationaler und internationaler Ebene Bestrebungen, ein einheitliches Prinzip zur Bewertung von Umweltwirkungen zu schaffen. Hierbei handelt es sich um die Ökobilanzierung nach ISO 14040 (2009). Sie ist gegenwärtig die anerkannteste Methode zur ökologischen Systembewertung und wurde deshalb auch für Energie- und Treibhausgasbilanzierungen im Projekt EVA verwendet. Im Rahmen der Analysen werden „die Wirkungen eines Produktes auf die Umwelt während der Herstellung, im Gebrauch sowie bei der Entsorgung des Abfalls“ mit Hilfe von Indikatoren bewertet. Die Ökobilanz nach ISO 14040 (2009) besitzt als Umweltmanagementmethode jedoch auch kleine Schwächen, denn ökonomische und soziale Aspekte werden zum Beispiel nicht berücksichtigt. Des Weiteren werden lediglich die Rahmenbedingungen für die grundlegende Bilanzierung definiert, nicht jedoch individuelle, für jeden Produktionszweig angepasste, Vorgehensweisen (ZALF 2013).

Die Bilanzierungen im Rahmen des Projektes EVA II wurden von Matthias Willms und Christiane Peter am ZALF Münchenberg durchgeführt. Als Berechnungsgrundlage diente das vom ZALF entwickelte Modell MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture). Bei der für diesen Bericht verwendeten Ökobilanz-Methode nach ISO 14040 (2009) handelt es sich um eine iterative (sich schrittweise in wiederholten Gängen der exakten Lösung annähernde) Methode, die drei Phasen umfasste:

1. Feststellung von Ziel und Untersuchungsrahmen

Faktoren: beabsichtigter Anwendungsbereich, Gründe und Ziele der Studie, Zielgruppe, untersuchte Produktionssysteme (Untersuchungsrahmen), Systemgrenzen, Zieleinheit, Allokationsverfahren

Ziel und Anwendungsbereich der Untersuchung war die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen und des kumulierten Energieaufwandes (KEA) für die im EVA-Projekt angebauten Fruchtfolgen 1 bis 8 beider Anlagen. Der Fokus lag auf der Bewertung der Fruchtfolgen, wobei die Synergieeffekte der einzelnen Fruchtarten innerhalb der Anbausysteme entsprechend beachtet wurden. Es wurden alle produktionstechnischen Arbeitsschritte einzeln quantifiziert und zu Teilanbauverfahren aggregiert (z. B. Düngung, Bodenbearbeitung, Transport und Ernte).

Als *Zielgruppe* dieser Studie wurden Landwirte und landwirtschaftliche Berater im Bereich der Energiepflanzenproduktion sowie politische Berater im Bioenergiesektor klassifiziert.

In die Quantifizierungen flossen alle Arbeitsschritte von der Saat bis zur Ernte/Silage der angebauten Energiepflanzen ein (*Untersuchungsrahmen*). Es wurden alle direkten und indirekten Energieaufwendungen und Emissionen des Produktionsweges mit hinreichender zeitlicher und räumlicher Auflösung berechnet und bewertet. Aufwendungen, die aus den Vorketten, z. B. Maschinen-, Düngemittel-, Saatgut und Pflanzenschutzmittelherstellung, stammen, wurden ebenfalls integriert, jedoch blieben Infrastrukturen für die Herstellung der verwendeten Betriebsmittel unberücksichtigt.

Die *zeitliche Systemgrenze* wurde durch den Zeitraum von 2009 bis zum Erntejahr 2012 bzw. 2013 der Fruchtfolgen definiert.

Die analysierten Umweltwirkungen können flächenbezogen oder produktbezogen angegeben werden (*Zieleinheit*). Flächenbezogene Wirkungen wurden je Hektar formuliert. Sie sind abhängig von der Anzahl der Arbeitsgänge, der Höhe der eingesetzten Produktionsmittel sowie der Standortwirkung. Produktbezogene Wirkungen werden durch Leistungen eines Systems definiert. Im EVA-Versuch wurde der Energiegehalt des Methans verwendet, der aus dem Silagegut einer Fruchtart gewonnen wurde. In dieser Kennzahl sind jedoch keine Aufwendungen aus dem Bau oder Betrieb einer Biogasanlage inbegriffen. Der Methanenergieertrag wurde in Relation zum Aufwand gestellt, sodass letztendlich die Effizienz der Maßnahme von Bedeutung war. Verwendete Gasausbeuten bezogen sich auf die mit Hilfe von Batch-Versuchen vom ATB aufgestellte Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013, siehe Kap. 2.3.4.2).

Allokationsverfahren (Allokation = Zuordnung von Ressourcen) sind notwendig, um Nebenprodukten wie Stroh und Gärresten eine bestimmte Umweltwirkung zuzuordnen zu können. In der EVA-Studie wurde über Haupt- und Nebenprodukte anhand des ökonomischen Wertes eines Produkts entschieden.

2. Sachbilanz

In der zweiten Phase Sachbilanz erfolgten die Datenerhebung und Aufstellung der Berechnungsverfahren (produkt- und flächenbezogen, siehe „Zieleinheit“, Punkt 1). Das Ergebnis war die Auflistung aller Inputs (genutzte Ressourcen an Infrastruktur und Produktionsmitteln sowie aufgewendete Arbeitsschritte) und Outputs (Methanerträge der Ernteprodukte, Nebenprodukte) unter Beachtung von Klima- und Bodeneinflüssen des Versuchsstandorts. Es wurde eine Betriebsgröße von 10 ha und eine Feld-Hof-Entfernung von 5 km angesetzt. Bei der Sachbilanz wurden sowohl direkte (Emissionen, die bei Arbeitsverfahren des Anbaus entstehen bzw. Energieverbrauch auf dem Feld, Stromverbrauch im Betrieb) als auch indirekte Umweltbelastungen

(Emissionen, die bei der Förderung, der Aufbereitung, dem Transport und der Herstellung der verwendeten Betriebsmittel wie Kraftstoff, Dünger oder Saatgut, im Vorfeld entstanden sind) ausgegeben.

3. Wirkungsabschätzung

Bei der Wirkungsabschätzung wurden die Ergebnisse der Sachbilanz den Wirkungskategorien „Treibhausgaspotenzial“ und „kumulierter Energieaufwand“ zugeordnet. Wirkungsindikatoren zeigen die potenziellen Effekte auf die Umwelt an. Die erste Kategorie *Treibhauseffekt* beschreibt die Wirkung anthropogener Emissionen (Lachgas, Stickoxide, Ammoniak und Kohlendioxid) auf die Erderwärmung über eine Zeit von 100 Jahren. Als Charakterisierungsfaktor wurde das Referenzgas Kohlendioxid festgelegt. Die Einheit ist kg CO₂-Äquivalent (kg CO₂-Äq). Je kleiner der errechnete Wert, desto geringer ist die Umweltbelastung. Bei der zweiten Wirkungskategorie, dem *Energieaufwand*, wurde die Gesamtheit des Verbrauchs an Primärenergieträgern (Primärwald, fossile und nukleare Energieträger sowie erneuerbare Energien) während der Herstellung, Nutzung und Entsorgung der erprobten Biogassubstrate bzw. Fruchtfolgen berechnet. Der kumulierte Energieaufwand wurde nach VDI 4600 (1997) und VDI 4600 BLATT 1 (1998) bestimmt. Das Ergebnis der Energiebilanz wurde als so genannter Output/Input-Faktor (EROI – Energy return on investment, Energieeffizienzwert) wiedergegeben. Dazu wurde die Summe der produzierten Energie auf der Outputseite ins Verhältnis zur Summe des Verbrauchs an Primärenergieträgern auf der Inputseite gesetzt (Output dividiert durch Input). Das Verhältnis (EROI) kann wie folgt interpretiert werden: Ist EROI > 1, war der Prozess mit einem Energiegewinn verbunden. Ist jedoch EROI < 1, forderte die Energiepflanzenerzeugung einen höheren Energieaufwand als an Energie gewonnen werden konnte (REINHARD 1993; ZALF 2013). Beim EROI-Faktor handelt es sich um einen dimensionslosen Wert, der sich nicht auf die beiden funktionalen Einheiten Fläche und Produkt beruft. Deshalb wurden die Ergebnisse der Energiebilanz zusätzlich zum Output/Input-Faktor (EROI) als realer Energiegewinn (Energieausbeute = Output [Energieertrag] – Input [Energieverbrauch]) mit Flächenbezug (je Hektar) dargestellt.

In jeder einzelnen Phase wurden die Ergebnisse aus der jeweils vorhergehenden Phase verwendet. Dadurch wurde innerhalb und zwischen den einzelnen Phasen die Ganzheitlichkeit und Konsistenz der Studie gewährleistet. Eine genaue Methodikbeschreibung und Hintergrundinformationen zum angewendeten Verfahren enthält der Endbericht des ökologischen Teilprojektes 2 (ZALF 2013).

3 Ergebnisse

3.1 Frisch- und Trockenmasseerträge

Die Frisch- und Trockenmasseerträge in dt/ha der angebauten Fruchtarten aus Anlage 3 (A III) und der Spiegelanlage 4 (A IV) sind kumulativ (aufsummiert nach Fruchtfolgen) in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt.

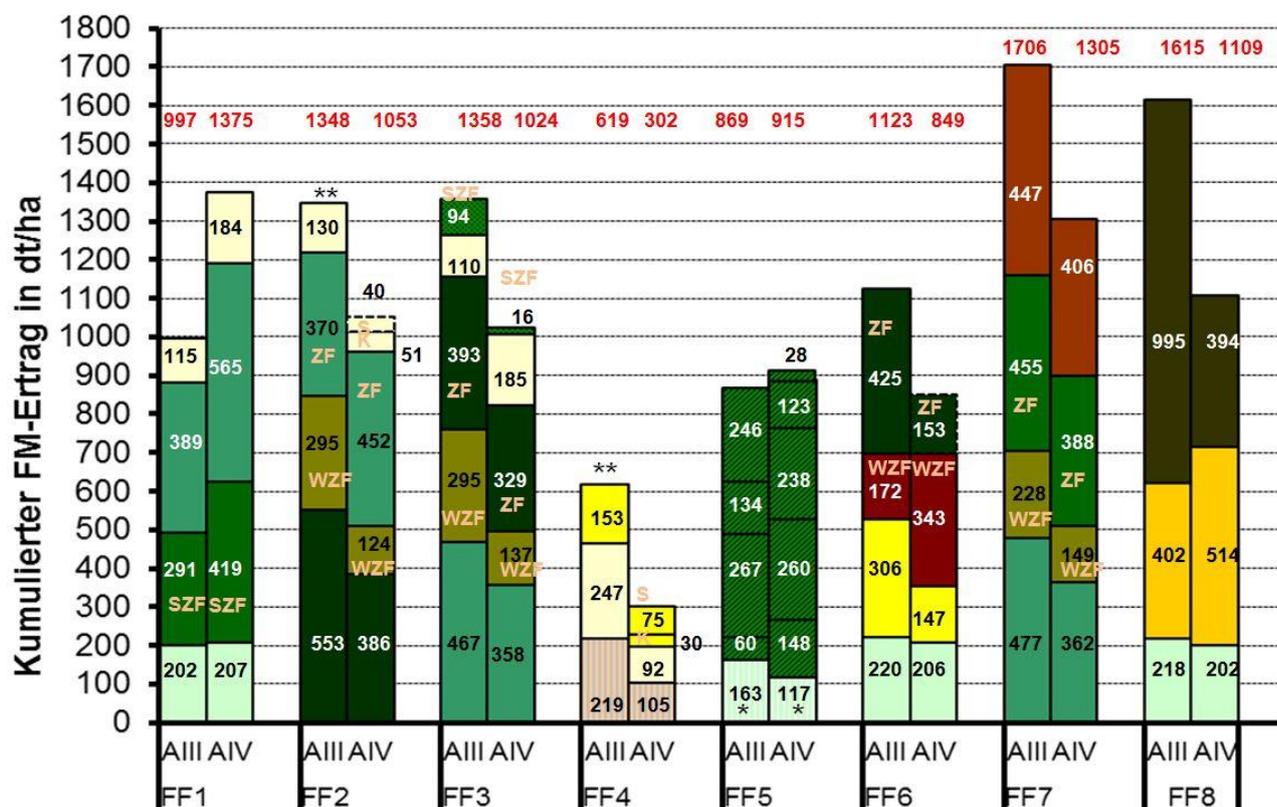


Abbildung 10: Kumulative Frischmasse-Erträge [dt/ha] der im EVA-Projekt angebauten Fruchtarten der Anlagen 3 ab 2009 (AIII) und 4 ab 2010 (AIV) aller Versuchsjahre, Versuchsstandort Trossin, n = 4 je Fruchtart, ohne Abschlussfrucht Winterroggen und Gründüngungspflanzen. WZF = Winterzwischenfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht, ZF = Zweitfrucht

- Wintergerste
- Futterhirse
- Sudangrash.
- Raps
- Grünroggen
- Hafermischung
- Wintertriticale
- Mais
- Sommergerste
- Sonnenblume
- LuKleegras
- Rübe
- Weidelgras
- Landsb. Gemenge
- Kartoffeln

* Sommergerste mit Untersaat Luzerne-Kleegras

** Ernte von Wintertriticale bzw. Raps aus technischen Gründen im Jahr 2011 als GPS

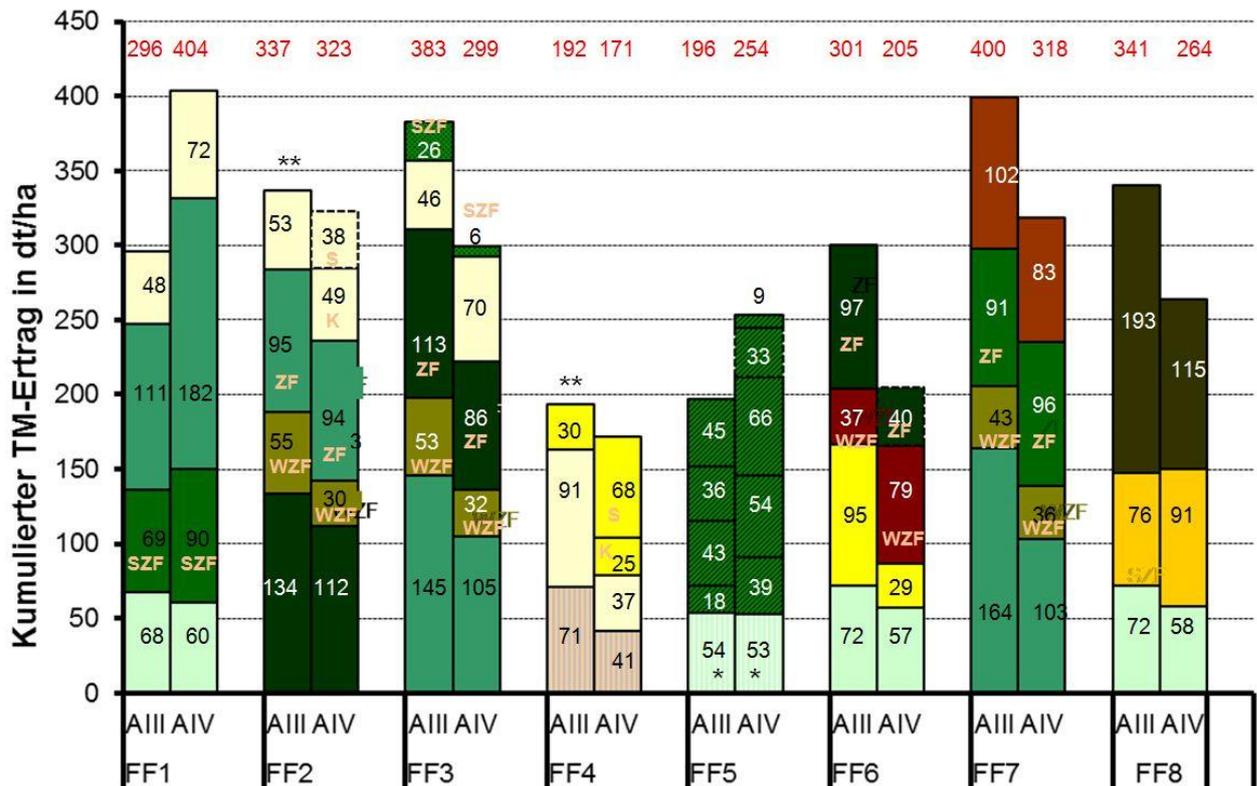
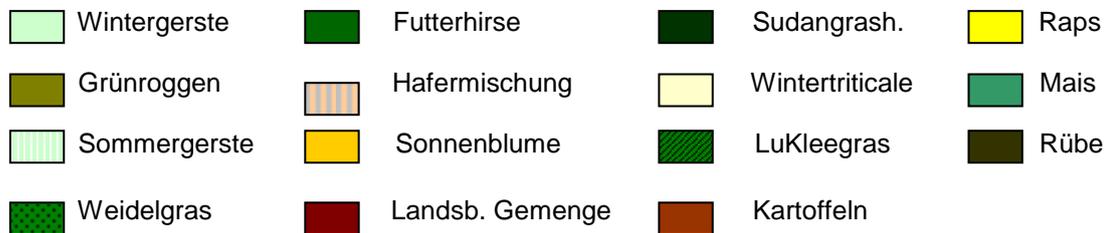


Abbildung 11: Kumulative Trockenmasse-Erträge [dt/ha] der im EVA-Projekt angebaute Frucharten der Anlagen 3 ab 2009 (AIII) und 4 ab 2010 (AIV) aller Versuchsjahre, Versuchsstandort Trossin, n = 4 je Fruchtart, ohne Abschlussfrucht Winterroggen und Gründüngungspflanzen. WZF = Winterzwischenfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht, ZF = Zweitfrucht



* Sommergerste mit Untersaat Luzerne-Kleegras

** Ernte von Wintertriticale bzw. Raps aus technischen Gründen im Jahr 2011 als GPS

Weil für die Biogasproduktion vor allem der Trockenmasse-(TM)-Ertrag einer Fruchtart von Bedeutung ist, werden im Folgenden nur diese Erträge betrachtet (Abbildung 11 und Abbildung 12).

Die höchsten kumulativen Trockenmasseerträge (bis zu 400 dt TM/ha) wurden mit Fruchtfolgen aus einer Kombination von Mais (Ø 148 dt TM/ha) und Sorghumhirschen (Futterhirschen und Sudangrashhybride, Ø 83 % Relativertrag zu Mais) erzielt. In den regionalen Fruchtfolgen überzeugten auch die Sonnenblume (Ø 84 dt TM/ha), die Kartoffel (Ø 92 dt TM/ha) und eine massenbetonte Zuckerrübe (Ø 154 dt TM/ha des Rübenkörpers). Die untersuchten Getreideganzpflanzen erreichten durchschnittliche Ertragswerte zwischen 53 und 70 dt TM/ha, wobei das Wintergetreide im Vergleich zu den Sommerarten Mehrerträge von 20–25 % realisierte. Das Ertragsniveau von mehrschnittigen Ackergras-Leguminosenmischungen ist stark vom Schnittregime abhängig. Bei extensiver Nutzung mit 2–3 Schnitten im Jahr wurden durchschnittlich 86 dt TM/ha erzeugt. Zur

ganzjährigen Bodenbedeckung und zur Reduktion von Erosions- und Auswaschungsverlusten bieten sich Zwischenfrüchte an. Die angebaute Winterzwischenfrüchte zeichneten sich durch ein Ertragsmittel von 41 dt TM/ha (Grünroggen) bzw. 58 dt TM/ha (Landsberger Gemenge) über alle Versuchsjahre aus. Das Ertragspotenzial der Sommerzwischenfrüchte, mit Ausnahme von *Sorghum bicolor*, lag darunter (Ø 16–21 dt TM/ha). Die Futterhirse (*Sorghum bicolor*) hob sich gegenüber den anderen Zwischenfrüchten durch einen überdurchschnittlichen Ertrag von Ø 81 dt TM/ha hervor.

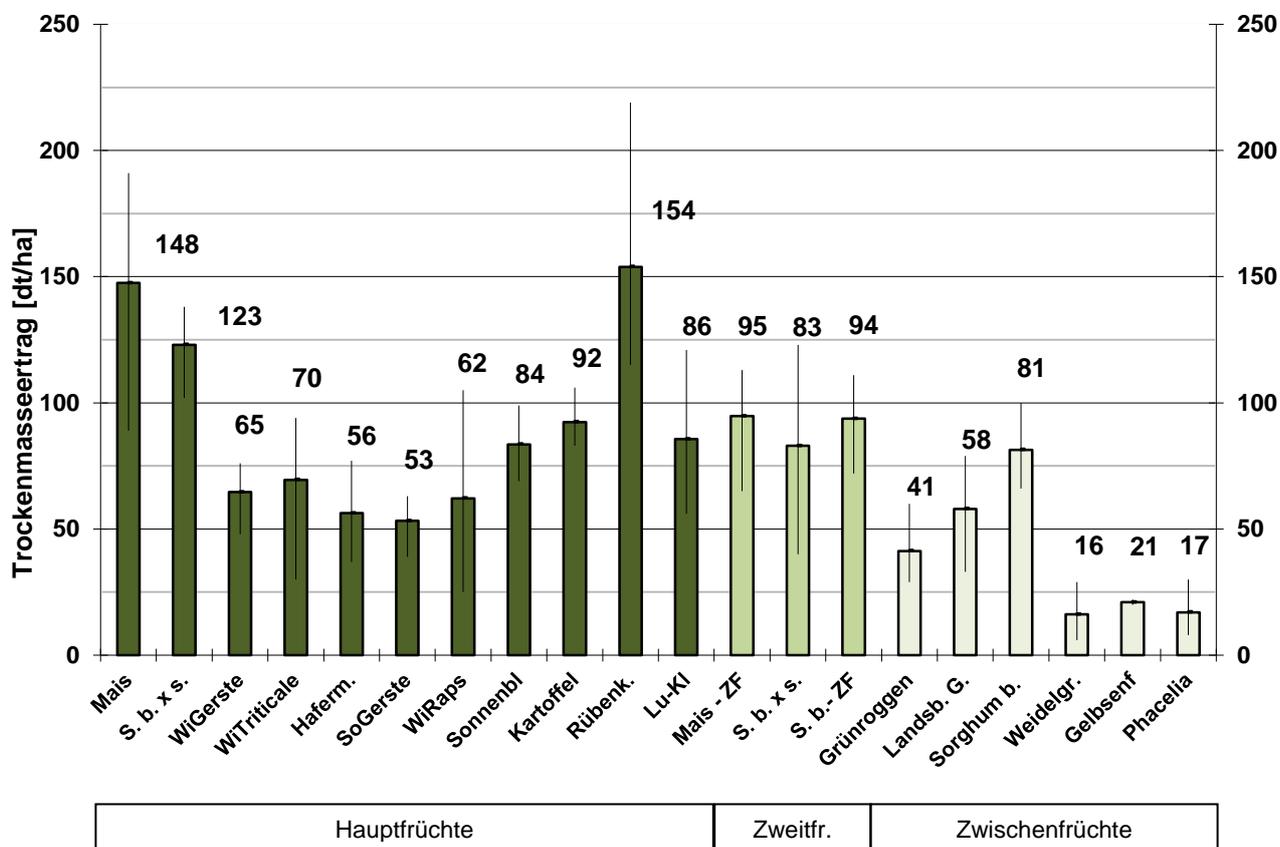


Abbildung 12: Ertragsniveau [dt TM/ha] der am Versuchsstandort Trossin angebaute Fruchtarten im Mittel der Jahre 2009–2012

An den Minimal- und Höchstwerten in Abbildung 12 ist zu erkennen, dass die Erträge der Fruchtarten stark in Abhängigkeit von der Witterung eines Versuchsjahres schwankten (vgl. auch Tabelle 6).

Das *Vegetationsjahr 2009* ermöglichte aufgrund der durchschnittlich warmen und sonnenscheinreichen Witterung gute Ernteerträge. Einen Wachstumsschub insbesondere bei den wärmeliebenden C4-Pflanzen ermöglichte der milde Herbst mit vielen „Sommertagen“ im September. Limitierende Faktoren für die ertragsbildenden Prozesse waren in der Vegetationsperiode 2009 der kalte, frostige Winter und der kühle, wechselhafte Juni (nur sehr zögerliche bzw. langsame Bestandesentwicklung der C4-Pflanzen). Das Jahr war ein gutes „Getreide-Jahr“ mit überdurchschnittlichen Erträgen vor allem bei Wintergerste und Hafer.

Im *Jahr 2010* erschwerten ungünstige Wachstumstemperaturen, besonders im viel zu kühlen Monat Mai, den Aufgang und die Jugendentwicklung der C4-Pflanzen Mais und *Sorghum* sp. Nach einer langen Trockenphase konnten die zum Teil stark lückigen Bestände erst im witterungsgünstigen Monat August an Biomasse zulegen. Die Sorghumhirse „Lussi“ wies im insgesamt relativ kühlen und durch Trockenheitsphasen geprägten Jahr 2010 ein geringfügig höheres Ertragsniveau auf als der Mais. In Zweitfruchtstellung erreichte das Sudan-

grashybrid mit 113 dt TM/ha einen Mehrertrag von 16 % gegenüber Mais (Ø 95 dt TM/ha). Ertragseinschränkend für viele Winterungen waren kalte, frostige und schneereiche Witterungsverhältnisse bis Mitte März, Niederschlagsextreme wie Starkregenfälle und Trockenperioden. Winterraps ist sehr gut entwickelt in die Ruhephase gekommen, in der Kältephase lag eine schützende Schneeschicht auf dem Bestand. Kleinere Auswinterungs- und Fraßschäden sind gut verwachsen, sodass der Jahresertrag mit Ø 95 dt TM/ha GPS weit über dem Erwartungswert (um 60 dt TM/ha) lag.

Im *Vegetationsjahr 2011* erschwerten die ausgeprägte Frühsommertrockenheit, die relativ vielen kühlen Sommernächte und die unbeständige Witterung den Aufgang, die Jugendentwicklung und die Biomassezunahme der Zweitkulturen. Im sehr milden Herbst konnte das Wachstumsdefizit nur bedingt aufgeholt werden. Das Ertragsergebnis (Ø 94–97 dt TM/ha) ist mit 2010, einem für die Etablierung von Zweitkulturen ebenfalls schwierigen Jahr, vergleichbar. Die Erträge der *Sorghum*-Zweitfrüchte lagen trotz verringerter Vegetationsstage (Neusaat) auf gleichem Niveau wie Mais. Mais in Hauptfruchtstellung dagegen nutzte die Wasserreserven des Bodens nach der Aussaat, profitierte somit von einer größeren Bestandesdichte beim Auflaufen im Vergleich zur Zweitfrucht und erzielte einen für den Versuchsstandort guten Ertragswert von 180 dt TM/ha. Bei allen Winterungen waren unter Berücksichtigung der Vorjahre zum Teil erhebliche Ertragseinbußen zu verzeichnen. Aufgrund eines zu kühlen Oktobers 2010 gingen viele Bestände unterentwickelt bzw. mit zu wenigen Speicherreserven in die sehr frostige Winterphase. Besonders der sehr kalte Dezember 2010 setzte vielen Kulturen stark zu. Negativ für die optimale Weiterentwicklung der Bestände war weiterhin der Wassermangel zur Hauptwachstumszeit der Winterfrüchte (April/Mai).

Wassermangel im November 2011, der plötzliche Kälteeinbruch im Februar und die ausgeprägte Frühjahrs-trockenheit hatten suboptimale Winterfrucht-Bestände im *Versuchsjahr 2012* zur Folge. Günstige Witterungsbedingungen im weiteren Vegetationsverlauf beseitigten größtenteils Wachstumsdefizite und kleinere Pflanzenschädigungen, sodass letztendlich gute Erträge der Winterfrüchte (Wintertriticale: Ø 71 dt TM/ha, Landsberger Gemenge: Ø 79 dt TM/ha) erzielt werden konnten. Die Frühjahrstrockenheit hatte Auswirkungen auf den Aufgang und die Jugendentwicklung der Sommerungen (lückige Bestände). Starkregenereignisse im Juni und eine längere Trockenphase im Spätsommer minderten die Erträge der Hackfrüchte im Vergleich zum Vorjahr zusätzlich (im Vergleich zu 2011: -19 dt TM/ha Kartoffel, -78 dt TM/ha Rübe). Regenereignisse behinderten zwar die Aussaat von *Sorghum b. x s.* nach Landsberger Gemenge (geerntet am 24.05.12), begründen aber nicht dessen geringe(n) Keimrate, ausbleibenden Aufgang und Ertrag (Ø 40 dt TM/ha). Warme, feuchte Verhältnisse boten beste Voraussetzungen für die Etablierung der *Sorghum*-Zweitfrucht. Aber schon in den Vorjahren wurde ein verzögerter Aufgang und Wachstumsbehinderungen von *Sorghum* sp. nach Landsberger Gemenge beobachtet. Unverträglichkeiten mit dessen Komponenten, ein starkes Ausschöpfen der Bodenwasservorräte oder Hinterlassen eines ungeeigneten Saatbettes sind zu vermuten. Luzerne-Kleegras reagierte auf den trockenen Vegetationsbeginn mit der Verdrängung des Mischungspartners Rotklee. Besonders die feuchteren Monate Mai, Juni und Juli erbrachten ein üppiges Ackergraswachstum, sodass in diesem Jahr 3 Schnitte möglich waren. Nach dem 2. Schnitt setzte eine Trockenphase ein, sodass der 3. Schnitt enttäuschend gering ausfiel (1. Schnitt: 66 dt TM/ha, 2. Schnitt: 33 dt TM/ha, 3. Schnitt: 9 dt TM/ha). Im Spätsommer gedrillte Sommerzwischenfrüchte hatten keine Chance.

Tabelle 6: Durchschnittserträge (in dt TM/ha) der EVA-Fruchtarten in Trossin in den einzelnen Versuchsjahren. ZF = Zweitfrucht, WZF = Winterzwischenfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht

Fruchtart	2009	2010	2011	2012
Mais	155	106	182	----
<i>Sorghum bicolor x sudanense</i>	134	112	----	----
Wintergerste	71	59	----	----
Wintertriticale	----	91	46	71
Hafermischung	71	41	----	----
Sommergerste + Untersaat	54	53	----	----
Winterraps	----	95	29	----
Sonnenblume	----	76	91	----
Kartoffel	----	----	102	83
Rübenkörper	----	----	193	115
Luzerne-Kleegras	----	61	87	108
Mais – ZF	----	95	94	----
<i>Sorghum b. x s.</i> – ZF	----	113	97	40
<i>Sorghum b.</i> - ZF	----	91	96	----
Grünroggen - WZF	----	50	33	----
Landsberger Gemenge - WZF	----	----	37	79
<i>Sorghum bicolor</i> - SZF	67	90	86	----
Weidelgras - SZF	----	----	26	6
Gelbsenf - SZF	21	----	----	----
<i>Phacelia</i> - SZF	----	----	26	8

3.2 TS-Gehalte

Qualitativ hochwertige Silagen lassen sich nur mit Trockensubstanzgehalten des Erntegutes zwischen 28 und 35 % bzw. 35 und 40 % bei den meisten Getreidearten (Ausnahme: Gerste < 35 %) erzeugen (PAULUS & STARK 2008; HERRMANN et al. 2009).

Mais in Hauptfruchtstellung und die Getreideganzpflanzen konnten im Durchschnitt der Versuchsjahre 2009–2012 die empfohlenen TS-Gehalte erreichen. In sehr warmen, trockenen Jahren war ein rascher Anstieg des TS-Gehaltes beim Getreide innerhalb weniger Tage zu verzeichnen, sodass die TS-Obergrenze von 40 % unter diesen Witterungsbedingungen bei einigen Wintertriticale- und Hafer-Proben überschritten wurde. Das Sudangrashybrid (Sorte „Lussi“) und Winterraps liegen mit Ø 27 % bzw. 26 % TS im suboptimalen Bereich. Die Sonnenblume (Sorte: Methasol), die Biogaserübe (massebetonte E-Zuckerrübe) und die Kartoffeln schnitten mit TS-Gehalten unter 20 % enttäuschend ab. Im Sortiment der Biomasse-Sonnenblumen gibt es allerdings schon züchterisch fortgeschrittenere Sorten, die deutlich höhere TS-Gehalte versprechen als die Sorte Methasol von KWS. Die Abreife zum Zeitpunkt der Ernte war beim Luzerne-Kleegras vom Schnitt abhängig: Beim 1. Schnitt Mitte Mai bis Juni konnten im Durchschnitt der Versuchsjahre optimale TS-Gehalte realisiert werden. Beim 2. Schnitt dagegen, im August bis September, lagen die TS-Gehalte mit Ø 21 % weit unter dem anzustrebenden Wert. Bei Zweitfrucht-*Sorghum* sollten Sudangrashybride (Ø 27 % TS) aufgrund eines besse-

ren Abreifeverhaltens gegenüber Futterhirsen (\emptyset 22 % TS) bevorzugt werden. Auch Zweitfrucht-Mais (Sorte: Atletico) konnte in Bezug auf den TS-Gehalt zur Ernte (\emptyset 22 % TS) nicht überzeugen. Mit einer Siloreifezahl von 280 gehört Atletico zur mittelspäten Reifegruppe. Zur Optimierung des TS-Wertes sollte bei der Zweikulturnutzung auf Sorten der frühen bis mittelfrühen Reifegruppe zurückgegriffen werden. Beim Zwischenfruchtanbau bietet sich zur Erhöhung des TS-Gehaltes eine kurze Anwelkphase nach der Ernte an (in Abbildung 13 dargestellte TS-Gehalte ohne Anwelken). Bei Gräsern und Gräsermischungen (z. B. Weidelgras) ist das Erntefenster sehr eng: Mit steigender Vegetationszeit nimmt zwar der Ertrag, in sehr kurzer Zeit aber auch der TS-Gehalt inkl. Rohfaseranteil zu.

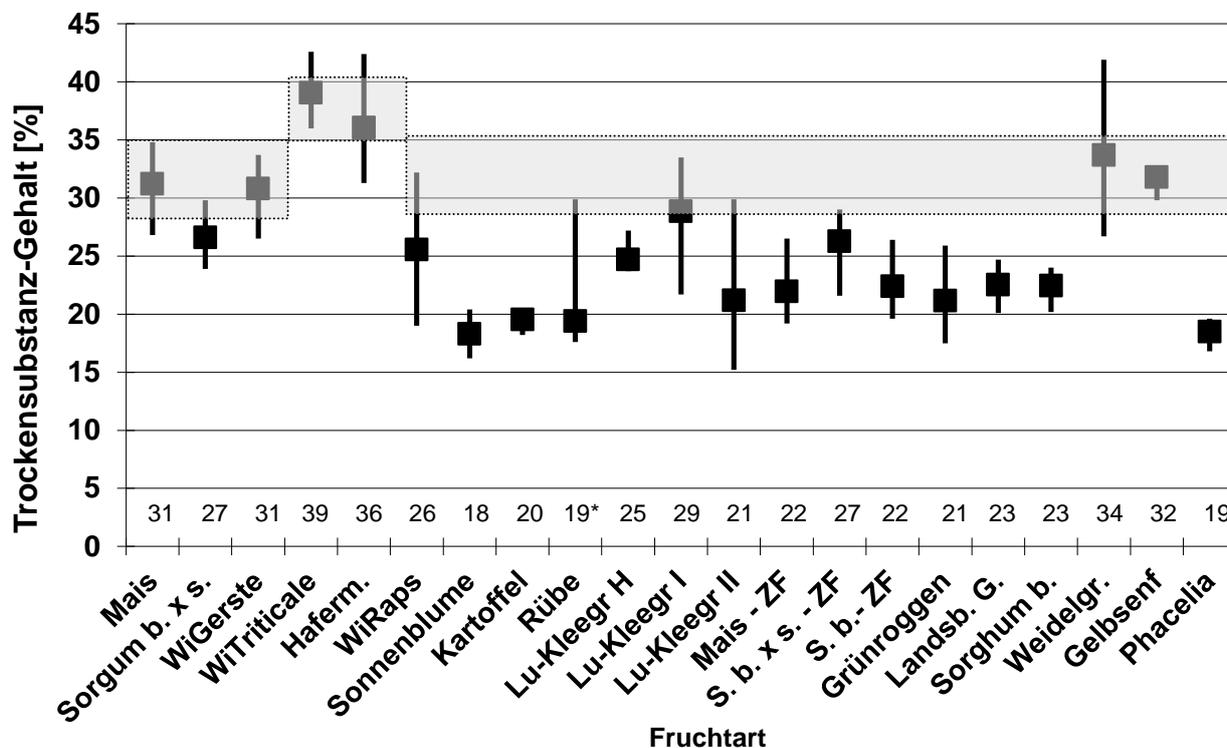


Abbildung 13: TS-Gehalt (in %) der EVA-Fruchtarten am Standort Trossin im Mittel der Jahre 2009–2012. Optimalbereich des TS-Gehaltes hellgrau dargestellt. H = Herbstschnitt, I = 1. Schnitt, II = 2. Schnitt, ZF = Zweitfrucht. * = nur Wert von 2011, weil 2012 aufgrund von Personalmangel sehr lange Lagerung erfolgte

3.3 Erträge und fruchtfolgeabhängige Auswirkungen auf das Abschlussfruchtfolgeglied Winterroggen

Um Fruchtfolgeeffekte untersuchen zu können, schlossen alle acht Anbausysteme einheitlich mit Winterroggen ab. Die Korn- und Stroherträge (in dt TM/ha) beider Versuchsanlagen sind in Tabelle 7 bzw. Tabelle 8 aufgelistet. Der Kornertrag wurde mit Hilfe des Parzellenmähers bestimmt. Beim Strohertrag handelt es sich um das manuell gewogene „erntbare Stroh“, demnach ohne Spreu, bei einer Stoppellänge von 10 cm. Um zu überprüfen, ob Ertragsunterschiede des Winterroggens zwischen den Anbauvarianten auf Fruchtfolgewirkungen beruhen, wurden einfaktorielle Varianzanalysen (ANOVA) und Mehrfachvergleiche, d. h. Post-Hoc Analysen (Tukey-Tests) durchgeführt (Signifikanzniveau: $p = 0,05$, d. h. die mittlere Ertrags-Differenz ist auf der Stufe 0,05 signifikant). Der Tukey-Test setzt eine Varianzhomogenität in den untersuchten Gruppen „Korner-

trag“ und „Strohertrag“ voraus. Über den Test auf Homogenität der Varianzen wurde diese Voraussetzung der Varianzanalyse sichergestellt (Levene-Statistik-Ergebnis: $p > 0,05$).

Tabelle 7: Trockenmasseerträge (Korn- und Strohertrag in dt TM/ha bei 105 °C Trocknung) und Korn : Stroh-Verhältnis des Abschlussfruchtfolgegliededes Winterroggen bei den acht erprobten Anbauvarianten im Fruchtfolgeversuch mit Energiepflanzen zur Biogasproduktion am Versuchsstandort Trossin (AZ 31), Anlage 3, Versuchsjahr 2012

Fruchtfolge	1	2	3	4	5	6	7	8
Kornertrag [dt TM/ha]								
A	56,9	58,9	50,2	60,3	58,4	60,9	61,0	59,9
B	58,1	57,5	57,2	56,2	48,7	55,0	55,3	57,1
C	51,9	55,7	52,6	58,6	51,6	56,9	56,2	56,9
D	56,2	61,0	59,6	62,9	56,4	58,9	57,8	58,5
Mittelwert Prüfglied	55,8^a	58,3^a	54,9^a	59,5^a	53,8^a	57,9^a	57,6^a	58,1^a
Standardabweichung	2,33	2,23	4,27	2,82	4,43	2,57	2,50	1,39
Standardfehler	1,34	1,12	2,14	1,41	2,21	1,27	1,25	0,70
Strohertrag [dt TM/ha]								
A	20,8	24,8	12,5	28,1	20,9	28,4	27,2	29,8
B	22,7	11,7	15,6	18,8	11,0	24,1	17,5	19,3
C	16,5	28,5	17,0	24,5	18,4	28,2	23,0	22,0
D	21,5	27,3	21,4	26,2	23,9	22,4	29,7	24,2
Mittelwert Prüfglied	20,4^a	23,1^a	16,6^a	24,4^a	18,6^a	25,8^a	24,4^a	23,8^a
Standardabweichung	2,69	7,74	3,70	4,02	5,51	3,00	5,34	4,46
Standardfehler	1,35	3,87	1,85	2,17	2,76	1,50	2,67	2,23
Korn : Stroh-Verhältnis	1 : 0,37	1 : 0,40	1 : 0,30	1 : 0,41	1 : 0,35	1 : 0,45	1 : 0,42	1 : 0,41

^a homogene Gruppe des Tukey-Tests (signifikante Unterschiede bestehen nur zwischen Fruchtfolgevarianten mit unterschiedlichen Buchstaben)

Tabelle 8: Trockenmasseerträge (Korn- und Strohertrag in dt TM/ha bei 105 °C-Trocknung) und Korn : Stroh-Verhältnis des Abschlussfruchtfolgegliededes Winterroggen bei den acht erprobten Anbauvarianten im Fruchtfolgeversuch mit Energiepflanzen zur Biogasproduktion am Versuchsstandort Trossin (AZ 31), Spiegelanlage 4, Versuchsjahr 2013

Fruchtfolge	1	2	3	4	5	6	7	8
Kornertrag [dt TM/ha]								
A	44,5	51,7	56,8	56,4	47,2	63,1	62,1	65,2
B	58,9	57,9	51,8	60,2	41,6	48,4	61,8	52,8
C	42,4	45,9	44,0	38,5	39,0	52,4	42,3	44,3
D	57,5	50,4	41,0	47,4	34,2	53,9	48,2	44,6
Mittelwert Prüfglied	50,8^a	51,5^a	48,4^a	50,6^a	40,5^a	54,5^a	53,6^a	51,7^a
Standardabweichung	8,58	4,95	7,22	9,70	5,42	6,22	9,94	9,81
Standardfehler	4,29	2,48	3,61	4,85	2,71	3,12	4,97	4,90

Fruchtfolge	1	2	3	4	5	6	7	8
Strohertrag [dt TM/ha]								
A	26,5	30,8	37,0	36,7	42,7	40,1	38,4	40,3
B	34,4	38,7	31,7	39,2	34,9	37,0	41,1	33,4
C	22,4	29,4	32,8	37,7	30,9	28,8	27,8	23,6
D	30,1	36,2	32,2	29,8	34,0	31,5	31,6	32,8
Mittelwert Prüfglied	28,4^a	33,8^a	33,4^a	35,9^a	35,6^a	34,4^a	34,7^a	32,5^a
Standardabweichung	5,12	4,40	2,43	4,16	5,02	5,13	6,12	6,85
Standardfehler	2,56	2,20	1,21	2,08	2,51	2,57	3,05	3,43
Korn : Stroh-Verhältnis	1 : 0,56	1 : 0,66	1 : 0,69	1 : 0,71	1 : 0,88	1 : 0,63	1 : 0,65	1 : 0,63

^a homogene Gruppe des Tukey-Tests (signifikante Unterschiede bestehen nur zwischen Fruchtfolgevarianten mit unterschiedlichen Buchstaben)

Im Versuchsjahr 2012 wurde über die Fruchtfolgevarianten ein durchschnittlicher Roggen-Kornertrag von 56,98 dt TM/ha mit einer geringen fruchtfolgeabhängigen Streuung von $\pm 3,24$ dt TM/ha ermittelt. Bei der Spiegelanlage (2013) waren die Abweichungen ($\pm 8,13$ dt TM/ha) vom Kornertrags-Mittelwert (50,20 dt TM/ha) deutlich größer. Die auf der Spiegelanlage erzielten geringeren Kornerträge und größeren Streuungswerte sind auf die ungünstigeren Witterungsbedingungen im Versuchsjahr 2013 zurückzuführen. Temperaturstürze verbunden mit Frost und ohne schützende Schneedecke und ein sehr kühles Frühjahr hatten einen Vegetationsrückstand des Winterroggens von ca. 2 Wochen zur Folge. Die darauffolgenden Starkregenereignisse und die Julihitze waren auch nicht wachstumsfördernd (siehe Kap. 2.2). Im Vergleich zum Vorjahr konnte auf Anlage 4 im Herbst 2012 bzw. Frühjahr 2013 aufgrund der Projektpause keine Grunddüngung realisiert werden (vgl. Tabelle A6a und A6b im Anhang). Weil laut EBEL & BARTHELMES (2013) der Saattermin einen entscheidenden Einfluss auf den Kornertrag hat (eine Saatzeitverspätung von 14 Tagen führte in Feldversuchen zu einer Kornertragsverringerung von 20 %), wurde dieser genauer betrachtet. Die Aussaat erfolgte 2012 (Anlage 4) jedoch standorttypisch Ende September, sogar zwei Wochen früher als im Vorjahr (vgl. Tabellen A6 a und b).

Die Stroherträge an Trockenmasse streuen variantenabhängig mit 5,24 dt TM/ha (Anlage 3) bzw. 4,99 dt TM/ha (Anlage 4) um den mittleren Strohertrag von 22,10 dt TM/ha bzw. 33,58 dt TM/ha. Für die sehr geringen Stroherträge im Jahr 2012 war die ausgeprägte Apriltrockenheit verantwortlich, weil zur Bildung von vegetativer Masse die Verfügbarkeit von Wasser in der Hauptwachstumsphase im Frühjahr eine entscheidende Rolle spielt (SAUERMANN 2012).

Es wurden Korn : Stroh-Verhältnisse von 1 : 0,39 bzw. 1 : 0,68 (Mittelwerte der acht Fruchtfolgen) bestimmt. Der fruchtartentypische Literaturwert liegt bei 1 : 0,9 (TLL 1999) bis 1 : 1 (BÖSE 2009). Diese Richtwerte beziehen allerdings Spreu und Stoppelreste mit ein (BÖSE 2009). Bei „EVA“ wurde vom „erntbaren Stroh“ (siehe oben) ausgegangen.

Die statistische Auswertung ergab bei beiden Versuchsanlagen keinen signifikanten Einfluss der Fruchtfolgevarianten auf die Ertragshöhe des Winterroggens. Sowohl die Korn- als auch die Stroherträge (Mittelwerte)

bilden eine homogene Signifikanzgruppe (Grenzdifferenz¹ nach Tukey bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %: Korn 2012 = 8,01 dt TM/ha, Stroh 2012 = 13,27 dt TM/ha, Korn 2013 = 17,84 dt TM/ha, Stroh 2013 = 9,81 dt TM/ha). Deutlich vom Mittelwert abweichende, jedoch nicht statistisch gesicherte, niedrigere Korn- als auch Stroherträge wurden in den Fruchtfolgen 3 und 5 registriert. Weidelgras in Fruchtfolge 3 kam trotz sorgfältiger Bodenbearbeitung nach der Ernte (gescheibt, gepflügt und 2 x gegrubbert) zum Durchbruch. Weidelgräser sind stark wasserzehrende Feldfrüchte und treten somit in Wasserkonkurrenz mit dem Wintergetreide. Dasselbe Problem trat in Fruchtfolge 5 auf. Auch hier wurden Ackergräser (Wiesenschwingel und Glatthafer) im Winterroggen-Bestand bonitiert. Der zu erwartende gute Vorfruchtwert des Luzerne-Kleegrases machte sich in keinem höheren N_{\min} -Wert vor Aussaat des Winterroggens im Vergleich zu den anderen Varianten bemerkbar (vgl. Tabellen A6a und b).

3.4 Zweikulturnutzung

Bei den stetig steigenden Pachtkosten, dem zunehmenden Flächenbedarf und der wachsenden Nachfrage nach Biomasse könnten Zweikultursysteme wieder an Bedeutung gewinnen. Unter Zweikulturnutzung ist der Anbau von zwei aufeinanderfolgenden, ertragsrelevanten Kulturen innerhalb eines Jahres zu verstehen. Der Erntetermin der Erstkultur (Winterzwischenfrucht) liegt vor der maximalen Biomassebildung (BBCH 55-69, Anfang bis Mitte Mai), damit für die Zweitfrucht noch ausreichend Wachstumszeit bleibt. Aber auch bei der Zweitfrucht ist die Vegetationszeit im Vergleich zum Hauptfruchtanbau verkürzt – die Aussaat erfolgt in der Regel 2 bis 4 Wochen später, verglichen mit Fruchtarten in Hauptfruchtstellung. Geerntet wird je nach Witterungsverhältnissen, TS-Gehalt und Nachfrucht Ende September bereits ab einem BBCH-Stadium von 65 (Ende September bis Mitte Oktober).

In Abbildung 14 sind die Erntedaten (TM-Erträge, TS-Gehalte) der Fruchtarten Mais, *Sorghum bicolor* und *Sorghum bicolor x sudanense* als Zweitfrucht nach der Winterzwischenfrucht Grünroggen bzw. Landsberger Gemenge im Vergleich zum Hauptfruchtanbau aufgezeigt.

¹ $GD_{5\% (Tukey)} = q \times \sqrt{(MQ/n)}$; GD = Grenzdifferenz, q = Quantile der studentisierten Spannweite bei $\alpha = 5\%$ (Freiheitsgrad des Fehlers über Anzahl der Mittelwerte, nach RASCH et al. 1973), MQ = Mittel der Quadrate zwischen den Gruppen, n = Anzahl der Mittelwerte

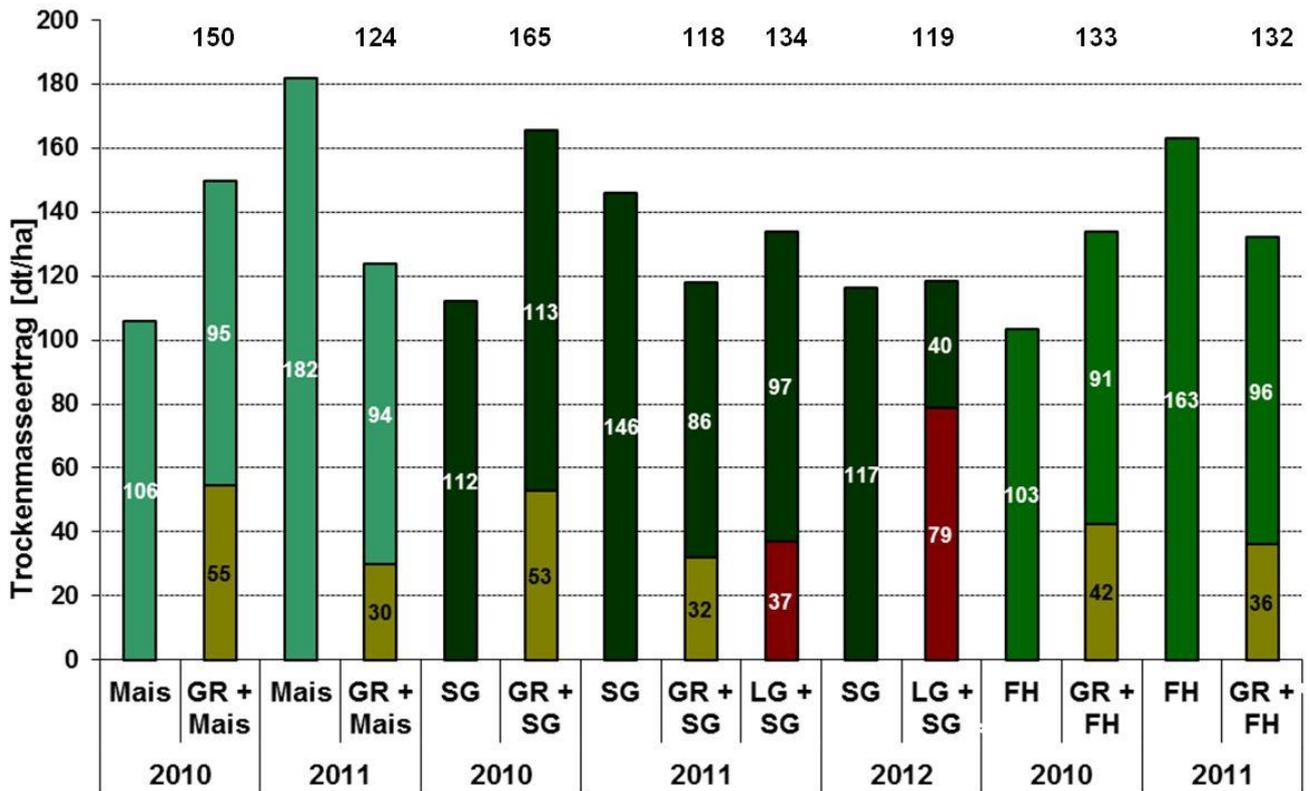
Korn 2012: q = 5,82 (df [Freiheitsgrade] = 7, n = 8); MQ = 15,188; n = 8

Stroh 2012: q = 5,82 (df = 7, n = 8), MQ = 41,565; n = 8

Korn 2013: q = 5,82 (df = 7, n = 8); MQ = 75,129; n = 8

Stroh 2013: q = 5,82 (df = 7, n = 8), MQ = 22,724; n = 8

→ Alle Mittelwertdifferenzen, die größer als die Grenzdifferenz sind, gelten als signifikant!



