

Produktion von nachwachsenden Energierohstoffen auf landwirtschaftlichen Flächen

Dr.-Ing. Volkhard Scholz, Prof. Dr. rer. nat. habil. Hans Jürgen Hellebrand, Dr. agr. Philipp Grundmann, Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Potsdam

1 EINLEITUNG

Mit zunehmender Ausschöpfung des Energieholzpotenzials geraten zwangsläufig auch andere Bioenergieträger in das Blickfeld der land- und forstwirtschaftlichen Forschung und Praxis. Neben Getreidestroh sind dies insbesondere Energiepflanzen, also Pflanzen, die auf landwirtschaftlichen Flächen angebaut werden und ausschließlich zur Herstellung von festen, flüssigen und gasförmigen Brenn- bzw. Treibstoffen dienen. Unter der Voraussetzung dass ertragreiche Arten und effiziente Energietechnologien - wie die Verbrennung oder Vergasung - zur Anwendung kommen, könnten solche auf Stilllegungsflächen produzierte Pflanzen ca. 3 % des künftigen Primärenergiebedarfs der Bundesrepublik decken.

Energiepflanzen tragen nicht nur zur Schonung fossiler Rohstoffressourcen bei, sondern auch zur Verbesserung und Stabilisierung der Einkommenslage von Landwirten. Langfristig haben sie jedoch nur dann eine Chance, wenn ihre Produktion und Nutzung keine unzulässigen Umweltbelastungen bewirken, der Ertrag pro Flächeneinheit ausreichend hoch und die Kosten entsprechend niedrig sind. Die Auswahl diesbezüglich geeigneter Pflanzenarten ist nicht einfach, zumal auch technologische, pflanzenbauliche und standörtliche Eigenheiten berücksichtigt werden müssen, und für bislang eher selten angebaute Arten wie schnellwachsende Baumarten, mehrjähriger Roggen und Topinambur nur lückenhafte Kenntnisse und Erfahrungen vorliegen, die zudem meist nur für einen speziellen Standort und/oder ein spezielles Produktionsverfahren gelten (EL BASSAM, 1998).

Nachfolgend werden daher verschiedene für die Verbrennung und Vergasung geeignete Pflanzenarten hinsichtlich ihrer relevanten energetischen, ökologischen und ökonomischen Merkmale verglichen und bewertet. Dabei stützen wir uns vorzugsweise auf Ergebnisse eines langjährigen Anbauversuchs des Instituts für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), der gemeinsam mit dem Landesamt für Verbraucherschutz und Landwirtschaft Brandenburg (LVL) und dem Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung Müncheberg e.V. (ZALF) durchgeführt wurde und bezogen auf den gegebenen Standort einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Pflanzenarten und Düngungsvarianten ermöglicht.

2 BORNIMER FELDVERSUCH

Das für die Untersuchungen parzellierte Versuchsfeld ist Teil eines bisher konventionell genutzten Schlages, der bereits in den zwanziger Jahren des letzten Jahrhunderts bodenkundlich analysiert und beschrieben wurde (PFUHL, 1929). Es ist in 10 Langparzellen a 0,25 ha und diese wiederum in jeweils 4 Blöcke a 625 m² geteilt. Block A erhält 150 kg Stickstoff (N) pro Hektar und Jahr und eine ortsübliche mineralische Grunddüngung, Block B 75 kg N und 1650 kg Holzasche sowie ca. 30 kg mineralisches Kalium (K), und Block C bekommt 75 kg N und je nach K-Gehalt etwa 350 bis 500 kg Strohasche, so dass auf diesen drei Blöcken eine einheitliche Kaliumversorgung gewährleistet ist. Block D bleibt generell ungedüngt. Pflanzenschutzmittel kommen auf der gesamten Fläche nicht zum Einsatz (SCHOLZ, KRÜGER, HÖHN ET AL., 1999).

In den oberen Bodenhorizonten bis ca. 30 cm Tiefe herrscht ein schwachhumoser, schwachlehmiger Sand und darunter sandiger Lehm vor (pH-Wert 5,7; Humusgehalt 15,5 g kg⁻¹; Bodenwertzahl ca. 30; Grundwasserstand ca. 8 m). Im Untersuchungszeitraum 1994 bis 2003 betragen die Jahresmitteltemperaturen $9,5 \pm 1,9$ °C und die Niederschlagssummen 480 ± 230 mm a⁻¹.

Als Pflanzenarten wurden bzw. werden Knaulgras (*Lidacta*), Weide (*Salix viminalis* 21), Pappel (Japan 105 und NE 42), mehrjähriger Roggen (Permontra), Topinambur (Parlow), Hanf (Fedora 19 bzw. Fedrina 74), Winterroggen (Amilo) und Wintertriticale (Alamo) angebaut. Die annuellen Kulturen rotieren auf drei Parzellen (**Abb. 1**).

