www.umweltethik.at

Landnutzung, Energie und industrielle Modernisierung Eine historische Perspektive mit Blick in die Zukunft

Fridolin Krausmann

Die industrielle Revolution war mit einem Transformationsprozess des gesellschaftlichen Energiesystems verbunden, der zu gravierenden Veränderungen in der Landnutzung, im agrarischen Produktionssystem und im gesellschaftlichen Biomassemetabolismus führte. In diesem Kontext wird eine empirische Untersuchung der Entwicklung der *gesellschaftlichen Aneignung von Nettoprimärproduktion* in Österreich seit dem frühen 19. Jahrhundert präsentiert. Eine Analyse dieses Transformationsprozesses des gesellschaftlichen Energiesystems ist nicht nur aus einer umwelthistorischen Perspektive interessant, sondern liefert auch Einsichten hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen einer notwendigen Entwicklung in Richtung einer modernen Solarenergie-Gesellschaft.

The transformation of the socio-economic energy system, with a substitution of fossil fuels by biomass during the process of industrial modernization was connected with sweeping changes in land use, the agricultural production system and socio-economic biomass metabolism. In this paper an empirical analysis of the development of the *human appropriation of NPP* in Austria since the early 19th century in connection with the changes in the socio-economic energy system is presented. This focus is of interest not only from an environmental history perspective, but also reveals important aspects about possibilities and limitations of a development towards a modern version of a society based on solar energy.

Schlüsselbegriffe: Gesellschaftlicher Stoffwechsel, gesellschaftliches Energiesystem, Landnutzung, Biomasse, gesellschaftliche Aneignung von Nettoprimärproduktion, industrielle Modernisierung, nachhaltige Entwicklung

Keywords: Socio-economic metabolism, socio-economic energy system, land use, biomass, human appropriation of net primary production, industrial modernization, sustainable development

Einleitung

In der ersten Nummer von *Natur und Kultur* hat Helmut Haberl (2000) in seinem Beitrag dem Zugang der klassischen Ökologie, die gesellschaftliche Eingriffe aus einer ökosystemaren Perspektive bloß als Störungen in der Funktion von Ökosystemen versteht, ein Konzept gegenübergestellt, das von einer strukturellen Koppelung sozialer und natürlicher Systeme ausgeht. Gesellschaftliche Eingriffe in natürliche Systeme prägen nicht nur diese Systeme, sondern auch die Gesellschaft selbst, denn die veränderte Natur wirkt wieder auf die Gesellschaft zurück. Dadurch können Wechselwirkungen zwischen sozialen und natürlichen Systemen als historischer Prozess beschreibbar gemacht werden (siehe auch Fischer-Kowalski et al. 1997).

Vor diesem theoretischen Hintergrund wird im folgenden Beitrag über Ergebnisse aus einer empirischen Untersuchung[1] eine Verbindung zwischen gesellschaftlichem Stoffwechsel, Landnutzung und gesellschaftlichen Eingriffen in ökosystemare Energieflüsse hergestellt. Angewandt wird dabei das Konzept der *gesellschaftlichen Aneignung von Nettoprimärproduktion* oder kurz *NPP-Aneignung* (HANPP)[2], das von einer Arbeitsgruppe um den Ökologen Peter Vitousek entwickelt wurde (Vitousek et al. 1986; Wright 1990; siehe auch Haberl 2000). Dieses Konzept leitet sich aus der Beobachtung ab, dass Men-

Natur und Kultur 1/2 (2000): 44-61
© Gesellschaft für ökologisch-nachhaltige Entwicklung

schen über Landnutzung in ökosystemare Energieflüsse eingreifen und die für ökosystemare Prozesse zur Verfügung stehende Biomasse- bzw. Energiemenge reduzieren.

Grüne Pflanzen sind in der Lage über den Prozess der Photosynthese Lichtenergie in chemische Bindungsenergie umzuwandeln, indem sie aus anorganischen Ausgangsstoffen organisches Material bilden. Die so genannte *Nettoprimärproduktion* (kurz NPP) bezeichnet dabei die pro Jahr auf einer bestimmten Fläche von grünen Pflanzen fixierte Energiemenge, abzüglich der von den Pflanzen selbst verbrauchten Energie. Damit stellt die Nettoprimärproduktion die energetische Basis für alle Organismen dar, die nicht in der Lage sind, Sonnenenergie direkt zu nutzen. NPP ist dementsprechend ein grundlegender Parameter für die Beschreibung von ökosystemaren Energieflüssen und die Funktion von Ökosystemen (vgl. BEGON et al. 1990).

Eine Reihe von gesellschaftlichen Aktivitäten verändern – meist gezielt, oft aber auch nur als Nebeneffekt – die biologische Produktivität von Ökosystemen. Die Umwandlung natürlicher Systeme in Agrarökosysteme etwa führt im Allgemeinen zu einer Verringerung der NPP, die Versiegelung von Flächen verhindert NPP gänzlich. Darüber hinaus eignet sich die Gesellschaft durch die Entnahme von Biomasse (land- und forstwirtschaftliche Ernte) ökosystemare Energie in Form von pflanzlicher Biomasse an. Das Konzept der NPP-Aneignung bildet diese beiden Prozesse – Landnutzung und Biomasseentnahme – ab und kann so zur Beschreibung der Auswirkung gesellschaftlicher Aktivitäten auf die Verfügbarkeit von Biomasse-Energie in Ökosystemen verwendet werden (HABERL 1997).

Vitousek et al. (1986) und Wright (1990) schätzten die globale Aneignung von NPP auf 20-40%. Dieses Ergebnis wurde vor allem im Hinblick auf die möglichen ökologischen Auswirkungen der NPP-Aneignung, insbesondere auf einen Zusammenhang zwischen Energieverfügbarkeit und Artenvielfalt, kontroversiell diskutiert (WRIGHT 1983; WRIGHT 1987).

Die in diesem Beitrag präsentierten Ergebnisse zur langfristigen Entwicklung der NPP-Aneignung in Österreich werden nicht direkt im Kontext dieser Biodiversitäts-Diskussion interpretiert, vielmehr versuche ich auf ein Argument einzugehen, das unter anderem von Herman Daly (1992) und Donella Meadows et al. (1992) aufgebracht wurde. In dieser Diskussion wird NPP-Aneignung als ein möglicher Indikator für die 'Größe' des gesellschaftlichen Systems im Vergleich zur begrenzten Tragfähigkeit von Ökosystemen betrachtet, wobei ein direkter Zusammenhang zwischen Bevölkerungsentwicklung, gesellschaftlichem Biomasse-Metabolismus und NPP-Aneignung unterstellt wird (siehe auch DALY 1996):

> Wenn es auch nur annähernd stimmen sollte, dass die Menschheit 40 Prozent der von den Kontinenten gelieferten NPP [NPP-Aneignung in terrestrischen Ökosystemen laut Vitousek et al. (1986). FK] beansprucht, stellt sich die aktuelle Frage: Was passiert wenn sich die Menschheit und ihre Wirtschaft wiederum verdoppeln, was schon in 20 bis 30 Jahren der Fall sein wird? Wie sieht die Welt aus, wenn die Menschen 80 Prozent der NPP für sich beanspruchen? Oder gar 100 Prozent? (MEADOWS et al. 1992, 93)

Aus diesem Kontext heraus werden im Folgenden die Ergebnisse einer empirischen Untersuchung zur Entwicklung der NPP-Aneignung in Österreich im Laufe der industriellen Revolution vorgestellt und interpretiert. Im Vordergrund der Analyse steht dabei ein Prozess, den der deutsche Umwelthistoriker Rolf Peter Sieferle (1997) als die *große Transformation* bezeichnet: Ein grundlegender Wandel im gesellschaftlichen Energiesystem, der durch eine fortschreitende Substitution von flächenabhängiger, erneuerbarer Biomasseenergie durch fossile Energie gekennzeichnet ist. Dieser Übergang von einer Solarenergiegesellschaft zur Industriegesellschaft, der sich in Österreich ab der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts vollzog, war mit drastischen Auswirkungen auf die Art und Weise der Landnutzung und auf Muster

im sozio-ökonomischen Biomasse-Metabolismus verbunden. Vor diesem Hintergrund scheint es interessant zu untersuchen, wie sich der Transformationsprozess des gesellschaftlichen Energiesystems in der gesellschaftlichen Aneignung von NPP und anderen damit in Beziehung stehenden Parametern wie Landnutzung, Ökosystemproduktivität und gesellschaftlicher Biomasse-Metabolismus niedergeschlagen hat.

Diese Frage ist nicht nur aus einer (umwelt)historischen Perspektive interessant, sondern sie weist auch sehr aktuelle Bezugspunkte auf: In Strategien für eine nachhaltige Entwicklung wird eine forcierte Nutzung von Biomasse als eine Möglichkeit für die Reduktion des Einsatzes von fossilen Energieträgern gesehen. Parallel dazu wird auch eine Ökologisierung der landwirtschaftlichen Produktion, das heißt eine Reduktion des Einsatzes von synthetischen Handelsdüngern und Pflanzenschutzmitteln angestrebt. Aus dem historischen Blickwinkel dieser Arbeit entsprechen diese Strategien charakteristischen Strukturen einer Solarenergiegesellschaft wie im Österreich des frühen 19. Jahrhunderts (Krausmann 1998). In diesem Sinne lassen sich aus einem historischen Vergleich zwischen Solarenergiegesellschaft und Industriegesellschaft und einer Betrachtung des Übergangsprozesses auch Erkenntnisse über Möglichkeiten und Grenzen von Strategien für eine nachhaltige Entwicklung ableiten. Ziel dieses Beitrags ist es, aus einer historischen Perspektive neue Aspekte für diese Diskussion zu liefern. Darüber hinaus soll mein Beitrag auch exemplarisch methodische Möglichkeiten einer quantitativen, historischen Untersuchung von Gesellschaft-Natur Systemen aufzeigen.

