

Vom Kreislauf zum Durchfluss

Österreichs Agrarmodernisierung als sozialökologischer Transformationsprozess

Einleitung*

Soziale Ökologie begreift Gesellschaft und Natur als strukturell gekoppelte Systeme.¹ Abbildung 1 stellt eine allgemeine graphische Repräsentation der konzeptuellen beziehungsweise epistemologischen Vorstellung dieser Koppelung von sozialen und ökologischen Systemen dar. Demnach bestehen sozialökologische Systeme aus einem *naturalen* oder *biophysischen* Wirkungszusammenhang, der den Naturgesetzen unterliegt, und einem *kulturalen* oder *symbolischen* Wirkungszusammenhang, der durch Kommunikation reproduziert wird. Diese zwei Sphären besitzen einen Überlappungsbereich, der die *biophysischen Strukturen der Gesellschaft* umfasst. Die Produktion und Reproduktion dieser biophysischen Strukturen erfordert einen permanenten Austausch von Energie und Material mit der natürlichen Umwelt. Dieser Austausch basiert auf dem Einsatz von Arbeit und Technologie, die im Wissen des sozialen Systems beziehungsweise der Kultur verankert sind. Für diesen materiellen und energetischen Austausch zwischen Gesellschaft und Natur wurde der Terminus *gesellschaftlicher Metabolismus* geprägt.² Die Aufrechterhaltung des Metabolismus bedeutet nicht nur Entnahme und Deposition von Materialien, sondern sie bedingt in vielen Bereichen eine mehr oder weniger tiefgreifende und dauerhafte Umgestaltung natürlicher Systeme durch die Gesellschaft. Diese gezielte Umgestaltung von Ökosystemen mit dem Ziel, diese in einem bestimmten von der Gesellschaft gewollten Zustand zu halten, der üblicherweise fern vom ökologischen Gleichgewicht ist, wird als *Kolonisierung von Natur* bezeichnet; das klassische Beispiel dafür ist Landwirtschaft.³ Sowohl gesellschaftlicher Metabolismus wie auch Kolonisierung natürlicher Systeme bedingen spezifische Wechselwirkungen zwischen Gesellschaft und Natur und verbinden diese in einer ko-evolutionären Weise.⁴



[Abbildung siehe Druckfassung]

Abbildung 1: Strukturelle Koppelung von Gesellschaft und Natur in sozialökologischen Systemen
Quelle: verändert nach Haberl, Progress, wie Anm. 1.

Aus dieser Perspektive lässt sich die Agrarmodernisierung des 19. und 20. Jahrhunderts als Teil eines Wechsels im sozialökologischen Regime, also eines strukturellen Wandels von Mustern im gesellschaftlichen Stoffwechsel und in den gesellschaftlichen Eingriffen in Ökosystemen, begreifen: Agrarische Gesellschaften zeichnen sich in dieser Lesart durch das sozialökologische Regime kontrollierter Solarenergieflüsse aus. Ihr Energiesystem beruht praktisch ausschließlich auf der Nutzung von Biomasse⁵ und der intentionalen Umgestaltung von Ökosystemen mit dem Ziel, die für den Menschen nutzbare Biomasse zu erhöhen. Auf diese Weise werden durch die Bewirtschaftung von Land deutlich größere Bevölkerungsdichten möglich als unter dem sozialökologischen Regime von Jäger- und Sammlergesellschaften. Das agrarische Regime zeichnet sich durch weitreichende Eingriffe in Ökosysteme aus und hat die Erde in einem noch nie dagewesenen Ausmaß verändert. Dennoch ist das agrarische Regime prinzipiell nachhaltig, da es auf der Nutzung erneuerbarer Ressourcen basiert. Erst vor 200 Jahren erfasste, ausgehend von England, ein neuer Transformationsprozess die Agrargesellschaften mit ihrem Regime kontrollierter Solarenergieflüsse. Die Industrialisierung löste, angetrieben von fossilen Energieträgern, einen Wachstumsprozess aus, in dessen Verlauf die Bevölkerung und die von der Gesellschaft bewegten Material- und Energiemengen teilweise um mehrer Größenordnungen anstiegen und die Umgestaltung der Biosphäre eine völlig neue Qualität erreichte. Dieser Prozess ist weder auf globaler Ebene abgeschlossen, noch ist klar, wohin er führt; denn die Industrialisierungsepoche besitzt nicht den Charakter eines dauerhaften Regimes, da sie im energetischen Sinne prinzipiell nicht nachhaltig ist: Im Gegensatz zum agrarischen Regime schaltet sich die Industriegesellschaft nicht bloß in Flüsse ein, sondern sie nutzt energetische Bestände, die nun in kurzer Zeit mobilisiert werden. Diese Bestände sind eben nicht, oder nur in geologischen Zeiträumen, erneuerbar, sondern endlich und werden durch die gesellschaftliche Nutzung absolut reduziert.

Mit dem Regimewechsel vom kontrollierten Solarenergiesystem der Agrargesellschaft zum fossilen Energiesystem der modernen Industriegesellschaft verändern sich die Eigenschaften der Landwirtschaft als sozialökologisches System. Diese Veränderungen in der Rolle der Landwirtschaft innerhalb des gesellschaftlichen Energiesystems und in ihrer grundlegenden Funktionsweise sind Gegenstand dieses Beitrages. Im ersten Abschnitt werden empirische Ergebnisse zum sozialen Metabolismus dreier dörflicher ruraler Systeme in verschiedenen Agrarregionen Österreichs am Beginn des 19. Jahrhunderts präsentiert. Daraus können bestimmte Schlussfolgerungen über die physischen Grundlagen der vorindustriellen Landwirtschaft abgeleitet werden. In der Folge stehen weniger die spezifischen Entwicklungspfade der unterschiedlichen Produktionssysteme im Vordergrund, sondern die Entwicklung einer sozialökologischen Perspektive auf den Modernisierungs- und Industrialisierungsprozess der Landwirtschaft in Österreich im Allgemeinen. Damit demonstriert dieser Beitrag die Potentiale eines sozialökologischen Zugangs und die Anwendung der Methoden der Material- und Energieflussanalyse in der Agrar- und Umweltgeschichte.⁶



Abbildung 2: Landwirtschaft als sozialökologisches System: Materielle und energetische Austauschbeziehungen zwischen Agrarökosystem und gesellschaftlichen Subsystemen in der vorindustriellen Landwirtschaft
Quelle: Fridolin Krausmann, The Transformation of Central European Land Use Systems: A Biophysical Perspective on Agricultural Modernization in Austria since 1830, in: *Historia Agraria* (2006).

Methoden und Quellen

Dieser Beitrag basiert auf detaillierten Untersuchungen zur Landnutzung und zum sozialen Metabolismus der Landwirtschaft in Österreich im Zeitraum 1830 bis 2000. In verschiedenen Forschungsprojekten wurden Veränderungen in der österreichischen Landwirtschaft auf verschiedenen räumlichen Skalenebenen vom Hof bis zum Nationalstaat im Kontext des sozialökologischen Regimewechsels untersucht. Die methodischen Grundlagen und die Quellen, die für die Rekonstruktion des gesellschaftlichen Metabolismus speziell in den dörflichen Agrarsystemen verwendet wurden, sind im Detail bereits an anderer Stelle vorgestellt und diskutiert worden. Hier wird daher nur auf einige allgemeine und grundlegende Aspekte eingegangen, die für das Verständnis des gewählten Ansatzes und des präsentierten empirischen Materials von Bedeutung sind.⁷

Hinter den empirischen Untersuchungen zum sozialen Metabolismus der Landwirtschaft stehen modellhafte Überlegungen zu den physischen Beziehungen in agrarischen Produktionssystemen. Abbildung 2 zeigt eine konzeptuelle Darstellung dieses sozialökologischen Modells von vorindustriellen Agrarsystemen mit den wichtigsten Subsystemen und deren biophysischen Beziehungen zueinander in seiner einfachsten Form.⁸ Das Modell definiert die wichtigsten biophysischen Austauschbeziehungen zwischen Gesellschaft und Natur sowie innerhalb dieser beiden Systeme. Innerhalb der *biophysischen Strukturen der Gesellschaft* wird zwischen einem Subsystem *Bevölkerung* mit bestimmten demographischen Eigenschaften und einem Subsystem *Produktion*, in dem die Höfe samt ihrer Ausstattung und dem Nutzvieh zusammengefasst sind, unterschieden. Innerhalb des Agrarökosystems können verschiedene Landnutzungstypen (Ackerland, Grünland, Wald) unterschieden

werden. Das Modell beschreibt nun ein landwirtschaftliches Produktionssystem als einen Komplex verschiedener Agrarökosysteme, die von einer lokalen Bevölkerung unter Aufwand von Energie (menschlicher und tierischer Arbeit) und einem bestimmten Technologiemix *kolonisiert* werden. Auf diese Weise kann ein bestimmtes Ertragsniveau aufrechterhalten und ein permanenter Materialfluss vom Agrarökosystem in das sozioökonomische System aufrechterhalten werden, wo es zu einer Reihe von Umwandlungsprozessen (etwa Produktion von Nahrungsmittel) kommt. Solch ein Produktionssystem ist weder in ökologischer noch in sozioökonomischer Hinsicht abgeschlossen und es können auf Ebene aller Subsysteme Austauschprozesse mit anderen Systemen, etwa durch Tausch oder Verkauf von Agrarprodukten, Emigration oder Auswaschung von Nährstoffen, stattfinden. Dieses Modell ist im Prinzip auch auf industrialisierte Agrarsysteme anwendbar und lässt sich in einem Detailliertheitsgrad darstellen, der etwa eine Unterscheidung sämtlicher Formen von Ernte, Umwandlung und Endkonsum von Biomasse zulässt. Das Modell ist mit dem allgemeinen sozialökologischen Modell, das in Abbildung 1 dargestellt ist, und auch mit dem Methodeninventar der Material- und Energieflussrechnung voll kompatibel.⁹

Die quantitativen Betrachtungen zum sozialen Metabolismus der lokalen Agrarsysteme basieren auf einer Adaptation des Methodeninventars der Material- und Energieflussrechnung (MEFA) für lokale, historische Produktionssysteme.¹⁰ Dabei werden die im Systemmodell identifizierten physischen Beziehungen aufgrund von quantitativen und qualitativen Angaben in den Quellen und einer Reihe von Modellannahmen in mit den Systemgrenzen und Bilanzierungskriterien der MEFA konsistenter Weise quantifiziert. Eine insbesondere für historische Untersuchungen wesentliche Eigenschaft dieser Methode ist die Möglichkeit der Validierung von quantitativen Daten aus den Quellen und Modellannahmen durch Kenntnis über die entsprechenden Systemzusammenhänge. So muss etwa das auf empirischen Daten beruhende Futteraufkommen mit dem berechneten Futterbedarf bei gegebenem Viehbestand und Produktionsleistung übereinstimmen. Auf diese Weise ist es möglich, Lücken in den Datensätzen zu schließen, Unplausibilitäten in den Primärdaten oder Modellannahmen zu identifizieren oder andere qualitative Rückschlüsse über die Eigenschaften des untersuchten Systems (etwa den Ernährungszustand des Viehs) zu ziehen und insgesamt die Unsicherheiten von Daten und Modellannahmen zu reduzieren.¹¹ Noch ausständig – aber für eine umfassende Betrachtung von entscheidender Bedeutung – ist eine quantitative Betrachtung der gesellschaftlichen Zeitverwendung und der sich verändernden Rolle menschlicher und tierischer Arbeitskraft. Grundsätzlich bieten die Katasteroperat mit den Angaben zum Kulturaufwand wichtige Informationen für eine quantitative Untersuchung dieses Aspektes von agrarischen Produktionssystemen; allerdings ist für diesen Schritt noch sehr grundsätzliche Arbeit über die Systemzusammenhänge und die Annahmen zur Quantifizierung zu leisten.¹²

Für eine Rekonstruktion des Metabolismus rezenter und historischer Agrarsysteme müssen eine Vielzahl von unterschiedlichen Quellen herangezogen werden. Grundsätzlich wurden soweit möglich vor allem Daten aus der amtlichen Statistik und Berichterstattung herangezogen, die seit dem frühen 19. Jahrhundert auf verschiedenen Skalenebenen (vom einzelnen Hof über die Katastral- und politische Gemeinde bis zum Nationalstaat) erhoben und berichtet werden. Die wichtigste Quelle für das frühe 19. Jahrhundert ist der Franziszeische Kataster, der neben parzellenscharfen Daten zur Landbedeckung und Landnutzung, zu Grundbesitzern und -nutzern, sowie den steuerlichen Ertragsschätzungen mit den sogenannten *Operaten* auch detaillierte qualitative und quantitative Informationen über die

lokale Landnutzungsgestaltung bietet.¹³ Diese Informationen können dazu genutzt werden, ein physisches Bild des sozialen Metabolismus vorindustrieller Landnutzung zu zeichnen. Die Daten erlauben eine quantitative Abschätzung der einzelnen Produktströme, ihrer Verwendung als menschliche Nahrung, Futter oder zur Energiegewinnung ebenso wie eine Rekonstruktion von Nährstoffflüssen in den historischen Agrarökosystemen. Diese Daten liegen nicht alle auf Ebene einzelner Höfe vor, eine Analyse muss sich daher auf die Dorfgemeinschaft beschränken. Die wichtigsten Datenquellen für die Untersuchungszeitpunkte im 20. Jahrhundert waren statistische Daten zu Landnutzung, Viehbestand, Betriebsstruktur, landwirtschaftliche Erträge und Produktion, Energieumsatz und so fort, wie sie von der Statistik Austria und den entsprechenden Vorgängern auf unterschiedlichen Ebenen räumlicher Auflösung seit der Mitte des 19. Jahrhunderts veröffentlicht werden. Darüber hinaus wurden auch vor Ort Daten erhoben und Angaben aus der wissenschaftlichen Literatur verwendet.¹⁴

Die Landwirtschaft im frühen 19. Jahrhundert – eine lokale Perspektive

Die Untersuchungsregionen und ihr Landnutzungssystem

Tabelle 1 gibt einen Überblick über wichtige Strukturmerkmale der drei untersuchten Dörfer. Theyern ist eine Rodungsinsel im westlichen Weinviertel und repräsentiert das Agrarsystem in der niederösterreichischen Ackerbauregion. 1830 lebten in Theyern 102 Menschen auf einer Gesamtfläche von 2,3 Quadratkilometer, womit die Bevölkerungsdichte mit 45 Personen pro Quadratkilometer ungefähr beim österreichischen Durchschnitt lag. Das Dorf liegt in hügeliger Landschaft auf einer Seehöhe von 250 bis 370 Metern, mit mildem, für Acker- und Getreidebau geeignetem Klima (mittlere Jahrestemperatur 9,6 Grad Celsius, 521 Millimeter Niederschlag). Theyern liegt am Rande einer Weinbauregion und obwohl in der Gemeinde Theyern selbst kein Wein angebaut wurde, bewirtschafteten einige Bauern Weingärten als Überlandgründe in Nachbargemeinden. 1830 wurde mehr als die Hälfte der Fläche von Theyern ackerbaulich genutzt, Haus- und Obstgärten machten nur 1 Prozent der Fläche aus und trotz eines großen Rindviehbestandes waren nur 3 Prozent der Fläche als Grünland genutzt. Wald bedeckte mit 35 Prozent alle flachgründigen Standorte, die nicht für ackerbauliche Nutzung geeignet waren.