Werte aus dem Projekt „Anbautechnik Sorghumhirsen“ (mdl. Mitteilung THEIS, M.), Standort Trossin

** Bestand musste aufgrund des Nichtaufgangs Mitte Juni umgebrochen und erneut gedreht werden.

	TS-Gehalt [%]													
HF	28,7		32,2		29,0		35			37		20		31
WZF		18,5		24,2		17,9		23,3	21,8		23,3		20,1	24,2
ZF		25,7		20,7		28,6		26,1	22,7		25,8		18,6	24,7

Abbildung 14: Trockenmasseerträge [dt/ha] und TS-Gehalte [%] von Mais (blau-grün) und Sorghumhirsen (Sudangrashybrid [SG] – schwarz-grün; Futterhirse [FH] – grün) in Hauptfruchtstellung und Zweitfruchtstellung nach einer Winterzwischenfrucht (Grünroggen [GR] oder Landsberger Gemenge [LG]) am Versuchsstandort Trossin, Versuchsjahre 2010–2012 (Jahresmittelwerte)
Sorten: Mais „Atletico“, Sudangrashybrid „Lussi“, Futterhirsen „Super Sile 18“ (2010) und „Goliath“ (2011)

Die Ertragsprüfung der Zweikulturnutzung im EVA-Versuch am Standort Trossin erbrachte in Abhängigkeit von der Jahreswitterung unterschiedliche Ergebnisse. Das kühle *Jahr 2010* brachte insgesamt keine optimalen Bedingungen für das Wachstum der wärmeliebenden C4-Pflanzen mit sich. Insbesondere die C4-Pflanzen-Hauptfrüchte hatten aufgrund von Wassermangel im April und viel zu kühler Temperaturen bis Mitte Mai, verbunden mit sehr kalten Nächten, große Probleme beim Aufgang und der Jugendentwicklung. Lückige Bestände waren die Folge. Letztendlich lagen die Erträge von Haupt- und Zweitfrucht in diesem Jahr dicht beieinander. Weiterhin profitierte die Zweikulturnutzung 2010 von guten Vorfruchtwerten (Grünroggen: 40–55 dt TM/ha). Somit konnten durch den Anbau von 2 Fruchtarten innerhalb der Vegetationsperiode Mehrerträge zwischen 30 (*Sorghum bicolor*) und 44 (Mais) bis zu 53 dt TM/ha (*Sorghum bicolor* x *sudanense*) im Vergleich zum Anbau einer Hauptfrucht erzielt werden (30–50 %). Im *Versuchsjahr 2011* beeinträchtigte die ausgeprägte Vorsommertrockenheit dagegen den Aufgang der Zweitfrüchte. Einige Bestände mussten sogar

zum Teil umgebrochen und Mitte Juni erneut ausgesät werden. Die Hauptfrüchte nutzten für einen relativ zügigen und problemlosen Aufgang Bodenwasserreserven. Auch die Vorfruchternten fielen enttäuschend gering aus und konnten zum Gesamtertrag des Zweikultursystems nicht viel beisteuern (Grünroggen: 30–36 dt TM/ha, Landsberger Gemenge: 37 dt TM/ha). Mindererträge von 58 dt TM/ha bei Mais, 12 bzw. 28 dt TM/ha bei den Sudangrashybriden und 31 dt TM/ha bei den Futterhirsen mussten bei Zweikulturnutzung im Vergleich zum Hauptfruchtanbau in Kauf genommen werden (10–30 %). Die drei angebauten Zweitfruchtarten lagen sowohl 2010 als auch 2011 auf gleichem Ertragsniveau – mit Ausnahme vom Sudangrashybride „Lussi“ im Jahr 2010 (ca. 10–15 dt TM/ha höherer TM-Ertrag verglichen mit Mais und Futterhirse). Auch im *Versuchsjahr 2012* war die Etablierung der Zweitfrucht problematisch, allerdings weniger witterungsbedingt. Eine Saatbettverdichtung bzw. Saatausspülung Ende Mai bzw. Anfang Juni aufgrund von Starkregenfällen ist eine mögliche Ursache. Weil Beeinträchtigungen beim Aufgang und der Entwicklung von Sorghumhirsen nach der Vorfrucht Landsberger Gemenge auch in Vorjahren beobachtet wurden, ist allerdings eher eine „Unverträglichkeit“ mit Komponenten des Landsberger Gemenges anzunehmen (Ausschöpfen der Wasservorräte, Hinterlassen eines ungeeigneten Saatbettes o. ä.). *Sorghum bicolor x sudanense* musste wie auch im Vorjahr Mitte Juni erneut gedrillt werden. Die sehr geringe Wachstumszeit (später Saattermin, Ernte schon Mitte September) in Kombination mit Trockenstress im Spätsommer führten zu einem *Sorghum*-Zweitfruchtertrag von nur 40 dt TM/ha. Durch überdurchschnittliche Vorfruchtwerte des Landsberger Gemenges konnte letztendlich ein Jahresertrag des Zweikultursystems auf Hauptfruchtniveau realisiert werden (119 dt TM/ha, *Sorghum*-Hauptfrucht: 117 dt TM/ha).

In Bezug auf den TS-Gehalt erreichten alle Hauptfrüchte und Sorten, bis auf „Super Sile“, den für die Silierung optimalen Wert von > 28 %. Bei den Zweitfrüchten konnte nur das Sudangrashybrid, allerdings auch nicht in allen Versuchsjahren, TS-Gehalte von > 28 % aufweisen. Weil *Sorghum bicolor x sudanense* im allgemeinen ein besseres und schnelleres Abreifeverhalten aufzeigte als *Sorghum bicolor*, sollten zur Zweikulturnutzung mit Sorghumhirsen eher (frühreifende) Sudangrashybrid-Sorten bevorzugt werden. Für die Verwendung von Mais als Zweitfrucht bieten sich Sorten der frühen (S200-S220) bis mittelfrühen Reifegruppe (S230-S250) an. Die im EVA-Versuch erprobte Sorte „Atletico“ mit einer Siloreifezahl von 280 (mittelspät abreifend) braucht relativ viele warme und sonnige Vegetationstage und erreichte somit den silierfähigen Reifegrad in Zweitfruchtstellung in keinem Versuchsjahr. Die zu niedrigen TS-Gehalte der Winterzwischenfrüchte/Vorfrüchte könnten durch kurzes Anwelken nach der Ernte erhöht werden.

3.5 Bonituren

Ergebnisse der Bestandesaufnahmen (Bonituren) in den einzelnen Versuchsjahren fasst Tabelle 9 zusammen.

Tabelle 9: Bestandesaufnahmeprotokoll der angebauten Feldfrüchte – Getreide, C₄-Pflanzen, Regionalkulturen und Zwischenfrüchte – in den Versuchsjahren 2009–2013 des Versuchsstandortes Trossin

Fruchtarten	2009	2010	2011	2012	2013
Wintergetreide/ Winterraps/Winter- zwischenfrüchte	<ul style="list-style-type: none"> - Aufgang Wi-Gerste nach 11-12 Tagen - Wachstumseinflüsse aufgrund des kalten, frostigen Winters → trotzdem gut entwickelte Bestände zu Vegetationsbeginn - optimale Ernte nach BBCH-Vorgabe (77-83) 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufgang: 10 Tage (WiGetreide) bzw. 9 Tage (Raps) nach Aussaat - hohe Schneedecken → Schneebruch des Wildzaunes - Wildschäden am Raps, aber gut verwachsen - gute Bestandesentwicklung bei Getreide - Krankheiten: WiTriticale – Mehltau, Blattfleckenkrankheit (gering), WiGerste - Braunrost, Blattfleckenkrankheit (gering) - mittlere Lagerneigung - Ernte WiGetreide nach BBCH-Vorgabe, zur Optimierung der TS - Ernte WiRaps erst zur Teigreife 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufgang: L. Gemenge – 11 Tage, WiRaps – 11 Tage, WiGetreide – 16 Tage - leichte bis mäßige Frostschäden aufgrund Wintereinbruch im Dezember (Ø -4 °C) → verringerter Ernteertrag im Vergleich zu Vorjahren - starke Schäden am Raps – nur Blattverluste, keine Reduzierung Bestandesdichten → kein Umbruch - Hauptwachstumsphase April/Mai sehr trocken (Ø je 26 mm Niederschlag) - Krankheiten: WiTriticale – Braunrost, Grünroggen – Braunrost, Blattfleckenkrankheit, Weidelgras - Braunrost (gering-mittel) - Ernte nach BBCH-Vorgabe 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufgang: WiRoggen – 16 Tage, WiTriticale – 15 Tage, WiRaps – 7 Tage, L. Gemenge – 7 Tage - extremer H₂O-Mangel erschwerte Nov. '11 (Ø nur 1 mm NS) - optimale Bestandesetablierung vor Wintereinbruch - frostiger, trockener Februar '12 (Ø -3 °C) ohne schützende Schneedecke, ausgeprägte Frühjahrstrockenheit → Auswinterungsschäden, unausgeglichene Bestände - Aufholung der Wachstumsdefizite in Folgewochen bei „gutem C3-Pflanzen-Wetter“ - geringer Druck durch Segetalflora - Schädlinge: WiGetreide – Braunrost (sehr gering – gering), WiRaps - Rapsglanzkäfer (gering) - geringfügige Lagerneigung bei Druschfrüchten zum Zeitpunkt der Ernte (Anfang August) 	<ul style="list-style-type: none"> - Starkregenereignisse, Frosteinbrüche und Trockenstress führten zu ersichtlichen „Ausdünnungen“ der Bestände - starker Durchwuchs der Vorfrüchte der PG 3 und 5 - Luzerne und Gräser - trotz enormer Niederschläge (u. a. über 100 l / Tag) kaum Lager - Krankheiten: mittlerer bis starker Befall (BSA-Note 5-7) eines parasitischen Schlauchpilzes der Gattung <i>Septoria</i> --> braune Blattflecken - Drusch planmäßig Anfang August zur Totreife
Sommergetreide	<ul style="list-style-type: none"> - Aufgang problemlos nach 13 Tagen - Schädlinge: Blattlausbefall kurz vor Ernte - hoher Unkrautdruck (5-18 % Segetalflora) - optimale Ernte nach BBCH-Vorgabe (77-83) 	<ul style="list-style-type: none"> - verspätete Aussaat aufgrund Bodenvernässung (Ende März) - Aufgang 15 Tage nach Aussaat - Trockenphase im Juni & Juli → ersichtliche Blattschäden, LuKleegras-Untersaat größtenteils vertrocknet - Ernte nach BBCH-Vorgabe 	----	----	----
C₄-Pflanzen	<p><u>Mais:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Aufgang: 18 Tage - Schädlinge: Maiszünsler (BSA- 	<p><u>Mais:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - in HF-Stellung zögerlicher Aufgang nach 25 Tagen ³⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> - verzögerter Aufgang Zweitfrüchte aufgrund sehr geringer Boden-H₂O-Gehalte und Trockenheit - 	<p><u>Sorghum:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - kein Aufgang → Umbruch der Sudangrashybride-ZF, Neusaat 	----

Fruchtarten	2009	2010	2011	2012	2013
	<p>Note 3 ²⁾)</p> <p><u>Sorghum:</u> - Aufgang: 9-11 Tage - sehr zögerliche und langsame Jugendentwicklung → Höhen Ende Juli: Mais – 2-2,30 m; Sorghum (HF) - 1 m → Ursache: kühles Frühjahr - warmer August und sehr milder Herbst → Aufholung Wachstumsdefizite - Schädlinge: <i>Fusarium</i> sp. ¹⁾ als braune Blattflecken - Segetalflora: bis zu 5 % Schadhirsens - Ernte abweichend der BBCH-Vorgabe: SZF - Rispenschieben, HF – Ende Blüte-Fruchtentw. → Folge: suboptimaler TS-Gehalt → spätere Ernte aufgrund Wi-Roggen-Aussaat unmöglich</p>	<p>- Krankheiten: Maiszünsler (gering) - Ernte zur Teig- bzw. Siloreife (Optimierung TS)</p> <p><u>Sorghum:</u> Aussaat: HF & ZF – 22.5., SZF – 10.6. Aufgang nach 20 (HF, ZF) bzw. 10 Tagen (SZF) - zu kühle Temp. im Mai (Ø 11 °C), kalte Nächte → lückige Bestände (Ø 8-10 Pflanzen / lfd. m, bei SZF S. <i>bicolor</i> nur Ø 5 Pfl./lfd. m) - gutes Wärme- und H₂O-Angebot im Spätsommer → Zunahme Biomasse - bereits BBCH 71 geerntet, da vorhergesagter Temperaturabfall und Aussaat WiGetreide</p>	<p>Aufgang ZF-Mais nach 28 Tagen bei Aussaat Mitte Mai ³⁾, bei <i>Sorghum</i> sp. kein Auflaufen → Umbruch, Neuaussaat am 17.06.- Aufgang nach 9 Tagen - lückige ZF-Bestände (Mais: Ø 6 Pfl./lfd. m) - für HF-Mais H₂O-Reserven ausreichend (Aussaat Anfang Mai, Aufgang nach 7 Tagen, Ø 7 Pfl./lfd. m) - Ernte ZF-Mais nach BBCH-Vorgabe, Optimierung TS HF-Mais durch spätere Ernte (Teigreife) - ZF-<i>Sorghum</i> bereits bei BBCH 69-75 geerntet, da Aussaat Wi-Getreide und vorhergesagter Temperatursturz (verkürzte Vegetationszeit durch Neusaat)</p>	<p>Mitte Juni, Aufgang nach 7 Tagen → Ursache: Witterungsbedingungen, eventueller Einfluss der Vorfrucht Landsberger Gemenge (Erfahrung der Vorjahre: starke Ausschöpfung H₂O-Vorräte durch H₂O-zehrende Weidelgräser, ungenügend abgesetztes Saatbett oder Unverträglichkeit mit Komponenten des Gemenges) - eingeschränktes Längenwachstum durch Kaltluftvorstöße im Juli und Trockenphasen im Spätsommer – BBCH 30: ca. 50 cm Bestandeshöhe - auffallende Welkerscheinungen - aufgrund Trockenheit schon Mitte September silierfähige TS-Gehalte > 28 % erreicht → Ernte bei BBCH 59-61 und Ø 1,20 m Höhe</p>	
Regionalkulturen	----	<p><u>Sonnenblume:</u> - Aufgang nach 19 Tagen - Ernte nach BBCH-Vorgabe (77-83)</p>	<p>Aufgang: Rübe – 11 Tage, Sonnenblume – 19 Tage, Kartoffeln – 29 Tage → Vorkeimen der Kartoffeln kann Aufgangsprozess bei Trockenheit beschleunigen Ernte: nach BBCH-Vorgabe</p>	<p>- Wasserdefizit beim Aufgang: Kartoffeln – 28 Tage, Rübe – 6 Tage - Welkerscheinungen - geringer Druck durch Segetalflora Schädlinge: Kartoffel – Kartoffelkäfer (gering)</p>	----
Sommerzwischenfrüchte	<p><u>Gelbsenf:</u> – Aufgang nach 10 Tagen</p>	<p><u>Gelbsenf:</u> - Aufgang nach 18 Tagen, aber nur Auflauf von 3 % des ausge-drillten Saatguts</p>	<p>Aufgang: Weidelgras – 9 Tage, <i>Phacelia</i> – 11-12 Tage</p>	<p>Aufgang: <i>Phacelia</i> - 6 Tage (Aussaat: 22.6.), Weidelgras – 10 Tage (Aussaat: 29.8.) Krankheiten: <i>Phacelia</i> – Braunrost (gering)</p>	----

¹⁾ laboranalytisch bestätigt vom Referat „Pflanzengesundheit und Diagnose“ des LfULG;

²⁾ BSA-Notenskala für Bonituren des Bundessortenamtes (BSA 2000): Note 1 (sehr geringe Merkmalsausprägung) bis Note 9 (sehr starke Merkmalsausprägung)

³⁾ Die mittlere Aufgangsdauer von Mais liegt bei einer Bodentemperatur von 10–13 °C bei 18–20 Tagen (BECKMANN & KOLBE 2002).

3.6 Gasausbeuten, -gehalte und -hektarerträge

Die im EVA-Versuch ermittelten Methangasausbeuten und Methangehalte, sowohl basierend auf der ATB-Biogasmatrix (HERMANN et al. 2013) als auch berechnet nach BASERGA (FNR 2005) sind in Abbildung 16 dargestellt (Methodikbeschreibungen siehe Kap. 2.3.4.1 und 2.3.4.2). Biogasausbeuten wurden nicht abgebildet, sie sind in den Tabellen A12 (BASERGA-Werte) und A13 (ermittelte Werte über ATB-Biogas-matrix) aufgelistet.

Die spezifischen Biogas- bzw. Methanausbeuten (in l/kg oTS) sind in großem Maße von der biochemischen Zusammensetzung der Trockenmasse der Energiepflanzen abhängig. Die Gasausbeute wird im Wesentlichen von den drei Stoffgruppen Rohfett, leicht verdauliche Kohlenhydrate (Nichtfaserkohlenhydrate) und Rohprotein bestimmt (Methanausbeute: Rohfett > Rohprotein > leicht verdauliche Kohlenhydrate; FNR 2005). Die Inhaltsstoffcharakteristik der Pflanzenarten ist in Tabelle A12 aufgezeigt.

Die Methanausbeuten variieren bei den im EVA-Projekt untersuchten Pflanzenarten deutlich. Die höchsten Methangaswerte > 350 l CH₄/kg oTS (ATB) erreichten der Rübenkörper und die Kartoffelknollen aufgrund sehr geringer Rohfaseranteile und außergewöhnlicher Gehalte an leicht verdaulichen Kohlenhydraten (75–85 % in der TM), bei der Kartoffel vorrangig in Form von Stärke (> 70 % in der TM). Ein ebenfalls hohes Leistungsniveau erzielten die Winterzwischenfrüchte Grünroggen und Landsberger Gemenge mit rund 340–350 l CH₄/kg oTS (ATB) trotz relativ hoher Rohfaser- und Ligningehalte im Erntegut. Die Ausbeuten sind auf die überdurchschnittlichen Rohprotein- und Zuckergehalte zurückzuführen. Mais weist ein Methanbildungspotenzial von knapp 340 l/kg oTS (ATB) auf. Bei mittleren Rohprotein- und Rohfettwerten war beim Mais insbesondere der Anteil leicht umsetzbarer Kohlenhydratfraktionen von Bedeutung. Zu beachten ist der im Vergleich zu anderen Kulturarten herausragende Stärkegehalt von 22-34 % in der Trockenmasse. Die Mais-Zweitfrüchte liegen mit durchschnittlich 330 l CH₄/kg oTS nur wenig darunter. Das Methanbildungsvermögen differierte bei den untersuchten Winter- und Sommergetreidearten. Wintergerste zeichnet sich durch Methangasausbeuten von Ø 343 l/kg oTS (ATB) aus, gefolgt von Wintertriticale mit Ø 334 l CH₄/kg oTS (ATB). Das Leistungsniveau der Hafersortenmischung als sommerannueller Bestand ist mit rund 310 l/kg oTS (ATB) um 5–10 % geringer.

In der Trockenmasse von Wintertriticale und Wintergerste wurden mit mehr als 15 % sehr hohe Zuckergehalte nachgewiesen (NfE = Ø 60 % in der TM). Bei der Hafermischung machten sich neben den niedrigeren Zucker- (8-13 % in der TM) und NfE-Anteilen (52-54 % in der TM) zudem leicht höhere Rohfasergehalte im Vergleich zu den Wintergetreidearten bemerkbar. Das Methanbildungspotenzial von *Sorghum bicolor x sudanense* (Sudangrashybride) liegt in Hauptfruchtstellung bei durchschnittlich 298 l CH₄/kg oTS (ATB), in Zweitfruchtstellung mit Ø 314 l CH₄/kg oTS (ATB) etwas höher. Die Lignifizierung der Hauptfrucht zum Zeitpunkt der Ernte war in den meisten Versuchsjahren fortgeschrittener, erkennbar an höheren Rohfaser- und ADL-Werten. Zwischen den Sorghumhirsearten *Sorghum bicolor* und *Sorghum bicolor x sudanense* gab es keine auffallenden Differenzen in der Inhaltsstoffcharakteristik, beide Arten wiesen im Vergleich zu anderen Fruchtarten relativ hohe Anteile unverdaulicher Biomassefraktionen auf. Auch bei den sehr proteinreichen Weidelgräsern (Ø 287 l CH₄/kg oTS [ATB]) und Luzerne-Kleeegrasmischungen (250-331 l CH₄/kg oTS [ATB]) hing das Ergebnis stark vom Lignifizierungsgrad ab. Das Erntefenster ist bei diesen beiden Fruchtarten sehr gering, d. h. schon in wenigen Tagen kann der unverdauliche Rohfaser- und Ligningehalt in der Biomasse stark ansteigen. Sonnenblume profitierte zwar von herausragenden Rohfettwerten um 15 % in der Trockenmasse, die dem gegenüber stehenden hohen ADL-Werte lassen das Korbblütengewächs aber mit Ø 254 l CH₄/kg oTS (ATB) weit unter die Leistung der anderen Fruchtarten zurückfallen. Auch Winterraps (GPS) enttäuschte mit niedrigen Methanausbeuten von durchschnittlich 274 l/kg oTS (ATB). Die bei Winterraps zu erwartenden hohen Fettgehalte waren

zum Zeitpunkt der Ganzpflanzenernte (Milchreife) noch nicht nachweisbar (< 3 % Rohlipid in der TM), dafür aber höhere Gehalte an schwer verdaulichem Lignin.

Die ermittelten Ergebnisse über die Messungen vom ATB Potsdam (Abbildung 16) waren mit 5 Ausnahmen um 10–22 % höher als die nach BASERGA berechneten Werte. Der Korrelationskoeffizient nach PEARSON (bestimmt über die bivariate Korrelationsfunktion in SPSS 17.0) für eine vermutete Abhängigkeit zwischen „BASERGA-Werten“ und „ATB-Werten“ beträgt 0,256, d. h., es besteht nur ein geringer linearer Zusammenhang zwischen den Variablen ($0,2 < p < 0,5$). Diese Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (5 %) signifikant. Das Streudiagramm der Regression mit $R^2 = 0,066$ zeigt Abbildung 15.

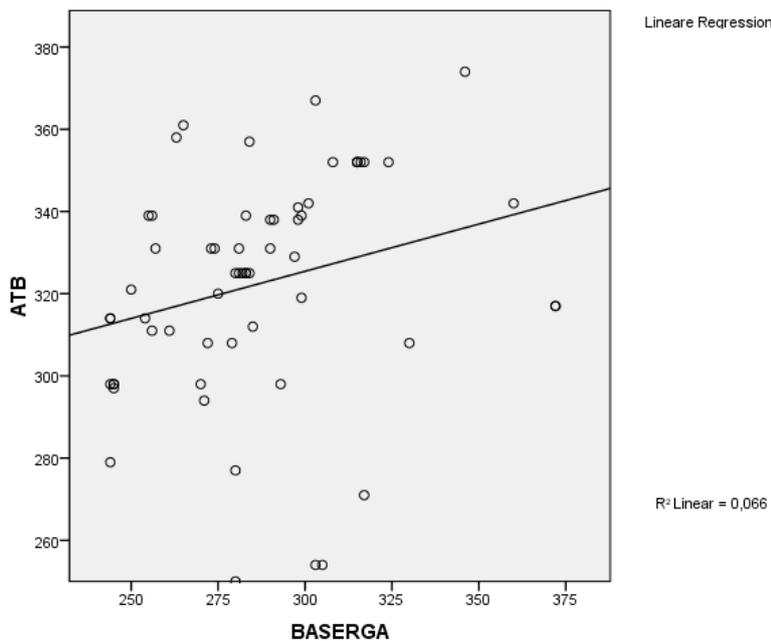


Abbildung 15: Streudiagramm der Regression mit geringer linearer Abhängigkeit zwischen BASERGA- und ATB-Werten (SPSS 17.0)

Die Methangehalte (in Vol %) der untersuchten Fruchtarten liegen bei den BASERGA-Berechnungen zwischen 54–57 % (Abbildung 16). Etwas höhere CH_4 -Gehalte erzielten die protein- bzw. lipidreichen Pflanzen Sonnenblume (Ø 58 %), Winterraps (Ø 59 %) und Luzerne-Kleegras (Ø 57–60 %). Die ermittelten ATB-Werte sind in Bezug zu BASERGA etwas höher (55–58 %). Aber auch hier heben sich proteinreichere Energiepflanzen mit CH_4 -Gehalten von 58–60 % hervor (Winterraps, Luzerne-Kleegras, Grünroggen, Weidelgräser und Landsberger Gemenge). Kartoffeln und Sonnenblumen mit den höchsten vom ATB gemessenen Methanausbeuten zeichnen sich durch die geringsten Methangehalte (< 50 Vol-% aus).

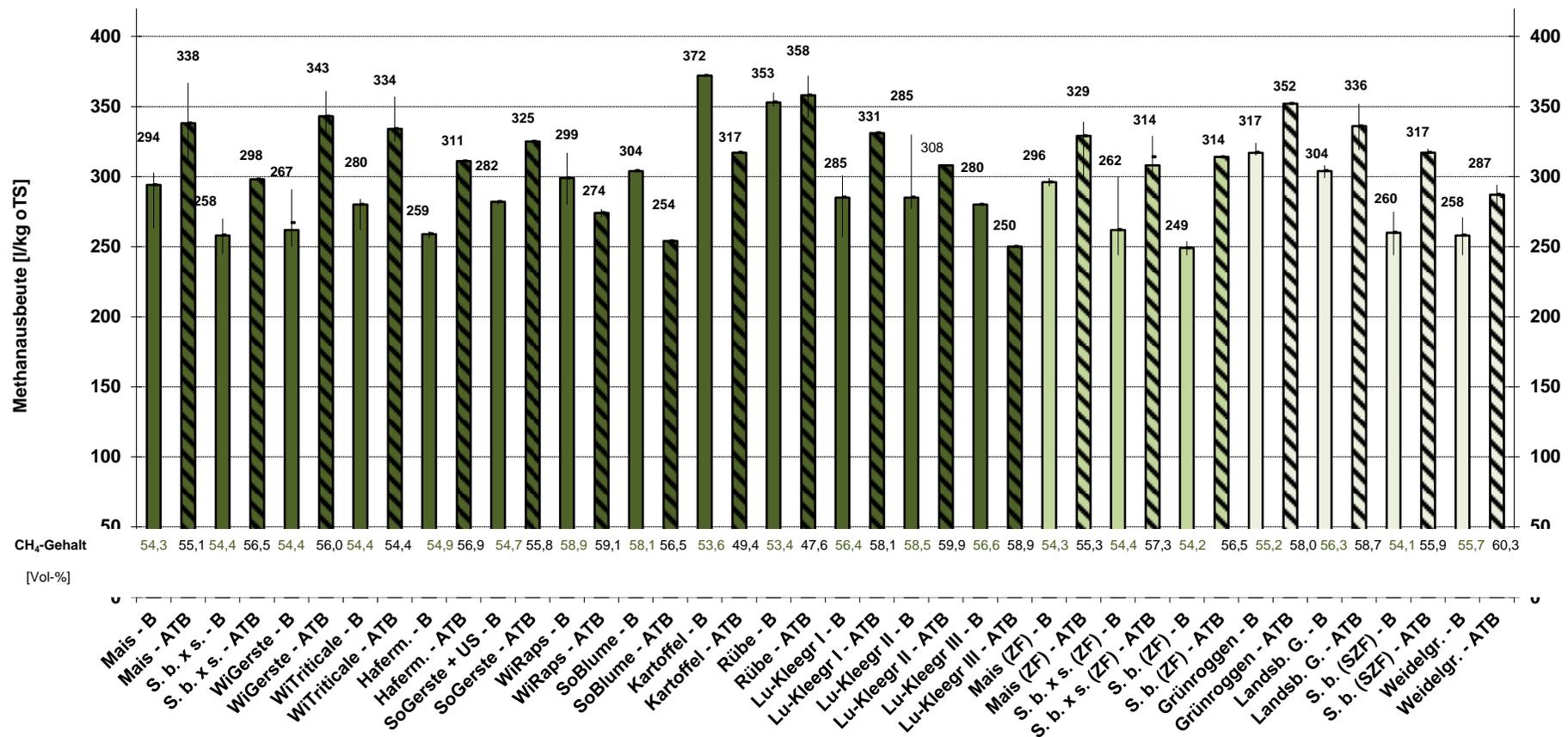


Abbildung 16: Methanausbeuten [l/kg oTS] und Methangehalte [Vol-%] der EVA-Fruchtarten vom Standort Trossin, grün: berechnet nach BASERGA (B), frisches Erntegut (FNR 2005); grün-schraffiert: korrigierte ATB-Messwerte (Batch-Versuche) bzw. bei fehlendem Batch-Wert ermittelt über ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013), Mittelwerte der Jahre 2009–2012 I = 1. Schnitt, II = 2. Schnitt, III = 3. Schnitt. * = Matrix von Sommergerste verwendet, d. h. keine Berücksichtigung der Untersaat
 ** = Winterraps als Ganzpflanze geerntet

Für die Energiegewinnung ist jedoch der Flächenertrag an Biogas, insbesondere Methan (in m³/ha) von Bedeutung. Er ist das Produkt aus der spezifischen Biogas-/Methanausbeute [l/kg oTS] und dem Trockenmasseertrag [dt/ha]. Die nach Fruchtfolge aufsummierten (kumulativen) Methangas-Hektarerträge (ATB-Methode, siehe Kap. 2.3.4.2 der in den Versuchsjahren 2009 bis 2012 im Projekt EVA II angebaute Kulturarten veranschaulicht die Abbildung 17. Die Biogas-Hektarerträge sind im Anhang, Tabelle, A12 (BASERGA) und A13 (ATB) zu finden.

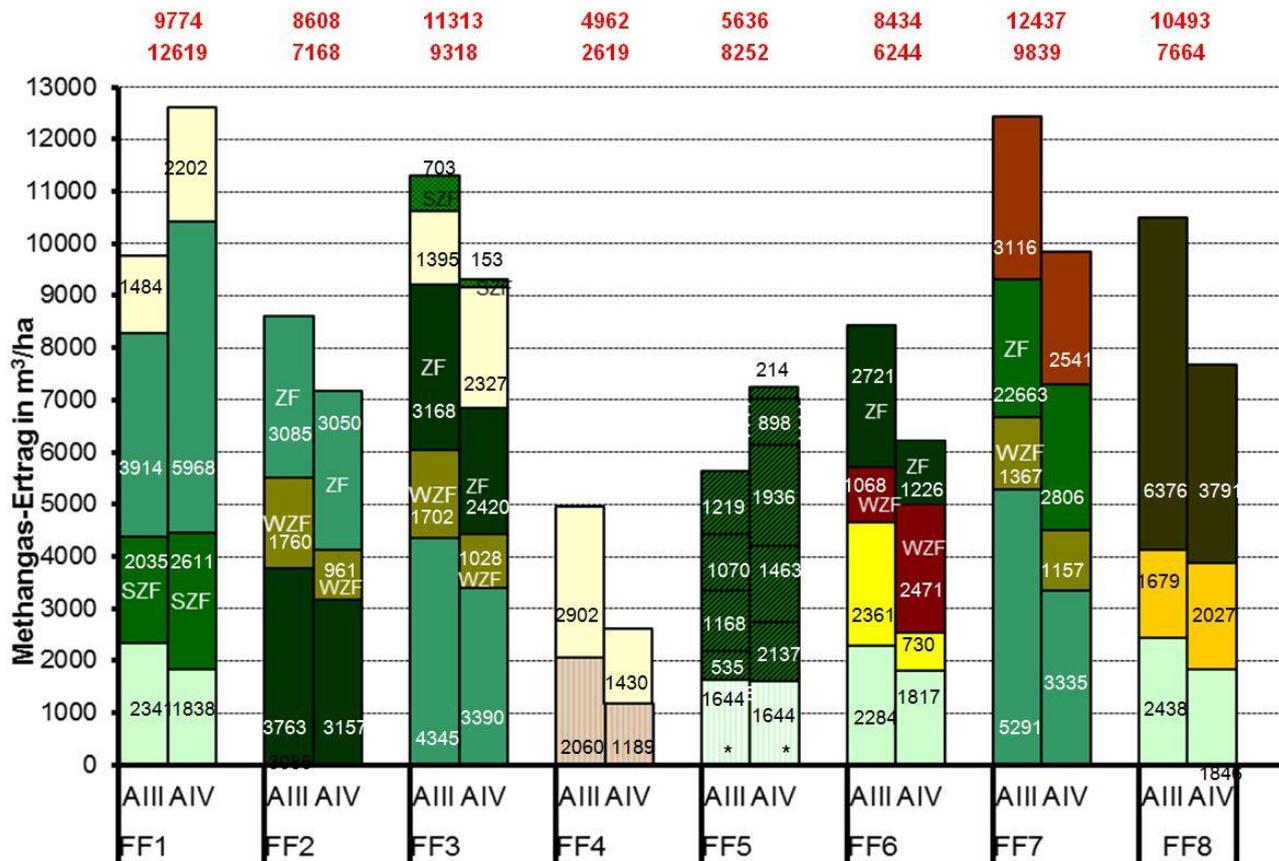
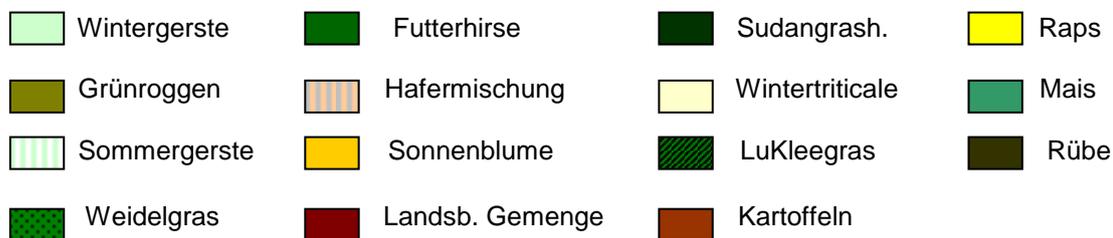


Abbildung 17: Kumulative Methangas-Hektarerträge [m³/ha] der im EVA-Projekt untersuchten Fruchtarten von Anlage 3 (AIII) ab 2009 und Anlage 4 (AIV) ab 2010, aufsummiert nach Fruchtfolgen, ohne Abschlussfruchtfolgeglied Winterroggen, Marktfrüchte und Gründungspflanzen. Ermittlung der Werte über ATB-Biogas-Matrix (HERMANN et al. 2013). * = CH₄-Ausbeute ausschließlich von Sommergerste, ohne Untersaat. WZF = Winterzwischenfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht, ZF = Zweitfrucht



Die kumulativen Methangaserträge (Abbildung 17) korrelieren in großem Maße mit den Trockenmasseerträgen (vgl. Abbildung 17). Demzufolge überzeugten ebenfalls Fruchtfolgen mit den Fruchtarten Mais, Sorghumhirsen, Wintergetreideganzpflanzen, Biogasrüben und Kartoffeln (FF 1-3, FF 7 und 8). Insbesondere die posi-

ven Eigenschaften (geringe Rohfaseranteile, hoher Gehalt leicht verdaulicher Kohlenhydrate) der Kartoffelknollen ($\bar{\varnothing}$ 2.829 m³ CH₄/ha) und der Rübenkörper ($\bar{\varnothing}$ 5.084 m³ CH₄/ha) machen sich auch im Methanhektarertrag bemerkbar (vgl. Abbildung 11). Die Sorghumhirsen ($\bar{\varnothing}$ 3.460 m³ CH₄/ha – HF) zeigen zu Mais ($\bar{\varnothing}$ 4.777 m³ CH₄/ha – HF) größere Differenzen beim Methanhektarertrag (Abbildung 18) als beim Trockenmasseertrag (vgl. Abbildung 12). Verantwortlich sind die teilweise sehr hohen Rohfasergehalte bei *Sorghum*. Weil die Fruchtfolgen 2 und 4 mit der Integration von Marktfrüchten zur Kornnutzung (Wintertriticale und Winterrap) eher ökonomisch ausgerichtet wurden, fallen die kumulativen Hektarerträge an Methan im Vergleich zu den anderen Fruchtfolgen dementsprechend schlechter aus (Abbildung 17).

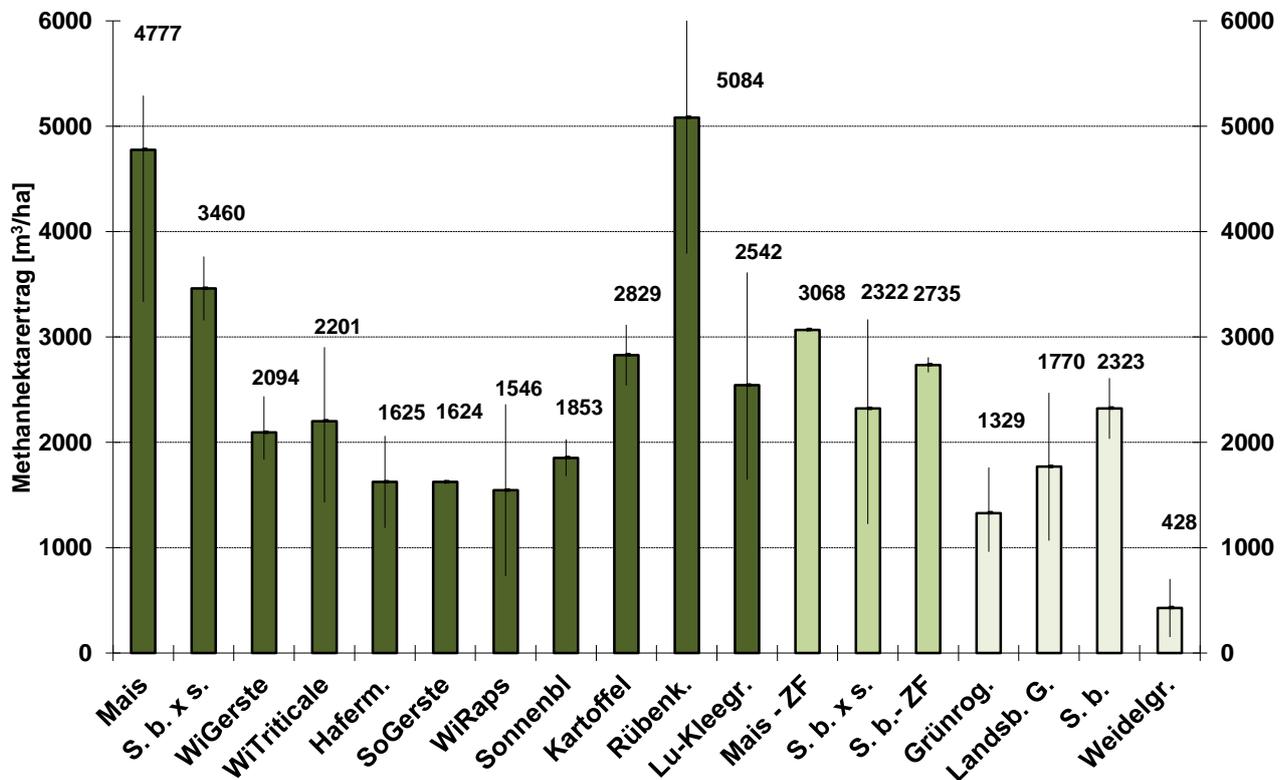


Abbildung 18: Methan-Hektarerträge [m³/ha] nach Fruchtarten im Mittel der Jahre 2009–2012, Standort Trossin, Ermittlung über ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013). * = Aufsummierung aller Schnitte pro Jahr – Jahresdurchschnittsertrag

3.7 Ökonomische Bewertung

Die ökonomische Deckungsbeitragsanalyse basiert auf der Gegenüberstellung der direkten Produktionskosten und dem Methanerlös je Hektar für die einzelnen Energiepflanzen des EVA-Versuchs (vgl. Kap. 2.3.4.3, Berechnungen von P. KORNATZ & J. MÜLLER, Universität Gießen). Die Ergebnisse der Kosten-Ertrags-Relationen sind in Tabelle 10 (Anlage 3) und Tabelle 11 (Anlage 4) zu finden.

Tabelle 10: Deckungsbeitragsanalyse (DB in €/ha) mit Gegenüberstellung von Produktionskosten [€/ha] und Erlös [€/ha] auf Basis des CH₄-Ertrags [m³/ha] für die Fruchtarten und Fruchtfolgen des EVA-Versuchs – Anlage 3 – in Trossin, Versuchsjahre 2009–2012, berechnet von P. Kornatz & J. Müller (Universität Gießen). PSM = Pflanzenschutzmaßnahmen, ArEr = Arbeiterledigungskosten

FF	Jahr	Fruchtart, FF-Stellung	TM-Ertrag [dt/ha]	CH ₄ -Ertrag [m ³ /ha]	Erlös [€/ha]	Kosten Saatgut [€/ha]	Kosten Dünger [€/ha]	PSM [€/ha]	ArEr-Kosten [€/ha] (davon: Kosten Ernte / Kosten Ausbringung Gärrest)	DB [€/ha]
1	2009	WiGerste, HF	67,9	1852	611	67	82	52	496 (251 / 51)	- 85
	2009	<i>Sorghum b.</i> , SZF	68,7	1730	571	304	121	57	450 (283 / 81)	- 361
	2010	Mais, HF	111,3	3090	1020	128	127	57	532 (319 /	176
	2011	WiTriticale, HF	48,4	1308	432	61	59	51	101)	- 102
	2011	<i>Phacelia</i> (GD), SZF	0	0	0	94	0	0	362 (219 / 297	- 168
	2012	WiRoggen (Korn), HF	55,7	0	1284	33	266	71	74	538
			FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]						376 (128 / 0)	- 2 / - 0,5
2	2009	<i>Sorghum b. x s.</i> , HF	133,8	3308	1092	145	170	54	762 (378 /	- 39
	2010	Grünroggen, WZF	54,6	1491	492	42	95	52	154)	- 179
	2010	Mais, ZF	95,3	2657	877	128	111	57	482 (285 / 85)	61
	2011	WiTriticale, HF ¹⁾	53,3	1440	475	61	65	51	520 (312 / 99)	- 74
	2012	WiRoggen (Korn), HF	58,3	0	1341	33	278	71	372 (224 / 30)	607
			FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]						353 (129 / 0)	376 / 94
3	2009	Mais, HF	145,4	4037	1332	128	165	102	689 (347 /	248
	2010	Grünroggen, WZF	52,8	1442	476	42	92	52	118)	- 191
	2010	<i>Sorghum b. x s.</i> , ZF	112,6	2788	920	145	141	57	481 (284 / 85)	39
	2011	WiTriticale, HF	45,5	1230	406	61	55	51	538 (318 /	- 120
	2011	Weidelgras, SZF	26,2	605	200	130	56	0	104)	- 387
	2012	WiRoggen (Korn), HF	54,9	0	1264	33	262	71	358 (217 / 26)	541
			FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]						401 (211 / 26)	130 / 32,5
								358 (128 / 0)		
4	2009	Hafermischung, HF	71,4	1813	598	45	96	32	552 (257 / 57)	- 126
	2010	WiTriticale, HF	91,4	2470	815	61	111	77	453 (267 / 60)	113
	2011	WiRaps, HF ¹⁾	30,3	731	241	62	54	219	459 (233 / 45)	- 553
	2012	WiRoggen (Korn), HF	59,5	0	1365	33	283	71	354 (130 / 0)	625
			FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]							59 / 15
5	2009	SoGerste, HF	53,9	1447	478	82	72	22	511 (237 / 41)	- 210
	2009	Untersaat Lu-Kleegr.				61		34	72	-167
	2010	Luzerne-Kleegras, HF	61,4	1341	443	61 ²⁾	19	0	458 (296 / 58)	- 95
	2011	Luzerne-Kleegras, HF	81,5	1780	588	0	25	0	472 (322 / 68)	91
	2012	WiRoggen (Korn), HF	53,8	0	1232	33	255	71	349 (127 / 0)	524
			FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]							143 / 36

FF	Jahr	Fruchtart, FF-Stellung	TM-Ertrag [dt/ha]	CH ₄ -Ertrag [m ³ /ha]	Erlös [€/ha]	Kosten Saatgut [€/ha]	Kosten Dünger [€/ha]	PSM [€/ha]	ArEr-Kosten [€/ha] (davon: Kosten Ernte / Kosten Ausbringung Gärrest)	DB [€/ha]
6	2009	WiGerste, HF	72,2	1969	650	67	87	52	508 (257 / 56)	- 65
	2010	WiRaps, HF	94,7	2104	694	42	155	298	504 (288 / 84)	- 305
	2011	L. Gemenge, WZF	37,1	898	296	266	91	9	457 (240 / 49)	- 526
	2011	<i>Sorghum b. x S.</i> , ZF	96,7	2394	790	145	121	0	601 (332 /	- 77
	2012	WiRoggen (Korn), HF	57,9	0	1331	33	276	71	120)	599
			FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]						353 (129 / 0)	- 374 / - 94
7	2009	Mais, HF	163,6	4542	1499	128	186	102	696 (351 /	387
	2010	Grünroggen, WZF	42,4	1158	382	42	74	52	117)	- 219
	2010	<i>Sorghum b.</i> , ZF	91,3	2299	759	304	93	57	433 (260 / 65)	- 277
	2011	Kartoffel (Knolle), HF	101,8	0	8147	1725	495	524	581 (342 /	4329 ³⁾
	2012	³⁾ WiRoggen (Korn), HF	57,6	0	1320	33	273	71	130)	591
			FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]						1075 (639 / 0)	4811 /
								352 (129 / 0)	1203	
8	2009	WiGerste, HF	71,6	1953	645	65	86	52	507 (257 / 55)	- 65
	2009	Gelbsenf (GD), SZF	0	0	0	43	0	0	50	- 93
	2010	Sonnenblume, HF	75,7	1478	488	144	123	100	570 (323 /	- 449
	2010	<i>Phacelia</i> (GD), SZF	0	0	0	93	0	9	120)	- 163
	2011	Rübe (Körper), HF	192,8	7323	2417	314		188	61	- 593 ⁴⁾
	2012	WiRoggen (Korn), HF	58,1	0	1331	33	276	71	1175	599
			FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]						(631/366)	- 764 / -
								352 (129 / 0)	191	

Tabelle 11: Deckungsbeitragsanalyse (DB in €/ha) mit Gegenüberstellung von Produktionskosten [€/ha] und Erlös [€/ha] auf Basis des CH₄-Ertrags [m³/ha] für die Fruchtarten und Fruchtfolgen des EVA-Versuchs – Anlage 4 – in Trossin, Versuchsjahre 2010–2013, berechnet von P. Kornatz & J. Müller (Universität Gießen). PSM = Pflanzenschutzmaßnahmen, ArEr = Arbeiterledigungskosten

FF	Jahr	Fruchtart, FF-Stellung	TM-Ertrag [dt/ha]	CH ₄ -Ertrag [m ³ /ha]	Erlös [€/ha]	Kosten Saatgut [€/ha]	Kosten Dünger [€/ha]	PSM [€/ha]	ArEr-Kosten [€/ha] (davon: Kosten Ernte / Kosten Ausbringung Gärrest)	DB [€/ha]
1	2010	WiGerste, HF	60,4	1648	544	67	73	77	531 (252 / 54)	- 205
	2010	<i>Sorghum b.</i> , SZF	89,5	2253	744	304	158	57	595 (329 /	- 340
	2011	Mais, HF	181,7	5045	1665	128	207	57	119)	575
	2012	WiTriticale, HF	71,8	2027	669	61	91	31	698 (382 /	79
	2012	<i>Phacelia</i> (GD), SZF	0	0	0	93	0	0	142)	- 255
	2013	WiRoggen (Korn), HF	50,8	0	1087	33	225	96	406 (244 / 43)	386
			FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]						162	<u>240 / 60</u>
								347 (126 / 0)		
2	2010	<i>Sorghum b. x s.</i> , HF	112,2	2774	916	145	143	82	682 (318 /	- 136
	2011	Grünroggen, WZF	29,8	814	269	42	52	51	104)	- 236
	2011	Mais, ZF	94,2	2626	867	128	110	54	360 (222 / 34)	12
	2012	WiTriticale (Korn), HF	48,7	0	814	61	227	25	562 (342 /	265
	2013	WiRoggen (Korn), HF	51,5	0	1102	33	228	96	126)	398
			FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]						235 (121 / 0)	<u>303 / 76</u>
								347 (126 / 0)		
3	2010	Mais, HF	104,5	2901	958	128	119	99	652 (307 / 92)	- 40
	2011	Grünroggen, WZF	31,9	871	287	42	55	51	369 (227 / 38)	- 231
	2011	<i>Sorghum b. x s.</i> , ZF	86,0	2130	703	290	108	0	547 (297 / 90)	- 242
	2012	WiTriticale, HF	70,3	1997	660	61	90	31	381 (244 / 44)	96
	2012	Weidelgras, SZF	6,3	155	51	130	14	83	367 (183 / 4)	- 544
	2013	WiRoggen (Korn), HF	48,4	0	1035	33	215	96	349 (125 / 0)	344
			FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]							<u>- 617 / -</u>
									<u>154</u>	
4	2010	Hafermischung, HF	41,2	1046	345	45	55	51	489 (216 / 26)	- 295
	2011	WiTriticale, HF	37,3	1008	333	61	45	51	335 (211 / 22)	- 160
	2012	WiRaps (Korn), HF	25,1	0	881	42	243	216	249 (112 / 0)	132
	2013	WiRoggen (Korn), HF	50,6	0	1082	33	224	96	350 (126 / 0) ⁶⁾	385
			FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]							<u>59 / 15</u>
5	2010	SoGerste, HF	52,6	1412	466	82	71	51	497 (220 / 27)	- 235
	2010	Untersaat Lu-Kleeagr.	23,6	516	170	61	20	0	212 (126 / 18)	- 122
	2011	⁵⁾	92,8	2027	669	0	28	0	493 (334 / 74)	147
	2012	Luzerne-Kleeagr., HF	108,2	25013	829	0	35	0	638 (446 / 72)	156

FF	Jahr	Fruchtart, FF-Stellung	TM-Ertrag [dt/ha]	CH ₄ -Ertrag [m ³ /ha]	Erlös [€/ha]	Kosten Saatgut [€/ha]	Kosten Dünger [€/ha]	PSM [€/ha]	ArEr-Kosten [€/ha] (davon: Kosten Ernte / Kosten Ausbringung Gärrest)	DB [€/ha]
	2013	Luzerne-Kleegrass, HF WiRoggen (Korn), HF FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]	40,5	0	768	33	159	96	333 (116 / 0)	147 <u>93 / 23</u>
6	2010	WiGerste, HF	57,4	1566	517	67	69	77	531 (252 / 55)	- 228
	2011	WiRaps, HF	28,9	642	212	42	47	185	409 (231 / 43)	- 471
	2012	L. Gemenge, WZF	78,9	2033	671	116	205	0	490 (302 / 96)	-140
	2012	<i>Sorghum b. x S.</i> , ZF	39,6	1055	348	290	53	54	550 (233 / 42)	-600
	2013	WiRoggen (Korn), HF FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]	54,5	0	1166	33	242	96	350 (128 / 0)	446 <u>- 993 / - 248</u>
7	2010	Mais, HF	103,1	2863	945	128	117	99	655 (309 / 94)	- 55
	2011	Grünroggen, WZF	36,0	983	324	42	63	51	378 (232 / 41)	- 209
	2011	<i>Sorghum b.</i> , ZF	96,2	2422	799	607	98	0	561 (318 /	- 467
	2012	Kartoffel (Knolle), HF	83,0	0	6045	1438	440	136	107)	3027
	2013	³⁾ WiRoggen (Korn), HF FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]	53,6	0	1147	33	238	96	1005 (568 / 0) 354 (128 / 0) ⁶⁾	436 <u>2727 / 682</u>
8	2010	WiGerste, HF	58,3	1590	525	67	70	50	528 (251 / 53)	- 191
	2010	Gelbsenf (GD), SZF	0	0	0	41	0	25	75	- 116
	2011	Sonnenblume, HF	91,4	1784	589	144	149	87	651 (364 /	- 441
	2011	<i>Phacelia</i> (GD), SZF	0	0	0	93	0	0	154)	- 143
	2012	Rübe (Körper), HF	114,5	3534	1166	272	0	198	49	-315 ⁴⁾
	2012	WiRoggen (Korn), HF FF / Jahr [€ ha⁻¹ a⁻¹]	51,7	0	1106	33	229	96	618 (307 / 94) 348 (127 / 0)	78 <u>- 1128 / - 282</u>

¹⁾ Ernte abweichend vom Versuchsplan als Ganzpflanzensilage (Biogassubstrat)

²⁾ aufgrund starker Verunkrautung und schlechter Entwicklung des Untersaat-Bestandes war eine Nachsaat erforderlich

³⁾ Bewertung der Kartoffel als Marktfrucht

⁴⁾ einschließlich der Reinigungskosten von 10 €/t FM nach DLG (2010): 1.334 €/ha (Anlage 3), 393 €/ha (Anlage 4)

⁵⁾ Herbstschnitt

⁶⁾ Wenn beim Winterroggen zum Erntezeitpunkt der Restfeuchtegehalt > 14,5 % war, wurden Kosten der Getreidetrocknung nach Vorgaben des KTBL (2012) berücksichtigt (Anlage 4: FF 4 – 2,5 €/ha & FF 7 – 5 €/ha). Hierfür wurden ein Heizölpreis von 0,53 €/l und ein Strompreis 0,20 €/kWh angesetzt (KORNATZ et al. 2013).