Der räumliche und zeitliche Rahmen

Für eine Berechnung der gesellschaftlichen Aneignung von NPP ist ein Datensatz erforderlich, der im Wesentlichen die Flächennutzung, die biologische Produktivität und die land- und forstwirtschaftliche Ernte zum jeweiligen Untersuchungszeitpunkt umfasst. Je weiter man allerdings in der Zeit nach hinten geht, umso lückenhafter sind die erforderlichen Daten und umso problematischer gestaltet sich die Vergleichbarkeit der Datensätze. In diesem Sinne stellt der räumliche und zeitliche Rahmen für eine derartige Untersuchung einen Kompromiss zwischen den Anforderungen, die sich aus der Fragestellung ergeben und der Datenverfügbarkeit dar.

Die erste umfassende Landvermessung mit einer parzellenscharfen Erfassung der Landnutzung und einer Schätzung der land- und forstwirtschaftlichen Erträge für die österreichische Reichshälfte der Habsburgermonarchie stammt aus der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts und ist der so genannte *franziscäische* oder *stabile Kataster*. Die Vermessungsarbeiten für weite Teile des Territorium der heutigen Republik Österreich wurden bis 1835 abgeschlossen. Da die wesentlichen Neuerungen der 'Agrarrevolution' und eine allgemeine Industrialisierung zu dieser Zeit in Österreich erst langsam zu greifen begannen und insbesondere fossile Energieträger vor 1850 nicht in nennenswertem Ausmaß Verwendung fanden, konnte ein erster Untersuchungszeitpunkt unter Bezugnahme auf die Daten aus dem franziscäischen Kataster mit 1830 festgelegt werden (Sandgruber 1978; Matis und Bachinger 1973; Haberl 2000). Auch die Auswahl der restlichen zehn Untersuchungszeitpunkte bis 1995 wurde wesentlich von der Verfügbarkeit entsprechender Daten bestimmt[3].

In räumlicher Hinsicht bezieht sich diese Untersuchung auf das heutige Territorium der Republik Österreich, das als administrative Einheit in dieser Form allerdings erst seit 1918 existiert[4]. Bis zum ersten Weltkrieg war das Untersuchungsgebiet auf verschiedene Kronländer der Österreichisch-Ungarischen Monarchie verteilt, sodass für die Jahre 1830, 1880 und 1910 die Daten zu Landnutzung und land- und forstwirtschaftlicher

Ernte auf das heutige Bundesgebiet umgelegt werden mussten. Diese Korrektur des Gebietsstandes erfolgte über räumlich disaggregiert vorliegende Daten und Korrekturfaktoren. Die Flächennutzung für das heutige Burgenland (ca. 3.900 km² oder 4,7% der Landesfläche) konnte für die Jahre vor 1918 nicht rekonstruiert werden. Diese Region befand sich bis 1918 unter Verwaltung der ungarischen Krone. Alle im Folgenden für Österreich präsentierten Daten beziehen sich daher ausschließlich auf das heutige österreichische Bundesgebiet ohne Burgenland (d.h. 95,3% des heutigen Bundesgebietes).

Formale Definition von NPP-Aneignung

Unter gesellschaftlicher Aneignung von NPP wird in diesem Zusammenhang die Differenz zwischen der NPP der *potenziellen natürlichen Vegetation* (kurz NPP_0) und der tatsächlich, nach der land- und forstwirtschaftlichen Ernte, in Ökosystemen verbleibenden NPP verstanden (siehe Abbildung 1). Die NPP der potenziellen natürlichen Vegetation bezeichnet die hypothetische Vegetation, die sich ohne Eingriffe des Menschen aufgrund von klimatischen Gegebenheiten und Bodeneigenschaften herausbilden würde (siehe TÜXEN 1956)[5]. Sie stellt in diesem Konzept das notwendige 'natürliche' Referenzsystem dar, ohne dass damit der Verzicht auf jegliche Landnutzung als gedachter 'Idealfall' gesehen wird. Die im Ökosystem verbleibende NPP wird mit NPP_t bezeichnet und entspricht der Menge an Biomasse, die für ökologische Prozesse verfügbar ist.

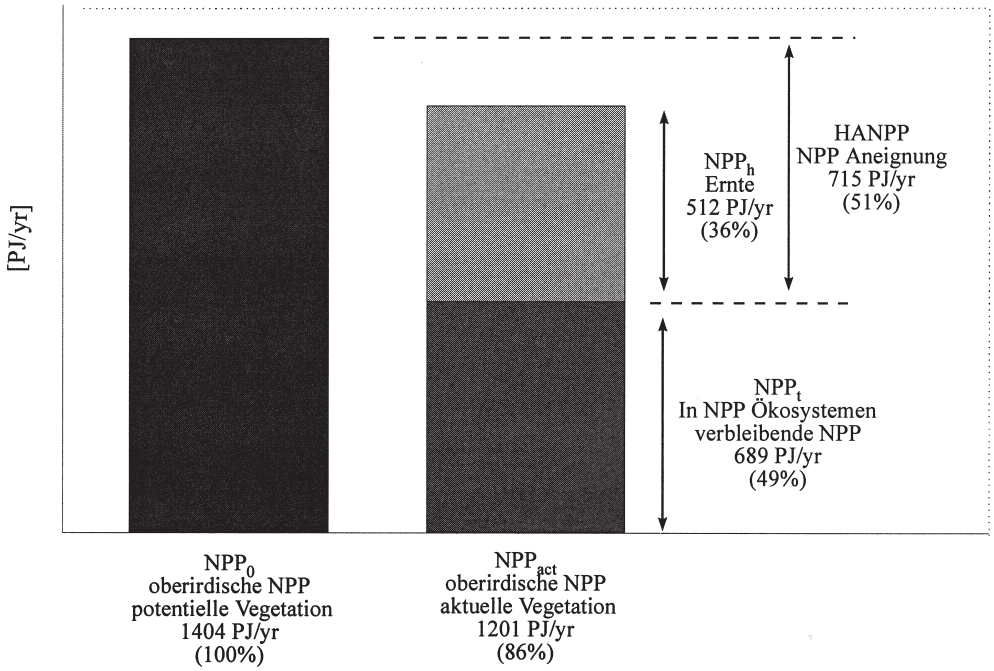

Abb.1: Die Berechnung der gesellschaftlichen Aneignung von Nettoprimärproduktion (HANPP) aus den Parametern NPP_0, NPP_{act}, NPP_h und NPP_t. Erklärung siehe Text. Die angegebenen Werte beziehen sich auf Österreich 1995. Quelle: Eigene Berechnungen.

Damit werden zwei Prozesse abgebildet, die zur Aneignung von Nettoprimärproduktion beitragen: (1) Landnutzung, die zu einer Veränderung der NPP von Ökosystemen führt, und (2) land- und forstwirtschaftliche Ernte, durch die den Ökosystemen NPP aktiv entzogen wird. Beide Prozesse reduzieren die Energiemenge, die in Form von Biomasse für heterotrophe Nahrungsketten zur Verfügung steht. Die NPP der *aktuellen Vegetation* wird mit NPP_{act} bezeichnet und die *geerntete NPP* mit NPP_h. Entsprechend diesen Konventionen kann NPP-Aneignung (HANPP) wie folgt definiert werden (Abbildung 1; vgl. HABERL 1997):

$$HANPP = NPP_0 - NPP_t$$

und

$$NPP_t = NPP_{act} - NPP_h$$

Für die Berechnung der gesellschaftlichen Aneignung von NPP und die Ermittlung der Parameter NPP_0, NPP_{act}, NPP_h und NPP_t sind Daten zur Entwicklung der Landnutzung, zur biologischen Produktivität bzw. zum Ertrag der betreffenden Vegetationseinheiten oder Kulturarten und zur land- und forstwirtschaftlichen Ernte erforderlich. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt üblicherweise in energetischen Einheiten [Joule], kann aber auch in Trockenmasse [kg] oder Kohlenstoff [kg C] umgerechnet werden[6].

Daten und Berechnungsmethoden

Aus den Forschungsarbeiten des *internationalen biologischen Programmes* (IBP) liegen umfassende Daten zur oberirdischen NPP (abgekürzt ANPP[7]) für viele Vegetationseinheiten vor (z.B. LIETH und WHITTAKER 1975). Aktuelle Arbeiten zeigen allerdings, dass in den meisten IBP Studien die unterirdische NPP (Wurzelwachstum usw.) von forstlichen Ökosystemen signifikant unterschätzt wurde (z.B. VOGT et al. 1986). Aufgrund dieser Unsicherheiten und einem Mangel an verlässlichen Datenquellen zur unterirdischen NPP beschränke ich mich in dieser Arbeit auf eine Betrachtung der oberirdischen NPP[8].

Angaben zur NPP der potenziellen natürlichen Vegetation ($ANPP_0$) in Österreich liegen aus den Arbeiten von Haberl (1995) und Schulz (1999) vor. Die NPP_0 in Österreich wurde in diesen Studien mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells auf der Basis von Produktivitätsdaten aus dem IBP über bekannte Beziehungen zwischen mittlerer Jahrestemperatur, Niederschlag und NPP modelliert[9].

Zur Rekonstruktion der Veränderungen in der Landnutzung wurde auf Primärdaten aus verschiedenen Quellen aus der amtlichen Statistik zurückgegriffen (z.B. Grundsteuerkataster, landwirtschaftliche Bodennutzungserhebungen, Häuser- und Wohnungszählungen, Eisenbahn- und Straßenstatistik). Auf Basis dieser Daten wurde ein Datensatz zur Landnutzung in Österreich zusammengestellt, der die gesamte Landfläche – je nach Datenverfügbarkeit in den Untersuchungsjahren – in 23 bis 43 unterschiedlichen Flächennutzungskategorien erfasst.