Weniger als 50 Kilometer Luftlinie von Theyern entfernt liegt Voitsau, mit einer Gesamtfläche von 3,25 Quadratkilometer und einer Bevölkerungsdichte von 31 Personen pro Quadratkilometer in den Hochlagen des Waldviertels in hügeligem Gebiet auf einer Seehöhe von 600 bis 800 Metern. Das Klima ist deutlich rauer als in Theyern (7,3 Grad Celsius mittlere Jahrestemperatur, 662 Millimeter Niederschlag) und die Landwirtschaft trotz Betonung des Ackerbaus stärker gemischtwirtschaftlich ausgerichtet: Knapp die Hälfte der Fläche wurde ackerbaulich genutzt, ein Drittel, vor allem die steileren Parzellen, als Grünland (35 Prozent); Wald bedeckte nur 14 Prozent der Fläche. Darüber hinaus hatten die Voitsauer auch Nutzungsrechte in den Wald- und Weidegebieten der nahen Voitsauer und Kotteser Heide.

Tabelle 1: Bevölkerung, Landnutzung und Viehbestand in den untersuchten Dörfern

	[Einheit]	Theyern	Voitsau	Großarl
Bevölkerung	[Anzahl]	102	129	650
Haushalte	[Anzahl]	20	29	122
Höfe	[Anzahl]	17	24	80
Landw. Arbeitskräfte	[Anzahl]	67	85	429
Bevölkerungsdichte	[P/km ²]	45	40	22
Viehichte pro Gesamtfläche	[GVE ₅₀₀ /km ²]	24	30	10
Viehichte pro landw. Fläche	[GVE ₅₀₀ /km ²]	38	32	17
Hofgröße (Gesamtfläche/Hof)	[ha/Hof]	13,0	13,5	30,9
Hofgröße (landw. Fläche/Hof)	[ha/Hof]	8,4	13,0	21,0
Landnutzung				
Gesamtfläche*	[km ²]	2,25	3,25	29,00
davon Überlandgründe	[km ²]	0,26	0,21	k.D.
Ackerland	[%]	54%	62%	5%
Gartenland	[%]	6%	1%	0%
Grünland	[%]	3%	33%	53%
Wald	[%]	35%	1%	27%
Sonstige Flächen	[%]	2%	3%	15%
Externe Weide/Holzbezugsrechte**	[km ²]		0,9	
Viehbestand				
Gesamtbestand	[GVE ₅₀₀]***	54	99	284
Pferde	[%GVE ₅₀₀]	8%	0%	6%
Ochsen	[%GVE ₅₀₀]	34%	60%	0%
Kühe	[%GVE ₅₀₀]	32%	24%	66%
Kälber/Jungvieh	[%GVE ₅₀₀]	6%	8%	12%
Schweine	[%GVE ₅₀₀]	9%	4%	1%
Schafe	[%GVE ₅₀₀]	10%	3%	11%
Ziegen	[%GVE ₅₀₀]	0%	0%	3%
Geflügel	[%GVE ₅₀₀]	1%	0%	0%

* Diese Fläche inkludiert die sogenannten Überlandgründe, nicht aber externe Flächen mit Holzbezugs- bzw. Weiderechten. ** anteiliger Wert, berechnet. *** Großvieheinheiten zu 500 kg Lebendgewicht

Der Schwerpunkt der Landwirtschaft in beiden Gemeinden war der Ackerbau, und pro Hof stand in Voitsau mit 8,4 Hektar etwas mehr Ackerland zur Verfügung als in Theyern mit 7,2 Hektar. Der Ackerbau wurde zur Zeit des Franziszeischen Katasters in beiden Gemeinden noch in der Form der Dreifelderwirtschaft betrieben.¹⁵ Das Land der ganzen Gemeinde war in drei etwa gleichgroße Zelgen geteilt, die in einem jährlich wechselnden Rhythmus jeweils im Herbst mit Wintergetreide (Roggen) und im Frühling mit Sommergetreide bestellt wurden. Das dritte Feld wurde nach der Sömmerung für ein Jahr brach liegen gelassen, wurde aber währenddessen mehrfach gepflügt und beweidet. In Theyern wurde um 1830 bereits ein Drittel des jeweiligen Brachfeldes mit Kartoffel und Klee bestellt; in Voitsau waren die neuen Anbaumethoden noch kaum verbreitet, nur 2 Prozent der Brache wurden mit neuen Kulturpflanzen bestellt.

Großarl ist eine alpine Gemeinde im Bereich der Nordabdachung der mittleren Zentralalpen (Gastein und Rauriser Produktionsgebiet), deren Nutzflächen sich bis auf eine Seehöhe von 2.000 Metern erstrecken. Die Hofstätten und der Dauersiedlungsbereich reichen in Höhenlagen bis 1.300 Meter. Entsprechend rauh sind die Klimaverhältnisse: Die nächstgelegene Klimastation (Rauris, 980 Meter Seehöhe) verzeichnet eine langjährige Jahresmitteltemperatur von 6,1 Grad Celsius und 1.100 Millimeter Niederschlag. Großarl ist mit 29 Quadratkilometer deutlich größer als die anderen beiden Gemeinden, allerdings mit 22 Personen pro Quadratkilometer sehr dünn besiedelt. Die Gebirgsgemeinde war im 19. Jahrhundert von Grünland- und Holzwirtschaft geprägt: Wiesen und Weiden machten etwa ein Drittel der Gesamtfläche aus, dazu kamen noch Almen mit einem Anteil von 30 Prozent. Wald nahm etwa 32 Prozent der Fläche ein. Nur 6 Prozent der Fläche entfielen auf Egärten, eine im Alpenraum verbreitete Landnutzungsform, in der sich Ackerbau und Grünland in einem unterschiedlichen zeitlichen Rhythmus abwechseln. Ein Zyklus dauerte in Großarl zwischen vier und acht Jahre, inklusive zwei bis drei Jahre Wiesennutzung. Roggen (Winterkorn) stellte neben Winterweizen und Gerste die wichtigste Feldfrucht in der Egartenwirtschaft Großarls dar.

Viehwirtschaft

Der Viehwirtschaft kommt aus biophysischer Hinsicht in der vorindustriellen Landbewirtschaftung in Nord- und Mitteleuropa eine Schlüsselrolle zu. Das gilt nicht nur für alpine Regionen wie Großarl, die für Ackerbau aus klimatischen Gründen nicht geeignet sind, weshalb das Landnutzungssystem primär auf Rinder- oder Schafhaltung ausgerichtet ist, sondern auch für die Tiefländer, in denen Getreideanbau im Vordergrund des Wirtschaftssystems steht, wie etwa in Theyern oder Voitsau. Der Rolle der Viehwirtschaft in der vorindustriellen Landwirtschaft wird daher besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Die empirischen Daten zeigen, dass die Viehwirtschaft in allen drei Dörfern unabhängig von der vorherrschenden Flächennutzung eine wichtige Rolle spielte. Die relativen Viehdichten, gemessen in Großvieheinheiten (GVE) zu 500 Kilogramm Lebendgewicht je Quadratkilometer Gesamtfläche, (siehe Tabelle 1) liegen in den ackerbaudominierten Gemeinden mit 24 GVE pro Quadratkilometer (Theyern) und 30 GVE pro Quadratkilometer (Voitsau) sogar deutlich höher als in der auf Viehwirtschaft ausgerichteten Gemeinde Großarl mit 10 GVE pro Quadratkilometer.¹⁶ Das liegt zunächst am hohen Zugviehbedarf in den Ackerbauregionen: In Theyern betrug der Anteil der als Zugvieh nutzbaren Ochsen und Pferde am Viehbestand über 40 Prozent und in Voitsau über 60 Prozent. In Großarl waren es dagegen nur rund 6 Prozent.¹⁷ Im alpinen Großarl mit seinem hohen Anteil an wenig produktiven Almflächen konnte deutlich weniger Vieh pro Flächeneinheit mit ausreichend Futter versorgt werden als in den anderen beiden Gemeinden.

Die Schlüsselrolle der Viehwirtschaft für die Funktionsweise der vorindustriellen Landwirtschaft zeigt sich deutlich in ihrem Einfluss auf die Biomasse und Energieflüsse im Landnutzungssystem. Über 95 Prozent der gesamten landwirtschaftlichen Biomasse (ohne Holz) wurden in allen Dörfern in Form von Futter oder Einstreu in der Viehwirtschaft umgesetzt. Das Rind war in allen drei Dörfern die dominante Nutztiergattung: Der Rinderanteil am Gesamtbestand betrug in allen Gemeinden über 70 Prozent. Wichtigstes und universellstes Nutztier war zweifelsohne die Kuh. Sie produzierte wichtigen Dünger, war auch als Zug-

tier einsetzbar (was vor allem auf kleinen Höfen geschah) und leistete durch die effiziente Umwandlung von Stroh und Heu in Milch einen regelmäßigen Beitrag zur Nahrungsversorgung. Am Ende der über zehnjährigen Nutzungsdauer lieferte sie schließlich auch noch Fleisch und Rohstoffe wie Leder oder Knochen. Trotzdem spielten auch die anderen Nutztiere eine wichtige, regional aber recht unterschiedliche Rolle: Durch Schafhaltung lassen sich magere Flächen mit vergleichsweise geringem Arbeitsaufwand zur Gewinnung von Nahrung und Rohstoffen nutzen. Schweine wurden in der vorindustriellen Landwirtschaft vor allem als effiziente Verwerter von Resten und Abfällen eingesetzt oder sie wurden durch Waldweide ernährt. In Theyern machte der Anteil von Schafen und Schweinen immerhin 19 Prozent des Viehbestands aus, und auch in Großarl spielten Schafe und Ziegen mit 14 Prozent des Viehbestands eine wichtige Rolle (Tabelle 1). Pferde wurden nur in Großarl und Theyern genutzt. Das mag zum einen eine Frage des Wohlstandes gewesen sein, hing aber auch ursächlich mit der Bedeutung der Waldwirtschaft zusammen. Pferde sind beispielsweise zur Holzbringung besser einsetzbar als Ochsen.

Tabelle 2: Futteraufkommen in kg Trockenmasse (kg_{TM}) je Großvieheinheit (GVE_{500}) und im Vergleich zum modellierten Futterbedarf

Parameter	[Einheit]	Theyern	Voitsau	Großarl
Futteraufkommen gesamt	$[\text{kg}_{\text{TM}}/\text{GVE}_{500}\text{a}]$	4.109	3.917	3.801
Getreide etc.	[%]	9%	7%	0%
Milch	[%]	0%	0%	1%
Erntenebenprodukte	[%]	61%	41%	9%
Heu	[%]	12%	25%	26%
Weide	[%]	17%	26%	27%
Almweide	[%]			36%
Aufkommen in % des Bedarfes	[%]	88%	93%	96%

Die Futterbilanz (Tabelle 2) zeigt, dass das Vieh im Allgemeinen nicht in direkter Nahrungskonkurrenz zum Menschen stand, sondern entweder von Flächen ernährt wurde, die für den Ackerbau ungeeignet waren, oder von Nebenprodukten des Ackerbaues und der Nahrungsverarbeitung lebten: Der Anteil von Biomasse, die auch vom Menschen als Nahrung genutzt werden kann (Getreide, Kartoffeln), am Futteraufkommen war sehr gering und betrug in Theyern 9 Prozent, in Voitsau 7 Prozent und in Großarl weniger als 1 Prozent. Dagegen machten Erntenebenprodukte in Theyern zwei Drittel und in Voitsau immerhin 40 Prozent des Futteraufkommens aus. In Großarl war die wichtigste Futterquelle im Sommer die Weide (63 Prozent) und im Winter das Wiesenheu (27 Prozent). Aber auch in Theyern (17 Prozent) und Voitsau (26 Prozent) leisteten Weiden einen wichtigen Beitrag zur Versorgung des Viehs im Sommer. Neben der Nutzung expliziter Hutweideflächen wurden praktisch alle Flächen zu bestimmten Zeiten im Jahr beweidet: Die Nachweide auf Wiesen, die Stoppelweide auf abgerenteten Feldern, die Brachweide, die Waldweide und die Beweidung der zahlreichen Raine machten in Voitsau 65 Prozent und in Theyern 98 Prozent der geweideten Biomasse aus.¹⁸ Insgesamt zeigt sich aber, dass sowohl die verfügbare Futtermenge, wie auch die Qualität des Futters recht gering waren. Das Futterangebot erreichte in allen Gemeinden nur knapp den von uns errechneten Bedarf und das trotz des – mit heute verglichen – recht

geringen Lebendgewichtes und der geringen Produktionsleistung des Nutztviehs: Die ausgewachsenen Rinder wogen nur 250 bis 300 Kilogramm, und die jährliche Milchleistung einer Kuh wird mit durchschnittlich 1.000 bis 1.500 Kilogramm angenommen.¹⁹ Es wurde offensichtlich soviel Vieh wie möglich gehalten.