Aus der ökonomischen Analyse ist zu entnehmen, dass Mais, sowohl in Haupt- (176 bis 575 €/ha) als auch in Zweitfruchtstellung (12 bis 61 €/ha) überwiegend positive Deckungsbeiträge erzielte, mit Ausnahme einzelner Prüfglieder im für C₄-Pflanzen witterungsbedingt ungünstigen Jahr 2010 (Anlage 4 - FF 3: -40 €/ha, FF 7: -55 €/ha). Das Versuchsjahr 2010 zeichnete sich durch eine ausgeprägte Frühjahrstrockenheit aus, wodurch vor allem Mais in Hauptfruchtstellung große Probleme bei der Jugend- und Bestandesetablierung hatte, was in Trockenmasse- und Methanerträgen resultierte, die unter dem Standortniveau lagen. Dies zeigte sich letztendlich auch in den Deckungsbeiträgen. Das Zweikultursystem Grünroggen – Mais (Anlage 3/2010: -179 + 61

= -118 €/ha und Anlage 4/2011: $-236 + 12 = -224$ €/ha) überzeugte aufgrund der schlechten Vorfruchtleistung des Grünroggens (geringe TM- und CH₄-Erträge, enttäuschende TS-Gehalte) ökonomisch allerdings nicht. Die Sorghumhirsen (Futterhirsen und Sudangrashybriden) befanden sich ertraglich in vielen Versuchsjahren auf Maisniveau. Die Anbau- und Transportkosten liegen zurzeit aber noch höher als beim Mais. Getreideganzpflanzen zeichneten sich durch kostengünstige Produktionsbedingungen bei mittleren Erträgen/Erlösen aus. Aber erst bei Erträgen > 70 dt TM/ha GPS und minimierten Fungizideinsätzen konnten positive Deckungsbeitragswerte bestimmt werden. Mehrjährige Ackerfutter-Leguminosenmischungen (Luzerne-Klee gras) profitierten von sehr niedrigen Anbaukosten (einmalige Aussaat, ein reduzierter Düngebedarf aufgrund der N-Fixierungsleistung der Leguminosen, kein PSM-Einsatz zwingend notwendig). Entscheidend für den Deckungsbeitrag war der Jahresertrag als Summe mehrerer Schnitte. Im EVA-Versuch erbrachte das extensive Schnittregime (2–3 Schnitte pro Jahr) bei Jahreserträgen von 80–110 dt TM/ha Deckungsbeiträge bis zu 160 €/ha. Die Erntekosten waren trotz zweifacher Einfahrt (2 Schnitte) dennoch viel niedriger im Vergleich zu Mais. Bei Raps und Sonnenblume beeinflussten weniger geringe Ertragsleistungen das ökonomische Ergebnis, sondern zu niedrige TS-Gehalte und zu hohe Pflanzenschutzkosten. Dem sehr guten Leistungsniveau der Rüben standen enorme Aufbereitungs-, Reinigungs- und Transportkosten gegenüber. Zwischenfrüchte belasteten das Bilanzergebnis zwar ersichtlich, sollten aus Nachhaltigkeitsgründen (Nährstoff- und Humushaushalt, Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit) dennoch in die Anbausysteme integriert werden. Marktfrüchte (Getreide, Raps, Kartoffeln) können Kosten-Ertrags-Analysen deutlich aufwerten, sodass nicht nur aus wirtschaftlichem Interesse „reine“ Energiepflanzenfruchtfolgen durch Marktfrucht-Biogaspflanzen-Mischsysteme ersetzt werden sollten.

3.8 Ökologische Nachhaltigkeitsbewertungen

3.8.1 Nährstoffhaushalt (N, P, K, Mg)

Nährstoffbilanzen bewerten das Verhältnis der im Anbau aufgewendeten und mit der Ernte entzogenen Nährstoffe von Fruchtfolgen für einzelne Schläge oder Betriebe. Im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung werden möglichst ausgeglichene Bilanzen angestrebt.

Die Nährstoffsalden (Jahresmittel in kg ha⁻¹ a⁻¹) für N, P, K und Mg der im Projekt EVA II erprobten Fruchtfolgen 1–8 der Versuchsjahre 2009–2013 sind in Abbildung 19 dargestellt. Detaillierte Angaben zur Nährstoffzufuhr (mineralische Düngung von N, P, K und Mg + symbiotische N-Fixierungsleistung bei Leguminosen) und -abfuhr mit dem Erntegut der einzelnen Fruchtfolgeglieder sowie die bei der Düngebedarfsermittlung einbezogenen N_{min}-Bodengehalte sind in den Tabellen A14 und A3 aufgelistet. Nährstoffverbräuche (in kg/ha pro Jahr) nach Fruchtarten zeigt Abbildung 20.

Nährstoffe werden von der Pflanze aus dem Boden aufgenommen. Durch eine dem Nährstoffbedarf der Pflanzen angepasste Düngung in Abhängigkeit von der Ertragserwartung und dem Bodenvorrat sollen Nährstoffkreisläufe weitgehend geschlossen werden. So lassen sich Ertragsminderungen aufgrund von Mangel an Nährstoffen weitgehend vermeiden, aber auch Umweltbelastungen, die durch Düngung entstehen können, minimieren. Je nach Witterungsbedingungen, Bewirtschaftungsform und Pflanzenwachstum können die Gehalte an Pflanzennährstoffen im Boden allerdings suboptimal ausfallen, was letztendlich in negativen oder positiven Nährstoffbilanzen resultiert.

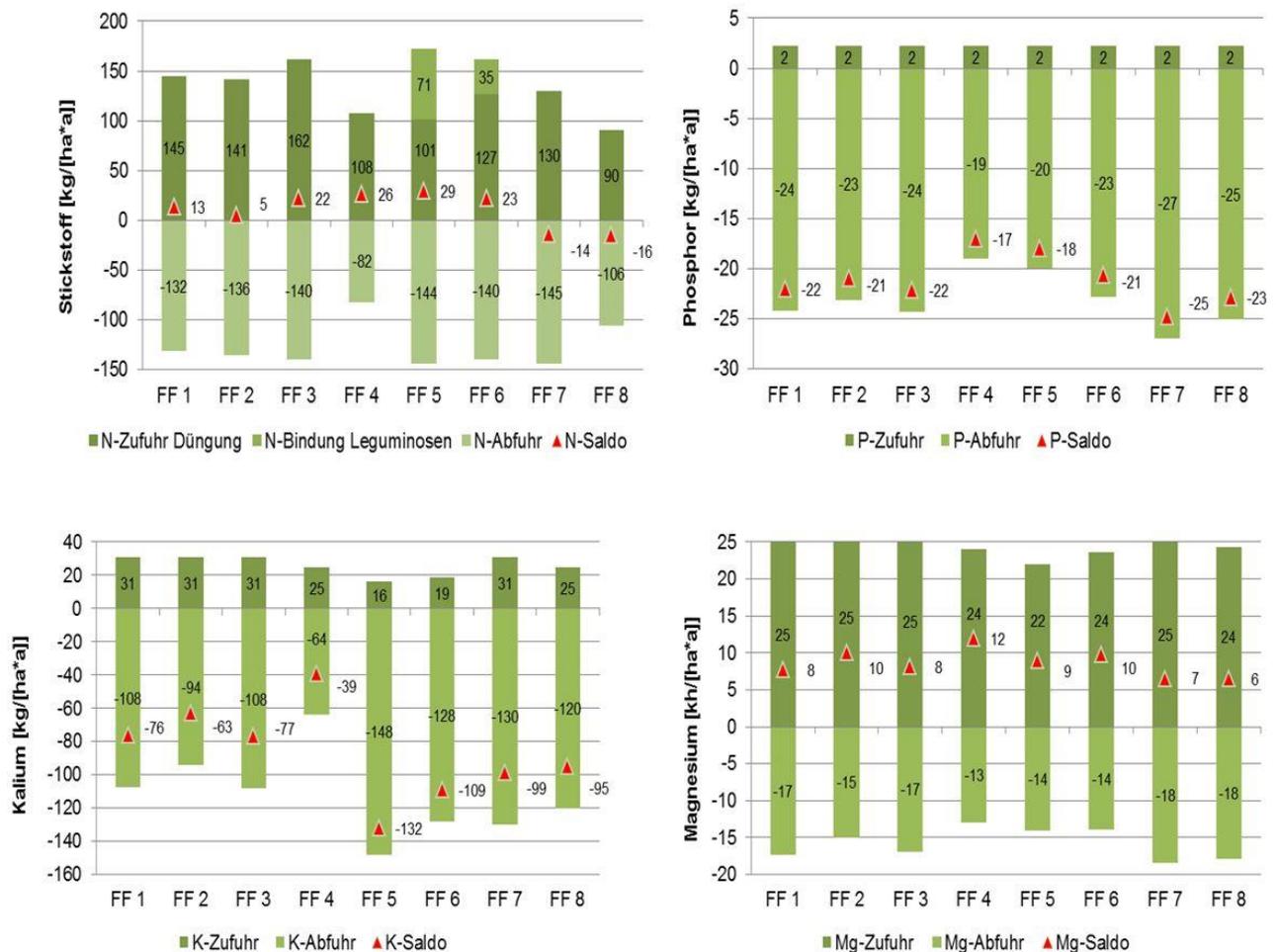


Abbildung 19: Jährliches Mittel der Nährstoffzufuhren, -abfuhren und -bilanzen für N, P, K und Mg (in kg/ha⁻¹ a⁻¹) im Energiepflanzenversuch EVA II für die Fruchtfolgen 1–8 (FF1-8) der Anlage 3 + 4, Standort Trossin, Versuchsjahre 2009–2013 (Gelbsenf und *Phacelia* in FF 1 und 8 sind Gründungspflanzen, d. h. es erfolgt kein Nährstoffentzug durch Erntegut, weil keine Beerntung), Aufstellung von M. Willms (ZALF)

Stickstoff (N) ist Voraussetzung für ein optimales Pflanzenwachstum und somit Hauptkriterium für Ertragsquantität und -qualität. Der N-Verbrauch eines Bestandes korrelierte in großem Maße mit dem Ertragsniveau, jedoch wiesen eiweißreiche Pflanzen, wie Raps und Leguminosen, einen (ertragsunabhängig) hohen N-Bedarf auf (Abbildung 20). Die N-Bilanzen der Versuchsjahre 2009 bis 2013 liegen im Bereich von -16 bis 29 kg N/ha pro Jahr. Besonders bei Kulturen, die in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf der Vegetationsperiode im Jahresertrag stark schwanken können, konnte die Düngermenge oftmals schlecht eingeschätzt werden. Die N-Fixierungsleistungen von Leguminosen (FF 5 – Luzerne-Klee gras, FF 6 – Wicke und Inkarnat klee im Landsberger Gemenge) sollten bei Nährstoffzufuhrberechnungen immer einbezogen werden. Auch Zwischenfrüchte zur Gründung (*Phacelia* und Gelbsenf in FF 1 und 8) verbesserten das Bilanzergebnis deutlich, da kein Erntegut vom Acker abgeführt wurde und die Nährstoffe bei Einarbeitung der Pflanzen dem Boden wieder gegeben wurden.

Die Kalium (K)- und Phosphor (P)-Bilanzen der Versuchsjahre 2009 bis 2013 sind bei allen Fruchtfolgen negativ (P = -25 bis -17 kg/[ha*a]; K = -132 bis -39 kg/[ha*a]). Pro Fruchtfolge wurden nur 9 kg P/ha und 50-125 kg K/ha gegeben, weil die Versorgung des Bodens mit diesen Nährstoffen zu Versuchsbeginn als hoch bis sehr

hoch eingestuft wurde (Versorgungsstufe D-E). Die Mineralisierung im Boden gebundener Nährstoffe fand bei dieser Bilanzierungsmethode keine Berücksichtigung. Kalium regelt in der Pflanze den Wasserhaushalt und fördert die Frostresistenz sowie Standfestigkeit. Einen hohen Kaliumverbrauch > 150 kg/(ha*a) hatten im EVA-Versuch Mais, Sorghumhirsen, Kartoffeln, Sonnenblumen und Leguminosen-Gräser-Mischungen (Abbildung 20). Phosphor ist ein wichtiger Baustoff für Zellwand und -kern und ist verantwortlich für Blüten- Frucht-, Wurzel sowie Samenbildung. Vor allem Leguminosen (Blüten als Anziehungspunkt für Insekten), Sonnenblumen und Druschfrüchte (Samenbildung als Ertragskriterium) sowie Hackfrüchte (Fruchtentwicklung) und die C₄-Pflanzen (Kolben- bzw. Rispenwachstum) sollten ausreichend mit Phosphor versorgt werden (Abbildung 20).

Die Berechnung der Magnesium (Mg)-Bilanzen ergab leicht positive Werte (6–12 kg Mg/[ha*a]). Es wurden aufsummiert in den drei Versuchsjahren je Fruchtfolge 86–100 kg Mg/ha verabreicht. Magnesium ist wichtigster Baustein des Chlorophylls und somit unabdingbar für die Photosynthese. Eine weitere Hauptaufgabe besteht in der Eiweißbildung. Im EVA-Versuch nahmen Mais, Sorghumhirsen, Sonnenblumen, Rüben, Luzerne-Klee gras und Raps zur Kornnutzung die höchsten Gehalte an Mg (> 20 kg/[ha*a]) auf.

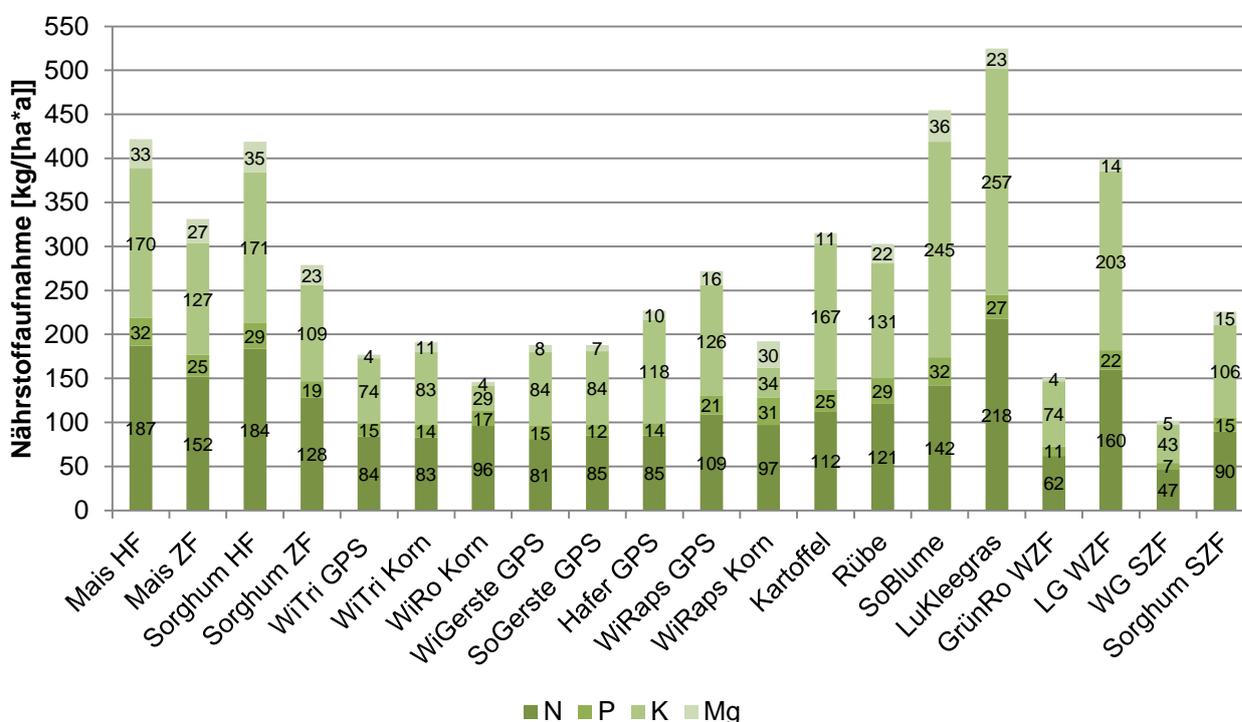


Abbildung 20: Jährlicher Verbrauch der Nährstoffe N, P, K und Mg (in kg/[ha*a]) der EVA-Fruchtarten im Mittel der Versuchsjahre 2009–2013 beider Versuchsanlagen am Standort Trossin. WiTri = Wintertriticale, WiRo = Winterroggen, GrünRo = Grünroggen, LG = Landsberger Gemenge, WG = Einj. Weidelgras. HF = Hauptfrucht, ZF = Zweitfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht, WZF = Winterzwischenfrucht, GPS = Ganzpflanzensilage

Zusammenfassend ist die Ganzpflanzennutzung als stark nährstoffzehrend einzustufen, weil kaum Pflanzenreste bei der Ernte auf dem Acker verbleiben. Positiv auf die Nährstoffbilanz wirken sich Zwischenfrüchte bei Einarbeitung als Gründünger, Marktfrüchte bei Verbleib von Ernteresten auf dem Acker und Leguminosen aufgrund der N-Fixierungsleistung von symbiontischen Knöllchenbakterien aus.

3.8.2 Humushaushalt

Humus (lat. „feuchter, fruchtbarer Erdboden“) bezeichnet die Gesamtheit der toten organischen Substanz eines Bodens. Er unterliegt vor allem den Bodenorganismen, die durch ihre Stoffwechselaktivitäten zum Auf-, Um- oder Abbau des Humus beitragen. Humus ist ein wesentlicher Faktor für die Fruchtbarkeit bzw. Ertragsfähigkeit von Böden. Der Humusgehalt eines Bodens stellt sich aus dem Fließgleichgewicht von Humusbildung durch humusmehrende Bestände und organische Düngung (einschließlich der Einarbeitung von Gründüngungspflanzen und Ernteresten) sowie Humuszerlegung (Mineralisation) ein (= Humusbilanz). Dabei sind Bodentemperatur, Bodenwassergehalt, Bodenart, Fruchtfolgegestaltung und die landwirtschaftliche Nutzung bedeutende Einflussfaktoren.

Das Ergebnis der Humusbilanzierung² für die im EVA II-Projekt am Standort Trossin erprobten Fruchtarten gibt Abbildung 22 wieder. Zu den Humuszehmern gehören Fruchtarten, die zur Ganzpflanzennutzung komplett vom Feld gefahren wurden, wie Mais (-560 kg Humus-C/ha), Sorghumhirsen (-420 kg Humus-C/ha), Getreideganzpflanzen (-280 kg Humus-C/ha), Winterraps (-280 kg Humus-C/ha), Sonnenblume (-280 kg Humus-C/ha) und Kartoffeln (-760 kg Humus-C/ha). Hackfrüchte haben den größten Humusbedarf, welcher jedoch durch Verbleiben von Ernteresten (Blättern) auf dem Acker gesenkt werden kann. Auch das Stroh von Druschfrüchten hatte einen positiven Effekt auf den Humushaushalt (+80–110 kg Humus-C je t Substrat). Humusmehrende Eigenschaften werden sowohl Winterzwischenfrüchten (z. B. Landsberger Gemenge – bei Abfuhr des Aufwuchses: +120 kg Humus-C/ha) als auch Sommerzwischenfrüchten zugeschrieben. Im EVA-Versuch wurde zum Beispiel ein Ackergras (Einj. Weidelgras) in FF 3 integriert (+ 100 kg Humus-C/ha). Weiterhin werden Leguminosen, Leguminosen-Gras-Gemenge und Stoppelfrüchte empfohlen. Bei stärkeren Humusdefiziten sollten sogenannte „Gründüngungspflanzen“ etabliert werden, welche nicht abgeerntet werden, sondern die gesamte Biomasse als organischer Dünger in den Boden eingearbeitet wird (*Phacelia* in FF 1 und 8: Ø + 150 kg Humus-C je ha, Senf in FF 8: Ø + 164 kg Humus-C/ha). Bei der Gründüngung können bis zu 8 kg Humus-C/ha je Tonne Pflanzenmaterial (10 % TS) anfallen (VDLUFA 2004). Auf stark humusverarmten Böden hat mehrjähriges Ackerfutter die stärkste Wirkung in Bezug auf Humusanreicherung (+400 kg Humus-C/ha im Ansaatjahr und +600 kg Humus-C/ha in den Folgejahren, vgl. Abbildung 22). Wie das „Kreislauf-Szenario“ der vollständigen Gärrestrückführung in Abbildung 22 zeigt, sollte die abgefahrene Biomasse, insbesondere bei der stark humuszehrenden Ganzpflanzennutzung, dem System (Acker) unbedingt wieder in Form organischer Düngung zugeführt werden.

Zur langfristigen Einstellung standortangepasster Humusgehalte sollte der Humushaushalt von ganzen Anbausystemen über mehrere Jahre betrachtet werden. Eine Gegenüberstellung von Humusmehrern und Humuszehmern mit den daraus resultierenden Salden je Fruchtfolge zeigt Abbildung 21 für den EVA II-Versuch der Jahre 2009–2012 (Anlage 3) bzw. 2010–2013 (Anlage 4). Detailliertere Angaben zur spezifischen Veränderung des Bodenhumus-Vorrates für jedes Fruchtfolgeglied unter Angabe von Reproduktionsleistungen organischer Materialien (Erntereste, Wirkung eingearbeiteter Biomasse) sind im Anhang, Tabelle A15, angegeben. Ein geringes Verlustrisiko und optimale Erträge versprechen jährliche Humussalden zwischen -75 und 100 kg Humus-C ha⁻¹ a⁻¹ (Gruppe C, VDLUFA 2004). Der optimalen Humussaldo-Gruppe C sind nur die FF 2, 6 und 8, trotz vollständiger Rückführung vom Feld gefahrener Biomassen in Form von Gärrest, zuzuordnen (unter Nichtberücksichtigung von FF 2 in Anlage 3, weil hier Wintertriticale nicht wie im Versuchsplan angegeben als Marktfrucht, sondern als GPS geerntet wurde). Diese Fruchtfolgen zeichnen sich durch eine höhere Anzahl „humusfreundlicherer“ Fruchtarten (Zwischenfrüchte, Kulturen mit Verbleib von Stroh bzw. Blättern auf

² Bei EVA wurden die Humusbilanzen nach VDLUFA (2004) unter Nutzung der unteren Werte (Cross-Compliance-Bestimmungen) berechnet (Methodik siehe Kap. 2.3.4.5).

dem Acker, Gründüngungspflanzen) aus im Vergleich zu den stark humuszehrenden Energiepflanzen-Fruchtfolgen mit überwiegender Ganzpflanzennutzung ohne verbleibende Biomasse auf dem Acker. Den höchsten Bilanzwert von 414 bzw. 489 kg Humus-C ha⁻¹ a⁻¹ (Gruppe E) erzielte der mehrjährige Ackerfutter-Leguminosenanbau (FF 5). Bei dieser Fruchtfolge machen Gärrestrückführungen keinen Sinn. Ganz im Gegenteil: Ein erhöhtes Stickstoffauswaschungsrisiko ist die Folge. Am schlechtesten schnitt die C₃-C₄-Pflanzen-Hackfrucht-FF 7 mit einem Jahressaldo von rund -260 kg Humus-C ha⁻¹ a⁻¹ ab. Zu bemerken sei, dass angenommen wurde, dass die Kartoffeln in den Verkauf gingen, sodass keine humusfördernden Eigenschaften des Gärrests dem hohen Bedarf von -760 kg Humus-C ha⁻¹ a⁻¹ entgegenstanden. Auch die Blätter wurden vollständig vom Feld abgeführt. Ist der Boden im Großen und Ganzen gut mit Humus versorgt, sind auch Werte < -75 kg Humus-C ha⁻¹ a⁻¹ kurz- bis mittelfristig tolerierbar, sollten aber durch dementsprechende Maßnahmen schnellstmöglich ausgeglichen werden.

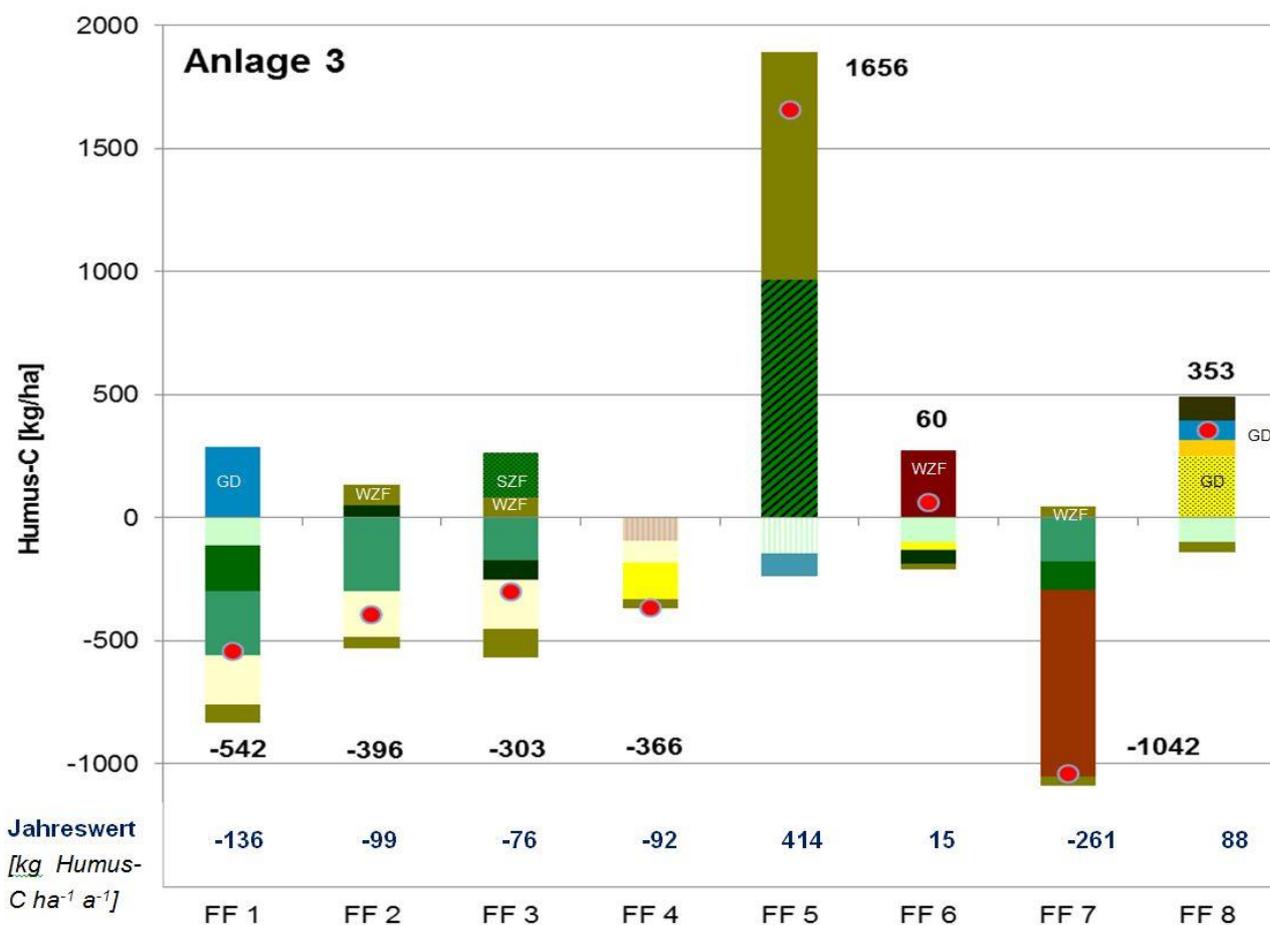
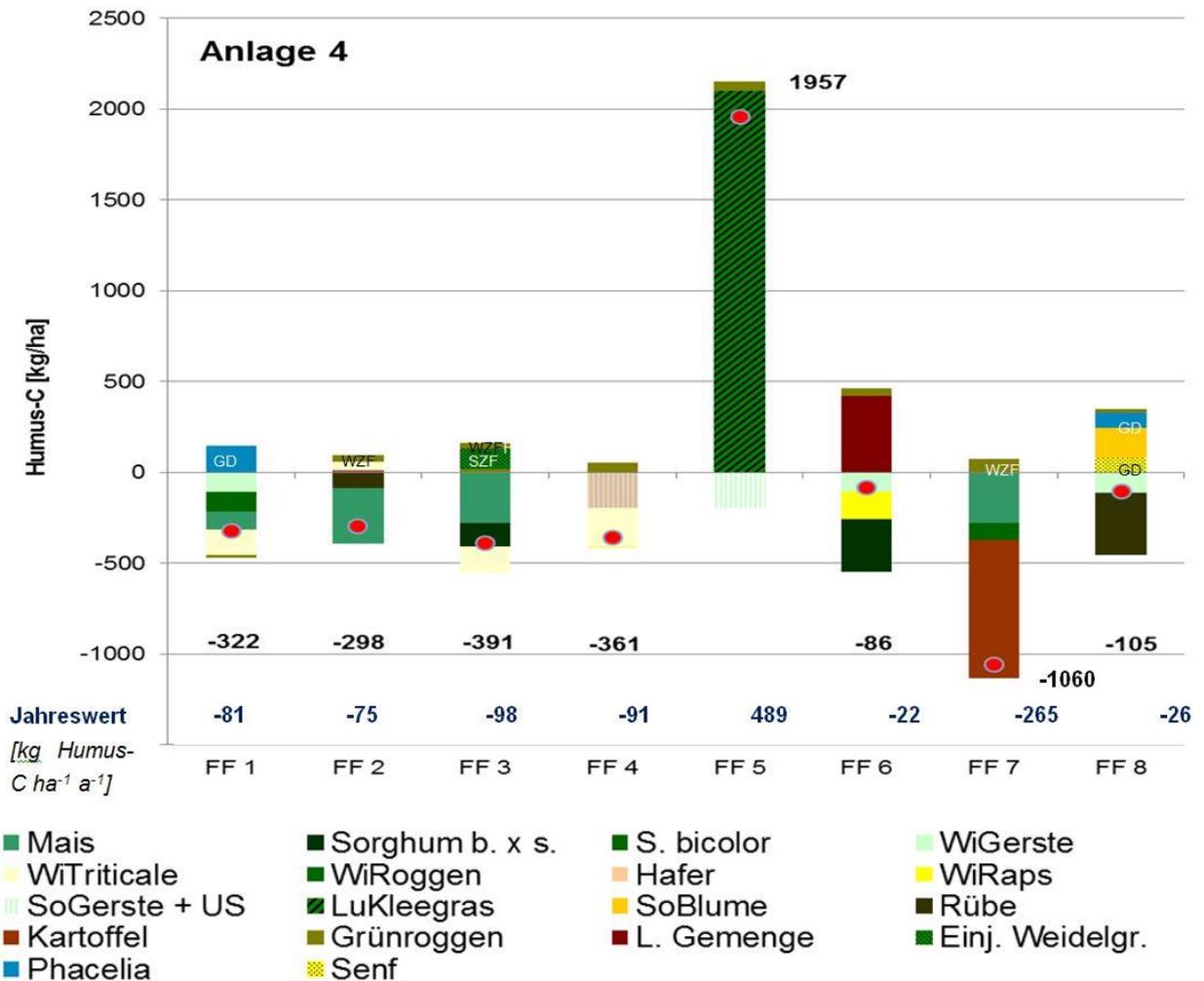


Abbildung 21: Humushaushalt (in kg Humus-C/ha) der am Standort Trossin erprobten Fruchtfolgen 1–8

a) Anlage 3: Gegenüberstellung der humusmehrenden Fruchtarten (positiver Bereich) und humuszehrenden Fruchtarten (negativer Bereich) mit Fruchtfolge-Saldo (Summe, roter Kreis) als „Kreislauf-Szenario“, d. h. bei vollständiger Gärrestrückführung der geernteten Biomasse (Ausnahme: Druschfrüchte, Gründüngungspflanzen und Kartoffeln), Versuchsjahre 2009-2012 bzw. 2010-2013, Berechnungen von M. Willms (ZALF) nach VDLUFA (2004, untere Werte, Cross Compliance). Farbskala siehe Abbildung 21b



b) Anlage 4: Gegenüberstellung der humusmehrenden Fruchtarten (positiver Bereich) und humuszehrenden Fruchtarten (negativer Bereich) mit Fruchtfolge-Saldo (Summe, roter Kreis) als „Kreislauf-Szenario“, d. h. bei vollständiger Gärrestrückführung der geernteten Biomasse (Ausnahme: Druschfrüchte, Gründüngungspflanzen und Kartoffeln), Versuchsjahre 2009–2012 bzw. 2010–2013, Berechnungen von M. WILLMS (ZALF)

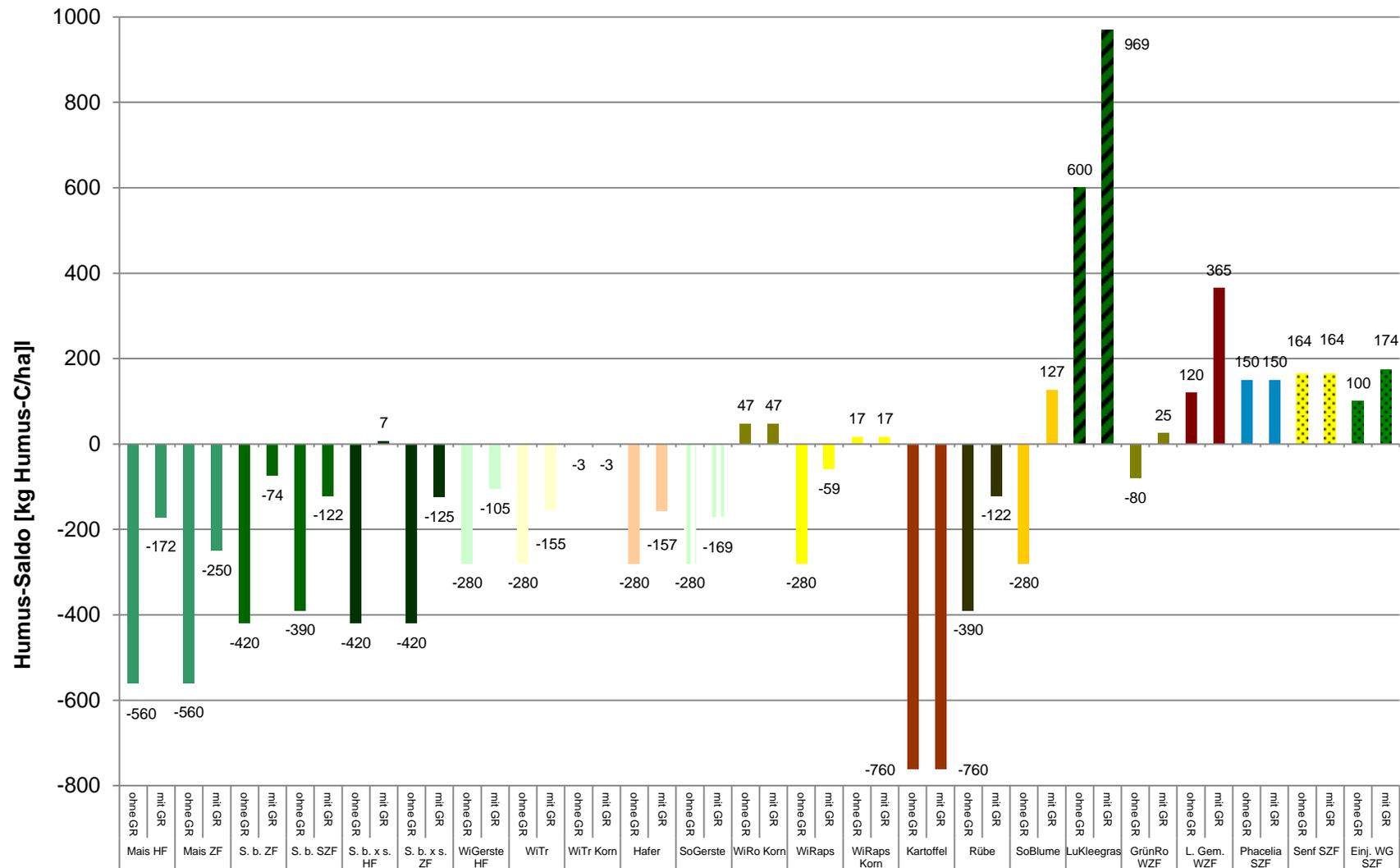


Abbildung 22: Humussalden (in kg Humus-C/ha, Mittelwerte) der im EVA II-Projekt angebaute Fruchtsorten der Jahre 2009-2013 am Standort Trossin, ermittelt aus Humusbedarf einer Fruchtart (Humusverbrauch nach VDLUFA [2004], unterer Wert) und der Reproduktionsleistung organischer Stoffe (Humuszufuhr) ohne Gärrestrückführung (linke Säule) und Szenario „Kreislauf“ bei voller Gärrestrückführung der geernteten Biomasse (Ausnahme: Druschfrüchte, Kartoffeln und Gründünpflanzen, rechte Säule). Berechnungen von M. WILLMS (ZALF). HF = Hauptfrucht, ZF = Zweitfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht, WZF = Winterzwischenfrucht.

3.8.3 Wasserhaushalt

3.8.3.1 Bodenfeuchte

Als Bodenfeuchte wird der Wasserzustand eines Bodens bezeichnet, der für die Versorgung der Pflanzen von Bedeutung ist. Die vom Boden maximal aufnehmbare, gegen die Schwerkraft haltbare Wassermenge gibt die Feldkapazität an (Wasserspeichervermögen bei Sättigung in Vol-%). Abhängig von der jeweiligen Bodenart unterliegt das Wasser unterschiedlichen Bindungskräften. Pflanzen sind ab einer bestimmten Wasserspannung nicht mehr in der Lage, dem Boden Wasser über ihre Wurzeln zu entziehen, weil die Haftung des Wassers an die Bodenpartikel zu stark ist. Das für Pflanzen nicht mehr nutzbare Wasser wird Totwasser genannt (pflanzenverfügbares Wasser bzw. nutzbare Feldkapazität = Feldkapazität – Totwasser). Wesentliche Quellen für den Bodenwasserhaushalt sind das Niederschlagswasser, das als Haftwasser gegen die Schwerkraft im Boden festgehalten wird, und das Grundwasser, welches vorrangig aus Sickerwasser gebildet wird und über Wasserverdunstungsprozesse an der Bodenoberfläche kapillar aufsteigen kann (SCHEFFER & SCHACHTSCHA-BEL 2002).

Bodenfeuchtegehalte (in Vol-%) unter den im EVA-Versuch erprobten Kulturen gibt Abbildung 23 wieder. Das maximale Wasserspeichervermögen eines mittelschluffigen Sandbodens (Su3) mit einer Trockenrohddichte von 1,77 (bestimmt vom ZALF 2009) liegt bei 25 Vol-% (BGR 2005). Im Herbst und Winter wurden die Bodenwasservorräte sowohl bei der Brache als auch bei den Pflanzenbeständen auf 21–22,5 Vol-% bzw. 18–22,5 Vol-% aufgefüllt. Niedrigere Bodenwassermengen vor Vegetationsbeginn wurden aufgrund einer niederschlagsarmen Witterung nur 2011 verzeichnet. Dabei schnitten die Winterbestände mit einem Wassergehalt < 15 Vol-% (Wintertriticale und Winterraps) etwas schlechter ab als brachliegende Flächen mit ca. 18 Vol-%. Bei der gravimetrischen Bodenfeuchtebestimmung über Gewichtsabnahme durch Trocknung bei 105 °C im Labor müssen Wasserverluste von 1–2 Vol-% einkalkuliert werden, sodass Bodensättigungswerte von 25 Vol-% nur mit Hilfe von „Vor-Ort-Messmethoden“ registriert werden können. Mit steigenden Temperaturen und somit zunehmender Transpiration und Bodenverdunstung trat eine deutliche Wasserzehrung bis hin zu Wassergehalten von knapp 3 Vol-% bei sehr trockenen Verhältnissen ein. Der bekanntlich nicht niedrige Wasserkonsum der Sonnenblumen und Hackfrüchte (Kartoffeln, Rüben) konnte nicht bestätigt werden. Sie hinterließen im Vergleich zu Hauptfrucht-Mais, Wintergetreide und -raps höhere Wassergehalte nach der Ernte (Kartoffel: 10 Vol-%, Rübe: 16 Vol-%, Sonnenblume: 18,5 Vol-%). Der Anbau von zwei Kulturen innerhalb einer Vegetationsperiode war beim Anbausystem Grünroggen-Zweitfrucht mit keiner Überstrapazierung des Bodenwasserhaushalts verbunden. Die nach der Grünroggenernte gemessenen Bodenfeuchtwerte lagen bei 14–15 Vol-%. Das mit METVER erstellte Bodenfeuchtetageswertmodell der Varianten „Mais-Brache-Mais“ und „Grünroggen-Mais“ (Modellierungen von Falk Böttcher, DWD, siehe Abbildung 24). bestätigt ebenfalls, dass bei Ernte der Vorfrucht bis Mitte Mai der Anbau einer Zweitfrucht in Bezug auf die Wasserverfügbarkeit ohne Bedenken möglich ist. Landsbergerer Gemeinde dagegen zehrte sehr stark am Bodenwasservorrat (4,6 Vol-% Bodenwasser nach der Ernte), sodass die Folgefrucht *Sorghum bicolor x sudanense* erhebliche Auflaufverzögerungen zeigte. Ein erhöhtes Anbaurisiko aufgrund übermäßigen Wasserentzugs durch Integration von Zwischenfrüchten konnte ebenfalls nicht festgestellt werden (Abbildung 23).

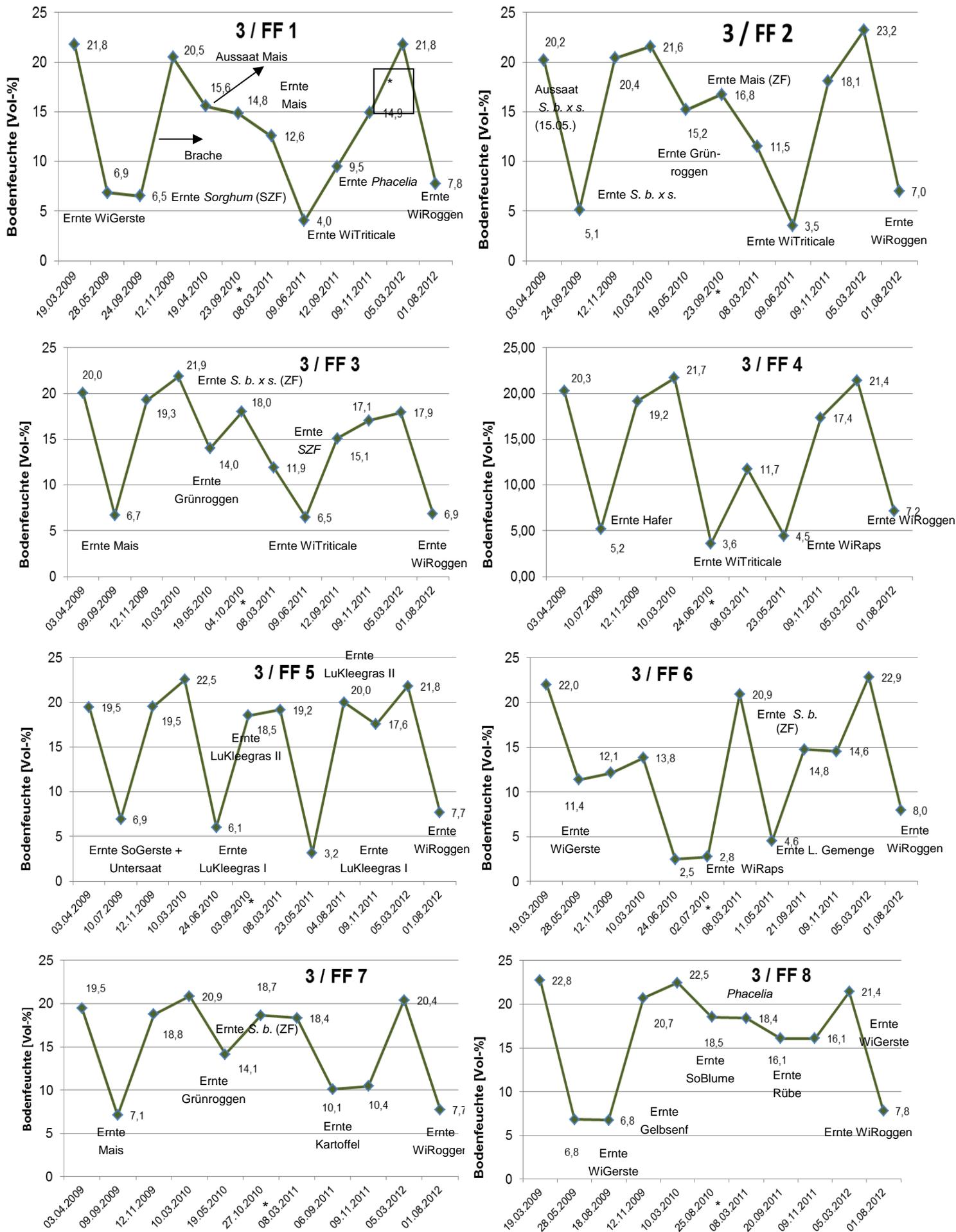


Abbildung 23: Bodenfeuchtegehalte (in Vol-%) bis zu 60 cm Tiefe der acht untersuchten Fruchtfolgen am Standort Trossin, Grundanlage, Versuchsjahr 2009–2012, Bestimmung gravimetrisch durch Trocknung von Bodenproben bei 105 °C. *Aufgrund technischer Defekte war keine Probenahme im Herbst 2010 möglich.

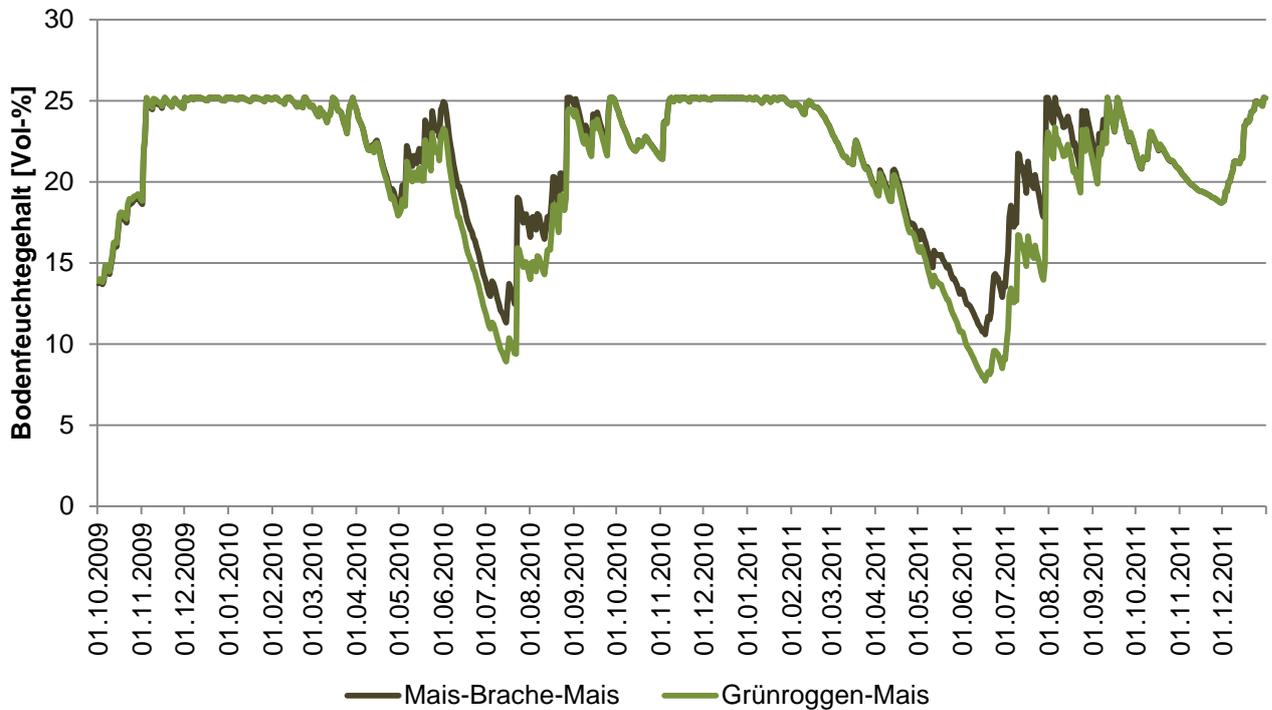


Abbildung 24: Bodenfeuchte-Tageswertmodell (in Vol-%) der Zweikulturnutzung – Variante „Grünroggen-Mais“ (grün) im Vergleich mit „Mais-Brache-Mais“ (schwarz) am Standort Trossin, Grundanlage, 2009–2011, erstellt mit dem Programm METVER des DWD aus gravimetrisch bestimmten Bodenfeuchtwerten (105 °C-Trocknung, in Vol-%) der Tiefe 0–90 cm zu Vegetationsbeginn, Vegetationsende und zu den Ernten (BÖTTCHER, DWD).

