

# Umweltverträglicher Anbau von Energiepflanzen

Volkhard Scholz <sup>1</sup>, Karen Krüger <sup>2</sup> und Axel Höhn <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Potsdam

<sup>2</sup> Landesanstalt für Landwirtschaft Brandenburg (LfL), Güterfelde

<sup>3</sup> Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V. (ZALF), Müncheberg

*Energiepflanzen könnten in absehbarer Zukunft ein fester Bestandteil des Energiemixes der Bundesrepublik sein. Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß diese Pflanzen umweltverträglich produziert werden und der Ertrag an Energie den Aufwand rechtfertigt. In vorliegendem Beitrag werden Ergebnisse zum Anbau von 10 für die Verbrennung geeigneten Energiepflanzenarten vorgestellt. Über einen Zeitraum von 6 Jahren wurden unter praxisnahen Bedingungen Ertrag, Energiegewinn und umweltrelevante Stoffe in Pflanze und Boden ermittelt. Die Düngung erfolgte jeweils in 4 Varianten von 0 bis 150 kg N/ha und mit Holz- und Strohasche bzw. mineralischem Grunddünger. 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 12 t<sub>TM</sub>/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 6 Jahren um 20 bis 40 % ab, ausgenommen Pappel (ohne Untersaat), die mit etwa 10 t<sub>TM</sub>/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. Durch Düngemittel und energiebedingte Immissionen eingetragene Schwermetalle, wie Kadmium, Kupfer, Zink und Blei, werden unterschiedlich absorbiert, wobei die Gehölze in besonderem Maße zur Dekontamination des Bodens beitragen. Hohe Energieerträge werden mit Hanf, Pappel und Winterroggen erzielt. Auch bei reduzierter Stickstoffdüngung und mit Pappel selbst bei Nulldüngung werden Nettoenergiegewinne von über 3.200 Liter Öläquivalent pro Hektar und Jahr erreicht.*

## **Schlüsselwörter:**

Energiepflanze, Ertrag, Nährstoff, Schwermetall, Energieertrag

## **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, Standortadaption, Technologie, Erntefeuchte, Düngemittel- und Pflanzenschutzmittelbedarf etc. [1]. 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 relevant für Pflanzen, die bisher kaum oder in anderer Form angebaut und genutzt wurden, wie z.B. Ganzpflanzengetreide, Hanf und Feldgehölze. Bisherige Untersuchungen beziehen sich überwiegend auf spezielle Fragestellungen oder ausgewählte Pflanzenarten auf unterschiedlichen Standorten, so daß ein Quervergleich kaum möglich ist. Für die leichten sandigen Böden der Mark liegen mit Ausnahme von *Miscanthus sinensis* bisher noch keinerlei Ergebnisse vor.

In einem Verbundprojekt des Instituts für Agrartechnik Bornim, der Landesanstalt für Landwirtschaft Brandenburg und des Zentrums für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung wurde daher die ökologische Verträglichkeit und die energetische Effizienz beim Anbau verschiedener für die Verbrennung 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 4,1 ha ist es Teil eines zuvor konventionell genutzten Schlages, der bereits in den zwanziger Jahren bodenkundlich präzise analysiert und beschrieben wurde [2]. Es ist in 10 Langparzellen a 0,25 ha und diese wiederum in jeweils 4 Blöcke a 624 m<sup>2</sup> 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 Strohaschegabe sowie jeweils 75 kg N/ha, und Block D wird nicht gedüngt. Pflanzenschutzmittel kommen auf der gesamten Fläche nicht zum Einsatz (Bild 1).

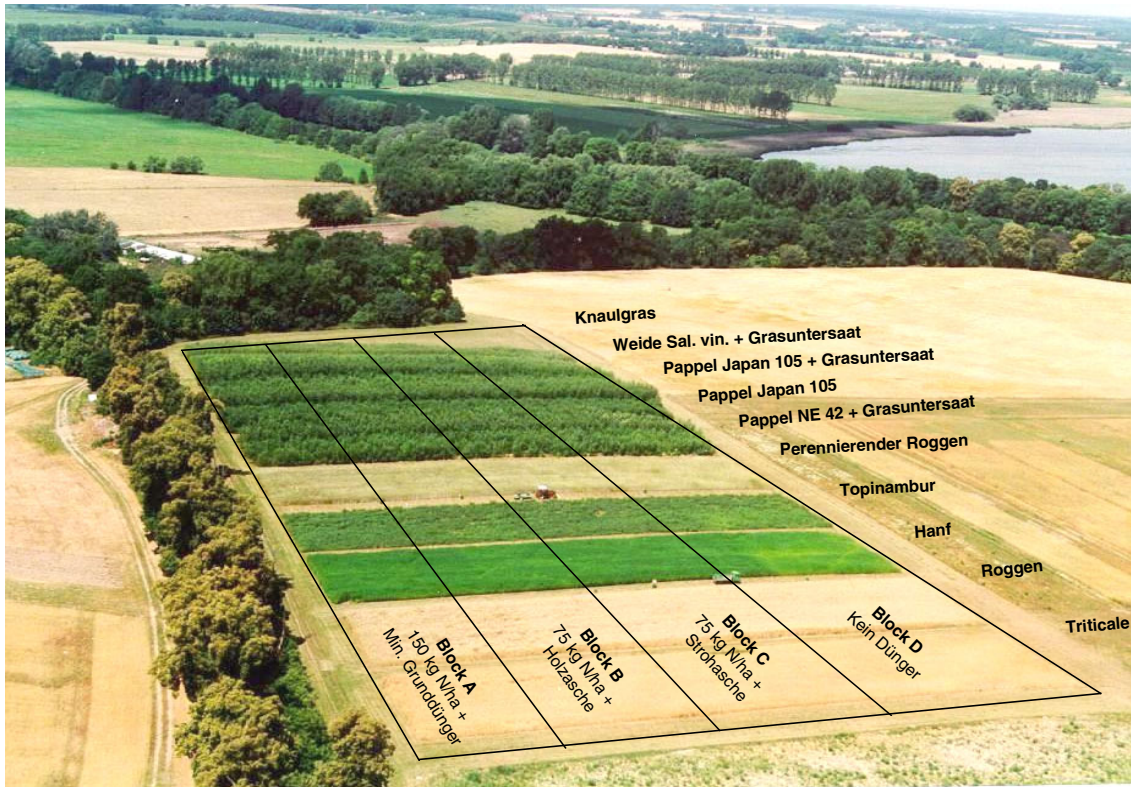


Bild 1: Struktur der Versuchsfeldes (1997)

Als Düngemittel werden 540 bzw. 270 kg/ha Kalkammonsalpeter und 520 kg Kamex-Superphosphat-Gemisch (1:1,1) sowie jeweils 660 kg Rostasche (Grobasche) von einer 4 MW-Holz- und einer 3 MW-Strohfeuerungsanlage verwendet. Während der Stickstoffdünger in 2 bis 3 Teilgaben jährlich ausgebracht wird, wurden die drei Grunddüngemittel zunächst nur im Etablierungsjahr 1994 eingesetzt, weil die Bodenanalysen der folgenden Jahre einen deutlichen Phosphor- und Kaliumüberschuß auswiesen.