Die oberirdischen NPP der aktuellen Vegetation ($ANPP_{act}$) in Österreich wurde auf der Basis der Landnutzungsdaten und entsprechenden Produktivitätsdaten der jeweiligen Vegetationstypen berechnet: Die $ANPP_{act}$ der Wälder wurde dabei der ANPP der potenziellen Vegetation gleichgesetzt. Die Berechnung der biologischen Produktivität von landwirtschaftlich genutzten Flächen (Acker- und Grünland)[10] erfolgte über die Beziehung:

$$NPP = H \times F$$

H steht dabei für die (aus der amtlichen Agrarstatistik bekannte) kommerzielle Ernte und F für einen so genannten Erntefaktor, der es erlaubt aus der Ernte die oberirdische NPP zu extrapolieren. Dahinter steht die Annahme, dass zwischen kommerzieller Ernte und oberirdischer NPP einer Kulturpflanze ein konstantes Verhältnis besteht. Dieser feste Zusammenhang zwischen Ernte und oberirdischer NPP wird in der agrarwissenschaftlichen

Literatur durch den so genannten *Harvestindex* beschrieben, der den Anteil der Ernte an der oberirdischen Gesamtbiomasse bezeichnet und einen charakteristischen Wert jeder Kulturpflanze darstellt (siehe DONALD und HAMBLIN 1976).

Bei einer zeitlich vergleichenden Betrachtung ist allerdings zu berücksichtigen, dass die enormen Ertragssteigerungen der letzten Jahrzehnte unter anderem auf einer pflanzenzüchterischen Erhöhung des Harvestindex der meisten Kulturpflanzen, also einer Steigerung des Anteils der kommerziell interessanten Pflanzenteile (z.B. Korn) an der Gesamtpflanze, beruhen. Eine Erhöhung des Harvestindex (H) führt zu einer Erniedrigung des Erntefaktors (F). Zur Berechnung der ANPP landwirtschaftlich genutzter Flächen im Untersuchungszeitraum wurde daher über Daten aus der agrarwissenschaftlichen Literatur (z.B. AUSTIN et al. 1980; FEIL 1992) die Entwicklung des Harvestindex der wichtigsten Kulturarten rekonstruiert und dann die Erntefaktoren entsprechend angepasst.

Demnach wurde der Harvestindex von wichtigen Getreidearten wie etwa Weizen von 0,3 im frühen 19. Jahrhundert auf heute knapp 0,6 erhöht. Das bedeutet, dass im 19. Jahrhundert ein Kilogramm Weizenbiomasse in einem Weizenfeld zum Zeitpunkt der Ernte nur etwa 0,3 kg Korn enthielt, der Rest entfiel auf Stroh. Im Gegensatz dazu beträgt der Anteil des Korns an der Gesamtbiomasse beim Weizen zum Erntezeitpunkt heute fast 60%.

Die geerntete Biomasse wurde soweit wie möglich nach Angaben aus der amtlichen Agrar- und Forststatistik ermittelt. Für Flächennutzungstypen, deren Ernte nicht von der amtlichen Statistik erfasst wird (z.B.: Wald- und Almweide, Ernte in Hausgärten), wurde die durchschnittliche Ernte zu den Untersuchungszeitpunkten geschätzt. Die Daten zur land- und forstwirtschaftlichen Ernte wurden über die jeweiligen Brennwerte in energetische Einheiten [Joule] umgerechnet. Eine detailliertere Darstellung von Datengrundlagen und Berechnungsmethoden findet sich etwa in Haberl et al. 1999, Krausmann (in Druck) oder Weisz et al. 1999.

Ergebnisse

Nach den Berechnungen von Haberl (1995) und Schulz (1999) beträgt die oberirdische NPP der potenziellen natürlichen Vegetation in Österreich 1.404 PJ/a oder 17,7 $MJ/m^2.a$. Es wurde angenommen, dass sich die Produktivität der potenziellen natürlichen Vegetation zwischen 1830 und 1995 nicht verändert hat. Wie in Abbildung 2 gezeigt wird, betrug die oberirdische NPP der aktuellen Vegetation am Anfang des 19. Jahrhunderts nur 859 PJ/a oder 61% der Produktivität der potenziellen Vegetation. Bis 1970 wurde die $ANPP_{act}$ auf mehr als 80% des Wertes für die potenzielle Produktivität erhöht und betrug etwa 1.200 PJ/a. Nach 1970 blieb die $ANPP_{act}$ etwa auf diesem Niveau.

Die gesellschaftliche Aneignung von oberirdischer NPP ging kontinuierlich von 60% im Jahr 1830 auf 48% im Jahr 1970 zurück und begann dann bis auf 51% im Jahr 1995 anzusteigen. Das heißt, dass heute 23% mehr Biomasse (das sind etwa 131 PJ/a oder 7 Mio. Tonnen Trockenmasse) in Ökosystemen verbleiben als 1830. Diese Energie wird zum Teil im Schaftholz von Bäumen über mehrere Jahrzehnte gebunden, der überwiegende Teil geht im Laufe weniger Jahre – etwa über Blattfall und Abbau der Biomasse – in die bio-geochemischen Kreisläufe von Waldökosystemen ein (vgl. ERB 1999).

Dem Rückgang der NPP-Aneignung entgegengesetzt, stieg die Menge an geernteter Biomasse zwischen 1830 und 1995 um 72% an und beträgt heute über 500 PJ/a. Wie Abb. 2 zeigt, stiegen die geerntete Biomasse und die NPP der aktuellen Vegetation mehr oder weniger parallel bis zum Jahr 1985 an und blieben seither auf gleich bleibendem Niveau. So gesehen ist die 'Effizienz' der Ernte von Biomasse in Bezug auf die NPP-Aneignung gestiegen: 1830 kam auf 1 PJ geernteter Biomasse noch eine Aneignung von fast 2,9 PJ während 1995 nur mehr 1,4 PJ NPP je PJ Ernte angeeignet wurden (siehe Tabelle 1).

www.umweltethik.at

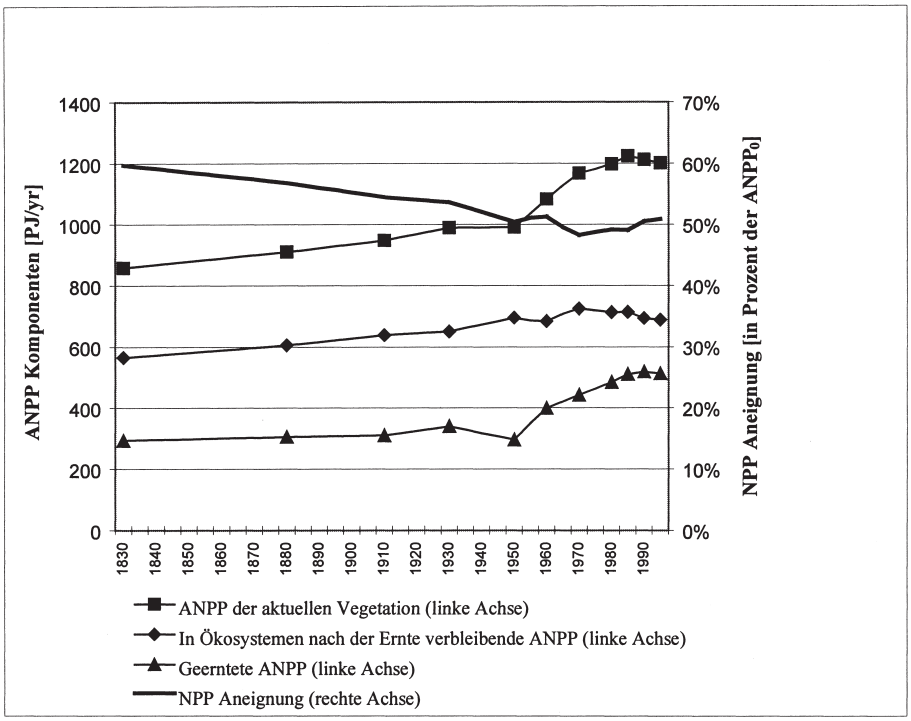

Abb.2: Die Entwicklung der gesellschaftlichen Aneignung von Nettoprimärproduktion (HANPP) in Österreich, 1830 bis 1995. Quelle: Eigene Berechnungen, siehe Text.

Tab.1: Angaben zur landwirtschaftlichen Nutzfläche, landwirtschaftlichen Ernte, insgesamt geernteter NPP und NPP-Aneignung pro Kopf und Jahr sowie zur NPP-Aneignung je Einheit geernteter Biomasse in Österreich 1830-1995.

	Bevölkerung	Landwirtschaftliche Nutzfläche	Landwirtschaftliche Ernte	Ernte insgesamt	NPP-Anneignung pro Kopf	NPP-Anneignung pro Ernte
	[1000]	[ha/cap.a]	[GJ/cap.a]	[GJ/cap.a]	[GJ/cap.a]	[PJ HANPP je PJ Ernte]
1830	3.255	1,3	41,7	90,2	257,7	2,9
1880	4.693	0,9	33,7	65,1	170,1	2,6
1910	6.356	0,6	29,6	48,7	120,4	2,5
1930	6.353	0,6	34,4	53,5	118,6	2,2
1950	6.672	0,6	28,9	44,4	106,1	2,5
1960	6.844	0,6	39,4	58,3	106,5	1,8
1970	7.226	0,5	44,3	61,2	94,0	1,5
1980	7.303	0,5	46,2	66,3	94,8	1,4
1990	7.525	0,4	43,5	68,9	93,2	1,3
1995	7.772	0,4	39,6	65,9	94,3	1,4

Quelle: Eigene Berechungen; Erklärung siehe Text.

www.umweltethik.at

Die Steigerung der landwirtschaftlichen Biomasseernte ist auf eine entsprechende Steigerung der $ANPP_{act}$ auf landwirtschaftlich genutzten Flächen zurückzuführen. Eine Steigerung der Ernte verringert daher nicht die im Ökosystem verbleibende NPP und resultiert dementsprechend auch nicht in einem Anstieg der NPP-Aneignung. Die leichte Zunahme der NPP-Aneignung seit 1970 kann im Zusammenhang mit einer Stagnation der Produktivität landwirtschaftlicher Flächen und einer steigenden Holzernte gesehen werden.