Tabelle 3: Nahrungsproduktion aus Pflanzenbau und Viehwirtschaft, Nahrungsbedarf und Surplus in Gigajoule Nährwert (GJ_{NW})

Parameter	[Einheit]	Theyern	Voitsau	Großarl
Nahrungsproduktion insgesamt	$[GJ_{NW}]$	632	738	1.967
davon vom Ackerland	[% gesamt]	62%	69%	19%
davon von Dauerkulturen	[% gesamt]	11%	2%	0%
davon Fleisch	[% gesamt]	7%	8%	6%
davon Milch	[% gesamt]	20%	21%	75%
Pflanzliche Nahrung gesamt	[% gesamt]	73%	71%	19%
Tierische Nahrung gesamt	[% gesamt]	27%	29%	81%
Milch:Fleisch Verhältnis	$[GJ_{NW}/GJ_{NW}]$	10.7	9.6	40.7
Pflanzlich:tierisch	$[GJ_{NW}/GJ_{NW}]$	2.8	2.4	0.2
Nahrungsbedarf (bei 4,5 GJ/Kopf)	$[GJ_{NW}]$	459	581	2.925
Surplus	[% Produktion]	27%	21%	-49%

Nahrungsproduktion

Obwohl die Nahrungsproduktion bei der Viehhaltung nicht im Vordergrund stand, lieferte die Viehwirtschaft einen wichtigen Beitrag zum gesamten Nahrungsoutput der Landwirtschaft in den untersuchten Dörfern (Tabelle 3): Fleisch spielte dabei die geringste Rolle. Sein Anteil an der insgesamt produzierten Nahrung lag – gemessen in Nährwert – in allen drei Dörfern nur bei 6 bis 8 Prozent. Von großer Bedeutung war dagegen die Milchproduktion: Der Anteil der Milch lag auch in den Ackerbaugemeinden Theyern und Voitsau bei rund 20 Prozent, in Großarl machte Milch drei Viertel der Nahrungsproduktion und damit auch des täglichen Speiseplans aus. In Theyern und Voitsau lieferten die Produkte des Ackerbaus, zum größten Teil Roggen und andere Getreidesorten, etwa zwei Drittel der Gesamtproduktion, in Großarl immerhin knapp ein Fünftel.

Nährstoffversorgung

Ein zentrales Problem der vorindustriellen Landwirtschaft war die Frage der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit. Durch die landwirtschaftliche Ernte wurden dem Boden Nährstoffe entzogen und diese mussten, wollte man ein langsames Absinken der Erträge vermeiden, wieder ersetzt werden. Dieser Ersatz von Nährstoffen war ein Ergebnis der lokalen Organisation des Landnutzungssystems, die eine Reihe von ökosystemaren Prozessen und gesellschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen integrierte. Am Beispiel des Stickstoffs lässt sich das gut zeigen. Zum Ersatz des entzogenen Stickstoffs konnten einerseits ökosystemare Prozesse ausgenutzt werden; dazu zählten die Deposition von Luftstickstoff, die Stickstoff-Fixierung durch Boden-

mikroorganismen und die Stickstoff fixierende Eigenschaft von bestimmten Futterpflanzen.²⁰ Eine weitere, besser steuerbare Möglichkeit stellten Transfers von Stickstoff zwischen extensiv und intensiv genutzten Flächen und die Schließung lokaler Kreisläufe dar. Dabei spielte die Viehhaltung eine entscheidende Rolle: Durch die Fütterung des Viehs im Stall oder auch bei Weidehaltung während des Tages, aber nächtlicher Stallhaltung konnten Nährstoffe von den Weideflächen, vom Grünland und vom Wald in Form von tierischem Mist konzentriert und dann auf die Ackerflächen ausgebracht werden. Auch die Waldstreu, also die Entnahme nährstoffreicher Biomasse aus den Wäldern, die anstelle von Stroh, das überwiegend verfüttert wurde, als Einstreu in den Ställen verwendet wurde, spielte ebenfalls eine Rolle beim Nährstofftransfer. Neben dem Transfer von Nährstoffen lag die Bedeutung des Viehs auch im Abschluss der Pflanzennährstoffe des Futters durch die Verdauung.

Tabelle 4: Der Stickstoffhaushalt: Entzug von Stickstoff (N) durch Biomasseentnahme (DE) nach Landnutzungs-klassen, natürliche und sozioökonomische Inputs sowie Exporte von Stickstoff

Parameter	[Einheit]	Theyern	Voitsau	Großarl
Stickstoffentzug (DE)				
Entzug Ackerland und Gärten	[kg _N]	3.405	4.375	4.824
Entzug Ackerland und Gärten	[kg _N /ha]	25	21	33
Entzug Grünland und Wald	[kg _N]	848	3.808	22.329
Entzug Grünland und Wald	[kg _N /ha]	10	19	10
Input				
ökosystemare Prozesse*	[kg _N]	1.899	1.360	886
Saatgut	[kg _N]	276	443	170
Viehmist min**	[kg _N]	821	1.546	4.093
Viehmist max**	[kg _N]	1.436	2.705	7.163
Anteil ökosystemarer Prozesse am Gesamtinput (max)	[% gesamt]	58%	50%	69%
Nährstoffersatz Ackerland und Gärten				
Input ökosystemare Prozesse*	[% Entzug]	56%	31%	18%
Input Saatgut	[% Entzug]	8%	10%	4%
Input Viehmist min	[% Entzug]	24%	35%	85%
Input Viehmist max	[% Entzug]	42%	62%	148%
Stickstoff in Importen und Exporten***				
Import (Dünger, Nahrung, Futter, Holz)	[kg N/ha]	0	0	0.20
Export (Dünger, Nahrung, Futter, Holz)	[kg N/ha]	1.97	0.91	0.16
Import im Vergleich zum Entzug	[% von DE]	0%	0%	2%
Export im Vergleich zum Entzug	[% von DE]	8%	4%	1%

* Unter ökosystemaren Prozessen werden hier biologisch-chemische Prozesse verstanden, die in den Agrarökosystemen auch ohne gesellschaftliche Steuerung ablaufen bzw. unter vorindustriellen Bedingungen einer gesellschaftlichen Steuerung weitgehend entzogen waren. Dazu zählen wir hier die Deposition von Luftstickstoff und die N-fixierenden Eigenschaften von Bodenorganismen und bestimmten (Kultur)Pflanzen.

** In den beiden Varianten der Berechnung des Stickstoffinputs durch Viehmist spiegeln sich unterschiedliche Annahmen zu den bei Lagerung und Aufbringung auftretenden Stickstoff-Verlusten wider, siehe Text.

***Darunter sind ausschließlich sozioökonomische Transfers von Biomasse oder Düngemitteln in die oder aus den dörflichen Systemen zu verstehen.

Eine quantitative Untersuchung der Stickstofftransfers für die drei Dörfer (Tabelle 4) zeigt, dass in Theyern, wo bereits in beträchtlichem Ausmaß Futterleguminosen in der Brache gebaut wurden, über die Hälfte des dem Ackerland²¹ durch die Ernte entzogenen Stickstoffs durch ökosystemare Prozesse ersetzt werden konnte. In Voitsau machte der Beitrag von Deposition und Fixierung auf dem Ackerland immerhin 31 Prozent und in Großarl 18 Prozent aus. Saatgut lieferte in den Ackerbaugemeinden weitere 8 bis 10 Prozent und 4 Prozent in Großarl. Tierischer Mist wurde laut Operaten im Allgemeinen nur auf den Äckern ausgebracht. Je nach Annahme der Verluste an Stickstoff²² während Lagerung und Ausbringung war es möglich, durch den Mist dem Boden in Theyern bis zu 42 Prozent und in Voitsau bis zu 62 Prozent der entzogenen Nährstoffe zurück zu geben. Das zeigt – trotz der Unsicherheiten, die solche Berechnungen in sich bergen – dass es in den Ackerbaugemeinden gelang, die Stickstoffbilanz auf den Äckern ausgeglichen zu halten, wobei ökosystemare Prozesse und Mistwirtschaft ungefähr einen gleich großen Beitrag leisteten. In Großarl fiel deutlich mehr Viehmist an, als zum Ausgleich des Nährstoffentzuges auf den Ackerflächen nötig war (bis zu 150 Prozent), hier wurden aber auch Wiesen gedüngt. Alle anderen Flächen wurden nicht gedüngt. Sie waren hinsichtlich des Nährstoffersatzes ausschließlich auf Ökosystemprozesse und den feldfallenden Mist der Tiere angewiesen. Das führte unter anderem dazu, dass Wälder und Weiden meist recht ausgehagert waren und deutlich geringere Biomasseerträge als das Ackerland aufwiesen. Insbesondere die Produktivität der Wälder wurde durch die Beweidung und die Streuentnahme spürbar verringert.²³

Tabelle 5: Maßzahlen zur landwirtschaftlichen Produktivität: Flächen- und Arbeitsproduktivität und Nahrungsproduktion

Parameter	[Einheit]	Theyern	Voitsau	Großarl
Getreideertrag brutto	[kg/ha]	819	732	862
Getreideertrag netto	[kg/ha]	639	557	622
Verhältnis Saatgut : Ertrag	[kg Körnerernte/ kg Saat]	5	4	4
Flächenproduktivität (Ernte/ha Landwirtschaftsfläche)	[GJ _{BW} /ha _{agr}]*	38	26	12
Nahrungsproduktion pro Person	[GJ _{NW} /P]**	6.2	5.7	3.0
Arbeitsproduktivität: Produktion pro Arbeitskraft	[GJ _{NW} /P]	9.4	8.7	4.6
Nahrungsproduktion pro Gesamtfläche	[GJ _{NW} /ha _{tot}]	2.8	1.8	0.7
Nahrungsproduktion pro Landwirtschaftsfläche	[GJ _{NW} /ha _{agr}]	4.4	2.1	1.2 (2.1)***
Tierische Produktion pro Landwirtschaftsfläche	[GJ _{NW} /ha _{agr}]	1.2	0.6	1.0
Umwandlungseffizienz****	[DE _{agr} /O]	7	10	10

* Die Abkürzung GJ_{BW} steht für Gigajoule (Brennwert).

** Die Abkürzung GJ_{NW} steht für Gigajoule (Nährwert)

*** Werte in Klammern: pro Hektar landwirtschaftlicher Fläche exklusive Almen.

**** Die Umwandlungseffizienz gibt das Verhältnis von insgesamt umgesetzter landwirtschaftlicher Biomasse (DE_{agr}) zu landwirtschaftlichen Endprodukten (O) (im wesentlichen Nahrung), jeweils gemessen in GJ_{BW} an.

Produktivität

Um die Produktivität der drei landwirtschaftlichen Produktionssysteme zu vergleichen, können unterschiedliche Maßzahlen verwendet werden (Tabelle 5). Das Netto-Ertragsniveau für Getreide, also die Bruttoernte abzüglich Saatgut je Hektar Anbaufläche, lag in allen drei Gemeinden auf einem für heutige Verhältnisse sehr niedrigen Niveau, nämlich bei etwa 0,6 Tonnen pro Hektar.²⁴ Auf den Egartenflächen von Großarl wurden erstaunlicherweise höhere Erträge erwirtschaftet als in Voitsau, was vermutlich mit der besseren Nährstoffversorgung und der intensiveren Pflege der kleinen Egärten zusammenhing. Ein anderes Bild ergibt sich, wenn man die Flächenproduktivität des Nahrungsoutputs insgesamt betrachtet. Die Nahrungsproduktion je Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche war im klimatisch begünstigten Theyern mit 4,4 Gigajoule am höchsten, mehr als doppelt so hoch wie in Voitsau, wo nur 2,1 Gigajoule je Hektar erwirtschaftet wurden. In Großarl war der Wert erwartungsgemäß mit nur 1,2 Gigajoule am geringsten, da dort der Schwerpunkt der Landbewirtschaftung auf almwirtschaftlicher Viehhaltung lag.

Eine weitere wichtige Maßzahl ist der relative Energieertrag der Landwirtschaft. Er zeigt das Verhältnis des Energieertrags der Landwirtschaft in Form von Nahrung zum gesellschaftlichen Energieaufwand.²⁵ Als gesellschaftlicher Energieaufwand wird dabei unter vorindustriellen Bedingungen nur die menschliche Arbeit gerechnet, wobei ein Arbeitstag mit einem Nahrungsäquivalent von 6,5 Megajoule bewertet wird.²⁶ Tierische Arbeit wird nicht als Energieaufwand gewertet, da sie innerhalb des agrarischen Produktionssystems bereitgestellt wird. Unter den Bedingungen des kontrollierten Solarenergiesystems musste klarerweise deutlich mehr Nahrung erzeugt werden, als die Gesellschaft in Form von Arbeit in die Nahrungsproduktion investierte. Eine grobe Schätzung für die drei Dörfer zeigt, dass in Theyern und Voitsau jeweils etwa sechs Joule an Nahrung pro Joule Energieinput erzeugt wurden, während in Großarl der Ertragsfaktor nur bei knapp drei lag.