Als Pflanzen werden ausschließlich für Verbrennung bzw. Vergasung geeignete Arten angebaut, wobei der Schwerpunkt auf perennierende Pflanzen, wie Knaulgras, 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).

Tabelle 1: Saat- und Pflanzgut

Parzelle	Art	Sorte	Saat-/Pflanzdichte
----------	-----	-------	--------------------

1	Knautgras	Lidacta	33 kg/ha
2	Weide	Salix viminalis 83/21/12	12000 Pfl./ha
3	Pappel	Japan 105 <sup>1)</sup>	12000 Pfl./ha
4	Pappel	Japan 105 <sup>1)</sup>	12000 Pfl./ha
5	Pappel	NE 42 <sup>2)</sup>	12000 Pfl./ha
6	Miscanthus x giganteus	Miscanthus sinensis	10000 Pfl./ha
6	Perennierender 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) Ähnlich der Mehrklonsorte Max; Kreuzung Populus maximowiczii x P. nigra

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

## Boden und Klima

Die Bodenwertzahl 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 [3].

Das Versuchsfeld liegt lt. KTBL-Nomenklatur im Klimagebiet 8, welches durch ein relativ ausgeglichenes Klima gekennzeichnet ist [4]. Dennoch traten im Versuchszeitraum 1994 bis 1999 erhebliche Differenzen im Jahresmittel der Temperaturen und Niederschläge auf. Die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur betrug 9,3 °C und die Niederschlagssumme 523 mm/a (Bild 2).

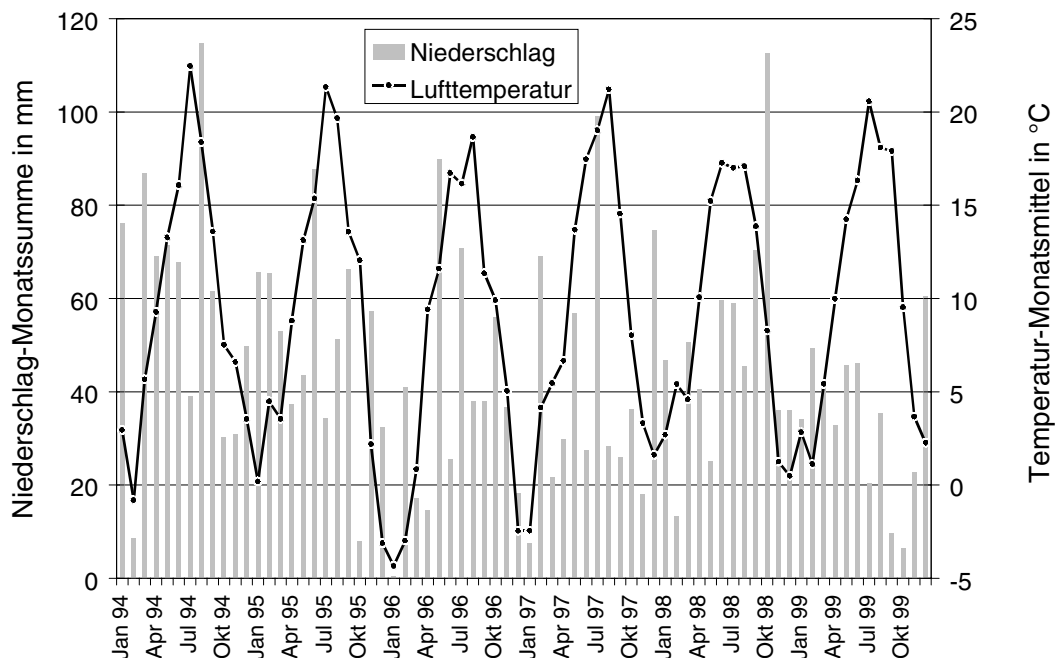


Bild 2: Temperatur und Niederschlag am Versuchsstandort

## **Meßmethoden**

Zur Messung der Erträge wurden innerhalb eines Blockes jeweils 5 Flächenstücke a 10 m<sup>2</sup> abgeerntet, die Teilmengen gewogen und davon je dreimal 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 ebenfalls 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 [3].

## **Aufwuchsleistung**

### **Halmgüter**

Die Erträge bestimmen in besonderem Maße die Energieeffizienz einer Kultur. Auf den hochgedüngten Flächen (A) erreichen Hanf mit 11,8 t<sub>TM</sub>/ha sowie Winterroggen, Knaulgras und Wintertriticale mit 8,5 bis 9,4 t<sub>TM</sub>/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<sub>TM</sub>/ha innerhalb von 3 Jahren. Die insgesamt niedrigsten Erträge weist das ursprünglich vielversprechende Topinamburkraut auf (4,3 t<sub>TM</sub>/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<sub>TM</sub>/ha höher als hier angegeben (Bild 3).

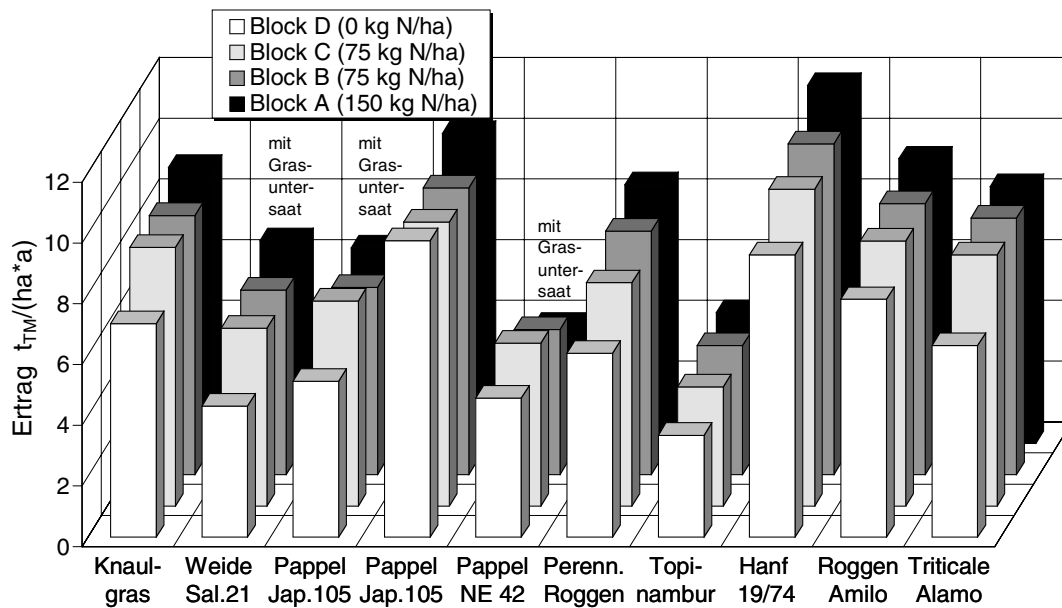


Bild 3: Mehrjähriges Ertragsmittel der untersuchten Energiepflanzen (1994 bis 1999)