3.8.3.2 Wasserverbrauch und Wassernutzungseffizienz

Wenn die Prognosen der Klimaforscher stimmen, dann avanciert Wasser zum wichtigsten limitierenden Faktor der Ertragsproduktion. Für leichte, warm-trockene Standorte ist die Wassernutzungseffizienz einer Fruchtart in Abhängigkeit vom Wasserverbrauch und der zwischen Aussaat und Ernte gebildeten, energetisch nutzbaren Biomasse ($WNE = TM\text{-Ertrag}/\text{Wasserverbrauch}$) schon jetzt ein bedeutendes Leistungs- und Anbaukriterium. Künstliche Bewässerung zur Stabilisierung der Bestände ist nicht überall möglich. Landwirte müssen in diesem Fall verstärkt Pflanzenarten einsetzen, die auch mit wenig Wasser einen vergleichsweise hohen Biomassertrag erbringen. Der Wasserverbrauch [$mm\ ha^{-1}$] und die Wassernutzungseffizienz [$kg\ TM\ ha^{-1}\ mm^{-1}$] der im EVA-Versuch erprobten Fruchtfolgen (Abbildung 25) und Fruchtarten (Abbildung 26) wurde durch Berechnung der aktuellen Evapotranspiration (Blatt- und Bodenverdunstung) mit Hilfe des MONICA-Modells ermittelt (PRESCHER, A.-K.; ZALF). Zwischenbrachezeiten wurden beim Fruchtfolgeanbau berücksichtigt. Am besten in Bezug auf die Wassernutzung schnitt Fruchtfolge 2 mit dem geringsten Wasserverbrauch von $342\ mm\ ha^{-1}\ a^{-1}$ und einer sehr guten Wassernutzungseffizienz von $59\ kg\ TM\ ha^{-1}\ mm^{-1}\ a^{-1}$ ab. Sehr kurze Brachezeiten, leistungsstarke Trockenmassebildner (C_4 -Pflanzen) und eine zweijährige, wasserschonende Getreidekultivierung zeichnen dieses Anbausystem aus. Das integrierte Zweikultursystem Grünroggen-Mais verbrauchte aufgrund des geringen Wasserentzugs der Erstfrucht ($\varnothing\ 78\ mm\ ha^{-1}$) weniger Wasser und war im Durchschnitt aller Versuchsjahre sogar wassereffizienter als die Hauptfrucht kultivierung von Mais (Wasserverbrauch: Grünroggen + Mais: $\varnothing\ 306\ mm\ ha^{-1}$, HF-Mais: $\varnothing\ 329\ mm\ ha^{-1}$). Wasseraufnahmen von knapp über $340\ mm\ ha^{-1}\ a^{-1}$ wiesen auch die FF 4 und 6 auf, aber mit schlechterer Umsetzung (48 bzw. $34\ kg\ TM\ ha^{-1}\ mm^{-1}\ a^{-1}$). Diese Anbausysteme enthalten vorwiegend C_3 -Pflanzen, Getreide und Raps, die durch eine sparsame Wassernutzung charakterisiert sind. Fruchtfolgesysteme mit den höchsten Wassernutzungseffizienzen waren die hin-

sichtlich des Ertragspotenzials leistungsstärksten C₃-C₄-Energiepflanzen-Fruchtfolgen mit Mais, Sorghumhirsen, Wintergetreideganzpflanzen und Kartoffeln. Weil der Wasserverbrauch proportional zum Ertrag zunimmt (SCHITTENHELM 2009), müssen beim Anbau dieser biomassestarken Fruchtfolgen höhere Wasseraufnahmen in Kauf genommen werden.



Abbildung 25: Jährliche Wasserverbräuche [mm ha⁻¹ a⁻¹] und Wassernutzungseffizienzen [WNE, Werte in grün, kg TM ha⁻¹ mm⁻¹ a⁻¹] auf Grundlage von Evapotranspirationsprozessen der untersuchten Fruchtfolgen inkl. Brachezeiten am warm-trockenen Standort Trossin (Su3), Versuchsdauer: 2009–2013, Mittel aus 2 Anlagen, Berechnungen von PRESCHER (ZALF) mit Hilfe des MONICA-Modells. *keine MONICA-Parametrisierung für die Fruchtarten Sonnenblume und Rübe erfolgt

Bei Betrachtung der Fruchtarten zehrten Mais (HF: Ø 329 mm ha⁻¹), Sorghumhirsen/Sudangrashybriden (HF: Ø 247 mm ha⁻¹) und Luzerne-Kleegrass (Ø 222 mm ha⁻¹ a⁻¹) am stärksten an den Bodenwasservorräten (Abbildung 26). Getreide und Raps waren am ressourcenschonendsten. Zu bemerken ist, dass Sorghumhirsen (Sudangrashybride „Lussi“) sowohl in Hauptfrucht- als auch Zweitfruchtstellung bei vergleichbarem Ertragsniveau im Durchschnitt aller Versuchsjahre deutlich geringere Wasserverbräuche (HF: *Sorghum b. x s.* Ø 247 < Mais Ø 329 mm ha⁻¹, ZF: *Sorghum b. x s.* Ø 188 < Mais Ø 228 mm ha⁻¹) und höhere Wassernutzungsleistungen (HF: *Sorghum b. x s.* Ø 50 > Mais Ø 41 kg TM ha⁻¹ mm⁻¹, ZF: *Sorghum b. x s.* Ø 53 > Ø 42 kg TM ha⁻¹ mm⁻¹) aufwiesen als Mais. WAGNER & KNOBLAUCH (2009, 2011) bestätigen eine bessere Wasserumsetzung der Sorghumhirsen am Beispiel von *Sorghum bicolor* im Vergleich zu Mais, allerdings nur bei ausreichender Niederschlagsversorgung.

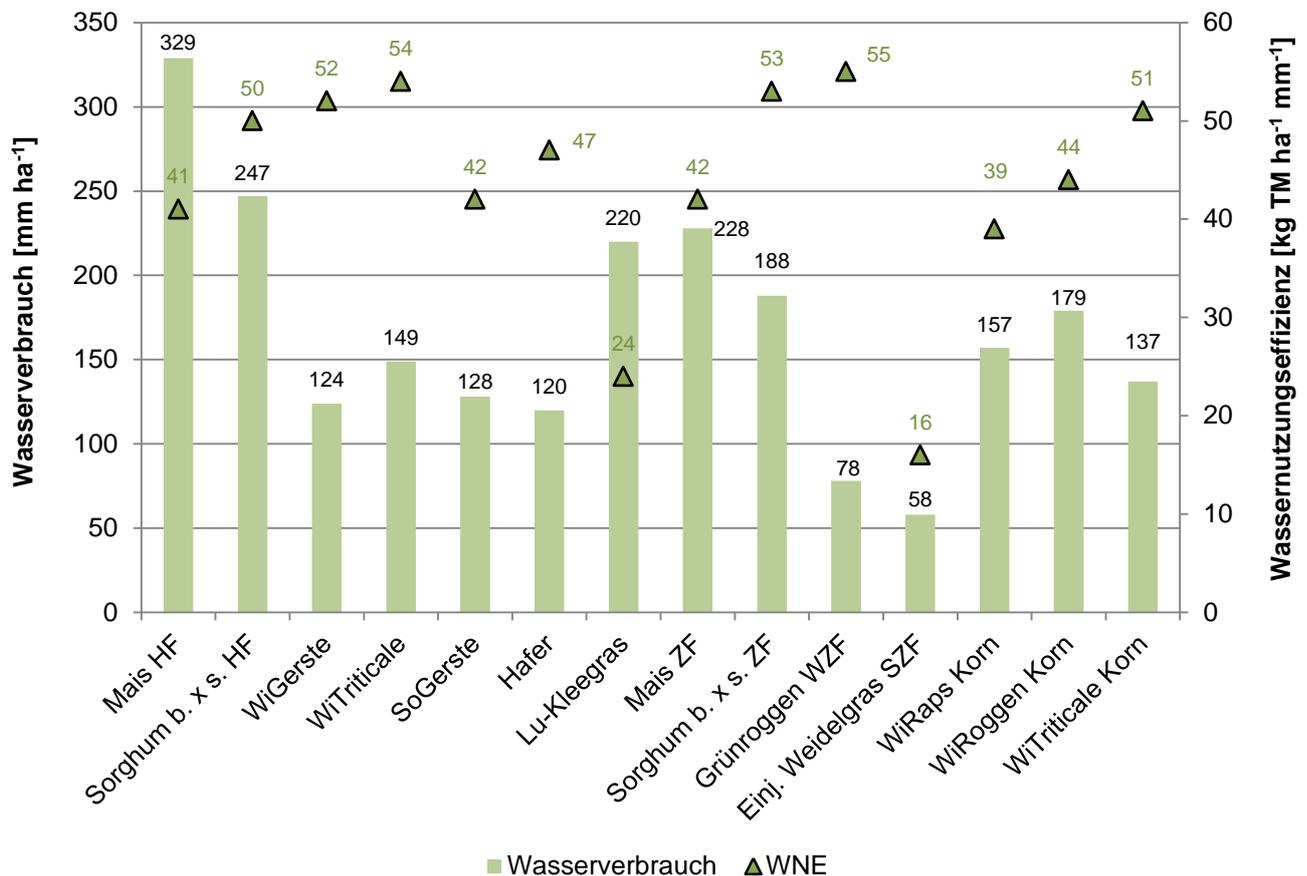


Abbildung 26: Wasserverbräuche [mm ha⁻¹ a⁻¹] und Wassernutzungseffizienzen [WNE, Werte in grün, kg TM ha⁻¹ mm⁻¹ a⁻¹] auf Grundlage von Evapotranspirationsprozessen der untersuchten und Modellparametrisierten Fruchtarten am warm-trockenen Standort Trossin (Su3), Versuchsdauer: 2009–2013, Mittel aus 2 Anlagen, Berechnungen von PRESCHER (ZALF) mit Hilfe des MONICA-Modells.

Schlussfolgernd bieten sich zur Erzielung guter Biomasseerträge bei limitierendem Wasserangebot die wassernutzungseffizienten Sorghumhirsen (\emptyset 50 als HF bzw. 53 als ZF kg TM ha⁻¹ mm⁻¹) und Wintergetreideganzpflanzen (\emptyset 52–54 kg TM ha⁻¹ mm⁻¹) an. Mais braucht zwar zur Gewährleistung seines Ertragsniveaus eine bestimmte Wasserverfügbarkeit (\emptyset 41 kg TM ha⁻¹ mm⁻¹), ist als C₄-Pflanze aber durchaus in der Lage Trockenphasen, wenn auch mit Ertragseinbußen, gut zu überstehen (Biomassebildung bei geschlossenen Spaltöffnungen durch Vorfixierung von CO₂ möglich). Mehrjährige Ackerfutter-Bestände schnitten hinsichtlich der Wasserbilanz weniger zufriedenstellend ab. Für leichte, wasserärmere Böden eignen sich allerdings Luzernegras-Mischungen mit trockenoleranteren Gräsern, wie Glatthafer und Knautgras, besser als Luzerne-Klee-Gras-Gemenge mit Komponenten, wie Rotklee, Wiesenschwingel, Wiesenlieschgras und Weidelgräser, die ein gewisses Wasserangebot voraussetzen (TLL 2012). Zur Verringerung der unproduktiven Evaporation sollten nach der Hauptfruchternte Zwischenfrüchte integriert werden (Bodenverdunstung > Blattverdunstung im Winter; SCHITTENHELM 2009, GRUNEWALD & JÄKEL 2012 [Modellierungen vom DWD], vgl. auch Kap. 3.8.3.1). Im EVA-Versuch konnte gezeigt werden, dass Grünroggen als Winterzwischenfrucht bei relativ geringer Wasseraufnahme bis Mitte Mai kein Anbau- und Aufgangsrisko für eine frühe Zweitfrucht darstellt.

3.8.4 Nitrat austräge

Stickstoff wird generell als Motor des Pflanzenwachstums bezeichnet. Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft haben aber zu einem Anstieg der Nitratkonzentration im Grundwasser geführt. Um die Zielvorgabe der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) „Schaffung eines guten ökologischen und chemischen Zustandes von Gewässern“ erfüllen zu können, müssen die Nährstoffausträge mit dem Sickerwasser reduziert werden. Nährstoffverlagerungen sind aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten des Sickerwassers erst in einigen Jahren im Grundwasser nachweisbar. Aussagen über mögliche Stickstoff-Auswaschungsrisiken geben N_{\min} -Boden-Werte zu bestimmten Zeiten. Unter dem N_{\min} -Wert wird der Gehalt an leicht verfügbarem mineralischem Stickstoff, Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+), verstanden. Die N_{\min} -Mengen nach der Ernte und zu Vegetationsende im November erlauben eine Momentaufnahme des noch verfügbaren mineralischen Stickstoffs im Boden. Der Nachernte- N_{\min} gestattet Rückschlüsse darauf, ob Stickstoffdüngung und -mineralisation mit der Aufnahme durch die Pflanze in Einklang gestanden haben. Der N_{\min} -Wert zu Vegetationsende gibt Auskunft über die Mineralisationsleistung des Bodens zwischen Ernte und Winterbeginn und lässt erste Abschätzungen des Nitrat-Verlagerungsrisikos mit dem Sickerwasser zu (BUTTLAR 2012). Weil nur mineralisch gedüngt wurde, lag kein erhöhtes Mineralisationspotenzial aus organischer Düngung vor. Die in Abbildung 27 gezeigten N_{\min} -Gehalte (in kg/ha) der Bodenbeprobungen nach den Ernten der Kulturarten und zu Vegetationsende lassen Aussagen zur kulturbezogenen N-Dynamik der untersuchten Pflanzen zu. Beprobungen zu Vegetationsbeginn im Frühjahr dienen der N-Düngebedarfsermittlung einer Kulturart und wurden in diesem Zusammenhang nicht abgebildet (dazu siehe Tabelle A3 im Anhang). Düngergaben zu den angebauten Beständen sind in Tabelle A3 (Anhang) wiedergegeben. Bei Interpretation von kulturspezifischen N_{\min} -Bodengehaltsdiagrammen ist allerdings zu berücksichtigen, dass neben der angebauten Kulturart auch die Bodenbearbeitung und der Witterungsverlauf (Temperatur, Niederschlag) einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe des N_{\min} -Gehaltes haben (BUTTLAR 2012).

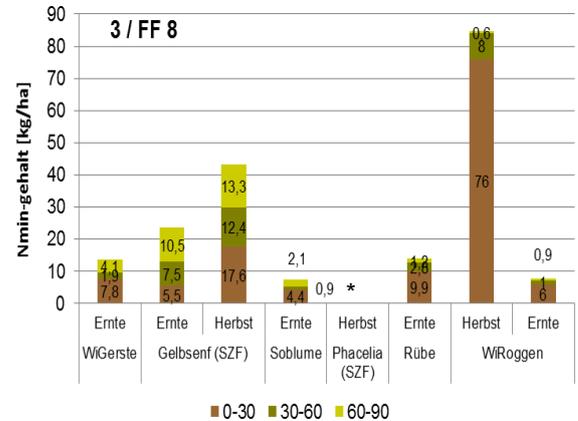
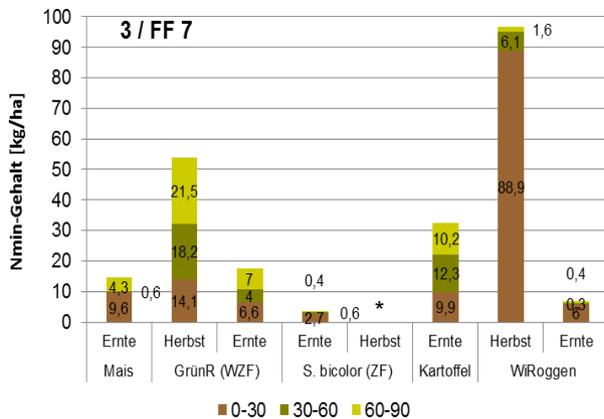
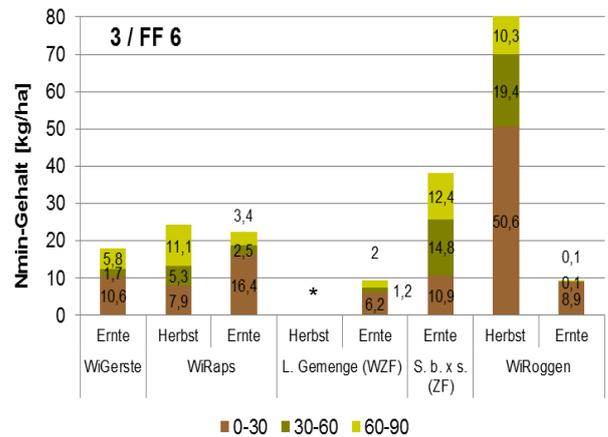
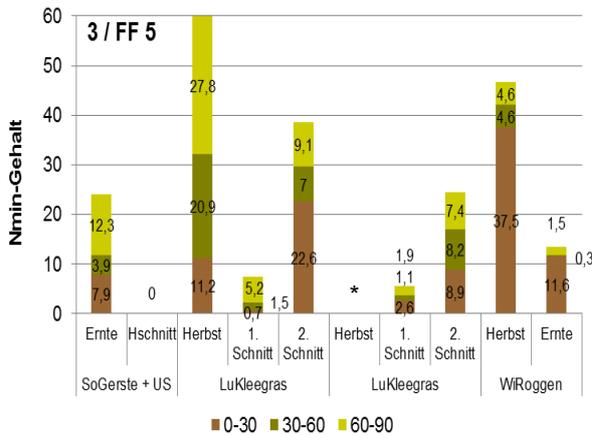
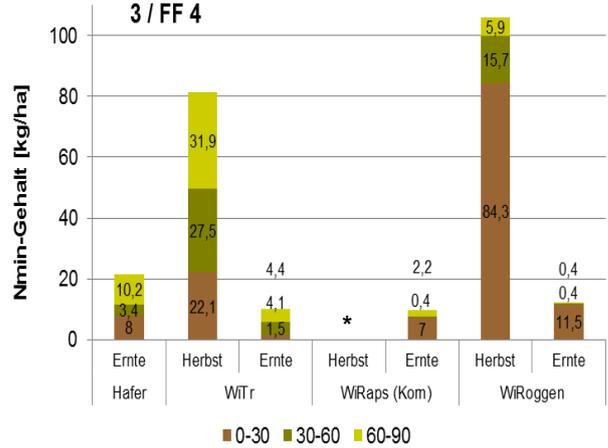
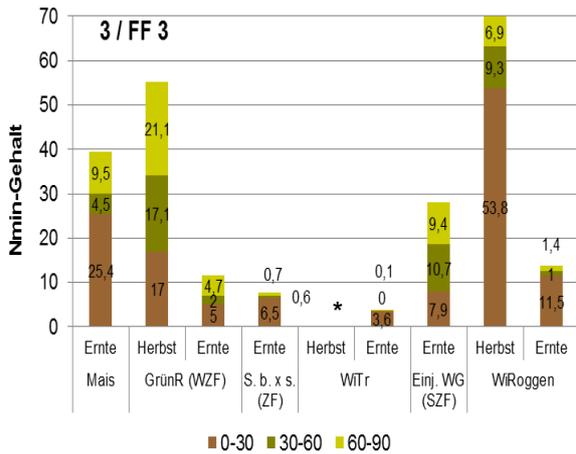
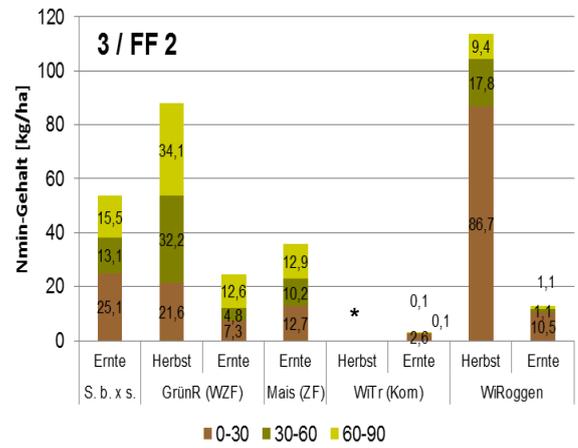
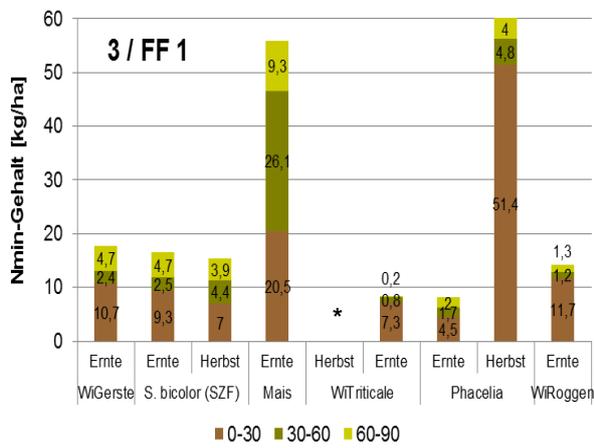


Abbildung 27 a): N_{min} -Gehalte (in kg/ha) in den Bodentiefen 0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm nach der Ernte einer Fruchtart und im Herbst (Mittelwert aus 4 Parzellen) im Verlauf der Fruchtfolgen 1–8 zur Abschätzung des Nitratverlagerungsrisikos. Anlage 3 (2009–2012). *Reparaturen am Probenahmegerät = keine N_{min} -Beprobung erfolgt.

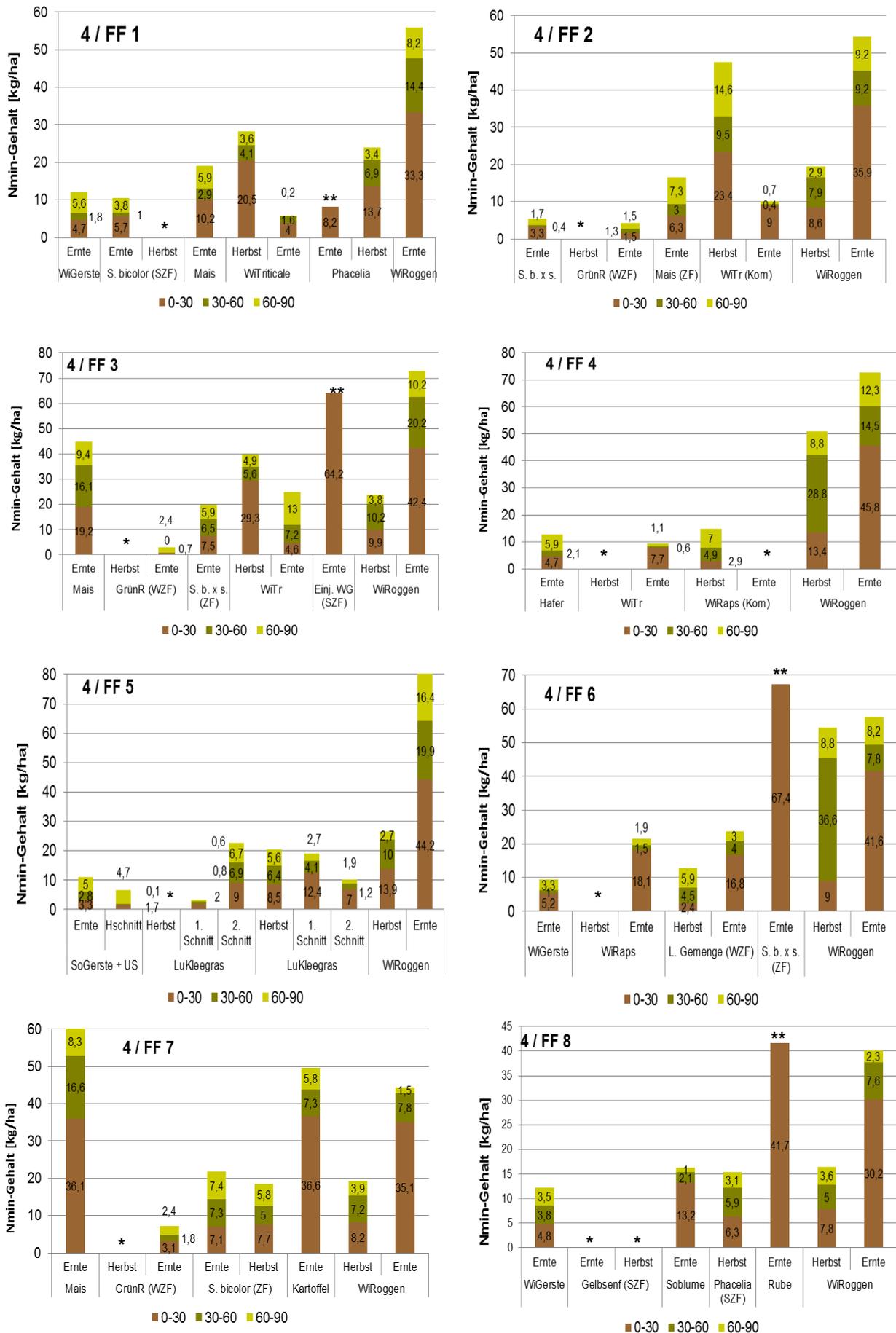


Abbildung 27 b): N_{min} -Gehalte (in kg/ha) in den Bodentiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm nach der Ernte einer Fruchtart und im Herbst (Mittelwert aus 4 Parzellen) im Verlauf der Fruchtfolgen 1–8 zur Abschätzung des Nitratverlagerungsrisikos. Anlage 4 (2010–2013). *Reparaturen am Probenahmegerät = keine N_{min} -Beprobung erfolgt, ** Beprobung war nur in einer Tiefe von 0–30 cm möglich.

Die bei EVA II ermittelten Nachernte-N_{min}-Gehalte differierten zwischen 5 und 80 kg N_{min}/ha (0–90 cm Bodentiefe) je nach Fruchtart und Jahr. Nicht erreichte Ertragserwartungswerte und somit die Nichtausschöpfung gedüngter Stickstoffmengen waren die Hauptursache erhöhter N_{min}-Werte nach Aberntung einer Fruchtart (z. B. Abschlussfrucht Winterroggen 2013: 40–81 kg N_{min}/ha [0–90 cm], Sommerfrüchte 2012: 40–70 kg N_{min}/ha [0–90 cm]). Ertragsschwankungen der C₄-Pflanzen über die Projektphase hinweg zeigen sich auch in einem breiten Nachernte-N_{min}-Bereich (Mais: 15–60 kg N_{min}/ha [0–90 cm], Sorghumhirsen: 5–55 kg N_{min}/ha [0–90 cm]). Sorghumhirsen besitzen laut THEIß (2012) und ZANDER (2012) ein größeres Nährstoffaneignungsvermögen als Mais, was auch die Beprobungsergebnisse bestätigten (N_{min}-Gehaltsvergleich beim Anbau von *Sorghum* und Mais im direkten Jahresvergleich 2009, 2010 und 2011). Getreide-GPS zeigt erfahrungsgemäß die geringsten N_{min}-Gehalte nach der Ernte im Boden (BUTTLAR 2012), so auch im EVA II-Versuch (< 25 kg N_{min}/ha [0–90 cm], Ausnahme: Winterroggen 2013).

Die Herbst-N_{min}-Gehalte sollten bestimmte Grenzwerte nicht übertreffen. Die tolerierbaren N_{min}-Gehalte sind von der Sickerwasserrate und von der Bodenart abhängig (HENNING & SCHEFFER 2000, siehe Tabelle 5). Für den leichten Versuchsstandort Trossin (Su, Sickerwassermenge zwischen 150 und 250 mm/a) geben HENNING & SCHEFFER (2000) einen Herbst-N_{min}-Grenzwert von 20 (bei niedrigerer Sickerwassermenge < 200 mm) bis 30 kg/ha (bei höherer Sickerwassermenge > 200 mm/a) an. Dieser wurde im EVA-Versuch in vielen Versuchsjahren, vorrangig beim Anbau der stark im Ertrag schwankenden Kulturen Mais, Sorghumhirsen und Sommergetreide (weil Düngermenge schwer kalkulierbar), deutlich überschritten (vgl. Abbildung 27a und 27b). Das danach angebaute Wintergetreide war bis Vegetationsende nicht in der Lage, den überschüssigen mineralischen Stickstoff im Boden zu binden.

Zur Minderung von Nitratauswaschungen bieten sich mehrjährige Ackerfuttermischungen und Sommerzwischenfrüchte (z. B. Gelbsenf) an. Bei diesen Beständen wurden niedrigere Herbst-N_{min}-Gehalte verzeichnet. Für Leguminosengemenge spricht ein verringerter Düngbedarf (Stickstofffixierungsleistung von Luzerne und Klee gras), Gründüngungspflanzen werden üblicherweise überhaupt nicht gedüngt (höchstens 30 kg N/ha). Weitere Vorteile dieser Kulturen sind ein mittleres bis tiefes, weit verzweigtes Wurzelsystem und ein gutes Stickstoffaneignungsvermögen (Umwandlung in Proteine). Aufgrund des Wachstums im Spätsommer/Herbst, verbunden mit Wasseraufnahme, wird weiterhin die Sickerwassermenge (mit den auswaschungsgefährdeten Nährstoffen) verringert (vgl. Abschnitt 3.8.3). Zwischenfrüchte sollten nach Möglichkeit bis ins Frühjahr stehen bleiben (pflanzengebundene Nährstoffe werden im Frühjahr wieder mineralisiert und stehen der Folgefrucht zur Verfügung). Ein Einarbeiten eines grünen Pflanzenbestandes im Spätherbst ist abzulehnen, weil der von der Zwischenfrucht gebundene Stickstoff frühzeitig mineralisiert wird und über die Wintermonate ausgewaschen werden kann (siehe *Phacelia* in FF 1). Auch auf tiefgreifende Bodenbearbeitungsmaßnahmen kurz vor Vegetationsende, wie hier im EVA-Versuch vor Aussaat der Abschlussfrucht Winterroggen (gescheibt, gepflügt, 2 x gegrubbert), sollte möglichst verzichtet werden, denn durch angekurbelte Mineralisationsprozesse können > 30 kg N/ha freigesetzt werden (GANTENBEIN o. J., vgl. Abbildung 27a und 27b).

Die Stickstoffkonzentration des Sickerwassers zeigt enge Korrelationen mit dem Stickstoffgehalt des Bodens (N_{min}-Gehalt), der applizierten Düngermenge und mit der Sickerwassermenge (KETELSEN et al. 1999). Die Nitratbelastung des Sickerwassers (in mg/l, pro Jahr) in Abhängigkeit vom NO₃⁻-Austrag [kg/(ha*a)] und der Sickerwassermenge [mm/a] der acht erprobten Fruchtfolgen ist in Tabelle 12 wiedergegeben. Weil die überwiegende Menge des Sickerwassers im Winterhalbjahr anfällt, kommt es in diesem Zeitraum zu den größten Stoffausträgen (BLUME 1992).

Tabelle 12: Jährliche Nitratkonzentration (in mg/l) im Sickerwasser der acht angebauten Fruchtfolgen in Abhängigkeit von Nitrataustrag (in kg N/ [ha*a]) und Sickerwassermenge (in mm/a), Standort Trossin, Mittelwerte aus 2 Anlagen

		FF 1	FF 2	FF 3	FF 4	FF 5	FF 6	FF 7	FF 8 ³⁾
Nitrataustrag [kg N ha ⁻¹ a ⁻¹]	¹⁾	55	48	40	47	54	52	46	--
Sickerwassermenge [mm a ⁻¹]	¹⁾	200	163	156	158	184	231	156	--
NO₃⁻-Konzentration im Sickerwasser [mg l ⁻¹ a ⁻¹]	²⁾	122	131	114	132	130	100	131	--

¹⁾ ermittelt mit dem Simulationsmodell MONICA des ZALF von Matthias Willms und Christiane Peter (ZALF 2013)

²⁾ Berechnung siehe Abschnitt 2.3.4.7

³⁾ noch keine Parametrisierung für die Fruchtarten Sonnenblume und Rübe im Modell MONICA vorhanden

Eine nachhaltige Landwirtschaft hinsichtlich Nitratbelastung des Trinkwassers ist nur gegeben, wenn der kritische Grenzwert von derzeit 50 mg/l im Grundwasser sicher unterschritten wird. Bei den im EVA II-Projekt untersuchten Fruchtfolgen wurden über 2-mal höhere NO₃⁻-Konzentrationen im Sickerwasser pro Versuchsjahr festgestellt. Weil diese quantifizierten, potenziellen Nitratkonzentrationen Mengen darstellen, die vollständig ins Grundwasser eingetragen werden können, dürfen am Standort Trossin, bei den gegebenen Sickerwassermengen zwischen 156 und 231 mm/a (Modell MONICA, ZALF 2013), die Austräge 15 (bei Sickerwassermengen < 200 mm) bzw. 25 (bei Sickerwassermengen > 200 mm/a) kg NO₃⁻ je Hektar und Jahr zur Einhaltung der EG-Nitratrichtlinie nicht übersteigen.

3.8.5 Energie- und Treibhausgasbilanzen

Seit vielen Jahren werden die negativen Folgen der Landwirtschaft, besonders des Energiepflanzenanbaus, auf die Umwelt in der Wissenschaft und der Politik diskutiert. Der Fokus liegt dabei auf den Treibhausgasemissionen und der Energiebilanz. Ziel der Politik ist es, mit Hilfe der Wissenschaft die Entwicklung nachhaltiger Produktionsverfahren voranzutreiben. Somit können die negativen Umwelteinflüsse der Landwirtschaft verringert und die Energiepolitik in eine nachhaltige Richtung gelenkt werden. Um jedoch diese umweltverträglichen Produktionsverfahren in die Praxis umzusetzen, sind Analysen des gesamten Produktionsweges und dessen vielseitigen Umweltwirkungen notwendig. Die im EVA-Projekt durchgeführten Fruchtfolgeversuche boten eine gute Möglichkeit, um praxisnahe Anbauverfahren von Energiepflanzen auf ihre Umweltwirkungen hin zu untersuchen und umweltverträgliche Produktionsverfahren und Optimierungsmöglichkeiten abzuleiten (ZALF 2013).

3.8.5.1 Treibhausgasemissionen

Treibhausgase sind strahlungsbeeinflussende gasförmige Stoffe in der Luft, die zur Erderwärmung beitragen. Die Atmosphäre ist weitgehend transparent für die von der Sonne ankommende kurzwellige Strahlung. Diese

wird von der warmen Erdoberfläche als langwellige Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) emittiert. Treibhausgase, die sowohl einen natürlichen als auch anthropogenen Ursprung haben können, absorbieren einen Teil der vom Boden abgegebenen Wärmestrahlung, die sonst in das Weltall entweichen würde und führen zu einer atmosphärischen Gegenstrahlung. Das wichtigste Treibhausgas der Erde ist Wasserdampf. Die natürlichen Treibhausgase heben die durchschnittliche Temperatur an der Erdoberfläche auf 15 °C an. Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt hätte die untere Atmosphäre im globalen Mittel nur -18 °C. Die Störung des natürlichen Gleichgewichts der Atmosphäre durch Eingriffe in den Naturhaushalt und durch anthropogene Emission von Treibhausgasen verstärkt den natürlichen Treibhauseffekt und führt zur globalen Erwärmung. Der stetig in der Atmosphäre ansteigende Gehalt bestimmter Treibhausgase wird größtenteils auf menschliche Aktivitäten zurückgeführt. Der anthropogene Treibhauseffekt entsteht durch ein Übermaß an direkten Treibhausgasen, wie Kohlenstoffdioxid (CO₂), Distickstoffoxid/Lachgas (N₂O), Methan (CH₄) und den industriell hergestellten Fluorkohlenwasserstoffen (Kyoto-Protokoll). Aber auch Kohlenstoffmonoxid (CO) und Stickoxide (NO_x) tragen wesentlich als indirekte Treibhausgase zur Erderwärmung bei, weil sie zur Zerstörung der Ozonschicht beitragen (Montreal-Protokoll). In der Landwirtschaft spielen insbesondere Emissionen von Stick- und Distickoxiden sowie Kohlendioxid eine Rolle. Kohlendioxid wird hauptsächlich bei Verbrennungsvorgängen, einschließlich Maschineneinsätzen, verursacht. Lachgas (N₂O)- und Stickoxidemissionen (NO) entstehen vorrangig durch Prozesse der Nitrifikation (aerob, NH₃ → NO₂⁻ → NO₃⁻) und Denitrifikation (anaerobe Atmung, z. B. bei Staunässe und Verdichtung, NO₃⁻ → NO₂⁻ → NO → N₂O → N₂). Die Klimarelevanz der Treibhausgase wird in CO₂-Äquivalenten (CO₂-Äq) gemessen. Kohlendioxid dient als Richtgröße. Die anderen Treibhausgase werden zur besseren Vergleichbarkeit entsprechend ihrer spezifischen Wirksamkeit in Teilchen pro Million Teilchen (part per million, ppm) dem CO₂ in Bezug gesetzt (z. B. ist CH₄ 21-mal klimawirksamer als CO₂, demnach sind 10 ppm CH₄ umgerechnet 210 ppm CO₂-Äq, Greenpeace 2012; Wikipedia 2013).

Bislang gibt es kein standardisiertes Messverfahren und keine wissenschaftlich messtechnisch bewiesene Methode zur Aufnahme von landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen, sodass diese im EVA-Projekt über das Computer-Modell MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture) simuliert wurden. In Abbildung 28 und Abbildung 29 sind die flächenbezogenen Emissionsbelastungen der bei EVA-erprobten Fruchtfolgen und -arten (in t CO₂-Äq/ha) dargestellt. Die produktbezogenen Umweltwirkungen beim Energiepflanzenanbau (in kg CO₂-Äq/(GJ CH₄)) geben Abbildung 30 und Abbildung 31 wieder. Die Treibhausgasemissionen wurden hierbei auf die Leistung der jeweiligen Fruchtfolge bzw. Fruchtart, in diesem Fall auf den Energiegehalt des produzierten Methans bei Vergärung der Substrate, bezogen (Methodik siehe Kap. 2.3.4.8).

Bei Vergleich der Fruchtfolgen am warm-trockenen Standort Trossin (Abbildung 28) verursachten die Fruchtfolgen 4, 5 und 8 die geringsten Treibhausgas-(THG-)Emissionen pro Hektar Anbaufläche. Bei Fruchtfolge 4, ein charakteristisches Getreide-Raps-Anbausystem mit Marktfrüchten und Energiepflanzen, führte die geringe Anzahl von Fruchtfolgegliedern zu den geringsten Umweltbelastungen durch Treibhausgase (geringster Einsatz von Düngemitteln und Maschinen). Fruchtfolge 5 (mehrjähriger Luzerne-Kleegrass-Anbau) profitierte von der Stickstofffixierungsleistung der Leguminosen und einer daraus resultierenden reduzierten Stickstoffdüngergabe. Bei mehrjährigen Feldfrüchten ist außerdem der maschinelle Aufwand für Pflanzenschutz, Aussaat und Bodenbearbeitung geringer als bei der Kultivierung einjähriger Fruchtarten. In Fruchtfolge 8 wurden viele Fruchtarten mit niedrigem Treibhausgaspotenzial integriert, z. B. Sonnenblumen, Rüben und Gründüngungspflanzen (vgl. Abbildung 29). Die Fruchtfolgen 1 bis 3 und 7, welche aus einer Kombination von C₃- und C₄-Pflanzen bestehen, sind aufgrund ihres hohen Betriebsmitteleinsatzes durch höhere Gasausträge charakterisiert. Die Kartoffel in FF 7 war im EVA-Versuch am Standort Trossin die Fruchtart mit dem größten Gefährdungspotenzial (Ø 2.412 kg CO₂-Äq/ha, Abbildung 29).

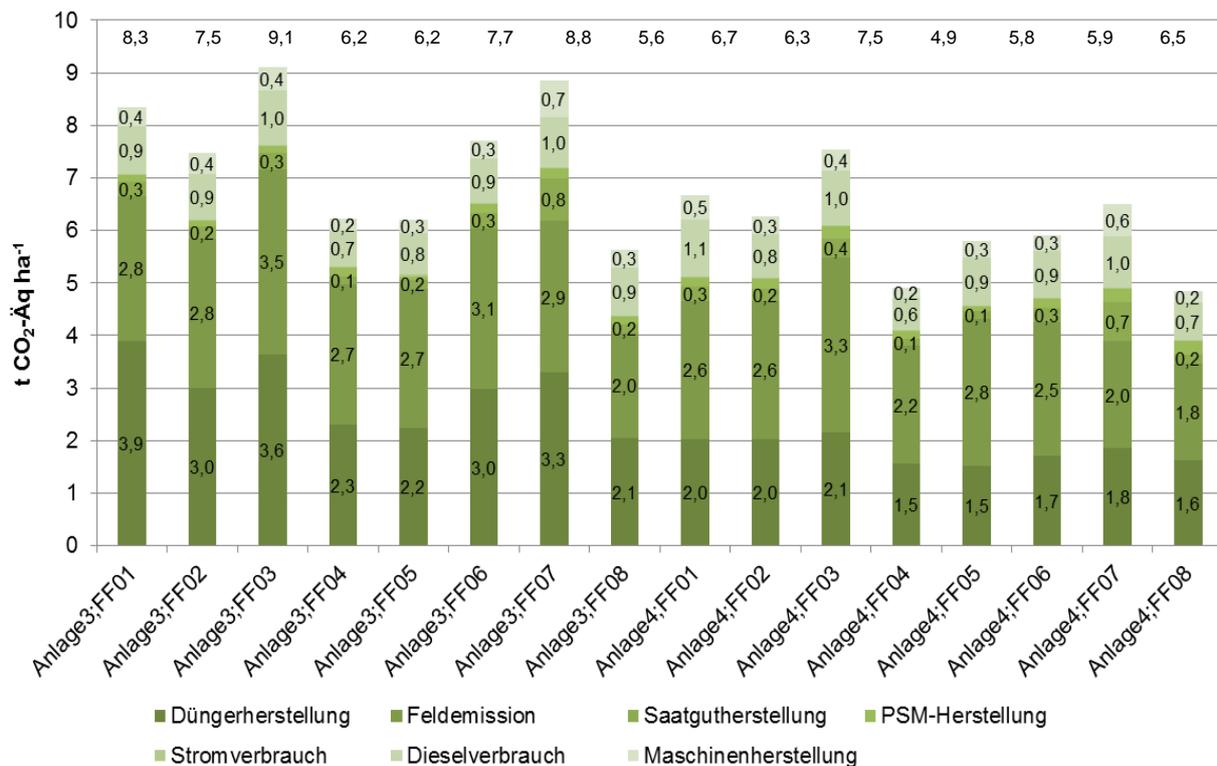


Abbildung 28: Flächenbezogene Emissionsbelastung von Treibhausgasen (in t CO₂-Äq/ha), aufgeschlüsselt nach Produktionskategorien, der im EVA II-Projekt untersuchten Fruchtfolgen beider Versuchsanlagen (Aussaat bis Ernte/Silage), Berücksichtigung aller angebauten Fruchtarten, Anbaujahre 2009–2013, Versuchsstandort Trossin. Bilanzierung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), Berechnungen durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF

Stoppelsaaten und Sommerzwischenfrüchte wiesen die geringsten Treibhausgasemissionen auf (Senf, *Phacelia*: < 200 kg CO₂-Äq ha⁻¹, Weidelgras: 929 kg CO₂-Äq ha⁻¹). Dies steht zum Teil im Widerspruch zur Praxis. Bei abfrierenden Zwischenfrüchten mit einem geringen C:N-Verhältnis kommt es beim Wechsel von Frost- und Auftauprozessen im Winter zu Abbauvorgängen, die mit einer Lachgas-Bildung, erkennbar am stechenden Geruch, verbunden sind. BADAWI (2010) beschreibt die Ausgasungsverluste nach dem Abfrieren bei Senf mit 37 % und bei den restlichen Zwischenfrucht-Mischungen (Leguminosen- und Nicht-Leguminosen) mit 18 %. KROMP-KOLB et al. (2013) stellte mit Schwarzbrache als Referenz einen erhöhten Lachgasausstrag von Senf, besonders zu Auftauzeiten bei starker Wassersättigung des Bodens, fest. Weitere getestete Zwischenfrucht-Varianten (*Phacelia*-Senf, Kresse-Mungo-Ölrettich, Alexandriner Klee-Mungo-*Phacelia*) unterschieden sich bezüglich der Treibhausgasbelastung nicht von der Schwarzbrache. Grund der höheren Lachgasbildung bei den Kreuzblütlern dürfte die Umsetzung der Senfölglicoside sein. Künftige Agrarumweltprogramme sollten Mischkulturen fördern und Reinsaaten von Senf vermeiden. Die geringen Ausgasungen der Stoppelsaaten (Abbildung 28) sind darauf zurückzuführen, dass die Gründungs- aufwüchse im EVA-Projekt zu Versuchszwecken (Ertragserfassung) bereits im Herbst geerntet und eingearbeitet wurden. Winterzwischenfrüchte (Landsberger Gemenge, Grünroggen) lagen mit Werten um 1.400 kg CO₂-Äq ha⁻¹ im mittleren Bereich (Abbildung 29). Mais verursachte höhere Gasausstöße (Ø 1.976–2.177 kg CO₂-Äq/ha) als die Sorghumhirsens (Sudangrasybriden: Ø 1.733–1.919 kg CO₂-Äq/ha > Futterhirsens: Ø 1.431 kg CO₂-Äq/ha [ZF]). Das geringste Treibhausgaspotenzial bei den Hauptfrüchten zur Biogasproduktion wiesen, wie schon erwähnt, Sonnenblumen (Ø 1.272 kg CO₂-Äq/ha) und Biogasrüben (Ø 1.040 kg CO₂-Äq/ha) auf (Abbildung 29).

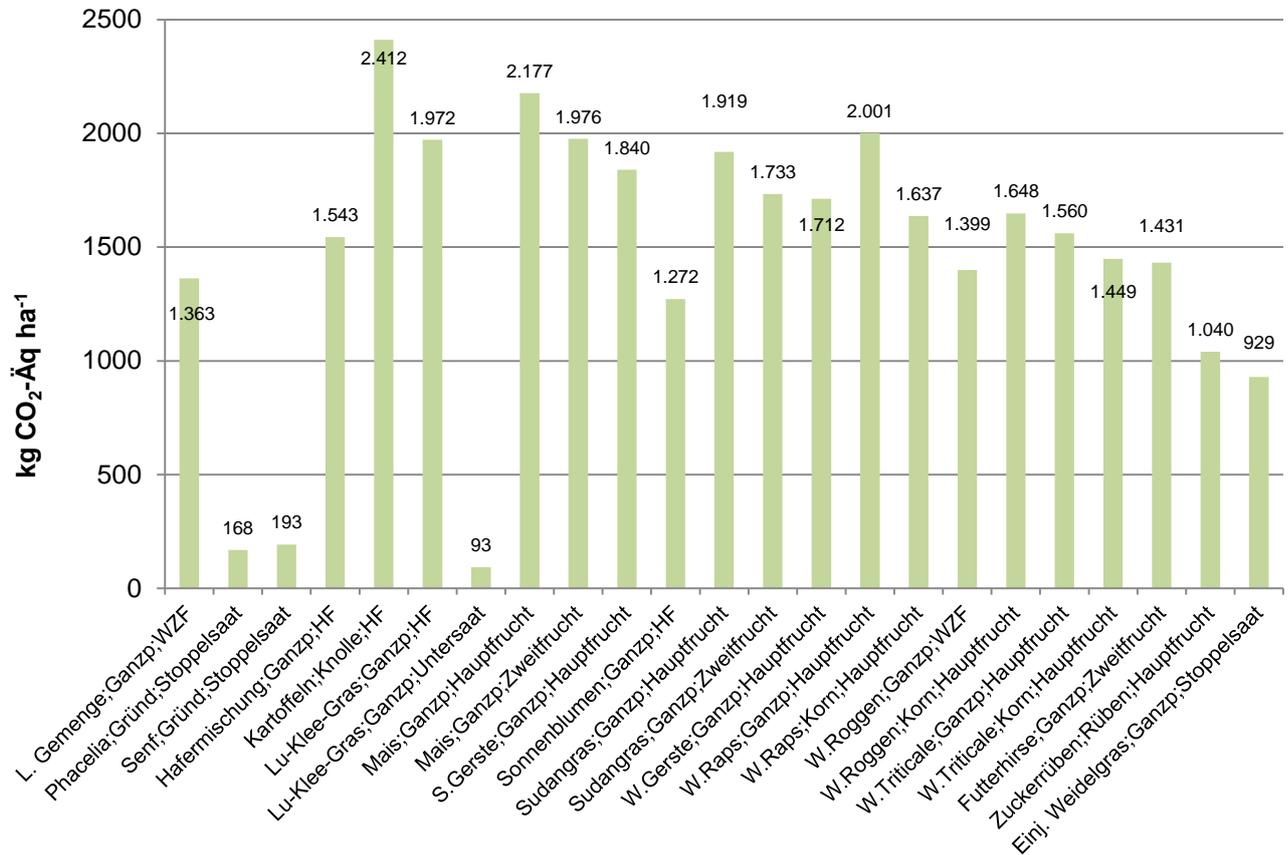


Abbildung 29: Flächenbezogene Treibhausgasemissionen (in kg CO₂-Äq/ha) einzelner Energiepflanzen, Marktfrüchte und Gründungspflanzen von der Aussaat bis zur Ernte/Silage unter Beachtung der Fruchtfolgestellung (Hauptfrucht, Zweitfrucht oder Zwischenfrucht), die im Projekt EVA II am Standort Trossin erprobt wurden, Versuchsjahre 2009–2013, Mittelwerte aus zwei Anlagen. Bilanzierung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), Berechnungen durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF

Bei Betrachtung der produkt- bzw. leistungsbezogenen Treibhausgasemissionen (Leistungskennzahl: Energiegehalt des produzierten Methans einer Fruchtart bzw. Fruchtfolge, vgl. Abbildung 30 und Abbildung 31) zeigt sich zum Teil ein kontroverses Bild zu den flächenbezogenen Emissionen. Die höchsten Gasausstöße je GJ Methan wurden bei den Fruchtfolgen 4-6, die niedrigsten bei den leistungsstarken Energiepflanzen-FF gemessen. Bei Betrachtung einzelner Energiepflanzen bewirkten Mais (HF), Sorghumhirsens und Rüben die geringsten, Winterraps (HF) und Weidelgräser (SZF) dagegen die höchsten Emissionsbelastungen im Anbauversuch. Für die produktbezogene Bewertung war der Ertrag bzw. die organische Trockenmasse (oTM) des Silierguts ausschlaggebend, denn je höher die Menge an siliierter oTM/ha, desto mehr CH₄ kann pro Hektar gewonnen werden und umso höher war die produktspezifische Effizienz der THG-Austräge (ZALF 2013). Dies bedeutet, dass hohe flächenbezogene Emissionen beim Energiepflanzenanbau aufgrund des hohen Verbrauchs von Düngemitteln und Treibstoff durch hohe spezifische Methanausbeuten bei gleichzeitig hohen Trockenmasse-erträgen produktbezogen kompensiert werden können.

Fruchtarten, die hinsichtlich ihres Treibhausgefährdungspotenzials sowohl flächen- als auch produktbezogen beachtlich abschnitten, waren Sonnenblumen und Biogasrüben.