Betrachtet man die NPP-Aneignung nach Landnutzungstypen, zeigt sich, dass im Jahr 1830 nur etwa 1% der gesamten NPP-Aneignung auf Flächenversiegelung durch Gebäude- und Verkehrsflächen (Siedlungsflächen) zurückzuführen ist. Bis zum Jahr 1995 ist der Anteil der Siedlungsflächen an der NPP-Aneignung auf fast 8% angestiegen. Der Anteil der Landwirtschaft ging von 84% im Jahre 1830 auf nur mehr 65% im Jahre 1995 zurück, während sich der Anteil der Forstwirtschaft von 15% auf 27% fast verdoppelt hat. Diese Entwicklung war mit weit reichenden Veränderungen in der Landnutzung in der untersuchten Zeitspanne verbunden (siehe Abbildung 3): Zwischen 1830 und 1995 war eine Zunahme der Siedlungsfläche um fast 370% (2.565 km^2) und der Waldfläche um 6.600 km^2 zu verzeichnen. Dabei betrug die Zunahme der Waldfläche in den ersten 100 Jahren der Untersuchungsperiode nur 5,5%. Zwischen 1930 und 1995 stieg die Aufforstungsrate deutlich an, heute ist eine um 21% größere Fläche mit Wald bedeckt als um 1830. Umgekehrt ging die Ausbreitung von Siedlungs- und Waldflächen mit einer Reduktion des Ackerlandes um etwa ein Drittel (34%) und des Grünlandes um ein Fünftel (20%) einher.

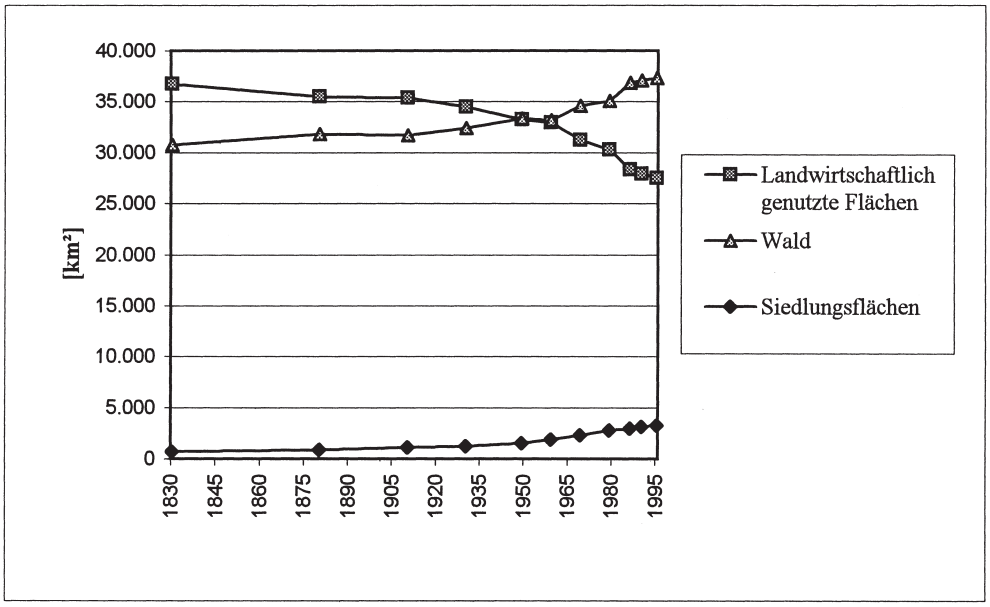

Abb. 3: Die Entwicklung der Landnutzung in Österreich, 1830 bis 1995.
Quelle: Eigene Berechnungen, siehe Text.

Auf einer räumlich disaggregierten Ebene wird innerhalb dieser generellen Trends (Zunahme der Waldfläche und Abnahme der landwirtschaftlich genutzten Flächen) ein Prozess der räumlichen Konzentration bestimmter Landnutzungstypen sichtbar. Während im frühen 19. Jahrhundert Ackerbau noch bis in große Höhen üblich und verbreitet war, verschwand diese Form der Landnutzung weitgehend aus alpinen Regionen und wurde durch Grünlandwirtschaft ersetzt oder die Flächen wurden aufgeforstet. Im Bundesland

www.umweltethik.at

Tirol verringerte sich die Ackerfläche von 700 km² im Jahr 1830 auf 260 km² im Jahr 1930 und wurde bis 1995 weiter auf nur mehr 90 km² reduziert. Demgegenüber hat sich vor allem in den fruchtbaren Tiefebenen das Ausmaß von Wiesen und Weiden drastisch verringert. In Niederösterreich ging die Grünlandfläche innerhalb von 100 Jahren von 3.900 km² im Jahr 1830 auf 2.700 km² (1930) zurück.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Aufforstung der vorwiegend extensiv genutzten Flächen und Grenzertragsflächen – und damit für die Reduktion der landwirtschaftlich genutzten Fläche – lag in der stetigen Steigerung der Produktivität (und damit des Ertrages) landwirtschaftlicher Flächen, die insbesondere in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts eine enorme Beschleunigung erfuhr. Wie in Abbildung 4 dargestellt, wurde die Produktivität am Ackerland zwischen 1830 und 1910 um 37% erhöht und in den folgenden 80 Jahren mehr als verdoppelt, wobei allein die Steigerung in den Jahren nach dem zweiten Weltkrieg bis 1980 über 70% betragen hat. Eine ganz ähnliche, wenn auch etwas abgeschwächte Entwicklung lässt sich auch für die Produktivität des Grünlandes zeigen.

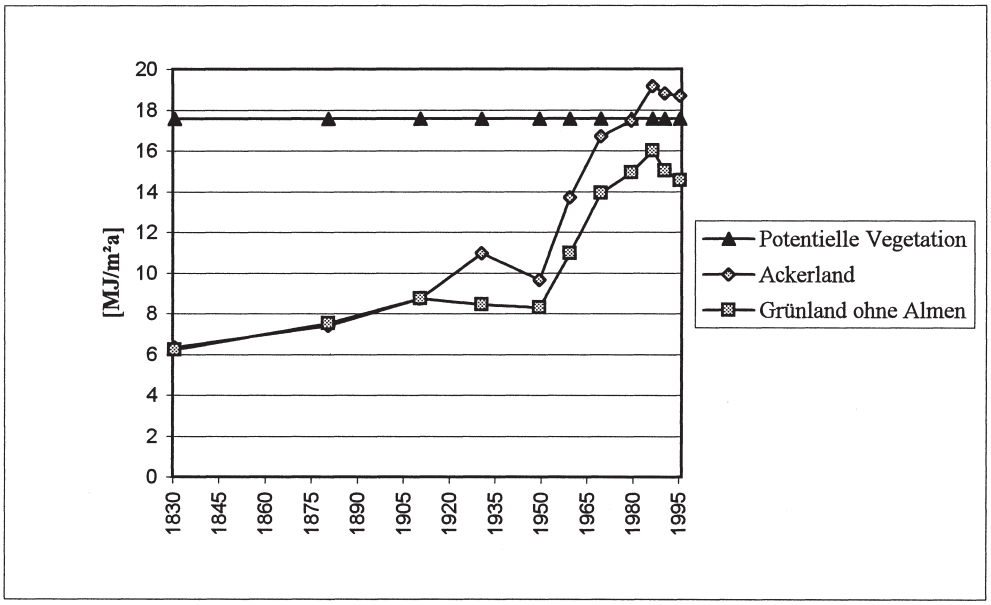

Abb. 4: Die Entwicklung der durchschnittlichen NPP auf landwirtschaftlich genutzten Flächen im Vergleich zur NPP der potenziellen Vegetation in Österreich, 1830 bis 1995. Angaben in MJ pro m² und Jahr (MJ/m².a). Quelle: Eigene Berechnungen, siehe Text.

Insgesamt ergibt sich aus diesen Entwicklungen trotz des drastischen Rückganges der landwirtschaftlichen Nutzfläche ein deutlicher Anstieg in der $ANPP_{act}$ der landwirtschaftlich genutzten Flächen von 211 PJ/a im Jahr 1830 auf 394 PJ/a im Jahr 1995.

Die jährlich geerntete Biomasse (siehe Abbildung 2) stieg um 72% oder 213 PJ zwischen 1830 und 1995, wobei 80% dieses Zuwachses auf eine Zunahme der landwirtschaftlichen Ernte entfallen. Die Ernte von Ackerland und Grünland wuchs von 130 PJ/a im Jahr 1830 auf 331 PJ/a im Jahr 1980, also um mehr als 150%. Ab 1980 war ein leichter Rückgang der landwirtschaftlichen Ernte auf 301 PJ/a im Jahr 1995 zu verzeichnen. Die Biomasseernte aus Wäldern ging von 155 PJ/a im Jahr 1830 auf 96 PJ/a im Jahr 1950 zurück. Seither hat sie sich fast verdoppelt und betrug 1995 etwa 185 PJ/a.

Trotz des zunehmenden Trends der Biomasseernte insgesamt im Laufe des 19. Jahrhunderts ging die Menge der pro Kopf geernteten Biomasse bis 1910 auf nur mehr 50% des Wertes von 1830 zurück (siehe Tabelle 1). Erst nach dem 2.Weltkrieg begann die pro Kopf geerntete Biomasse anzusteigen und erreichte um 1990 mit 75% des Wertes von 1830 den höchsten Wert im 20 Jahrhundert. Die pro Kopf geerntete Menge an landwirtschaftlicher Biomasse lag um 1980 sogar um 11% höher als 1830 und lag 1995 etwa auf dem Niveau von 1830. Die pro Kopf verfügbare landwirtschaftliche Nutzfläche beträgt aufgrund der deutlichen Zunahme der Gesamtbevölkerung und der Abnahme der landwirtschaftlich genutzten Flächen mit 0,4 ha heute nur mehr etwa 30% des Wertes von 1830.

