

Energetische und ökologische Aspekte der Feldholzproduktion

V. Scholz¹, H. J. Hellebrand¹ & A. Höhn²

¹ Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Potsdam, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, Deutschland, e-mail: vscholz@atb-potsdam.de

² Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V. (ZALF), Müncheberg, Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg, Deutschland, e-mail: ahoehn@zalf.de

Zusammenfassung

In vorliegendem Beitrag werden verschiedene Energiepflanzenarten, einschließlich schnellwachsender Baumarten, hinsichtlich Ertrag, Energiegewinn und Umweltverträglichkeit analysiert. Dabei wird sich auf Ergebnisse eines mehrjährigen praxisnahen Anbauversuchs auf sandigem Boden gestützt. Über einen Zeitraum von 10 Jahren wurden Ertrag, Energiegewinn und umweltrelevante Stoffe in Pflanze, Boden und Luft ermittelt. Die Düngung erfolgte jeweils in 4 Varianten von 0 bis 150 kg N/ha sowie mit Holz- und Strohasche. Auf Pflanzenschutzmittel wurde gänzlich verzichtet. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Ausnahme von Topinamburkraut und Gehölzen mit Untersaat die mittleren Erträge im Bereich von 8 bis 11 t_{TM}/ha liegen und eine Verringerung der Stickstoffgabe von 150 auf 75 kg N/ha nur geringfügige Ertragseinbußen zur Folge hat. Ohne Düngung fallen die Erträge nach 10 Jahren um 20 bis 60 % ab, ausgenommen Pappel, die mit über 9 t_{TM}/ha ähnlich hohe Erträge wie mit Düngung erreicht. Die Gehalte der emissions- und feuerungstechnisch relevanten Pflanzennährstoffe, wie Stickstoff, Kalium, Schwefel und Chlor, sind bei Pappel und Weide deutlich geringer als bei Knautgras, Roggen, Triticale und Hanf. Das Gleiche gilt auch für Lachgas, welches beim Anbau aus dem Boden entweicht und extrem klimawirksam ist. Durch Düngemittel und energiebedingte Immissionen eingetragene Schwermetalle werden unterschiedlich absorbiert, wobei die Gehölze trotz Rückführung der Rostasche zur Dekontamination des Bodens beitragen. Hohe Energieerträge werden mit Hanf, Pappel, Triticale und Winterroggen erzielt. Auch bei reduzierter Stickstoffdüngung und mit Pappel selbst bei Nulldüngung werden Nettoenergiegewinne von über 3.500 Liter Öläquivalent pro Hektar und Jahr erreicht.

Schlüsselwörter: Energiepflanze, Ertrag, Nährstoff, Schwermetall, Energiegewinn

Problem und Zielstellung

Energiepflanzen können sowohl zur Reduktion der Treibhausgasemissionen beitragen als auch zur Stabilisierung der Einkommenslage von Landwirten. Diese Pflanzen, die vorzugsweise auf für die Nahrungsmittelproduktion nicht benötigten landwirtschaftlichen Flächen angebaut werden, könnten mittelfristig etwa ein Drittel der aus Biomasse erzeugten Energie liefern und damit immerhin 3 % des Primärenergiebedarfs in Deutschland decken. Obwohl es sich um einen erneuerbaren Energieträger handelt, haben Energiepflanzen langfristig nur dann eine Chance, wenn ihr Anbau und ihre Nutzung keine unzulässigen Umweltbelastungen bewirken und der Nettoenergiegewinn pro Flächeneinheit ausreichend hoch ist.

Die insgesamt etwa 60 vorzugsweise in Frage kommenden Energiepflanzenarten unterscheiden sich hinsichtlich Ertrag, Habitus, Schaderregeranfälligkeit, Standortadaptation, Technologie, Erntefeuchte, Düngemittel- und Pflanzenschutzmittelbedarf etc. (El Bassam, 1998). Bei der Auswahl geeigneter Arten sind neben pflanzenbaulichen und technologischen Eigenheiten insbesondere auch ökologische und energetische Aspekte der Produktion und Nutzung zu berücksichtigen. Dies ist besonders schwierig für Pflanzen, die bisher kaum oder in anderer Form angebaut und/oder genutzt wurden, wie z.B. Ganzpflanzengetreide, Topinambur, Hanf und Feldgehölze. Bisherige Untersuchungen beziehen sich überwiegend auf spezielle Fragestellungen oder ausgewählte Pflanzenarten auf unterschiedlichen Standorten, so dass ein Quervergleich kaum möglich ist.

In einem Verbundprojekt des Instituts für Agrartechnik Bornim, der Landesamtes für Verbraucherschutz und Landwirtschaft und des Leibniz-Zentrums für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung wurde daher die ökologische Verträglichkeit und die energetische Effizienz beim Anbau verschiedener für die Verbrennung und Vergasung geeigneter Energiepflanzenarten unter praxisnahen Bedingungen auf sandigem Boden ermittelt.

Methodik

Standort und Anbauplan

Das für die Anbauuntersuchungen parzellierte Versuchsfeld befindet sich auf dem Gelände des ATB nordwestlich von Potsdam. Mit einer Gesamtfläche von ca. 4 ha ist es Teil eines zuvor konventionell genutzten Schlags, der bereits in den zwanziger Jahren bodenkundlich beschrieben wurde (Pfuhl, 1929) (Abbildung 1).

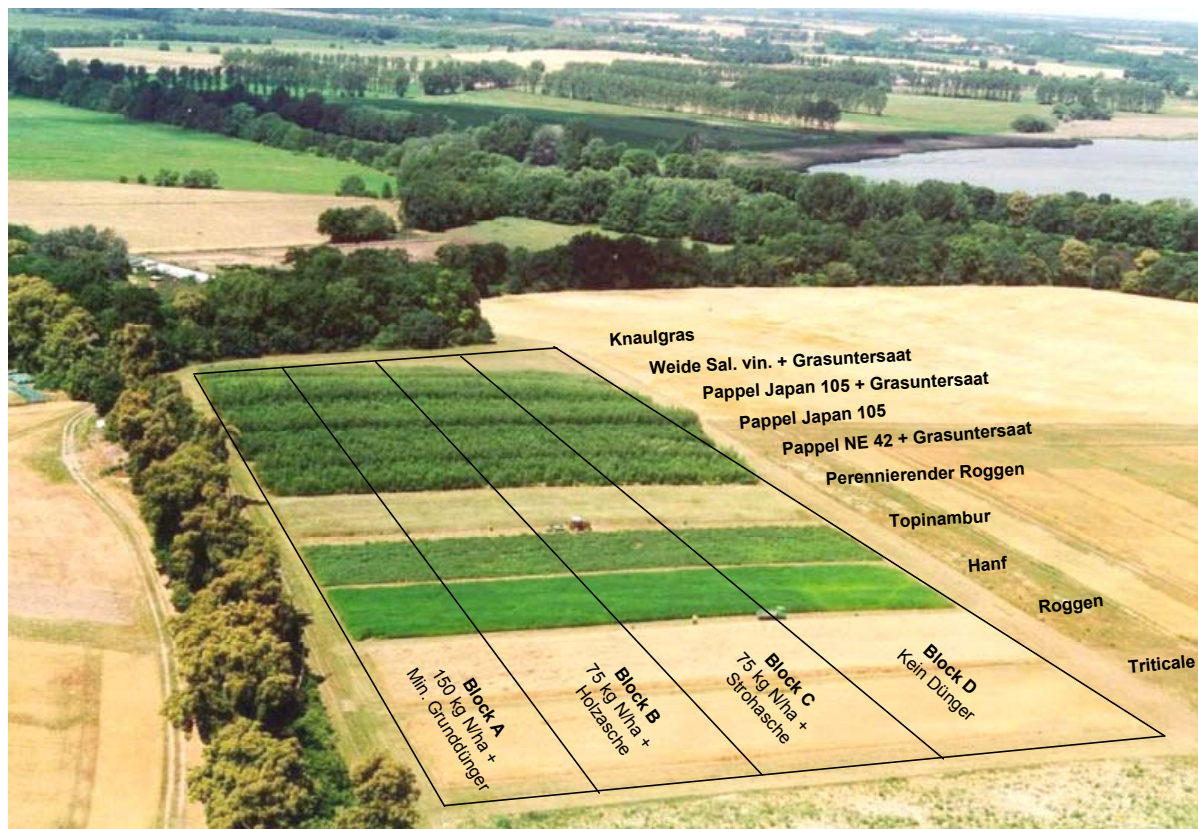


Abbildung 1: Struktur der Versuchsfeldes (1997)

Das Versuchsfeld ist in 10 Langparzellen a 0,25 ha und diese wiederum in jeweils 4 Blöcke a 624 m² geteilt. In ausgewählten Parzellen erfolgt eine weitere Unterteilung in rechte und linke Seite. Block A erhält eine mineralische Grunddüngung und 150 kg N/ha Stickstoff, die Blöcke B und C bekommen eine Holz- und Strohaschegaße sowie jeweils 75 kg N/ha, und Block D wird nicht gedüngt. Pflanzenschutzmittel kommen auf der gesamten Fläche nicht zum Einsatz.