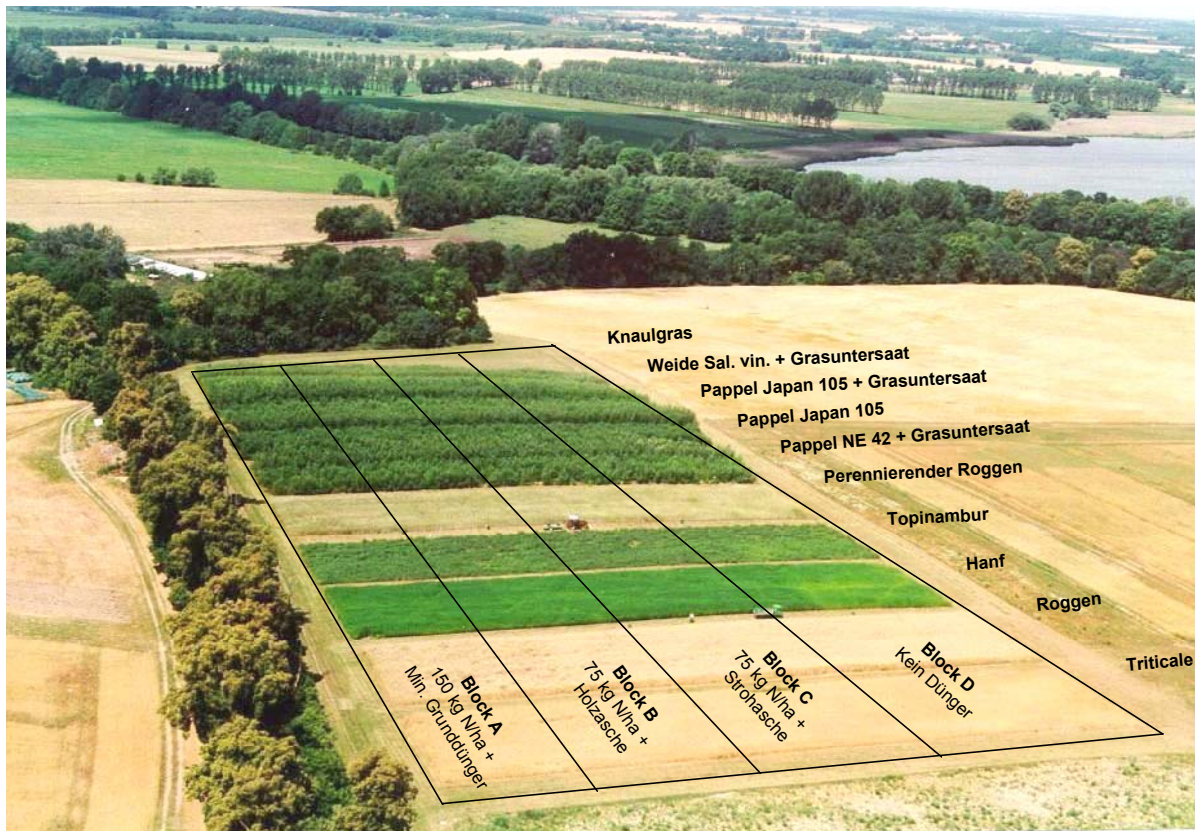


Abb. 1: Energieplantage Bornim - Struktur des Versuchsfeldes

Zur Messung der Erträge werden jeweils 5 Flächenstücke a 3,6 m² (Gehölze a 10 m²) pro Block geerntet. Die umweltrelevanten Makro- und Mikronährstoffe (N, P, K, S, Cl) und die Schwermetalle (Cd, Zn, Pb, Cu, Mn, Fe) in Pflanze, Boden und Düngemittel sowie die übrigen Bodenparameter werden nach gängigen VDLUFA-Methoden bestimmt. Die natürlichen und die durch Düngung induzierten Gasflüsse (N₂O, CH₄, NH₃, CO₂) zwischen Boden und Atmosphäre werden über Gasflusskammern und gaschromatographische Konzentrationsbestimmung an 24 Messstellen viermal wöchentlich erfasst (HELLEBRAND UND SCHOLZ, 2000).

BIOMASSEPRODUKTION

Energetische Effizienz, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit werden maßgeblich durch den Ertrag der Pflanzen bestimmt. Auf den hochgedüngten Flächen des Parzellenversuchs (Block A) erreichen Hanf und Pappel ohne Untersaat mit 9,6 bis 11,2 t_{TM} ha⁻¹ a⁻¹ sowie Winterroggen, perennierender Roggen, Wintertriticale und Knaulgras mit 8,0 bis 8,5 t_{TM} ha⁻¹ a⁻¹ die höchsten mehrjährigen Erträge, wobei mit einer die vergleichende Bilanzierung vereinfachenden Einheitsgabe von 150 kg N ha⁻¹ a⁻¹ nicht in jedem Fall bedarfsgerecht gedüngt wird und z.B. Roggen und Triticale etwa 20 % zu viel und Knaulgras etwa 30 % zu wenig Stickstoff erhält (ANONYMUS, 1997). Die insgesamt niedrigsten Erträge weist das ursprünglich vielversprechende Topinamburkraut auf.

Trotz des konsequenten Verzichts auf Pflanzenschutzmittel halten sich Schädlingsbefall und Pflanzenkrankheiten in Grenzen und haben keine nachweisbaren Ertragsdepressionen zur Folge. Da bei der Ganzpflanzenernte von Halmgütern die Un- bzw. Beikräuter in der Regel

mit geerntet werden, sind die Ertragseinbußen gegenüber einem unkrautfreien Bestand unerheblich (KARPENSTEIN-MACHAN, 2000).

Mit Ausnahme von Knaulgras liegen die Ganzpflanzenerträge der Halmgüter im Bereich der aus den Kornerträgen kalkulierten 10-Jahresmittel des Landes Brandenburg. Die entsprechenden Durchschnittserträge der Bundesrepublik sind generell höher (Tab. 1).

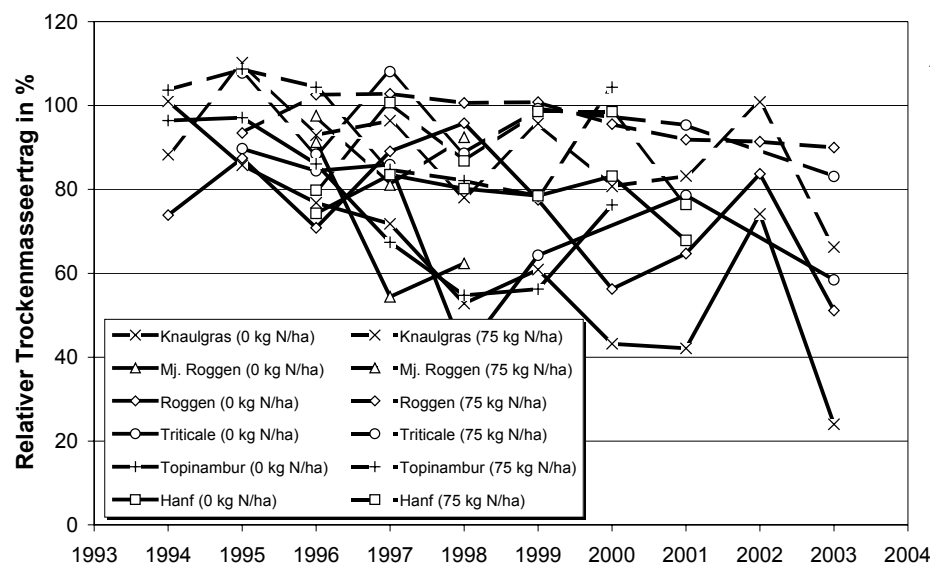
Tab. 1: Mittlere mehrjährige Trockenmasserträge potenzieller Energiepflanzen in $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ - Ergebnisse des Feldversuchs Bornim sowie Landes- und Bundesmittel -

Pflanzenart	Feldversuch Bornim (ATB) 1994 - 2003					Land Brandenburg 1994 - 2003	Bundesrepublik 1994 - 2001
	a ¹⁾	A	B	C	D		
Knaulgras	10	8,0	7,3	7,3	5,4	5,5 ²⁾	8,7 ²⁾
Perenn. Roggen	3	8,5	8,0	7,4	6,0	-	-
Winterroggen	10	8,5	8,1	7,7	6,6	8,6 ³⁾	11,1 ³⁾
Wintertriticale	7	8,4	8,2	8,1	6,2	9,9 ³⁾	12,3 ³⁾
Hanf	5	11,2	10,5	10,0	8,9	-	-
Topinamburkraut	7	4,2	4,1	3,9	3,3	-	-
Weide (<i>Salix vim.</i> 21 ⁴⁾)	10	7,6	6,4	6,9	6,0	-	3,0 - 4,1 ⁵⁾
Pappel (Japan 105 ⁴⁾)	10	7,0	6,9	7,4	6,7	-	5,8 - 11,2 ⁶⁾
Pappel (Japan 105)	10	9,6	9,0	9,0	9,5	-	-
Pappel (NE 42 ⁴⁾)	10	5,4	6,5	6,9	6,9	-	-