Nimmt man einen Nahrungsbedarf von durchschnittlich 4,5 Gigajoule pro Person und Jahr an²⁷, dann konnte in Theyern und Voitsau ein Surplus von etwa 20 bis 30 Prozent erwirtschaftet werden (Tabelle 2). Dieser Überschuss diente vor allem dazu, Natural- und Geldabgaben an die Grundherren zu leisten. In beschränktem Ausmaß erlaubte er auch die Partizipation an lokalen Märkten. Anders lag die Situation in Großarl. In dieser Gemeinde wurden nur etwa 50 Prozent der von der Bevölkerung pro Jahr benötigten Nahrung erzeugt. Dabei muss man allerdings berücksichtigen, dass die Wertdichte der Agrarprodukte von Großarl höher war als die der Ackerbauregionen. Der ökonomische Wert eines Joules Nahrungsenergie in Form von Fleisch war 1830 etwa 2,5-mal und in Form von Milch etwa 1,7-mal so hoch wie der in Form von Getreide.²⁸ Das weist darauf hin, dass die Nahrungsversorgung in Großarl stärker als in den anderen Gemeinden durch den Verkauf von Vieh, Käse und Holz sichergestellt wurde.

Biomasse- und Energieumsatz

Aus den Untersuchungen zum sozialen Metabolismus der drei Dörfer lassen sich wichtige Hinweise auf die Struktur des vorindustriellen Energiesystems gewinnen: Um 1830 wurden in den drei Dörfern keine fossilen Energieträger benutzt, das Energiesystem basierte daher vollständig auf der Nutzung von land- und forstwirtschaftlicher Biomasse.²⁹ Der Energieumsatz insgesamt lag in allen drei Gemeinden auf einem recht ähnlichen Niveau, bei 70 bis 90 Giga-

joule pro Person. Die Entnahme von Primärenergie, das heißt land- und forstwirtschaftlicher Biomasse, lag in Theyern bei 36 Gigajoule pro Hektar, in Voitsau bei 29 Gigajoule pro Hektar und in Großarl bei 21 Gigajoule pro Hektar. Energieimporte in die Dörfer gab es praktisch keine. Auch die Exporte waren im Vergleich zum internen Umsatz sehr klein. Sie beliefen sich in Theyern und Voitsau auf wenige Prozent. Nur in Großarl waren sie durch die Holzverkäufe mit 13 Prozent der gesamten Entnahme relativ hoch. Bezogen auf die Fläche machten sie aber auch in diesem Fall nur 2,7 Gigajoule pro Hektar aus.

Resümee

Die Unterschiede der untersuchten Dörfer in ihrer naturräumlichen Ausstattung, aber auch in der Gestaltung des Landnutzungssystems spiegeln sich zwar in den biophysischen Eigenschaften wider, es zeigen sich aber auch sehr deutlich gemeinsame Grundeigenschaften vorindustrieller Landbewirtschaftungssysteme, die in engem Zusammenhang zu den Limitierungen des solaren Energiesystems stehen. Eines der Grundprobleme der vorindustriellen Landwirtschaft war ihre weitgehende Abhängigkeit von lokal verfügbaren Produktionsmitteln. Insbesondere im Hinblick auf Energie und Nährstoffe war sie praktisch vollständig auf interne, das heißt am Hof oder innerhalb des Dorfes verfügbare Ressourcen sowie natürliche Erneuerungsraten angewiesen. Nur in Ausnahmefällen konnten punktuell externe Inputs, etwa die Anwendung von Guano in bestimmten Sonderkulturen, eine quantitativ bedeutende Rolle spielen. In der Regel, und so auch in den untersuchten Dörfern, musste alles, was dem Boden durch die landwirtschaftliche Ernte an Nährstoffen entzogen wurde, entweder durch natürliche Prozesse³⁰ nachgeliefert oder durch internes Recycling und Nährstofftransfers³¹ wieder zurückgegeben werden. Wird dieser Ausgleich nicht bewerkstelligt, kommt es unweigerlich zu einer Minderung der Bodenfruchtbarkeit und damit zu Rückgängen im Ertrag. Ähnliches gilt für die Bereitstellung der notwendigen Energie. Sämtliche für die Landnutzung erforderliche Arbeitsenergie – und dabei handelt es sich bis ins 20. Jahrhundert praktisch ausschließlich um tierische und menschliche Arbeitskraft – musste aus dem Wirtschaftssystem mit Primärenergie, das heißt Futter und Nahrung, versorgt werden. Gelingt dies nicht, dann ließ sich das Bewirtschaftungssystem nicht aufrechterhalten. Die Rückkoppelungsmechanismen zwischen Agrarökosystem und Bewirtschaftung waren also immer sehr unmittelbar und direkt spürbar, was letztlich darauf hinauslief, dass im Extremfall die ausreichende Ernährung der lokalen Bevölkerung nicht sichergestellt werden konnte.

Unter derartigen Bedingungen bestand Landwirtschaft in einer komplexen Optimierung der Nutzung von lokal verfügbaren Ressourcen unter den jeweiligen Umweltbedingungen. Die quantitativen Betrachtungen zum sozialen Metabolismus der untersuchten Dörfer zeigen nun eine Reihe von den damit in Zusammenhang stehenden biophysischen Grundeigenschaften der vorindustriellen Landwirtschaft auf. Insbesondere wird die integrative Bedeutung der Viehwirtschaft erkennbar. Im Unterschied zur industrialisierten Landwirtschaft war Viehhaltung nicht primär auf die Produktion von Milch und Fleisch ausgerichtet, sondern hatte einen multifunktionalen Charakter. In den Ackerbauregionen war die Haltung von Vieh, wie gezeigt wurde, aus mehreren Gründen unerlässlich: Zum einen wurde es wegen der im Ackerbau erforderlichen Zugkraft gehalten, zum anderen stellte Viehhaltung für die Bauern eine der wenigen Möglichkeiten eines aktiven Nährstoffmanagements dar. Erst in dritter Hinsicht wurde Vieh zur Produktion von Nahrung und Rohstoffen gehalten. Um diese Leistungen zu

erbringen, wurde im Allgemeinen nicht wertvolles Getreide verfüttert, sondern ein Großteil des Futters war sonst nicht unmittelbar verwertbare Biomasse. Anders in Großarl: Die Viehwirtschaft ermöglichte überhaupt erst die Nahrungsproduktion in Regionen und Höhenlagen, die für den Ackerbau ungeeignet sind. Durch die Haltung von Wiederkäuern war man in der Lage, ausgedehnte und zum Teil natürliche Grünlandflächen zur Produktion von Nahrung zu nutzen, und ermöglichte damit beträchtliche Bevölkerungsdichten in großer Höhe. Daneben war Vieh natürlich auch in Großarl unerlässlich für die erforderliche Zugkraft und die Düngung der Egartenflächen. Viehhaltung spielte also eine Schlüsselrolle in der auf lokaler Optimierung beruhenden vorindustriellen Landwirtschaft. Sie ermöglichte den Transfer von Pflanzennährstoffen von extensiv zu intensiv genutzten Flächen und erlaubte die Konzentration von knappen Betriebsmitteln auf bestimmte ertragreiche Flächen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der durch die biophysische Analyse sichtbar wird, ist die *relative physische Geschlossenheit* lokaler Agrarsysteme. Aus einer sozioökonomischen Perspektive wäre es sicher verfehlt, wenn man die lokalen Produktionssysteme als *geschlossene* Subsistenzwirtschaften betrachten würde, denn sie standen mit anderen Systemen über Migrations- und Marktbeziehungen durchaus im Austausch. Die hier gebotene biophysische Perspektive zeigt aber, dass der Material- und Energieumsatz innerhalb des Produktionssystems (Hof oder Dorf) die Größe nach außen oder innen gerichteter Flüsse (Importe und Exporte) um ein Vielfaches überstieg und auch übersteigen musste, wenn die Stabilität der landwirtschaftlichen Produktion nicht gefährdet werden sollte. Während in der industrialisierten Landwirtschaft die Importe und Exporte von Energie und Biomasse etwa in der selben Größenordnung liegen wie der interne Biomasseumsatz eines Hofes, gingen unter vorindustriellen Bedingungen die Importe gegen Null, während die Exporte im Bereich von einigen Prozentpunkten der Biomasseentnahme lagen (Tabelle 10 und Abbildung 3).

Es zeigt sich also, dass die Aufrechterhaltung der Bodenfruchtbarkeit und damit eine Stabilisierung der Nahrungsproduktion durch regionaltypische und von den jeweiligen naturräumlichen Gegebenheiten geprägte Produktionssysteme gewährleistet wurde, in denen Transfers von Biomasse und Nährstoffen zwischen Ackerland, Grünland und Wald, räumlich und zeitliche wechselnde Flächennutzungen³², die weitgehende Schließung lokaler Kreisläufe und die Ausnutzung von natürlichen Regenerationsprozessen wichtige Grundelemente darstellten. Für die Integration dieser Elemente spielte die Kombination verschiedener Landnutzungsformen und Viehhaltung auf betrieblicher Ebene eine entscheidende Rolle. Diese Form der Landnutzung erlaubte nur wenig räumliche Spezialisierung im Sinne der modernen Landwirtschaft, aber sie ermöglichte eine Stabilisierung des Ertragsniveaus – allerdings auf einem im Vergleich zu heute recht niedrigen Niveau. Die Produktivität der Landbewirtschaftung lag je nach angelegter Maßzahl um mindestens eine Größenordnung unter den heute in Industrieländern üblichen Werten für Flächen- und Arbeitsproduktivität. Wachstum stellte für diese Systeme ein gravierendes Problem dar.

Agrarische Optimierung im 19. Jahrhundert

Im Zusammenhang mit steigender Marktintegration und dem zunehmenden Nahrungsbedarf der rasch wachsenden urbanen Bevölkerung war die österreichische Landwirtschaft im 19. Jahrhundert einem Wachstumsdruck ausgesetzt. Mit der wachsenden Industrialisierung, der Zunahme der Bevölkerung und der Verstädterung begannen im 19. Jahrhundert

auch in der im europäischen Vergleich relativ rückständigen österreichischen Landwirtschaft Veränderungen zu greifen. Die institutionellen Voraussetzungen für diese Veränderungen waren die Grundentlastung und der Abbau grundherrschaftlicher Strukturen sowie damit verbundener dörflicher Regelmechanismen wie dem Flurzwang seit der Mitte des 19. Jahrhunderts.³³

Eine der wesentlichen technologischen Neuerungen in der Landnutzung war der zunehmende Anbau von Hackfrüchten und Futterleguminosen auf dem Brachfeld der Dreifelderwirtschaft. Während der Anteil der Getreidefläche an der Ackerfläche im gesamten 19. Jahrhundert praktisch konstant bei knapp zwei Dritteln lag, stieg der Anteil der neuen Feldfrüchte (leguminöse Futterpflanzen und Hackfrüchte) an der gesamten Ackerfläche auf Kosten der Brache zwischen 1830 und dem Beginn des 20. Jahrhunderts von 14 Prozent auf 30 Prozent (Tabelle 6). Vor Ausbruch des Ersten Weltkrieges war der Anteil der Brachflächen an der Ackerfläche auf unter 5 Prozent gesunken.

Tabelle 6: Entwicklung der Nutzung des Ackerlands in Österreich 1830–1910

in % der Ackerfläche	1830	1870	1890	1910
Ackerfläche [km ²]	20.391	19.395	19.986	20.206
Getreide	62%	62%	62%	63%
Leguminosen Futterpflanzen	12%	15%	16%	16%
Hackfrüchte	2%	6%	7%	14%
Sonstige Feldfrüchte	8%	6%	6%	4%
Brache	15%	10%	10%	3%

Quelle: Krausmann, Rekonstruktion, wie Anm. 14.

Der Anbau der ertragreichen Kartoffel³⁴ trug direkt zur Steigerung des Outputs an pflanzlichen Nahrungsmitteln bei; noch bedeutender waren aber die Auswirkungen der neuen Kulturpflanzen auf die Viehhaltung: Sowohl Kartoffeln wie auch Klee und andere Leguminosen waren hochwertige Futtermittel und konnten dazu beitragen, dass die Verfügbarkeit von Stallfutter erhöht sowie die Futterqualität deutlich verbessert wurde. Der Stellenwert von Stroh und minderwertigen Weideflächen im Futteraufkommen wurde verringert, während das Futteraufkommen insgesamt gesteigert werden konnte. Zwischen 1830 und 1910 wurde das Futteraufkommen in Österreich um etwa 35 bis 40 Prozent erhöht, was eine Erhöhung des Rinderbestandes um rund 20 Prozent, des Schweinebestandes um das Fünffache und der Produktion tierischer Nahrungsmittel um 90 Prozent (von 4,6 auf 9,3 Petajoule) ermöglichte. In der Folge stand auch mehr Stroh für Einstreu zur Verfügung und der sozioökonomische Druck auf die Waldökosysteme wurde durch eine Reduktion von Waldstreuentnahme und Waldweide verringert.

Tabelle 7: Entwicklung der Viehwirtschaft in Österreich, 1830–1910

		1830	1870	1890	1910
Viehbestand	[1000 GVE]	1.440	1.970	2.295	2.650
Zugviehbestand*	[1000 Stück]	554	661	740	733
Futteraufkommen	[10 ⁹ StE]**	3.000	k.D.	k.D.	4.300
Endproduktion***	[PJ _{NW}]	4,6	6,3	7,5	9,3
Stickstoff in tierischem Mist	[1000 t]	38	44	54	67

* Pferde und Ochsen ** Das Futteraufkommen wird in Stärkeeinheiten (StE) gemessen. *** Tierische Endproduktion inkludiert Fleisch, Milch und Eier (gemessen in Petajoule (Nährwert)).

Quelle: Eigene Berechnungen nach Daten in Krausmann, Rekonstruktion, wie Anm. 14.