Als Düngemittel werden 540 bzw. 270 kg/ha Kalkammonsalpeter und 520 kg Kamex-Superphosphat-Gemisch (1:1,1) sowie jeweils 660 kg Rostasche (Grob- asche) von einer 4 MW-Holz- und einer 3 MW-Strohfeuerungsanlage verwendet. Der Stickstoffdünger wurde in zwei (B/C) bzw. drei (A) Teilgaben ausgebracht.

Tabelle 1: Saat- und Pflanzgut

Parzelle	Art	Sorte	Saat-/Pflanzdichte
1	Knautgras	Lidacta	33 kg/ha
2	Weide ¹⁾	Salix viminalis 83/21/12	12000 Pfl./ha
3	Pappel ¹⁾	Japan 105 ²⁾	12000 Pfl./ha
4	Pappel	Japan 105 ²⁾	12000 Pfl./ha
5	Pappel ¹⁾	NE 42 ³⁾	12000 Pfl./ha
6	Miscanthus x giganteus	Miscanthus sinensis	10000 Pfl./ha
6	Perenn. Roggen	Permontra	130 kg/ha
7	Topinambur	Parlow	40000 St./ha
8 bis 10	Winterroggen	Amilo	120 kg/ha
8 bis 10	Wintertriticale	Alamo	150 kg/ha
8 bis 10	Hanf	Fedora 19 bzw. Fedrina 74	50 kg/ha

1) Untersaat-Grasmischung Mecklenburger Schafschwingel und Rotschwingel 1:1

2) Ähnlich der Mehrklonsorte Max; Kreuzung *Populus maximowiczii* x *P. nigra*

3) Synonym für Hybride 275; Kreuzung *Populus maximowiczii* x *P. trichocarpa*

Als Pflanzen werden ausschließlich für Verbrennung bzw. Vergasung geeignete Arten angebaut, wobei der Schwerpunkt auf perennierende Pflanzen, wie Knautgras, Weide, Pappel, Miscanthus, mehrjähriger Roggen und Topinambur gelegt wird. Die Auswahl der Sorten erfolgte auf Empfehlung land- und forstwirtschaftlicher Einrichtungen aus dem In- und Ausland (Tab. 1).

Boden und Klima

Die Bodenwertzahl der Versuchsfläche liegt im Bereich von 28 bis 34. In den oberen Horizonten bis 60 cm Tiefe herrscht ein schwachhumoser, schwachlehmiger Sand und darunter sandiger Lehm diluvialen Ursprungs vor. Zu Versuchsbeginn betragen die Gehalte an Humus und organisch gebundenem Kohlenstoff im Mittel 15,5 g/kg und 9,0 g/kg und der pH-Wert 5,7. Der Grundwasserstand beträgt etwa 8 m (Scholz, Krüger, Höhn et al., 1999).

Das Versuchsfeld liegt lt. KTBL-Nomenklatur im Klimagebiet 8, welches durch ein relativ ausgeglichenes Klima gekennzeichnet ist. Dennoch traten im Versuchszeitraum 1994 bis 2003 erhebliche Unterschiede im Jahresmittel der Temperaturen und Niederschläge auf (Tabelle 2). Die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur betrug 9,5 °C und die Niederschlagssumme 477 mm/a.

Tabelle 2: Temperatur und Niederschlag am Versuchsstandort

	Kalenderjahr									
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Niederschlags- summe in mm/a	707	603	446	495	596	405	410	412	465	249
Jahresmittel- temperatur in °C	9,87	9,26	7,49	9,39	9,43	10,16	10,24	9,07	9,65	9,53

Mess- und Analysemethoden

Zur Messung der Erträge wurden innerhalb eines Blockes jeweils 5 Flächenstücke a 10 m² abgeerntet, die Teilmengen gewogen und davon die Trockenmasse bestimmt. Von der Gesamtmenge wurde eine Mischprobe entnommen und nach den gängigen VDLUFA-Methoden in einem lizenzierten Labor insgesamt 5 Nährstoffe (N, P, K, S, Cl) und 6 Schwermetalle (Cd, Zn, Pb, Cu, Mn, Fe) bestimmt.

Die 25 Parameter des Bodens und die Inhaltsstoffe der Düngemittel sind nach derzeit üblichen, überwiegend nach DIN-Methoden bestimmt worden. Die Bodenproben wurden mit einem Bohrstock aus 0 - 25 cm bzw. 0 - 90 cm Tiefe entnommen, wobei für die jährlich im Herbst durchgeführte Vollanalyse des Oberbodens jeweils 5 Einzelproben pro Block zu einer Mischprobe vereinigt wurden (Scholz, Krüger, Höhn et al., 1999).

Die natürlichen und die durch Düngung induzierten Gasflüsse (N₂O, CH₄, CO₂) zwischen Boden und Atmosphäre werden über Gasflussskammern und gaschromatographischer Konzentrationsbestimmung an 24 Messstellen viermal wöchentlich erfasst (Hellebrand und Scholz, 2000).

Ertrag

Halmgüter

Die Erträge bestimmen in besonderem Maße die Energieeffizienz einer Kultur. Auf den hochgedüngten Flächen (Block A) erreichen Hanf mit 11,8 t_{TM}/ha sowie Winterroggen, Knautgras und Wintertriticale mit 8,5 bis 9,4 t_{TM}/ha die höchsten Ganzpflanzenerträge der Halmgüter, wobei mit einer die vergleichende Bilanzierung vereinfachenden Einheitsgabe von 150 kg N/ha nicht in jedem Fall bedarfsgerecht gedüngt wurde. Bei perennierendem Roggen fällt der Ertrag erwartungsgemäß ab, und zwar von 10,2 auf 5,9 t_{TM}/ha innerhalb von 3 Jahren. Die insgesamt niedrigsten Erträge weist das ursprünglich vielversprechende Topinamburkraut auf (4,3 t_{TM}/ha). Bei diesem Kraut verringert sich im Laufe der Jahre mit zunehmender Knollenzahl die Stabilität der Halme, was die mechanisierte Krauternte erschwert. Ohne Ernte der Knollen ist der Krautertrag im groben Mittel etwa 1,0 t_{TM}/ha höher als hier angegeben (Abbildung 2).

Trotz des konsequenten Verzichts auf Pflanzenschutzmittel hielten sich Schädlingsbefall und Pflanzenkrankheiten in Grenzen und hatten keine nachweisbaren Ertragsdepressionen zur Folge. Da bei der Energiepflanzenproduktion die Un- bzw. Beikräuter in der Regel mit geerntet werden, sind die Ertragseinbußen gegenüber einem unkrautfreien Bestand unerheblich (Karpenstein-Machan, 2000).

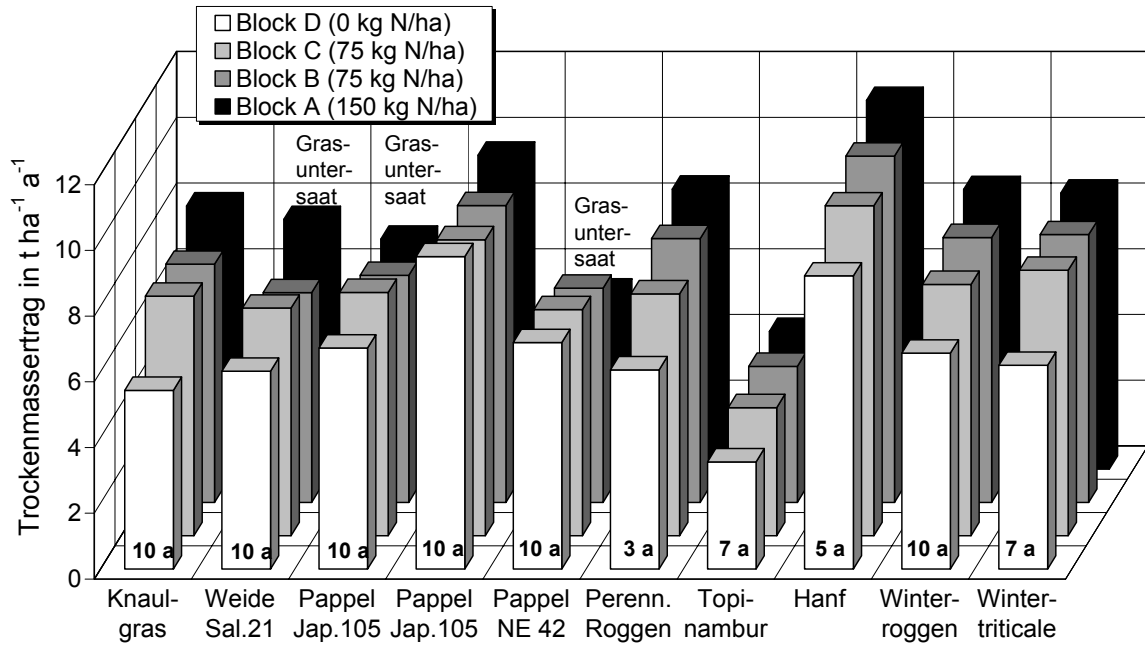


Abbildung 2: Mehrjähriges Ertragsmittel der untersuchten Energiepflanzen (1994 bis 2003)

Bezogen auf die Stickstoffgabe von 150 kg N/ha (Block A) verringern sich die Erträge der halmgutartigen Energiepflanzen bei 75 kg N/ha (Block B/C) im zehnjährigen Durchschnitt um lediglich 8 % (ohne 2003). Der außergewöhnlich hohe Ertragsrückgang im Jahre 2003 ist auf geringe Niederschläge zurückzuführen (Abbildung 3).