Diskussion

Vitousek et al. (1986) schätzten die globale NPP-Aneignung auf 24-39%. Wright (1990), der im Wesentlichen von derselben Datenbasis ausging, aber zwischen Holzernte aufgrund von Entwaldung und Holzernte in Wirtschaftswäldern unterschied, engte diesen Wert auf 20-30% ein. Wie hier und im Detail von Haberl et al. (1999) gezeigt wurde, liegt die NPP-Aneignung in Österreich mit über 50% im Jahr 1995 deutlich über diesen Schätzungen der globalen NPP-Aneignung.

Darüber hinaus zeigt sich aber, dass die NPP-Aneignung seit dem frühen 19. Jahrhundert nicht etwa angestiegen ist, wie man aufgrund der stetig steigenden Erntemengen, der Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion und der Zunahme der Flächenversiegelung seit 1830 bei einer oberflächlichen Betrachtung vermuten könnte. Im Gegenteil dazu ist die NPP-Aneignung zwischen 1830 und 1995 um einige Prozentpunkte zurückgegangen, bezogen auf die Bevölkerung ist sie sogar um zwei Drittel von knapp 260 GJ/cap auf derzeit etwa 95 GJ/cap und Jahr gesunken (Tabelle 1). Eine Verstärkung könnte dieser sinkende Trend noch durch die aus methodischen Gründen erfolgte Gleichsetzung der $ANPP_{act}$ von Waldökosystemen mit der $ANPP_0$ erfahren. Diese Annahme könnte zu einer Überschätzung der Produktivität von Waldökosystemen im 19. Jahrhundert und damit zu einer Unterschätzung der NPP-Aneignung für dieses Jahrhundert führen: Bis hinein ins 20. Jahrhundert wurden den Wäldern in manchen Regionen durch die weit verbreiteten Nutzungsformen von Waldweide und Waldstreugewinnung große Mengen an krautiger Biomasse mit einem – im Vergleich zu Holz – vergleichsweise hohen Nährstoffgehalt entnommen. Dadurch könnte die Nährstoffverfügbarkeit in Waldökosystemen deutlich unter den heutigen Bedingungen gelegen haben, was wiederum zu einer Reduktion der Produktivität von Wäldern geführt haben könnte. Diese Vermutung wird auch durch zeitgenössische Schätzungen zum jährlichen Holzzuwachs gestützt, die für das 19. Jahrhundert von einem deutlich geringeren jährlichen Zuwachs ausgehen, als er etwa für die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts angenommen wird (Krausmann 2000).

Der unerwartete Rückgang der NPP-Aneignung hängt unter anderem damit zusammen, dass eine der bestimmenden Größen für das Ausmaß der NPP-Aneignung das Verhältnis von Waldland zu landwirtschaftlich genutzter Fläche darstellt: Wälder zeichnen sich durch eine vergleichsweise hohe Produktivität ($ANPP_{act}$) aus, während durchschnittlich nur etwa 20-30% der jährlichen ANPP von Waldökosystemen geerntet werden. Der Ersatz von Wald durch Ackerland auf einer bestimmten Fläche führt dagegen zu einer Aneignung der oberirdischer NPP von über 90%, da auf Ackerflächen fast die gesamte jährliche ANPP abgeerntet wird. Von der Produktivität der jeweiligen Feldfrüchte wird die NPP-Aneignung hingegen kaum beeinflusst, da jeder Zuwachs an Produktivität im Allgemeinen zu einer entsprechenden Erhöhung der Biomasseernte führt. Dementsprechend

spiegelt sich eine Zunahme der landwirtschaftlichen Ernte aufgrund von Intensivierungsmaßnahmen nicht in der NPP-Aneignung wider. Dieser Prozess kann erst bei einer Analyse von $ANPP_{act}$ und $ANPP_h$ verstanden werden, die die gleichzeitige Zunahme der Produktivität und der Ernte abbilden.

Würde man weiter in der Geschichte zurückblicken, etwa in die Zeit ausgedehnter Rodungsperioden im 11. und 12. Jahrhundert (KRAL 1994), ließe sich aufgrund der Urbarmachung, also der Umwandlung von Wald in Ackerland und Grünland, vermutlich eine entsprechende Zunahme der NPP-Aneignung feststellen. Dieser Prozess war jedoch bereits im 18. Jahrhundert abgeschlossen. Am Beginn des 19. Jahrhunderts wurde der größte Teil des kulturfähigen Landes in der einen oder anderen Form landwirtschaftlich genutzt. Man kann daher annehmen, dass die NPP-Aneignung mit dem ausgehenden 18. Jahrhundert einen historischen Höhepunkt erreicht hatte. Das weist darauf hin, dass das sozio-ökonomische Energiesystem im frühen 19. Jahrhundert, das bis in die 1850er Jahre immer noch fast vollständig auf flächenabhängigen, erneuerbaren Energieträgern (Biomasse) basierte, bis an die Grenze der Kapazität ausgelastet war. Gleichzeitig führten Bevölkerungswachstum und ein rasch wachsender industrieller Metabolismus zu einem stetig steigenden gesellschaftlichen Bedarf an Energie und damit Biomasse.

Insbesondere die Wälder wurden um die Mitte des 19. Jahrhunderts vermutlich bis an die Grenze ihrer Ertragsfähigkeit und darüber hinaus genutzt, wobei die energieintensive Schwerindustrie Mitte des 19. Jahrhunderts bis zu 40% des jährlichen Holzeinschlages für sich beanspruchte.

Ebenfalls sehr begrenzt waren die Möglichkeiten für eine Steigerung der landwirtschaftlichen Biomasseproduktion. Trotz einer durchaus beträchtlichen Zunahme der Produktivität der landwirtschaftlich genutzten Flächen aufgrund einer verbesserten Nährstoffversorgung (Optimierung des Düngermanagements und Leguminosenanbau), einer damit im Zusammenhang stehenden Reduktion der Brachflächen und neuer, ertragreicher Kulturarten (Kartoffel, Mais) konnte die Steigerung der Erntemenge nicht mit dem Bevölkerungswachstum Schritt halten. Die pro Kopf geerntete Menge an landwirtschaftlicher Biomasse ging dementsprechend während des 19. Jahrhunderts zurück, erst ab 1930 begann sie wieder anzusteigen und liegt heute etwa in der gleichen Größenordnung wie im frühen 19. Jahrhundert bei rund 40 GJ/cap.a (siehe Tabelle 1).

Im 20. Jahrhundert wurde die landwirtschaftliche Produktion vor allem durch neue Technologien auf der Basis fossiler Energieträger enorm gesteigert. Landwirtschaftliche Maschinen ersetzten Zug- und Arbeitstiere, zu deren Ernährung im 19. Jahrhundert bis zu einem Drittel der landwirtschaftlichen Nutzfläche erforderlich war. Industriell mit hohem Energieaufwand gefertigte Handelsdünger wurden bereits in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu einer bedeutenden Nährstoffquelle in der Landwirtschaft und von 1954 bis 1974 stieg der Handelsdüngereinsatz in der österreichischen Landwirtschaft von 54.000 Tonnen auf über 400.000 Tonnen an. Bis in die Mitte der 80er Jahre blieb er auf etwa diesem Niveau und begann dann, unter anderem aufgrund politischer Maßnahmen zur Verringerung von Produktionsüberschüssen und landwirtschaftlich bedingten Umweltproblemen, deutlich zurückzugehen.

Bedingt durch die Ertragssteigerungen entwickelte sich Österreich in den 1970er Jahren von einem Land, das von importierten Nahrungsmitteln abhängig war, zu einem Nettoexporteur von Agrarprodukten. Immer mehr Nahrungsmittel konnten auf einer immer kleineren Fläche produziert werden und die Zuwächse in den landwirtschaftlichen Erträgen im 20. Jahrhundert waren eine wichtige Voraussetzung für die Aufforstung von landwirtschaftlichen Grenzertragsböden und die dadurch bedingte Zunahme der Waldfläche.

Parallel dazu stieg der Anteil der landwirtschaftlichen Biomasseproduktion, der in der aus energetischen Gesichtspunkten vergleichsweise ineffizienten Produktion von Fleisch, Eiern und Geflügel verwendet wurde, stetig an. Um 1830 wurde etwa ein Drittel des Ackerlandes zur Erzeugung von Ackerfutter (insbesondere zur Versorgung von Zugtieren) verwendet, bis 1970 war dieser Anteil auf fast 70% angestiegen und ist seither wieder deutlich zurückgegangen, nicht zuletzt aufgrund einer Substitution von traditionellem Ackerfutter (Silomais, Klee, Kartoffel) durch importierte Kraft- und Eiweißfuttermittel (KRAUSMANN 2000).

Die rasche Substitution von Brennholz durch Kohle ab der Mitte des 19. Jahrhunderts führte zu einem deutlichen Rückgang des Bedarfes an Brennholz. Dementsprechend ging der Holzeinschlag in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts bis in die 1950er Jahre stark zurück, eine Entwicklung, die ebenfalls einen spürbaren Beitrag zum beobachteten Rückgang der NPP-Aneignung leistete. Allerdings wurde die rückläufige Nachfrage nach Brennholz für Haushalte und Industrie mit einer gewissen Zeitverzögerung durch den schnell ansteigenden Holzbedarf der Zellstoff- und Papierindustrie sowie der Sägeindustrie mehr als kompensiert. Nach dem 2. Weltkrieg begann der Holzeinschlag rasch anzusteigen, und 1980 wurde bereits mehr Holz eingeschlagen als zu den Spitzenzeiten Mitte des 19. Jahrhunderts. Heute verbrauchen Zellstoffindustrie und Sägewerke mehr Holz als um 1850 zur Erzeugung von Prozesswärme in Haushalten und Industrie benötigt wurde. Die Steigerung der Holzernte gegenüber dem 19. Jahrhundert wurde einerseits durch 'Verbesserungen' im Forstmanagement, andererseits durch Fortschritte in der Technologie der Holzbringung und die Bewirtschaftung auch abgelegener Regionen (Forststraßenbau) ermöglicht. Darüber hinaus könnte in gewissem Ausmaß eine Steigerung der NPP von Forstökosystemen und damit des erwirtschaftbaren Ertrages auch auf die bereits angesprochene Einschränkung von Waldweide und Waldstreuentnahme zurückzuführen sein.