Die mit der Zunahme der Stallfütterung verbundene Steigerung des Düngeraufkommens und der Anbau von stickstofffixierenden Leguminosen bewirkten eine deutliche Verbesserung der Stickstoffversorgung im Ackerbau.³⁵ Um 1830 wurden dem Ackerland durch die landwirtschaftliche Ernte jährlich rund 58.000 Tonnen Stickstoff entzogen. Dem stand ein sozioökonomisch gesteuerter Stickstoffeintrag durch leguminöse Feldfrüchte von rund 12.000 Tonnen und durch Stallmist von 38.000 Tonnen gegenüber. Bis 1910 wurde durch die Zunahme von Leguminosenanbau und Stallfütterung der Eintrag durch N-Fixierung um 66 Prozent auf 22.000 Tonnen und die N-Rückführung aus Stallmist um 76 Prozent auf 67.000 Tonnen erhöht. Damit stieg der Nähstoff-Input auf den Ackerflächen insgesamt um 60 Prozent auf 89.000 Tonnen. Insgesamt 25 Prozent des Mehrinputs trug der Leguminosenanbau und 75 Prozent die Stallfütterung bei. Das bewirkte deutlich höhere Erträge im Pflanzenbau (etwa von 900 auf 1.200 Kilogramm pro Hektar bei Roggen) und fast eine Verdoppelung der tierischen Produktion. Parallel dazu stieg natürlich auch der Stickstoffentzug durch die landwirtschaftliche Ernte um 43 Prozent auf 83.000 Tonnen an.

Insgesamt wurde die Nahrungsproduktion der österreichischen Landwirtschaft durch diese Entwicklung deutlich gesteigert – zwischen 1830 und 1910 kam es fast zu einer Verdoppelung des Nährwerts landwirtschaftlicher Endprodukte von 14 auf 27 Petajoule. Trotzdem blieb die Zunahme der Nahrungsproduktion unter dem Bevölkerungswachstum, und es wurde in zunehmendem Ausmaß Nahrung zur Versorgung der städtischen Ballungsräume aus anderen Regionen der Monarchie, vor allem Ungarn, Böhmen und Mähren, bezogen.

Herauszustreichen ist, dass die agrarischen Innovationen im 19. Jahrhundert zwar eine deutliche und relativ rasche Steigerung der Leistungsfähigkeit der Landwirtschaft und insbesondere der Flächenproduktivität bewirkten, dass sie aber nicht mit grundlegenden strukturellen Veränderungen in der Funktion der Landwirtschaft verbunden waren. Die landwirtschaftliche Modernisierung des 19. Jahrhunderts bewegte sich, mit Ausnahme der gestiegenen Verwendung von Metallen in landwirtschaftlichen Geräten und dem von der Eisenbahn ermöglichten Ferntransport, weiterhin fast vollständig innerhalb des Rahmens eines sozialökologischen Regimes kontrollierter Solarenergieflüsse.

Limitierend für die weitere Entwicklung der Landwirtschaft blieben nach wie vor die Versorgung mit Stickstoff und anderen Pflanzennährstoffen, vor allem Phosphor und Kalium, und der hohe Bedarf an menschlicher und tierischer Arbeitskraft. Die Substitution von biogener Arbeitskraft durch Maschinen, die von fossilen Energieträgern angetrieben wurden, begann erst im 20. Jahrhundert wirksam zu werden. Um 1900 wurden in der österreichischen Landwirtschaft zwar in etwa 30 Prozent der landwirtschaftlichen Betriebe Maschinen, vor allem Dresch-, Häcksel- und Getreidereinigungsmaschinen, verwendet, die Antriebskraft

dieser Maschinen war aber fast ausschließlich menschliche (70 Prozent) und tierische (25 Prozent) Arbeit. Nur 2 Prozent der Betriebe nutzten dampfbetriebene Maschinen.³⁶

Die Innovationen des 19. Jahrhunderts waren daher nicht mit einer spürbaren Reduktion der landwirtschaftlichen Bevölkerung oder der Beschäftigten in der Landwirtschaft verbunden. Der arbeitssparende Effekt neuer Technologien wie eiserner Pflüge oder Dreschmaschinen dürfte weitgehend durch Mehrbelastungen, die aus der Stallhaltung und der Fruchtwechselwirtschaft entstanden, zunichte gemacht worden sein. Die Bestellung der ehemaligen Bracheflächen sowie die Stallhaltung und der gestiegene Viehbestand erforderten insgesamt eine höhere Arbeitsleistung. Dementsprechend ist auch die installierte Leistung³⁷ je Hektar Nutzfläche um 10 bis 20 Prozent von 0,17 Kilowatt pro Hektar auf 0,20 Kilowatt pro Hektar gestiegen, wobei vor allem der Anteil der tierischen Arbeitskraft deutlich zugenommen hat. Da vermutlich auch der Grad der Ausnutzung der verfügbaren Leistung gestiegen ist, kann man davon ausgehen, dass die tatsächlich in der Landwirtschaft geleistete Arbeit um mindestens 20 bis 30 Prozent zugenommen hat. Im Gegensatz zur Agrarmodernisierung im 20. Jahrhundert brachte der Optimierungsprozess im 19. Jahrhundert aber noch einmal eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz der Landwirtschaft. Die Produktivitätssteigerungen übertrafen den Mehraufwand an Arbeit beträchtlich, und das Verhältnis zwischen gesellschaftlichem Energieaufwand und Energieertrag in Form von Agrarprodukten ist zwischen 1830 und 1910 von ungefähr 1 : 5 auf 1 : 9 angestiegen.³⁸

Eine strukturell wichtige Veränderung stellte die zunehmende Marktintegration der österreichischen Landwirtschaft dar. Der Anstieg der nicht-agrarischen und urbanen Bevölkerung von knapp einer auf über vier Millionen bedeutete auch, dass die Landwirtschaft wesentlich mehr Nahrungsmittel in die Städte lieferte. Der Export von Agrarprodukten aus den immer noch auf lokaler Ebene integrierten Produktionssystemen war gleichbedeutend mit einem Export von ohnehin knappen Pflanzennährstoffen und einer zunehmenden Öffnung von lokal weitgehend geschlossenen Stoffkreisläufen.³⁹ Die urbanen Zentren müssen als Senken für Pflanzennährstoffe begriffen werden: In der nach Wien gelieferten Nahrung und dem Futter für die städtischen Zugtiere waren Ende des 19. Jahrhunderts beispielsweise mindestens 15.000 bis 20.000 Tonnen Stickstoff enthalten⁴⁰, was ungefähr 20 bis 25 Prozent der jährlich den österreichischen Ackerflächen durch die Ernte entzogenen Stickstoffmenge (rund 80.000 Tonnen im Jahr 1910) entspricht. Dieser Stickstoff sowie alle anderen in den Agrarprodukten enthaltenen Pflanzennährstoffe landeten mit den menschlichen Ausscheidungen in Gewässern und der Luft und ging damit für die Landwirtschaft verloren.

Die Nährstoffverluste konnten im 19. Jahrhundert noch weitgehend durch nicht-fossile Techniken wie Bewässerung, Fruchtfolgemaßnahmen, die gezielte Nutzung von Leguminosen zur Fixierung von Luftstickstoff oder den Abbau mineralischer Düngemittel wie Mergel kompensiert werden.⁴¹ Einer weiteren Steigerung der Marktintegration der *low-input*-Landwirtschaft des frühen 19. Jahrhunderts hätten aber vermutlich mittelfristig die damit verbundenen Nährstoffverluste enge Grenzen gesetzt.⁴²

Die agrarischen Innovationen des 19. Jahrhunderts können zusammenfassend als ein weiterer Optimierungsschritt der Landwirtschaft des Solarenergiesystems verstanden werden. Zahlreiche technische Neuerungen wie neue Kulturpflanzen und Fruchtfolgen, effizientere landwirtschaftliche Geräte und Arbeitsweisen bewirkten zwar eine deutliche Steigerung der Flächen- und Arbeitsproduktivität, aber sie stellten keinen fundamentalen Bruch in der grundsätzlichen Funktionsweise der Landwirtschaft dar. Es handelte sich überwiegend um

biogene Prozesse, und die Rolle der Viehhaltung als multifunktionales und integrierendes Element in den lokalen Produktionssystemen blieb erhalten. Fossilenergie war praktisch nicht involviert, wenn man von einem gewissen und mengenmäßig unbedeutenden indirekten Kohleverbrauch durch die gesteigerte Anwendung von Eisen in landwirtschaftlichen Geräten absieht.

Die Transformation der Landwirtschaft im 20. Jahrhundert

Die Optimierung der Landwirtschaft im 19. Jahrhundert brachte deutliche Leistungssteigerungen, aber auch eine zunehmende Öffnung der lokalen Produktionssysteme durch Marktintegration und sie führte die Landwirtschaft an die elastischen Grenzen des solaren Energiesystems heran. Eine Überwindung dieser Systembeschränkungen erfolgte erst mit dem Eindringen von auf fossiler Energie basierenden Technologien in die Landwirtschaft sowie der Industrialisierung der Landwirtschaft selbst: Nach dem Zweiten Weltkrieg ermöglichten neue Agrartechnologien auf Basis fossiler Energieträger und damit die Zunahme exogener Inputs räumliche Ausdifferenzierung und Spezialisierung der Landwirtschaft und schließlich eine nie dagewesene Steigerung der Erträge und der Arbeitsproduktivität. Wie die Transformation des Energiesystems insgesamt war auch die Industrialisierung der Landwirtschaft ein rasantes und umfassendes Phänomen und veränderte zwischen 1950 und 1980 die Funktionsweise der gesamten österreichischen Landwirtschaft radikal. Drei Aspekte, die eng mit der Nutzung fossiler Energieträger verbunden sind, können aus einer biophysischen und energetischen Perspektive als treibende Kräfte in diesem Prozess hervorgehoben werden (Tabelle 8):

Die Substitution menschlicher und tierischer Arbeit durch Maschinen: Die Landwirtschaft war einer der letzten Wirtschaftssektoren, die auch nach dem Zweiten Weltkrieg fast ausschließlich mit menschlicher und tierischer Arbeitskraft betrieben wurden. Erst Verbrennungs- und Elektromotor und Erdöl sowie die flächendeckende Elektrifizierung ermöglichten eine Substitution belebter Arbeit durch Maschinen: Während um 1950 noch etwa 600.000 Stück Zugvieh und nur 30.000 Traktoren im Einsatz waren, sind Zugochsen und Pferde bereits um 1970 völlig aus der Landwirtschaft verschwunden, und die Anzahl der Traktoren ist auf 270.000 Stück mit einer Leistung von 5,5 Millionen Kilowatt angestiegen. Die installierte Leistung je Flächeneinheit wurde durch den Einsatz von Traktoren und anderen landwirtschaftlichen Maschinen von im österreichischen Durchschnitt 0,2 Kilowatt pro Hektar auf 5,6 Kilowatt pro Hektar, also um den Faktor 30, erhöht (Tabelle 8).⁴³ Die Bedeutung der menschlichen Arbeitskraft in der Landwirtschaft wurde marginalisiert, die Anzahl der Berufstätigen in der Landwirtschaft ist von 1,1 Millionen im Jahr 1950 auf 0,3 Millionen im Jahr 1980 gesunken, und menschliche Arbeitskraft trägt heute nur noch zwischen 0,2 und 0,5 Prozent zur installierten Leistung bei.

Die Aufhebung der Nährstofflimitierung: Das bereits Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelte Haber-Bosch-Verfahren ermöglichte die kostengünstige technische Fixierung von Luftstickstoff, was zwischen 1950 und 1980 zu einer Steigerung der Stickstoffinputs aus Kunstdünger von 0,5 auf 4,3 Tonnen pro Quadratkilometer führte. Dadurch wurde die Stickstoffversorgung der Landwirtschaft von Viehhaltung und natürlichen Erneuerungsraten entkoppelt. Die Bedeutung der Viehhaltung zum Transfer von Pflanzennährstoffen, zur Konzentration und zur Aufbereitung von Dünger wurde obsolet und auch auf das Potential von Leguminosen

zur Fixierung von Luftstickstoff konnte verzichtet werden: Ab 1950 verschwanden die Kleearten zugunsten von ertragreicheren Futterpflanzen, vor allem Körner- und Silomais, wieder aus der Fruchtfolge (Tabelle 8). Auch die Verfügbarkeit anderer essentieller Pflanzennährstoffe in Form von Handeldüngern wurde durch industrielle Syntheseverfahren (Phosphor) oder den industriellen Abbau mineralischer Lagerstätten (Kalium) erhöht.

Flächendeckende Erschließung durch Transportinfrastruktur: Wesentlich für die Industrialisierung der dezentral organisierten Landwirtschaft und ihre vollständige Integration in das Industriesystem war aber auch die flächendeckende und engmaschige Erschließung durch das Straßennetz und den Individualverkehr. Die Dichte des Straßennetzes ist mit 1.200 Metern pro Quadratkilometer mehr als zehnmal so hoch wie die des Schienennetzes (100 Meter pro Quadratkilometer). Die kostengünstigen Möglichkeiten zum KFZ-gebundenen Ferntransport von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln und Agrarprodukten waren eine wichtige Voraussetzung für die völlige Marktintegration der Landwirtschaft und für die räumliche Ausdifferenzierung und Spezialisierung des Agrarsystems. Im Jahr 2000 wurden 43 Millionen Tonnen Nahrungs- und Futtermittel auf Österreichs Straßen transportiert und dabei 3,7 Milliarden Tonnenkilometer zurückgelegt.⁴⁴ Zum Vergleich: Die in diesem Jahr geerntete Menge an Biomasse betrug inklusive der Ernte vom Grünland und Stroh knapp 20 Millionen Tonnen. Jede geerntete Tonne legte also im Durchschnitt eine Strecke von fast 200 Kilometer zurück.⁴⁵

Tabelle 8: Die Industrialisierung der österreichischen Landwirtschaft 1950–2000

		1950	1960	1970	1980	1990	2000
Berufstätige	[1000]	1.092	776	432	290	214	150
Zugtiere	[1000]	580	280	25	0	0	0
Traktoren	[1000]	30	147	268	335	339	336
Installierte Leistung*	[1000 kW]	504	1.880	5.583	8.872	12.075	17.060
Kunstdünger	[1000 t Rein- nährstoff]	54	209	438	402	310	230
Leguminosenanbau	[1000 ha]	280	220	120	73	54	70
Getreideertrag	[t/ha]	1,55	2,51	3,20	4,54	5,61	5,46
Flächenproduktivität	$\frac{[G]_{NW}}{ha_{LWF}}$	5,7	8,7	11,3	12,0	16,4	16,1
Arbeitsproduktivität	$\frac{[G]_{NW}}{LW_{Ab}}$	22	45	100	151	266	354

* Zur Definition von installierter Leistung siehe Anm. 37.