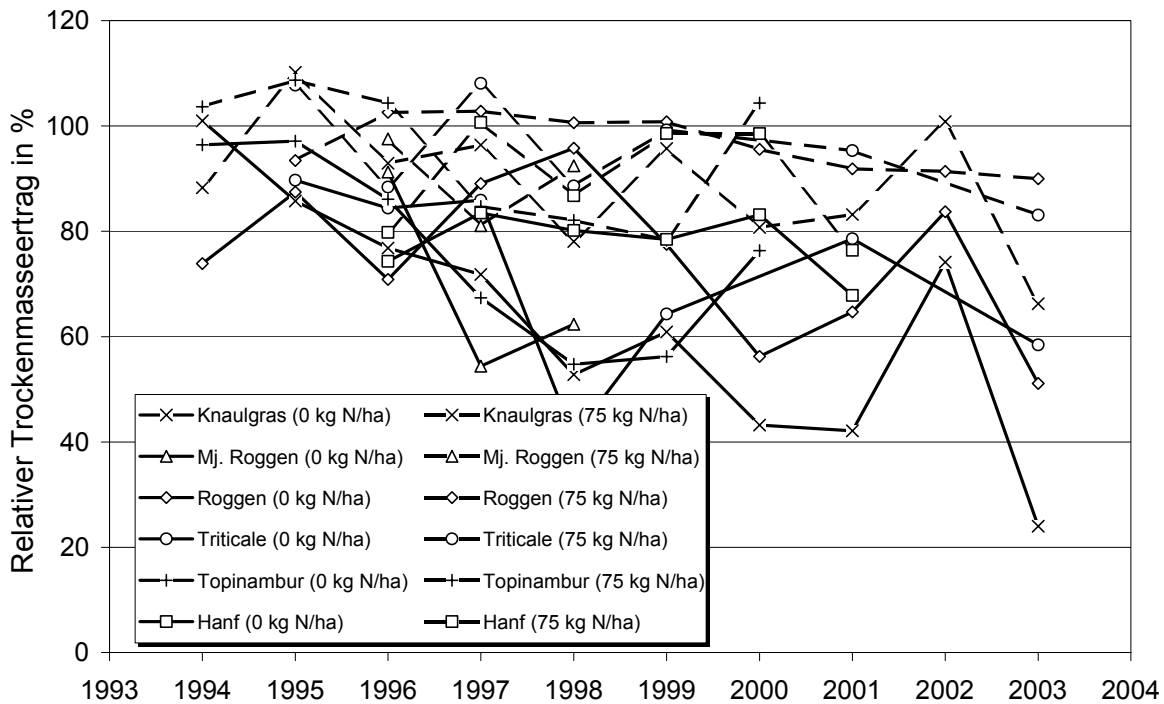


Abbildung 3: Relativer Ertrag der halmgutartigen Energiepflanzen bei reduzierter Stickstoffdüngung bezogen auf den Ertrag bei einer Stickstoffgabe von 150 kg/ha

Das heißt, auf dem vorliegenden Standort können die betreffenden Pflanzenarten auch bei einer mehrjährig reduzierten Stickstoffversorgung relativ hohe Erträge gewährleisten. Eine gänzlich unterlassene Düngung (Block D) verursacht demgegenüber einen Ertragsrückgang nach 10 Jahren um mindestens 20 % bis 60 %, was sich bezüglich des Stickstoffeinsatzes mit den Ergebnissen von Kundler et al. (1970), Pickert (2000) u.a. deckt.

Schnellwachsende Baumarten

Bei schnellwachsenden Baumarten, den sog. Kurzumtriebs- oder Feldgehölzen, wurden neben Baumart, Untersaat und Düngung auch das Rotationsintervall (Umschlagszeit) variiert. Die rechte Parzellenhälfte wurde alle 2 Jahre und die linke Hälfte alle 4 Jahre geerntet. Die gemessenen Erträge weisen eine außerordentliche Spanne auf und werden weniger von der Düngergabe als vielmehr von Untersaat und Alter des Bestandes bestimmt (Abbildung 4).

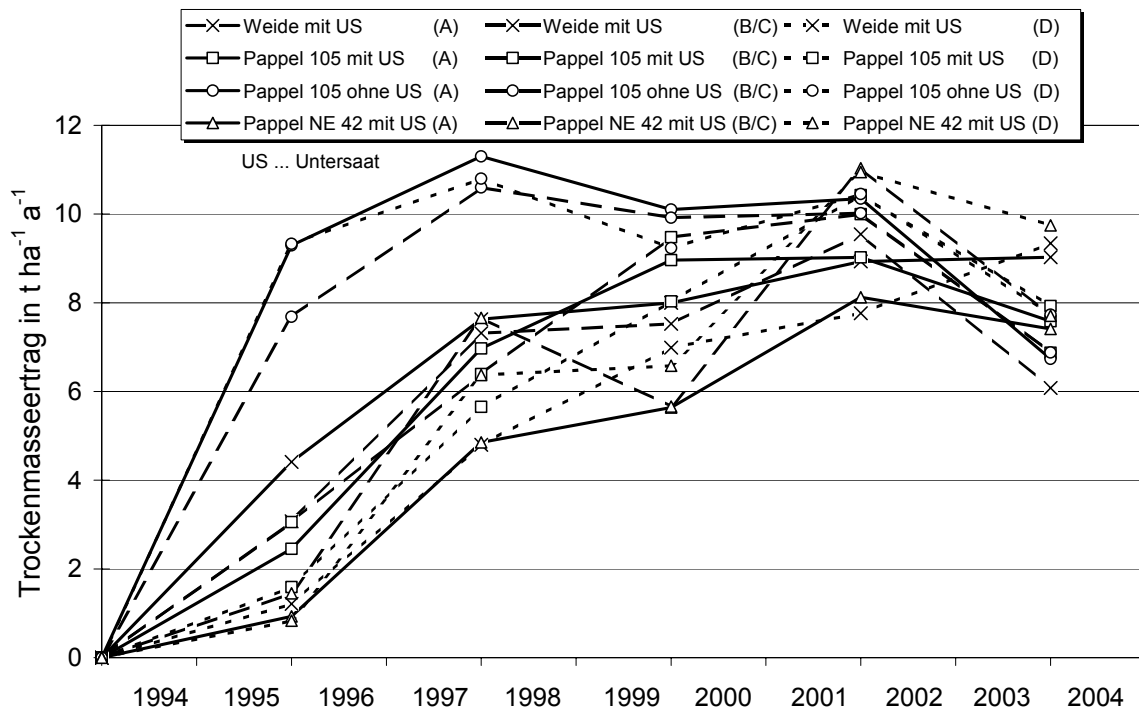


Abbildung 4: Ertragsentwicklung von Pappel und Weide in zweijährigem Rotationsintervall

Die Untersaat erweist sich als erheblicher Wasser- und Nährstoffkonkurrent, der bei dem leistungsfähigen Balsampappelhybrid Japan 105 in den ersten 4 Jahren je nach Düngungsregime und Rotationsintervall eine Ertragseinbuße von 10 bis 65 % bewirkt. Im Gegensatz zu Weide wird jedoch bei Pappel die Untersaat (aber auch das Unkraut) durch das großflächige Laub unterdrückt, so dass sich die Ertragsdifferenz im Laufe der Zeit verringert. Übrigens zeigen Untersuchungen zum Laufkäferbesatz, dass die Untersaat offenbar keinen oder nur geringfügigen Einfluss auf die Artenvielfalt der Fauna hat (Scholz, V., Krüger, K., Höhn, A. et al., 1999).

Zum Einfluss des Alters und der Rotationsdauer sind aus einem 10jährigen Bestand noch keine gesicherten Aussagen ableitbar. Allerdings ist festzustellen, dass nach etwa 4 Jahren der Ertragszuwachs eine gewisse Konstanz aufweist, und keine

wesentlichen Unterschiede zwischen dem 2- und 4jährigem Rotations- bzw. Ernteintervall messbar sind. Der Ertragsrückgang im letzten Jahr ist auf die extrem trockene Vegetationsperiode des Jahres 2003 zurückzuführen.

Der Einfluss der Düngung auf den Ertrag ist bei Pappel weit weniger ausgeprägt als bei Weide oder gar bei Halmgütern. Abgesehen von der Pappelsorte NE 42, die bereits im ersten Jahr eine extrem hohe Mortalitätsrate aufweist, beträgt der Ertragsverlust der Pappeln bei Nulldüngung (Block D) gegenüber der Hochdüngung (Block A) im zehnjährigen Mittel ca. 4 % mit Grasuntersaat und knapp 1 % ohne Untersaat. Diese Ergebnisse decken sich mit Aussagen in der Literatur, wonach im Gegensatz zu Weide die Pappeln (ohne Untersaat) auf ursprünglich gut versorgten Ackerflächen zumindest in den ersten 10 Jahren keine Düngung benötigen (Rehfuess, 1995) (Hofmann, 1999). Die Ursachen dieser außergewöhnlichen Anspruchlosigkeit von Pappeln werden in Anpassungsstrategien, N-Verlagerungsprozessen, Mykorrhizen u.ä. vermutet (Bungart, 1999).