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 Unkräuter in der Regel mit geerntet werden, sind die Ertragseinbußen gegenüber einem unkrautfreien Bestand unerheblich [5].

Bezogen auf die Stickstoffgabe von 150 kg N/ha (Block A) verringern sich die Erträge bei 75 kg N/ha (Block B und C) im sechsjährigen Durchschnitt um lediglich 6 % und weisen mit Ausnahme von Topinambur keine zeitabhängige Tendenz auf. 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 einen Ertragsrückgang um mindestens 20 % bis 40 % nach 6 Jahren, was sich bezüglich des Stickstoffeinsatzes etwa mit den Ergebnissen von Kundler et al. [6], Beer et al. [7], Diercks und Heitfuss [8] sowie Pickert [9] deckt (Bild 4).

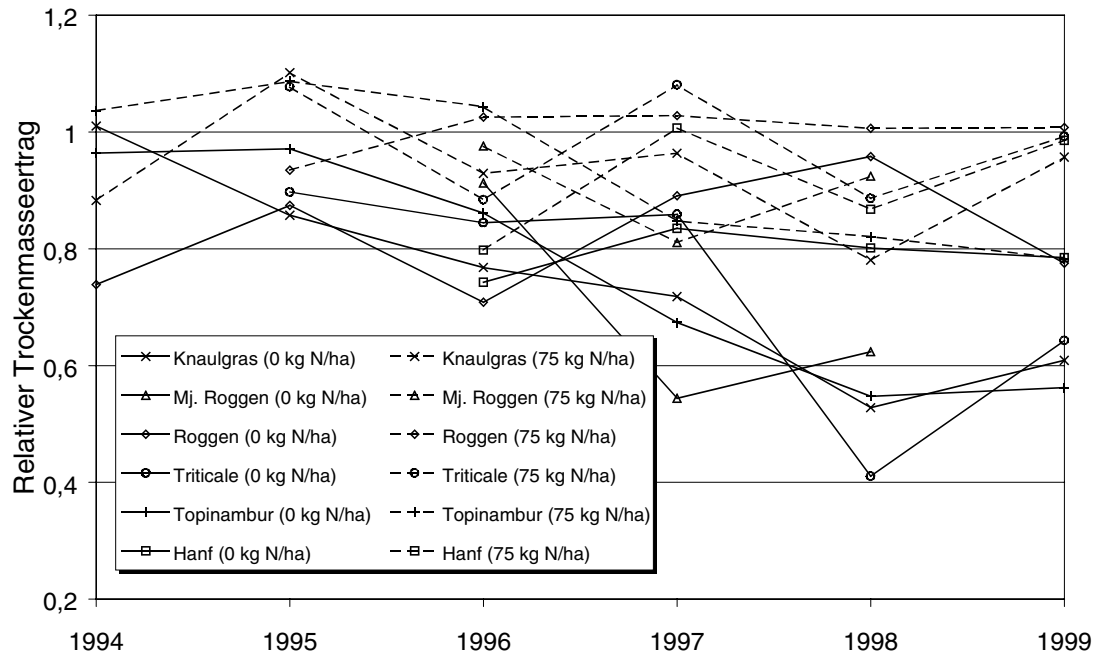


Bild 4: Relativer Ertrag von halmgutartigen Energiepflanzen bei reduzierter Stickstoffdüngung bezogen auf den Ertrag bei einer Stickstoffgabe von 150 kg/ha

### Gehölze

Bei den sog. Kurzumtriebs- oder Feldgehölzen wurden neben Baumart, Untersaat und Düngung auch das Rotationsintervall (Umtriebszeit) 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 (Bild 5).

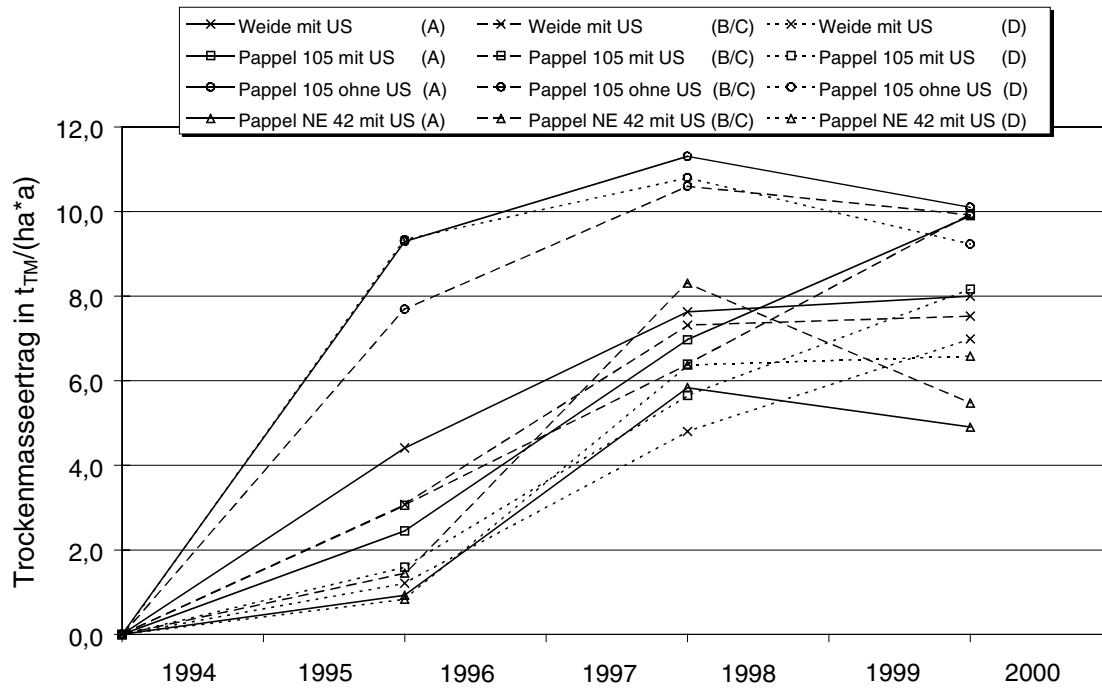


Bild 5: Ertragsentwicklung von Pappel und Weide in zweijährigem Rotationszyklus

Die Untersaat erweist sich als erheblicher Wasser- und teilweise auch 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 (und auch Unkraut) durch das großflächige Laub unterdrückt, so daß sich die Ertragsdifferenz im Laufe der Zeit erheblich verringert.