Die Biomasseernte insgesamt ist im Untersuchungszeitraum deutlich angestiegen und hat zu einer Ausweitung des gesellschaftlichen Biomasse-Metabolismus geführt. Die im Inland geerntete Menge an Biomasse entspricht dabei auch weitgehend dem inländischen Verbrauch an Biomasse. Zumindest über den Zeitraum für den Außenhandelsdaten für Österreich vorliegen zeigt sich, dass sich Importe und Exporte von Biomasse die Waage halten, wenngleich bis in die 1970er Jahre überwiegend Nahrungs- und Futtermittel importiert und Holz bzw. Holzprodukte exportiert wurden (KRAUSMANN 2000). Insgesamt verbraucht die österreichische Gesellschaft heute um 75% mehr an Biomasse als im frühen 19. Jahrhundert und das trotz der Umstellung des sozio-ökonomischen Energiesystems von Biomasse auf fossile Energie und Wasserkraft.

Schlussfolgerungen

Noch vor 150 Jahren stellte Biomasse die quantitativ bedeutendste Energiequelle für die menschliche Gesellschaft in Österreich dar. Mittlerweile hat Biomasse diese zentrale Rolle im gesellschaftlichen Energiesystem an Kohle, Öl und Gas verloren. Der sozio-ökonomische Energiebedarf ist in diesem Zeitraum um den Faktor 6 angestiegen. 1995 wurden in Österreich knapp 1.600 PJ an Energie bzw. Energieträgern verbraucht, etwa 30% davon in Form von Biomasse (siehe Abbildung 5).

Mit diesen weit reichenden Veränderungen in der energetischen Basis des gesellschaftlichen Stoffwechsels im Laufe der industriellen Revolution hat sich auch die Struktur des Biomasse-Metabolismus und die gesellschaftliche Bedeutung und Funktion von Biomasse verändert, und diese Veränderungen in den Mustern von Bedarf und Produktion von Biomasse spiegeln sich in der Entwicklung der NPP und ihrer gesellschaftlichen Aneignung zwischen 1830 und 1995 in Österreich wider. Trotz einer Verdoppelung der Be-

www.umweltethik.at

völkerung und einer Verdoppelung des gesellschaftlichen Biomasse-Metabolismus seit dem frühen 19. Jahrhundert ist die NPP-Aneignung in diesem Zeitraum gesunken, bezogen auf die Bevölkerung (pro Kopf) ist sie zwischen 1830 und 1995 sogar um zwei Drittel zurückgegangen. Diese Entwicklung ist in sehr engem Zusammenhang mit den Veränderungen im sozio-ökonomischen Energiesystem und dem zunehmenden Verbrauch fossiler Energieträger zu sehen.

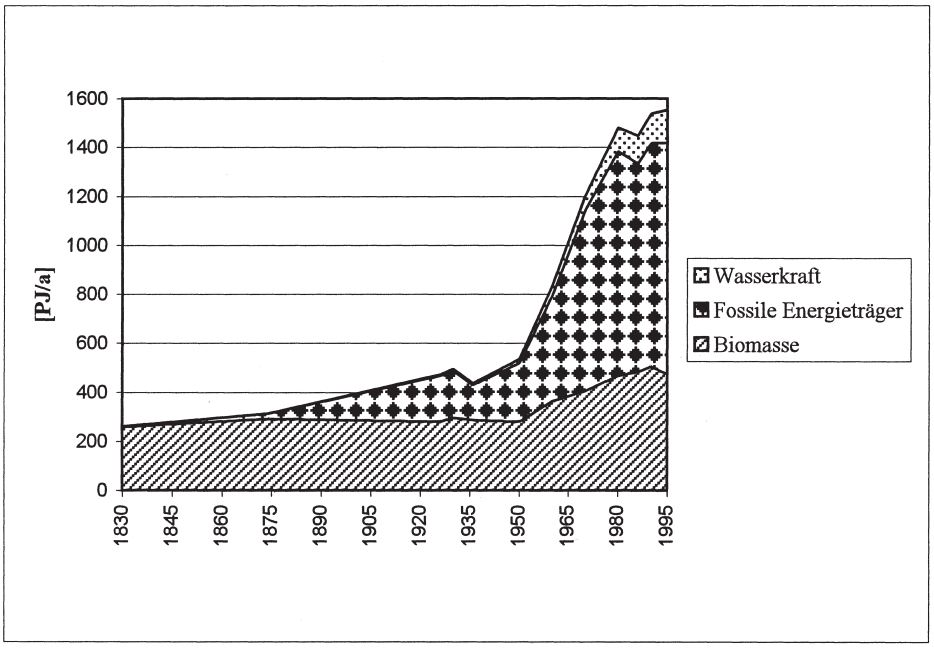

Abb. 5: Die Entwicklung des energetischen Metabolismus in Österreich, 1830 bis 1995. Dargestellt ist der inländische Verbrauch von Primärenergie in PJ pro Jahr. Dabei wurden neben Primärenergieträgern für technische Konversionsprozesse auch alle anderen energiereichen Materialien – insbesondere Biomasse zur Ernährung von Menschen und Nutztieren – berücksichtigt (siehe HABERL *2000). Quelle:* KRAUSMANN *und* HABERL *2000.*

Im 19. Jahrhundert war es vor allem der Umstieg von Holz auf Kohle bei Erzeugung von Prozesswärme in Industrie und Gewerbe und später auch in den Haushalten, der zu einer spürbaren Verringerung des Holzverbrauches und damit auch der NPP-Aneignung geführt hat. Im 20. Jahrhundert bewirkte die so genannte *grüne Revolution* eine Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion weit über den wachsenden Bedarf hinaus, mit der Folge, dass landwirtschaftliche Flächen in bedeutendem Umfang aus der Produktion genommen und aufgeforstet wurden – was wiederum wesentlich dazu beigetragen hat, dass die NPP-Aneignung trotz stark ansteigender Biomasseernte und zunehmender Flächenversiegelungen in den letzten Jahrzehnten nicht angestiegen ist. Die technologischen Entwicklungen, die die Ertragssteigerungen der *grünen Revolution* möglich machten, beruhen allerdings direkt oder indirekt auf dem Einsatz von fossiler Energie.

Der beobachtbare Rückgang der NPP-Aneignung bzw. der angesprochene 'Effizienzgewinn' der Biomasseproduktion in Bezug auf die Aneignung von NPP ist also wesentlich an den Einsatz nicht erneuerbarer, fossiler Energieträger gekoppelt.

Diese Entwicklung ist nicht nur für das empirisch untersuchte Fallbeispiel Österreich charakteristisch, sondern ließe sich in ihrer Grundtendenz vermutlich auch für die meis-

ten anderen (mittel)europäischen Industriestaaten feststellen. Die beschriebenen Veränderungen im gesellschaftlichen Biomasse-Metabolismus, in der Landnutzung und im agrarischen Produktionssystem, die für diese Entwicklung der NPP-Aneignung ausschlaggebend sind, können als geradezu charakteristische Folgeerscheinungen des Transformationsprozesses des gesellschaftlichen Energiesystems im Laufe der industriellen Revolution betrachtet werden (siehe SIEFERLE 1997).

Vor dem Hintergrund dieses Ergebnisses scheint eine Hinterfragung der Argumentation von Herman Daly (1992) und Donella Meadows et al. (1992), die in der gesellschaftlichen Aneignung von NPP einen Indikator für die Annäherung einer wachsenden menschlichen Bevölkerung und ihres ökonomischen Systems an ökologisch vorgegebene Grenzen sehen, notwendig.

Der Rückgang der NPP-Aneignung in Österreich in einer Periode von rasantem ökonomischen Wachstum und einer Zunahme der Gesamtbevölkerung zeigt, dass die Argumentation von Daly und Meadows zu kurz greift, denn die Beziehung zwischen Bevölkerung, Verbrauch und Produktion von Biomasse und NPP-Aneignung ist dynamischer als eben dieses Argument impliziert. In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass Zuwächse in der Produktivität landwirtschaftlicher Flächen eine deutliche Steigerung der Biomasseentnahme ermöglichen, während die NPP-Aneignung dadurch nicht erhöht wird, oder, wie im Fall von Österreich, sogar zurückgeht.

Allerdings sind dieser Steigerung der Produktivität bzw. der Erträge letztendlich bestimmte Grenzen gesetzt – etwa aufgrund physiologischer Einschränkungen hinsichtlich einer weiteren Verbesserung des Harvestindex oder von Sättigungseffekten im Bereich der Nährstoffversorgung (EVANS 1998). Darüber hinaus gibt es bis heute kaum Hinweise darauf, dass die NPP größerer Regionen deutlich über den Wert der NPP der potenziellen natürlichen Vegetation gesteigert werden kann (MOHR 1999).

Während meine Ergebnisse die Grundaussage von Daly und Meadows insofern also durchaus unterstützen, als sie zeigen, dass NPP einen limitierenden Faktor für eine nachhaltige Entwicklung darstellt (siehe auch MUNASINGHE und SHEARER 1995), verdeutlichen sie, dass die Zusammenhänge komplexer sind als bisher angenommen.