Tabelle 3: Entwicklung der Mortalitätsrate von Pappeln und Weiden im 2 und 4 jährigen Rotationsintervall bei unterschiedlichen Düngungsregimen

Spezies und Düngungsvariante	Fehlstellen in %								
	1995 2 a	Nov. 1997 4 a	Nov. 1999 2 a	Nov. 1999 4 a	Nov. 2001 2 a	Nov. 2001 4 a	Nov. 2003 2 a	Nov. 2003 4 a	
Weide Sal. vim. mit US									
Block A (150 kg N/ha)	6,8	3,2	9,6	3,5	8,8	6,4	19,9	22,4	30,7
Block B (75 kg N/ha)	5,6	3,7	7,2	3,7	6,9	6,9	14,1	32,8	36,3
Block C (75 kg N/ha)	5,2	5,3	7,7	5,3	8,3	8,2	13,0	34,9	21,1
Block D (kein Dünger)	8,9	4,2	9,9	4,0	9,3	6,4	11,7	10,4	12,0
Pappel Jap. 105 mit US									
Block A (150 kg N/ha)	36,0	37,3	36,0	36,0	34,9	51,9	40,7	47,7	48,8
Block B (75 kg N/ha)	28,0	32,3	26,9	32,5	26,7	35,4	30,3	48,3	38,4
Block C (75 kg N/ha)	20,0	26,1	17,3	25,6	17,9	26,3	25,5	26,1	27,7
Block D (kein Dünger)	17,7	12,8	21,6	13,6	20,5	14,6	19,6	17,3	21,3
Pappel Jap. 105 ohne US									
Block A (150 kg N/ha)	1,7	1,6	1,3	1,9	1,6	21,8	15,7	33,3	24,8
Block B (75 kg N/ha)	5,3	6,4	3,2	6,4	3,5	17,8	13,5	31,7	25,6
Block C (75 kg N/ha)	4,3	3,7	4,5	3,2	4,0	11,4	10,9	28,5	19,5
Block D (kein Dünger)	5,7	4,8	5,1	4,0	5,6	10,1	8,8	20,3	14,9
Pappel NE 42 mit US									
Block A (150 kg N/ha)	61,3	66,4	61,3	66,7	61,6	64,6	61,6	75,2	63,7
Block B (75 kg N/ha)	37,2	35,7	37,9	34,9	37,1	39,9	41,7	46,7	44,3
Block C (75 kg N/ha)	37,6	36,3	38,9	36,5	38,7	39,9	35,6	45,9	41,1
Block D (kein Dünger)	32,0	40,0	23,5	38,9	22,9	40,1	20,7	40,8	26,1

US ... Untersaat

Interessant ist, dass eine hohe Mortalitäts-, bzw. Fehlstellenrate keine adäquate Ertragsminderung zur Folge hat. Das könnte bedeuten, dass auch Bestandesdichten unter 12.000 Stecklingen pro Hektar hohe Erträge gewährleisten. Allerdings spielt hier auch der Zeitfaktor eine Rolle. Die Fehlstellenrate nimmt mit Ausnahme der Pappel NE 42, die bereits im zweiten Jahr Raten von 30 bis 65 % aufweist, kontinuierlich zu. Sie scheint weniger vom Rotationsintervall abhängig zu sein, als vielmehr von Untersaat und Düngung. So hat die Pappel Japan 105 ohne Grasuntersaat deutlich weniger Fehlstellen als mit Untersaat. Aufgrund günstiger Wachstumsbedingungen für die Konkurrenzflora, insbesondere der Brennnessel, ist sie auf den hochge-

düngten Blöcken (A) nach 8 Jahren im groben Schnitt etwa doppelt so hoch, wie auf den ungedüngten Blöcken (D) und erreicht hier - ohne NE 42 - Werte zwischen 20 und 50 % (Tabelle 3).

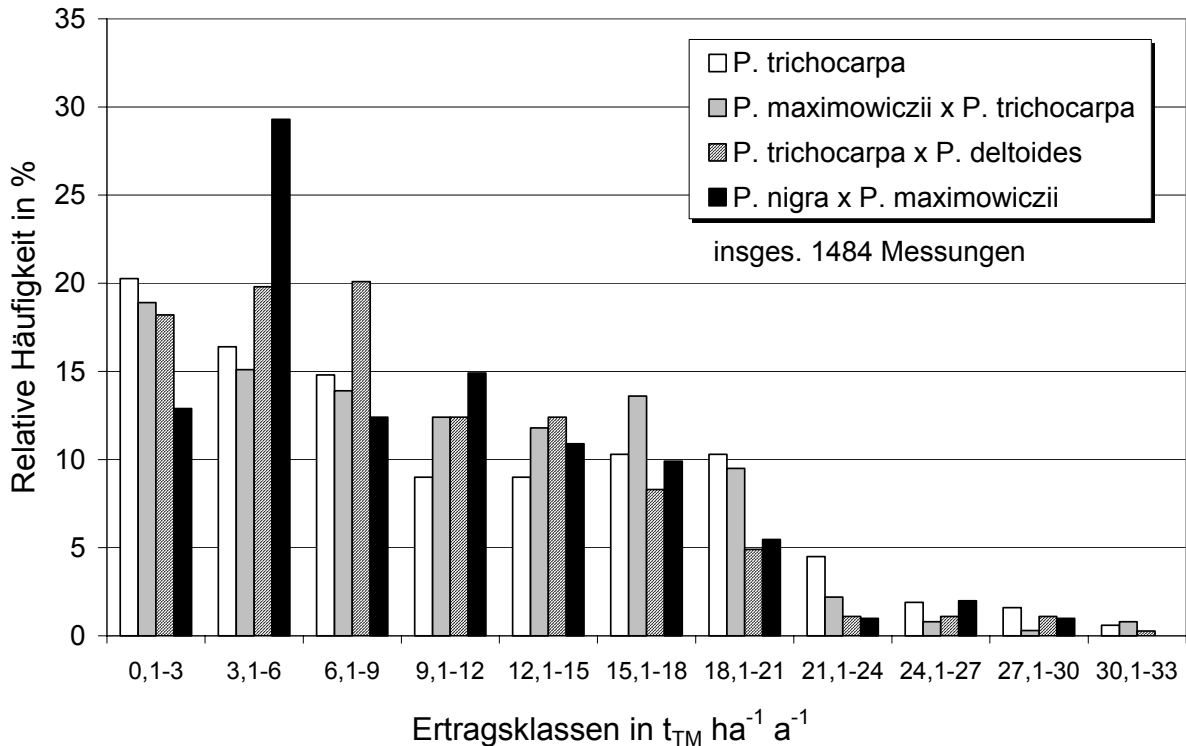


Abbildung 5: Erträge von Kurzumtriebspappeln in Europa (Kobus, 2000)

Die auf dem Versuchsstandort Bornim gemessenen Pappelerträge von etwa 9,5 $t_{TM}/(ha a)$ liegen im Mittelfeld der ca. 1500 auf unterschiedlichen Standorten in Europa ermittelten Erträge. Demnach können mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit bis etwa 18 t Trockenmasse pro ha und Jahr erreicht werden. Die Häufigkeitsmaxima unter 6 $t_{TM}/(ha a)$ sind höchstwahrscheinlich auf das geringe Alter der betreffenden Bestände zurückzuführen, was bei diesem relativ jungen Untersuchungsgegenstand nicht verwundern darf. Wie eine äquivalente Auswertung von ca. 90 Ertragsmessungen in verschiedenen europäischen Weidenpflanzungen zeigt, erreichen Weiden im Durchschnitt geringere Erträge als Pappeln (Abbildung 5).

Umweltrelevante Nährstoffe

Stickstoff

Die Umweltrelevanz von Pflanzennährstoffen resultiert einerseits aus den ökologischen Auswirkungen der Düngemittel (Emissionen in Atmosphäre und Hydrosphäre) und andererseits aus den Emissionen beim Verbrennen. Um die Schädwirkungen zu minimieren, werden in verschiedenen Verordnungen Grenzwerte für umweltschädigende Nährstoffe und Schwermetalle vorgegeben, die hilfreich bei der Bewertung der entsprechenden Anteile sind (Scholz and Ellerbrock, 2002).

Die Stickstoffgehalte (N_t) der verschiedenen Pflanzenarten weisen - wie auch in anderen Untersuchungen festgestellt wurde - eine außerordentliche Spannweite auf (Vetter, 1995; Kasper, 1997; Maier et al., 1997; Leitfaden Bioenergie, 2000; Hartmann, Böhm, Maier, 2000; Röhrich, Kiesewalter, Groß-Ophoff, 2002). Auf den gedüngten Blöcken A bis C erreichen Knaulgras, Getreide und Hanf mit 0,8 bis 1,7 % die höchsten mittleren N_t -Gehalte. Die Gehalte von Gehölzen und Topinamburkraut liegen mit 0,3 bis 0,8 % deutlich darunter. Die ermittelten Ergebnisse gestatten die Herleitung eines durch Regressionsanalyse bestätigten Zusammenhangs zwischen Düngung und Stickstoffgehalt der Pflanzen. Eine Stickstoffgabe von 150 kg/ha bewirkt demnach je nach Pflanzenart eine durchschnittliche Zunahme des N_t -Gehaltes von 0,1 bis 0,3 % (Scholz, Krüger und Höhn, 2001).