Zum Einfluß des Alters und der Rotationsdauer sind aus einem 6jährigen 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 Einfluß der Düngung auf den Ertrag ist bei Pappel weit weniger ausgeprägt als bei Weide oder gar bei Halmgütern. Abgesehen von der nicht repräsentativen Pappelsorte NE 42, die eine extrem hohe Mortalitätsrate aufweist, beträgt der Ertragsausfall der Pappeln bei Nulldüngung (Block D) gegenüber Hochdüngung (Block A) im 4- bzw. 6-Jahresmittel 1 % bis 23 % mit und lediglich 1 % bis 4 % ohne Grasuntersaat. 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 [10] [11]. Die Ursachen dieser außergewöhnlichen Anspruchslosigkeit von Pappeln werden in Anpassungsstrategien, N-Verlagerungsprozessen, Mykorrhizen u.ä. vermutet [12] [13]. Aus den im zweijährigen Intervall gemessenen Erträgen geht allerdings hervor, daß sich ohne Düngung der Ertrag auf diesem Standort im Laufe der Zeit doch ein wenig verringert.



## Umweltrelevante Nährstoffe

### Stickstoff

Die Umweltrelevanz von Pflanzennährstoffen resultiert einerseits aus den ökologischen Auswirkungen der Düngemittel auf Pflanze und Boden 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 (Tab. 2).

Tabelle 2: Quellen, Umweltwirkungen sowie Grenz- und Richtwerte ausgewählter umweltrelevanter Nährstoffe und Schwermetalle

Element	Anthropogene Quellen	Umweltwirkungen	Grenz- bzw. Richtwerte			
			Dünger <sup>1)</sup> mg/kg	Boden <sup>2)</sup> mg/kg	Pflanze <sup>3)</sup> mg/kg	Abgas <sup>4)</sup> mg/m <sup>3</sup>
Stickstoff	Verbrennung, Verkehr, Düngung etc.	Klimawirkungen, Gesundheitsschäden etc.	-	-	3000	400
			-	-	-	NO <sub>x</sub>
Kalium	Abwasser, Düngung etc.	Versalzung des Wassers	-	8...11	-	-
			-	-	-	-
Phosphor	Abwasser, Düngung etc.	Eutrophierung des Wassers	-	6...8	-	1,0
			-	-	-	P <sub>x</sub> H <sub>y</sub>
Schwefel	Verbrennung, Industrie etc.	Luftverschmutzung, Versauerung	-	-	800	2000
			-	-	2500*	SO <sub>2</sub>
Chlor	Verbrennung, Industrie etc.	Luftverschmutzung, Gesundheitsschäden	-	-	300	30
			-	-	1000*	Cl-Verb.
Kadmium	Verbrennung, Verhüttung etc.	Schwere Gesundheitsschäden	4	-	0,5	0,2
			(10)	(1,5)	(1,0)	-
Blei	Verkehr, Verbrennung etc.	Schwere Gesundheitsschäden	200	-	10	5,0
			(900)	(100)	(40)	-
Kupfer	Strom-, Wasserleitung, Verhüttung etc.	Geringe Gesundheitsrisiken	200	1,5...3,5	5	5,0
			(800)	(60)	(50)	-
Zink	Reifenabrieb, Verbrennung etc.	Geringe Gesundheitsrisiken	750	1,0...2,5	100	-
			(2500)	(200)	(250)	-

1) nach Düngemittelverordnung [14]; Klammerwerte nach Klärschlammverordnung [15]

2) nach Rahmenempfehlungen zur Düngung im Land Brandenburg [16] für anlehmigen Sand; Klammerwerte nach Klärschlammverordnung [15]

3) nach Holzpreßlings-Norm DIN 51731; Klammerwerte nach der Futtermittelverordnung [18]; Sternwerte (\*) nach Empfehlungen von Obernberger [19]

4) nach Bundesimmissionsschutzgesetz [20] bzw. TA-Luft [21]

Die Stickstoffgehalte (N<sub>t</sub>) der verschiedenen Pflanzenarten weisen - wie auch in anderen Untersuchungen festgestellt wurde - eine außerordentliche Spannweite auf [22 bis 25] [37 bis 39]. Auf den gedüngten Blöcken A bis C erreichen Knaulgras, Getreide und Hanf mit 0,8 bis 1,7 % die höchsten mittleren N<sub>t</sub>-Gehalte. Die Gehalte von Gehölzen und Topinamburkraut liegen mit 0,3 bis 0,8 % deutlich darunter. Die ermittelten Ergebnisse gestatten die Herstellung

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<sub>r</sub>-Gehaltes von 0,1 bis 0,3 % (Bild 6).