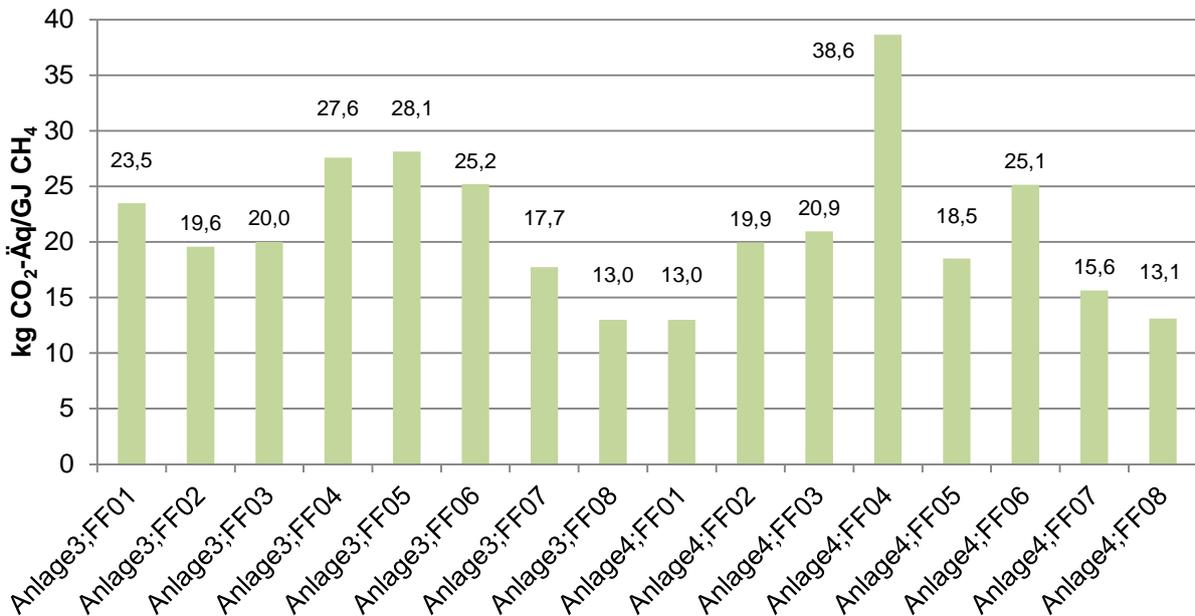


Abbildung 30: Produktbezogene Treibhausgasemissionen (in kg CO₂-Äq/[GJ CH₄]), aufsummiert nach Fruchtfolgen beider Anlagen, am Versuchsstandort Trossin, Versuchsjahre 2009–2012, nur Energiepflanzen. Als Leistung eines Systems wurde der Energiegehalt des Methans definiert, der aus dem Silagegut gewonnen wurde (Gasausbeuten nach ATB-Biogasmatrix, HERRMANN et al. 2013). Bilanzierung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), Berechnungen durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF

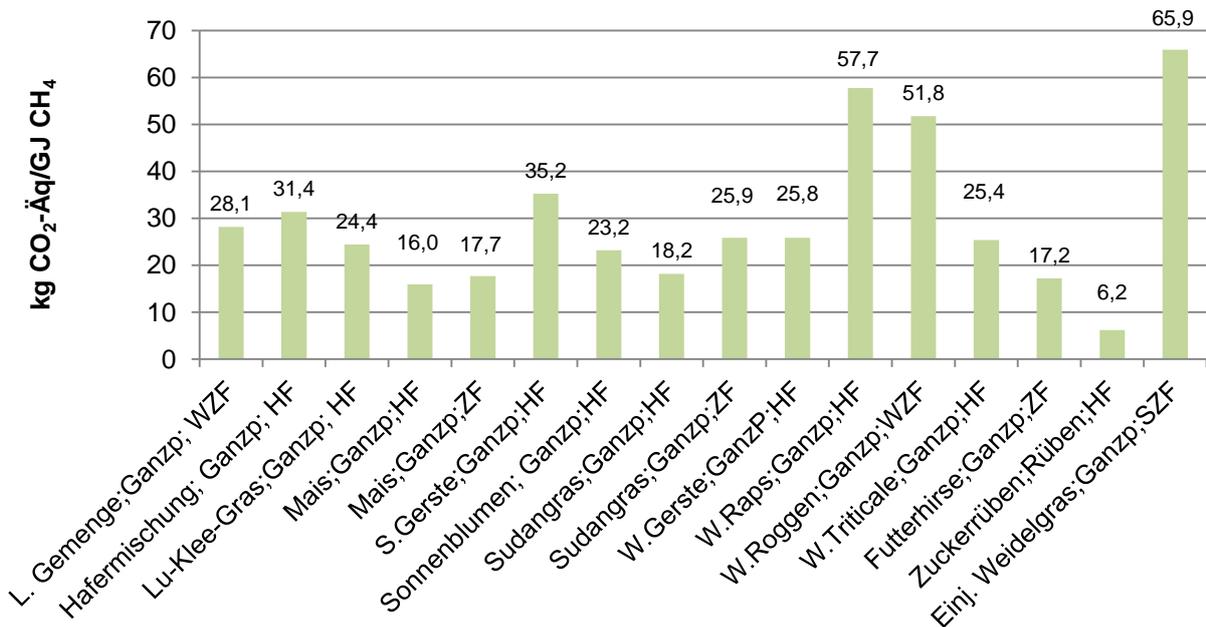


Abbildung 31: Produktbezogene Treibhausgasemissionen (in kg CO₂-Äq/[GJ CH₄]) einzelner Energiepflanzen unter Beachtung der Fruchtfolgestellung (Hauptfrucht [HF], Zweitfrucht [ZF] oder Zwischenfrucht [SZF, WZF]), die im Projekt EVA II am Standort Trossin erprobt wurden, Versuchsjahre 2009–2013, Mittelwerte aus zwei Anlagen. Als Leistung eines Systems wurde der Energiegehalt des Methans definiert, der aus dem Silagegut gewonnen wurde (Gasausbeuten nach ATB-Biogasmatrix, HERRMANN et al. 2013). Bilanzierung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), Berechnungen durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF

3.8.5.2 Energiebilanz/Energieeffizienz

Energiebilanzierungen liefern die Basis, um Energiesparpotenziale beim Anbau von nachwachsenden Rohstoffen aufzudecken. Sie sollen aufklären, ob zur Produktion und Aufbereitung der im EVA-Projekt erzeugten Biogassubstrate mehr Energie erforderlich war, als letztlich durch den Rohstoff, die Energiepflanze, geliefert wurde (ZALF 2013). Die Energiebilanz (in GJ/ha), d. h. der reale Energiegewinn durch Gegenüberstellung von Energieaufwand (in GJ/ha, in Abbildung 33 aufgeschlüsselt nach Produktionskategorien) und dem Methan-Energieertrag (GJ CH₄/ha), bezogen auf die Anbaufläche pro Hektar der acht untersuchten Fruchtfolgen beider EVA-Anlagen ist in Abbildung 32 aufgezeigt. Das Ergebnis der Energieertrags-/Energieverbrauchs-Betrachtungen (in GJ/ha) einzelner Energiepflanzen im Vergleich mit Markt- und Zwischenfrüchten zur Gründung ist in Abbildung 34 dargestellt. Mit dem EROI-(Energy return on investment)-Faktor (ohne Einheit, da dimensionslos) wurde die Energieeffizienz eines Anbausystems bzw. einer Fruchtart ausgedrückt. Dazu wurde die Summe der produzierten Energie (Output) ins Verhältnis zur Summe des Verbrauchs an Primärenergieträgern (Input) gesetzt (Abbildung 35 und Abbildung 36).

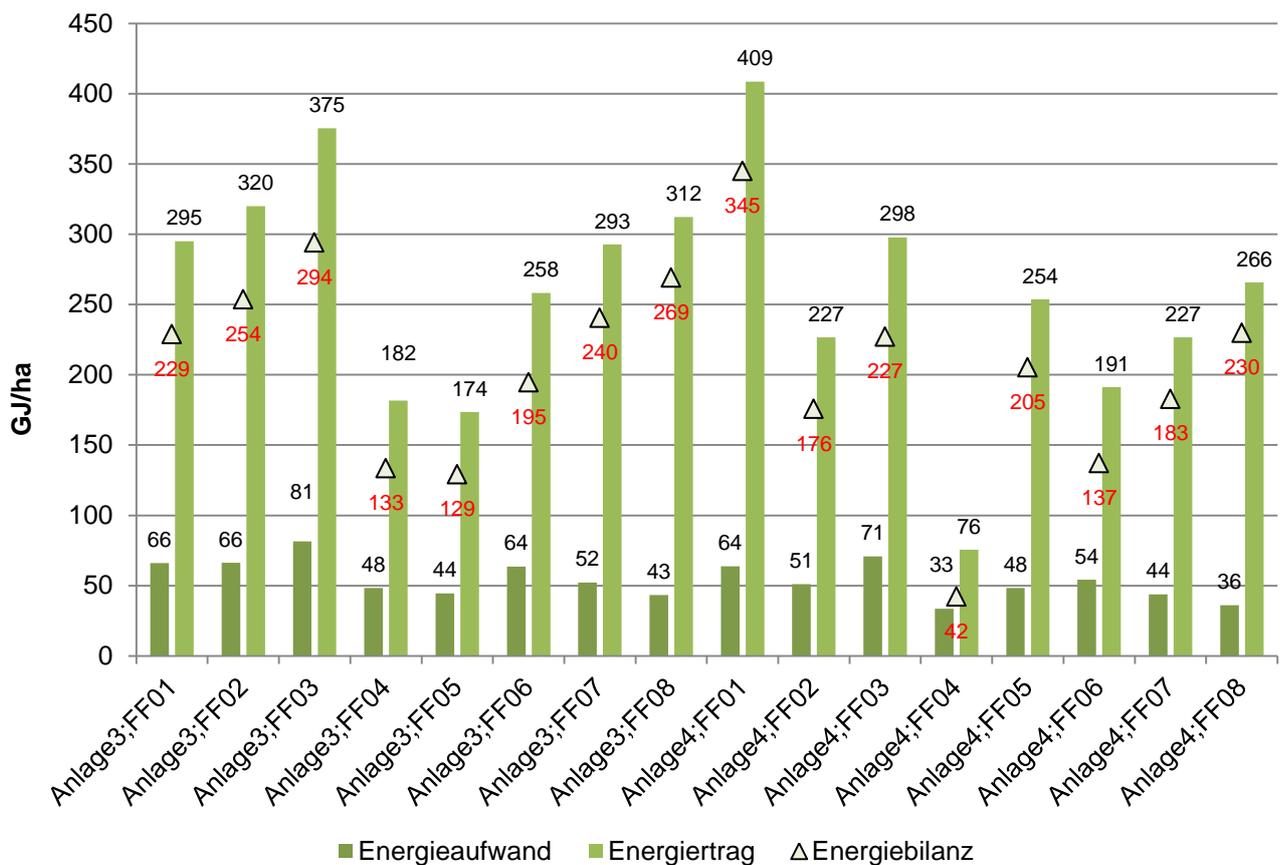


Abbildung 32: Energiebilanz (Energieertrag des produzierten Methans – Energieverbrauch durch Maschineneinsatz und Herstellung von Saatgut, Pflanzenschutzmitteln, Düngemitteln sowie Stromverbrauch, in GJ/ha) der acht untersuchten Fruchtfolgen am Standort Trossin, nur Energiepflanzen, Versuchsjahre 2009–2012. Bilanzierung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), Berechnungen durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF; Gasausbeuten über ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013).

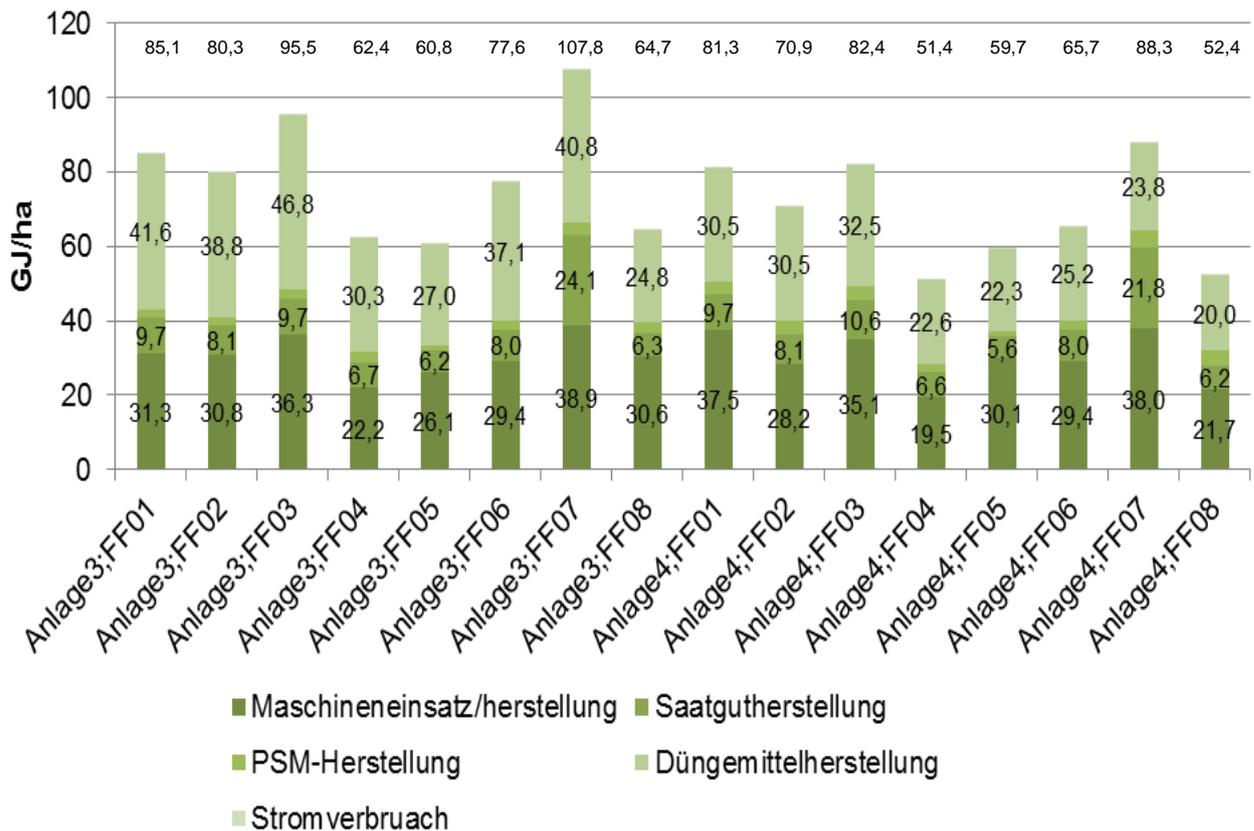


Abbildung 33: Kumulierter Energieaufwand (KEA in GJ/ha) durch Maschineneinsatz und Herstellung von Saatgut, Pflanzenschutzmitteln, Düngemitteln sowie Stromverbrauch bei der Produktion aller Fruchtarten (inkl. Abschlussfrucht) in den Fruchtfolgen 1-8 beider Anlagen am Versuchsstandort Trossin, Versuchsjahre 2009–2013. Erstellt mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture) von PETER & WILLMS, ZALF

In Abbildung 32 wird deutlich, dass die Energieerträge und demnach auch die Energiebilanzen einer Fruchtfolge im Vergleich beider Anlagen stark schwankten. Dies ist auf jahresbedingt unterschiedliche Methangaserträge in Abhängigkeit vom TM- und oTM-Ertrag zurück zu führen. Energieaufwände differierten dagegen fruchtfolgespezifisch in verschiedenen Anbaujahren weniger stark (vgl. Abbildung 32 und Abbildung 33). Düngemittelherstellung und Maschineneinsatz/-herstellung machten den größten Anteil am Energieverbrauch aus (vgl. Abbildung 33). Fruchtfolge 7 zeigte einen etwas höheren Verbrauch bei der Saatgutproduktion als die anderen Anbausysteme, was in der Produktion von Legekartoffeln begründet ist (vgl. Abbildung 33). Bei Betrachtung der Anbausysteme erzielten Fruchtfolgen mit hohen Trockenmasse- bzw. Methangas-Hektarerträgen auch die günstigsten Energiebilanzen (vgl. Abbildung 32).

Bei der Darstellung von Energiebilanzen einzelner Fruchtarten rücken Mais mit \emptyset 130 GJ/ha bzw. 96 GJ/ha (ZF), Sudangrashybriden mit \emptyset 93 GJ/ha und Biogasrüben mit \emptyset 158 GJ/ha in den Vordergrund (Abbildung 34). Begründet liegt dies wieder in hohen Methangas- und Trockenmasse-Hektarerträgen im Durchschnitt aller Versuchsjahre, weniger in geringeren KEAs (kumulierten Energieaufwendungen) bei der Produktion. Gründungs- und Marktfrüchte schnitten sehr schlecht ab (negative Energiebilanzen), da als Merkmal des Outputs die Energieleistung des produzierten Methangases festgelegt wurde. Da bei EVA diese Pflanzen nicht vergärt wurden, gingen nur Inputs (Energieverbräuche) in die Bilanzierungen ein.

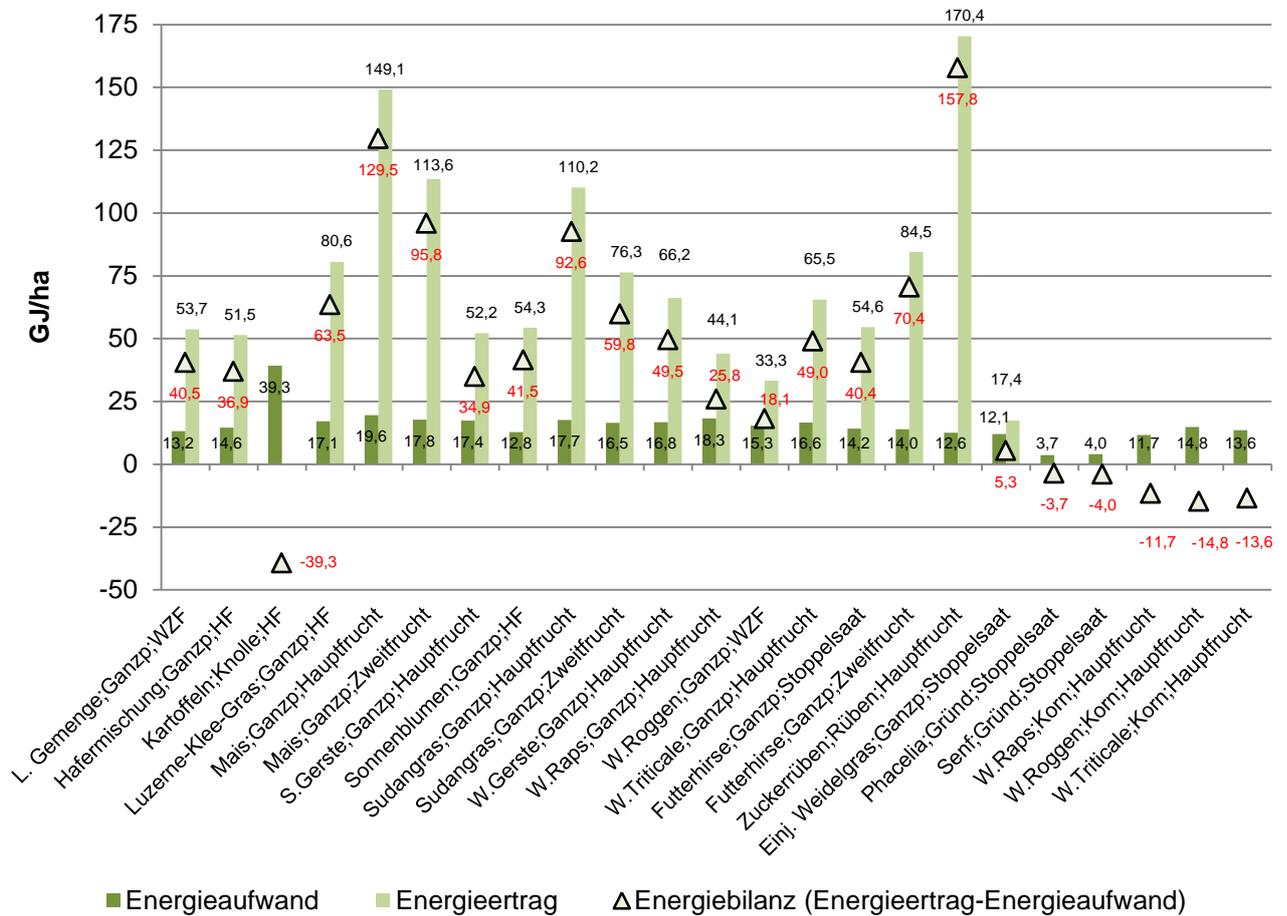


Abbildung 34: Energiebilanzen (CH₄-Energieertrag - Energieverbrauch in GJ/ha) der im Projekt EVA II am Standort Trossin angebauten Energiepflanzen im Vergleich mit Marktfrüchten und Zwischenfrüchten zur Gründung (Bewertung der Kartoffel als Marktfrucht), Versuchsjahre 2009–2013, Mittelwerte aus 2 Anlagen. Bilanzierung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), Berechnungen durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF, Gasausbeuten über ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013)

In Bezug auf die Energieeffizienz ist der Energiepflanzenanbau im Projekt EVA II (Abbildung 35) positiv zu bewerten. Alle Fruchtfolgen waren mit einem Energiegewinn verbunden und damit ressourcenschonend sowie wirtschaftlich rentabel (EROI > 1). Höchste EROI-Werte kennzeichnen höchstmögliche Energiegewinne bei kleinsten Energieaufwendungen. Fruchtfolge 8 ist mit relativ niedrigen Energieverbräuchen und sehr hohen Energieerträgen (vor allem durch Rüben) im Mittel beider Versuchsanlagen am energieeffizientesten einzustufen (EROI = 4,8 bzw. 5,1 [Abbildung 35]).

Bei Betrachtung einzelner Energiepflanzen überzeugten Mais (HF, ZF), Sorghumhirsens und Rüben durch die höchste Energieeffizienz (Abbildung 36).

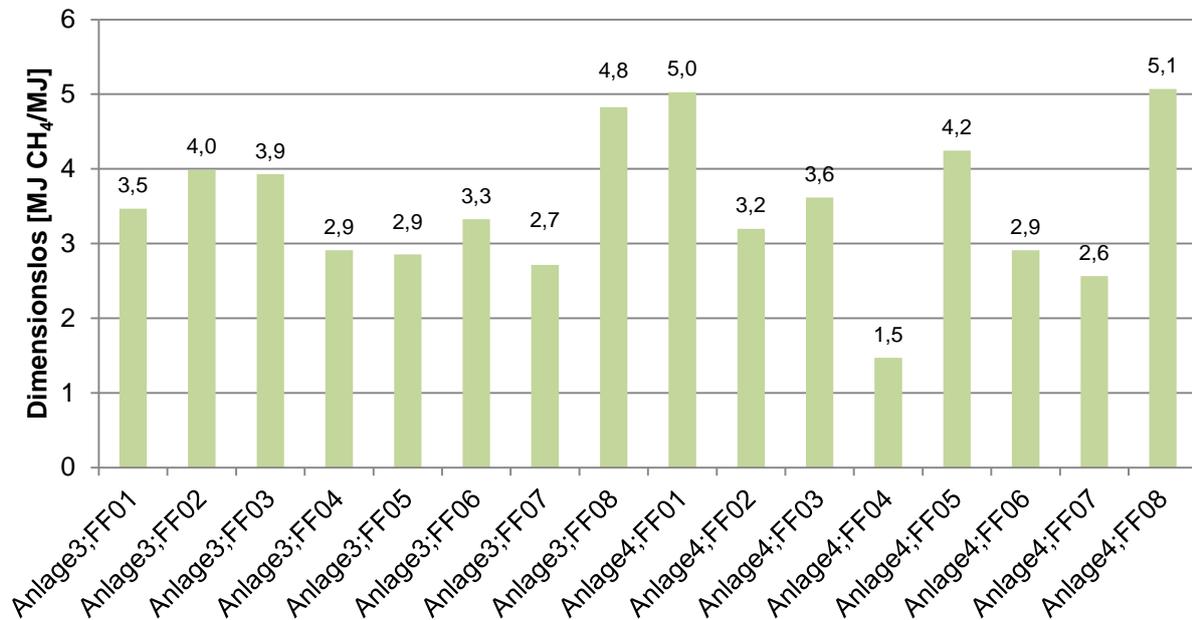


Abbildung 35: Energieeffizienz der im EVA II-Projekt am Standort Trossin angebauten Fruchtfolgen beider Anlagen, ausgedrückt als EROI-(energy return on investment-)Faktor als Summe der produzierten Energie aus Methangas (Output) im Verhältnis zur Summe des Verbrauchs an Primärenergieträgern (Input), Versuchsjahre 2009–2012, nur Energiepflanzen. Berechnung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF, Gasausbeuten über ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013)

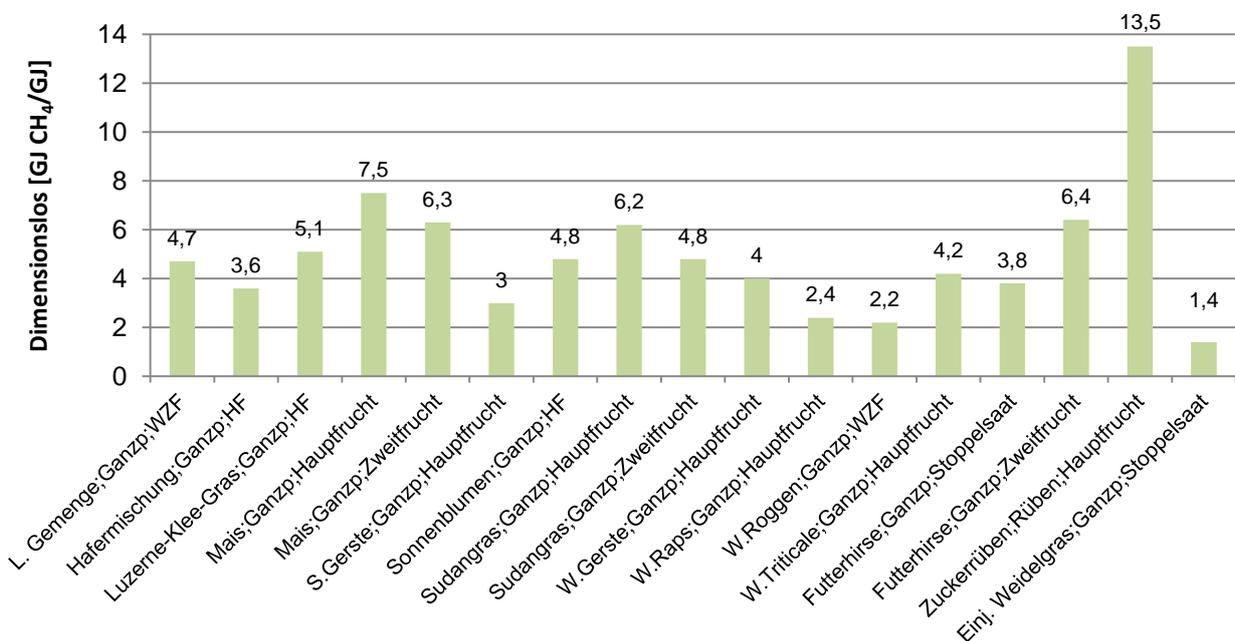


Abbildung 36: Energieeffizienz der im EVA II-Projekt am Standort Trossin angebauten Energiepflanzen als Mittelwert beider Anlagen, ausgedrückt als EROI-(energy return on investment-)Faktor als Summe der produzierten Energie aus Methangas (Output) im Verhältnis zur Summe des Verbrauchs an Primärenergieträgern (Input), Versuchsjahre 2009–2012. Berechnung mit Hilfe des Computer-Modells MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment for Agriculture), durchgeführt von PETER & WILLMS, ZALF, Gasausbeuten über ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013)

3.8.6 Zusammenfassende Übersicht der ökologischen Bewertungsgrößen

Tabelle 13 soll eine übergreifende Bewertung des Energiefruchtfolgegrundversuchs zu ökologischen, abiotischen und biotischen Wirkungen am Standort Trossin aufzeigen, die es ermöglicht, die Fruchtfolgen 1–8 auf einen Blick hinsichtlich Anbauvorteilen zur Einhaltung von Umweltrichtlinien zu vergleichen. Der Wert eines Indikators wurde für jede Fruchtart innerhalb einer Fruchtfolge aufsummiert und durch die Anbaujahre geteilt. Aufgezeigt sind jährliche Durchschnittswerte der ökologischen Bewertungsgrößen für jede Fruchtfolge (Mittelwert aus 2 Anlagen).

Tabelle 13: Zusammenfassende ökologische Bewertung der 8 Fruchtfolgen des Energiefruchtfolgeversuchs am Standort Trossin (Erläuterung der FF siehe Tabelle 2, inkl. Abschlussfrucht, 2009–2013, Su3, AZ 31, warm-trocken). Grün = aus ökologischer Sicht besonders gut zu bewertende FF, Rot = in Hinsicht auf Indikator schlechteste Fruchtfolge.

	FF 1	FF 2	FF 3	FF 4	FF 5	FF 6	FF 7	FF 8
Ackerbauliche Indikatoren								
TM-Ertrag (+ Korn & Stroh, ohne Gründ.) [t ha ⁻¹ a ⁻¹]	10,7	10,3	10,4	6,6	7,8	8,5	11,1	9,6
CH₄-Ertrag ⁴⁾ [k N m ³ ha ⁻¹ a ⁻¹]	3,7	3,9	3,4	1,9	2,3	2,5	3,7 (inkl. Kartoffel)	3,0
N-Aufwendung [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]	156	153	181	119	109	148	160	105
Abiotische Indikatoren ¹⁾								
Humusbilanz-Saldo ²⁾ [kg Humus-C ha ⁻¹ a ⁻¹]	-341	-296	-320	-173	237	-213	-454	-179
Humusbilanz-Saldo b. Gärrestrückführung [kg Humus-C ha ⁻¹ a ⁻¹]	-109	-87	-87	-92	452	-4	-259	31
Wasserverbrauch [mm a ⁻¹]	377	342	356	342	372	343	361	--- ³⁾
WNE [kg TM ha ⁻¹ mm ⁻¹ a ⁻¹]	59	59	64	48	27	34	61	--- ³⁾
Sickerwassermenge [mm a ⁻¹]	200	163	156	184	158	231	156	--- ³⁾
Nitrataustrag [kg N ha ⁻¹ a ⁻¹]	55	48	40	54	47	52	46	--- ³⁾
Leistungsbezogene Treibhausgas-Emission ⁴⁾ [kg CO ₂ -Äq GJ ⁻¹ CH ₄ ⁻¹ a ⁻¹]	6,1	9,9	6,8	16,6	7,8	8,4	8,3	4,4
Flächenbezogene Treibhausgas-Emission [t CO ₂ -Äq ha ⁻¹ a ⁻¹]	1,9	1,7	2,1	1,4	1,5	1,7	1,9	1,3
KEA ⁵⁾ [GJ ha ⁻¹ a ⁻¹]	20,8	18,9	22,2	14,2	15,1	17,9	24,5	14,6
EROI ^{4) 5)}	4,3	3,6	3,8	2,2	3,6	3,1	2,7	5,0
Biotische Indikatoren ⁶⁾								
Brutvogelhabitatindex (4 Arten)	2,28	1,80	1,95	2,83	1,71	1,29	1,72	2,48
Futterhabitatindex (3 Arten)	3,20	2,44	3,32	4,47	1,63	2,04	2,46	3,35

- 1) ausführliche Informationen siehe Kap. 3.8.1–3.8.5, Methodik siehe Kap. 2.3.4.4–2.3.4.8
- 2) keine Rückführung der Gärreste, nur Berücksichtigung von Gründüngungsertrag und Ernteresten (Stroh, Rübenblatt, ...)
- 3) keine Parametrisierung des Agrarökosystem-Modells MONICA für Sonnenblume und Rübe vorhanden
- 4) nur Energiepflanzen (keine Drusch-/Marktfrüchte und Gründüngungspflanzen, ohne Abschlussfrucht Winterroggen)
- 5) KEA = Kumulativer Energieaufwand, EROI (Energy return on investment) = Summe der produzierten Energie/Summe des Verbrauchs an Primärenergieträgern (bei EROI > 1 war Prozess mit einem Energiegewinn verbunden [REINHARD 1993])
- 6) ermittelt mit Hilfe des Habitatwertmodells MODAM-HVM (ANDERSON & FERGUSSON 2006 ; ZALF 2013) von GLEMNITZ (ZALF) in Abhängigkeit von angebauten Fruchtarten (Anbauzeiträume), Vegetationsstrukturen (u. a. Bestandesdichte, -höhe und Beikrautbesatz) sowie Managementmaßnahmen (Bewirtschaftungsstörungen), Grundlage waren die erhobenen Boniturdaten. Der Brutvogelhabitatindex berechnet die Habitateignung von 4 im Acker brütenden Vogelarten (Feldlerche, Graumammer, Kiebitz und Braunkehlchen) unter Berücksichtigung der benötigten Brutzeit. Der Futterhabitatindex bezieht sich auf die Futtermittelfürbarkeit während der Brutzeit (ca. 4 Wochen) für 3 Vogelarten, die außerhalb der Ackerflächen nisten (Neuntöter, Goldammer, Heidelerche).

Energiefruchtfolgen, die durch ein hohes Leistungsniveau überzeugten, waren nicht unbedingt gleichbedeutend ökologisch nachhaltig (FF 1-3, 7). Zur Produktion großer Mengen an Biomasse waren hohe Energie- und Stickstoffaufwendungen notwendig, verbunden mit starker Zehrung der Humus- und Wasservorräte. Bei Nichtausschöpfung der gedüngten N-Mengen aufgrund witterungsbedingter Wachstumsdefizite waren erhöhte Nitrat- und Treibhausgasausträge die Folge. Zur Einhaltung von Umweltrichtlinien (u. a. Cross Compliance, EG-WRRL) bieten sich Anbausysteme mit ganzjähriger Bodenbedeckung an. Mehrjährige Leguminosen-Gräser-Gemenge (FF 5) gewährleisteten nicht nur den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit (Humusmehrer), sondern auch eine Verringerung der Grundwasser- und Luftgefährdung. Bei kürzeren Anbauzeiten sollten Zwischenfrüchte etabliert werden. Sie können Brachezeiten mit einem erhöhten Nährstoff-Auswaschungsrisiko überbrücken (vgl. FF 3) und die Humusbilanz aufwerten (vgl. FF 8).

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Das bundesweite Verbundprojekt EVA ist ein Meilenstein in der Fruchtfolge- und Energiepflanzenforschung sowohl mit überregionalem als auch regionalem Bezug. „Mit Vielfalt gegen die Vermaischung auf dem Acker“ lautete das Hauptziel umfangreicher Anbauversuche und Begleitforschungen. Dieser Satz bekam Anfang 2012 mit der EEG-Novelle eine noch stärkere Bedeutung (BMELV 2012). Künftig werden Betreiber von neu erstellten Biogasanlagen aufgrund der festgelegten „Maisdeckelung“ nicht mehr an der Frage vorbeikommen, welche Energiepflanzen neben dem Mais noch in die Fruchtfolge passen, denn die bei der Fermentation eingesetzte Maismasse ist auf maximal 60 % begrenzt. Dieser Beschluss ist durchaus begründet, denn in einigen Bundesländern Deutschlands, insbesondere Bayern, Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen, stellt die regional gehäufte Kultivierung von Mais ein großes Problem dar. Diese einseitige Ausrichtung des Anbaus schmälert nicht nur die Kulturarten- und Lebensraumvielfalt, sondern hat auch erhebliche Auswirkungen auf das Natursystem. Belastungen des Bodens durch Verdichtungen, Erosionen und Humuszehrung, des Wasserhaushalts durch Senkung der Grundwasserbildungsrate und des Grundwasserspiegels sowie der Luft und Gewässer durch Treibhausgas- bzw. Nährstoffausträge sind nur einige Beispiele. In Sachsen ist die Mais-Anbaufläche mit ca. 96.100 ha bei einem Anteil von 13,4 % an der Gesamtackerfläche zwar noch vertretbar (Statistisches Bundesamt 2012), in der näheren Umgebung von Biogasanlagen ist die lokal konzentrierte und immer wiederkehrende monotone Maisproduktion jedoch kaum zu übersehen.

Bei Betrachtung der Energieerträge pro Hektar ist Mais unter den aktuellen Bedingungen als Biogassubstrat tatsächlich nur schwer zu schlagen. Regionsspezifisch konnten aber praxisrelevante Ergänzungen herausgestellt werden. Auf den warm-trockenen Diluvialstandorten im Norden Sachsens konnten C3/C4-Kombinationen aus Mais, Sorghumhirsen und Wintergetreideganzpflanzen mit den höchsten Biomasse- und Methangaserträgen je Hektar und Jahr überzeugen. Feldversuche haben gezeigt, dass neben der Pflanzenart vor allem

standortangepasste ackerbauliche Maßnahmen, wie die richtige Sortenwahl (zügige Jugendentwicklung, gute Abreife), der optimale Aussaat- und Erntetermin sowie eine auf Bodenverhältnisse und Vorfrucht ausgerichtete Düngung entscheidend zum Anbauerfolg beitragen. Aber nicht nur im Sinne der Biodiversitäts- und Natursystemerhaltung, sondern auch in Bezug auf den Gärprozess ist eine Vielfalt an Biogassubstraten von Vorteil, denn ein ausgewogenes Eiweiß-Energie-Verhältnis des Gärguts, welches für eine optimale Methanbildung im Fermenter Voraussetzung ist, kann am besten durch Mischungen eiweißreicher Biomasse (z. B. Grünlanderntegut, Weidelgräser, Leguminosen-Gräser-Gemenge oder Grünroggen) und energiereichen Einsatzstoffen (Gülle, Mais) erreicht werden (AMON et al. 2004, 2007; BRÖCKER 2007).

Im EVA-Projekt konnten Anbauoptionen für unterschiedliche Situationen aufgezeigt werden – sei es aus Gründen von Quarantäneverordnungen, der gesellschaftlichen Akzeptanz, der Aufwertung des Landschaftsbildes, der Entzerrung von Arbeitsspitzen, der optimalen Ausnutzung begrenzter Agrarflächen oder des Boden- und Gewässerschutzes.

Nachdem 2012/2013 Käfer des Westlichen Maiswurzelbohrers (*Diabrotica virgifera*) in der Nähe von Dresden und in Ostsachsen gefunden wurden, wurde wieder verdeutlicht, dass ein übermäßiger Maisanbau inakzeptabel ist. Bei Auftreten dieses gefährlichen Schädling wird ein zweijähriges Produktionsverbot von Mais in der Befallszone (mindestens 1 km um den Fundort) wirksam. Weil *Sorghum* sp. keine Wirtspflanze für den Maiswurzelbohrer ist, könnte diese Süßgräser-Art bei Weiterausbreitung des Maisschädling als Instrument zur Bekämpfung dienen.

Ängste vor Ernährungs- und Hungerkrisen machten auch vor der Bioenergiebranche keinen Halt. Dass anstelle von Lebensmitteln verstärkt nachwachsende Rohstoffe zur Erfüllung der EU-Klimaziele (Erhöhung des Anteils der Erneuerbaren Energien am Bruttoenergieverbrauch bis 2020 auf 20 %, innerhalb des Freistaates sogar auf 30 %) erzeugt werden sollten, brachte zum Teil enorme Kritik aus der Gesellschaft hervor. In Sachsen wird derzeit auf ca. 10.630 ha Anbaufläche Biomasse zur Vergärung hergestellt (1,5 % der sächsischen Ackerfläche, Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen 2012, eigene Anfrage). Es gibt noch genügend Reserven für den Biogaspflanzenanbau, vor allem in landwirtschaftlich ungünstigeren Gebieten (Diluvial- und Verwitterungsstandorte). Durch Züchtung und Erprobung stresstoleranterer Pflanzen bzw. Sorten sollen ertragsärmere Flächen besser genutzt werden. Mit Sonnenblumen, Leguminosen oder Blümmischungen, die einen Blickfang für das Auge darstellen, können ackerbaulich beanspruchte Regionen für die Öffentlichkeit attraktiver gestaltet werden.

Die zunehmende Flächenkonkurrenz, verbunden mit steigenden Pachtpreisen, führte auch zur Entwicklung effizienterer Anbausysteme. Die Zweikulturnutzung mit zwei Ernteeinfahrten pro Jahr sollte bestenfalls den Jahresgewinn verdoppeln. Im Feldversuch konnte dieses Wunschdenken zwar nicht bestätigt werden, aber beim Anbau einer Winterzwischenfrucht mit darauffolgender Zweitfrucht konnten in Nordsachsen dennoch Mehrerträge bis zu 50 % im Vergleich zur Hauptfruchtkultivierung erzielt werden. Ausschlaggebend für den Erfolg eines Zweikultursystems waren gute Erstfruchtwerte sowie optimale Witterungsbedingungen und Vegetationszeiten der Folgefrucht. In Bezug auf den Wasserhaushalt bestand kein erhöhtes Anbaurisiko. Für diese flächeneffiziente Form der Energiepflanzenproduktion sprechen weiterhin die Aufweitung von Arbeitsspitzen und ökologische Vorteile aufgrund einer ganzjährigen Bodenbedeckung.

Sollte in der EU-GAP-Reform nach 2013 die geplante Ökologisierung (Greening) umgesetzt werden, drohen den Landwirten 30%ige Abzüge der direkten Förderungen (Direktzahlungen) in der Ersten Säule, wenn bestimmte Umweltauflagen nicht erfüllt werden (BMELV 2014). Dazu gehören neben einer vielseitigen Fruchtfolge aus mindestens 3 Fruchtarten (Biodiversitätsschutz) auch die Erfüllung von Auflagen zur Erhal-

tung der Umwelt. Aber schon jetzt stellt die Europäische Gemeinschaft (EG) hohe Anforderungen an eine ökologisch nachhaltige Landbewirtschaftung. Seit 2005 sind für alle Landwirte, die Direktzahlungen erhalten, „Cross Compliance“ obligatorisch, welche vorrangig zum Humuserhalt und Förderung der Bodenfruchtbarkeit beitragen sollen (SMUL 2013). Die „Cross Compliance“-Auflagenbindung beinhaltet aber auch Forderungen zum Gewässerschutz, die sich aus der Durchführung der Richtlinien für Grundwasser und Nitrate sowie aus den Vorschriften für die Erhaltung von Flächen in gutem landwirtschaftlichem und ökologischem Zustand (GLÖZ) ergeben (SMUL 2013). Nur dadurch können die dem Bund auferlegten Verpflichtungen gegenüber der Wasserrahmenrichtlinie eingehalten werden (BMU 2012). Durch eine ganzjährige Bodenbedeckung und somit effiziente N-Aufnahme/-bindung sowie gute Humusreproduktionsleistung konnten die im EVA-Projekt erprobten mehrjährigen Leguminosen-Gras-Gemenge den ökologischen Anforderungen an eine Fruchtfolge sehr gut gerecht werden. Zwischenfrüchte zeigten bei deutlich kürzerer Vegetationszeit ebenfalls positive Umweltwirkungen.

Förderinstrumente können Alternativen zum Maisanbau wirtschaftlich rentabel machen. Bestimmte Pflanzenarten, darunter u. a. Leguminosen und Kleegräser, erhalten einen Aufschlag bei der kWh-Vergütung nach Anlage II (Einsatzstoffvergütungsklasse für ökologisch vorteilhafte NawaRo) der neuen Biomasseverordnung des EEG 2012 (BMELV 2012). Weiterhin kann der Anbau von ökonomisch eher nachteiligen Zwischenfrüchten auch in der Energiepflanzenerzeugung über Agrarumweltmaßnahmen gefördert werden (Zwischenfruchtprämie, SMUL 2007).

Zu berücksichtigen ist, dass ökonomische Analysen die aktuelle Anbauwürdigkeit einer Fruchtart bzw. Fruchtfolge unter den derzeitigen Preis- und Klimabedingungen widerspiegeln. Auswertungen von Wetterdaten der letzten Jahre deuten aber auf einen Temperaturanstieg, abnehmende Jahresniederschläge, stärkere Winde und eine ungleichmäßigere Wasserverteilung mit damit verbundenen Trockenperioden hin. Die in der Versuchsregion im mitteldeutschen Trockengebiet ausgeprägte Frühjahrstrockenheit wird ein stärkeres Ausmaß aufweisen. Die unter gemäßigten Klimaverhältnissen relativ ertragsstabilen C3-Pflanzen (u. a. Getreide) werden auf diese Veränderungen mit Lager und Ertragsnachteilen reagieren. Energiepflanzen vom C4-Typ, welche Wassermangel zeitweise gut tolerieren können, werden mehr und mehr an Bedeutung gewinnen. Durch Vorfixierung von Kohlendioxid können C4-Pflanzen auch unter ariden Bedingungen bei verengten Spaltöffnungen Photosynthese betreiben und Biomasse bilden. Zum C4-Typ gehören, neben Mais, u. a. die bei EVA erprobten Sorghumhirsen. Diese zeigten zwar aufgrund unterschiedlicher Witterungsbedingungen zwischen den einzelnen Versuchsjahren größere Ertragsschwankungen, bewiesen aber in warmen, trockenen Versuchssituationen ein vergleichbares, teilweise sogar höheres, Ertragspotenzial als Mais. In Gegenüberstellung zu Mais haben sie ein tieferes, weit verzweigtes Wurzelsystem, einen geringeren Wasserverbrauch und eine bessere Wassernutzungseffizienz.

„Bioenergie ist keine Modeerscheinung. Sie ist einer der Grundpfeiler der Energiewende und notwendig, wenn es um Fragen der Energieversorgung von morgen geht. Schon heute stellt Biomasse über zwei Drittel des Aufkommens aller erneuerbaren Energien in Deutschland und bleibt auch zukünftig unverzichtbar!“ (Zitat von Dr. Andreas Schütte, Geschäftsführer der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow). Im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern sind Rohstoffe wie Holz und Stroh sowie Pflanzenöl oder Biogas speicherbar und damit kalkulierbar. Durch ein breites Anbauspektrum bereichern Energiepflanzen in Fruchtfolgen das Landschaftsbild und bieten zusätzliche Lebensräume. Für die Biogaserzeugung sprechen außerdem die Schaffung und Erhaltung von Arbeitsplätzen sowie zusätzliche Einkommenswege. Um die Ziele des Energie- und Klimaprogramms (BMU 2009; SMWA und SMUL 2013) erfolgreich umsetzen zu können, muss die Energieerzeugung effizient gestaltet werden. Ein hohes Ertragspotenzial einer Fruchtart bzw. Frucht-

folge darf die ökologischen Nachhaltigkeitskriterien (u. a. Verminderung von Treibhausgasemissionen, Grundwasser- und Bodenschutz) dabei nicht ausschließen.

Schon in den ersten beiden EVA-Projektphasen konnten durch fundierte pflanzenbauliche Versuche sowie ökonomische, ökologische und biochemische Begleitforschungen umfassende Fragestellungen über den Anbau von Energiepflanzen im Gesamtsystem bearbeitet und Kultivierungsempfehlungen für Praktiker abgeleitet werden. Mit der im Jahr 2013 gestarteten dritten Projektphase sollen die gewonnenen Erkenntnisse weiter vertieft und abgesichert werden. Hauptziel bleibt auch bei EVA III die Erprobung und Gewinnung energieeffizienter, ertragsstarker Biogaspflanzen bzw. Anbaualternativen zum Mais für eine vielfältige Energiepflanzenerzeugung in Bezug auf Kulturartenspektrum, Lebensraumvorkommen und Anbaumöglichkeiten. Dabei rücken aber nachhaltige Anbausysteme mit dem Ziel des Ressourcen- und Umweltschutzes noch stärker in den Versuchsfokus (GRUNEWALD et al. 2013).

5 Anbauempfehlungen

Auf leichten, diluvialen Böden unter Einfluss des mitteldeutschen Trockengebietes überzeugten Fruchtfolgen mit Mais, Getreideganzpflanzen und Sorghumhirsen. Getreide-GPS erreichte zwar nicht die höchsten Trockenmasse-Erträge, wies aber über alle Versuchsjahre sehr geringe Ertragsschwankungen auf (ertragsstabile Fruchtart). Wintergetreidekulturen sollten bevorzugt werden, weil sie 15–25 % höhere Erträge im Vergleich zu den Sommerarten erzielten. Im Vergleich zu Mais besitzen die wärmeliebenden Zucker- bzw. Futterhirsen und Sudangrashybriden ein höheres Bodenwasserausschöpfungsvermögen aufgrund eines ausgedehnten Faserwurzelsystems. Sie verfügen außerdem über eine größere Hitze- und Trockentoleranz (stellen Wachstum bei Wassermangel ein) und können somit vor allem in wasserarmen Jahren und in Regionen mit ausgeprägten Trockenphasen das Ertragsrisiko deutlich senken. Für den Hauptfruchtanbau sind vorrangig die leistungsstärkeren Futterhirsen (*Sorghum bicolor*) einzusetzen.

Um zu enge Fruchtfolgen zu vermeiden, können Kartoffeln (ökonomisch besser als Marktfrüchte), Sonnenblumen (Biogas-Sorten) und Biogaserüben (E-Typ-Zuckerrüben) integriert werden.

Eine mehrjährige Nutzung von Leguminosen-Gras-Gemengen bei ca. 2–3 Schnitten im Jahr ist aufgrund der überzeugenden ertraglichen, ökonomischen und ökologischen Leistung nicht nur für Böden mit niedrigen Stickstoff- und/oder Humussalden zu empfehlen. In trockeneren Regionen eignen sich Luzerne-Gras-Gemenge (Direktsaat), bei besserer Wasserversorgung Mischungen aus Luzerne und Rotklee (Direktsaat oder Etablierung als Getreide-Untersaat möglich).

Mit Zwischenfrüchten kann das Risiko für Bodenverdichtung und N-Verlagerungen nach der Hauptfrucht-Ernte verringert und die Bodenfruchtbarkeit durch Aufwertung des Humushaushalts verbessert werden. Für leichte Böden bieten sich Sorghumhirsen mit guter Abreife (Sudangrashybriden, z. B. „Lussi“) als Biogassubstrat, sowie Ölrettich, Gelbsenf und *Phacelia* (für Raps-betonte Fruchtfolgen) zur Gründüngung an. Für die wasserzehrenden Weidelgräser reichte das Wasserangebot in vielen Jahren oft nicht aus.

Zu niedrige TS-Gehalte, nicht nur bei Zwischenfrüchten, sollten durch Anwelkphasen oder Siliermittelzusätze ausgeglichen werden, um Silierverluste zu vermeiden.

Zur Zweikulturnutzung eignet sich unter trockeneren Bedingungen Grünroggen, bei besserem Niederschlagsangebot Landsberger Gemenge als frühräumende Wintervorfrucht. Nach Landsberger Gemenge zeigten sich in mehreren Versuchsjahren jedoch schwierige Aufgangsbedingungen für die Nachkultur *Sorghum bicolor x sudanense*. Die Ursachen sind in einer zu hohen Wasserausschöpfung der Bodenwasservorräte durch die Weidelgräser im Gemenge, ein für *Sorghum* zu schlecht abgesetztes Saatbett oder in einer Unverträglichkeit zwischen Fruchtarten gesehen und müssen noch geklärt werden. Bei der Zweitfruchtwahl sollte sowohl bei Mais als auch bei den Sorghumhirsen auf frühreife Sorten geachtet werden. Weil *Sorghum bicolor*-Sorten schlechter abreiften, sind zur Zweikulturnutzung früh räumende *Sorghum bicolor x sudanense*-Sorten besser geeignet.

Zur Beachtung der Nachhaltigkeitskriterien sollten ausschließliche Energiepflanzen-Fruchtfolgen vermieden werden. Sowohl zur Erreichung ökonomischer als auch ökologischer (Verbleib von Ernteresten auf dem Acker) Ziele bieten sich kombinierte Energiepflanzen-Marktf Frucht-Anbausysteme an. Defizite im Humushaushalt können mit Gärrestgaben ausgeglichen werden.

Eine Einschätzung zur Anbaueignung der im EVA-Versuch am Standort Trossin geprüften Fruchtarten hinsichtlich wichtiger Biogassubstrat-Eigenschaften gibt Tabelle 14.