Unter Berücksichtigung des von Nussbaumer (1997), Obernberger (1997) und Hartmann und Schmid (2001) experimentell bestätigten Zusammenhangs zwischen dem Stickstoffgehalt des Brennstoffs und der Bildung von Stickoxiden (NO_x) bei der Verbrennung, wonach eine N_t -Erhöhung von 0,2 % eine NO_x -Zunahme um 5 bis 100 mg pro 1 m^3 Rauchgas verursacht, bewirkt eine Stickstoffgabe von 150 kg/ha im groben Mittel etwa 50 mg/m^3 zusätzliche NO_x -Emissionen, was bei einem gesetzlichen Grenzwert von 150 bzw. 400 mg/m^3 nicht unerheblich ist.

Wie mehrjährige Gasmessungen auf den Versuchsflächen zeigen, werden infolge der Stickstoffdüngung bei 150 kg N/ha außerdem jährlich bis zu 150 mg/m^2 zusätzliches Lachgas (N_2O) im Boden freigesetzt, das mit einem CO_2 -Äquivalent von ca. 300 extrem klimawirksam ist (Hellebrand, Kern und Scholz, 2003). Auch die Pflanzenart hat Einfluss auf die Lachgasentwicklung. Die mittleren Emissionsraten von Pappel- und Weidenflächen liegen etwa um etwa 80 bis 100 mg/m^2 unter denen der Roggenflächen (Abbildung 6).

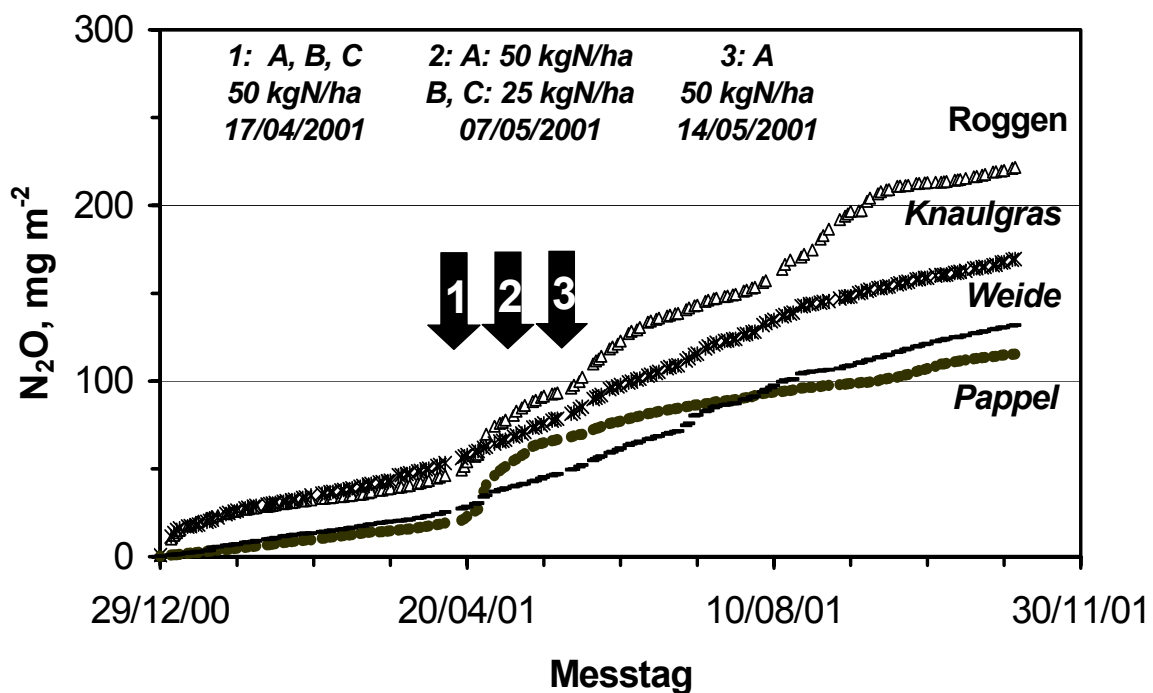


Abbildung 6: Mittlere akkumulierte Lachgasemissionen beim Anbau von Energiepflanzen in Anhängigkeit von der Pflanzenart im (Mittel aller Düngungsvarianten A bis D)

Damit sind die akkumulierten Lachgasemissionen auf ungedüngten Feldholzflächen (Block D) um etwa 200 mg/m² pro Jahr geringer als auf konventionell gedüngten Roggenflächen (Block A). Dies entspricht einem mittleren CO₂-Äquivalent von ca. 60 g pro 1 kg Trockenmasse des Brennstoffs (bei 10 t_{TM}/ha) und macht damit immerhin etwa 10 bis 30 % der anrechenbaren Gesamtemission klimawirksamer Gase bei der Erzeugung und Nutzung von pflanzlichen Festbrennstoffen aus (Scholz et al., 1997).

Phosphor und Kalium

Ähnlich wie bei Stickstoff zeigt sich auch bei Kalium (K) ein Zusammenhang zwischen den Gehalten in der Pflanze und im Boden. Neben Knautgras weisen Ganzpflanzengetreide und Hanf Werte > 0,85 % auf, Pappel und Weide hingegen < 0,45 %. Hohe Kaliumgehalte in der Pflanze führen bei der Verbrennung zu Korrosion an Überhitzungsflächen, bewirken geringe Ascheschmelztemperaturen (Schlackebildung) und sind daher in brennstoffliefernden Pflanzen unerwünscht.

Der Gehalt an Phosphor (P) ist im Knautgras und Getreide ebenfalls recht hoch (0,2 bis 0,3 %) und in Weide und Pappel, besonders aber in Topinamburkraut sehr niedrig (0,05 bis 0,15 %). Mit Ausnahme des in diesem Zusammenhang vernachlässigbaren Phosphorwasserstoffs hat dieses Element nach bisherigem Kenntnisstand jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Emissionen beim Verbrennen und bewirkt sogar eine Erhöhung der Ascheschmelztemperatur. Allerdings trägt Phosphor zur Eutrophierung der Gewässer bei. Insofern ist ein geringer P-Bedarf der Pflanzen, der zwangsläufig eine geringere Düngergabe erfordert, ökologisch als vorteilhaft zu bewerten.

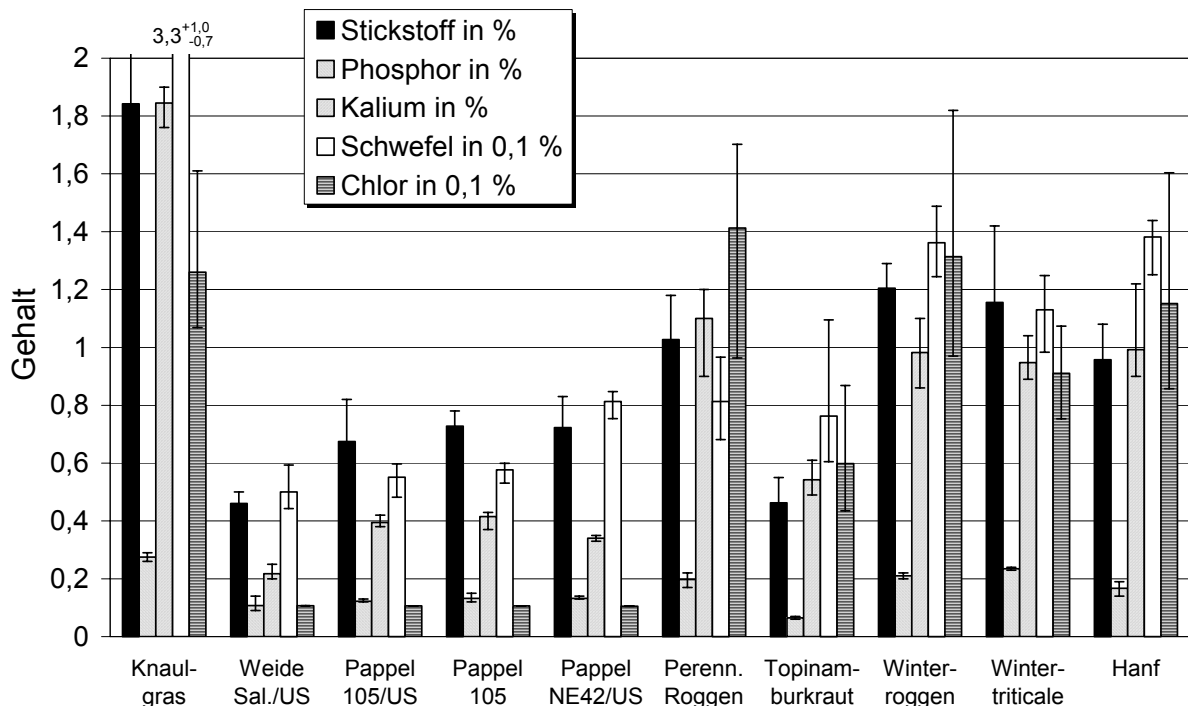


Abbildung 7: Umweltrelevante Nährstoffe in Energiepflanzen

Schwefel und Chlor

Die Gehalte dieser beiden Nährstoffe liegen in der Spanne der Literaturangaben (Oberberger, 1997; Vetter, 1995; Maier et al., 1997; Kasper, 1997; Leitfaden Bioenergie, 2000; Hartmann, Böhm, Maier, 2000), lediglich der Schwefelgehalt von Knautgras weist höhere Werte auf. Diese Kultur zeichnet sich im übrigen auch durch einen sehr hohen Chlorgehalt aus. Die beiden winterannualen Getreidearten und Hanf erreichen mit 0,10 bis 0,14 % Schwefel (S) und 0,08 bis 0,16 % Chlor (Cl) ebenfalls recht hohe Werte. Die insgesamt geringsten Gehalte weisen die Gehölze mit 0,04 bis 0,08 % S und 0,01 % Cl auf.