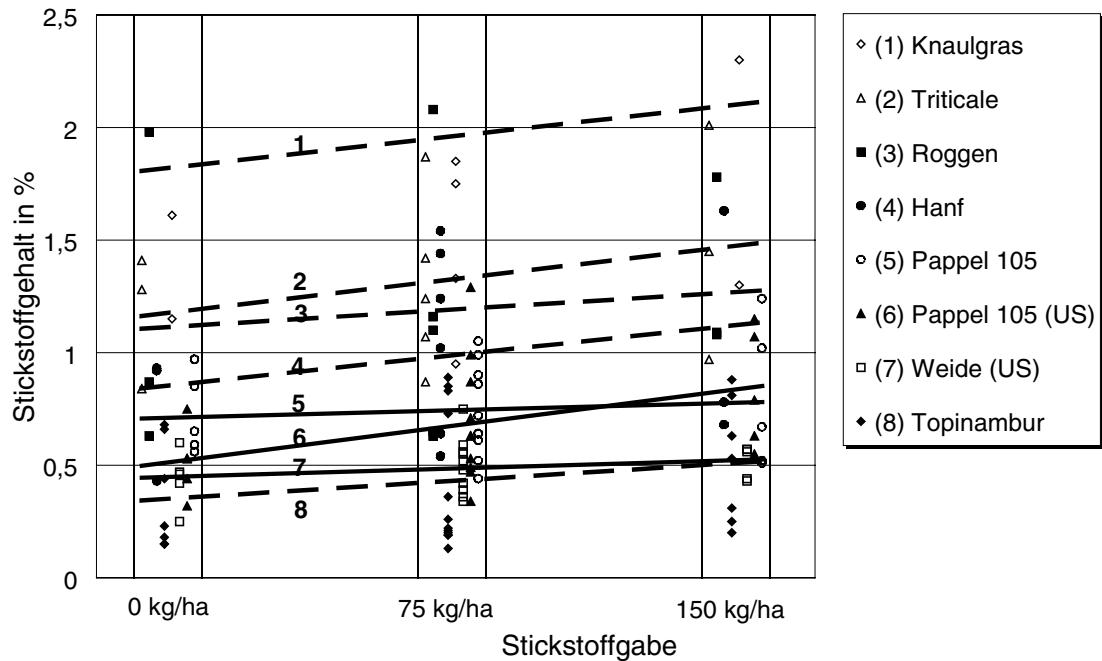


Bild 6: Stickstoffgehalt von Energiepflanzen in Abhängigkeit von der Düngergabe

Unter Berücksichtigung des von Nussbaumer [26] und Oberberger [19] experimentell bestätigten Zusammenhangs zwischen dem Stickstoffgehalt des Brennstoffs und der Bildung von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) bei der Verbrennung, wonach eine N<sub>r</sub>-Erhöhung von 0,2 % eine NO<sub>x</sub>-Zunahme um 5 bis 85 mg pro 1 m<sup>3</sup> Rauchgas verursacht (Bild 7), bewirkt eine Stickstoffgabe von 150 kg/ha im groben Mittel etwa 50 mg/m<sup>3</sup> zusätzliche NO<sub>x</sub>-Emissionen, was bei einem gesetzlichen Grenzwert von 400 mg/m<sup>3</sup> nicht unerheblich ist (Tab 2).

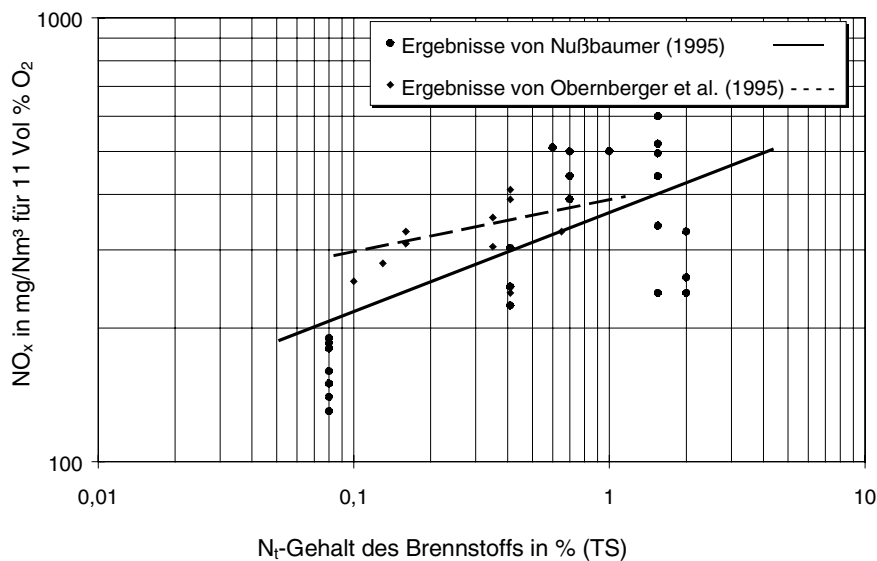


Bild 7: Stickoxidemissionen von Biomassefeuerungsanlagen in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt im Brennstoff nach Nußbaumer [26] und. Obernberger [19]

Wie mehrjährige Gasmessungen auf denselben Versuchsflächen zeigen, werden infolge der Stickstoffdüngung bei 150 kg N/ha außerdem jährlich bis zu 100 mg/m<sup>2</sup> zusätzliches Lachgas (N<sub>2</sub>O) im Boden freigesetzt [27]. Das entspricht einem mittleren CO<sub>2</sub>-Äquivalent von etwa 30 g pro 1 kg Brennstoff und macht damit immerhin bis zu 20 % der anrechenbaren Gesamtemission klimawirksamer Gase bei der Erzeugung und Nutzung von pflanzlichen Festbrennstoffen aus [28].

### 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 Knaulgras 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 Knaulgras 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.

Tabelle 3: Gehalte ausgewählter Makro- und Mikronährstoffe in den Pflanzen

<b>Kultur</b>	<b>Stickstoff</b>	<b>Phosphor</b>	<b>Kalium</b>	<b>Schwefel</b>	<b>Chlor</b>
<b>Block</b>	<b>1994/97</b>	<b>1994/97</b>	<b>1994/97</b>	<b>1997</b>	<b>1997</b>
<b>(Parzelle)</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>mg/kg</b>	<b>mg/kg</b>
Knaulgras					
Block A (1)	1,69	0,29	1,90	2597	1288
Block B (1)	1,26	0,28	1,82	2966	1069
Block C (1)	1,55	0,26	1,76	3418	1073
Block D (1)	1,29	0,27	1,90	4352	1610
Weide mit US					
Block A (2)	0,51	0,09	0,25	593	107
Block B (2)	0,47	0,10	0,20	443	107
Block C (2)	0,52	0,10	0,22	519	107
Block D (2)	0,44	0,14	0,20	447	107
Pappel Japan 105 mit US					

Block A (3)	0,84	0,13	0,38	550	106
Block B (3)	0,66	0,12	0,39	597	106
Block C (3)	0,73	0,12	0,42	575	106
Block D (3)	0,51	0,12	0,39	482	106
Pappel Japan 105 ohne US					
Block A (4)	0,79	0,12	0,37	585	106
Block B (4)	0,75	0,13	0,43	591	106
Block C (4)	0,72	0,13	0,43	531	106
Block D (4)	0,72	0,15	0,43	599	106
Pappel NE42 mit US					
Block A (5)	0,90	0,13	0,34	836	106
Block B (5)	0,68	0,14	0,33	814	106
Block C (5)	0,80	0,13	0,35	847	106
Block D (5)	0,71	0,13	0,34	754	105
Perennierender Roggen					
Block A (6)	1,12	0,20	1,17	869	1292
Block B (6)	0,83	0,17	1,13	966	963
Block C (6)	1,18	0,20	1,20	681	1693
Block D (6)	0,98	0,22	0,90	736	1702
Topinamburkraut					
Block A (7)	0,50	0,06	0,56	1095	654
Block B (7)	0,42	0,06	0,61	645	435
Block C (7)	0,42	0,07	0,49	605	435
Block D (7)	0,34	0,07	0,51	706	868
Winterroggen					
Block A (9;8;9)	1,08	0,22	1,05	1488	970
Block B (9;8;9)	0,90	0,21	0,92	1328	1285
Block C (9;8;9)	0,86	0,20	1,10	1245	1181
Block D (9;8;9)	0,75	0,21	0,86	1387	1820
Wintertriticale					
Block A (8;9;10)	1,21	0,23	1,04	1215	955
Block B (8;9;10)	1,05	0,24	0,89	1248	753
Block C (8;9;10)	1,24	0,23	0,97	984	859
Block D (8;9;10)	1,06	0,24	0,89	1072	1074
Hanf					
Block A (10;8)	1,03	0,15	1,22	1417	857
Block B (10;8)	1,14	0,19	0,95	1439	1074
Block C (10;8)	1,00	0,14	0,90	1421	1072
Block D (10;8)	0,76	0,19	0,90	1251	1604