Tabelle 14: Anbaueignung (--, -, +, ++) verschiedener Energiepflanzen als Biogassubstrat auf leichten Böden bei periodischem Wassermangel auf Grundlage der EVA-Versuchsergebnisse

Fruchtart	TM-Ertrag	TS-Gehalt	CH ₄ -Ausbeute	Energieeffizienz	Ökologie	Ökonomie	Bemerkung
Mais – HF	++	++	++	++	--	++	
Mais – ZF	++	++	++	++	--	++	frühreife Sorten
<i>Sorghum</i> – HF	++	++	+	++	--	+	
<i>Sorghum</i> – ZF	++	+	+	++	--	+	Sudangrashybriden, frühreife Sorten
Getreide-GPS	+	++	+	++	-	+	ertragsstabil
Luzerne-Kleegras	+ bis ++	+	+	++	++	+	mehrfährig, ca. 2–3 Schnitte/Jahr
Sonnenblume	+	-	+	++	-	-	Biogas-Sonnenblumen (höherer TS-Gehalt), Aufwertung Landschaft
Kartoffel (Knolle)	+	--	++	o. A.	--	--	Ökonomisch besser als Marktf Frucht in FF

Fruchtart	TM-Ertrag	TS-Gehalt	CH ₄ -Ausbeute	Energieeffizienz	Ökologie	Ökonomie	Bemerkung
Biogasrübe (Körper)	++	--	++	++	--	--	massenbetonte E-Typ-Zuckerrübe mit hohem Zuckergehalt
Winterraps	+	+	+	+	--	--	eher für andere Verwertungsrichtungen, FF schon „rapslastig“ genug
Weidelgras – SZF	--	++	+	+	++	--	hoher Wasserbedarf
<i>Sorghum</i> – SZF	++	+	+ bis ++	+	+	--	Sudangrashybriden, frühreife Sorten
Landsb. Gem. – WZF	+	-	++	++	++	--	hoher Wasserbedarf
Grünroggen – WZF	+	-	+	++	+	--	
Gründüngung	--	--	o. A.		++	--	Einhaltung der CC-Kriterien

o. A. = ohne Angabe

6 Zusammenfassung

Auf einem leichten, diluvialen Boden in der Winterroggen-Kartoffel-Region Nordsachsens unter Einfluss des mitteleuropäischen Trockengebietes (Versuchsstandort Trossin: H = 120 m ü. NN, T = 8,9 °C, NS = 554 mm, Su3, AZ = 31) wurden acht verschiedene Anbausysteme mit Energiepflanzen zur Biogasproduktion in den Versuchsjahren 2009 bis 2013 hinsichtlich ihrer Anbaueignung, Ertragsleistung, Nachhaltigkeit und ihres Gasbildungspotenzials erprobt. In die Fruchtfolgen wurden sowohl traditionelle Kulturarten des Nahrungs- und Futterpflanzenanbaus (Mais, Getreideganzpflanzen) als auch „neuartige“ Feldkulturen (Futterhirsen, Sudangrashybride) sowie mehrjährige Leguminosen-Gras-Mischungen aufgenommen. Regionalspezifisch gewählte Fruchtarten wie Winterraps, Rüben, Kartoffeln und Sonnenblumen sollten die Biodiversität in den Fruchtfolgen erhöhen. Sie wurden in Haupt- und Zweitfruchtstellung integriert. Großer Wert wurde auch auf Kulturarten zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und Erfüllung von Umweltrichtlinien gelegt. Den Abschluss der 4-jährigen Anbausysteme bildete ein einheitliches Fruchtfolgeglied (Winterroggen als Marktfrucht) zur Darstellung fruchtfolgeabhängiger Effekte.

Die leistungsfähigsten Fruchtfolgen mit Mais (Ø 148 dt TM/ha), Sorghumhirsen (Ø 80 % Relativertrag zu Mais) und Getreideganzpflanzen (Ø 53–70 dt TM/ha je nach Getreideart) als bedeutendste Fruchtarten er-

zielten kumulative Trockenmasse-Erträge bis zu 400 dt TM/ha. Das Wintergetreide konnte im Vergleich zu den Sommerarten Mehrerträge von durchschnittlich 15–25 % aufweisen. In den regionalen Anbausystemen erreichten auch die Sonnenblume (Ø 84 dt TM/ha), die Kartoffel (Ø 92 dt TM/ha) und die massenbetonte E-Typ-Zuckerrübe (Ø 154 dt TM/ha) eine gute Ertragsleistung. Bei extensiver Schnittnutzung (2–3 Schnitte pro Jahr) wurden vom Luzerne-Klee-gras-Gemenge etwa 86 dt TM/ha gewonnen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Jahreserträge bei allen Fruchtarten in Abhängigkeit von der Witterung stark schwankten. Am ertragsstabilsten waren die Getreideganzpflanzen. Die statistische Auswertung ergab keinen signifikanten Einfluss der Fruchtfolgevarianten auf den Korn- und Strohertrag der Abschlussfrucht.

Qualitativ hochwertige Silagen lassen sich nur mit Trockensubstanzgehalten des Erntegutes zwischen 28 und 35 % bzw. 35 und 40 % bei den meisten Getreidearten erzeugen. Nur Mais in Hauptfruchtstellung und die Getreideganzpflanzen konnten die für die Silierung optimalen Werte sicher erreichen.

Die spezifischen Biogas- und Methangasausbeuten waren in großem Maße von der biochemischen Zusammensetzung der Trockenmasse (Anteil Rohfett, Nichtfaserkohlenhydrate und Rohprotein) der Energiepflanzen abhängig. Besonders die Eigenschaften (geringe Rohfaseranteile, hoher Gehalt leicht verdaulicher Kohlenhydrate) der Kartoffelknollen und der Rübenkörper machten sich positiv bei der Gasbildung bemerkbar. Ansonsten kumulierten die Methangashektarerträge weitgehend mit den Trockenmasseerträgen. Demzufolge überzeugten diesbezüglich ebenfalls Fruchtfolgen mit den Fruchtarten Mais, Sorghumhirsen, Wintergetreideganzpflanzen, Kartoffeln und Biogasarüben. Die Sorghumhirsen zeigten gegenüber Mais ein etwa 10 % geringeres Gasbildungspotenzial. Dafür verantwortlich waren die höheren Rohfasergehalte bei *Sorghum*. Mit den erprobten Anbausystemen waren kumulative Methangasleistungen von über 12.500 m³ CH₄/ha möglich.

Die Energiebilanzen differierten stark in Abhängigkeit der erzielten Methangas- bzw. Energieerträge witterungs- und jahresbedingt. Die zugeführte Energie war dagegen fruchtfolge- bzw. fruchtartenspezifisch. Düngemittelherstellung und Maschineneinsatz machten den größten Anteil am kumulierten Energieaufwand (KEA) aus. Am energieeffizientesten waren Mais (Ø 130 [HF] bzw. 96 [ZF] GJ/ha), Sorghumhirsen (Ø 93 [HF] bzw. 60–70 [ZF] GJ/ha) und Rüben (Ø 158 GJ/ha), gefolgt von Luzerne-Klee-gras (Ø 64 GJ/ha) und den Wintergetreideganzpflanzen (Ø 50 GJ/ha). Begründet liegt dies im Vergleich zu den restlichen erprobten Fruchtarten in höheren Methangashektarerträgen, weniger in geringeren Energieaufwendungen bei der Erzeugung.

Die Ertragsprüfung der Zweikulturnutzung im EVA-Versuch erbrachte in Abhängigkeit von der Jahreswitterung unterschiedliche Ergebnisse: Im relativ kühlen Jahr 2010 profitierten Zweikultursysteme von schlechten Bestandesetablierungen der Hauptfrüchte (Trockenheit, sehr kühle Nächte) sowie guten Wintervorfruchtwerten und erreichten Mehrerträge zwischen 30 und 50 % im Vergleich zum Hauptfruchtanbau. Im Versuchsjahr 2011 trat genau das Gegenteil ein: Aufgrund von ausgeprägter Vorsommertrockenheit mussten zum Teil Zweitfruchtbestände sogar umgebrochen und Mindererträge von 10–30 % im Vergleich zur Hauptkulturnutzung hingenommen werden. 2012 wurde die dritte Möglichkeit, ein gleiches Ertragsniveau beim Haupt- und Zweitfruchtanbau, verzeichnet. Landsberger Gemenge schnitt zwar im Mittel der Versuchsjahre mit Ø 58 dt TM/ha um ca. 30 % besser ab als Grünroggen, zeigte aber schlechtere Wirkungen auf die Nachfrucht.

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der angebauten Fruchtfolgeglieder mit Hilfe von Deckungsbeitragsanalysen basierte auf der Gegenüberstellung der direkten Produktionskosten und dem Methanerlös je Hektar (33 ct/m³ CH₄). Die günstigste Kosten-Ertrags-Relation wies Mais auf (Ø 215 €/ha als HF). In Energiefruchtfolgen integrierte Marktfrüchte konnten den Gesamtdeckungsbeitrag eines Anbausystems deutlich steigern.

Seit vielen Jahren werden die negativen Folgen der Landwirtschaft auf die Umwelt in Wissenschaft und Politik diskutiert. Ein Fokus liegt dabei auf den Treibhausgasemissionen. Übermäßige Einsätze von Stickstoffdüngern und Maschinen gehören zu den Hauptverursachern von Luftbelastungen mit Stick- und Distickoxiden sowie Kohlendioxid. Der mehrjährige Luzerne-Kleegras-Anbau profitierte von der Stickstofffixierungsleistung der Leguminosen mit den daraus resultierenden reduzierten N-Aufwendungen und schnitt in Bezug auf die Klimawirksamkeit am besten ab. Zudem war der maschinelle Aufwand geringer als bei jährlicher Aussaat. Bei den einjährigen Kulturarten überzeugten Rüben und Sonnenblumen mit dem geringsten Emissionsrisiko.

Ökologische Nachhaltigkeit hat auch zur Einhaltung von CC-Anforderungen und bevorstehender GAP-Reform (Greening) eine große Bedeutung. Weil bei der Ganzpflanzennutzung (fast) sämtliches Erntematerial vom Acker gefahren wird, zeigten Nährstoff- und Humusbilanzierungen eine starke Inanspruchnahme des Nährstoff- und Humushaushalts. Nicht erreichte Ertragserwartungswerte und somit die Nichtausschöpfung gedüngter Stickstoffmengen führten teilweise zu kritischen N_{\min} -Bodenwerten und einem erhöhten Auswaschungsrisiko. Zwischenfrüchte und mehrjährige Leguminosenmischungen können das Gefährdungspotenzial deutlich senken sowie zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit beitragen.

7 Literaturverzeichnis

- AMON, T.; KRYVORUCHKO, V.; AMON, B. (2004): Biogas aus Klee gras-, Feldfutter- und Dauerwiesenmischungen. *Der fortschrittliche Landwirt* 22, 30-31.
- AMON, T.; MACHMÜLLER, A.; KRYVORUCHKO, V. (2007): Optimierung der Methanausbeute aus Zuckerrüben, Silomais, Körnermais, Sonnenblumen, Ackerfutter, Getreide, Wirtschaftsdünger und Rohglyzerin unter den Standortbedingungen der Steiermark. Universität für Bodenkultur, Wien.
- ANDERSON, G.; FERGUSON, M. (2006): Energy from biomass in the UK: sources, processes and biodiversity implications. *Ibis* 148, 180-183.
- BADAWI, A. (2010): Verluste der oberirdischen Biomasse von abfrostenden Begrünungspflanzen durch Ausgasung vor der Einarbeitung in den Boden. Diplomarbeit. Universität Wien, Wien.
- BAYWA (2012): Pflanzenschutz-Navigator 2012. BAYWA AG.
- BGR (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung KA5. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BECKMANN, U.; KOLBE, H. (2002): Maisanbau im ökologischen Landbau. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig.
- BLUME, H.-P. (1992): Handbuch des Bodenschutzes, Bodenökologie und -belastung. 2. Auflage, Landsberg.
- BMELV (2012): Das Erneuerbare-Energien-Gesetz. Daten und Fakten zu Biomasse – Die Novelle 2012. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Berlin.
- BMELV (2014): Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) der EU 2014-2020. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin.
- BMU (2009): Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.
- BMU (2012): Die Wasserrahmenrichtlinie. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.
- BÖSE, S. (2009): Strom oder Stroh. Saaten Union, Isernhagen.
- BRÖCKER, M. (2007): Welcher Energiepflanzen-Mix für hohe Gaserträge? *Top agrar* 4, 74-79.
- BSA (2000): Richtlinien für die Durchführung von landwirtschaftlichen Wertprüfungen und Sortenversuchen. Bundessortenamt, Hannover.
- BUTTLAR, CH. (2012): Energiepflanzenanbau nach EG-WRRRL. Ingenieurgesellschaft für Landwirtschaft und Umwelt, Göttingen.
- EBEL, G, BARTHELMES, G. (2013): Winterroggen: Eine vielseitige und typische Fruchtart im Land Brandenburg. Feldtag Güterfelde, 22.08.2013. LELF Brandenburg, Güterfelde.
- FNR (2005): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow.
- FNR (2010): Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 3. Auflage, Gülzow.
- FÖRSTER, F.; ERNST, H.; ALBERT, E. (2009, 2010, 2011, 2012): Düngebedarfsermittlung BEFU. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig.
- GANTENBEIN, P. (o. J.): Vorteile von Zwischenfrüchten jetzt gezielt nutzen. Landwirtschaftskammer Luxemburg.
- Greenpeace (2012): Was ist der Treibhauseffekt. Greenpeace e. V., Hamburg.
- GRUNEWALD, J.; JÄKEL, K. (2012): Rechnet's sich's? *Bauernzeitung* 36/2012, 54-55.
- GRUNEWALD, J.; GRUBITZSCH, R.; JÄKEL, K. (2013): Das Projekt EVA III. Versuchsstandort Trossin/Sachsen. Zwischenbericht 2013. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen.
- HENNINGS, H.-H.; SCHEFFER, B. (2000): Zum Nitrataustrag ins Grundwasser – Stand der Erkenntnisse. *Wasserwirtschaft* 90, 348-355.

- HERRMANN, CH.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2009): Silierung von Energiepflanzen. In: VETTER, A.; HEIERMANN, M.; TOEWS, T. (Hrsg.), Anbausysteme für Energiepflanzen. DLG-Verlag, Frankfurt/Main.
- HERRMANN, CH.; HEIERMANN, M.; IDLER C.; PLOGSTIES, V. (2013): Ermittlung des Einflusses der Substratqualität auf die Biogasausbeute in Labor und Praxis. Schlussbericht des TP 4 (FKZ: 22013308) im Rahmen des Verbundvorhabens „EVA 2“. ATB Potsdam-Bornim.
- JUNGHÄNEL, T. (2010): Vergleich verschiedener Wasserhaushaltsmodelle mit gemessenen Parametern an Bodendauerbeobachtungsflächen in Sachsen (Bachelorarbeit). Universität Leipzig, Leipzig.
- KAYSER, M. (2002): Aspekte zum Wasserhaushalte von Sandlössen im Mitteldeutschen Trockengebiet (Dissertation). Technische Universität Berlin, Berlin.
- KETELSEN, H.; HANSEN, J.; REICHE, E.-W. (1999): Modellstudien zur Nitratauswaschung unter beweidetem Grünland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 162, 685-696.
- KOLBE, H. (2007): Formen der Nährstoffbilanzierung in Praxis und Beratung des ökologischen Landbaus. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig.
- KORNATZ, P.; Aurbacher, J. (2013): Endbericht EVA, Teilprojekt 3: Ökonomische Begleitforschung. Universität Gießen.
- KROMP-KOLB, H.; BECSI, B.; LITSCHAUER, M. (2013): StartClim 2012. Anpassung an den Klimawandel in Österreich – Themenfeld Boden. Endbericht. Universität für Bodenkultur, Wien.
- KTBL (2010): Betriebsplanung Landwirtschaft 2010/2011. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt.
- KUTSCHERA, L. (2009): Wurzelatlas der Kulturpflanzen. DLG-Verlag, Frankfurt.
- MÜLLER, J. (1987): Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete in ausgewählten Vegetationsabschnitten und deren statistische, modellmäßige und kulturbezogene Bewertung (Dissertation). Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle.
- NENDEL, E. (2011): The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. *Ecol. Model.* 222 (9), 1614-1625.
- PAULUS, J.; STARK, G. (2008): Empfehlungen zum Einsatz von Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising.
- RÖHRICHT, CH.; FREYDANK, S.; SCHRÖDER, S. (2008): Energie vom Sand. *Bauernzeitung* 25/2008, 26-27.
- SAUERMAN, W. (2012): Stroherträge von Futtererbsen 2011. *Bauernblatt Schleswig-Holstein* 24. März 2012, 40-42.
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. Enke-Verlag, Stuttgart.
- SCHITTENHELM, S. (2009): Wassernutzungseffizienz von Energiepflanzen. Fachvortrag. Julius Kühn-Institut, Braunschweig.
- SCHMIDT, T.; VOLK, M.; NEUBERT, M. (o. J.): Nitratkonzentration im Sickerwasser - Nachhaltige Wasserbewirtschaftung und Landnutzung im Torgauer Raum. Umweltforschungszentrum Halle.
- SMUL (2007): Richtlinie zur Förderung von flächenbezogenen Agrarumweltmaßnahmen und der ökologischen Waldmehrung im Freistaat Sachsen (RL AuW/2007). Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden.
- SMWA, SMUL (2013): Energie- und Klimaprogramm Sachsen 2012. Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, Dresden. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden
- SMUL (2013): Cross Compliance 2013. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden.
- STOLZENBURG, K. (2008): Ergebnisse der Arten- und Sortenversuche in Baden-Württemberg – Gasausbeuten, Biomasse- und Energieerträge. In: MASTEL, K. (Hrsg.), Pflanzliche Rohstoffe zur Biogasgewinnung – Tagungsband vom 3. Workshop. LTZ Bayern, Augustenberg.

- THEIB, M. (2012): Sorghumhirsen – Ein Beitrag zur Diversifizierung des Energiepflanzenpektrums. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow.
- TLL (1999): Merkblatt – Schwefelgehalte in landwirtschaftlichen Kulturpflanzen und organischen Düngestoffen.
- TLL (2009): Entwicklung und Optimierung von standortangepassten Anbausystemen für Energiepflanzen im Fruchtfolgeregime (EVA) – Abschlussbericht zum Teilprojekt 1. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Dornburg/Jena.
- TLL (2012): Abschlussbericht zum Teilprojekt 1 (Energiefruchtfolgegrundversuch): Entwicklung und Optimierung von standortangepassten Anbausystemen für Energiepflanzen im Fruchtfolgeregime. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Dornburg/Jena.
- Universität Hohenheim (1997): DLG-Futterwerttabellen Wiederkäuer. DLG-Verlag, 7. Auflage, Frankfurt.
- VDLUFA (1997): Methodenhandbuch Band 1 – Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA (1998): Methodenhandbuch Band 3 – Futtermitteluntersuchung. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA (2004): Standpunkt Humusbilanzierung – Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Bonn.
- WAGNER, M.; KNOBLAUCH, S. (2009): Wassernutzungseffizienz von Mais und *Sorghum*. Fachvortrag. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.
- WAGNER, M.; KNOBLAUCH, S. (2011): Wassernutzungseffizienz und Wasserverbrauch von *Sorghum bicolor* im Vergleich zu Energiemais. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung, 215-218.
- Wikipedia (2013): Treibhausgas. Treibhauseffekt. Kyoto-Protokoll. Montreal-Protokoll. www.wikipedia.de (Stand: 14.05.2014).
- WILLMS, W.; GLEMNITZ, W.; HUFNAGEL, J. (2009): Ökologische Folgewirkungen des Energiepflanzenanbaus (EVA) – Abschlussbericht zu Teilprojekt II. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Münchenberg.
- ZALF (2013): EVA II – Vorläufiger Endbericht zu Teilprojekt 2: Ökologische Folgewirkungen des Energiepflanzenanbaus. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Münchenberg.
- ZANDER, D. (2012): Ergebnisse mehrjähriger Sortenversuche Sorghumhirsen. Schriftenreihe, Heft 24/2012, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen.

Anhang I – Tabellen

Tabelle A1: Angebaute Sorten im EVA-Energiefruchtfolge-Versuch am Standort Trossin

Kulturart	Fruchtfolge	Sorte	Saatgutvertrieb
Wintergerste	1, 6, 8	Lomerit	KWS Lochow GmbH
<i>Sorghum bicolor</i> (SZF)	1	Super Sile 18	Caussade Saaten GmbH
Mais	1, 2, 3, 7	Atletico	KWS Saat AG
Wintertriticale	1, 2, 3, 4	SW Talentro	SW Seed GmbH
<i>Phacelia</i>	1, 8	Amerigo	Saaten Union GmbH
<i>Sorghum bicolor x sudanense</i>	2, 3, 4, 6	Lussi	Caussade Saaten GmbH
Grünroggen	2, 3, 7	Vitallo	KWS Lochow GmbH
Einjähriges Weidelgras	3	Liquattro	DSV Saaten GmbH
Hafermischung	4	Freddy-Dominik	Saaten Union GmbH
Winterraps	4, 6	Elektra	Rapool Ring GmbH
Sommergerste	5	Simba	Saaten Union GmbH
Luzerne-Kleegras	5	QA 10 ¹⁾	Rudloff Feldsaaten GmbH / Saatzucht Steinach GmbH
Landsberger Gemenge ²⁾	6	----	DSV Saaten GmbH
<i>Sorghum bicolor</i> (ZF)	7	Super Sile 18 (2010) Goliath (2011)	Caussade Saaten GmbH Dehner Agrar GmbH
Kartoffel	7	Melody	----
Gelbsenf	8	Ascot	Saaten Union GmbH
Sonnenblume	8	Methasol	KWS Saat AG
Biogaserübe	8	GERTY KWS	KWS Saat AG
Winterroggen	1-8	Visello	KWS Lochow GmbH

¹⁾ QA 10 = Saatmischung für wechsellrockene bis trockene Standorte, bestehend aus Wiesenschwingel, Wiesenlieschgras, Glatthafer, Rotklee und Luzerne

²⁾ Landsberger Gemenge ist ein Leguminosen-Gras-Gemenge aus 30 % Inkarnatklee, 50 % Welschem Weidelgras und 20 % Winterwicke

Tabelle A2: Aussaat und Aufgang der Feldfrüchte im Energiefruchtfolgeversuch am Standort Trossin

Jahr	Anlage	FF	Kulturart	FF-Stellung	Datum Aussaat	Aussaatmenge*	Datum Aufgang
2009	3	1, 6, 8	Wintergerste	HF	27.09.2008	300 Körner/m ²	09.10.2008
		1	<i>Sorghum bicolor</i>	SZF	04.06.2009	25 Körner/m ²	15.06.2009
		2	<i>Sorghum b. x s.</i>	HF	15.05.2009	40 Körner/m ²	24.05.2009
		3, 7	Mais	HF	01.05.2009	<u>13, 2 / 75 cm</u>	18.05.2009
		4	Hafermischung	HF	09.04.2009	280 Körner/m ²	22.04.2009
		5	Sommergerste + US**	HF	09.04.2009	310 Körner/m ²	----
		8	Gelbsenf	SZF	04.06.2009	18 kg/ha	14.06.2009
2010	3	1	Mais	HF	30.04.2010	<u>13,2 / 75 cm</u>	25.05.2010
		2, 3, 7	Grünroggen	WZF	30.09.2009	300 Körner/m ²	10.10.2009
		2	Mais	ZF	22.05.2010	<u>13,2 / 75 cm</u>	06.06.2010
		3	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	22.05.2010	40 Körner / m ²	11.06.2010
		4	Wintertriticale	HF	30.09.2009	320 Körner/m ²	10.10.2009
		5	Luzerne-Klee gras	HF	30.09.2009	8 + 8 kg/ha	14.10.2009
					06.07.2010	8 + 8 kg/ha	17.07.2010
		6	Winterraps	HF	22.08.2009	50 Körner/m ²	31.08.2009
		7	<i>Sorghum bicolor</i>	ZF	22.05.2010	40 Körner/m ²	11.06.2010
		8	Sonnenblume	HF	14.04.2010	<u>17,0 / 62,5 cm</u>	03.05.2010
8	<i>Phacelia</i>	SZF	02.09.2010	11 kg/ha	14.09.2010		
2010	4	1, 6, 8	Wintergerste	HF	30.09.2009	320 Körner/m ²	10.10.2009
		1	<i>Sorghum bicolor</i>	SZF	10.06.2010	40 Körner/m ²	20.06.2010
		2	<i>Sorghum b. x s.</i>	HF	22.05.2010	40 Körner/m ²	11.06.2010
		3, 7	Mais	HF	30.04.2010	<u>13,2 / 75 cm</u>	25.05.2010
		4	Hafermischung	HF	31.03.2010	330 Körner / m ²	15.04.2010
		5	Sommergerste + US**	HF	31.03.2010	330 Körner / m ²	14.04.2010
		8	Gelbsenf	SZF	02.09.2010	18 kg/ha	20.09.2010
2011	3	1, 2, 3	Wintertriticale	HF	09.10.2010	325 Körner/m ²	25.10.2010
		1	<i>Phacelia</i>	SZF	17.06.2011	11 kg/ha	28.06.2011
		3	Einjähriges Weidelgras	SZF	17.06.2011	40 kg/ha	26.06.2011
		4	Winterraps	HF	02.09.2010	50 Körner/m ²	13.09.2010
		5	Luzerne-Klee gras	HF	----	----	----
		6	Landsberger Gemenge	WZF	02.09.2010	50 kg/ha	13.09.2010
		6	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	16.05.2011	40 Körner/m ²	kein Aufgang
					17.06.2011	40 Körner/m ²	26.06.2011
		7	Kartoffel	HF	27.04.2011	<u>30 / 70 cm</u>	24.05.2011
8	Biogasrübe	HF	15.04.2011	<u>17 / 45 cm</u>	26.04.2011		
2011	4	1	Mais	HF	02.05.2011	<u>14,6 / 75 cm</u>	11.05.2011
		2, 3, 7	Grünroggen	WZF	09.10.2010	245 Körner/m ²	25.10.2010
		2	Mais	ZF	12.05.2011	<u>14,6 / 75 cm</u>	30.05.2011
		3	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	16.05.2011	40 Körner/m ²	kein Aufgang

Jahr	Anlage	FF	Kulturart	FF-Stellung	Datum Aussaat	Aussaatmenge*	Datum Aufgang
					17.06.2011	40 Körner/m ²	26.06.2011
		4	Wintertriticale	HF	09.10.2010	325 Körner/m ²	25.10.2010
		5	Luzerne-Kleegras	HF	06.07.2010	8 + 8 kg/ha	17.07.2010
		6	Winterraps	HF	02.09.2010	50 Körner/m ²	13.09.2010
		7	<i>Sorghum bicolor</i>	ZF	16.05.2011	25 Körner/m ²	kein Aufgang
					16.06.2011	25 Körner/m ²	26.06.2011
		8	Sonnenblume	HF	06.04.2011	<u>15,8 / 62,5 cm</u>	25.04.2011
		8	<i>Phacelia</i>	SZF	26.08.2011	11 kg/ha	07.09.2011
		1, 2, 3	Wintertriticale	HF	14.10.2011	350 Körner/m ²	29.10.2011
		1	<i>Phacelia</i>	SZF	22.06.2012	11 kg/ha	28.06.2012
		3	Einjähriges Weidelgras	SZF	22.06.2012	40 kg/ha	29.06.2012
		4	Winterraps	HF	29.08.2011	50 Körner/m ²	05.09.2011
2012	4	5	Luzerne-Kleegras	HF	----	----	----
		6	Landsberger Gemenge	WZF	29.08.2011	48 kg/ha	05.09.2011
		6	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	25.05.2012	40 Körner/m ²	kein Aufgang
					22.06.2012	40 Körner/m ²	29.06.2012
		7	Kartoffel	HF	20.04.2012	<u>33 / 75 cm</u>	18.05.2012
		8	Biogasrübe	HF	05.04.2012	<u>17,4 / 45 cm</u>	29.04.2012

* nicht unterstrichen: Drillsaat mit Hege 80 PNI mit Kreiselegge

* unterstrichen: Einzelkornsaat mit Hege 76 – Abstand der Ablage [cm]/Reihenabstand [cm]

** Untersaat = Luzerne-Kleegras-Mischung (8 + 8 kg/ha)

Tabelle A3: Mineralische Stickstoffdüngung im EVA-Fruchtfolgeversuch am Standort Trossin^{^1}

Jahr	Anlage	FF	Kulturart	Datum	BBCH	N _{min} Frühjahr/vor Aussaat ²⁾ 0–90 cm [kg/ha]	Aufwandmenge Dünger/N _{gesamt} [kg/ha]		
2009	3	1, 6, 8	Wintergerste	19.03.09	24-26	25,8/27,2/30,6	370 / 100		
		1	<i>Sorghum bicolor</i>	12.06.09	k. A.	19,4	555 / 150		
		2	<i>Sorghum b. x s.</i>	26.05.09	11-12	47,9	444 / 120		
		3, 7	Mais	26.05.09	14	47,1/41,6	555 / 150		
		4	Hafermischung	05.05.09/18.05.09	zur Saat/30-31	65,9	185 / 50 + 129,5 / 35		
		5	Sommergerste + US	05.05.09/18.05.09	zur Saat/30-31	49,9	185 / 50 + 222 / 60		
2010	3	1	Mais	12.05.10	vA	13,9	455 / 150		
		2, 3, 7	Grünroggen	18.03.10 - FF 2,7 25.03.10 - FF 3	21-25	38,7/26,0/25,7	303 / 100 303 / 100		
		2	Mais	09.06.10	13	24,7	455 / 150		
		3	<i>Sorghum b. x s.</i>	16.06.10	14	11,7	455 / 150		
		4	Wintertriticale	18.03.10	22-24/k. M.	30,5	364 / 120		
		5	Luzerne-Klee gras	18.03.10/22.07.10	21-23/k. A.	28,3	182 / 60 + 121 / 40		
		6	Winterraps	11.03.10/01.04.10	16-17/31-32	31,6	242 / 80 + 212 / 70		
		7	<i>Sorghum bicolor</i>	16.06.10	14	17,6	364 / 120		
2010	4	1, 6, 8	Wintergerste	18.03.10	k. A.	19,9/20,1/17,4	303 / 100		
		1	<i>Sorghum bicolor</i>	16.06.10	vA	12,1	364 / 120		
		2	<i>Sorghum b. x s.</i>	16.06.10	14-15	17,4	364 / 120		
		3, 7	Mais	12.05.10	vA	14,6/14,8	455 / 150		
		4	Hafermischung	16.04.10	k. A.	21,5	258 / 85		
		5	Sommergerste + US	16.04.10	k. A.	28,9	333 / 110		
		2011	3	1, 2, 3	Wintertriticale	09.03.11 – FF 1,2 22.03.11 – FF 3	22-23	23,6/19,7 18,7	364 / 120 303 / 100
				3	Einjähriges Weidelgras	29.06.11	10-11	2,8	303 / 100 + 152 / 50
4	Winterraps			07.03.11/05.04.11	12-13/31	23,6	152 / 50 + 121 / 40		
5	Luzerne-Klee gras			08.06.11/05.08.11	k. A.	9,2	303 / 100		
6	Landsberger Gem.			07.03.11	k. A.	11,5	364 / 120		
6	<i>Sorghum b. x s.</i>			29.06.11	12-13	9,4	455 / 150		
7	Kartoffel			04.05.11	vA	16,9	212 / 70		
8	Biogasröbe			26.04.11	10	11,8			
2011	4	1	Mais	12.05.11	k. A.	8,9	455 / 150		

Jahr	Anlage	FF	Kulturart	Datum	BBCH	N _{min} Frühjahr/vor Aussaat ²⁾ 0–90 cm [kg/ha]	Aufwandmenge Dünger/N _{gesamt} [kg/ha]
		2, 3, 7	Grünroggen	09.03.11 – FF 2, 7 22.03.11 – FF 3	22-23 22-23	20,1/15,8/17,9	303 / 100 303 / 100
		2	Mais	08.06.11	11	4,3	455 / 150
		3	<i>Sorghum b. x s.</i>	29.06.11	nA	3,2	364 / 120
		4	Wintertriticale	09.03.11	22-23	18,4	364 / 120
		5	Luzerne-Klee gras	07.03.11/08.06.11	k. A.	11,7	152 / 50 + 152 / 50
		6	Winterraps	07.03.11/05.04.11	12-13/31	25,4	303 / 100 + 152 /
		7	<i>Sorghum bicolor</i>	29.06.11	nA	7,4	50 364 / 120
		8	Sonnenblume	11.04.11	vA	9,8	273 / 90
2012	3	1-8	Winterroggen	14.03.12 (alle) 14.03.12 (FF 3) 28.03.12 (FF 3) 10.05.12 (FF 3)	k. A. k. A. 30 55-59	9,6/17,9/15,6/13,2/ 15,7/8,9/10,2/6,4	364 / 120 145 / 48 110 / 36 110 / 36
		1, 2, 3	Wintertriticale	14.03.12 – FF 1,2 14.03.12 – FF 3 28.03.12 – FF 3 10.05.12 – FF 3	k. A. k. A. 30 49	7,9/4,3 8,2	364 / 120 182 / 60 109 / 36 73 / 24
2012	4	3	Einj. Weidelgras	04.07.12	11-12	24,8	303 / 100
		4	Winterraps	07.03.12/26.03.12	15-16/32	4,5	242 / 80 + 212 / 70
		5	Luzerne-Klee gras	14.03.12/25.05.12	k. A.	2,8	182 / 60 + 121 / 40
		6	Landsberger Gem.	14.03.12	k. A.	4,2	303 / 100
		6	<i>Sorghum b. x s.</i>	04.07.12	12-13	23,7	364 / 120
		7	Kartoffel	04.05.12	vA	9,7	455 / 150
		8	Biogaserübe	04.05.12	10	8,9	455 / 150
2013	4	1-8	Winterroggen	08.04.13 (alle FF) 08.04.13 (FF 3) 10.04.13 (FF 3) 29.04.13 (FF 3)	25-27 25-27 25-27 32	9,7/8,5/8,6/12,6/ 23,9/12,0/10,2/10,4	364 / 120 --- 212 / 70 152 / 50

k. M. = keine Bodenbeprobung bzw. N_{min}-Messung erfolgt, vA = vor Aufgang, nA = kurz nach Aufgang, k. A. = keine Angabe

¹⁾ Versuchsjahr 2009: KAS (Kalkammonsalpeter, bestehend aus 13,5 % Nitratstickstoff, 13,5 % Ammoniumstickstoff und ca. 22 % Calciumcarbonat)

Versuchsjahre 2010, 2011, 2012 und 2013: Piamon 33 S (Ammoniumsulfat-Harnstoff 33/12, ein Stickstoffdünger mit Schwefel, bestehend aus 22,6 % Carbamidstickstoff und 10,4 % Ammoniumstickstoff [33 % Gesamtstickstoff] sowie 12 % wasserlöslichem Schwefel), Ausnahme: Düngung von Kartoffel und Rübe am 04.05.2012 mit KAS

²⁾ Mittelwert aus Beprobungsergebnis aller Parzellen (n = 4), Summe der Bodentiefen 0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm

Tabelle A4: Pflanzenschutzmitteleinsatz im EVA-Energiefruchtfolgeversuch in Trossin, 2009–2012

Jahr	Anlage	FF	Kulturart	Datum (BBCH)	Präparat (Funktion)	Aufwandmenge
2009	3	1, 6, 8	Wintergerste	15.10.08 (12)	Fenikan (H) / Karate Zeon (I)	2,5 / 0,075 l/ha
		1	<i>Sorghum bicolor</i>	29.06.09	Gardo Gold (H)	4,0 l/ha
		2	<i>Sorghum b. x s.</i>	02.06.09 (13-14)	Gardo Gold (H)	3,8 l/ha
		3, 7	Mais	18.05.09 (12-13)	Calaris (H) / Gardo Gold (H)	1,5 l/ha / 3,5 l/ha
		4	Hafermischung	27.04.09 (13)	Primus (H)	0,1 l/ha
		5	Sommergerste + US	29.06.09 (65) 27.04.09 (13) 12.05.09	Karate Zeon (I) Certrol B (H) Karate Zeon (I)	0,075 l/ha 0,75 l/ha 0,075 l/ha
2010	3	1	Mais	25.05.10 (12) 14.06.10 (14)	Gardo Gold (H) / Callisto (H) Gardo Gold (H)	3,5 l/ha / 0,5 l/ha 4,0 l/ha
		2, 3, 7	Grünroggen	13.10.09 (10-11)	Fenikan (H) / Karate Zeon (I)	2,5 / 0,075 l/ha
		2	Mais	28.06.10 (12-13)	Gardo Gold (H)	4,0 l/ha
		3	<i>Sorghum b. x s.</i>	14.06.10 (14)	Gardo Gold (H)	4,0 l/ha
		4	Wintertriticale	13.10.09 (10-11)	Fenikan (H) / Karate Zeon (I)	2,5 / 0,075 l/ha
		5	Luzerne-Klee gras	16.09.09	Karate Zeon (I)	0,075 l/ha
		6	Winterraps	24.08.09 10.09.09 24.04.10	Nimbus (H) / Raps Stomp (H) Karate Zeon (I) / Folicur (F) Talstar (I)	3,0 l/ha / 1,5 l/ha 0,075 / 1,0 l/ha 0,125 l/ha
		7	<i>Sorghum bicolor</i>	14.06.10 (14)	Gardo Gold (H)	4,0 l/ha
		8	Sonnenblume	16.04.10 (vA) 21.05.10	Stomp (H) / Boxer (H) Fusilade Max (H)	2,5 l/ha / 2,5 l/ha 1,5 l/ha
		8	<i>Phacelia</i>	22.09.10	Karate Zeon (I)	0,075 l/ha
2010	4	1, 6, 8	Wintergerste	13.10.09 (10-11)	Fenikan (H) / Karate Zeon (I)	2,5 / 0,075 l/ha
		1	<i>Sorghum bicolor</i>	28.06.10 (13)	Gardo Gold (H)	4,0 l/ha
		2	<i>Sorghum b. x s.</i>	14.06.10 (14)	Gardo Gold (H)	4,0 l/ha
		3, 7	Mais	25.05.10 (12)	Gardo Gold (H) / Callisto (H)	3,5 l/ha / 0,5 l/ha
4	Hafermischung	28.04.10	Certrol B (H)	1,5 l/ha		
2011	3	1, 2, 3	Wintertriticale	12.10.10 (vA) 09.05.11 (49-51)	Stomp a. (H) / Priori Extra (F) Priori Extra (F)	4,0 l/ha / 1,0 l/ha 1,0 l/ha
		3	Einj. Weidelgras	07.07.11 (13-14)	Primus (H)	0,1 l/ha
		4	Winterraps	03.09.10 (zS) 22.09.10	Nimbus (H) Karate Zeon (I)	3,0 l/ha 0,075 l/ha
				12.10.10 05.04.11	Folicur (F) Caramba (F) / Karate Z. (I)	1,5 l/ha 0,5 l/ha / 0,05 l/ha
				11.04.11 (33/51)	Chlorpyriphos (I)	1,0 l/ha
				05.05.11	Mavrik (I) / Folicur (F)	0,2 l/ha / 1,0 l/ha
		5	Luzerne-Klee gras	22.09.10	Karate Zeon (I)	0,075 l/ha
		6	Landsb. Gemenge	22.09.10	Karate Zeon (I)	0,075 l/ha
		7	Kartoffel	18.05.11 (vA) 10.06.11 (35) 16.06.11	Sencor (H) / Boxer (H) Ranman (F) / Fusilade Max (H) Ranman (F) / Coragen (I)	0,5 kg/ha / 3,2 l/ha 0,2 l/ha / 1,0 l/ha 0,2 l/ha / 0,06 l/ha

Jahr	Anlage	FF	Kulturart	Datum (BBCH)	Präparat (Funktion)	Aufwandmenge
				29.06.11	Ranman (F)	0,2 l/ha
				18.08.11	Reglone (Krautabt.)	2,5 l/ha
		8	Biogasrübe	19.04.11 (vA)	Goltix Gold (H) / Betanal Expert (H)	1,5 l/ha 1,25 l/ha
				28.04.11 (10)	Rebell (H) / Karate Zeon (I)	0,8 / 0,075 l/ha
				06.05.11 (12)	Goltix Gold (H) / Betanal Expert (H)	1,25 l/ha / 1,25 l/ha
				18.05.11 (12-13)	Spectrum (H)	0,9 l/ha
				03.06.11	Debut (H) / FHS (H) / Fusilade Max (H)	0,03 kg/ha / 0,25 1,0 l/ha
		1	Mais	18.05.11 (12-13)	Gardo Gold (H)	4,0 l/ha
		2, 3, 7	Grünroggen	12.10.10 (vA)	Stomp aqua (H)	4,0 l/ha
		2	Mais	15.06.11 (13-14)	Gardo Gold (H)	3,8 l/ha
		4	Wintertriticale	12.10.10 (vA)	Stomp aqua (H)	4,0 l/ha
		5	Luzerne-Klee gras	22.09.10	Karate Zeon (I)	0,075 l/ha
2011	4	6	Winterraps	03.09.10 (zS)	Nimbus (H)	3,0 l/ha
				12.10.10	Folicur (F)	1,5 l/ha
				05.04.11	Caramba (F) / Karate Z. (I)	0,5 l/ha / 0,05 l/ha
				05.05.11	Mavrik (I) / Folicur (F)	0,2 l/ha / 1,0 l/ha
				03.08.11	Albaugh Rosate (H)	3,0 l/ha
		8	Sonnenblume	06.04.11 (zS)	Stomp SC (H) / Boxer (H)	3,0 l/ha / 3,0 l/ha
				23.05.11	Karate Zeon (I)	0,075 l/ha
		1, 2, 3	Wintertriticale	01.11.11 (11-12)	Fenikan (H)	1,8 l/ha
		3	Einj. Weidelgras	13.07.12 (13/21)	Basagran DP (H)	3,0 l/ha
		4	Winterraps	30.08.11 (vA)	Nimbus (H)	3,0 l/ha
				19.09.11 (11-12)	Karate Zeon (I)	0,05 l/ha
				29.09.11	Folicur (F) / Fusilade Max (H)	1,0 l/ha / 1,2 l/ha
					Caramba (F) / Talstar (I)	0,5 l/ha / 0,1 l/ha
				26.03.12 (32/51)	Talstar 8 SC (I)	0,125 l/ha
				24.04.12 (61)	Folicur (F)	1,0 l/ha
		6	<i>Sorghum b. x s.</i>	04.05.12 (65)	Gardo Gold (H)	3,8 l/ha
		7	Kartoffel	13.07.12 (14/15)	Boxer (H)	4,8 l/ha
				07.05.12 (vA)	Fusilade Max (H)	0,8 l/ha
2012	4			23.05.12 (14-18)	Dythane Neotec (F)	1,8 kg/ha
				11.06.12 (39)	Acrobat Plus (F)	0,8 kg/ha
				18.06.12 (51)	Acrobat Plus (F)	0,8 kg/ha
				25.06.12 (65-67)	Basta (Krautabtötung)	2,0 l/ha
		8	Biogasrübe	15.08.12	Rebell (H)	4,0 l/ha
				05.04.12 (vA)	Betanal Extra (H) /	1,75 l/ha /
				07.05.12 (12)	Karate Zeon (I)	0,075 l/ha
					Betanal Extra (H)	1,75 l/ha
				15.05.12 (12-13)	Eria (F)	0,4 l/ha
				18.06.12 (19-31)	Eria (F) /	0,4 l/ha /
				25.06.12 (RS)	Karate Zeon (I)	0,075 l/ha

vA = vor Aufgang, zS = zur Saat, RS = bei Reihenschluss, H = Herbizid, I = Insektizid, F = Fungizid, WR = Wachstumsregler

Tabelle A5: Erntedaten der Kulturen des EVA-Energiefruchtfolgeversuches am Standort Trossin, 2009–2012

Jahr	Anlage	FF	Kulturart	FF-Stellung	Datum	BBCH-Vorgabe*/BBCH-IST
2009	3	1, 6, 8	Wintergerste	HF	27.05.09	77-83 / 83
		1	<i>Sorghum bicolor</i>	SZF	24.09.09	77-83 / 55
		2	<i>Sorghum b. x s.</i>	HF	24.09.09	77- 83 / 69-77
		3, 7	Mais	HF	08.09.09	77-83 / 83
		4	Hafermischung	HF	09.07.09	77-83 / 77
		5	Sommergerste + US	HF	09.07.09	77-83 / 75
		8	Gelbsenf	SZF	18.08.09	k. V. / 69
2010	3	1	Mais	HF	23.09.10	77-83 / 85
		2, 3, 7	Grünroggen	WZF	18.05.10	55 / 55
		2	Mais	ZF	23.09.10	77-83 / 85
		3	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	04.10.10	77-83 / 71
		4	Wintertriticale	HF	24.06.10	77-83 / 75
		5	Luzerne-Klee gras	HF	1. Schnitt: 24.06.10 2. Schnitt: 03.09.10	k. V. / 51 k. V. / 51
		6	Winterraps	HF	24.06.10	77-83 / 85
		7	<i>Sorghum bicolor</i>	ZF	19.10.10	77-83 / 71
		8	Sonnenblume	HF	26.08.10	77-83 / 83
8	<i>Phacelia</i>	SZF	zu wenig Aufwuchs	----		
2010	4	1, 6, 8	Wintergerste	HF	04.06.10	77-83 / 75
		1	<i>Sorghum bicolor</i>	SZF	04.10.10	77-83 / 71
		2	<i>Sorghum b. x s.</i>	HF	04.10.10	77-83 / 71
		3, 7	Mais	HF	23.09.10	77-83 / 85
		4	Hafermischung	HF	02.07.10	77-83 / 77
		5	Sommergerste	HF	02.07.10	77-83 / 77
2011	3	1, 3	Wintertriticale	HF	09.06.11	77-83 / 77
		2	Wintertriticale	HF	09.06.11	99 (MF) / 77 (GPS) **
		1	<i>Phacelia</i>	SZF	12.09.11	k. V. / k. A.
		3	Einj. Weidelgras	SZF	12.09.11	k. V. / 69
		4	Winterraps	HF	23.05.11	99 (MF) / 75 (GPS) **
		5	Luzerne-Klee gras	HF	1. Schnitt: 23.05.11 2. Schnitt: 04.08.11	k. V. / 61 k. V. / 57
		6	Landsb. Gemenge	WZF	11.05.11	k. V. / k. A.
		7	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	21.09.11	77-83 / 69-75
7	Kartoffel	HF	06.09.11	99 / 99		
8	Biogasröbe	HF	20.09.11	k. V. / 91		
2011	4	1	Mais	HF	12.09.11	77-83 / 85
		2, 3, 7	Grünroggen	WZF	11.05.11	k. V. / 55
		2	Mais	ZF	21.09.11	77-83 / 83

Jahr	Anlage	FF	Kulturart	FF-Stellung	Datum	BBCH-Vorgabe*/BBCH-IST
		3	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	13.10.11	77-83 / 69-73
		4	Wintertriticale	HF	09.06.11	77-83 / 77
		5	Luzerne-Klee gras	HF	1. Schnitt: 23.05.11 2. Schnitt: 04.08.11	k. V. / 61 k. V. / 59
		6	Winterraps	HF	23.05.11	77-83 / 75
		7	<i>Sorghum bicolor</i>	ZF	13.10.11	77-83 / 71-75
		8	Sonnenblume	HF	26.08.11	77-83 / 83
		1, 3	Wintertriticale	HF	18.06.12	77-83 / 77
		1	<i>Phacelia</i>	SZF	17.09.12	k. V. / 81-85
		2	Wintertriticale	HF	01.08.12	99 (MF) / 99 (MF)
		3	Einj. Weidel gras	SZF	17.09.12	k. V. / 88-89
		4	Winterraps	HF	20.07.12	99 (MF) / 99 (MF)
2012	4	5	Luzerne-Klee gras	HF	1. Schnitt: 24.05.12 2. Schnitt: 10.07.12 3. Schnitt: 17.09.12	k. V. / 61 k. V. / 61 k. V. / 73
		6	Landsb. Gemenge	WZF	24.05.12	k. V. / 59-61
		6	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	17.09.12	77-83 / 65-67
		7	Kartoffel	HF	04.09.12	99 / 99
		8	Biogasrübe***	HF	18.09.12***	k. V. / 89-91

FF = Fruchtfolge, HF = Hauptfrucht, ZF = Zweitfrucht, WZF = Winterzwischenfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht

* BBCH-Vorgabe zur Ernte bezieht sich auf Ganzpflanzennutzung einer Fruchtart (GPS) – wenn Bestand zur Körnernutzung geerntet wurde, wurde dies vermerkt (MF – Marktfruchtnutzung), k. V. = keine Vorgabe, k. A. = keine Angabe

** Wintertriticale (FF 2) und Winterraps (FF 4) konnten im Versuchsjahr 2011 abweichend vom Versuchsplan, in dem die Ernte als Marktfrucht vorgesehen war (BBCH 99), aus technischen Gründen nur als GPS geerntet werden

*** Weiterverarbeitung erfolgte erst am 03.12.12, Lagerung des Rübenkörpers ohne Blatt

Tabelle A6a: Pflanzenbauliche Maßnahmen und Versuchsbedingungen beim Anbau der Abschlussfrucht Winterroggen der acht erprobten Fruchtfolgen in Anlage 3, Versuchsjahr 2012

Fruchtfolge Versuchsbedingung	1	2	3	4	5	6	7	8
Bodenbearbeitung 23.09.11 26.09.11 04.10.11	scheiben pflügen 2 x grubbern							
N_{\min} [kg N/ha] nach Vorfrucht ¹⁾	10,2	6,3	7,5	7,7	9,0	18,1	7,1	13,2
Aussaattermin	14.10.11	14.10.11	14.10.11	14.10.11	14.10.11	14.10.11	14.10.11	14.10.11
Aussaatzstärke [Kö/m ²] ²⁾	250	250	250	250	250	250	250	250
Aufgang	30.10.11	30.10.11	30.10.11	30.10.11	30.10.11	30.10.11	30.10.11	30.10.11
N_{\min} [kg N/ha] zu Vegetationsbeginn ¹⁾	3,7	3,3	4,2	4,8	5,9	3,8	3,3	3,1
N-Düngung [kg N/ha] Piamon 33 S 1. Gabe: 14.03.12 2. Gabe: 28.03.12 3. Gabe: 10.05.12	120	120	48 36 36	120	120	120	120	120
Grunddüngung [kg/ha] Triple-Superphosphat (P) – 17.11.11 60er-Kali (K, Mg) – 17.11.11 Magnesiumkalk (Ca, Mg) – 06.03.12	30 100 15							
Pflanzenschutzmittel [l/ha] Herbizid Fenikan - 01.11.11 Wachstumsregler Moddus – 30.04.12 Fungizid Alto – 30.04.12	1,8 0,3 0,4							
Erntetermin	01.08.12	01.08.12	01.08.12	01.08.12	01.08.12	01.08.12	01.08.12	01.08.12
N_{\min} [kg N/ha] nach Ernte ¹⁾	11,7	10,5	11,5	11,5	11,6	8,9	5,9	5,9

¹⁾ – ²⁾ Erläuterungen siehe Tabelle A6b

Tabelle A6b: Pflanzenbauliche Maßnahmen und Versuchsbedingungen und erzielte beim Anbau der Abschlussfrucht Winterroggen der acht erprobten Fruchtfolgen in Anlage 4, Versuchsjahr 2013

Fruchtfolge Versuchsbedingung	1	2	3	4	5	6	7	8
Bodenbearbeitung 20.09.12 21.09.12 24.09.12	scheiben pflügen grubbern							
N _{min} [kg N/ha] nach Vorfrucht ¹⁾	13,7	22,6	9,9	13,4	13,9	9,0	8,2	7,8
Aussaattermin	27.09.12	27.09.12	27.09.12	27.09.12	27.09.12	27.09.12	27.09.12	27.09.12
Aussaatzstärke [Kö/m ²] ²⁾	250	250	250	250	250	250	250	250
Aufgang	07.10.12	07.10.12	07.10.12	07.10.12	07.10.12	07.10.12	07.10.12	07.10.12
N _{min} [kg N/ha] zu Vegetationsbeginn ¹⁾	6,4	4,9	4,4	8,0	13,7	6,2	5,1	5,1
N-Düngung [kg N/ha] Piamon 33 S 1. Gabe: 08.04.13 2. Gabe: 10.04.13 3. Gabe: 29.04.13	120	120	70 50	120	120	120	120	120
Grunddüngung [kg/ha]	----	----	----	----	----	----	----	----
Pflanzenschutzmittel [l/ha] Herbizid Fenikan - 11.10.12 Wachstumsregler Moddus – 03.05.13 Fungizid Proline – 30.04.12	1,8 0,3 0,8							
Erntetermin	01.08.13	01.08.13	01.08.13	01.08.13	01.08.13	01.08.13	01.08.13	01.08.13
N _{min} [kg N/ha] nach Ernte ¹⁾	33,3	35,9	42,4	45,8	44,2	41,6	35,1	30,2

¹⁾ N_{min}-Werte beziehen sich auf eine Bodentiefe von 0–30 cm

²⁾ Drillsaat mit Hege 80 PNI mit Kreiselegge

Tabelle A7: Annahmen aus der DLG-Futterwerttabelle für Wiederkäuer, frisches Erntegut (Universität Hohenheim 1997) zur Berechnung der Biogas- und Methanerträge für die im EVA-Projekt untersuchten Pflanzenarten, Versuchsjahre 2009–2012