A: 150 kg N ha⁻¹ + 225 kg min. Grunddünger ha⁻¹ B: 75 kg N ha⁻¹ + 30 kg K ha⁻¹ + 1650 kg Holzasche ha⁻¹
C: 75 kg N ha⁻¹ + 350-500 kg Strohasche ha⁻¹ D: Kein Dünger

1) Anbaudauer in Jahren
2) Landes- bzw. Bundesmittel für Gras von Ackerland nach ANONYMUS (2003) und (2002)
3) Landes- bzw. Bundesmittel nach ANONYMUS (2003) und (2002) mit kalk. Korn-Stroh-Verhältnis 1:1,1
4) Grasuntersaat bei ATB-Feldversuch
5) Spanne der Medianwerte von 3 Weidenklonen (*Salix viminalis*) auf 7 Standorten ($n_{ges.} = 88$) nach KOBUS (2000)
6) Spanne der Medianwerte von 26 Balsam- und Schwarzpappelklonen (*Tacamahaca*, *Aigeiros*) nach Abb. 3

Bei reduzierter Stickstoffdüngung ($75\ kg\ N\ ha^{-1}\ a^{-1}$) verringern sich die Erträge der Halmgüter im zehnjährigen Durchschnitt um lediglich 8 %, bezogen auf die Stickstoffgabe von $150\ kg\ N\ ha^{-1}\ a^{-1}$. Die rechnerische Trendanalyse (ohne 2003) weist eine Verringerung von 1,2 bis 2,3 % pro Jahr aus. Eine gänzlich unterlassene Düngung verursacht einen Ertragsrückgang auf etwa 40 bis 80 % im 10. Jahr (ohne 2003). Der ungewöhnlich hohe Ertragsabfall im Jahr 2003 ist auf extrem geringe Niederschläge ($250\ mm\ a^{-1}$) zurückzuführen (Abb. 2).



Die Erträge der Feldgehölze (schnellwachsende Baumarten) werden weniger von der Düngergabe als vielmehr von Untersaat, Sorte und Alter des Bestandes bestimmt. Abgesehen von der Weide und von der Pappelsorte NE 42, die eine extrem hohe Mortalitätsrate von 20 % (D) bis 60 % (A) aufweist, ist kein signifikanter Einfluss der Düngung auf den Ertrag nachweisbar. Diese Ergebnisse decken sich mit Aussagen in der Literatur, wonach Pappeln auf ursprünglich gut versorgten Ackerflächen zumindest in den ersten Jahren keine Düngung benötigen (REHFUESS, 1995; HOFMANN, 1999; BUNGART, 1999; KOBUS, 2000; WERNER, VETTER UND HERING, 2004).

Wie eine unlängst durchgeführte Erhebung des ATB von über 350 Ertragsdaten (26 Klone) auf 25 ackerbaulichen Standorten in Deutschland zeigt, ist die Spanne der Pappelerträge außerordentlich weit und hängt insbesondere von der Sorte und der Wasserversorgung ab (**Abb. 3**). Mit Medianwerten zwischen 6 und 11 t Trockenmasse pro Hektar und Jahr erreichen Pappeln in Deutschland offenbar höhere Durchschnittserträge als Weiden. Diese Ertragsdaten stammen allerdings überwiegend von jüngeren Beständen, so dass anzunehmen ist, dass das repräsentative Langzeitmittel beider Baumarten über den hier angegebenen Werten liegt (**Tab. 1**).

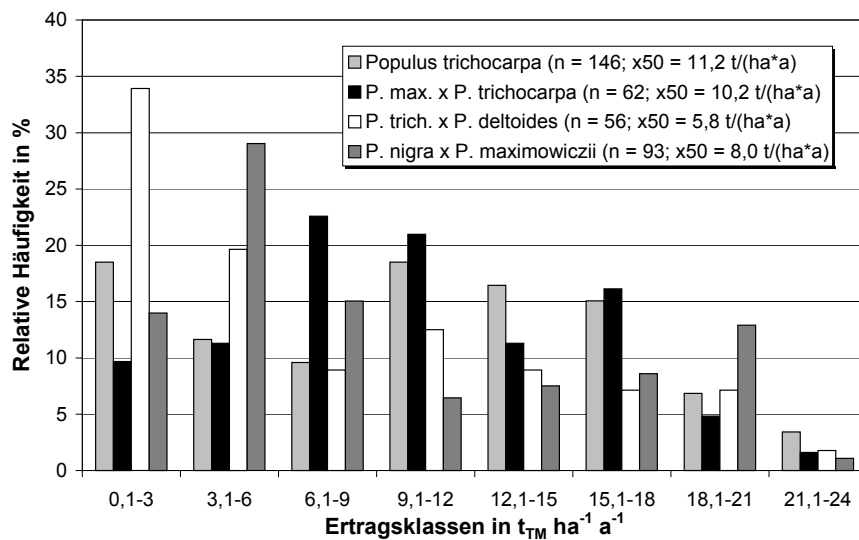
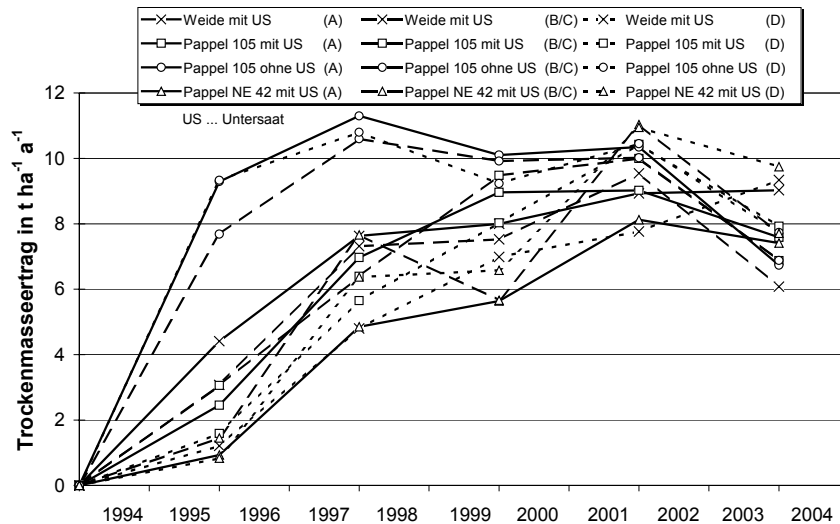


Abb. 3: Trockenmasseerträge der Pappeln im Kurzumtrieb von 25 Standorten in Deutschland

Die Rotationsdauer hat im Bereich von 2 bis 4 Jahren keinen nennenswerten Einfluss auf den Ertrag. Demgegenüber bewirkt eine Grasuntersaat, aufgrund der Wasser- und Nährstoffkonkurrenz, eine Ertragseinbuße von etwa 20 bis 30 % bei Pappeln in den ersten 10 Jahren. Sie kann daher nicht uneingeschränkt empfohlen werden, zumal die ursprüngliche Absicht, die Artenvielfalt zu erhöhen, nicht realisiert wurde, wie Messungen der Universität Potsdam zum Laufkäferbesatz zeigen (SCHOLZ, KRÜGER, HÖHN ET AL., 1999). Außerdem wird bei Pappeln die Untersaat aufgrund des großblättrigen Laubes nach 4 bis 6 Jahren ohnehin unterdrückt (**Abb. 4**).