Bei Gehölzen zweijähriges Rotationsintervall. Bei Topinamburkraut mit Knollenernte.  
US ... Untersaat

### Schwefel und Chlor

Die Gehalte dieser beiden Nährstoffe liegen in der Spanne der Literaturangaben [19] [23 bis 25] [37 bis 39], lediglich der Schwefelgehalt von Knaulgras 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 Knaulgras 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 ( $\text{SO}_2$  und  $\text{SO}_3$ ) 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). Außerdem begünstigen beide Elemente die Korrosion der Wärmetauscherrohre im Kessel. Daher werden vom Gesetzgeber Emissionsgrenzwerte vorgegeben [21] und von Obernberger [19] maximale Gehalte von 0,25 % Schwefel und 0,1 % Chlor für Biofestbrennstoffe empfohlen (Tab. 2).

## 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) (Tab.2). 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 [19] [29]. 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 [30] [31] [37].

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<sub>TM</sub> auf. Knaulgras 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 (Tab. 4).

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

Kultur Block (Parzelle)	Kadmium		Blei		Kupfer		Zink	
	Gehalt mg/kg	Bilanz mg/(m <sup>2</sup> · a)	Gehalt mg/kg	Bilanz mg/(m <sup>2</sup> · a)	Gehalt mg/kg	Bilanz mg/(m <sup>2</sup> · a)	Gehalt mg/kg	Bilanz mg/(m <sup>2</sup> · a)
Knaulgras								
Block A (1)	0,36	-0,10	<3,8	>1,66	16,0	-11,48	46	-11,42
Block B (1)	0,39	-0,22	<4,9	>0,78	11,8	-7,10	58	-21,94
Block C (1)	0,73	-0,54	<5,8	>0,13	12,2	-7,54	89	-51,18
Block D (1)	1,57	-1,07	<5,8	>0,75	22,6	-13,90	135	-73,59
Weide Salix vin. mit US								
Block A (2)	1,56	-0,54	<1,0	>4,73	3,8	+1,66	82	-9,32
Block B (2)	1,40	-0,56	<1,0	>4,76	3,9	+1,74	96	-17,16
Block C (2)	1,32	-0,57	<1,0	>4,71	3,4	+1,94	83	-13,31
Block D (2)	2,18	-0,78	<1,0	>4,79	3,6	+1,95	105	-14,26
Pappel Japan 105 mit US								
Block A (3)	1,23	-0,56	<1,0	>4,58	3,0	+1,62	51	-1,35
Block B (3)	1,25	-0,76	<1,0	>4,54	3,4	+1,25	56	-9,26
Block C (3)	1,12	-0,56	<1,0	>4,63	2,8	+2,03	54	-2,32
Block D (3)	1,20	-0,66	<1,0	>4,54	2,6	+1,74	58	-8,63
Pappel Japan 105 ohne US								
Block A (4)	1,06	-0,67	<1,0	>4,37	3,0	+1,00	50	-11,04
Block B (4)	1,25	-0,80	<1,0	>4,51	2,8	+1,61	55	-10,01
Block C (4)	1,35	-1,07	<1,0	>4,36	2,8	+1,27	57	-19,58
Block D (4)	0,82	-0,59	<1,0	>4,32	2,6	+1,17	43	-8,01
Topinamburkraut								
Block A (7)	0,73	-0,07	<1,0	>4,80	3,5	+2,08	67	+3,30
Block B (7)	0,44	-0,06	<1,0	>4,80	2,7	+2,47	47	+9,70
Block C (7)	0,28	+0,02	<1,0	>4,83	2,7	+2,64	25	+20,90
Block D (7)	0,25	+0,04	<1,0	>4,83	2,7	+2,45	38	+15,71
Winterroggen								
Block A (9;9)	0,06	+0,18	<1,0	>4,17	4,7	-1,43	32	-2,18
Block B (9;9)	0,03	+0,11	<1,0	>4,18	4,6	-1,26	29	-0,16
Block C (9;9)	0,03	+0,11	<1,0	>4,22	4,6	-0,95	19	+11,81
Block D (9;9)	0,04	+0,11	<1,0	>4,34	3,8	+0,17	15	+17,15
Wintertriticale								
Block A (8)	0,06	+0,19	<1,0	>4,33	6,8	-2,56	39	-3,34
Block B (8)	0,04	+0,11	<1,0	>4,40	6,8	-2,18	43	-6,07
Block C (8)	0,05	+0,10	2,6	+2,92	6,0	-1,62	46	-9,99
Block D (8)	0,08	+0,08	1,8	+3,80	5,2	-0,59	66	-21,45

Das Bilanzsaldo ergibt sich aus Einträgen durch Düngemittel, Verwitterung\* und atmosphärische Deposition\* abzüglich der Austräge durch Auswaschung\* und Erntegut. Die mit Stern (\*) markierten Anteile wurden nach Angaben von Wilcke und Döhler [32] berechnet. US ... Untersaat

## **Blei**

Hauptquelle der anthropogenen Bleiemissionen ist der Kraftfahrzeugverkehr. Vergiftungen führen beim Menschen unter anderem zu Schädigungen des Nervensystems und der Nieren [29]. Blei wird bevorzugt von Knaulgras 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 Knaulgras, 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.

## **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 [29]. Der mittlere Zinkgehalt der Pflanzen bewegt sich zwischen 15 mg/kg<sub>TM</sub> (Roggen) und 135 mg/kg<sub>TM</sub> (Knaulgras). 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 [16] einen deutlichen Zinküberschuß aufweist.