Der Schwefelgehalt der Pflanzen ist offenbar auch von der Düngung abhängig. Auf den Blöcken A, denen in Form von mineralischem Grunddünger deutlich mehr Schwefel zugeführt wurde als den übrigen Blöcken, sind mit Ausnahme von Knautgras die Gehalte im Mittel um 14 % bzw. 18 % höher als auf den Blöcken B/C und D. Bei Chlor ist eher eine gegenläufige Tendenz festzustellen.

Der in den Pflanzen enthaltene Schwefel geht bei der Verbrennung unter Bildung von Schwefeloxiden (SO_2 und SO_3) in die Gasphase über, gelangt in die Atmosphäre und trägt somit zur Versauerung der Böden und Gewässer bei. Chlor bildet Chlorkohlenwasserstoff (HCl) und hochtoxische polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD/F). Daher werden vom Gesetzgeber entsprechende Emissionsgrenzwerte vorgegeben (TA Luft, 2002). Außerdem begünstigen beide Elemente die Korrosion der Wärmetauscherrohre im Kessel.

Umweltrelevante Schwermetalle

Von den in Boden und Pflanzen analysierten Schwermetallen interessieren in diesem Zusammenhang insbesondere diejenigen, deren Akkumulation durch energiebedingte Immissionen und/oder durch Einträge aus Düngemitteln verursacht wird und deren Emissionen gesetzlich limitiert sind, nämlich Kadmium (Cd), Blei (Pb), Kupfer (Cu) und Zink (Zn). Trotz Streuung der Messwerte, die - wie in der Praxis üblich - auf lokale Heterogenitäten im Boden zurückzuführen ist, und nur begrenzte Aussagen hinsichtlich der Wirkung der Düngemittel erlaubt, lassen sich eine Reihe interessanter Schlussfolgerungen ziehen.

Kadmium

Dieses bei der Verhüttung und bei der Verbrennung fossiler Rohstoffe anfallende und in Superphosphat und z.T. auch in Biomasseasche enthaltene Schwermetall ist phytotoxisch und kann u. a. zu Nierenfunktionsstörungen und Knochenschäden führen (Merian, 1991). Mit mittleren Gehalten von 1,2 bis 2,2 mg je kg Trockenmasse wird es bevorzugt von Pappeln und Weiden absorbiert, was auch auf anderen Standorten festgestellt wurde (Oberberger, 1997; Kayser, Schulin, Felix, 1999; Klang, Eriksson, Perttu, 1999; Hartmann, Böhm, Maier, 2000). Ganzpflanzengetreide wie Roggen und Triticale, die konventionell als Nahrungs- und Futtermittel verwendet werden, weisen deutlich geringere Gehalte von 0,03 bis 0,08 mg/kg_{TM} auf. Knautgras und Topinamburkraut ordnen sich dazwischen ein. Entsprechend sind die Bilanzen. Während die Gehölze ein negatives Saldo aufweisen, also dem Boden deutlich mehr Kadmium entziehen, als durch Düngemittel, Deposition und Verwitterung eingetragen wird, haben die beiden Getreidearten positive Saldi (Tabelle 4).

Blei

Hauptquelle der anthropogenen Bleiemissionen ist der Kraftfahrzeugverkehr. Vergiftungen führen beim Menschen unter anderem zu Schädigungen des Nervensystems und der Nieren (Merian, 1991). Blei wird bevorzugt von Knautgras aufgenommen. Der Gehalt in der Pflanzenmasse erreicht hier Werte von über 5 mg/kg, während der mittlere Bleigehalt der übrigen Pflanzenarten mit Ausnahme von z.T. Triticale unter der Nachweisgrenze von 1 mg/kg bleibt. Das Bilanzsaldo zeigt, daß Knautgras, Getreide und Topinambur zwar Blei in höherem Maße aufnehmen als die untersuchten Feldgehölze, dennoch mit der abgeschätzten atmosphärischen Deposition langfristig keine Dekontamination des Bodens bewirken. Die Ursachen hierfür sind einerseits der relativ niedrige Gehalt im vorliegenden Boden und andererseits die geringe Mobilität und die geringe Pflanzenverfügbarkeit dieses Schwermetalls.

Tabelle 4: Gehalt und Bilanz ausgewählter Schwermetalle für die untersuchten Energiepflanzen (Mittelwerte der Jahre 1994 bis 1997)

Pflanzenart	Parameter	Kadmium		Blei		Kupfer		Zink	
		mittel	max min	mittel	max min	mittel	max min	mittel	max min
Knautgras	Gehalt mg kg ⁻¹	0,76	1,57 0,36	5,08	5,80 3,80	15,6	22,60 11,80	82,0	135 46
	Bilanz mg m ⁻² a ⁻¹	-0,48	-0,10 -1,07	0,83	1,66 0,13	-10,0	-7,10 -13,90	-39,5	-11 -74
Weide	Gehalt mg kg ⁻¹	1,62	2,18 1,32	1,00	1,00 1,00	3,68	3,90 3,40	91,5	105 82
	Bilanz mg m ⁻² a ⁻¹	-0,61	-0,54 -0,78	4,75	4,79 4,71	1,82	1,95 1,66	-13,5	-9 -17
Pappel ¹⁾	Gehalt mg kg ⁻¹	1,16	1,35 0,82	1,00	1,00 1,00	2,88	3,40 2,60	53	58 43
	Bilanz mg m ⁻² a ⁻¹	-0,71	-0,56 -1,07	4,48	4,63 4,32	1,46	2,03 1,00	-8,8	-1 -20
Topinamburkraut	Gehalt mg kg ⁻¹	0,43	0,73 0,25	1,00	1,00 1,00	2,90	3,50 2,70	44,2	67 25
	Bilanz mg m ⁻² a ⁻¹	-0,02	0,04 -0,07	4,82	4,83 4,80	2,41	2,64 2,08	12,4	21 3
Winterroggen	Gehalt mg kg ⁻¹	0,04	0,06 0,03	1,00	1,00 1,00	4,42	4,70 3,80	23,7	32 15
	Bilanz mg m ⁻² a ⁻¹	0,13	0,18 0,11	4,23	4,34 4,17	-0,87	0,17 -1,43	6,7	17 -2
Wintertriticale	Gehalt mg kg ⁻¹	0,06	0,08 0,04	1,60	2,60 1,00	6,20	6,80 5,20	49,0	66 39
	Bilanz mg m ⁻² a ⁻¹	0,12	0,19 0,08	3,86	4,40 2,92	-1,74	-0,59 -2,56	-10,2	-3 -21

Das Bilanzsaldo ergibt sich aus Einträgen durch Düngemittel, Verwitterung* und atmosphärische Deposition* abzüglich der Austräge durch Auswaschung* und Erntegut, wobei die mit Stern (*) markierten Anteile nach Wilcke und Döhler (1995) kalkuliert sind.

1) Pappel Japan 105 sowohl mit als auch ohne Grasuntersaat

Zink und Kupfer

Diese beiden Schwermetalle werden ebenso wie die vorgenannten Metalle bei der Verhüttung freigesetzt. Zink ist darüber hinaus im Reifenabrieb, Motoröl und im Rauchgas von Kohlefeuerungsanlagen enthalten und Kupfer in Strom- und Wasserleitungen. Charakteristisch für beide Metalle ist, dass sie sowohl essentiell als auch

toxisch sind, eine erhöhte Aufnahme jedoch kein schwerwiegendes Gesundheitsrisiko für den Menschen darstellt (Merian, 1991). Der mittlere Zinkgehalt der Pflanzen bewegt sich zwischen 15 mg/kg_{TM} (Roggen) und 135 mg/kg_{TM} (Knautgras). Mit Ausnahme von Triticale und z.T. Roggen weisen alle übrigen Pflanzenarten eine eindeutig negative Bilanz auf und bewirken somit eine nachhaltige Zn-Reduktion im Boden, was in diesem Fall von Vorteil ist, da die Versuchsfläche nach den Rahmenempfehlungen zur Düngung im Land Brandenburg (MELF, 1997) einen deutlichen Zinküberschuss aufweist.

Kupfer, dessen Gehalt in den Pflanzen zwischen 2,6 mg/kg_{TM} (Pappel) und 22,6 mg/kg_{TM} (Knautgras) variiert, hat demgegenüber überwiegend positive Saldi. Lediglich Knautgras, Triticale und z.T. Roggen weisen eine negative Bilanz auf. Generell ist anzumerken, dass beide Metalle zu den Mikronährstoffen zählen und die Gehalte im Boden trotz relativ hoher Werte noch deutlich unter der Toleranzschwelle von 200 ppm für Zink und 60 ppm für Kupfer liegen (Klärschlammverordnung BGBl. I, 1997).