Abb. 4: Ertragsentwicklung von Pappel und Weide in zwei-jährigem Rotationszyklus



4 UMWELTVERTRÄGLICHKEIT

4.1 Umweltrelevante Nährstoffe

Die Umweltrelevanz von Pflanzennährstoffen resultiert einerseits aus den direkten Auswirkungen der Düngemittel auf Atmosphäre und Hydrosphäre und andererseits aus den Emissionen beim Verbrennen. Geringe Gehalte und damit ein geringer Bedarf an umweltschädigenden Nährstoffen sind daher von Vorteil (**Tab. 2**).

Stickstoff

Die auf dem Versuchsfeld gemessenen Stickstoffgehalte (N_t) der verschiedenen Pflanzenarten liegen in der Spanne der auf anderen Standorten ermittelten Werte. Auf den Blöcken A bis D erreichen Knaulgras, Getreide und Hanf mit 0,9 bis 1,9 % die höchsten mittleren N_t -Gehalte. Die entsprechenden Gehalte in den Gehölzen und Topinamburkraut liegen mit 0,4 bis 0,7 % deutlich darunter. Die etwa 190 durchgeführten Stickstoffanalysen gestatten die Herleitung eines durch Regressionsanalyse bestätigten Zusammenhangs zwischen Düngung und Stickstoffgehalt der Pflanzen. Eine Stickstoffgabe von 150 kg ha^{-1} bewirkt demnach je nach Pflanzenart eine durchschnittliche absolute Zunahme des N_t -Gehaltes von etwa 0,1 bis 0,3 % gegenüber der Nulldüngungs-Variante (SCHOLZ, KRÜGER UND HÖHN, 2001), was in ähnlicher Größenordnung auch auf anderen Standorten festgestellt wurde (HYTÖNEN, 1996; RÖHRICHT, KIESEWALTER UND GROß-OPHOFF, 2002; LEWANDOWSKI AND KAUTER, 2003).

Unter Berücksichtigung des von NUSSBAUMER (1997), OBERNBERGER (1997) sowie 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 $100 \text{ mg pro } 1 \text{ m}^3$ Rauchgas verursacht, bewirkt unter den Bedingungen des Versuchsstandorts eine Stickstoffgabe von 150 kg/ha im groben Mittel etwa 50 mg m^{-3} zusätzliche NO_x -Emissionen, was bei gesetzlichen Grenzwerten von 250 und 500 mg m^{-3} nicht unerheblich ist (TA LUFT, 2002).

Kalium und Phosphor

Die mittleren Kaliumgehalte (K) von Knaulgras, Ganzpflanzengetreide und Hanf weisen Werte von über 0,9 % auf, Pappel und Weide hingegen unter 0,4 %. Phosphor (P) zeigt mit $\geq 0,2$ % bzw. $\leq 0,1$ % ähnliche Tendenzen. Hohe Kaliumgehalte führen bei der Verbrennung zu verstärkter Korrosion und Schlackebildung und sind daher unerwünscht. Ähnlich wie bei Stickstoff zeigt sich auch hier ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Düngung und den K-Gehalten in Getreide und Hanf.

Tab. 2: Gehalte umweltrelevanter Makro- und Mikronährstoffe in Energiepflanzen
- Ergebnisse des Feldversuchs (ATB) sowie Literaturangaben -

Pflanzenart		Stickstoff %		Kalium %		Phosphor %		Schwefel mg kg ⁻¹		Chlor mg kg ⁻¹	
		mittel	max min	mittel	max min	mittel	max min	mittel	max min	mittel	max min
Knautgras	ATB	1,86	3,31 0,95	1,86	2,78 1,31	0,30	0,46 0,20	2440	3418 1340	1704	2598 1069
	Lit.	1,41	2,67 0,80	1,55	3,23 0,50	0,20	0,33 0,09	1435	3600 190	3703	14600 400
Perenn. Roggen	ATB	1,24	1,50 0,98	1,26	1,35 1,04	0,21	0,23 0,19	813	966 681	1413	1702 963
	Lit.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Winterroggen	ATB	1,12	2,08 0,63	0,98	1,28 0,77	0,19	0,25 0,02	1126	1488 750	1177	1820 640
	Lit.	1,26	2,20 0,62	0,54	1,28 0,18	0,20	0,29 0,10	1786	4800 700	1868	6500 1000
Wintertriticale	ATB	1,27	2,01 0,84	0,90	0,84 0,68	0,20	0,29 0,02	1117	1248 984	1124	1610 753
	Lit.	1,00	1,43 0,40	0,88	1,19 0,61	0,21	0,28 0,14	1527	3100 170	1652	4500 160
Hanf	ATB	0,95	1,63 0,43	1,04	1,81 0,06	0,18	0,29 0,08	1250	1439 920	2021	3320 857
	Lit.	0,73	1,40 0,35	1,60	2,20 0,40	0,25	0,38 0,15	1055	1350 500	1911	4000 500
Topinamburkraut	ATB	0,44	0,89 0,13	0,55	1,38 0,27	0,07	0,09 0,04	763	1095 605	598	868 435
	Lit.	0,59	0,90 0,29	0,67	1,20 0,07	0,06	0,13 0,03	1711	3000 530	1867	4000 10
Weide	ATB ¹⁾	0,46	0,75 0,25	0,21	0,56 0,14	0,10	0,18 0,04	446	593 330	138	200 107
	Lit.	0,46	1,04 0,30	0,27	0,50 0,19	0,09	0,12 0,08	497	900 300	190	2000 20
Pappel	ATB ²⁾	0,71	1,41 0,32	0,34	0,61 0,10	0,12	0,22 0,06	576	847 360	137	200 106
	Lit.	0,57	0,80 0	0,31	0,50 0,20	0,10	0,15 0,08	303	900 200	148	1500 20

ATB-Werte von vier Düngungsvarianten (A bis D) mit jeweils 20 (8) Analysen pro Pflanze und Element (1994 - 2001).
Literaturwerte nach VETTER, 1995; KASPER, 1997; MAIER ET AL., 1997; HARTMANN, BÖHM UND MAIER, 2000; RÖHRICHT, KIESEWALTER UND GROß-OPHOFF, 2002; WERNER UND VETTER, 2003 sowie HÄRDTLEIN, ELTROP UND THRÄN, 2003.