Kupfer, dessen Gehalt in den Pflanzen zwischen 2,6 mg/kg<sub>TM</sub> (Pappel) und 22,6 mg/kg<sub>TM</sub> (Knaulgras) variiert, hat demgegenüber überwiegend positive Saldi. Lediglich Knaulgras, 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 [15].

## **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 [33], die sämtliche direkten und indirekten Primärenergieaufwendungen anteilmäßig berücksichtigt, z. B. auch für die Herstellung von landwirtschaftlichen Geräten 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 [11] [22] [24] [33 bis 36]. 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 [33].

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 2 bzw. 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 90 bis 170 GJ/(ha·a) und entspricht damit einem Öläquivalent von 2.400 bis 4.500 Liter pro Hektar und Jahr (Bild 8).



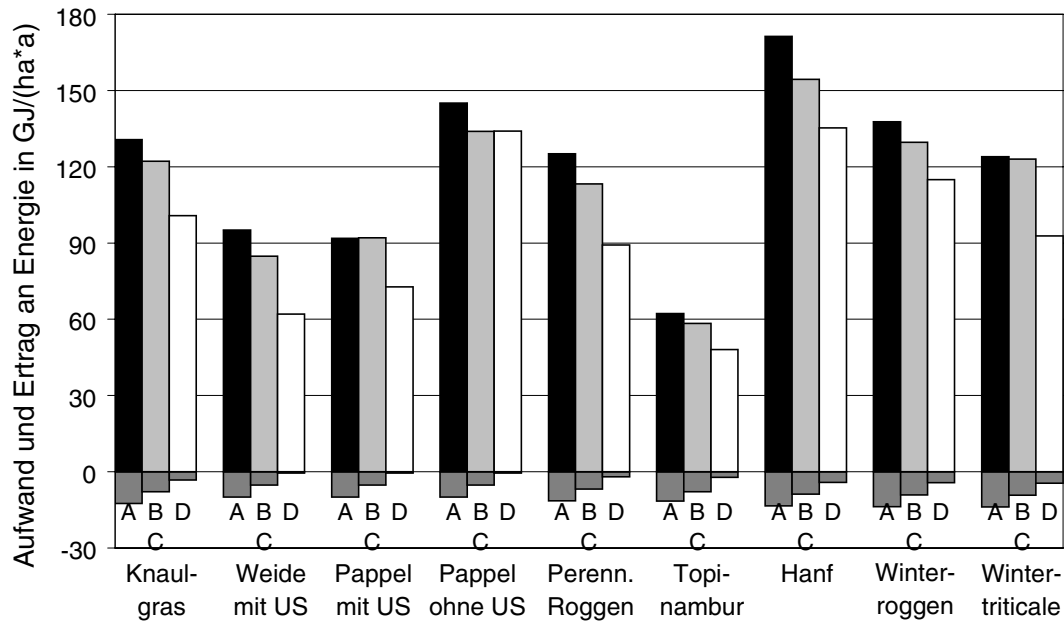


Bild 8: Aufwand und Ertrag an Energie beim Anbau der untersuchten Energiepflanzen in Abhängigkeit von der Düngung

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  $KEA / EE = 0,01...0,18$ . 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 88 und 158 GJ/(ha·a). Pappel Japan 105 ohne Untersaat erreicht mit 128 bis 135 GJ/(ha·a) ebenfalls recht 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 9 bis 28 % 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 weniger als 75 kg Stickstoff pro Hektar erzielen. Eine Erhöhung der Stickstoffgabe darüber hinaus bewirkt nur eine geringfügige Steigerung des Energiegewinns und ist demzufolge energetisch ineffizient.

## Schlußfolgerungen

Die über 6 Jahre durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß beim Anbau von Energiepflanzen auf sandigen Böden der Düngemiteleinsatz erheblich reduziert und auf Pflanzenschutzmittel in der Regel verzichtet werden kann. Die mittleren Erträge an oberirdischer Pflanzenmasse liegen je nach Pflanzenart und Düngemiteleinsatz zwischen 3,4 und 11,8 t<sub>TM</sub>/ha, wobei Hanf, Pappel und Knautgras die höchsten und Topinamburkraut sowie alle Feldgehölze mit Untersaat die geringsten Aufwuchsleistungen aufweisen. Wintertriticale und Winterroggen erreichen Ganzpflanzenerträge von 6,3 bis 9,4 t<sub>TM</sub>/ha.

Bei einer Verringerung der Stickstoffgabe von 150 auf 75 kg N/ha reduziert sich der Ertrag im groben Mittel um lediglich 6 %. Ohne jegliche Düngung fällt er kontinuierlich ab und erreicht nach 6 Jahren ca. 60 bis 80 % des entsprechenden Ertrags von 150 kg N/ha. Eine Ausnahme bildet Pappel Japan 105, die zumindest in den ersten 5 bis 10 Jahren nach der Anpflanzung auf einer ackerbaulich genutzten Fläche auch ohne Düngemiteleinsatz hohe sichere Erträge von über 9 t<sub>TM</sub>/(ha·a) gewährleistet. Allerdings muß hierfür auf eine Grasuntersaat verzichtet werden, selbst wenn diese nach etwa 4 Jahren durch das großflächige Pappellaub 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 2.800 bis 4.200 Liter Öläquivalent pro Hektar und Jahr und ohne Düngung bei Pappeln bei etwa 3.600 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 Kadmium. 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 Vorteil 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 in Zusammenhang mit der Erntetechnik neue Technologien zur verlustreduzierten und arbeitshygienisch vertretbaren Lagerung von Feldholzhackgut zu entwickeln.