Energiegewinn

Zur Bestimmung der energetischen Effizienz und des Energiegewinns der Produktion und Nutzung von Energiepflanzen müssen Aufwand und Ertrag an Energie ermittelt und gegenübergestellt werden. Die Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes KEA erfolgt nach einer aufwendigen, bereits früher erläuterten Methode (Scholz, 1997), die sämtliche direkten und indirekten Primärenergieaufwendungen anteilmäßig berücksichtigt, z. B. auch für die Herstellung von landwirtschaftlichen Maschinen und Düngemitteln. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden landwirtschaftliche Verfahren angenommen, wie sie in der Praxis üblich oder künftig zu erwarten sind und bezogen auf den Anbauzyklus der jeweiligen Kultur alle Arbeitsgänge von der Bodenvorbereitung bis zur Ernte bilanziert.

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) für Anbau und Ernte der hier untersuchten Energiepflanzen beträgt bei hoher bzw. konventioneller Düngung (Block A) etwa 10 bis 14 GJ/(ha·a) und liegt damit in der weiten Spanne der Literaturangaben (Hofmann, 1999; Maier et al., 1997; Scholz, Berg, Kaulfuß, 1998; Kaltschmitt, Reinhardt, 1997). Die geringsten Energieaufwendungen verursachen Pappeln und Weiden mit ca. 10 GJ/(ha·a). Die höchsten Aufwendungen erfordern Roggen, Triticale und Hanf mit 13 bis 14 GJ/(ha·a). Generell gilt, dass sich mit längeren Produktionszyklen und Ernteintervallen der Energieaufwand pro Jahr verringert, so dass mehrjährige Kulturen i.d.R. geringere Aufwendungen erfordern. Nachernteprozesse würden je nach Kultur und Technologie weitere 2 bis 6 GJ/ha erfordern (Scholz, 1997).

Aufgrund der energieintensiven Herstellung von Stickstoffdünger hat die Verringerung seines Einsatzes erhebliche Auswirkungen auf den kumulierten Energieaufwand. Gegenüber 150 kg N/(ha·a) (Block A) reduziert sich dieser bei Nulldüngung (Block D) um 9,4 GJ/(ha·a), so dass ohne Düngung lediglich 0,5 bis 4,5 GJ pro ha und Jahr für Anbau und Ernte der untersuchten Energiepflanzen benötigt werden. Der extrem geringe Wert für Feldholz resultiert aus dem langen Produktionszyklus von 20 Jahren und dem Ernteintervall von 4 Jahren.

Der Energieertrag (EE), der mit Hilfe des Naturalertrags, des Heizwertes und des Wassergehaltes des lagerfähigen Pflanzenmaterials berechnet wird, ist von Pflanzenart, Untersaat und Düngung abhängig. Werden die extrem ertragsschwachen Versuchsglieder, wie Topinamburkraut und Feldgehölze mit Untersaat, außer Acht gelassen, so liegt der Energieertrag im Bereich von 100 bis 190 GJ/(ha·a) und

entspricht damit einem Öläquivalent von 2.700 bis 5.100 Liter pro Hektar und Jahr (Abbildung 8).

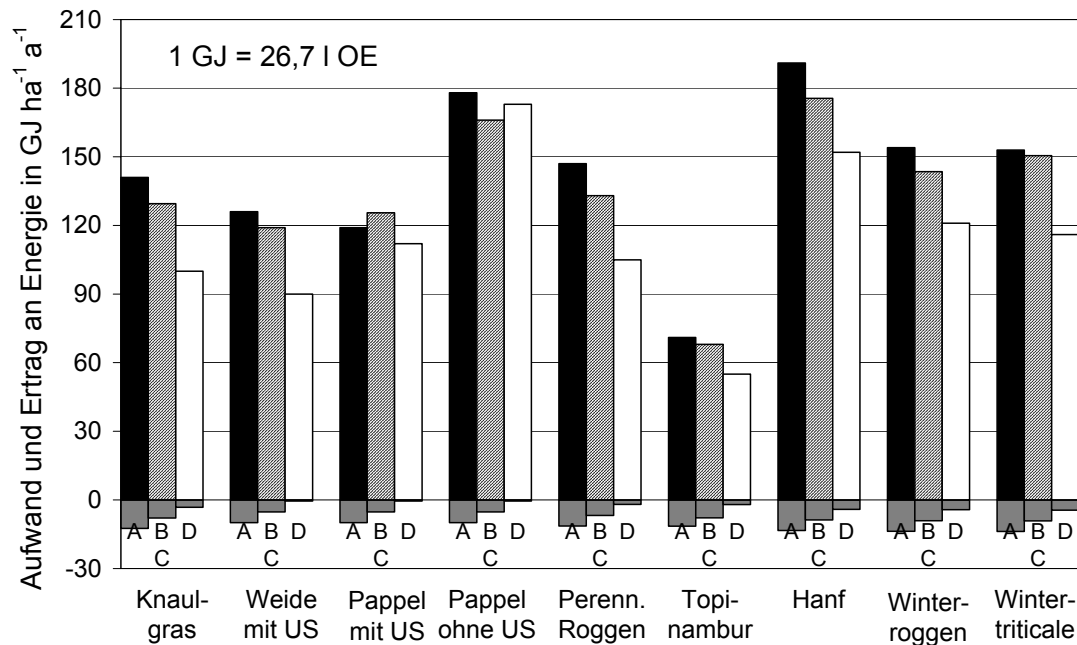


Abbildung 8: Aufwand und Ertrag an Energie beim Anbau von Energiepflanzen in Abhängigkeit von der Düngung

Das Verhältnis von Aufwand (KEA) zu Ertrag (EE) an Energie kennzeichnet die energetische Effizienz eines Verfahrens oder einer Kultur. In dem zugrunde gelegten Bilanzraum beträgt dieses Verhältnis für die hier untersuchten Kulturen und Düngungsvarianten $KEA / EE = 0,01 \dots 0,18$. Das heißt, dass nur 1 bis 18 % des Energiegehaltes der Pflanzen für deren Anbau und Ernte eingesetzt werden müssen. Der günstigste, d. h. geringste Wert wird mit Pappel Japan 105 ohne Untersaat und ohne Düngung erreicht.

Im Gegensatz zu anderen erneuerbaren Energieträgern ist bei Energiepflanzen jedoch weniger das Input/Output-Verhältnis, sondern vielmehr der Energiegewinn maßgebend, weil die Verfügbarkeit von Flächen für den Anbau begrenzt ist. Der jährliche (Netto-) Energiegewinn, der sich aus der Differenz von Aufwand (KEA) zu Ertrag (EE) ergibt, liegt bei Getreide, Knautgras und Hanf unabhängig von der Düngungsvariante zwischen 97 und 176 GJ/(ha·a). Pappel Japan 105 ohne Untersaat erreicht mit 161 bis 172 GJ/(ha·a) ebenfalls hohe Energiegewinne, wobei der Energiegewinn der düngungslosen Variante hier besonders hoch ist.

Mit Ausnahme der letztgenannten Kultur ist der Energiegewinn ohne Düngung (Block D) lediglich um 12 bis 25 % gegenüber der hohen Düngung (Block A) vermindert. Die Differenzen zwischen hoher und reduzierter Düngung (Block B/C) sind noch geringer. Das heißt, akzeptable Energiegewinne lassen sich i.d.R. mit erheblich reduzierter Stickstoffdüngung erzielen. Eine Erhöhung der Stickstoffgabe darüber hinaus bewirkt nur eine geringfügige Steigerung des Energiegewinns und ist demzufolge energetisch ineffizient.

Schlussfolgerungen

Die über 10 Jahre durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass beim Anbau von Energiepflanzen auf sandigen Böden der Düngemiteleininsatz erheblich reduziert und auf Pflanzenschutzmittel in der Regel verzichtet werden kann. Die mittleren Erträge an oberirdischer Pflanzenmasse liegen je nach Pflanzenart und Düngemiteleininsatz zwischen 3,3 und 11,2 t_{TM}/ha, wobei Hanf und Pappel die höchsten und Topinamburkraut sowie alle Feldgehölze mit Untersaat die geringsten Aufwuchsleistungen aufweisen. Wintertriticale und Winterroggen erreichen mittlere Ganzpflanzenerträge von 6,2 bis 8,5 t_{TM}/ha.

Bei einer Verringerung der Stickstoffgabe von 150 auf 75 kg N/ha reduziert sich der Ertrag nur geringfügig. Ohne Düngung fällt er kontinuierlich ab und erreicht nach 10 Jahren ca. 30 bis 80 % des entsprechenden Ertrags von 150 kg N/ha. Eine Ausnahme bildet Pappel Japan 105, die zumindest in den ersten 10 Jahren nach der Anpflanzung auf einer ackerbaulich genutzten Fläche auch ohne Düngemiteleininsatz hohe sichere Durchschnittserträge von über 9 t_{TM}/(ha·a) gewährleistet. Allerdings muss hierfür auf eine Grasuntersaat verzichtet werden, selbst wenn diese nach etwa 4 Jahren durch das großflächige Pappellaub ohnehin unterdrückt wird.