Jahr	Anlage	FF	Kulturart	BBCH Ernte	DLG-Stadium	DLG-Verdaulichkeit (RP, RL, RF, NfE *) [%]
2009	3	1, 6, 8	Wintergerste	83	in Teigreife, Körneranteil = 33 %	46, 64, 51, 73
		1	<i>Sorghum b.</i>	55	volles Rispenschieben	62, 63, 66, 70
		2	<i>Sorghum b. x s.</i>	69-77	Mitte bis Ende der Blüte	53, 53, 64, 59
		3, 7	Mais	83	Beginn der Teigreife, Kolbenanteil = mittel, 35-45 %	58, 72, 61, 79
		4	Hafermischung	77	in der Teigreife, Körneranteil = 33 %	60, 66, 59, 65
		5	Sommergerste	75	1. Aufwuchs, Beginn der Blüte	71, 66, 69, 65
		5	Luzerne (US)		1. Aufwuchs, Beginn der Blüte	80, 40, 53, 75
		5	Kleegrass (US)		1. Aufwuchs, Beginn der Blüte	66, 45, 69, 76
2010	3	8	Gelbsenf	69	Ende der Blüte	78, 67, 65, 77
		1, 2	Mais	85	Ende der Teigreife, Kolbenanteil mittel = 45-55 %	54, 80, 62, 78
		2, 3, 7	Grünroggen	55	volles Ährenschieben	76, 69, 79, 76
		3	<i>Sorghum b. x s.</i>	71	in bis Ende der Blüte	53, 53, 64, 59
		4	Wintertriticale	75	in der Teigreife, Körneranteil = 33 %	67, 65, 68, 70
		5	Luzerne I	51	1. Aufwuchs, Beginn der Blüte	80, 40, 53, 75
		5	Kleegrass I	51	1. Aufwuchs, Beginn der Blüte	66, 45, 69, 76
		5	Luzerne II	51	2. Aufwuchs, Beginn der Blüte	80, 38, 49, 73
2010	4	5	Kleegrass II	51	2. Aufwuchs, Beginn der Blüte	67, 64, 59, 72
		6	Winterraps	85	Ende der Blüte	73, 62, 58, 75
		7	<i>Sorghum b.</i>	71	in bis Ende der Blüte	53, 53, 64, 59
		8	Sonnenblume	83	Ende der Blüte	58, 61, 52, 78
		1, 6, 8	Wintergerste	75	in der Teigreife, Körneranteil = 33 %	46, 64, 51, 73
		1	<i>Sorghum b.</i>	71	in bis Ende der Blüte	53, 53, 64, 59
		2	<i>Sorghum b. x s.</i>	71	in bis Ende der Blüte	53, 53, 64, 59
		3, 7	Mais	85	Ende der Teigreife, Kolbenanteil mittel = 45-55 %	54, 80, 62, 78
2011	3	4	Hafermischung	77	in der Teigreife	60, 66, 59, 65
		5	Sommergerste	77	in der Teigreife, Körneranteil = 33 %	46, 64, 51, 73
		5	Luzerne (US)	55	1. Aufwuchs, Beginn der Blüte	80, 40, 53, 75
		5	Kleegrass (US)	55	1. Aufwuchs, Beginn der Blüte	66, 45, 69, 76
		1, 2, 3	Wintertriticale	77	in der Teigreife, Körneranteil ca. 33 %	67, 65, 68, 70
		3	Einj. Weidelgras	69	Mitte bis Ende der Blüte	65, 61, 75, 75
		4	Winterraps	75	Ende der Blüte	73, 62, 58, 75
		5	Luzerne I	61	2. und folgende Aufwüchse	80, 38, 49, 73
2011	4	5	Kleegrass I	61	Beginn der Blüte	67, 64, 59, 72
		5	Luzerne II	57	2. und folgende Aufwüchse	80, 38, 49, 73
		5	Kleegrass II	57	Beginn der Blüte	67, 64, 59, 72
		6	Landsb. Gem.	61	alle Aufwüchse, in Blüte	70, 61, 65, 76
		6	<i>S. b. x s.</i>	75	in bis Ende der Blüte	53, 53, 64, 59
		7	Kartoffel	99	Roh	72, 0, 90, 96
		8	Biogassrübe	91	Massenrübe, verschmutzt	71, 0, 68, 95
		2011	4	1	Mais	85
2, 3, 7	Grünroggen			55	volles Ährenschieben	76, 69, 79, 76
2	Mais			83	Beginn der Teigreife, Kolbenanteil mittel, 35-45 %	58, 72, 61, 79
3	<i>S. b. x s.</i>			73	in bis Ende der Blüte	53, 53, 64, 59
4	Wintertriticale			77	in der Teigreife, Körneranteil ca. 33 %	67, 65, 68, 70
5	Luzerne I			61	2. und folgende Aufwüchse, Beginn der Blüte	80, 38, 49, 73
5	Kleegrass I			61	Beginn der Blüte	67, 64, 59, 72
5	Luzerne II			59	2. und folgende Aufwüchse	80, 38, 49, 73
2012	4	5	Kleegrass II	59	Beginn der Blüte	67, 64, 59, 72
		6	Winterraps	75	Ende der Blüte	73, 62, 58, 75
		7	<i>S. bicolor</i>	75	in bis Ende der Blüte	53, 53, 64, 59
		8	Sonnenblume	83	Ende der Blüte	58, 61, 52, 78
		1, 3	Wintertriticale	77	in der Teigreife, Körneranteil ca. 33 %	67, 65, 68, 70
		3	Einj. Weidelgras	79-89	1. Aufwuchs, nach der Blüte	66, 45, 59, 57
		5	Luzerne I	61	1. Aufwuchs, Beginn der Blüte	80, 40, 53, 75
		5	Kleegrass I	61	1. Aufwuchs, Beginn der Blüte	66, 45, 69, 76
2012	4	5	Luzerne II	61	2. und folgende Aufwüchse, Beginn der Blüte	80, 38, 49, 73
		5	Kleegrass II	61	2. und folgende Aufwüchse, Beginn der Blüte	67, 64, 59, 72
		5	Luzerne III	57	2. und folgende Aufwüchse, Beginn der Blüte	80, 38, 49, 73
		5	Kleegrass III	57	2. und folgende Aufwüchse, Beginn der Blüte	67, 64, 59, 72
		6	Landsb. Gem.	59-61	vor der Blüte	64, 57, 76, 78

Jahr	Anlage	FF	Kulturart	BBCH Ernte	DLG-Stadium	DLG-Verdaulichkeit (RP, RL, RF, NfE *) [%]
		6	S. b. x s.	51-55	Beginn Rispenschieben	75, 60, 76, 71
		7	Kartoffel	99	Knolle	72, 0, 90, 96
		8	Biogaserübe	49	Zuckerrübe, Rübe verschmutzt	50, 0, 52, 95

* RP = Rohprotein, RL = Rohlipid/Rohfett, RF = Rohfaser, NfE = N-freie Extraktstoffe/Nichtfaserkohlenhydrate

Tabelle A8: „ATB-Biogasmatrix“ mit Richtwerten für Methanausbeuten von Silagen der für Trossin relevanten Fruchtarten des EVA-Projektes als Relativwerte [%] in Bezug zu Mais und Angabe des Methangehaltes [Vol-%] zur Berechnung der Biogasausbeute [l/kg_{OTS}]. Keine Berücksichtigung von Silierverlusten. Durchführung der Batch-Versuche und Aufstellung der Matrix von HERRMANN et al. (2013) ATB Potsdam-Bornim, EVA-Teilprojekt 4, Stand: 07.12.2012

Fruchtart	BBCH	n ausgewertet (Anzahl)	oTS-CH ₄ -Ausbeute [% bezogen auf Mais HF]	CH ₄ -Gehalt [Vol-%]	Mittlerer Aschegehalt [% TM]
Mais – HF	81-87	62	100	55,2	4,3
Mais - ZF	81-87	17	101	55,3	4,5
<hr/>					
S. b. x s., gute Entwicklung (TS > 22 %)	69-85	38	88	56,5	5,4
Sorghum b. x s., späte Abreife (TS < 22 %)	33-75	18	95	57,8	7,4
Sorghum b., gute Entwicklung (TS > 22 %)	69-85	10	88	56,2	5,2
Sorghum b., späte Abreife (TS < 22 %)	33-75	11	93	56,5	7,2
<hr/>					
Sommergerste	71-85	8	96	55,8	6,0
Hafer	71-85	16	92	56,9	7,2
Wintergerste	71-85	23	98	56,4	6,6
Wintertriticale	71-85	26	96	55,3	5,5
<hr/>					
Grünroggen - WZF	bis 59	23	104	58,0	8,3
Landsberger Gemenge - WZF	61	1	90	57,3	9,6
Einj. Weidelgras - SZF	51-69	8	87	58,1	10,7
<hr/>					
Raps	65-85	5	82	59,3	8,9
Sonnenblume	71-87	10	75	56,5	12,5
Luzerne-Klee gras, 1. Schnitt spät ¹⁾	59-61	6	92	60,2	11,3
Luzerne-Klee gras, Folgeschnitte spät ¹⁾	59-61	15	86	59,3	12,1

¹⁾ niedrige Schnitffrequenz (2–3 Schnitte pro Jahr)

Tabelle A9a: Frischmasseerträge [dt FM/ha] der einzelnen Fruchtfolgeglieder der Anbausysteme 1-8 am Standort Trossin, Anlage 3, Versuchsjahre 2009–2012

Fruchtfolge	Wiederholung	Erntejahr, FF-Stellung, Nutzung, Fruchtart Frischmasse in dt/ha						
1		2009 HF, GPS Wintergerste	2009 SZF, GPS <i>Sorghum bicolor</i>	2010 HF, GPS Mais	2011 HF, GPS Wintertriticale	2011 SZF, GD <i>Phacelia</i>	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen
	a	208,3	292,2	420,8	128,3	174,8	65,9	23,3
	b	209,4	281,4	348,4	111,6	133,5	67,1	25,0
	c	184,4	284,1	380,8	106,3	99,6	59,8	18,9
	d	206,1	305,6	405,7	115,4	163,8	65,3	25,6
		<u>202,1</u>	<u>290,8</u>	<u>388,9</u>	<u>115,4</u>	<u>142,9</u>	<u>64,5</u>	<u>23,2</u>
2		2009 HF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2010 WZF, GPS Grünroggen	2010 ZF, GPS Mais	2011 HF, GPS Wintertriticale	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen	
	a	569,4	322,7	383,5	151,7	68,3	28,3	
	b	546,6	281,3	329,2	122,3	66,3	13,3	
	c	527,9	282,9	346,7	110,9	64,4	33,9	
	d	566,4	294,3	420,0	132,9	70,7	30,6	
		<u>552,6</u>	<u>295,3</u>	<u>369,9</u>	<u>129,5</u>	<u>67,4</u>	<u>26,5</u>	
3		2009 HF, GPS Mais	2010 WZF, GPS Grünroggen	2010 ZF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2011 HF, GPS Wintertriticale	2011 SZF, GPS Einj. Weidelgras	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen
	a	472,8	301,8	394,4	127,9	105,4	58,3	14,4
	b	464,4	291,8	371,8	96,6	79,3	66,0	17,8
	c	444,4	277,9	379,2	82,3	82,2	60,8	19,4
	d	484,4	307,7	427,4	132,4	107,6	69,2	24,4
		<u>466,5</u>	<u>294,8</u>	<u>393,2</u>	<u>109,8</u>	<u>93,6</u>	<u>63,6</u>	<u>19,0</u>
4		2009 HF, GPS Hafermischung	2010 HF, GPS Wintertriticale	2011 HF, GPS Winterraps	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen		
	a	283,9	252,6	176,8	69,3	32,8		
	b	201,7	223,1	120,4	64,8	21,1		
	c	212,8	252,9	156,3	67,4	27,8		
	d	222,2	257,3	159,3	72,6	30,0		
		<u>218,9</u>	<u>246,5</u>	<u>153,2</u>	<u>68,5</u>	<u>27,9</u>		
5		2009 HF, GPS Sommergerste + US	2010 HF, GPS Luzerne-Klee gras I	2010 HF, GPS Luzerne-Klee gras II	2011 HF, GPS Luzerne-Klee gras I	2011 HF, GPS Luzerne-Klee gras II	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen
	a	173,3	90,3	172,2	151,3	296,1	66,7	23,9
	b	166,7	40,0	222,2	85,1	152,5	56,2	12,8
	c	128,9	29,2	294,4	131,4	290,6	59,5	20,6
	d	183,3	78,4	377,8	165,9	245,0	64,9	27,2
		<u>163,1</u>	<u>59,5</u>	<u>266,7</u>	<u>133,5</u>	<u>246,0</u>	<u>61,8</u>	<u>21,1</u>

Fruchtfolge	Wiederholung	Erntejahr, FF-Stellung, Nutzung, Fruchtart Frischmasse in dt/ha						
6		2009 HF, GPS Wintergerste	2010 HF, GPS Winterraps	2011 WZF, GPS Landsb. Gemenge	2011 ZF, GPS Sorghum b. x s.	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen	
	a	222,2	336,7	175,2	456,4	70,6	32,8	
	b	200,6	281,2	134,1	439,8	63,6	26,7	
	c	232,2	307,7	184,7	364,1	65,3	31,7	
	d	226,1	297,3	193,6	440,3	67,8	25,0	
		<u>220,3</u>	<u>305,7</u>	<u>171,9</u>	<u>425,2</u>	<u>66,8</u>	<u>29,0</u>	
7		2009 HF, GPS Mais	2010 WZF, GPS Grünroggen	2010 ZF, GPS Sorghum bicolor	2011 HF, GPS Kartoffeln	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen	
	a	502,2	250,7	478,1	570,6	70,3	31,1	
	b	481,1	220,7	407,4	545,6	63,2	20,0	
	c	441,7	214,8	450,6	551,7	64,7	26,1	
	d	483,3	224,7	483,1	519,4	66,6	33,9	
		<u>477,1</u>	<u>227,7</u>	<u>454,8</u>	<u>546,8</u>	<u>66,2</u>	<u>27,8</u>	
8		2009 HF, GPS Wintergerste	2009 SZF, GD Gelbsenf	2010 HF, GPS Sonnenblume	2010 SZF, GD Phacelia	2011 HF, GPS Biogasrübe	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen
	a	226,1	68,3	448,3	----	901,0	68,7	33,9
	b	198,3	61,1	356,7	----	1037,4	65,3	22,2
	c	221,7	70,3	405,0	----	1022,0	65,3	24,4
	d	226,7	65,6	397,2	----	1019,5	67,2	27,2
		<u>218,2</u>	<u>66,3</u>	<u>401,8</u>	<u>----</u>	<u>995,0</u>	<u>66,6</u>	<u>26,9</u>

Tabelle A9b: Frischmasseerträge [dt FM/ha] der einzelnen Fruchtfolgeglieder der Anbausysteme 1-8 am Standort Trossin, Anlage 4, Versuchsjahre 2010–2013

Fruchtfolge	Wiederholung	Erntejahr, FF-Stellung, Nutzung, Fruchtart Frischmasse in dt/ha							
1	a	2010 HF, GPS Wintergerste	2010 SZF, GPS <i>Sorghum bicolor</i>	2011 HF, GPS Mais	2012 HF, GPS Wintertriticale	2012 SZF, GD <i>Phacelia</i>	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen	
		b	195,4	422,4	577,3	189,4	29,4	52,0	28,3
		c	211,2	466,7	550,8	169,1	28,3	69,7	36,7
		d	210,7	445,7	554,3	181,7	18,3	50,5	24,4
			209,7	339,2	575,9	195,1	28,9	67,9	32,8
		206,8	418,5	564,6	183,8	26,3	60,0	30,6	
2	a	2010 HF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2011 WZF, GPS Grünroggen	2011 ZF, GPS Mais	2012 HF, Korn Wintertriticale	2012 HF, Stroh Wintertriticale	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen	
		b	400,1	123,6	525,7	51,2	37,5	61,9	33,3
		c	354,7	118,3	338,8	51,8	42,8	68,4	41,7
		d	369,1	117,1	490,6	49,8	44,1	54,3	31,1
			421,0	135,6	454,0	50,7	34,9	59,1	38,3
		386,2	123,7	452,3	50,9	39,8	60,9	36,1	
3	a	2010 HF, GPS Mais	2011 WZF, GPS Grünroggen	2011 ZF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2012 HF, GPS Wintertriticale	2012 SZF, GPS Einj. Weidelgras	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen	
		b	421,3	149,2	338,3	183,9	21,1	68,0	39,4
		c	297,0	121,6	285,8	167,2	11,7	61,5	34,4
		d	305,8	129,4	363,6	174,7	12,2	51,6	34,4
			406,3	149,6	328,1	209,2	18,9	48,9	35,6
		357,6	137,4	329,0	183,8	16,0	57,5	36,0	
4	a	2010 HF, GPS Hafermischung	2011 HF, GPS Wintertriticale	2012 HF, Korn Winterraps	2012 HF, Stroh Winterraps	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen		
		b	104,8	92,6	31,7	70,4	67,5	39,4	
		c	93,8	74,2	28,1	72,3	71,2	41,7	
		d	136,4	130,4	33,2	77,5	46,5	40,6	
			86,4	71,8	26,6	78,6	56,1	31,7	
		105,3	92,3	29,9	74,7	60,3	38,3		
5	a	2010 HF, GPS Sommergerste + US	2010 HF, GPS Luzerne-Kleegras (H)	2011 HF, GPS Luzerne-Kleegras I	2011 HF, GPS Luzerne-Kleegras II	2012 HF, GPS Luzerne-Kleegras I	2012 HF, GPS Luzerne-Kleegras II	2012 HF, GPS Lu-Kleegras III	
		b	111,3	72,2	123,6	229,4	241,7	111,1	18,9
		c	91,0	66,7	104,4	276,1	193,9	113,9	24,4
		d	110,7	77,8	114,1	234,4	207,2	98,9	8,3
			156,6	169,4	251,0	300,3	308,9	169,4	60,0
		117,4	96,5	148,3	260,1	237,9	123,3	27,9	

Fruchtfolge	Wiederholung	Erntejahr, FF-Stellung, Nutzung, Fruchtart Frischmasse in dt/ha						2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen
5	a								
	b						58,4	45,0	
	c						51,1	37,8	
	d						45,6	33,3	
							42,7	36,7	
						49,5	38,2		
6	a	2010 HF, GPS Wintergerste	2011 HF, GPS Winterraps	2012 WZF, GPS Landsb. Gemenge	2012 ZF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen		
	b	229,1	186,7	384,4	188,9	75,2	41,7		
	c	179,3	129,1	368,3	166,7	58,3	39,4		
	d	217,4	133,1	281,7	128,9	61,1	30,6		
		199,2	137,8	336,7	128,9	63,8	33,3		
	206,3	146,7	342,8	153,3	64,6	36,3			
7	a	2010 HF, GPS Mais	2011 WZF, GPS Grünroggen	2011 ZF, GPS <i>Sorghum bicolor</i>	2012 HF, GPS Kartoffeln	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen		
	b	427,3	175,4	434,8	380,0	73,8	41,1		
	c	322,7	127,4	321,2	400,6	74,1	42,8		
	d	356,5	151,8	405,9	424,4	50,7	29,4		
		343,1	140,9	389,9	417,8	57,4	33,3		
	362,4	148,9	388,0	405,7	64,0	36,7			
8	a	2010 HF, GPS Wintergerste	2010 SZF, GD Gelbsenf	2011 HF, GPS Sonnenblume	2011 SZF, GD <i>Phacelia</i>	2012 HF, Körper Biogasrübe	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen	
	b	233,7	----	500,0	----	401,1	77,4	42,8	
	c	188,8	----	547,6	----	525,6	63,7	35,6	
	d	184,7	----	503,4	----	291,7	52,5	25,0	
		199,7	----	506,4	----	353,3	53,4	34,4	
	201,7	----	514,3	----	392,9	61,7	34,4		

Tabelle A10a: Trockenmasseerträge [105 °C, dt TM/ha] der einzelnen Fruchtfolgeglieder der Anbausysteme 1-8 am Standort Trossin, Anlage 3, Versuchsjahre 2009–2012

Fruchtfolge	Wiederholung	Erntejahr, FF-Stellung, Nutzung, Fruchtart Trockenmasse in dt/ha (105 °C)							
1	a	2009 HF, GPS Wintergerste	2009 SZF, GPS <i>Sorghum bicolor</i>	2010 HF, GPS Mais	2011 HF, GPS Wintertriticale	2011 SZF, GD <i>Phacelia</i>	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen	
		69,1	70,2	129,3	53,0	29,4	56,9	20,8	
		b	71,5	66,7	93,4	46,8	26,2	58,1	22,7
		c	62,1	66,2	107,7	45,3	19,0	51,9	16,5
		d	68,9	71,5	114,7	48,6	30,2	56,2	21,5
67,7	68,7	111,3	48,4	26,2	55,7	20,4			
2	a	2009 HF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2010 WZF, GPS Grünroggen	2010 ZF, GPS Mais	2011 HF, GPS Wintertriticale	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen		
		139,3	60,1	101,7	61,6	58,9	24,8		
		b	130,8	53,9	84,8	50,4	57,5	11,7	
		c	126,6	52,4	85,3	45,5	55,7	28,5	
		d	138,3	51,9	110,0	55,7	61,0	27,3	
133,8	54,6	95,3	53,3	58,3	23,1				
3	a	2009 HF, GPS Mais	2010 WZF, GPS Grünroggen	2010 ZF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2011 HF, GPS Wintertriticale	2011 SZF, GPS Einj. Weidelgras	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen	
		149,8	52,9	114,4	52,0	29,2	50,2	12,5	
		b	143,4	53,2	105,6	40,5	23,1	57,2	15,6
		c	136,7	50,3	107,5	34,3	23,6	52,6	17,0
		d	151,6	54,7	123,0	55,3	28,7	59,6	21,4
145,4	52,8	112,6	45,5	26,2	54,9	16,6			
4	a	2009 HF, GPS Hafermischung	2010 HF, GPS Wintertriticale	2011 HF, GPS Winterraps	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen			
		76,8	94,1	35,6	60,3	28,1			
		b	63,0	86,9	24,5	56,2	18,8		
		c	72,2	91,1	30,7	58,6	24,5		
		d	73,6	93,6	30,2	62,9	26,2		
71,4	91,4	30,3	59,5	24,4					
5	a	2009 HF, GPS Sommergerste + US	2010 HF, GPS Luzerne-Klee gras I	2010 HF, GPS Luzerne-Klee gras II	2011 HF, GPS Luzerne-Klee gras I	2011 HF, GPS Luzerne-Klee gras II	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen	
		55,6	28,5	28,0	43,9	47,2	58,4	20,9	
		b	54,7	13,4	42,5	27,0	30,7	48,7	11,0
		c	43,0	8,9	44,7	36,3	57,5	51,6	18,4
		d	62,3	22,2	57,7	38,3	45,1	56,4	23,9
53,9	18,2	43,2	36,4	45,1	53,8	18,5			

Fruchtfolge	Wiederholung	Erntejahr, FF-Stellung, Nutzung, Fruchtart Trockenmasse in dt/ha (105 °C)						
6		2009 HF, GPS Wintergerste	2010 HF, GPS Winterraps	2011 WZF, GPS Landsb. Gemenge	2011 ZF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen	
	a	72,9	79,4	36,3	105,1	60,9	28,4	
	b	67,2	104,8	33,1	105,3	55,0	24,1	
	c	72,5	99,0	37,2	78,8	56,9	28,2	
	d	76,0	95,4	41,9	97,6	58,9	22,4	
		<u>72,2</u>	<u>94,7</u>	<u>37,1</u>	<u>96,7</u>	<u>57,9</u>	<u>25,8</u>	
7		2009 HF, GPS Mais	2010 WZF, GPS Grünroggen	2010 ZF, GPS <i>Sorghum bicolor</i>	2011 HF, GPS Kartoffeln	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen	
	a	169,6	45,0	96,4	105,5	61,0	27,2	
	b	164,3	41,9	82,7	103,0	55,3	17,5	
	c	153,8	41,1	88,2	100,4	56,2	23,0	
	d	166,6	41,7	97,9	98,4	57,8	29,7	
		<u>163,6</u>	<u>42,4</u>	<u>91,3</u>	<u>101,8</u>	<u>57,6</u>	<u>24,3</u>	
8		2009 HF, GPS Wintergerste	2009 SZF, GD Gelbsenf	2010 HF, GPS Sonnenblume	2010 SZF, GD <i>Phacelia</i>	2011 HF, GPS Biogasröbe	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen
	a	73,1	22,4	89,9	----	181,6	59,9	29,8
	b	65,7	19,9	72,7	----	218,7	57,1	19,3
	c	72,9	22,4	71,3	----	180,0	56,9	22,0
	d	74,6	19,6	68,7	----	191,0	58,5	24,2
		<u>71,6</u>	<u>21,1</u>	<u>75,7</u>	<u>----</u>	<u>192,8</u>	<u>58,1</u>	<u>23,8</u>

Tabelle A10b: Trockenmasseerträge [105 °C, dt TM/ha] der einzelnen Fruchtfolgeglieder der Anbausysteme 1-8 am Standort Trossin, Anlage 4, Versuchsjahre 2010–2013

Fruchtfolge	Wiederholung	Erntejahr, FF-Stellung, Nutzung, Fruchtart Trockenmasse in dt/ha (105 °C)						
1		2010 HF, GPS Wintergerste	2010 SZF, GPS <i>Sorghum bicolor</i>	2011 HF, GPS Mais	2012 HF, GPS Wintertriticale	2012 SZF, GD <i>Phacelia</i>	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen
	a	54,5	92,8	172,8	74,3	8,5	44,5	26,5
	b	63,4	97,1	181,8	65,6	10,6	58,9	34,4
	c	61,5	99,5	180,7	70,3	4,1	42,4	22,4
	d	62,4	68,5	191,4	77,0	8,8	57,5	30,1
		60,4	89,5	181,7	71,8	8,0	50,8	28,4
2		2010 HF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2011 WZF, GPS Grünroggen	2011 ZF, GPS Mais	2012 HF, Korn Wintertriticale	2012 HF, Stroh Wintertriticale	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen
	a	119,4	30,3	113,0	52,1	35,3	51,7	30,8
	b	105,0	30,7	65,0	48,8	40,2	57,9	38,7
	c	102,2	29,4	103,5	46,7	41,7	45,9	29,4
	d	122,1	28,6	95,2	47,5	33,7	50,4	36,2
		112,2	29,8	94,2	48,7	37,7	51,5	33,8
3		2010 HF, GPS Mais	2011 WZF, GPS Grünroggen	2011 ZF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2012 HF, GPS Wintertriticale	2012 SZF, GPS Einj. Weidelgras	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen
	a	124,1	36,7	88,1	72,1	8,3	56,8	37,0
	b	85,2	29,7	76,0	64,5	4,9	51,8	31,7
	c	91,0	31,6	99,8	67,4	4,5	44,0	32,8
	d	117,7	29,7	80,1	77,2	7,3	41,0	32,2
		104,5	31,9	86,0	70,3	6,3	48,4	33,4
4		2010 HF, GPS Hafermischung	2011 HF, GPS Wintertriticale	2012 HF, Korn Winterraps	2012 HF, Stroh Winterraps	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen	
	a	41,0	37,3	26,6	94,6	56,4	36,7	
	b	38,1	29,9	23,6	66,8	60,2	39,2	
	c	49,0	53,1	27,8	69,9	38,5	37,7	
	d	36,6	28,9	22,5	71,8	47,4	29,8	
		41,2	37,3	25,1	68,4	50,6	35,9	
5		2010 HF, GPS Sommergerste + US	2010 HF, GPS Luzerne-Klee gras (H)	2011 HF, GPS Luzerne-Klee gras I	2011 HF, GPS Luzerne-Klee gras II	2012 HF, GPS Luzerne-Klee gras I	2012 HF, GPS Luzerne-Klee gras II	2012 HF, GPS Lu-Klee gras III
	a	53,9	19,7	35,0	49,5	69,6	30,9	5,8
	b	38,7	16,0	30,3	57,5	57,6	34,1	7,7
	c	55,0	18,5	35,0	42,3	62,6	28,5	2,8
	d	62,6	40,2	54,5	66,9	74,1	39,3	20,2
		52,6	23,6	38,7	54,1	65,9	33,2	9,1

Fruchtfolge	Wiederholung	Erntejahr, FF-Stellung, Nutzung, Fruchtart Trockenmasse in dt/ha (105 °C)						
5	a						2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen
	b						47,2	42,7
	c						41,6	34,9
	d						39,0	30,9
							34,2	34,0
						40,5	35,6	
6	a	2010 HF, GPS Wintergerste	2011 HF, GPS Winterraps	2012 WZF, GPS Landsb. Gemenge	2012 ZF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen	
	b	62,5	35,6	89,6	48,2	61,1	40,1	
	c	47,5	24,5	70,4	45,8	48,4	37,0	
	d	60,4	25,8	77,7	33,8	52,4	28,8	
		59,4	29,9	78,1	30,7	53,9	31,5	
	57,4	28,9	78,9	39,6	54,5	34,3		
7	a	2010 HF, GPS Mais	2011 WZF, GPS Grünroggen	2011 ZF, GPS <i>Sorghum bicolor</i>	2012 HF, GPS Kartoffeln	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen	
	b	123,8	41,6	111,2	81,7	62,1	38,4	
	c	89,4	31,3	71,6	81,7	61,8	41,1	
	d	98,6	35,7	99,0	87,9	42,3	27,8	
		100,7	35,3	102,9	80,6	48,2	31,6	
	103,1	36,0	96,2	83,0	53,6	34,7		
8	a	2010 HF, GPS Wintergerste	2010 SZF, GD Gelbsenf	2011 HF, GPS Sonnenblume	2011 SZF, GD <i>Phacelia</i>	2012 HF, Körper Biogasrübe	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen
	b	68,1	----	90,5	----	119,9	65,2	40,3
	c	53,2	----	88,9	----	151,9	52,8	33,4
	d	55,8	----	87,3	----	63,9	44,3	23,6
		56,0	----	98,8	----	122,2	44,6	32,8
	58,3	----	91,4	----	114,5	51,7	32,5	

Tabelle A11a: Trockensubstanz-Gehalte [105 °C, %] der einzelnen Fruchtfolgeglieder der Anbausysteme 1-8 am Standort Trossin, Anlage 3, Versuchsjahre 2009–2012

Fruchtfolge	Wiederholung	Erntejahr, FF-Stellung, Nutzung, Fruchtart Trockensubstanz-Gehalt in % (105 °C)						
1	a	2009 HF, GPS	2009 SZF, GPS	2010 HF, GPS	2011 HF, GPS	2011 SZF, GD	2012 HF, Korn	2012 HF, Stroh
		Wintergerste	<i>Sorghum bicolor</i>	Mais	Wintertriticale	<i>Phacelia</i>	Winterroggen	Winterroggen
		33,1	24,0	30,7	41,3	16,8	86,3	89,3
		34,1	23,7	26,8	42,0	19,6	86,5	90,8
		33,7	23,3	28,3	42,6	19,1	86,7	87,1
2	a	2009 HF, GPS	2010 WZF, GPS	2010 ZF, GPS	2011 HF, GPS	2012 HF, Korn	2012 HF, Stroh	
		<i>Sorghum b. x s.</i>	Grünroggen	Mais	Wintertriticale	Winterroggen	Winterroggen	
		24,5	18,6	26,5	40,6	86,3	87,5	
		23,9	19,2	25,6	41,2	86,7	87,9	
		24,0	18,5	24,6	41,1	86,5	84,1	
3	a	2009 HF, GPS	2010 WZF, GPS	2010 ZF, GPS	2011 HF, GPS	2011 SZF, GPS	2012 HF, Korn	2012 HF, Stroh
		Mais	Grünroggen	<i>Sorghum b. x s.</i>	Wintertriticale	Einj. Weidelgras	Winterroggen	Winterroggen
		31,7	17,5	29,0	40,6	27,7	86,1	86,3
		30,9	18,2	28,4	41,9	29,2	86,7	87,5
		30,8	18,1	28,4	41,7	28,7	86,5	87,2
4	a	2009 HF, GPS	2010 HF, GPS	2011 HF, GPS	2012 HF, Korn	2012 HF, Stroh		
		Hafermischung	Wintertriticale	Winterraps	Winterroggen	Winterroggen		
		32,2	37,2	20,1	87,1	85,8		
		31,3	39,0	20,4	86,7	89,0		
		33,9	36,0	19,6	86,9	88,2		
5	a	2009 HF, GPS	2010 HF, GPS	2010 HF, GPS	2011 HF, GPS	2011 HF, GPS	2012 HF, Korn	2012 HF, Stroh
		Sommergerste + US	Luzerne-Klee gras I	Luzerne-Klee gras II	Luzerne-Klee gras I	Luzerne-Klee gras II 15,9	Winterroggen	Winterroggen
		32,1	31,5	16,3	29,0	20,2	87,5	87,6
		32,8	33,5	19,1	31,7	19,8	86,7	85,8
		33,4	30,3	15,2	27,6	18,4	86,9	87,9
	d	34,0	28,2	15,3	23,1	18,4	86,9	87,9
		<u>33,6</u>	<u>23,6</u>	<u>28,5</u>	<u>42,0</u>	<u>18,5</u>	<u>86,4</u>	<u>89,2</u>
		<u>24,2</u>	<u>18,5</u>	<u>25,7</u>	<u>41,2</u>	<u>86,5</u>	<u>87,2</u>	
		<u>31,1</u>	<u>17,9</u>	<u>28,6</u>	<u>41,5</u>	<u>28,1</u>	<u>86,4</u>	<u>87,1</u>
		<u>32,6</u>	<u>37,2</u>	<u>19,8</u>	<u>86,9</u>	<u>87,6</u>		
		<u>33,1</u>	<u>30,9</u>	<u>16,5</u>	<u>27,8</u>	<u>18,6</u>	<u>87,0</u>	<u>87,7</u>

Fruchtfolge	Wiederholung	Erntejahr, FF-Stellung, Nutzung, Fruchtart Trockensubstanz-Gehalt in % (105 °C)						
6		2009 HF, GPS Wintergerste	2010 HF, GPS Winterraps	2011 WZF, GPS Landsb. Gemenge	2011 ZF, GPS Sorghum b. x s.	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen	
	a	32,8	23,6	20,7	23,0	86,3	86,7	
	b	33,5	37,3	24,7	23,9	86,5	90,3	
	c	31,2	32,2	20,1	21,6	87,1	89,1	
	d	33,6	32,1	21,6	22,2	86,9	89,7	
		<u>32,9</u>	<u>31,3</u>	<u>21,8</u>	<u>22,7</u>	<u>86,7</u>	<u>89,0</u>	
7		2009 HF, GPS Mais	2010 WZF, GPS Grünroggen	2010 ZF, GPS Sorghum bicolor	2011 HF, GPS Kartoffeln	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen	
	a	33,8	17,9	20,2	18,5	86,7	87,3	
	b	34,1	19,0	20,3	18,9	87,4	87,5	
	c	34,8	19,1	19,6	18,2	86,9	87,9	
	d	34,5	18,6	20,3	18,9	86,9	87,7	
		<u>34,3</u>	<u>18,7</u>	<u>20,1</u>	<u>18,6</u>	<u>87,0</u>	<u>87,6</u>	
8		2009 HF, GPS Wintergerste	2009 SZF, GD Gelbsenf	2010 HF, GPS Sonnenblume	2010 SZF, GD Phacelia	2011 HF, GPS Biogasröbe	2012 HF, Korn Winterroggen	2012 HF, Stroh Winterroggen
	a	32,3	32,8	20,1	----	20,2	87,1	87,8
	b	33,1	32,5	20,4	----	21,1	87,4	86,8
	c	32,9	31,9	17,6	----	17,6	87,2	90,1
	d	32,9	29,8	17,3	----	18,7	87,1	88,9
		<u>32,8</u>	<u>31,8</u>	<u>18,8</u>	<u>----</u>	<u>19,4</u>	<u>87,2</u>	<u>88,4</u>

Tabelle A11b: Trockensubstanz-Gehalte [105 °C, %] der einzelnen Fruchtfolgeglieder der Anbausysteme 1-8 am Standort Trossin, Anlage 4, Versuchsjahre 2010–2012

Fruchtfolge	Wiederholung	Erntejahr, FF-Stellung, Nutzung, Fruchtart Trockensubstanz-Gehalt in % (105 °C)							
1	a	2010 HF, GPS Wintergerste	2010 SZF, GPS <i>Sorghum bicolor</i>	2011 HF, GPS Mais	2012 HF, GPS Wintertriticale	2012 SZF, GD <i>Phacelia</i>	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen	
		b	27,9	22,0	29,9	39,2	29,0	85,6	93,5
		c	30,0	20,8	33,0	38,8	37,5	84,5	93,9
		d	29,2	22,3	32,6	38,7	22,1	83,9	91,8
		29,7	20,2	33,2	39,5	30,6	84,7	91,8	
		29,2	21,3	32,2	39,1	29,8	84,7	92,7	
2	a	2010 HF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2011 WZF, GPS Grünroggen	2011 ZF, GPS Mais	2012 HF, Korn Wintertriticale	2012 HF, Stroh Wintertriticale	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen	
		b	29,8	24,5	21,5	93,9	94,1	83,5	92,4
		c	29,6	25,9	19,2	93,8	93,9	84,6	93,0
		d	27,7	25,1	21,1	93,8	94,6	84,5	94,4
		29,0	21,1	21,0	93,8	96,6	85,4	94,5	
	29,0	24,2	20,7	93,8	94,7	84,5	93,6		
3	a	2010 HF, GPS Mais	2011 WZF, GPS Grünroggen	2011 ZF, GPS <i>Sorghum b. x s.</i>	2012 HF, GPS Wintertriticale	2012 SZF, GPS Einj. Weidelgras	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen	
		b	29,5	24,6	26,0	39,2	39,3	83,5	93,8
		c	28,7	24,4	26,6	38,6	41,9	84,2	92,1
		d	29,8	24,5	27,4	38,6	37,1	85,3	95,1
		29,0	19,8	24,4	36,9	38,8	83,8	90,5	
	29,2	23,3	26,1	38,3	39,3	84,2	92,9		
4	a	2010 HF, GPS Hafermischung	2011 HF, GPS Wintertriticale	2012 HF, Korn Winterraps	2012 HF, Stroh Winterraps	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen		
		b	39,1	40,3	83,9	92,2	83,5	93,0	
		c	40,7	40,4	84,2	92,4	84,6	94,1	
		d	36,0	40,7	83,7	90,2	82,9	93,0	
		42,4	40,3	84,6	91,3	84,5	94,2	93,6	
	39,5	40,4	84,1	91,6	83,9	93,6			
5	a	2010 HF, GPS Sommergerste + US	2010 HF, GPS Luzerne-Klee gras (H)	2011 HF, GPS Luzerne-Klee gras I	2011 HF, GPS Luzerne-Klee gras II	2012 HF, GPS Luzerne-Klee gras I	2012 HF, GPS Luzerne-Klee gras II	2012 HF, GPS Lu-Klee gras III	
		b	48,4	27,2	28,4	21,6	28,8	27,8	30,7
		c	42,6	24,1	29,0	20,8	29,7	29,9	31,5
		d	49,7	23,8	30,7	18,1	30,0	28,8	34,0
		40,0	23,7	21,7	22,3	24,0	23,2	33,7	
	45,1	24,7	27,4	20,7	28,1	27,4	32,5		

Fruchtfolge	Wiederholung	Erntejahr, FF-Stellung, Nutzung, Fruchtart Trockensubstanz-Gehalt in % (105 °C)						
5	a						2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen
	b						80,9	94,9
	c						81,4	92,4
	d						85,6	92,6
							80,1	92,7
						<u>82,0</u>	<u>93,2</u>	
6	a	2010 HF, GPS Wintergerste	2011 HF, GPS Winterraps	2012 WZF, GPS Landsb. Gemenge	2012 ZF, GPS Sorghum b. x s.	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen	
	b	27,3	19,1	23,3	25,5	83,9	96,1	
	c	26,5	19,0	19,1	27,5	82,9	93,7	
	d	27,8	19,3	27,6	26,2	85,8	94,2	
		29,8	21,7	23,2	23,8	84,5	94,6	
	<u>27,8</u>	<u>19,8</u>	<u>23,3</u>	<u>25,8</u>	<u>84,3</u>	<u>94,7</u>		
7	a	2010 HF, GPS Mais	2011 WZF, GPS Grünroggen	2011 ZF, GPS Sorghum bicolor	2012 HF, GPS Kartoffeln	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen	
	b	29,0	23,7	25,6	21,5	84,1	93,4	
	c	27,7	24,6	22,3	20,4	83,4	96,0	
	d	27,6	23,5	24,4	20,7	83,3	94,3	
		29,3	25,1	26,4	19,3	83,9	94,9	
	<u>28,4</u>	<u>24,2</u>	<u>24,7</u>	<u>20,5</u>	<u>83,7</u>	<u>94,6</u>		
8	a	2010 HF, GPS Wintergerste	2010 SZF, GD Gelbsenf	2011 HF, GPS Sonnenblume	2011 SZF, GD Phacelia	2012 HF, GPS Biogasrübe *	2013 HF, Korn Winterroggen	2013 HF, Stroh Winterroggen
	b	29,1	----	18,1	----	29,9	84,2	94,3
	c	28,2	----	16,2	----	28,9	83,0	94,0
	d	30,2	----	17,3	----	21,9	84,4	94,4
		28,1	----	19,5	----	34,6	83,6	95,2
	<u>28,9</u>	<u>----</u>	<u>17,8</u>	<u>----</u>	<u>28,8</u>	<u>83,8</u>	<u>94,5</u>	

* 10-wöchige Lagerung der unzerkleinerten Biogasrübe (ohne Blätter) nach Ernte

Tabelle A12: Inhaltsstoffcharakteristik [% in TM, Mittelwert aus 4 Proben/Parzellen] und die nach BASERGA [FNR 2005] berechneten theoretischen Biogas- und Methanausbeuten [l/kg oTS] sowie die Gashektarerträge [m³/ha] und Methangehalte [Vol %] der untersuchten Kulturarten, sortiert nach den 8 geprüften Anbausystemen, Anlage 3 und 4, Versuchsstandort Trossin, Versuchsjahre 2009–2012 (*Phacelia*, Gelbsenf = Gründüngung, keine Berechnung von Gasausbeuten erfolgt)

FF	Jahr	Fruchtart (BBCH zur Ernte)	Org. TS	Roh- asche	Roh- protein	Rohfett	Rohfaser	N-freie Extrakt- stoffe	NDF ¹⁾	ADF ²⁾	ADL ³⁾	Zucker _{ges.} /Stärke	Biogas- gasaus- aus- beute	CH ₄ - Aus- beute	Biogas- Ertrag	CH ₄ - Ertrag	CH ₄ - Gehalt
			[%]	[% in Trockenmasse]										[l/kg oTS]	[m ³ /ha]	[Vol %]	
	2009	Wintergerste (83)	95,9	4,09	8,43	1,94	22,99	62,56	50,81	23,46	3,55	14,15/13,62	489,7	264,9	3189,9	1726,1	54,1
	2009	<i>S. bicolor</i> , SZF (55)	95,0	5,02	5,95	1,56	34,26	53,22	70,08	37,72	5,13	11,53/0,00	509,4	274,6	3322,5	1791,0	53,9
	2010	Mais (85)	96,0	3,97	8,39	3,33	16,66	67,65	42,59	20,97	2,86	7,90/31,77	554,9	303,1	5929,4	3238,7	54,6
	2011	Wintertriticale (77)	95,8	4,21	8,76	2,58	24,33	60,12	51,47	25,96	4,62	19,86/2,35	519,1	284,2	2407,1	1317,6	54,7
	2011	<i>Phacelia</i> , SZF (65)		13,85	10,74	2,97	28,74	43,70	51,11	40,55	9,96	k. A./4,56					
1	2010	WiGerste (75)	95,7	4,27	7,23	1,34	34,53	52,63	62,79	34,02	5,06	19,25/0,00	463,6	249,7	2678,8	1443,0	53,9
	2010	<i>S. bicolor</i> , SZF (71)	95,0	4,98	8,15	1,55	29,67	55,65	61,97	33,39	5,04	19,82/0,00	449,7	244,0	3824,0	2074,7	54,3
	2011	Mais (85)	95,6	4,40	7,34	3,03	20,38	64,86	41,26	23,41	1,98	5,95/28,96	547,9	298,2	9516,7	5179,5	54,4
	2012	Wintertriticale (77)	97,0	3,01	6,97	1,79	20,03	68,21	42,70	21,03	3,55	15,10/11,48	519,3	281,3	3616,6	1959,2	54,2
	2012	<i>Phacelia</i> , SZF (67-69)	96,9	13,95	13,27	4,28	24,38	44,13	44,50	28,93	6,54	3,43/0,00					

FF	Jahr	Fruchtart (BBCH zur Ernte)	Org. TS	Roh- asche	Roh- protein	Rohfett	Rohfaser	N-freie Extrakt- stoffe	NDF ¹⁾	ADF ²⁾	ADL ³⁾	Zucker _{ges.} /Stärke	Biogas- gasaus- aus- beute	CH ₄ - Aus- beute	Biogaser- gaser- trag	CH ₄ - Ertrag	CH ₄ - Gehalt
			[%]	[% in der Trockenmasse]									[l/kg oTS]	[m ³ /ha]	[Vol %]		
2009		<i>Sorghum b. x s.</i> (69-77)	95,0	4,99	10,67	1,88	32,21	50,25	65,33	37,15	5,55	11,69/0,00	445,4	244,8	5659,1	3109,9	55,0
2010		Grünroggen, WZF (55)	94,7	5,28	9,83	1,84	41,61	41,44	69,72	39,62	5,84	9,20/0,00	575,6	315,2	2976,5	1629,8	54,8
2010		Mais, ZF (85)	95,7	4,34	8,66	2,87	20,04	64,10	45,12	22,86	2,59	6,87/26,94	548,0	298,9	4997,9	2726,2	54,6
2011		Wintertriticale (77)	96,2	3,85	8,40	2,56	24,46	60,73	51,29	26,14	3,69	20,34/2,81	519,6	283,3	2659,3	1453,2	54,7
2010		<i>Sorghum b. x s.</i> (71)	95,9	4,14	6,94	1,41	35,31	52,20	68,75	38,84	5,97	12,28/0,00	501,3	269,7	5393,7	2902,4	53,8
2011		Grünroggen, WZF (55)	94,6	5,44	11,79	2,31	31,62	48,83	60,62	32,99	4,71	13,42/0,00	572,9	316,5	1614,4	891,9	55,3
2011		Mais, ZF (83)	96,2	3,80	6,57	1,57	26,53	61,54	53,05	29,07	2,24	11,48/10,99	544,2	293,3	4931,7	2657,5	53,9
2012		Wintertriticale, Korn (99)			11,60	1,68						k. A./67,20					

FF	Jahr	Fruchtart (BBCH zur Ernte)	Org. TS	Roh- asche	Roh- protein	Rohfett	Rohfaser	N-freie Extrakt- stoffe	NDF ¹⁾	ADF ²⁾	ADL ³⁾	Zucker _{ges.} /Stärke	Biogas- ausbeute	CH ₄ - Aus- beute	Biogas- ertrag	CH ₄ - Ertrag	CH ₄ - Gehalt
			[%]	[% in der Trockenmasse]								[l/kg oTS]	[m ³ /ha]	[Vol %]			
	2009	SoGerste + US (75)	91,8	8,25	11,63	2,80	28,82	48,50	65,52	31,42	5,44	2,98/14,49	514,3	282,6	2544,6	1398,3	54,8
	2010	Luzerne-Klee gras I (51)	93,1	6,81	9,41	2,62	29,25	51,92	53,52	33,66	5,83	11,71/0,00	521,0	300,7	896,8	529,1	57,6
	2010	Luzerne-Klee gras II (51)	88,0	12,02	12,41	3,12	29,58	42,87	58,55	33,70	7,01	6,55/0,00	588,8	273,8	1877,3	1050,3	56,0
	2011	Luzerne-Klee gras I (61)	93,1	6,93	11,15	2,75	30,08	49,09	58,69	33,60	4,71	10,02/0,00	493,8	273,0	1673,3	925,2	55,4
	2011	Luzerne-Klee gras II (59)	91,4	8,65	13,02	2,65	31,16	44,51	57,52	34,33	4,67	k. A./0,00	491,1	330,3	2026,1	1361,6	63,4
5	2010	SoGerste + US (77)	95,4	4,56	8,49	2,76	26,79	57,41	54,85	27,91	3,53	8,50/18,96	514,3	280,3	2544,1	1384,6	54,5
	2011	Luzerne-Klee gras I (61)	92,8	7,23	12,12	2,66	32,54	45,46	57,73	35,55	4,80	8,03/0,00	401,5	256,8	1651,8	922,0	56,3
	2011	Luzerne-Klee gras II (59)	90,1	9,89	15,16	2,59	31,93	40,42	56,94	36,21	5,82	k. A./0,00	482,8	272,2	2353,0	1327,0	56,5
	012	Luzerne-Klee gras I (61)	92,3	7,66	14,44	2,61	30,83	44,47	57,18	34,75	5,63	5,61/0,00	520,9	290,1	3169,9	1765,4	55,7
	2012	Luzerne-Klee gras II (61)	88,2	11,84	13,69	3,21	26,95	44,31	50,80	32,73	3,83	5,44/0,00	496,4	279,0	970,9	816,6	56,2
	2012	Luzerne-Klee gras III (57)	92,1	7,86	16,16	3,21	27,23	45,56	44,93	27,55	6,03	6,09/0,00	495,8	280,4	447,7	253,2	56,6
	2009	WiGerste (83)	95,9	4,18	8,51	1,63	23,95	61,73	52,86	25,38	3,84	13,37/12,38	514,3	282,6	2544,6	1398,3	54,8
	2010	Winterraps (85)	92,4	7,63	10,94	16,90	33,47	31,05	49,61	36,66	7,75	1,90/4,04	537,9	316,6	4706,5	2770,2	58,9
	2011	Landsb. Gem., WZF (61)	91,6	8,41	19,11	2,83	25,56	44,09	49,95	29,17	3,97	13,50/0,00	526,6	299,3	1789,3	1016,9	56,8
	2011	<i>Sorghum b. x s.</i> , ZF (75)	94,8	5,19	9,88	0,93	43,37	40,63	75,46	43,05	7,31	3,74/0,00	450,9	245,0	4133,7	2245,6	54,3
6	2010	Wintergerste (75)	95,5	4,46	7,85	1,32	33,08	53,30	65,16	30,97	5,29	16,98/0,00	472,6	254,8	2590,5	1396,8	53,9
	2011	Winterraps (75)	90,8	9,22	12,26	2,46	36,08	39,97	51,65	40,16	6,65	5,67/6,36	503,4	312,4	1321,0	819,7	62,1
	2012	Landsb. Gemenge (59)	92,1	7,90	16,00	2,27	29,00	44,84	50,55	31,98	5,89	8,06/0,00	553,6	308,2	4023,1	2239,7	55,7
	2012	<i>Sorghum b. x s.</i> , ZF (55)	95,6	4,36	11,19	1,36	27,00	56,10	59,45	26,60	3,94	13,90/0,00	539,9	296,6	2044,8	1123,3	54,9