1) Weide *Salix viminalis* 21 mit Grasuntersaat

2) Pappel Japan 105 mit und ohne Grasuntersaat sowie NE 42 ohne Grasuntersaat

Schwefel und Chlor

Die mittleren Gehalte der beiden bei der Verbrennung besonders emissionswirksamen und z.T. hochtoxische Verbindungen verursachenden Elemente Schwefel ($S \Rightarrow S_2O$) und Chlor ($Cl \Rightarrow HCl$ und Dioxine) liegen mit Ausnahme von Knautgras in der Spanne der Literaturangaben. Die Getreidearten und Hanf weisen mit 0,08 bis 0,13 % S und 0,12 bis 0,20 % Cl deutlich höhere Mittelwerte auf als die Gehölze mit $\leq 0,06$ % S und $\leq 0,01$ % Cl. Abweichend von anderen Untersuchungsergebnissen (HARTMANN, BÖHM UND MAIER, 2000) konnte bei Schwefel ein signifikanter Einfluss der Düngung nachgewiesen werden. Mit Ausnahme von Knautgras liegt der Schwefelgehalt der auf Block D geernteten Pflanzen (ohne Dünger) im Mittel um 13 % unter dem von Block A und überschreitet damit teilweise den von STOCKINGER UND OBERNBERGER (1998) empfohlenen Grenzwert von 0,1 %. Die gemessenen Chlorgehalte, für die o.g. Autoren ebenfalls $< 0,1$ % empfehlen, lassen keinen eindeutigen Zusammenhang zur Düngung erkennen. Sie werden offenbar eher von der Art des Kaliumdüngers (KCl bzw. K_2SO_4) sowie von Standort, Sorte und Feldliegezeit beeinflusst (KASPER, 1997; HARTMANN, BÖHM UND MAIER, 2000; HERING, 2002).

4.2 Schwermetalle

Von den sechs in Pflanzen und Boden analysierten Schwermetallen interessieren in diesem Zusammenhang vor allem diejenigen, deren Akkumulation durch energiebedingte Immissionen und/oder durch Einträge aus Düngemitteln verursacht wird, nämlich Kadmium (Cd), Blei (Pb), Kupfer (Cu) und Zink (Zn). Die beiden Letztgenannten sind vergleichsweise wenig schädlich für Mensch, Tier und Pflanze und ohnehin essentiell, also in bestimmtem Umfang notwendig (MERIAN, 1991). Mit Ausnahme von Knautgras weisen die verschiedenen Pflanzenarten keine erheblichen Unterschiede in den Gehalten an Kupfer und Zink auf. Auch bei Blei gibt es keine nennenswerten Differenzen, zumal die Pb-Gehalte auf dem verkehrsfernen Versuchstandort ohnehin an der unteren Nachweisgrenze liegen (**Tab. 3**).

Tab. 3: Gehalt und Bilanz ausgewählter Schwermetalle für die untersuchten Energiepflanzen

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
Winterroggen	Gehalt mg kg ⁻¹	0,04	0,06 0,03	<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
Topinamburkraut	Gehalt mg kg ⁻¹	0,43	0,73 0,25	<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
Weide	Gehalt mg kg ⁻¹	1,62	2,18 1,32	<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	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

Analysen von 4 Düngungsvarianten (A bis D) mit 8 bis 36 Werten pro Pflanze und Schwermetall (1994 - 1997). 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

Kadmium (Cd) ist ebenso wie Blei hochtoxisch und daher durch entsprechende gesetzliche Verordnungen für Düngemittel, Böden, pflanzliche Produkte und Abgase eng limitiert (SCHOLZ UND ELLERBROCK, 2002). Dieses bei der Verbrennung anfallende und z.B. in Superphosphat enthaltene Schwermetall ist phytotoxisch und kann zu schweren Gesundheitsschäden bei Mensch und Tier führen. Ganzpflanzengetreide, wie Roggen und Triticale, weisen mit 0,03 bis 0,08 mg kg_{TM}⁻¹ sehr geringe Cd-Gehalte auf, was in Hinblick auf die traditionelle Verwendung als Nahrungs- und Futtermittel sehr vorteilhaft ist. Mit 0,8 bis 2,2 mg je kg Trockenmasse sind die Gehalte in Pappeln und Weiden deutlich höher. Da bei der Verbrennung ca. 98 % des Kadmiums in der Flug- bzw. Filterasche konzentriert werden (OBERNBERGER, 1997), die ohnehin deponiert werden muss, ergibt sich eine elegante Lösung, dieses Schwermetall zu entsorgen und aus dem Asche-Dünger-Kreislauf herauszuschleusen. Wie die eindeutig negative Bilanz der Gehölze zeigt, wird damit - selbst bei Verwendung der verbleibenden Grob- bzw. Rostasche als Grunddünger - der Boden langfristig von Kadmium gereinigt (**Tab. 3**).

4.3 Anbaubedingte Treibhausgasemissionen

Bei den Umweltwirkungen des Stickstoffs muss auch Lachgas (Distickstoffmonoxid N_2O) berücksichtigt werden, das infolge der Denitrifikation (mikrobielle Reduktion von Nitraten zu N_2O) aus dem Boden entweicht und mit einem CO_2 -Äquivalent von ca. 300 extrem klimawirksam ist (Treibhauspotential mit einem Zeithorizont von 100 Jahren; IPCC, 2001). Wie mehrjährige Gasmessungen auf den Versuchsflächen zeigen, werden infolge der Stickstoffdüngung bei $150 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Mittel ca. $140 \text{ mg N}_2O \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ bzw. 0,6 % des gedüngten Stickstoffs (bei einer Schwankungsbreite von 0 bis $480 \text{ mg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) als Lachgas im Boden freigesetzt (HELLEBRAND, KERN UND SCHOLZ, 2003). Auch die Pflanzenart hat Einfluss auf die Lachgasentwicklung. Die mittleren Emissionsraten von Pappel- und Weidenflächen liegen um etwa 80 bis $100 \text{ mg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ unter denen der Roggenflächen (**Abb. 5**).

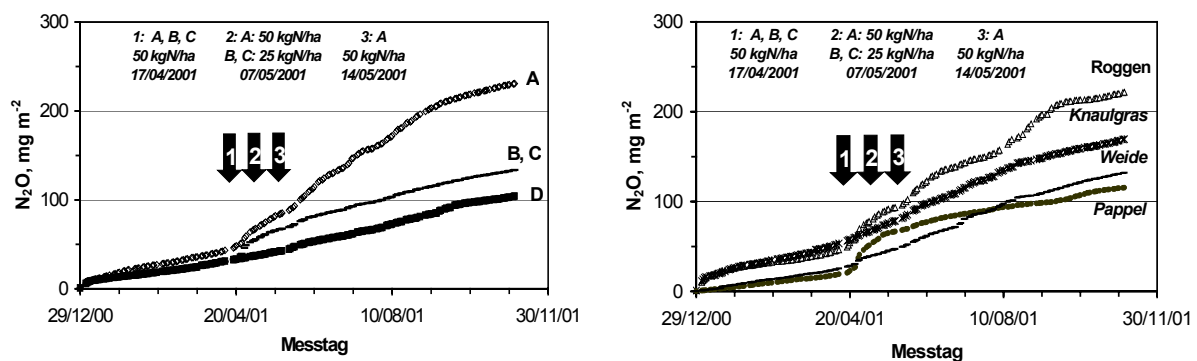


Abb. 5: Mittlere akkumulierte Lachgasemissionen beim Anbau von Energiepflanzen
links: in Abhängigkeit von der Stickstoffgabe (Mittel gleichgedüngter Parzellen)
rechts: in Anhängigkeit von der Pflanzenart (Mittel aller Düngungsvarianten)

Die akkumulierten Lachgasemissionen auf ungedüngten Pappelflächen (Block D) sind daher um ca. $250 \text{ mg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ geringer als die Emissionen konventionell gedüngter Roggenflächen (Block A). Dies entspricht einem mittleren CO_2 -Äquivalent von ca. $75 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ bzw. bis zu 30 % der anrechenbaren Gesamtemission klimawirksamer Gase bei der Erzeugung und Nutzung von pflanzlichen Festbrennstoffen (SCHOLZ ET AL., 1997).