Quellen: Felix Butschek u.a., Statistische Reihen zur österreichischen Wirtschaftsgeschichte, Die österreichische Wirtschaft seit der industriellen Revolution, Wien 1998; Österreichisches Statistisches Zentralamt, Republik Österreich 1945–1995, Wien 1995; Krausmann, Land-use change, wie Anm. 51; WIFO, Traktoren und Zugvieh in der österreichischen Landwirtschaft, in: Monatsberichte des österreichischen Institutes für Wirtschaftsforschung (1962) H. 7, 332–339; eigene Berechnungen.

Im Verbund mit einer ganzen Reihe technologischer Entwicklungen, etwa in der Pflanzen- und Tierzucht oder der chemischen Schädlingsbekämpfung, führte die rasante Durchsetzung dieser Technologien nach dem Zweiten Weltkrieg zu einer Steigerung der Flächen- und Arbeitsproduktivität um eine Größenordnung und mehr und damit zur Industrialisierung der landwirtschaftlichen Produktion (Tabelle 8). Aus sozialökologischer Perspektive wurden dadurch sämtliche verbliebenen Limitierungen des alten Regimes der kontrollierten Solar-

energieflüsse aufgehoben und ein grundlegender Wandel im Agrarsystem bewirkt. Die enge Koppelung der Landwirtschaft an lokal, das heißt auf betrieblicher und dörflicher Ebene, verfügbare Ressourcen und natürliche Erneuerungsraten wurde innerhalb weniger Jahre aufgehoben. Viehhaltung verlor die fundamentale Bedeutung die sie für die Integration und Optimierung der traditionellen Landwirtschaft hatte: Die Bedeutung der Viehhaltung für die Bereitstellung von Arbeitskraft, im landwirtschaftlichen Nährstoffmanagement und für die Verwertung von Biomasse minderer Qualität wurde obsolet, die Haltung von Vieh konnte auf die Produktion von Milch und vor allem Fleisch reduziert werden.⁴⁶ Mit einem Schlag entfiel der funktionale Zwang einer betrieblichen oder lokalen Koppelung von Viehhaltung und Ackerbau, und eine räumliche Ausdifferenzierung der österreichischen Landwirtschaft als Basis für den weiteren Industrialisierungsprozess wurde möglich.⁴⁷ Die Folge war eine völlige Desintegration der dörflich organisierten Agrarsysteme des 19. Jahrhunderts und die Ausbildung eines auf nationaler und globaler Ebene integrierten Produktionssystems.

Viehhaltung konzentrierte sich in der Folge zunehmend in den Maisanbauregionen im Süden Österreichs (Schweine- und Geflügelzucht) und in den Futterbauregionen im Alpenvorland (Rindermast), während sie in den Anbaugebieten für Brotgetreide in Ostösterreich völlig aufgegeben wurde. Umgekehrt verschwand der Ackerbau aus den alpinen Regionen, wo sich die Landwirtschaft auf grünlandbasierte Rinderhaltung und Milchproduktion spezialisierte. In Grenzertragsregionen wurde die Landwirtschaft mit der Steigerung der Flächenproduktivität vielfach gänzlich aufgegeben. Während die Agrarproduktion zwischen 1950 und 1995 verdoppelt wurde, ist die landwirtschaftlich genutzte Fläche um über 20 Prozent zurückgegangen. Im Gegenzug ist die bewaldete Fläche um rund 13 Prozent gewachsen, und viele Regionen sind mit ausgeprägter Wiederbewaldung konfrontiert.

Tabelle 9: Räumliche Ausdifferenzierung der Flächennutzung: Das Verhältnis von Ackerland zu Grünland in den landwirtschaftlichen Hauptproduktionsgebieten Österreichs 1949, 1969 und 1995

	1949	1969	1995	Veränderung 1949/1995
Hochalpen	0,11	0,09	0,02	4,6
Voralpen	0,25	0,16	0,08	3,1
Alpenostrand	0,58	0,53	0,33	1,7
Wald- und Mühlviertel	1,58	1,33	1,34	1,2
Kärntner Becken	0,7	0,8	0,9	0,8
Alpenvorland	1,0	1,1	1,6	0,6
Südöstliches Flach- und Hügelland	1,2	1,2	2,4	0,5
Nordöstliches Flach- und Hügelland	7,8	10,0	20,6	0,4
Österreich	0,7	0,7	0,7	1,0

Quelle: Krausmann, Land-use change, wie Anm. 51.

Tabelle 9 demonstriert die großräumige Ausdifferenzierung der Landwirtschaft am Beispiel der Veränderungen des Verhältnisses von Ackerland zu Grünland in den österreichischen Agrarregionen. Während das Verhältnis von Ackerland zu Grünland zwischen 1949 und 1995 in Österreich insgesamt stabil bei 0,7 blieb (das heißt auf einen Hektar Ackerland kommen im Mittel 1,4 Hektar Grünland), verschob sich im alpinen Raum das Verhältnis deutlich zugunsten des Grünlandes (etwa in den Hoch- und Voralpen). Vor allem in den

Beckenlagen im Süden und Osten hingegen verschwanden die Wiesen- und Weideflächen mit der Rinder- und Pferdehaltung, und das Verhältnis verschob sich klar in Richtung Ackerland. Kamen im nordöstlichen Flach- und Hügelland im Jahr 1949 noch 0,1 Hektar Grünland auf einen Hektar Ackerland, waren es 1995 nur mehr 0,05 Hektar.

Die räumliche und betriebliche Spezialisierung der landwirtschaftlichen Produktion und ihre vollständige Integration in überregionale Märkte gingen Hand in Hand mit einer Zunahme des Transfers großer Mengen von Biomasse und landwirtschaftlichen Betriebsmitteln über weite Strecken.⁴⁸ Biomasse und die darin enthaltenen Pflanzennährstoffe werden heute in großen Mengen in Form von Tierfutter oder Nahrungsmitteln zwischen weit auseinanderliegenden Regionen verschoben, und die dadurch in den Produktionsregionen verlorenen Nährstoffe werden durch die Anwendung synthetischer Düngemittel ersetzt. In den intensiven Viehhaltungsregionen und in Großstädten fallen im Gegenzug organische Materialien und Nährstoffe in tierischem Mist und Fäkalien im Überschuss an und müssen entsorgt werden.

Auf lokaler Ebene bedeutete diese Entwicklung eine Öffnung ehemals regional weitgehend geschlossener⁴⁹ landwirtschaftlicher Produktionssysteme. Bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde Biomasse vor allem innerhalb des Betriebs und des lokalen Produktionssystems umgesetzt. Futter und Düngemittel wurden nur in geringem Ausmaß zugekauft, und nur ein verhältnismäßig kleiner Teil der Produktion verließ das System über den Markt. Mit der Industrialisierung der Landwirtschaft haben sich auf betrieblicher Ebene sowohl die Importe von Biomasse und anderen Betriebsmitteln wie auch die Exporte von Endprodukten enorm erhöht. Tabelle 10 zeigt, dass Ende der 1990er Jahre in den Dörfern Theyern und Voitsau der Anteil der landwirtschaftlichen Endproduktion zwischen 20 und 40 Prozent des gesamten Umsatzes an Biomasse ausmachte und praktisch vollständig exportiert wurde. Damit verringerte sich zwischen 1830 und 1995 das Verhältnis von Biomasseumsatz zu Export bei einem deutlich gestiegenen Umsatz von Biomasse von 30 : 1 auf 5 : 1. Parallel zu den Exporten stiegen auch die Importe von Biomasse, vor allem von Futtermitteln, gegenüber 1830 an. Besonders deutlich zeigen sich die Öffnung der lokalen Produktionssysteme und der Anstieg der insgesamt umgesetzten Mengen in der Entwicklung der sozioökonomischen Stickstoffflüsse. Abbildung 3 zeigt die wichtigsten Stickstoffflüsse in der Landwirtschaft der Gemeinde Theyern im Jahr 1830 und 1999: Mit dem Anstieg des Imports von Stickstoff in Form von Düngemitteln und Futter von 0 auf 70 Kilogramm pro Hektar hat sich auch die Entnahme von Stickstoff in Form von Ernteprodukten etwa auf rund 77 Kilogramm pro Hektar verdreifacht. Über den Verkauf von Agrarprodukten (Export) gingen dem lokalen Produktionssystem 1999 etwa 39 Kilogramm pro Hektar verloren, verglichen mit etwa 2 Kilogramm pro Hektar im Jahr 1830. Zugenommen haben aber auch der Stickstoffeintrag durch natürliche Prozesse⁵⁰ sowie der Anfall von Stickstoff in tierischem Mist.



Abbildung 3: Stickstoffflüsse im Agrarökosystem von Theyern um 1830 (links) und 1995 (rechts) Dargestellt sind Stickstoff (N)-Entzug durch landwirtschaftliche Ernte, N-Import über Futter- und Düngemittel, Eintrag von N durch natürliche Prozesse (feuchte und trockene Deposition, leguminöse Stickstoff-Fixierung), N-Eintrag durch Mineraldünger und Anwendung von tierischem Mist sowie Stickstoff-Export durch Marktverkauf von Agrarprodukten. Stickstoff-Austrag durch Auswaschung und Ausgasung sind nicht dargestellt. Alle Angaben in kg Stickstoff (N) pro ha Agrarfläche. Quelle: Fridolin Krausmann, *The Transformation of Central European Land Use Systems: A Biophysical Perspective on Agricultural Modernization in Austria since 1830*, in: *Historia Agraria* (2006, im Druck).

Tabelle 10: Biomasseumsatz in Theyern und Voitsau 1995: Importe, Entnahme (Ernte), Endproduktion und Export von landwirtschaftlicher Biomasse und Agrarprodukten sowie Veränderungen seit 1830

	Theyern [GJ/Kopf.a]	% des Um- satzes	Veränderung 1830–1995 [Faktor]	Voitsau [GJ/Kopf.a]	% des Umsatz	Veränderung 1830–1995 [Faktor]
Biomasseumsatz (Entnahme+Import)*	46	100%	0,8	221	100%	2,9
Import	5	11%		8	4%	
Entnahme	41	89%	0,7	213	96%	2,8
Endprodukte**	19	41%	3,0	38	17%	6,7
Export***	19	41%	7,4	38	17%	17,3

* Biomasseumsatz ergibt sich aus Import plus Entnahme. ** Gemeint sind alle pflanzlichen und tierischen Endprodukte des landwirtschaftlichen Produktionssystems. Im System verfüttertes Getreide wird beispielsweise nicht als Endprodukte verstanden. *** Export bezeichnet alle Endprodukte, die verkauft werden.

Quelle: Fridolin Krausmann, *Milk, Manure and Muscular Power. Livestock and the Industrialization of Agriculture*, in: *Human Ecology* 32 (2004) H. 6, 735–773; eigene Berechnungen.

Mit der Industrialisierung der Landwirtschaft kam es also zu einer Vernetzung von spezialisierten landwirtschaftlichen Produktionssystemen und den damit zusammenhängenden Material- und Energieflüssen auf überregionaler und zunehmend auch auf globaler Ebene. Schweine in Österreich werden mit Sojabohnen aus Brasilien gemästet, und Getreide und Fleisch aus der österreichischen Landwirtschaft ernähren Menschen in Russland oder Afrika. Biomasse und Pflanzennährstoffe werden dadurch in großen Mengen und über große Ent-

fernungen verschoben. Während die Entnahme von Biomasse in den letzten Jahrzehnten stagnierte, stiegen die Importe und Exporte sowohl von landwirtschaftlicher Biomasse als auch von Holz und Holzprodukten mit exponentiellen Raten an. Die physische Handelsbilanz von Biomasse ist dabei ausgeglichen, Importe und Exporte von Biomasse halten sich mengenmäßig die Waage. Das bedeutet natürlich auch, dass die österreichische Ökonomie zusehends die Flächennutzung auf globaler Ebene indirekt beeinflusst. Die Importe von Biomasse entsprechen mittlerweile einer Produktionsfläche von 80.000 Quadratkilometern. Mit dem internationalen Handel stieg auch die Transportintensität von land- und forstwirtschaftlichen Produkten. Die Transportintensität der Importe von Biomasse stieg zwischen 1950 und 1995 von 6 auf 17 Milliarden Tonnenkilometer jährlich.

All diese Aspekte, die gemeinsam die Industrialisierung der Landwirtschaft charakterisieren, bewirkten eine weitestgehende Aufhebung der Limitierungen, denen die Landwirtschaft unter den Bedingungen des Solarenergiesystems ausgesetzt war. Dadurch konnte sowohl die Flächen- wie auch die Arbeitsproduktivität gesteigert und die Entnahme landwirtschaftlicher Biomasse insgesamt erhöht werden. Der mittlere Ertrag der wichtigsten Getreidesorten wuchs zwischen 1950 und 1990 einem linearen Trend folgend von 1,5 auf 5,6 Tonnen pro Hektar, also mit einer mittleren Rate von fast 3 Prozent jährlich, und ähnliches gilt für alle anderen Feldfrüchte und den Biomassertrag insgesamt (Tabelle 8). Die Nahrungsproduktion der Landwirtschaft wuchs in diesem Zeitraum im Gegensatz zur Entwicklung im 19. Jahrhundert überproportional zur Bevölkerung. Noch 1950 konnte die österreichische Landwirtschaft nur 85 Prozent des Nahrungsbedarfes der Bevölkerung decken, 30 Jahre später produzierte sie pflanzliche Produkte, die zur ausreichenden Versorgung von fast neunzehn Millionen Menschen, also dem 2,5-fachen der tatsächlichen Bevölkerung gereicht hätten. Allerdings wurde ein großer Teil dieser Ackerbauprodukte in der Tierhaltung zur Fleisch- und Milchproduktion verbraucht, so dass die tatsächliche Endproduktion der Landwirtschaft im Jahr 1980 etwa dem Nahrungsbedarf von zehn bis zwölf Millionen Menschen entsprach. 1995 wurden pro Kopf in Österreich 530 Kilogramm Getreide einschließlich des verfütterten Getreides, 100 Kilogramm Fleisch und 370 Liter Milch produziert, und der Nahrungsbedarf eines Menschen konnte auf einer Fläche von 0,25 Hektar erzeugt werden. Noch eindrucksvoller war die Entwicklung der Arbeitsproduktivität. Sie wurde zwischen 1950 und 1990 um den Faktor 18 gesteigert. In den 1990er Jahren produzierte eine in der Landwirtschaft tätige Person bereits Nahrung für 60 Personen (Tabelle 8).