Eine Stickstoffgabe von 150 kg/ha ist i.d.R. energetisch ineffizient. Nachhaltig hohe Energieerträge werden auch mit Gaben von 75 kg N/ha und z.T. darunter realisiert. Mit Ausnahme von Topinamburkraut und Gehölzen mit Untersaat liegen die Nettoenergiegewinne bei reduzierter Stickstoffdüngung im Bereich von 2.600 bis 4.700 Liter Öläquivalent pro Hektar und Jahr und ohne Düngung bei Pappeln bei etwa 4.600 l/(ha a).

Neben dem hohen Natural- und Energieertrag sowie der Anspruchslosigkeit hinsichtlich Düngemittel- und Pestizideinsatz weisen Pappeln noch eine Reihe weiterer Vorzüge auf. Mit mittleren Gehalten von $\leq 0,8$ % N, $\leq 0,4$ % K, $\leq 0,08$ % S und $\leq 0,01$ % Cl gehören sie zu den Energiepflanzenarten, die bei der Verbrennung die geringsten Emissionen verursachen. Sie besitzen ebenso wie Weide ein außerordentlich hohes Akkumulationsvermögen an Schwermetall, insbesondere an Cadmium. Infolge der Aufkonzentrierung der Schwermetalle in der Filterasche kann selbst bei Rückführung der Rostasche als Düngemittel ein nachhaltiger Beitrag zur Dekontamination des Bodens geleistet werden. Holzasche ist ein wertvoller Grunddünger, der bis zu 80 % des durch die Pflanzen entzogenen Kaliums und nahezu 100 % des Phosphors enthält.

Arbeitswirtschaftliche und ökonomische Vorteile von Feldholz sind die Ernte im Winter, die zwischen 2 und 10 Jahren frei wählbaren Ernteintervalle und die Möglichkeit des subventionierten Anbaus auf Stilllegungsflächen. Der entscheidende Vorzug ist jedoch, dass es sich hierbei um einen Brennstoff handelt, für den im Gegensatz zu halmartigen Brennstoffen bewährte, emissionsminimierte Feuerungstechnologien bereits zur Verfügung stehen.

Weiterführende Untersuchungen sollten wegen der genannten Vorzüge und der geringen ackerbaulichen und technologischen Erfahrungen schwerpunktmäßig Feldgehölze zum Inhalt haben und sich insbesondere den langfristigen Auswirkungen des Anbaus auf Ertrag, Boden, Fauna und Morphologie der Gehölze widmen sowie die Nährstoff- und Schadstoffkreisläufe vollständig klären. Darüber hinaus sind kostengünstige und verlustarme Ernte- und Lagerungstechnologien zu entwickeln.

Literatur

- Bungart, R., 1999. Erzeugung von Biomasse zur energetischen Nutzung durch den Anbau schnellwachsender Baumarten auf Kippsubstraten des Lausitzer Braunkohlereviere unter besonderer Berücksichtigung der Nährelementversorgung und des Wasserhaushaltes. Dissertation, Brandenburg. Techn. Universität Cottbus
- El Bassam, N., 1998. Energy Plant Species. James & James Ltd London
- Hartmann, H. und V. Schmidt, 2001. NO_x-Emissionen in einer Hackschnitzelfeuerung. Persönliche Mitteilung, Landtechnik Weißenstephan
- Hartmann, H., Böhm, T. und L. Maier, 2000. Naturbelassene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Materialien 154, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München
- Hellebrand, H.J. und V. Scholz, 2000. Bestimmung bodenbürtiger Spurengasflüsse beim Anbau nachwachsender Rohstoffe. Agrartechnische Forschung 6 Nr. 4, S. 74-77
- Hellebrand, H.J., Kern, J. and V. Scholz, 2003. Long-term studies on the greenhouse gas fluxes during cultivation of energy crops on sandy soils. Atmospheric Environment 37 p. 1635-1644
- Hofmann, M., 1999. Modellvorhaben Schnellwachsende Baumarten. Zusammenfassender Abschlußbericht. In: Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 13, Münster
- Kaltschmitt, M. und G.A. Reinhardt, 1997. Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Verlag Vieweg, Braunschweig
- Karpenstein-Machan, M., 2000. Auswirkungen von pestizidfreiem Energiepflanzenanbau auf die Biomasseerträge (Teil II). Universität Kassel. energie pflanzen II/
- Kasper, B., 1997. Stoffwandlung und Logistik pflanzenbürtiger Festbrennstoffe in einer umweltgerechten Landnutzungsalternative für den Spreewald. Diss., Humboldt-Universität zu Berlin
- Kayser, A., Schulin, R. und H. Felix, 1999. Feldversuche zur Phytoremediation schwerbelasteter Böden. In: Pflanzenbelastung auf kontaminierten Standorten, Texte 1/99, Umweltbundesamt Berlin, S. 170-182
- Klang, E., Eriksson, J. und K. Perttu, 1999. The storage and fluxes of cadmium in the soil-salix system. In: Proceedings of the 5th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Wien 11./15.7.99, S. 674-675
- Klärschlammverordnung (1997) vom 15.04.1992 BGBl. I S. 912, zuletzt geändert am 6.3.1997 BGBl. I S. 446, Bundesanzeiger Köln
- Kobus, K., 2000. Vergleichende Untersuchungen zur Ertragsbildung von Energiepflanzen. Diplomarbeit, Universität Potsdam und ATB Potsdam
- Kundler, P. et al., 1970. Mineraldüngung. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin
- Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. (2000) Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. Gülzow
- Maier, J. et al., 1997. Anbau von Energiepflanzen – Ganzpflanzengewinnung mit verschiedenen Beerntungsmethoden (ein- und mehrjährige Pflanzenarten); Schwachholzverwertung. Abschlußbericht, Institut für umweltgerechte Landwirtschaft, Müllheim
- Merian, E., 1991. Metals and their Compounds in the Environment. VCH Verlagsgesellschaft Weinheim
- Nussbaumer, T., 1997. Primär- und Sekundärmaßnahmen zur NO_x-Minderung bei Biomassefeuerungen. VDI-Tagung Thermische Biomassenutzung, Salzburg 23./24.4.97, VDI-Bericht 1319, S.141-166

- Obernberger, I., 1997. Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente. Technische Universität Graz. In: Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung, Graz
- Pickert, J., 2000. Düngung ausgesetzt – Geld gespart? Aktuelle Beiträge zur Landwirtschaft, Schriftenreihe der LfL Brandenburg, Band III, S. 27-31
- Pfuhl, E., 1929. Die bodenkundliche Bewertung des Versuchsgutes Bornim bei Potsdam. Dissertation, Landwirtschaftliche Hochschule Berlin
- Rahmenempfehlung zur Düngung im Land Brandenburg. (1997) Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Brandenburg, Potsdam
- Rehfuess, K.E., 1995. Standortansprüche und Nährstoffbedarf schnellwachsender Baumarten in Kurzumtriebswirtschaft. In: Tagungsband zum Statusseminar Schnellwachsende Baumarten, Kassel 23./24.10.95
- Röhricht, C., Kiesevalter, S. und A. Groß-Ophoff, 2002. Acker- und pflanzenbauliche Untersuchungen zum Anbau ein- und mehrjähriger Energiepflanzen im Freistaat Sachsen. Schriftenreihe der Sächs. Landesanstalt für Landw. 7 Heft 7
- Scholz, V. and R. Ellerbrock, 2002. The growth productivity, and environmental impact of the cultivation of energy crops on sandy soil in Germany. Biomass and Energy 23 p. 81-92
- Scholz, V. et al., 1997. Energie aus Biomasse – Stand und Möglichkeiten der energetischen Nutzung von Biomasse im Land Brandenburg. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Brandenburg, Potsdam
- Scholz, V., Berg, W. and P. Kaulfuß, 1998. Energy Balance of Solid Biofuels. J. agric. Engng Res. 71, p. 263-272
- Scholz, V., Krüger, K. und A. Höhn, 2001. Vergleichende Untersuchungen zum umweltverträglichen und energieeffizienten Anbau von Energiepflanzen. Arch. Acker-Pfl. Boden 47 p. 333-361
- Scholz, V., Krüger, K., Höhn, A. et al., 1999. Umwelt- und technologiegerechter Anbau von Energiepflanzen. Forschungsbericht des ATB 1999/1, Potsdam-Bornim
- Scholz, V., 1997. Methodik zur Ermittlung des Energieaufwandes pflanzenbaulicher Produkte am Beispiel von Biofestbrennstoffen. Agrartechnische Forschung 3 H. 1, S.11-18
- TA Luft (2001) - Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Techn. Anleitung zur Reinhaltung der Luft). Bundesanz. Köln
- Vetter, A., 1995. Untersuchungen zum Einfluß der Brennstoffart und –qualität auf die Zusammensetzung der Reststoffe und deren Verwertung im Strohheizwerk Schkölen zur Sicherung der Umweltverträglichkeit. Abschlußbericht 12/1995, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft Jena
- Wilcke, W. und H. Döhler, 1995. Schwermetalle in der Landwirtschaft. KTBL-Arbeitspapier 217, Darmstadt