Die Oxidation atmosphärischen Methans (CH_4) im Boden kann zu einer Klimagutschrift führen, da CH_4 ein Treibhauspotential von 23 (IPCC, 2001) aufweist. Die CH_4 -Oxidationsrate ist bei regelmäßig bearbeiteten Böden höher, d.h. Roggenflächen könnten profitieren. Langjährige Messungen belegen jedoch, dass der bodenbürtige Methanabbau keine anrechenbaren Gutschriften erzeugt. Die ermittelte CH_4 -Oxidation von $0,7 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (HELLEBRAND UND SCHOLZ, 2002) und deren geringe anbaubedingte Variation führt zu Gutschriften unter 1% bezogen auf N_2O -Emissionen und liegt damit innerhalb des Messfehlerbereichs. Eine Ammoniakbelastung (NH_3) der Umwelt durch die Gabe von Kalkammonsalpeter kann ausgeschlossen werden, da die NH_3 -Freisetzung stets unterhalb der Nachweisgrenze blieb (HELLEBRAND UND SCHOLZ, 2000).

5 ENERGIEGEWINN

Zur Bestimmung des Energiegewinns müssen Aufwand und Ertrag an Energie ermittelt und gegenübergestellt werden. Die Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes erfolgt nach einer aufwendigen auf der VDI-Richtlinie 4600 basierenden Methode (SCHOLZ, 1997; SCHOLZ, BERG UND KAULFUß, 1998). Für Anbau und Ernte der hier untersuchten Pflanzen beträgt er 2 bis $14 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ je nach Pflanzenart, Ernteintervall, Technologie und Düngergabe. Der Energieertrag ist von Naturalertrag, Heizwert und Wassergehalt abhängig. Wird Topinamburkraut außer Acht gelassen, so liegt er im Bereich von etwa 90 bis $190 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (**Abb. 6**).

Im Gegensatz zu anderen erneuerbaren Energieträgern ist bei Energiepflanzen weniger das Input/Output-Verhältnis, sondern vielmehr der Energiegewinn pro Flächeneinheit maßgebend. Der (Netto-) Energiegewinn, der sich aus der Differenz von Aufwand zu Ertrag ergibt, liegt mit Ausnahme von Topinambur unabhängig von der Düngungsvariante zwischen 87 und 173 GJ ha⁻¹ a⁻¹. Energetisch und ökologisch ausgesprochen interessant ist die Tatsache, dass - bezogen auf das 10-jährige Ertragsmittel - der Energiegewinn bei reduzierter Düngung (Blöcke B/C) kaum geringer ist als bei konventioneller Volldüngung (Block A) und bei Pappel sogar ohne Düngung (Block D).

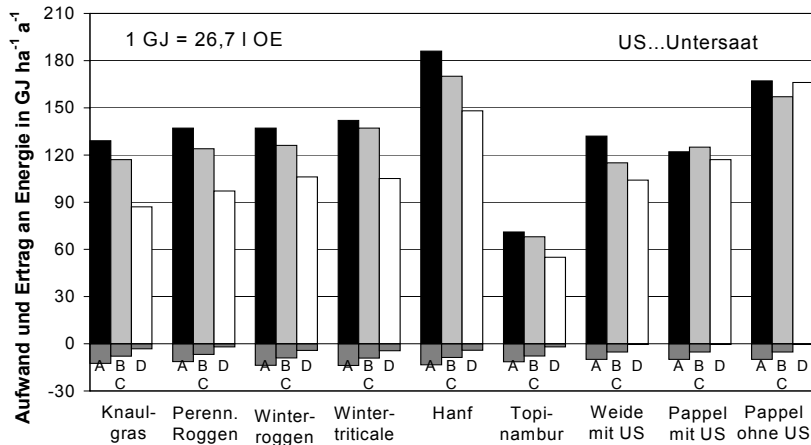


Abb. 6: Aufwand und Ertrag an Energie bei der Produktion von Energiepflanzen in Abhängigkeit von der Düngung

6 PRODUKTIONSKOSTEN

Der Vergleich der Produktionskosten der untersuchten Energiepflanzenarten erfolgt auf der Grundlage regionalspezifischer Rahmenbedingungen sowie der im 10-jährigen praxisnahen Feldversuch ermittelten Erträge und der hierbei gesammelten Anbauerfahrungen.

Für halmgutartige Energiepflanzen wird konventionelle Technik für Anbau, Ernte und Bergung als Quaderballen angesetzt. Sofern sie mit niedrigen Wassergehalten geerntet bzw. geborgen werden, kann davon ausgegangen werden, dass keine zusätzlichen Aufwendungen für Trocknung anfallen. Bei den Feldgehölzen wird, mit Ausnahme der Pflanzmaschine, ebenfalls konventionelle Technik für Pflanzbettbereitung, Düngung und Pflege (Hacken) eingesetzt. Die Holzernte erfolgt vollmechanisiert mit Hilfe eines adaptierten Feldhäckslers und eines Hochkippers im Parallelbetrieb. Die kostspielige ackerbauliche Rekultivierung der Flächen nach Ablauf des angenommenen 20-jährigen Produktionszyklus wird mit Forstmulcher und Bodenfräse durchgeführt. Da Feldholz in der Regel mit hohen Wassergehalten um etwa 50 % geerntet wird, fallen je nach Nutzungsverfahren u.U. zusätzliche Aufwendung für Trocknung und Lagerung an, die nachfolgend jedoch nicht berücksichtigt werden (**Tab. 4**).

Ohne Lagerung, Trocknung und Transport zum Verbraucher liegen die mittleren spezifischen Produktionskosten im Bereich von 45 bis 95 € t_{TM}⁻¹ und bezogen auf den Energieinhalt im Bereich von 2,8 bis 5,8 € GJ⁻¹ (Zum Vergleich: Der durchschnittliche Heizölpreis in der Bundesrepublik betrug im Jahr 2003 etwa 9,70 € GJ⁻¹.) Mit Lagerung würden sich die Produktionskosten um etwa 15 bis 30 % erhöhen.

Die Produktion von Knautgras und Hanf weist insgesamt die höchsten und die von Feldholz die geringsten mittleren Kosten auf. Bei Ganzpflanzengetreide zeichnet sich aufgrund der mehrjährigen Nutzung ein Kostenvorteil zugunsten des perennierenden Roggens ab. Von den untersuchten Feldgehölzen weisen Pappeln trotz relativ hoher Stecklingskosten geringere spezifische Kosten auf als Weiden. Eine Besonderheit der Feldholzproduktion ist, dass Produktionskosten und Erlöse nicht zeitgleich anfallen (GRUNDMANN ET AL., 2003).