Zwischen gesellschaftlichem Metabolismus – d.h. gesellschaftlichen Material- und Energieflüssen – und Landnutzung besteht eine sehr enge Beziehung. Mit der Transformation des gesellschaftlichen Energiesystems im 19. und 20. Jahrhundert und den damit verbundenen Veränderungen im gesellschaftlichen Biomasse-Metabolismus haben sich grundsätzliche Eigenschaften der Biomasseproduktion verändert.

Agrargesellschaften – wie etwa das vorindustrielle Österreich des frühen 19. Jahrhunderts oder viele der so genannten 'Länder des Südens' – basieren in energetischer Hinsicht in überwiegendem Ausmaß auf Biomasse als Energieträger und decken einen großen Teil Ihres Durchsatzes an Material und Energie über die Extraktion von Biomasse aus terrestrischen Ökosystemen. Landbewirtschaftung stellt aus dieser Perspektive eine 'Technologie' dar, die die Transformation von Sonnenenergie – als solche für gesellschaftliche Zwecke nur beschränkt nutzbar – in Nahrung und Rohstoff steuert. Dementsprechend ist die Erzeugung eines 'Nettoenergiegewinns' eine Grundvoraussetzung für die Landwirtschaft unter agrargesellschaftlichen Bedingungen, d.h. der gesellschaftliche Energieaufwand, der zur Erzeugung einer bestimmten Menge an Biomasse notwendig ist, darf den (energetischen) Ertrag zumindest längerfristig oder großräumig nicht übersteigen. Eine weitere Einschränkung für die landwirtschaftliche Produktion unter agrargesellschaftlichen Bedingungen ergibt sich aus der ständigen Gefahr einer Übernutzung von Ressourcen und einer damit verbundenen Beeinträchtigung der natürlichen Bodenfrucht-

barkeit. Insbesondere der notwendige Ersatz wichtiger Pflanzennährstoffe, die dem Boden durch die landwirtschaftliche Ernte entzogen werden, erfordert ein komplexes System an Kreislaufführung und Nährstofftransfers und bestimmt so das mögliche Ertragniveau.

Mit dem Übergang zur Industriegesellschaft und der Substitution von Biomasse durch fossile Energieträger verliert die Relation von gesellschaftlichem Energieaufwand zu (energetischem) Ertrag zunehmend an Bedeutung. Eine steigende Nachfrage nach Agrarprodukten kann durch eine Erhöhung der landwirtschaftlichen Erträge über den Einsatz von Technologien und Betriebsmitteln, die auf Fossilenergie basieren, befriedigt werden. Diese grundsätzliche, im Endeffekt allerdings ebenso begrenzte Möglichkeit zur Steigerung der Produktivität von Agrarökosystemen bringt ein dynamisches Element in den limitierenden Charakter der NPP-Aneignung.

Allerdings sind die Produktivitätszuwächse, die durch die *grüne Revolution* ermöglicht werden, mit einem hohen Aufwand an fossiler Energie in der agrarischen Produktion und den vorgelagerten Bereichen verbunden. So hat sich nach Pimentel et al. (1990) der Energieaufwand in der US-amerikanischen Maisproduktion zwischen 1700 und 1985 um den Faktor 15 erhöht, während die Erträge nur um das Dreieinhalbfache gestiegen sind. Die energetische Effizienz der Maisproduktion ist entsprechend gesunken und während um 1700 je MJ aufgewendeter Energie 11 MJ in Form von Maiskörnern erwirtschaftet wurden, waren es 1983 nur noch 2,4 MJ (siehe dazu auch GIAMPIETRO et al. 1992; STANHILL 1984). Darüber hinaus ist die industrielle Landwirtschaft mit massiven Eingriffen in ökosystemare Energieflüsse und Nährstoffkreisläufe verbunden (VITOUSEK et al. 1997a und 1997b) und führt zu einer Reihe von Umweltproblemen wie Bodendegradation und -erosion, Grundwasserbelastung, Emission von Treibhausgasen oder Artenverlust und steht so im Widerspruch zu den allgemeinen Vorstellungen für eine nachhaltige Entwicklung. Der Parameter NPP-Aneignung bildet derartige negative Auswirkungen der Landnutzung allerdings nicht, oder nur unzureichend ab, nämlich erst dann, wenn sie die NPP der betroffenen Ökosysteme reduzieren. Erst eine gemeinsame Betrachtung der Entwicklung von NPP-Aneignung und den dahinterliegenden Parametern (Landnutzung, Biomasse-Ernte, Produktivität,...) mit Ergebnissen aus Energie- und Materialflussanalysen oder anderen Umweltindikatoren ermöglicht also tiefergehende Aussagen über die 'Nachhaltigkeit' von sozio-ökonomischen (Wachstums-)Prozessen.

Meine Ergebnisse unterstreichen, dass eine zentrale Aufgabe im Bereich nachhaltiger Entwicklung die Lösung der Frage sein muss, auf welche Weise der weltweit zunehmende Bedarf an Biomasse als Nahrung, Rohstoff und Energieträger auf eine ökologisch verträgliche Weise bereitgestellt werden kann. Aus einer historischen Perspektive zeigt sich, dass das solare Energiesystem in Österreich bereits um die Mitte des 19. Jahrhunderts, also bei halbem Bevölkerungsstand und einem Energieverbrauch von nur einem Sechstel des derzeitigen Wertes bis an die Grenze der Tragfähigkeit genutzt wurde.

Derzeit werden in Österreich jährlich etwa 940 PJ an fossilen Energieträgern verbraucht (Abbildung 5). Wollte man diese Energiemenge auf der Basis von Biomasse – etwa Biodiesel auf Rapsbasis oder Brennholz – erzeugen, wäre dazu bei derzeitigem Ertragsniveau (und damit auch bei derzeitiger Produktionsintensität) eine Anbaufläche von Raps bzw. eine Wirtschaftswaldfläche von 170.000 bis 220.000 Quadratkilometer erforderlich[11]. Das entspricht etwa dem Dreifachen der heute in Österreich land- und forstwirtschaftlich genutzten Fläche. Andererseits wird auf 85% der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Österreich (bzw. 60% der Ackerfläche) Viehfutter produziert, das mit einem energetischen Wirkungsgrad von nur etwa 10% in tierische Produkte wie Milch, Fleisch oder Eier umgewandelt wird. Zur Nahrungsversorgung (Nährwert) tragen diese Nah-

rungsmittel tierischen Ursprungs vergleichsweise wenig, nämlich nur etwa 20-25% bei (KRAUSMANN 2000).

Ungeachtet aller technologischen Innovationen und Möglichkeiten, die uns heute zur Verfügung stehen oder die für die nächsten Jahrzehnte zu erwarten sind, stellt sich daher die berechtigte Frage wie groß ein notwendiger Schritt in Richtung moderner Solarenergiegesellschaft beim derzeitigen Niveau der gesellschaftlichen Energie- und Materialströme sein kann. Eine absolute Reduktion der sozio-ökonomischen Material- und Energieflüsse und Veränderungen in den Konsumgewohnheiten erscheinen aus dieser Perspektive jedenfalls als grundlegende Voraussetzungen für einen erfolgreichen Umbau der Gesellschaft in Richtung einer nachhaltigen Zukunft.

Dank

Die hier präsentierten Ergebnisse gehen auf ein Manuskript für einen Vortrag, der im Rahmen der Konferenz *Nature, Society and History. Long Term Dynamics of Social Metabolism* (30.9. bis 2.10.1999) in Wien gehalten wurde, zurück. Ich danke Helmut Haberl für seine Unterstützung und seine wertvollen Kommentare zu dieser Publikation und Niels Schulz, Helga Weisz und Karl Heinz Erb für die gute Zusammenarbeit in verschiedenen Forschungsprojekten.

Mag. Fridolin Krausmann
Abteilung Soziale Ökologie
Institut für Interdisziplinäre Forschung und Fortbildung der
Universitäten Innsbruck, Klagenfurt und Wien,
Schottenfeldgasse 29, A-1070 Wien

Anmerkungen

1. Die Arbeiten für diese Untersuchung wurden zum größten Teil im Rahmen des Kulturlandschaftsforschungsmoduls IN4: Top Down Planungsindikatoren, im Projekt 'Colonizing Landscapes: Indicators for Sustainable Land Use', im Auftrag des BMWA und des BMWV durchgeführt.
2. Die Abkürzung HANPP leitet sich vom englischen *Human Appropriation of Net Primary Production* ab.
3. Die weiteren Untersuchungszeitpunkte sind 1880; 1910; 1930; 1950; 1960; 1970; 1980; 1986; 1990; 1995.
4. Zwischen 1938 und 1945 war das heutige Bundesgebiet als Ostmark in das Deutsche Reich eingegliedert. In diesen Zeitraum fällt allerdings kein Untersuchungszeitpunkt.
5. Unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen würde das österreichische Bundesgebiet mit Ausnahme alpiner Regionen und einiger Sonderstandorte völlig mit verschiedenen Waldformen bedeckt sein (siehe WAGNER 1984).
6. Ein Joule ist eine sehr kleine Einheit. Im Allgemeinen werden in dieser Arbeit Megajoule (1 MJ $\sim 10^6$ Joule), Gigajoule (1 GJ $\sim 10^9$ Joule) bzw. Petajoule (1 PJ $\sim 10^{15}$ Joule) verwendet. Die Angaben erfolgen üblicherweise pro Jahr (z.B.: PJ/a), pro Flächeneinheit und Jahr (z.B.: MJ/m^2.a) oder pro Kopf und Jahr (z.B.: GJ/cap.a) Über den durchschnittlichen Brennwert von Biomasse, der in grober Annäherung 18,2 MJ pro kg Trockenmasse beträgt, können die energetischen Einheiten in Trockenmasse umgerechnet werden. Ein kg Biomasse entspricht 0,45 kg reinem Kohlenstoff.
7. Die Abkürzung ANPP leitet sich vom englischen *Aboveground Net Primary Production* ab.
8. Diese Einschränkung auf eine Betrachtung der oberirdischen NPP (ANPP) kann auf der einen Seite zu einer gewissen Unterschätzung von landnutzungsabhängigen Veränderungen in der NPP führen, da die Auswirkungen von Landnutzung auf die unterirdische NPP vermutlich noch deutlicher sind als auf die oberirdische (siehe HABERL 1995). Auf der anderen Seite kann eine Nichtberücksichtigung der unterirdischen NPP zu einer Überschätzung der NPP-Aneignung führen, da nur ein sehr kleiner Anteil der unterirdischen NPP geerntet wird.