Den Technologien, auf denen die flächendeckende Industrialisierung der Landwirtschaft und die damit im Zusammenhang stehenden Produktivitätssteigerungen basierten, liegt die kostengünstige Verfügbarkeit von Fossilenergie zu Grunde, und dementsprechend nahm auch der direkte und indirekte Energieeinsatz in der landwirtschaftlichen Produktion zu. Insgesamt stieg der Energieaufwand für Treibstoffe, Strom, Erzeugung von Kunstdüngern und Pflanzenschutzmitteln vor allem in den 1950er und 1960er Jahren viel schneller an als der in energetischen Einheiten gemessene Nettooutput der Landwirtschaft. Die Produktivitätssteigerungen der Landwirtschaft wurden also durch eine sinkende Energieeffizienz der Agrarproduktion erkauft: Während das Verhältnis zwischen Energieaufwand und Energieertrag der Agrarproduktion im Laufe des 19. Jahrhundert von 1 : 5 auf 1 : 10 gesteigert werden konnte, wurde bereits 1965 mehr Energie in die Agrarproduktion investiert als in Form von Nahrung gewonnen werden konnte: Zwischen 1965 und 1980 betrug das Verhältnis von Input zu Output nur etwa 1 : 0,86.⁵¹ Die Landwirtschaft hat sich demnach mit

der Transformation des Energiesystems von einem zentralen Element des gesellschaftlichen Energiesystems tendenziell in eine Senke gesellschaftlich nutzbarer Energie verwandelte. Die Verteuerung fossiler Energieträger mit den Ölkrisen der 1970er Jahre wirkte sich aber auch auf die Energieeffizienz der Landwirtschaft aus. Die Nahrungsproduktion stieg durch effizientere Bewirtschaftungsmaßnahmen schneller als der direkte und indirekte Energieeinsatz, und in den 1990er Jahren war die Energiebilanz der Landwirtschaft in etwa ausgeglichen.⁵²

Fazit

Aus einer sozialökologischen Perspektive erscheint die Agrarmodernisierung des 19. und 20. Jahrhunderts als ein Prozess, mit dem sich die Funktionsweise und die sozialmetabolische Funktion von Landwirtschaft grundlegend verändert haben. Die vorindustrielle Landwirtschaft zeichnet sich durch eine enge Koppelung an lokal verfügbare Ressourcen und natürliche Erneuerungsraten und die betriebliche und dörfliche Kombination unterschiedlicher Landnutzungsformen mit Viehwirtschaft aus. Dies ermöglichte die Stabilisierung der Bodenfruchtbarkeit und damit der landwirtschaftlichen Erträge, setzte aber auch enge Grenzen im Bezug auf Spezialisierung, räumliche Konzentration und Wachstum. Im 19. Jahrhundert wurde die Landwirtschaft von der kohlebasierten Industrialisierung in energetischer Hinsicht nur wenig berührt. Die Produktionssteigerungen sind vielmehr auf einen Optimierungsprozess zurückzuführen, der allerdings nicht zu einer Überwindung der Limitationen der alten Landwirtschaft führte. Damit näherte sich der Optimierungsprozess der vorindustriellen Landwirtschaft im 19. Jahrhundert an die elastischen Grenzen des kontrollierten Solarenergiesystems an und erst die Durchdringung des Agrarsystems mit Technologien auf Basis von Erdöl und elektrischer Energie nach dem Zweiten Weltkrieg erlaubte eine Überwindung der alten Grenzen. Im Zuge der Industrialisierung entwickelte sich die Landwirtschaft von einem *low-input-low-output*-System zu einem Durchflusssystem, die lokale Optimierung wurde zugunsten einer Integration auf einem nationalen und globalen Skalenniveau aufgegeben und die Arbeits- und Flächenproduktivität der Landwirtschaft wurde auf Kosten der Energieeffizienz enorm gesteigert. Damit änderte sich die Funktion von Landwirtschaft im Energiesystem grundlegend: Während Landbewirtschaftung unter den Bedingungen des kontrollierten Solarenergiesystems einen energetischen Überschuss erwirtschaften musste und damit die Versorgung des nicht landwirtschaftlichen Bereiches mit Nahrung für Menschen, Futter für Zugtiere und Brennholz für Raumwärme und Prozessenergie sicherzustellen hatte, ist die industrialisierte Landwirtschaft eine energetische Senke die durch Energiesubventionen aus dem nichtagrarisches Bereich angetrieben wird.

Es wird deutlich, dass der vorindustriellen Landwirtschaft eine fundamental andere Optimierungslogik zugrunde liegt als der modernen industrialisierten Landwirtschaft: Die Funktionsweise der Landwirtschaft war nicht von einer Strategie der Maximierung der Flächen- oder Arbeitsproduktivität geprägt, sondern musste auf eine Optimierung der (langfristig tragbaren) Nutzung lokal verfügbarer Ressourcen abgestimmt sein.⁵³ Das Problem chronischer Nährstoffknappheit ohne Möglichkeit von externem Ersatz musste gelöst werden, die jahreszeitlich stark schwankenden Erfordernissen an Arbeitsleistung mit einem kontinuierlich verfügbaren Angebot an tierischer und menschlicher Arbeitskraft in Einklang gebracht und Mechanismen zur Abpufferung von existenzbedrohenden klimatischen

Extremereignissen und so fort entwickelt werden. Dies wurde durch ein komplexes System aus räumlich und zeitlich wechselnden Wirtschaftsformen und die Ausnutzung der multifunktionalen Eigenschaften des Nutztviehs bewerkstelligt. Aus dieser Perspektive erscheint die Landwirtschaft des 19. Jahrhunderts hochgradig optimiert und lokal angepasst und aus ihrer internen Logik sehr effizient. Mit der Möglichkeit auf externe Energieressourcen und Nährstoffquellen zurückzugreifen verändern sich im 20. Jahrhundert allerdings die Voraussetzungen zugunsten eines Optimierungszieles, das hohe Erträgen bei hohem Betriebsmitteleinsatz und möglichst geringem Arbeitseinsatz in den Vordergrund stellt. Aus dieser Perspektive erscheint die Agrarmodernisierung daher weniger als ein Prozess der kontinuierlichen Effizienzsteigerung, der stetig zur besseren Anpassung der Landwirtschaft an die jeweiligen Standortbedingungen⁵⁴ führt. Vielmehr verändern sich mit der Industrialisierung der Landwirtschaft die maßgeblichen Systembedingungen grundlegend und lassen das alte System der subsistenzorientierten, risikovermeidenden naturalen Agrarökonomie als ineffizient erscheinen.⁵⁵

Auch im Bezug auf die Frage der überregionalen Integration sowie der lokalen Geschlossenheit agrarischer Produktionssysteme bringt eine sozialökologische Perspektive wichtige Einblicke: Die Betrachtung ökonomischer und institutioneller Aspekte zeigt, dass auch die vorindustrielle Landwirtschaft sehr früh auf regionaler und überregionaler Ebene in vielfältige Austauschprozesse eingebunden war (Migration, Transfer von Technologie und Information, Marktbeziehungen).⁵⁶ Eine biophysische Perspektive verweist allerdings auch auf die Grenzen dieser Austauschbeziehungen: In Bezug auf den Umsatz von Biomasse und Pflanzennährstoffen konnte die Öffnung bestimmte Grenzen, die vor allem durch natürliche Erneuerungsraten vorgegeben waren, nicht übersteigen, ohne die langfristige Stabilität des Systems zu gefährden. Interne Flüsse mussten in der Regel um eine Größenordnung größer als der Austausch mit anderen Systeme sein – eine Einschränkung, die erst mit der energetischen Subventionierung der Landwirtschaft durch fossile Energie aufgehoben wurde und die für die moderne industrialisierte Landwirtschaft nicht mehr gilt.

Schließlich weist dieser Beitrag auch auf einige aus sozialökologischer Perspektive noch unzureichend untersuchte Fragen hin. Zum einen erscheint eine stärkere Integration der Aspekte gesellschaftlicher Zeitverwendung, menschlicher und tierischer Arbeit sowie Fossilenergie, in die quantitativen Modellierungen erforderlich, sind es doch insbesondere auch Verschiebungen zwischen menschlicher, tierischer und technischer Arbeit, die den Modernisierungsprozess charakterisieren und in denen sich unterschiedliche agrarische Produktionssysteme auf globaler Ebene unterscheiden. Zum anderen stellt sich die Frage unter welchen biophysischen Rahmenbedingungen unter den Bedingungen des kontrollierten Solarenergiesystems agrarische Produktionssysteme mit hohem Spezialisierungsgrad und hoher Marktintegration möglich waren.

Anmerkungen

* Dieser Beitrag basiert auf Forschungsergebnissen aus den Projekten *Historische Nachhaltigkeitsforschung*, gefördert vom Kulturlandschaftsforschungsprogramm des BMBWK und *Historischer Wandel der gesellschaftlichen Naturverhältnisse* gefördert vom österreichischen Wissenschaftsfonds FWF (Nr. P16759 G04). Mein Dank gilt: Rolf Peter Sieferle, Heinz Schandl, Marina Fischer Kowalski, Helmut Haberl und Verena Winiwarter.

1 Vgl. Marina Fischer-Kowalski/Helga Weisz, Gesellschaft als Verzahnung materieller und symbolischer Welten, in: Karl-Werner Brand (Hg.), *Soziologie und Natur. Theoretische Perspektiven*, Opladen 1998, 145–172; Hel-

- mut Haberl u.a., Progress Towards Sustainability? What the conceptual framework of material and energy flow accounting (MEFA) can offer, in: *Land Use Policy* 21 (2004) H. 3, 199–213; Verena Winiwarter, Landwirtschaft, Natur und ländliche Gesellschaft im Umbruch. Eine umwelthistorische Perspektive zur Agrarmodernisierung, in: Karl Ditt u.a. (Hg.), *Agrarmodernisierung und ökologische Folgen: Westfalen vom 18. bis zum 20. Jahrhundert*, Paderborn 2001, 733–767.
- 2 Einen Überblick über die Entstehungsgeschichte des Konzeptes gibt etwa Marina Fischer-Kowalski/Walter Hüttler, *Society's Metabolism. The Intellectual History of Material Flow Analysis, Part II: 1970–1998*, in: *Journal of Industrial Ecology* 2 (1998) H. 4, 107–137.
 - 3 Vgl. Helmut Haberl/Helga Zangerl-Weisz, Kolonisierende Eingriffe: Systematik und Wirkungsweise, in: Marina Fischer-Kowalski u.a. (Hg.), *Gesellschaftlicher Stoffwechsel und Kolonisierung von Natur. Ein Versuch in Sozialer Ökologie*, Amsterdam 1997, 129–148.
 - 4 Vgl. Rolf Peter Sieferle, Kulturelle Evolution des Gesellschaft-Natur-Verhältnisses, in: Fischer-Kowalski, *Gesellschaftlicher Stoffwechsel*, wie Anm. 3, 37–53.
 - 5 Biomasse deckt in agrarischen Gesellschaften mehr als 95 Prozent des Primärenergiebedarfes. Daneben spielen nur Wind und Wasser eine gewisse, wenn auch mengenmäßig sehr untergeordnete Rolle, fossile Energieträger haben nur lokale Bedeutung. Vgl. Marina Fischer-Kowalski/Helmut Haberl, *Stoffwechsel und Kolonisierung: Ein universalhistorischer Bogen*, in: Fischer-Kowalski, *Gesellschaftlicher Stoffwechsel*, wie Anm. 3, 25–36; Paolo Malanima, *Energy Systems in Agrarian Societies: The European Deviation*, Neapel 2002; Rolf Peter Sieferle, *The Subterranean Forest. Energy Systems and the Industrial Revolution*, Cambridge 2001; Wrigley spricht in diesem Zusammenhang von der *organic economy*: Edward A. Wrigley, *Continuity, Chance and Change. The Character of the Industrial Revolution in England*, Cambridge 1988.
 - 6 Biophysische Zugänge zu Fragen der Agrar- und Umweltgeschichte wurden in jüngerer Zeit von einer Reihe von Autoren gewählt, siehe etwa Christian Pfister, *Im Strom der Modernisierung. Bevölkerung, Wirtschaft und Umwelt im Kanton Bern 1700–1914*, Bern u.a. 1995; Geoff Cunfer, *Manure Matters on the Great Plains Frontier*, in: *Journal of Interdisciplinary History* 34 (2004) H. 4, 539–567; Manuel Gonzales de Molina, *Environmental constraints on agricultural growth in 19th century Granada (Southern Spain)*, in: *Ecological Economics* 41 (2002) H. 2, 257–270; Xavier Cusso u.a., *Social metabolism in an agrarian region of Catalonia (Spain) in 1860 to 1870: Flows, energy balance and land use*, in: *Ecological Economics* 58 (2006) H. 1, 49–65; Winiwarter, *Landwirtschaft*, wie Anm. 1.
 - 7 Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf der Forschungsarbeit einer Reihe von Forschungsprojekten die am Institut für Soziale Ökologie durchgeführt wurden, allen voran die Projekte *Historische Nachhaltigkeitsforschung*, gefördert im BMBWK Programm *Kulturlandschaftsforschung* sowie dem Projekt *Historischer Wandel der gesellschaftlichen Naturverhältnisse* gefördert vom FWF (PNr. P16759 G04). Die methodischen Grundlagen sowie detaillierte Darstellungen von (Teil-)Ergebnissen wurden bereits an anderer Stelle veröffentlicht: Marina Fischer-Kowalski/Helmut Haberl (Hg.), *Global Change and socio-ecological transitions*, Cheltenham 2006 (im Druck); Fridolin Krausmann, *Milk, Manure and Muscular Power. Livestock and the Industrialization of Agriculture*, in: *Human Ecology* 32 (2004) H. 6, 735–773; Fridolin Krausmann, *Land Use and Socio-economic Metabolism in Pre-industrial Agricultural Systems: Four 19th Century Austrian Villages in Comparison* (Social Ecology Working Papers 72), Wien 2004; Rolf Peter Sieferle u.a., *Das Ende der Fläche. Zum Sozialen Metabolismus der Industrialisierung*, Köln 2006.
 - 8 Die in Abbildung 2 dargestellte physische Ebene kann auch um eine institutionelle oder ökonomische Ebene erweitert werden, sodass mit dem Modell auch Flüsse von Information und Geld erfasst werden können, vgl. etwa die Ausführungen in Verena Winiwarter/Christoph Sonnlechner, *Der soziale Metabolismus der vorindustriellen Landwirtschaft in Europa*, Stuttgart 2001; Timothy P. Bayliss-Smith, *The Ecology of Agricultural Systems*, Cambridge 1982.
 - 9 Siehe Helmut Haberl, *The Energetic Metabolism of Societies, Part I: Accounting Concepts*, in: *Journal of Industrial Ecology* 5 (2001) H. 1, 11–33.
 - 10 Zu den Grundlagen der Material- und Energieflussanalyse und ihrer Adaptation für lokale Systeme und historische Fragen siehe Clemens M. Grünbühl u.a., *Socio-economic Metabolism and Colonization of Natural Processes in SangSaeng Village: Material and Energy Flows, Land Use, and Cultural Change in Northeast Thailand*, in: *Human Ecology* 31 (2003) H. 1, 53–87; Haberl, *The Energetic Metabolism*, wie Anm. 9; Heinz Schandl u.a., *Handbook of Physical Accounting. Measuring bio-physical dimensions of socio-economic activities*. MFA – EFA – HANPP, Wien 2002.
 - 11 Vgl. Hannes Schüle, *Raum-zeitliche Modelle – ein neuer methodischer Ansatz in der Agrargeschichte. Das Beispiel der bernischen Viehwirtschaft als Träger und Indikator der Agrarmodernisierung 1790–1915*, unveröffentlichte phil. Diplomarbeit, Universität Bern 1989.
 - 12 Vielversprechend scheint in diesem Zusammenhang die Auswertung der Daten zum Kulturaufwand in Kombination mit Angaben zum Arbeitsaufwand für bestimmte landwirtschaftliche Tätigkeiten aus der historischen Agrarliteratur.