Tab. 4: Mittlere Produktionskosten von Energiepflanzen für unterschiedliche Düngungsregime

Pflanzenart	€ ha ⁻¹ a ⁻¹				Kosten ¹⁾ € t _{TM} ⁻¹				€ GJ ^{-1 2)}			
	A ³⁾	B ⁴⁾	C ⁵⁾	D ⁶⁾	A ³⁾	B ⁴⁾	C ⁵⁾	D ⁶⁾	A ³⁾	B ⁴⁾	C ⁵⁾	D ⁶⁾
Knautgras ⁷⁾	694	607	593	503	86,7	83,1	81,2	93,2	5,4	5,2	5,0	5,8
Perenn. Roggen ⁷⁾	532	453	435	362	62,6	56,6	58,8	60,4	3,9	3,5	3,6	3,7
Winterroggen ⁷⁾	610	530	514	434	71,7	65,5	66,7	65,7	4,4	4,1	4,1	4,1
Wintertriticale ⁷⁾	581	503	490	414	69,2	61,4	60,5	66,8	4,1	3,6	3,6	4,0
Hanf ⁷⁾	883	780	783	711	78,8	76,2	78,3	79,9	4,8	4,6	4,7	4,8
Weide ⁸⁾	494	408	403	330	65,0	63,7	58,3	55,0	4,1	4,0	3,6	3,4
Pappel ⁸⁾	579	489	479	421	60,4	54,4	53,2	44,3	3,8	3,4	3,3	2,8

- 1) Gesamtkosten für Anbau (ohne Pflanzenschutzmittel), Ernte und Bergung, jedoch ohne Lagerung und Ferntransport, in Anlehnung an KTBL-TASCHENBUCH (2002) und BRAUN ET AL. (2001) unter Berücksichtigung von 90,- € ha⁻¹ Pacht, 10,2 € h⁻¹ Lohnkosten, 6 % Zinsen für Umlaufkapital, übliche Saatgut- und Düngemittelpreise, Asche kostenfrei, ohne Kosten für die allgemeine Betriebsführung und ohne Flächenprämie, für Erträge nach Tab. 1, Schlaggröße 20 ha, Feldentfernung 4 km
- 2) Kalkuliert mit 13,7 - 14,3 MJ kg⁻¹ für Halmgüter mit 15 % Feuchte und 8,0 MJ kg⁻¹ für Gehölze mit 50 % Feuchte
- 3) 150 kg N ha⁻¹ + 225 kg min. Grunddünger ha⁻¹ 4) 75 kg N ha⁻¹ + 30 kg K ha⁻¹ + 1650 kg Holzasche ha⁻¹
- 5) 75 kg N ha⁻¹ + 350-500 kg Strohasche ha⁻¹ 6) Kein Dünger
- 7) Konventionelle Halmguttechnologien mit 1,7 m³ Quaderballen; Produktionszyklus des perenn. Roggens 3 a
- 8) Weide mit Grasuntersaat, Pappel ohne Grasuntersaat; 12.000 Pfl. ha⁻¹ a 0,08 € (Weide) bzw. 0,18 € (Pappel); Produktions- und Erntezyklus 20 a und 4 a; Ernte mit modifiziertem 275 kW-Häcksler, 15 t_{TM} h⁻¹

Bei reduzierter Düngung (B/C) liegen die masse- und energiebezogenen Kosten um 2 bis 12 % unter denen der konventionellen Düngung (A). Zwischen den Düngungsvarianten mit Stroh- und Holzasche (B und C) ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Bei vollständigem Verzicht auf Düngemittel (D) erreichen die spezifischen Kosten ein ähnlich hohes Niveau wie bei konventioneller Düngung (A). Bei Weide und insbesondere bei Pappel liegen sie jedoch deutlich darunter.

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der Anbau von Energiepflanzen auf landwirtschaftlichen Flächen ist eine zukunftsfähige und umweltverträgliche Alternative bzw. Ergänzung zur traditionellen Nahrungsmittelproduktion, die eine relativ stabile, zusätzliche Einkommensquelle für Landwirte bilden könnte. Mit geeigneten, vorzugsweise mehrjährigen Pflanzenarten können mit geringem Pflegeaufwand und reduziertem Düngemittel- und Pflanzenschutzmitteleinsatz selbst auf relativ armen Böden Erträge von 10 t Trockenmasse pro Hektar und Jahr erzielt werden.

Die auf dem Standort Bornim (BWZ 30) durchgeführten zehnjährigen Untersuchungen zeigen, dass sich bei einer Verminderung der Stickstoffgabe von 150 auf 75 kg N ha⁻¹ der Ertrag nur geringfügig verringert und bei Roggen, Triticale, Pappel und Hanf zwischen 7,7 und 10,5 t_{TM} ha⁻¹ liegt. Ohne Düngung fällt er kontinuierlich ab und erreicht nach 10 Jahren ca. 40 bis 80 % des entsprechenden Ertrags der Düngung mit 150 kg N ha⁻¹. Eine Ausnahme bildet Pappel ohne Untersaat, die auch ohne Stickstoffeinsatz hohe Erträge gewährleistet.

Eine hohe Stickstoffgabe ist daher sowohl ökonomisch als auch ökologisch und energetisch ineffizient. Nachhaltig hohe Energiegewinne werden mit relativ geringen Gaben (≤ 75 kg N ha⁻¹) erzielt. Mit Ausnahme von Topinamburkraut betragen die Nettoenergiegewinne - bezogen auf o.g. Standort - bei reduzierter Stickstoffdüngung etwa 2.900 bis 4.300 Liter Öläquivalent pro Hektar und Jahr, die von Pappeln auch ohne Düngung erreicht und übertroffen werden.

Aufgrund extrem hoher Gehalte an umweltschädigenden Inhaltsstoffen (N, S, Cl) ist Knautgras nur bedingt für die Verbrennung geeignet. Ganzpflanzengetreide, von denen sich mehrjähriger Roggen durch geringe Bereitstellungskosten auszeichnet, hat ebenfalls recht

hohe Gehalte an diesen Stoffen. Topinamburkraut weist diesbezüglich weit geringere Werte auf, erreicht aber im langjährigen Durchschnitt keine akzeptablen Erträge. Hanf hat sowohl geringe Schadstoffgehalte als auch hohe Erträge, ist aber relativ kostenaufwendig und erfordert eine ausreichende Düngung und geeignete Fruchtfolge.

Mit geringen bodenbürtigen Lachgasemissionen (N_2O) und mittleren Gehalten von $\leq 0,7$ % Stickstoff (N), $\leq 0,3$ % Kalium (K), $\leq 0,06$ % Schwefel (S) und $\leq 0,02$ % Chlor (Cl) gehören Pappeln und Weiden zu den Energiepflanzenarten, die bei Anbau und Verbrennung die geringsten Emissionen verursachen und darüber hinaus ein hohes Akkumulationsvermögen an Schwermetall, insbesondere an Kadmium (Cd), aufweisen. Infolge der Konzentrierung des Schwermetalls in der Filterasche kann dadurch selbst bei Rückführung der Rostasche als Düngemittel ein nachhaltiger Beitrag zur Dekontamination des Bodens geleistet werden.