9. Mögliche Veränderungen in der Produktivität der potenziellen natürlichen Vegetation im Zusammenhang mit Veränderungen in den klimatischen Bedingungen (global warming) im Untersuchungszeitraum konnten nicht berücksichtigt werden. Vielmehr wurde für den Zeitraum 1830 bis 1995 eine konstante NPP_0 angenommen.
10. Die Entwicklung der Produktivität von Weiden, Almen und einigen anderen Landnutzungskategorien wurde auf der Basis von Produktivitätsdaten aus der Literatur und Schätzungen ermittelt (siehe KRAUSMANN 2000).
11. Berechnungsannahmen: Durchschnittlicher Holzertrag: 6 fm je ha und Jahr (entspricht 57 GJ/ha.a), durchschnittlicher Rapsertrag von 1,1 Tonnen Rapsöl je ha und Jahr (entspricht 40 GJ/ha.a).

Literatur

AUSTIN, R.B., BINGHAM, I., BLACKWELL, R.D., EVANS, L.D., FORD, M.A., MORGAN, C.L., TAYLOR, M. (1980): Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. In: *Journal for Agricultural Science* 94, 675-685.

BEGON, M., HARPER, J.L., TOWNSEND, C.R. (1990): *Ecology. Individuals, populations and communities*. Blackwell, Bosten.

DALY, H. (1992): Vom Wirtschaften in einer leeren Welt zum Wirtschaften in einer vollen Welt. Wir haben einen historischen Wendepunkt in der Wirtschaftsentwicklung erreicht. In: Goodland, R., Daly, H., Serafy, S.E., Droste, B. (Hrsg.): *Nach dem Brundtland-Bericht. Umweltverträglich wirtschaftliche Entwicklung*. UNESCO, Bonn, 29-41.

DALY, H. (1996): *Beyond growth. The economics of sustainable development*. Beacon Press, Boston.

DONALD, C.M., HAMBLIN, J. (1976): The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. In: *Advances in Agronomy* 28, 361-405.

ERB, K. (1999): *Die Beeinflussung des oberirdischen Standing Crop und Turnover in Österreich durch die menschliche Gesellschaft*. IFF-Social Ecology Papers Nr. 58, Wien.

EVANS, L.T. (1998): Greater Crop Production. Whence and Whither? In: WATERLOW, J.C., Armstrong, D.G., Fowden, L., Riley, R.: *Feeding a World Population of More Than Eight Billion People. A Challenge to Science*. Oxford University Press, New York, Oxford, 89-97.

FEIL, B. (1992): Breeding progress in small grain cereals. A comparison of old and modern cultivars. In: *Plant Breeding* 108, 1-11.

FISCHER-KOWALSKI, M., HABERL, H., HÜTTLER, W., PAYER, H., SCHANDL, H., WINIWARTER, V., ZANGERL-WEISZ, H. (1997): *Gesellschaftlicher Stoffwechsel und Kolonisierung von Natur.* G+B Verlag Facultas, Amsterdam.

GIAMPIETRO, M., CERRETELLI, G., PIMENTEL, D. (1992): Energy analysis of agricultural ecosystem management: human return and sustainability. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 38, 219-244.

HABERL, H. (1995): *Menschliche Eingriffe in den natürlichen Energiefluss von Ökosystemen. Sozioökonomische Aneignung von Nettoprimärproduktion in den Bezirken Österreichs*. IFF-Social Ecology Papers Nr. 43, Wien.

HABERL, H. (1997): Human appropriation of net primary production as an environmental indicator. Implications for sustainable development. In: *Ambio* 26, 143-146.

HABERL, H. (2000): Energetischer Stoffwechsel und nachhaltige Entwicklung. In: *Natur und Kultur* 1/1, 32-47.

HABERL, H., ERB, K.H., KRAUSMANN, F., LOIBL, W., SCHULZ, N., WEISZ, H. (1999): *Colonizing landscapes. Human appropriation of net primary production and its influence on standing crop and biomass turnover in Austria*. IFF-Social Ecology Papers Nr. 57, Wien.

KRAL, F. (1994): Wald- und Siedlungsgeschichte. In: Österreichischer Forstverein (Hrsg.): *Österreichs Wald. Vom Urwald zur Waldwirtschaft*. Eigenverlag, Wien, 9-48.

KRAUSMANN, F. (1998): Von der Erhaltung der Bodenfruchrbarkeit zur Steigerung der Erträge. In: Dirlinger, H., Fliegenschnee, M., Krausmann, F., Liska, G., Schmid, M.A., Winiwarter, V.: *Bodenfruchtbarkeit und Schädlinge im Kontext von Agrargesellschaften*. IFF-Social Ecology Papers Nr. 51, Wien, 5-26.

KRAUSMANN, F. (2000): Rekonstruktion der Entwicklung von Materialflüssen im Zuge der Industrialisierung. Veränderungen im sozioökonomischen Biomasse-Metabolismus in Österreich von 1830 bis 1998. In: Sieferle, R. P., Breuninger, H. (Hrsg.): *Der europäische Sonderweg*, Band 3. Breuninger Stiftung, Stuttgart.

KRAUSMANN, F. (in Druck): Land use and industrial modernization. An empirical analysis of human influence on the functioning of ecosystems in Austria 1830-1995. In: *Land Use Policy*.

KRAUSMANN, F., HABERL, H. (2000): *From wood and rye to paper and beef*. Paper to the Conference of the European Society of Ecological Economics. Wien 3.-5. Mai 2000. CD Rom.

LIETH, H., WHITTAKER, R.H. (1975): *Primary productivity of the biosphere*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

MATIS, H., BACHINGER, K. (1973): Österreichs industrielle Entwicklung. In: Brusatti, A. (Hrsg.): *Die Habsburgermonarchie 1848-1918. Die wirtschaftliche Entwicklung*. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien, 105-232.

MEADOWS, D., MEADOWS, D., RANDERS, J. (1992): *Die neuen Grenzen des Wachstums*. Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart.

MOHR, H. (1999): Biomasse – Baustein einer CO_2-armen Energieversorgung. In: Eisenbeiß, G. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit und Energie*. Köln, 50-53.

MUNASINGHE, M., SHEARER, W. (1995): *Defining and measuring sustainability. The biogeophysical foundations*. The United Nations University (UNU) and The World Bank, Washington DC.

PIMENTEL, D., DAZHONG, W., GIAMPIETRO, M. (1990): Technological Changes in Energy Use in U.S. Agricultural Production. In: Gliessmann, S.R. (Hrsg.): *Agroecology, Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture*. Springer, New York, 305-321.

SANDGRUBER, R. (1978): *Österreichische Agrarstatistik 1750-1918. Wirtschafts- und Sozialstatistik Österreich-Ungarns*. Band 2. Verlag für Geschichte und Politik, Wien.

SCHULZ, N. (1999): *Auswirkungen von Landnutzung auf Ökosystemprozesse. Vergleichende Berechnung der menschlichen Aneignung von Nettoprimärproduktion in Österreich anhand verschiedener Datenquellen*. Diplomarbeit, Universität Wien.

SIEFERLE, R.P. (1997): *Rückblick auf die Natur. Eine Geschichte des Menschen und seiner Umwelt*. Luchterhand Verlag, München.

STANHILL, G. (1984): *Energy and Agriculture*. Springer, Berlin.

TÜXEN, R. (1956): Die heutige potentielle natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetationskartierung. In: *Angewandte Pflanzensoziologie* 13, 5-42.

VITOUSEK, P.M., EHRLICH, P.R., EHRLICH, A.H., MATSON, P.A. (1986): Human appropriation of the products of photosynthesis. In: *BioScience* 36, 368-373.

VITOUSEK, P.M., ABER, J., HOWARTH, R.W., LIKENS, G.E., MATSON, P.A., SCHINDLER, D.W., SCHLESINGER, W.H., TILMAN, D. (1997a): Human Alteration of the Global Nitrogen Cycle. Causes and Consequences. In: *Ecological Applications* 7, 737-750.

VITOUSEK, P.M., MOONEY, H.A., LUBCHENCO, J., MELILLO, J.M. (1997b): Human Domination of Earth`s Ecosystems. In: *Science* 277, 494-499.

VOGT, K.A., GRIER, C.C., VOGT, D.J. (1986): Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. In: *Advances in Ecological Research* 15, 303-377.

WAGNER, H. (1984): *Die natürliche Pflanzendecke Österreichs*. Österreichische Akademie der Wissenschaften. Beiträge zur Regionalforschung 6, Wien.

WEISZ, H., KRAUSMANN, F., ERB, K.H., SCHULZ, N., HABERL, H. (1999): Gesellschaftliche Beeinflussung ökosystemarer Energieflüsse und Energiebestände. In: Haberl, H., Bittermann, W., Hüttler, W., Weisz, H., Fischer-Kowalski, M., Schandl, H., Winiwarter, V.: *Colonizing Landscapes, Indicators for Sustainable Land Use*. IFF-Soziale Ökologie, Studie im Auftrag von BMWV und BMwA, Wien, 29-54.

WRIGHT, D.H. (1983): Species-energy theorie. An extension of the species-area theorie. *In: Oikos* 41, 496-506.

WRIGHT, D.H. (1987): Estimating human effects on global extinction. *In: International Journal of Biometeorology* 31, 293-299.

WRIGHT, D.H. (1990): Human impacts on the energy flow through natural ecosystems, and implications for species endangerment. In: *Ambio* 19, 189-194.