FF	Jahr	Fruchtart (BBCH zur Ernte)	Org. TS	Roh- asche	Roh- protein	Rohfett	Rohfaser	N-freie Extrakt- stoffe	NDF ¹⁾	ADF ²⁾	ADL ³⁾	Zucker _{ges.} /Stärke	Biogas- ausbeute	CH ₄ - Aus- beute	Biogas- ertrag	CH ₄ - Ertrag	CH ₄ - Gehalt
			[%]	[% in der Trockenmasse]							[l/kg oTS]	[m ³ /ha]	[Vol %]				
7	2009	Mais (83)	96,5	3,53	7,49	2,43	25,91	60,64	59,38	28,68	3,68	4,44/23,04	544,8	290,5	8599,7	4586,3	53,3
	2010	Grünroggen, WZF (55)	95,1	4,88	8,96	1,97	35,70	48,49	62,82	37,85	5,17	14,93/0,00	575,7	314,5	2321,3	1267,9	54,6
	2010	<i>S. bicolor</i> , ZF (71)	94,5	5,47	7,70	1,48	32,72	52,64	67,02	37,10	5,18	13,46/0,00	450,1	243,6	3883,2	2101,7	54,1
	2011	Kartoffel (99)	93,4	6,58	7,52	0,75	2,96	82,19	8,95	5,73	1,16	k. A./74,89	694,2	372,3	6600,8	3540,1	53,6
	2010	Mais (85)	95,9	4,08	8,60	3,43	33,69	50,21	42,80	20,77	3,33	7,36/30,98	530,6	290,1	5245,7	2868,1	54,7
	2011	Grünroggen, WZF (55)	94,2	5,78	11,88	2,21	33,87	46,27	63,19	33,04	4,86	13,32/0,00	583,2	323,9	1977,6	1098,2	55,5
	2011	<i>Sorghum b.</i> , ZF (75)	95,7	4,32	8,75	1,26	36,51	49,16	71,31	39,11	7,55	9,51/0,00	469,1	254,0	4318,4	2338,2	54,2
	2012	Kartoffel (99)	96,0	3,97	7,77	0,55	2,53	85,18	6,75	2,95	0,99	1,39/70,23	694,3	372,1	5533,9	2965,7	53,6
8	2009	WiGerste (83)	95,4	4,61	8,06	1,76	23,90	61,68	51,12	24,83	3,42	15,02/13,06	487,4	263,4	3369,2	1820,9	54,0
	2009	Gelbsenf (69)		7,32	12,05	4,89	38,30	37,44	57,63	41,73	7,44	3,05/4,21					
	2010	Sonnenblume (83)	89,0	11,04	10,29	14,42	25,43	38,82	43,29	31,89	6,45	8,34/0,69	521,4	302,5	3512,5	2037,6	58,0
	2011	Biogasrübe (91)	95,1	4,86	5,77	0,99	6,71	81,66	16,59	8,50	2,24	k. A./0,00	675,8	360,4	15675,0	8359,5	53,3
	2010	Wintergerste (75)	95,5	4,46	6,69	1,26	32,25	55,35	61,56	34,22	5,65	19,52/0,00	476,9	256,2	2655,2	1304,7	55,7
	2011	Sonnenblume (83)	83,6	16,43	8,73	14,96	24,00	35,87	42,44	38,70	7,64	4,97/0,00	524,7	305,4	3995,4	2325,4	58,2
	2012	Biogasrübe (49)	89,9	10,12	8,06	0,69	6,61	74,53	23,13	14,53	1,62	47,20/0,00	648,6	346,4	6675,4	3564,6	53,4

¹⁾ NDF = Neutrale-Detergentien-Fasern = Gesamtheit der Strukturkohlenhydrate (Cellulose, Hemicellulose, Lignin)

²⁾ ADF = Säure-(Acid)Detergentien-Fasern = Lignocellulose- Komplex

³⁾ ADL = Säure-(Acid)Detergentien-Lignin = Lignin

Tabelle A13: Auf Basis der ATB-Biogasmatrix (HERRMANN et al. 2013) ermittelten Gasausbeuten [l/kg oTS] und Hektarerträge [m³/ha] der am Standort Trossin erprobten Energiepflanzen der Versuchsjahre 2009–2012 unter Angabe der zur Berechnung benötigten Matrix- und Messwerte, Messungen durchgeführt vom ATB Potsdam-Bornim, Methodik siehe 2.3.4.2

FF	Jahr	Fruchtart (BBCH zur Ernte)	ATB- Mes- sung ¹⁾ ?	CH ₄ -Ausbeute Matrix-Wert	CH ₄ - Ausbeute Messwert	CH ₄ -Gehalt	CH ₄ -Ausbeute	Biogasaus- beute	oTS- Gehalt	TM-Ertrag	Methanertrag	Biogasertrag
				[% rel. zu Mais]	[l/kg oTS]	[Vol-%]	[l/kg oTS]	[l/kg oTS]	[% TS]	[dt TM/ha]	[m ³ /ha]	[m ³ /ha]
1	2009	Wintergerste (83)	ja		379,33	56,0	361,16	644,93	95,4	67,9	2340,5	4179,5
	2009	<i>S. bicolor</i> , SZF (55)	ja		335,77	55,2	319,69	579,15	92,7	68,7	2034,5	3685,6
	2010	Mais (85)	ja		385,90	54,7	367,42	671,70	95,7	111,3	3913,5	7154,6
	2011	Wintertriticale (77)	nein	96		55,3	324,48	589,97	94,5	48,4	1484,1	2698,4
	2010	WiGerste (75)	ja		336,77	54,0	320,64	593,78	94,9	60,4	1837,9	3403,5
	2010	<i>S. bicolor</i> , SZF (71)	nein	93		56,5	314,34	556,35	92,8	89,5	2610,8	4620,8
	2011	Mais (85)	ja		358,20	55,2	341,05	617,84	96,3	181,7	5967,6	10810,8
	2012	Wintertriticale (77)	nein	96		55,3	324,48	589,97	94,5	71,8	2201,6	4003,0
2	2009	<i>Sorghum b. x s.</i> (69-77)	nein	88		56,5	297,44	526,44	94,6	133,8	3763,4	6660,9
	2010	Grünroggen, WZF (55)	nein	104		58,0	351,52	606,07	91,7	54,6	1760,0	3034,5
	2010	Mais, ZF (85)	nein	101		55,3	339,01	613,04	95,5	95,3	3085,4	5579,4
	2010	<i>Sorghum b. x s.</i> (71)	nein	88		56,5	297,44	526,44	94,6	112,2	3157,1	5587,7
	2011	Grünroggen, WZF (55)	nein	104		58,0	351,52	606,07	91,7	29,8	960,6	1656,2
	2011	Mais, ZF (83)	nein	101		55,3	339,01	613,04	95,5	94,2	3049,8	5515,0

FF	Jahr	Fruchtart (BBCH zur Ernte)	ATB- Mes- sung ¹⁾ ?	CH ₄ -Ausbeute Matrix-Wert	CH ₄ - Ausbeute Messwert	CH ₄ -Gehalt	CH ₄ -Ausbeute	Biogasaus- beute	oTS- Gehalt	TM-Ertrag	Methanertrag	Biogasertrag
				[% rel. zu Mais]	[l/kg oTS]	[Vol-%]	[l/kg oTS]	[l/kg oTS]	[% TS]	[dt TM/ha]	[m ³ /ha]	[m ³ /ha]
	2009	Mais (83)	ja		328,03	54,9	312,32	568,89	95,7	145,4	4345,3	7914,9
	2010	Grünroggen, WZF (55)	nein	104		58,0	351,52	606,07	91,7	52,8	1702,0	2934,5
	2010	<i>Sorghum b. x s.</i> , ZF (71)	nein	88		56,5	297,44	526,44	94,6	112,6	3168,3	5607,6
	2011	Wintertriticale (77)	nein	96		55,3	324,48	586,76	94,5	45,5	1395,2	2522,9
3	2011	Weidelgras, SZF (69)	ja		308,33	62,6	293,57	468,95	91,4	26,2	703,0	1123,0
	2010	Mais (85)	nein	101		55,3	339,01	613,04	95,7	104,5	3390,3	6130,8
	2011	Grünroggen, WZF (55)	nein	104		58,0	351,52	606,07	91,7	31,9	1028,3	1772,9
	2011	<i>Sorghum b. x s.</i> , ZF (73)	nein	88		56,5	297,44	526,44	94,6	86,0	2419,9	4282,9
	2012	Wintertriticale (77)	ja		360,20	54,0	342,95	635,09	96,5	70,3	2326,6	4308,4
	2012	Weidelgras, SZF (79-89)	ja		292,60	58,0	278,59	480,33	87,3	6,3	153,22	264,2
	2009	Hafermischung (77)	nein	92		56,9	310,96	546,50	92,8	71,4	2060,4	3621,1
	2010	WiTriticale (75)	ja		347,77	53,1	331,12	623,57	95,9	91,4	2902,4	5465,8
4	2010	Hafermischung (77)	nein	92		56,9	310,96	546,50	92,8	41,2	1188,9	2089,5
	2011	Wintertriticale (77)	ja		374,37	55,8	356,44	638,79	95,5	41,0	1429,7	2562,2

FF	Jahr	Fruchtart (BBCH zur Ernte)	ATB- Mes- sung ¹⁾ ?	CH ₄ -Ausbeute Matrix-Wert	CH ₄ - Ausbeute Messwert	CH ₄ -Gehalt	CH ₄ -Ausbeute	Biogasaus- beute	oTS- Gehalt	TM-Ertrag	Methanertrag	Biogasertrag
				[% rel. zu Mais]	[l/kg oTS]	[Vol-%]	[l/kg oTS]	[l/kg oTS]	[% TS]	[dt TM/ha]	[m ³ /ha]	[m ³ /ha]
	2009	SoGerste + US (75) ²⁾	nein	96		55,8	324,48	581,51	94,0	53,9	1644,0	2946,3
	2010	Luzerne-Klee gras I (51)	nein	98		58,1	331,24	570,12	88,7	18,2	534,7	920,4
	2010	Luzerne-Klee gras II (51)	nein	91		59,9	307,58	513,49	87,9	43,2	1168,0	1949,9
	2011	Luzerne-Klee gras I (61)	nein	98		58,1	331,24	570,12	88,7	36,4	1069,5	1840,7
	2011	Luzerne-Klee gras II (59)	nein	91		59,9	307,58	513,49	87,9	45,1	1219,3	2035,6
5	2010	SoGerste + US (77) ²⁾	nein	96		55,8	324,48	581,51	94,0	52,6	1604,4	2875,2
	2011	Luzerne-Klee gras I (61)	nein	98		58,1	331,24	570,12	88,7	38,7	1137,0	1957,1
	2011	Luzerne-Klee gras II (59)	nein	91		59,9	307,58	513,49	87,9	54,1	1462,7	2441,9
	2012	Luzerne-Klee gras I (61)	nein	98		58,1	331,24	570,12	88,7	65,9	1936,2	3332,5
	2012	Luzerne-Klee gras II (61)	nein	91		59,9	307,58	513,49	87,9	33,2	897,6	1498,5
	2012	Luzerne-Klee gras III (57)	ja		262,0	58,9	249,45	423,52	87,7	9,8	214,4	364,0
	2009	WiGerste (83)	nein	98		56,4	338,98	601,03	93,4	72,2	2284,3	4050,2
	2010	Winterraps (85)	ja		284,60	58,8	270,97	460,84	92,0	94,7	2360,8	4015,0
	2011	Landsb. Gem., WZF (61)	ja		334,87	59,8	318,83	533,17	90,3	37,1	1068,1	1786,2
	2011	<i>Sorghum b. x s.</i> , ZF (75)	nein	88		56,5	297,44	526,44	94,6	96,7	2720,9	4815,8
6	2010	Wintergerste (75)	nein	98		56,4	339,0	601,0	93,4	57,4	1817,3	3222,2
	2011	Winterraps (75)	nein	82		59,3	277,2	467,4	91,1	28,9	729,7	1230,5
	2012	Landsb. Gemenge (59)	ja		370,05	57,5	352,33	712,75	88,9	78,9	2471,3	4298,0
	2012	<i>Sorghum b. x s.</i> , ZF (55)	ja		345,20	58,8	328,67	558,96	94,2	39,6	1226,0	2085,1

FF	Jahr	Fruchtart (BBCH zur Ernte)	ATB- Mes- sung ¹⁾ ?	CH ₄ -Ausbeute Matrix-Wert	CH ₄ - Ausbeute Messwert	CH ₄ -Gehalt	CH ₄ -Ausbeute	Biogasaus- beute	oTS- Gehalt	TM-Ertrag	Methanertrag	Biogasertrag
				[% rel. zu Mais]	[l/kg oTS]	[Vol-%]	[l/kg oTS]	[l/kg oTS]	[% TS]	[dt TM/ha]	[m ³ /ha]	[m ³ /ha]
	2009	Mais (83)	nein	100		55,2	338,00	612,32	95,7	163,6	5291,3	9585,6
	2010	Grünroggen, WZF (55)	nein	104		58,0	351,52	606,07	91,7	42,4	1366,7	2356,5
	2010	<i>S. bicolor</i> , ZF (71)	nein	93		56,5	314,34	556,35	92,8	91,3	2663,3	4713,8
7	2011	Kartoffel (99)	ja		332,50	49,4	316,58	640,85	96,7	101,8	3116,4	6308,6
	2010	Mais (85)	nein	100		55,2	338,00	612,32	95,7	103,1	3334,9	6041,6
	2011	Grünroggen, WZF (55)	nein	104		58,0	351,52	606,07	91,4	36,0	1156,6	1994,2
	2011	<i>Sorghum b.</i> , ZF (75)	nein	93		56,5	314,34	556,35	92,8	96,2	2806,2	4966,7
	2012	Kartoffel (99)	nein ³⁾		332,50 ³⁾	49,4	316,58	640,85	96,7	83,0	2540,9	5143,5
	2009	WiGerste (83)	ja		375,33	56,5	357,36	632,49	95,3	71,6	2437,8	4314,6
	2010	Sonnenblume (83)	nein	75		56,5	253,50	448,67	87,5	75,7	1679,1	2971,9
8	2011	Biogaserübe (91)	ja		359,57	46,3	342,35	739,42	96,6	192,8	6376,1	13771,3
	2010	Wintergerste (75)	nein	98		56,4	339,00	601,03	93,4	58,3	1845,8	3272,7
	2011	Sonnenblume (83)	nein	75		56,5	253,50	448,67	87,5	91,4	2027,4	3588,2
	2012	Biogaserübe (49)	ja		392,40	48,8	373,61	765,60	88,6	114,5	3791,4	7769,4

¹⁾ Messung der Gasausbeute am ATB Potsdam-Bornim: Messwerte (CH₄-Ausbeute in l/kg oTS, CH₄-Gehalt in Vol-%) = Mittelwert aus 3 Analysen einer Prüfglied-Mischprobe

²⁾ Berücksichtigung der Untersaat nur beim TM-Ertrag [dt/ha], nicht bei der Gasausbeute-Ermittlung (es wurde der Matrixwert der Sommergerste genutzt)

³⁾ Weil kein Matrixwert von der Kartoffel vorhanden war, wurde der Messwert aus dem Vorjahr 2011 verwendet.

Tabelle A14: Nährstoffbilanzen [kg/ha] der Makronährstoffe N, P, K und Mg als Ergebnis von Nährstoffzufuhr durch Düngung und symbiontische N-Fixierung sowie -abfuhr [kg/ha] für die 8 untersuchten Fruchtfolgen der Anlagen 3 und 4 am Standort Trossin, Versuchsjahre 2009–2013

FF	Jahr	Fruchtart	FF-Stellung	Nährstoffzufuhr (mineralische Düngung / symbiontische N-Fixierung bei Leguminosen) [kg/ha]				Nährstoffentzug durch Erntegut [kg/ha]				Saldo [kg/ha]			
				N	P	K	Mg	N	P	K	Mg	N	P	K	Mg
	2009	Wintergerste	HF	100	0	0	86	92	16	88	9	8	-16	-88	77
	2009	<i>Sorghum bicolor</i>	SZF	150	0	0	0	65	12	114	12	85	-12	-114	-12
	2010	Mais	HF	150	0	0	0	149	25	115	25	1	-25	-115	-25
	2011	Wintertriticale	HF	120	9	125	14	68	10	56	6	52	-1	69	8
	2011	<i>Phacelia</i>	SZF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2012	Winterroggen (Korn)	HF	120	0	0	0	104	20	31	5	16	-20	-31	-5
1		Summe FF 1 (A III):		640	9	125	100	478	83	404	57	162	-74	-279	43
	2010	Wintergerste	HF	100	0	0	86	70	14	76	6	30	-14	-76	80
	2010	<i>Sorghum bicolor</i>	SZF	120	9	125	14	117	20	105	20	3	-11	20	-6
	2011	Mais	HF	150	0	0	0	213	44	155	41	-63	-44	-155	-41
	2012	Wintertriticale	HF	40	0	0	0	91	18	96	10	-51	-18	-96	-10
	2012	<i>Phacelia</i>	SZF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2013	Winterroggen (Korn)	HF	111	0	0	0	84	16	25	4	27	-16	-25	-4
		Summe FF 1 (A IV):		521	9	125	100	575	112	457	81	-54	-103	-331	19
	2009	<i>Sorghum b. x s.</i>	HF	120	0	0	86	228	24	185	38	-108	-24	-185	48
	2010	Grünroggen	WZF	100	0	0	0	86	15	101	5	14	-15	-101	-5
	2010	Mais	ZF	150	0	0	0	131	25	90	19	19	-25	-90	-19
	2011	Wintertriticale	HF	120	9	125	14	72	12	56	7	48	-3	69	7
	2012	Winterroggen (Korn)	HF	120	0	0	0	109	21	32	5	11	-21	-32	-5
		Summe FF 2 (A III):		610	9	125	100	626	97	464	74	-16	-88	-339	26
2															
	2010	<i>Sorghum b. x s.</i>	HF	120	0	0	86	125	24	100	16	-5	-24	-100	70
	2011	Grünroggen	WZF	100	9	125	14	56	10	61	3	44	-1	64	11
	2011	Mais	ZF	150	0	0	0	99	22	79	15	51	-22	-79	-15
	2012	Wintertriticale (Korn)	HF	40	0	0	0	92	17	24	6	-52	-17	-24	-6
	2013	Winterroggen (Korn)	HF	111	0	0	0	89	17	27	4	22	-17	-27	-4
		Summe FF 2 (A IV):		521	9	125	100	461	90	291	44	60	-81	-166	56

FF	Jahr	Fruchtart	FF-Stellung	Nährstoffzufuhr (mineralische Düngung / symbiotische N-Fixierung bei Leguminosen) [kg/ha]				Nährstoffentzug durch Erntegut [kg/ha]				Saldo [kg/ha]			
				N	P	K	Mg	N	P	K	Mg	N	P	K	Mg

2009	Mais	HF	150	0	0	86	183	25	161	38	-33	-25	-161	48
2010	Grünroggen	WZF	100	0	0	0	87	15	99	5	13	-15	-99	-5
2010	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	150	0	0	0	124	23	92	19	26	-23	-93	-19
2011	Wintertriticale	HF	120	9	125	14	59	10	45	6	61	-1	80	8
2011	Weidelgras	SZF	100	0	0	0	49	9	44	5	51	-9	-44	-5
2012	Winterroggen (Korn)	HF	120	0	0	0	102	20	31	5	18	-20	-31	-5
	Summe FF 3 (A III):		<u>740</u>	<u>9</u>	<u>125</u>	<u>100</u>	<u>604</u>	<u>102</u>	<u>472</u>	<u>78</u>	<u>136</u>	<u>-93</u>	<u>-348</u>	<u>22</u>

3

2010	Mais	HF	150	0	0	86	140	26	106	22	10	-26	-106	64
2011	Grünroggen	WZF	100	9	125	14	55	11	68	3	45	-2	57	11
2011	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	120	0	0	0	126	19	81	17	-6	-19	-81	-17
2012	Wintertriticale	HF	40	0	0	0	89	18	95	10	-49	-18	-95	-10
2012	Weidelgras	SZF	33	0	0	0	13	3	17	2	20	-3	-17	-2
2013	Winterroggen (Korn)	HF	111	0	0	0	90	17	27	4	21	-17	-27	-4
	Summe FF 3 (A IV):		<u>554</u>	<u>9</u>	<u>125</u>	<u>100</u>	<u>513</u>	<u>94</u>	<u>394</u>	<u>58</u>	<u>41</u>	<u>-85</u>	<u>-269</u>	<u>42</u>

FF	Jahr	Fruchtart	FF-Stellung	Nährstoffzufuhr (mineralische Düngung / symbiotische N-Fixierung bei Leguminosen) [kg/ha]				Nährstoffentzug durch Erntegut [kg/ha]				Saldo [kg/ha]			
				N	P	K	Mg	N	P	K	Mg	N	P	K	Mg
	2009	Hafermischung	HF	85	0	0	86	102	20	126	13	-17	-20	-126	73
	2010	Wintertriticale	HF	120	0	0	0	104	16	81	9	16	-16	-81	-9
	2011	Winterraps	HF	150	9	100	11	58	10	66	7	92	-1	34	4
	2012	Winterroggen (Korn)	HF	120	0	0	0	111	21	33	5	9	-21	-33	-5
		Summe FF 4 (A III):		475	9	100	97	375	67	306	34	100	-58	-206	63
4															
	2010	Hafermischung	HF	110	0	0	86	52	10	85	5	58	-10	-85	81
	2011	Wintertriticale	HF	120	9	100	11	57	9	44	30	63	0	56	-19
	2012	Winterraps (Korn)	HF	50	0	0	0	88	51	49	28	-38	-51	-49	-28
	2013	Winterroggen (Korn)	HF	111	0	0	0	88	17	26	4	23	-17	-26	-4
		Summe FF 4 (A IV)		392	9	100	97	285	87	204	67	106	-78	-104	30
	2009	Sommergerste + US	HF	110	0	0	86	100	14	104	8	10	-14	-104	78
	2010	Luzerne-Klee gras	HF	100 / 95	0	0	0	113	17	155	14	82	-17	-155	-14
	2011	Luzerne-Klee gras	HF	90 / 126	9	75	0	161	21	206	17	55	-12	-131	-17
	2012	Winterroggen (Korn)	HF	120	0	0	0	100	19	30	5	20	-19	-30	-5
		Summe FF 5 (A III):		420 / 221	9	75	86	474	71	495	44	167	-62	-420	42
	2010	Sommergerste + US	HF	85	0	0	86	70	10	63	6	15	-10	-63	80
	2010	Luzerne-Klee gras (Herbst)	SZF	60 / 22	9	50	5	50	8	63	6	32	1	-13	-1
5	2011	Luzerne-Klee gras	HF	90 / 144	0	0	0	207	28	237	21	27	-28	-237	-21
	2012	Luzerne-Klee gras	HF	46 / 179	0	0	0	275	32	303	27	-50	-32	-303	-27
	2013	Winterroggen (Korn)	HF	111	0	0	0	74	14	22	4	37	-14	-22	-4
		Summe FF 5 (A IV):		392 / 345	9	50	91	676	92	688	64	61	-83	-638	27

FF	Jahr	Fruchtart	FF-Stellung	Nährstoffzufuhr (mineralische Düngung / symbiotische N-Fixierung bei Leguminosen) [kg/ha]				Nährstoffentzug durch Erntegut [kg/ha]				Saldo [kg/ha]			
				N	P	K	Mg	N	P	K	Mg	N	P	K	Mg
	2009	Wintergerste	HF	100	0	0	86	98	17	89	10	2	-17	-89	76
	2010	Winterraps	HF	144	0	0	0	141	23	146	20	3	-23	-167	-20
	2011	Landsberger Gemenge	WZF	100 / 87	9	50	5	113	14	104	8	74	-5	-54	-3
	2011	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	120	0	0	0	155	24	124	24	-35	-24	-124	-24
	2012	Winterroggen (Korn)	HF	120	0	0	0	108	21	32	5	12	-21	-32	-5
		Summe FF 6 (A III):		<u>584 / 87</u>	<u>9</u>	<u>50</u>	<u>91</u>	<u>615</u>	<u>99</u>	<u>495</u>	<u>67</u>	<u>56</u>	<u>-90</u>	<u>-466</u>	<u>24</u>
	2010	Wintergerste	HF	100	0	0	86	72	14	78	6	28	-14	-78	80
	2011	Winterraps	HF	150	9	100	11	56	10	73	7	94	-1	27	4
6	2012	Landsberger Gemenge	WZF	33 / 196	0	0	0	224	31	281	18	5	-31	-281	-18
	2012	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	40	0	0	0	58	11	67	9	-18	-11	-67	-9
	2013	Winterroggen (Korn)	HF	111	0	0	0	94	18	28	5	17	-18	-28	-5
		Summe FF 6 (A IV):		<u>434 / 196</u>	<u>9</u>	<u>100</u>	<u>97</u>	<u>504</u>	<u>84</u>	<u>527</u>	<u>45</u>	<u>126</u>	<u>-75</u>	<u>-427</u>	<u>52</u>

FF	Jahr	Fruchtart	FF-Stellung	Nährstoffzufuhr (mineralische Düngung / symbiontische N-Fixierung bei Leguminosen) [kg/ha]				Nährstoffentzug durch Erntegut [kg/ha]				Saldo [kg/ha]			
				N	P	K	Mg	N	P	K	Mg	N	P	K	Mg
	2009	Mais	HF	150	0	0	86	196	31	175	37	-46	-31	-175	49
	2010	Grünroggen	WZF	100	0	0	0	61	11	73	4	39	-11	-73	-4
	2010	<i>Sorghum bicolor</i>	ZF	120	9	125	14	112	24	113	23	8	-15	12	-9
	2011	Kartoffel	HF	150	0	0	0	122	29	178	12	28	-29	-178	-12
	2012	Winterroggen (Korn)	HF	120	0	0	0	107	20	32	5	13	-20	-32	-5
		Summe FF 7 (A III):		<u>640</u>	<u>9</u>	<u>125</u>	<u>100</u>	<u>598</u>	<u>115</u>	<u>571</u>	<u>81</u>	<u>42</u>	<u>-106</u>	<u>-446</u>	<u>19</u>
7															
	2010	Mais	HF	150	0	0	86	142	24	109	22	8	-24	-109	64
	2011	Grünroggen	WZF	100	9	125	14	68	12	76	4	32	-3	49	10
	2011	<i>Sorghum bicolor</i>	ZF	120	0	0	0	135	19	108	24	-15	-19	-108	-24
	2012	Kartoffel	HF	41	0	0	0	118	27	148	13	-77	-27	-148	-13
	2013	Winterroggen (Korn)	HF	111	0	0	0	96	18	29	5	15	-18	-29	-5
		Summe FF 7 (A IV):		<u>522</u>	<u>9</u>	<u>125</u>	<u>100</u>	<u>559</u>	<u>100</u>	<u>470</u>	<u>68</u>	<u>-37</u>	<u>-91</u>	<u>-345</u>	<u>32</u>

FF	Jahr	Fruchtart	FF-Stellung	Nährstoffzufuhr (mineralische Düngung / symbiotische N-Fixierung bei Leguminosen) [kg/ha]				Nährstoffentzug durch Erntegut [kg/ha]				Saldo [kg/ha]			
				N	P	K	Mg	N	P	K	Mg	N	P	K	Mg
	2009	Wintergerste	HF	100	0	0	86	92	18	96	10	8	-18	-96	76
	2009	Gelbsenf	SZF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2010	Sonnenblume	HF	90	0	0	0	124	29	201	31	-34	-29	-201	-31
	2010	<i>Phacelia</i>	HF	0	9	100	11	0	0	0	0	0	9	100	11
	2011	Biogasrübe	HF	70	0	0	0	160	30	162	27	-90	-30	-162	-27
	2012	Winterroggen (Korn)	HF	120	0	0	0	108	21	32	5	12	-21	-32	-5
		Summe FF 8 (A III):		<u>380</u>	<u>9</u>	<u>100</u>	<u>97</u>	<u>430</u>	<u>98</u>	<u>491</u>	<u>73</u>	<u>-104</u>	<u>-89</u>	<u>-391</u>	<u>24</u>
8															
	2010	Wintergerste	HF	100	0	0	86	62	13	76	6	38	-13	-76	80
	2010	Gelbsenf	SZF	0	9	100	11	0	0	0	0	0	9	100	11
	2011	Sonnenblume	HF	90	0	0	0	127	46	268	42	-37	-46	-268	-42
	2011	<i>Phacelia</i>	SZF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2012	Biogasrübe	HF	41	0	0	0	82	27	99	18	-41	-27	-99	-18
	2013	Winterroggen (Korn)	HF	111	0	0	0	90	17	27	4	21	-17	-27	-4
		Summe FF 8 (A IV):		<u>342</u>	<u>9</u>	<u>100</u>	<u>97</u>	<u>361</u>	<u>103</u>	<u>470</u>	<u>70</u>	<u>-19</u>	<u>-94</u>	<u>-370</u>	<u>27</u>

Tabelle A15: Anbauspezifische Veränderung der Humusvorräte (in Humusäquivalenten [kg Humus-C/ha]) nach VDLUFA (2004, untere Werte) beim Anbau der acht erprobten Energiefruchtfolgen für beide Versuchsanlagen am Standort Trossin unter Berücksichtigung der Humus-Reproduktionsleistung verschiedener organischer Materialien bei Annahme des Kreislauf-Szenarios, d. h. bei vollständiger Gärrestrückführung der geernteten Biomasse, 2009–2012 bzw. 2010–2013

FF	Jahr	Fruchtart	FF-Stellung	Nutzung	Biogas	Humus-C Fruchtart [kg/ha]	Humus-C Gründüngung [kg/ha]	Humus-C Stroh, Blatt [kg/ha]	Humus-Saldo Fruchtart + Gründ. + Erntereste [kg Humus-C/ha]	Humus-C Gärrest [kg/ha]	Humus-Saldo „Kreislauf-Szenario“ [kg Humus-C/ha]
	2009	Wintergerste	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	166	-114
	2009	<i>Sorghum bicolor</i>	SZF	GPS	ja	-420	0	0	-420	235	-185
	2010	Mais	HF	GPS	ja	-560	0	0	-560	298	-262
	2011	Wintertriticale	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	82	-198
	2011	<i>Phacelia</i>	SZF	GD	nein	90	210	0	290	0	290
	2012	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	207	-73	0	-73
		Summe FF 1 (A III):							-1323		-542
1											
	2010	Wintergerste	HF	GPS	ja	-280	0	0	-420	173	-107
	2010	<i>Sorghum bicolor</i>	SZF	GPS	ja	-420	0	0	-280	311	-109
	2011	Mais	HF	GPS	ja	-560	0	0	-560	463	-97
	2012	Wintertriticale	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	138	-142
	2012	<i>Phacelia</i>	SZF	GD	nein	80	69	0	149	0	149
	2013	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	264	-16	0	-16
		Summe FF 1 (A IV):							-1407		-322
	2009	<i>Sorghum b. x s.</i>	HF	GPS	ja	-420	0	0	-420	472	52
	2010	Grünroggen	WZF	GPS	ja	-80	0	0	-80	164	84
	2010	Mais	ZF	GPS	ja	-560	0	0	-560	260	-300
	2011	Wintertriticale ¹⁾	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	96	-184
	2012	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	232	-48	0	-48
		Summe FF 2 (A III):							-1388		-396
2											
	2010	<i>Sorghum b. x s.</i>	HF	GPS	ja	-420	0	0	-420	333	-87
	2011	Grünrogen	WZF	GPS	ja	-80	0	0	-80	90	10
	2011	Mais	ZF	GPS	ja	-560	0	0	-560	256	-304
	2012	Wintertriticale	HF	Korn	nein	-280	0	329	49	0	49
	2013	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	314	34	0	34
		Summe FF 2 (A IV):							-977		-298

FF	Jahr	Fruchtart	FF-Stellung	Nutzung	Biogas	Humus-C Fruchtart [kg/ha]	Humus-C Gründüngung [kg/ha]	Humus-C Stroh, Blatt [kg/ha]	Humus-Saldo Fruchtart + Gründ. + Erntereste [kg Humus-C/ha]	Humus-C Gärrest [kg/ha]	Humus-Saldo „Kreislauf-Szenario“ [kg Humus-C/ha]
----	------	-----------	-------------	---------	--------	------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	---	----------------------------	---

2009	Mais	HF	GPS	ja	-560	0	0	-560	386	-174
2010	Grünroggen	WZF	GPS	ja	-80	0	0	-80	161	81
2010	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	GPS	ja	-420	0	0	-420	340	-80
2011	Wintertriticale	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	81	-199
2011	Weidelgras	SZF	GPS	ja	100	0	0	100	83	-183
2012	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	166	-114	0	-114
Summe FF 3 (A III):								<u>-1354</u>		<u>-303</u>

3

2010	Mais	HF	GPS	ja	-560	0	0	-560	280	-280
2011	Grünroggen	WZF	GPS	ja	-80	0	0	-80	97	17
2011	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	GPS	ja	-420	0	0	-420	290	-130
2012	Wintertriticale	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	138	-142
2012	Weidelgras	SZF	GPS	ja	100	0	0	100	13	113
2013	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	311	31	0	31
Summe FF 3 (A IV):								<u>-1209</u>		<u>-391</u>

FF	Jahr	Fruchtart	FF-Stellung	Nutzung	Biogas	Humus-C Fruchtart [kg/ha]	Humus-C Gründüngung [kg/ha]	Humus-C Stroh, Blatt [kg/ha]	Humus-Saldo Fruchtart + Gründ. + Erntereste [kg Humus-C/ha]	Humus-C Gärrest [kg/ha]	Humus-Saldo „Kreislauf-Szenario“ [kg Humus-C/ha]
	2009	Hafermischung	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	187	-93
	2010	Wintertriticale	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	191	-89
	2011	Winterraps ¹⁾	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	130	-150
	2012	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	246	-34	0	-34
		Summe FF 4 (A III):							<u>-874</u>		<u>-366</u>
4											
	2010	Hafermischung	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	83	-197
	2011	Wintertriticale	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	69	-211
	2012	Winterraps	HF	Korn	nein	-280	0	273	-7	0	-7
	2013	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	334	54	0	54
		Summe FF 4 (A IV):	HF						<u>-513</u>		<u>-361</u>
	2009	Sommergerste + US ²⁾	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	137	-143
	2009	Luzerne-Kleegras	HF		nein	100	0	0	100	0	100
	2010	Luzerne-Kleegras	HF	GPS	ja	600	0	0	600	266	866
	2011	Luzerne-Kleegras	HF	GPS	ja	600	0	0	600	327	927
	2012	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	186	-94	0	-94
		Summe FF 5 (A III):							<u>926</u>		<u>1656</u>
5											
	2010	Sommergerste + US ²⁾	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	85	-195
	2010	Luzerne-Kleegras	SZF		nein	100	0	0	100	86	186
	2011	Luzerne-Kleegras	HF	GPS	ja	600	0	0	600	371	971
	2012	Luzerne-Kleegras	HF	GPS	ja	600	0	0	600	344	944
	2013	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	331	51	0	51
		Summe FF 5 (A IV):							<u>1071</u>		<u>1957</u>

FF	Jahr	Fruchtart	FF-Stellung	Nutzung	Biogas	Humus-C Fruchtart [kg/ha]	Humus-C Gründüngung [kg/ha]	Humus-C Stroh, Blatt [kg/ha]	Humus-Saldo Fruchtart + Gründ. + Erntereste [kg Humus-C/ha]	Humus-C Gärrest [kg/ha]	Humus-Saldo „Kreislauf-Szenario“ [kg Humus-C/ha]
	2009	Wintergerste	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	183	-97
	2010	Winterraps	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	244	-36
	2011	Landsberger Gemenge	WZF	GPS	ja	120	0	0	120	152	272
	2011	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	GPS	ja	-420	0	0	-420	364	-56
	2012	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	257	-23	0	-23
		Summe FF 6 (A III):							<u>-883</u>		<u>60</u>
6											
	2010	Wintergerste	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	175	-105
	2011	Winterraps	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	125	-155
	2012	Landsberger Gemenge	WZF	GPS	ja	120	0	0	120	302	422
	2012	<i>Sorghum b. x s.</i>	ZF	GPS	ja	-420	0	0	-420	133	-287
	2013	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	319	39	0	39
		Summe FF 6 (A IV):							<u>-821</u>		<u>-86</u>
	2009	Mais	HF	GPS	ja	-560	0	0	-560	382	-178
	2010	Grünroggen	WZF	GPS	ja	-80	0	0	-80	126	46
	2010	<i>Sorghum bicolor</i>	ZF	GPS	ja	-420	0	0	-420	305	-115
	2011	Kartoffel ³⁾	HF	Knolle	nein	-760	0	0	-760	0	-760
	2012	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	245	-35	0	-35
		Summe FF 7 (A III):							<u>-1855</u>		<u>-1042</u>
7											
	2010	Mais	HF	GPS	ja	-560	0	0	-560	279	-281
	2011	Grünroggen	WZF	GPS	ja	-80	0	0	-80	109	29
	2011	<i>Sorghum bicolor</i>	ZF	GPS	ja	-420	0	0	-420	329	-91
	2012	Kartoffel ³⁾	HF	Knolle	nein	-760	0	0	-760	0	-760
	2013	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	323	43	0	43
		Summe FF 7 (A IV):							<u>-1777</u>		<u>-1060</u>

FF	Jahr	Fruchtart	FF-Stellung	Nutzung	Biogas	Humus-C Fruchtart [kg/ha]	Humus-C Gründüngung [kg/ha]	Humus-C Stroh, Blatt [kg/ha]	Humus-Saldo Fruchtart + Gründ. + Erntereste [kg Humus-C/ha]	Humus-C Gärrest [kg/ha]	Humus-Saldo „Kreislauf-Szenario“ [kg Humus-C/ha]	
	2009	Wintergerste	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	-181	-99	
	2009	Gelbsenf	SZF	GD	nein	80	169	0	249	0	249	
	2010	Sonnenblume	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	345	65	
	2010	<i>Phacelia</i> ⁴⁾	SZF	GD	nein	80	0	0	80	0	80	
	2011	Biogaserübe	HF	Körper	ja	-760	0	468	-292	392	100	
	2012	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	238	-42	0	-42	
		Summe FF 8 (A III):								<u>-565</u>		<u>353</u>
8												
	2010	Wintergerste	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	169	-111	
	2010	Gelbsenf ⁴⁾	SZF	GD	nein	80	0	0	80	0	80	
	2011	Sonnenblume	HF	GPS	ja	-280	0	0	-280	447	167	
	2011	<i>Phacelia</i> ⁴⁾	SZF	GD	nein	80	0	0	80	0	80	
	2012	Biogaserübe	HF	Körper	ja	-760	0	272	-488	144	-344	
	2013	Winterroggen	HF	Korn	nein	-280	0	303	23	0	23	
		Summe FF 8 (A IV):								<u>-865</u>		<u>-105</u>

¹⁾ abweichend vom Versuchsplan als Ganzpflanzensilage geerntet

²⁾ Berücksichtigung der Untersaat erst nach Ernte der Sommergerste als (ungeerntete) Sommerzwischenfrucht

³⁾ Kartoffel als Marktfrucht, keine Vergärung

⁴⁾ keine Biomassebestimmung aufgrund eines zu geringen Aufwuchses, somit nur Humusäquivalente hinsichtlich Zwischenfruchtanbau, kein Humus-C aus untergearbeiteter Grünmasse (Gründüngung)

HF = Hauptfrucht, ZF = Zweitfrucht, SZF = Sommerzwischenfrucht, WZF = Winterzwischenfrucht, GPS = Ganzpflanzensilage, GD = Gründüngung, FF = Fruchtfolge

Anhang II – Öffentlichkeitsarbeit

Infobroschüren

GRUNEWALD, J., FREYDANK, S., SCHRÖDER, S., RÖHRICHT, CH. (2009): Das Projekt EVA - Erprobung von Energiefruchtfolgen zur Biogasproduktion auf D-Südstandorten. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig.

GRUNEWALD et al. (2012): Energiepflanzen für Biogasanlagen – Regionalausgabe Sachsen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow.

Beiträge in Broschüren und Kongressbänden

GRUNEWALD, J., RÖHRICHT, CH. (2010): Standortsspezifische Erträge: Trossin (Sachsen) – Roggen-Kartoffel-Region. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.), Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen. Gülzow, 3. Auflage, 24-25.

GRUNEWALD, J., JÄKEL, K., SCHAERFF, A. (2011): Energiepflanzen für warm-trockene, leichte D-Standorte. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Tagungsband Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven (20./21.9.2011 in Göttingen). Gülzow, 300-303.

GRUNEWALD, J., JÄKEL, K. (2012): Biomassebereitstellung für die energetische Verwertung in Sachsen. In: Hochschule Zittau (Hrsg.), Tagungsband Elektroenergie aus Biomasse in dezentraler Anwendung – Technik, Ökonomie, Ökologie (3./4.5.2012 in Zittau). Zittau, 25-32.

Beiträge in Fachzeitschriften

GRUNEWALD, J., FREYDANK, S., SCHRÖDER, S., RÖHRICHT, CH. (2009): Gut für Boden und Fermenter – Standortangepasste Energiefruchtfolgen für die Biogasproduktion. Neue Landwirtschaft 7/2009, 79-81.

GRUNEWALD, J., FREYDANK, S., SCHRÖDER, S., RÖHRICHT, CH. (2009): Gut für Boden und Biogasanlage – Standortangepasste Energiefruchtfolgen in mitteldeutschen Trockengebieten. Bauernblatt 45, 32-35.

GRUNEWALD, J. (2010): Pflanzenbaurat: Nährstoffbedarf einjähriger Energiepflanzen. Bauernzeitung 20/2010 (19.5.2010), 8.

GRUNEWALD, J. (2011): Lücke in der Bilanz. Bauernzeitung 13. Woche (1.4.2011), 32-34.

GRUNEWALD, J. (2011): Pflanzenbaurat: Nährstoffbedarf mehrjähriger Energiepflanzen. Bauernzeitung 19/2011 (13.5.2011), 8.

GRUNEWALD, J. (2012): Pflanzenbaurat: Fruchtfolgen für Energiepflanzen. Bauernzeitung 20/2012 (18.5.2012), 8.

GRUNEWALD, J., JÄKEL, K. (2012): Zwei Ernten im Jahr. Bauernzeitung 35/2012 (31.8.12), 46-47.

GRUNEWALD, J., JÄKEL, K. (2012): Zweikulturnutzung – Rechnet sich's? Bauernzeitung 36/2012 (7.9.2012), 54-55.

Projektberichte

GRUNEWALD, J., JÄKEL, K. (2009, 2010, 2011): EVA II, Teilprojekt 1 - Energiefruchtfolgegrundversuch: Erprobung von Energiefruchtfolgen zur Biogasproduktion auf einem warm-trockenen, leichten D-Südstandort – Jahresbericht. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig.

- GRUNEWALD, J., JÄKEL, K. (2009, 2010): EVA II, Teilprojekt 1 - Gärrestversuch: Prüfung verschiedener Stickstoffdüngewarianten (100 % mineralisch, 50 % organisch / 50 % mineralisch, 100 % organisch) auf einem warm-trockenen, leichten D-Südstandort – Jahresbericht. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig.
- GRUNEWALD, J., JÄKEL, K. (2012): EVA II, Teilprojekt 1 - Energiefruchtfolgegrundversuch: Erprobung von Energiefruchtfolgen zur Biogasproduktion auf einem warm-trockenen, leichten D-Südstandort – vorläufiger Endbericht (Stand: 31.10.2012). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen.

Vorträge

- GRUNEWALD, J. (2009): Standortangepasste Energiefruchtfolgen zur Biogasproduktion auf leichten Böden – Vorstellung und Ergebnisse eines Verbundprojekts. Fachveranstaltung „Energiefruchtfolgen“, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Trossin, 10.6.2009.
- GRUNEWALD, J. (2009): Energiepflanzen für Biogasanlagen – Ergebnisse des Anbaus auf D-Südstandorten. Leipziger Biogas-Fachgespräche 2009/2010, Deutsches Biomasseforschungszentrum, Leipzig, 2.12.2009.
- GRUNEWALD, J. (2010): Energiepflanzen für Biogasanlagen – Ergebnisse des Anbaus auf leichten Böden. Winterfortbildung, „Landwirtschaft und Beratung Dr. Hartwig Katzer“, Hochkirch bei Bautzen, 1.2.2010.
- GRUNEWALD, J. (2010): Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen zur Biogasproduktion – Das Verbundprojekt EVA. Fachveranstaltung „Energiepflanzenanbau zur Biogasproduktion“, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Trossin, 1.9.2010.
- GRUNEWALD, J. (2010): Energiepflanzen zur Biogasproduktion – Ergebnisse aus den Projekten „EVA“ und „Sorghum“. Fachtagung „Erneuerbare Energien – Einkommensalternativen“, Kompetenzzentrum Bioenergie Leipzig & Kreisbauernverband Borna/Geithain/Leipzig, Grimma, 26.10.2010.
- JÄKEL, K., GRUNEWALD, J. (2010): Energiepflanzenanbau in Sachsen. Sächsischer Bioenergetag, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Groitzsch, 18.11.2010.
- GRUNEWALD, J. (2010): Energiepflanzenanbau zur Biogasproduktion bei Klimaveränderungen. 2. REGKLAM-Workshop „Landwirtschaft im Klimawandel“, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Groitzsch, 3.12.2010.
- JÄKEL, K., GRUNEWALD, J. (2010): Energiepflanzenanbau in Sachsen. Biogasfachgespräch „Veränderte Stoff- und Energieströme“, Deutsches Biomasseforschungszentrum, Leipzig, 8.12.2010.
- GRUNEWALD, J. (2011): Welche Chancen bieten Zwei-Kultur-Anbausysteme? Fachveranstaltung „Biomassebereitstellung in der Landwirtschaft“, ENERTEC, Leipzig, 26.1.2011.
- GRUNEWALD, J. (2011): Hauptfruchtanbau versus Zweikulturnutzung. Fachveranstaltung „Energiepflanzen für die Biogasproduktion“, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Trossin, 1.9.2011.
- JÄKEL, K., GRUNEWALD, J. (2010, 2011): Nachwachsende Rohstoffe in Sachsen. Verschiedene Fachveranstaltungen des LfULG und Betriebsakademie Agrarmanagement, Dresden.
- JÄKEL, K., GRUNEWALD, J. (2011): Energiepflanzen zur Biogasproduktion im Mittelgebirgsvorland. Plauen, November 2011.

- JÄKEL, K., GRUNEWALD, J. (2012): Biomassebereitstellung für die energetische Verwertung in Sachsen. Fachtagung „Elektroenergie aus Biomasse“, Hochschule Zittau, Zittau, 3./4.5.2012.
- GRUNEWALD, J., EBEL, G. (2012): Energiepflanzenproduktion auf nordostdeutschen Diluvialstandorten: Herausforderung bei temporärem Wassermangel auf leichten Böden. 3. Forum Energiepflanzen „Anbausysteme für Biogassubstrate und Ergänzungen zum Mais – Ergebnisse aus 6 Jahren Forschung im EVA-Verbund“, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe & Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, 4./5.7.2012.
- GRUNEWALD, J. (2012): Ergebnisse aus 7 Jahren Energiefruchtfolgenforschung für die Biogasproduktion auf einem leichten D-Standort in Nordsachsen (2005-2011). Fachveranstaltung „Energiepflanzen für die Biogasproduktion“, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Trossin, 29.8.2012.
- JÄKEL, K., GRUNEWALD, J., THEIß, M. (2013): Aktuelles zu alternativen Energiepflanzen. Biogasfachgespräch „Betriebsmanagement“, Deutsches Biomasseforschungszentrum, Leipzig, 23.1.2013.
- JÄKEL, K., GRUNEWALD, J., THEIß, M. (2013): Nachwachsende Rohstoffe in Sachsen – Stand & Perspektiven. ENERTEC, Leipzig, 29.1.2013.
- GRUNEWALD, J. (2013): Ergebnisse aus der EVA-Forschung. Fachveranstaltung „Energiepflanzen für Biogasanlagen“, Trossin, 28.8.2013.

Poster und Postervorstellungen

- GRUNEWALD, J., FREYDANK, S., SCHRÖDER, S., RÖHRICHT, CH. (2009): Erprobung von Energiefruchtfolgen für D-Südstandorte zur Biogasproduktion. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig.
- GRUNEWALD, J., SCHRÖDER, S., RÖHRICHT, CH. (2009): Energiefruchtfolgen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig.
- GRUNEWALD, J. (2010): Versuchsplan des Verbundprojektes EVA II. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig.
- GRUNEWALD, J., JÄKEL, K. (2010, 2011, 2012, 2013): Prüfung verschiedener Stickstoffdüngewarienten im „Kleinen Gärrestversuch“ – Versuchsdarstellung und Ergebnisse. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig/Nossen.
- GRUNEWALD, J., JÄKEL, K. (2010, 2011, 2012, 2013): Erprobung von Energiefruchtfolgen zur Biogasproduktion auf einem warm-trockenen D-Süd-Standort – Aufbau und Ergebnisdarstellung. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig/Nossen.
- GRUNEWALD, J., JÄKEL, K. (2011): Energiepflanzen für warm-trockene, leichte D-Standorte: Biomasseleistung, Gasausbeute und Wirtschaftlichkeit (3-teilig). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig.
- GRUNEWALD, J., JÄKEL, K. (2013): Zweikulturnutzung auf leichten, trockenen Standorten – Reicht das Wasser für einen nachhaltigen Anbau? Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen.

Postervorstellung bei(m)

hausinternen Fachveranstaltungen, u. a. bei den jährlichen Energiepflanzentagen in Trossin (2009-2013)

Fachtagung „Energetische Nutzung Nachwachsender Rohstoffe“ am 10./11.9.2009 und 9./10.9.2010 in Freiberg
FNR-/KTBL-Kongress „Biogas in der Landwirtschaft“ am 15./16.9.2009 in Weimar, 20./21.9.2011 in Göttingen und am 10./11.9.2013 in Kassel
„2. bzw. 3. Symposium Energiepflanzen“ am 17./18.11.2009 und 2./3.11.2011 in Berlin
Forum „Anbausysteme für Biogassubstrate und Ergänzungen zum Mais – Ergebnisse aus 6 Jahren Forschung im EVA-Verbund“ am 4./5.7.2012 in Jena

Newsletter- und Internetbeiträge

GRUNEWALD, J., ZANDER, D., JÄKEL, K. (2009): Fachveranstaltung „Energiepflanzen- und Sorghumhirseanbau zur Biogasproduktion auf leichten Standorten“ am 10. Juni 2009 in Trossin (Nachlese). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig (<http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/10517.htm>).

GRUNEWALD, J., RÖHRICHT, CH. (2009): Biogas vom Acker – Fruchtfolgen auf leichten Böden erprobt. Newsletter des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie vom 27.8.2009 (<http://www.smul.sachsen.de/lfulg/13860.htm>).

DUDZIAK, D., GRUNEWALD, J., ZANDER, D., JÄKEL, K. (2010): Fachveranstaltung „Energiepflanzenanbau zur Biogasproduktion“ am 01. September 2010 in Trossin (Nachlese). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig.

GRUNEWALD, J., JÄKEL, K. (2010): EVA-Projekt-Homepage: Trockene, leichte D-Standorte Ost (Sachsen). Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena (<http://www.eva-verbund.de/regionen/roggen-kartoffel-region-sn>)

GRUNEWALD, J., ZANDER, D., JÄKEL, K. (2011): Energiepflanzen für die Biogasproduktion 2011 (Veranstaltungs-Nachlese). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig (<http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/26578.htm>).

GRUNEWALD, J., THEIß, M., JÄKEL, K. (2012): Fachveranstaltung „Energiepflanzen für die Biogasproduktion“ (Nachlese). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen (<http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/26917.htm>).

GRUNEWALD, J., THEIß, M., JÄKEL, K. (2013): „Energiepflanzen für Biogasanlagen“ am 28.08.2013 in Trossin (Nachlese). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen (<http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/30699.htm>).

EVA-Fachveranstaltungen des LfULG mit Ergebnisdarstellung und Versuchsfeldbesichtigung

10.09.2009: Fachveranstaltung „Energiefruchtfolgen und Sorghumhirsen“ in Trossin

01.09.2010: Fachveranstaltung „Energiepflanzenanbau zur Biogasproduktion“ in Trossin

01.09.2011: Fachveranstaltung „Energiepflanzen für die Biogasproduktion“ in Trossin

29.08.2012: Fachveranstaltung „Energiepflanzen für die Biogasproduktion“ in Trossin

28.08.2013: Fachveranstaltung „Energiepflanzen für Biogasanlagen“ in Trossin

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Jana Grunewald, Dr. Kerstin Jäkel
Abteilung Landwirtschaft/Referat Pflanzenbau
Waldheimer Str. 219, 01683 Nossen
Telefon: +49 35242 631-7223
Telefax: +49 35242 631-7299
E-Mail: jana.grunewald@smul.sachsen.de

Redaktion:

Dr. Kerstin Jäkel
Abteilung Landwirtschaft/Referat Pflanzenbau
Waldheimer Str. 219, 01683 Nossen
Telefon: +49 35242 631-7204
Telefax: +49 35242 631-7299
E-Mail: kerstin.jaekel@smul.sachsen.de

Redaktionsschluss:

31.01.2014

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.