Weitere Vorteile von Feldholz sind die Ernte im Winter, die zwischen 2 und 10 Jahren frei wählbaren Ernteintervalle und die vergleichsweise geringen Produktionskosten. Der entscheidende Vorzug ist jedoch, dass es sich hierbei um einen Brennstoff handelt, für den bewährte emissionsminimierte Feuerungstechnologien bereits zur Verfügung stehen. Im Gegensatz zu Energiegetreide müssen hierfür allerdings erst noch die Züchtung forciert und kostengünstige, zuverlässige Technologien zur Ernte und Lagerung des Holzes sowie zur ackerbaulichen Rekultivierung der Flächen entwickelt werden.

8 LITERATUR

- ANONYMUS (1997): Rahmenempfehlungen zur Düngung im Land Brandenburg. Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Potsdam
- ANONYMUS (2002): Statistisches Jahrbuch über Ernährung Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2002. Landw.-Verlag Münster-Hiltrup
- ANONYMUS (2003): Erträge im Land Brandenburg. Persönl. Mitteilung, Landesbetrieb für Datenverarbeitung und Statistik Land Brandenburg, Frankfurt(O.)
- BRAUN, J. ET AL. (2001): Datensammlung für die Betriebsplanung und die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg. Schr.-Reihe der Landesanstalt für Landwirtschaft Bd. II, Teltow
- 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, BTU Cottbus
- EL BASSAM, N. (1998): Energy Plant Species. James & James Ltd London
- GRUNDMANN, P.; LUCKHAUS, C.; HEIERMANN, M.; HELLEBRAND, H.J. UND JACOBS, H. (2003): Studie zur Errichtung einer Pilotanlage zur Trockenvergärung oder Thermolyse landwirtschaftlicher, forstwirtschaftlicher und gewerblicher Biomasse zur Energiegewinnung als Beispielobjekt für die Landkreise Barnim und Uckermark. Forschungsbericht des ATB 2003/1
- HÄRDTLEIN, M.; ELTROP, L. UND D. THRÄN (2003): Voraussetzungen zur Standardisierung biogener Festbrennstoffe - Brennstoffeigenschaften, Auswirkungen und Einflussnahmemöglichkeiten. Berichtsentwurf, IER Stuttgart
- HARTMANN, H. UND V. SCHMIDT (2001): NO_x -Emissionen in einer Hackschnitzelfeuerung. Persönliche Mitteilung, Landtechnik Weihenstephan
- 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. UND V. SCHOLZ (2002): Einfluss der Landbewirtschaftung auf die bodenbürtigen N_2O - und CH_4 -Gasflussraten. agrarspectrum "Umweltrelevante Spurengase in der Land- und Forstwirtschaft - Herausforderung für Wissenschaft, Politik und Praxis", Band 34, S. 107-110
- HELLEBRAND, H.J., KERN, J. UND 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
- HERING, T. (2002): Hauptelementgehalte und verbrennungstechnische Eigenschaften von Halmgutbrennstoffen. Datenauswertung der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, unveröff., Jena
- HOFMANN, M. (1999): Modellvorhaben Schnellwachsende Baumarten. Zusammenfassender Abschlußbericht. In: Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 13, Münster
- HYTÖNEN, J. (1996): Biomass production and nutrition of short-rotation plantations. Diss., University of Helsinki, The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 589, Kannus
- IPCC (2001): IPCC Third assessment report: Climate change 2001: The scientific basis, edited by Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguera, M., van der Linden, P.J., Xiaosu, D., Cambridge University Press, UK
- KARPENSTEIN-MACHAN, M. (2000): Auswirkungen von pestizidfreiem Energiepflanzenanbau auf die Biomasserträge (Teil II). Universität Kassel. energie pflanzen II, S. 36-38
- KASPER, B. (1997): Stoffwandlung und Logistik pflanzenbürtiger Festbrennstoffe in einer umweltgerechten Landnutzungsalternative für den Spreewald. Diss., Humboldt-Universität zu Berlin
- KOBUS, K. (2000): Vergleichende Untersuchungen zur Ertragsbildung von Energiepflanzen. Diplomarbeit, Universität Potsdam und ATB Potsdam
- KTBL-TASCHENBUCH (2002): KTBL-Taschenbuch Landwirtschaft 2002/2003. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup

- LEWANDOWSKI, I. AND KAUTER, D. (2003): The influence of nitrogen fertiliser on the yield and combustion quality of whole grain crops for solid fuel use. In: *Industrial Crops and Products* 17(2003), S. 103-117
- 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. In: *Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung* Bd. 1, Technische Universität Graz
- PFUHL, E. (1929): Die bodenkundliche Bewertung des Versuchsgutes Bornim bei Potsdam. Dissertation, Landwirtschaftliche Hochschule Berlin
- REHFUESS, K.E. (1995): Standortansprüche und Nährstoffbedarf schnellwachsender Baumarten in Kurzumtriebswirtschaft. In: *Tagungsband zum Statusseminar Schnellwachsende Baumarten*, Kassel 23./24.10.95
- RÖHRICHT, C., KIESEWALTER, 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. Heft 7*
- SCHOLZ, V. (1997): Methodik zur Ermittlung des Energieaufwandes pflanzenbaulicher Produkte am Beispiel von Biofestbrennstoffen. *Agrartechnische Forschung* 3 H. 1, S.11-18
- SCHOLZ, V. UND R. ELLERBROCK (2002): The growth productivity, and environmental impact of the cultivation of energy crops on sandy soil in Germany. *Biomass & Bioenergy* 23 p. 81-92
- SCHOLZ, V., BERG, W. UND P. KAULFUß (1998): Energy Balance of Solid Biofuels. *J. agric. Engng. Res.* 71, p. 263-272
- 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., KRÜGER, K., HÖHN, A. ET AL. (1999): Umwelt- und technologiegerechter Anbau von Energiepflanzen. *Forschungsbericht des ATB 1999/1*, Potsdam-Bornim
- 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
- STOCKINGER, H. UND OBERNBERGER, I. (1998): Systemanalyse der Nahwärmeversorgung mit Biomasse. *Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung* Bd. 2, Technische Universität Graz
- TA LUFT (2002) - Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Techn. Anleitung zur Reinhaltung der Luft). Bundesanz. Köln
- VETTER, A. ET AL. (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
- WERNER, A. UND A. VETTER (2003): Untersuchungen und Empfehlungen zum Anbau von mehrjährigen Energiepflanzen unter Thüringer Standortbedingungen. *Abschlussbericht 42.02.430/2002*, Jena
- WERNER, A., VETTER, A. UND T. HERING (2004): Ergebnisse des 10 jährigen Energieholzanbaus in Thüringen. In: *Tagungsband "Energieholzproduktion in der Landwirtschaft"*, Potsdam 29.1.04, Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 35, S. 93-98
- WILCKE, W. UND H. DÖHLER (1995): Schwermetalle in der Landwirtschaft. *KTBL-Arbeitspapier 217*, Darmstadt