## Literatur

- [1] El Bassam, N.: Energy Plant Species. James & James Ltd London 1998
- [2] Pfuhl, E.: Die bodenkundliche Bewertung des Versuchsgutes Bornim bei Potsdam. Dissertation, Landwirtschaftliche Hochschule Berlin 1929
- [3] Scholz, V., Krüger, K., Höhn, A. et al.: Umwelt- und technologiegerechter Anbau von Energiepflanzen. Forschungsbericht des ATB 1999/1, Potsdam-Bornim 1999
- [4] KTBL-Taschenbuch Landwirtschaft 1994/95. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft Darmstadt, 17. Auflage, 1994
- [5] Karpenstein-Machan, M.: Auswirkungen von pestizidfreiem Energiepflanzenanbau auf die Biomasserträge (Teil II). Universität Kassel. energie pflanzen II/2000
- [6] Kundler, P. et al.: Mineraldüngung. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin 1970
- [7] Beer, K., Koriath, H. und W. Podlesak: Organische und mineralische Düngung. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin 1990
- [8] Diercks, R. und R. Heitefuss: Integrierter Landbau. BLV Verlagsgesellsch. München 1990
- [9] Pickert, J.: Düngung ausgesetzt – Geld gespart? Aktuelle Beiträge zur Landwirtschaft, Schriftenreihe der LfL Brandenburg, Band III(2000), S.27-31
- [10] Rehfuess, K.E.: Standortansprüche und Nährstoffbedarf schnellwachsender Baumarten in Kurzumtriebswirtschaft. In: Tagungsband zum Statusseminar Schnellwachsende Baumarten, Kassel 23./24.10.1995
- [11] Hofmann, M.: Modellvorhaben Schnellwachsende Baumarten. Zusammenfassender Abschlußbericht. In: Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 13, Münster 1999
- [12] Marmann, P.: Der interne Stickstoffkreislauf von Esche (*Fraxinus excelsior*) und Birke (*Betula pendula*) bei unterschiedlicher Wasserversorgung. Bayreuther Forum Ökologie 55, 1998
- [13] Bungart, R.: Erzeugung von Biomasse zur energetischen Nutzung durch den Anbau schnellwachsender Baumarten auf Kippsubstraten des Lausitzer Braunkohlereviers unter besonderer Berücksichtigung der Nährelementversorgung und des Wasserhaushaltes. Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus 1999
- [14] Düngemittelverordnung. BGBl. I S.1450 vom 09.07.1991, zuletzt geändert am 17.11.1999 BGBl. I S. 1758, BGBl. III 7820-6, Bundesanzeiger Köln
- [15] Klärschlammverordnung. vom 15.04.1992 BGBl. I S. 912, zuletzt geändert am 6.3.1997 BGBl. I S. 446, Bundesanzeiger Köln
- [16] Rahmenempfehlung zur Düngung im Land Brandenburg. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Brandenburg, Potsdam 1997
- [17] DIN 51731: Prüfung fester Brennstoffe - Preßlinge aus naturbelassenem Holz. Beuth Verlag Berlin 1996
- [18] Koch, V. et al.: Futtermittelrechtliche Vorschriften. Verlag Alfred Strothe 1989
- [19] Obernberger, I.: Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente. Technische Universität Graz. In: Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung, Graz 1997

- [20] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundesimmissionsschutzgesetz BImSchG). 14.04.1990, zuletzt geändert am 18.10.1998, BGBl. I S.3718, Bundesanzeiger Köln
- [21] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft). GMBI. S. 93, Bundesanzeiger Köln 1986
- [22] Hartmann, H. und A. Strehler: Die Stellung der Biomasse im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern aus ökologischer, ökonomischer und technischer Sicht. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe Bd. 3, Münster 1995
- [23] Vetter, A.: 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 1995
- [24] Maier, J. et al.: Anbau von Energiepflanzen – Ganzpflanzengewinnung mit verschiedenen Beerntungsmethoden (ein- und mehrjährige Pflanzenarten); Schwachholzverwertung. Abschlußbericht, Institut für umweltgerechte Landbewirtschaftung, Müllheim 1997
- [25] Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. Gülzow 2000
- [26] Nussbaumer, T.: Primär- und Sekundärmaßnahmen zur NO<sub>x</sub>-Minderung bei Biomassefeuerungen. VDI-Tagung Thermische Biomassenutzung, Salzburg 23./24.4.1997, VDI-Bericht 1319, S.141-166
- [27] Hellebrand, H.J. und V. Scholz: Bestimmung bodenbürtiger Spurengasflüsse beim Anbau nachwachsender Rohstoffe. Agrartechnische Forschung 6 (2000) Nr. 4, S. 74-77
- [28] Scholz, V. et al.: Energie aus Biomasse – Stand und Möglichkeiten der energetischen Nutzung von Biomasse im Land Brandenburg. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Brandenburg, Potsdam 1997
- [29] Merian, E.: Metals and their Compounds in the Environment. VCH Verlagsgesellschaft Weinheim 1991
- [30] Kayser, A., Schulin, R. und H. Felix: Feldversuche zur Phytoremediation schwerbelasteter Böden. In: Pflanzenbelastung auf kontaminierten Standorten, Texte 1/99, Umweltbundesamt Berlin 1999, S. 170-182
- [31] Klang, E., Eriksson, J. und K. Perttu: The storage and fluxes of cadmium in the soil-salix system. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Wien 11./15.7.1999, S. 674-675
- [32] Wilcke, W. und H. Döhler: Schwermetalle in der Landwirtschaft. KTBL-Arbeitspapier 217, Darmstadt 1995
- [33] Scholz, V.: Methodik zur Ermittlung des Energieaufwandes pflanzenbaulicher Produkte am Beispiel von Biofestbrennstoffen. Agrartechnische Forschung 3 (1997) H. 1, S.11-18
- [34] Wintzer, D. et al.: Technikfolgenabschätzung zum Thema Nachwachsende Rohstoffe. In: Schriftenreihe des Bundesministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Münster 1993
- [35] Scholz, V.: Energiebilanz für Biofestbrennstoffe. Forschungsbericht des ATB Nr. 1995/3, Potsdam-Bornim 1995
- [36] Kaltschmitt, M. und G.A. Reinhardt: Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Verlag Vieweg, Braunschweig 1997
- [37] Hartmann, H., Böhm, T. und L. Maier: Naturbelassene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Materialien 154, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München 2000
- [38] Kasper, B.: Stoffwandlung und Logistik pflanzenbürtiger Festbrennstoffe in einer umweltgerechten Landnutzungsalternative für den Spreewald. Diss., Humboldt-Universität zu Berlin 1997
- [39] Anton, C.: Bestimmung feuerungstechnischer und umweltrelevanter Eigenschaften von Biofestbrennstoffen. Dipl.-Arbeit, FH Lausitz und ATB Potsdam-Bornim 1994

Dr.-Ing. Volkhard Scholz  
Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB)  
Max-Eyth-Allee 100  
14469 Potsdam-Bornim  
Tel.: +49/(0)331/5699-312  
Fax: +49/(0)331/5699-849  
E-mail: vscholz@atb-potsdam.de

Dr. agr. Karen Krüger  
Landesanstalt für Landwirtschaft Brandenburg (LfL)  
Berliner Straße  
14532 Güterfelde  
Tel.: +49/(0)3329/6914-21  
Fax: +49/(0) 3329/6914-20  
E-mail: LfL.BB.Ackerbau@t-online.de

Dr. rer. nat. Axel Höhn  
Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V. Müncheberg (ZALF)  
Eberswalder Str. 84  
15374 Müncheberg  
Tel.: +49/(0)33432/82-228  
Fax: +49/(0) 33432/82-212  
E-mail: ahoehn@zalf.de