- 13 Eine Diskussion der Eignung des Franziszeischen Katasters in der Agrar- und Umweltgeschichte findet sich u.a. in Andreas Moritsch, Der Franziszeische Grundsteuerkataster Quelle für die Wirtschaftsgeschichte und historische Volkskunde, in: East European Quarterly 3 (1972) H. 4, 438–448; Roman Sandgruber, Der Franziszeische Kataster und die dazugehörigen Steuerschätzungsoperare als wirtschafts- und sozialhistorische Quellen, in: Mitteilungen aus dem niederösterreichischen Landesarchiv 3 (1979) 16–28; Winiwarter, Der soziale Metabolismus, wie Anm. 8.
- 14 Für eine detaillierte Darstellung der verwendeten Quellen siehe Fridolin Krausmann, Rekonstruktion der Entwicklung von Materialflüssen im Zuge der Industrialisierung: Biomasse Materialflüsse in Österreich von 1830 bis 1998, Stuttgart 2001; Fridolin Krausmann/Heinz Schandl/Niels Schulz, Vergleichende Untersuchung zur langfristigen Entwicklung von gesellschaftlichem Stoffwechsel und Landnutzung in Österreich und dem Vereinigten Königreich, Stuttgart 2003; Zur Geschichte der österreichischen Agrarstatistik siehe Roman Sandgruber, Österreichische Agrarstatistik 1750–1918, Wien 1978.
- 15 Vgl. Projektgruppe Umweltgeschichte, Kulturlandschaftsforschung: Historische Entwicklung von Wechselwirkungen zwischen Gesellschaft und Natur, Wien 1999.
- 16 Zum Vergleich: Im Jahr 1830 lag die mittlere Viehdichte in Österreich im Durchschnitt bei 17 und im Jahr 1999 bei 26 GVE₅₀₀/km².
- 17 Der hohe Ochsenbestand in Voitsau spiegelt nicht nur den Zugkraftbedarf der Landwirtschaft wider, sondern auch eine stärker auf Viehzucht ausgerichtete Wirtschaftsform als in Theyern. Der Anteil des Zugviehs an der insgesamt installierten Leistung, also des Leistungspotentials von menschlichen Arbeitskräften und Zugvieh gemessen in kW, machte in Theyern etwa Dreiviertel und in Voitsau über 80 Prozent aus, in Großarl dagegen nur etwas über 50 Prozent.
- 18 Diese quantitativen Angaben sind als grobe Schätzung zu verstehen.
- 19 Zum Vergleich: Im Jahr 1999 wog eine ausgewachsene Kuh in Österreich knapp 600 Kilogramm bei einer Milchleistung von durchschnittlich fast 5.000 Kilogramm im Jahr.
- 20 Auch Bewässerung und die Nutzung von periodischen Überschwemmungen, etwa von Wiesen sind zu nennen, spielten aber in den untersuchten Gemeinden keine besondere Rolle.
- 21 Inklusive der intensiv genutzten Haus-, Wein und Obstgärten.
- 22 Es wurde angenommen, dass die Stickstoffverluste durch Lagerung und Ausbringung zwischen 40 und 60 Prozent lagen. Die Zahlen sind um feldfallenden Mist bereinigt.
- 23 Der Holzertrag der Wälder lag mit durchschnittlich 3fm/ha um 1830 sehr niedrig. Heute werden in den untersuchten Regionen Holzerträge von über 6 fm pro ha erwirtschaftet. Siehe dazu auch Martin Stuber/Matthias Bürgi, Agrarische Waldnutzungen in der Schweiz 1800–1950. Nadel- und Laubstreu, in: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 153 (2003) H. 10, 397–410; Martin Stuber/Matthias Bürgi, Agrarische Waldnutzung in der Schweiz 1800–1950. Waldweide, Waldheu, Nadel- und Laubfutter, in: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 152 (2001) H. 12, 490–508.
- 24 Zum Vergleich: Im Jahr 1999 lag der Nettoertrag für Getreide in Österreich bei durchschnittlich 5,5 t/ha, also um einen Faktor 10 über den Werten von 1830.
- 25 Vgl. Gerald Leach, Energy and food production, Guildford 1976.
- 26 Siehe etwa Richard C. Fluck, Energy of Human Labor, in: Richard C. Fluck (Hg.), Energy in Farm Production, Amsterdam u.a. 1992, 31–37.
- 27 Dieser Bedarfswert orientiert sich am physiologischen Energiebedarf der Bevölkerung (etwa 3,5 GJ/Kopf) und inkludiert Lager- und Verarbeitungsverluste.
- 28 Preise nach Vera Mühlpeck u.a., Index der Verbraucherpreise 1800 bis 1914, in: Geschichte und Ergebnisse der zentralen amtlichen Statistik in Österreich 1829–1979. Tabellenanhang, Wien 1979, 125–167.
- 29 Abgesehen von der Nutzung von Wasserkraft in der Mühle von Voitsau.
- 30 Deposition von Luftstickstoff, Fixierung durch Mikroorganismen.
- 31 Viehmist, Weidekreislauf, Plaggenwirtschaft.
- 32 Diese räumliche und zeitlich wechselnde Flächennutzung wird als *non-uniform land use* bezeichnet und bezieht sich auf die räumliche Integration verschiedener Landnutzungsformen (z.B. Ackerland, Grünland und Wald) auf lokaler Ebene und den hohen Stellenwert zeitlich wechselnder Landnutzungsformen (etwa die zeitliche Abfolge von Brache, Beweidung, Getreideanbau auf dem Ackerland). Im Gegensatz dazu steht die industrialisierte Landwirtschaft mit stark reduzierten Fruchtfolgen, Monokulturen und der großräumigen Spezialisierung auf bestimmte Feldfrüchte/Landnutzungsformen. Vgl. R. S. Loomis/D. J. Connor, Crop Ecology: Productivity and Management in Agricultural Systems, Cambridge 1992.
- 33 Das Revolutionsjahr 1848 brachte in Österreich die Aufhebung der Grundherrschaft und initiierte die Grundentlastung, siehe etwa Alfred Hoffmann (Hg.), Österreich-Ungarn als Agrarstaat. Wirtschaftliches Wachstum und Agrarverhältnisse in Österreich im 19. Jahrhundert, Wien 1978.

- 34 In Österreich lieferte der Kartoffelanbau um 1900 einen Nahrungsertrag von ca. 22 GJ_{NW} je ha, der Ertrag von Getreide (Roggen) lag mit 13 GJ_{NW}/ha deutlich unter diesem Wert. Zudem erfolgte der Anbau der Kartoffel meist anstelle der Brachhaltung (Berechnet aufgrund der Angaben in Krausmann, Rekonstruktion, wie Anm. 14).
- 35 Die Angaben zu den Stickstoffflüssen in der österreichischen Landwirtschaft 1830 und 1910 stammen aus bisher nicht veröffentlichten Berechnungen des Autors. Die Berechnung des Stickstoff-Entzuges durch die Ernte basiert auf Angaben zur Entnahme landwirtschaftlicher Biomasse und ihrem spezifischen Stickstoff-Gehalt, der Stickstoff-Eintrag durch Ackerleguminosen wurde auf Grund von Anbauflächen und Stickstoff-Fixierung pro Flächeneinheit berechnet. Das Stickstoff-Aufkommen wurde über Viehbestandsangaben, Anfall von tierischem Mist je GVE und Verlustraten (Ausgasung, Auswaschung) geschätzt. Daten und Faktoren stammen u.a. aus Roman Sandgruber, Österreichische Agrarstatistik 1750–1918, 1978; Krausmann, Rekonstruktion, wie Anm. 14; Krausmann, Land Use and Socio-economic Metabolism, wie Anm. 7.
- 36 Berechnet nach Angaben in Sandgruber, Österreichische Agrarstatistik, wie Anm 35. und den Ergebnissen der landwirtschaftlichen Betriebszählung von 1902, in: Österreichisches Statistisches Handbuch für die im Reichsrathe vertretenen Königreiche und Länder, Wien 1910.
- 37 Unter installierter Leistung wird hier die Leistung der vorhandenen Zugtiere (0,7 kW pro Pferd, 0,5 kW pro Ochse), Arbeitskräfte (0,1 kW pro Person) und – unter unternehmensgesellschaftlichen Bedingungen – auch des landwirtschaftlichen Maschinenparks (Traktoren, Erntemaschinen usw.) verstanden.
- 38 Dem Energieertrag in Form von landwirtschaftlichem Endprodukt (Getreide, Fleisch, Milch etc.) wird der direkte und indirekte gesellschaftliche Energieaufwand in Form des Nahrungsäquivalentes menschlicher Arbeit gegenüber gestellt. Futter für Arbeitstiere wird nicht als Energieaufwand gewertet, da es innerhalb des landwirtschaftlichen Produktionssystems erzeugt wird. Unter unternehmensgesellschaftlichen Bedingungen inkludiert der gesellschaftliche Energieaufwand auch Treibstoffe für landwirtschaftliche Maschinen, landwirtschaftlichen Stromverbrauch, Energieaufwand zur Düngemittelerzeugung etc.
- 39 Nimmt man an, dass in Theyern oder Voitsau die Nahrungsproduktion entsprechend dem österreichischen Durchschnitt zwischen 1830 und 1910 etwa verdoppelt werden konnte, bedeutet dies (bei gleichbleibender Bevölkerung und daher gleichbleibendem lokalen Nahrungsbedarf) eine Steigerung des potentiellen Exports landwirtschaftlicher Biomasse aus den lokalen Produktionssystemen um den Faktor 3 bis 4.
- 40 Berechnet aufgrund von Angaben zum Nahrungsverbrauch in Wien (nach Angaben in Roman Sandgruber, Die Anfänge der Konsumgesellschaft. Konsumgüterverbrauch, Lebensstandard und Alltagskultur in Österreich im 18. und 19. Jahrhundert, Wien 1982) und spezifischem Stickstoff-Gehalt je kg Nahrungsmittel.
- 41 Dazu gehört auch die Verwendung von phosphathaltigem Vogelmist (Guano), der in Südamerika in großen Mengen abgebaut und seit Mitte des 19. Jahrhunderts nach Europa exportiert wurde. In Österreich war die Guano-Anwendung aber von sehr untergeordneter Bedeutung.
- 42 Dieser Zusammenhang wurde bereits 1865 Justus von Liebig (Letters on the Subject of the Utilization of the Metropolitan Sewage, London 1865) angesprochen.
- 43 In den untersuchten Dörfern hat sich die installierte Leistung (siehe Anmerkung 37) um den Faktor 45 bis 55 auf 4–10 kW/ha erhöht.
- 44 Der Transport auf dem Schienennetz betrug etwa 5,3 Mio. t und 1 Mrd. tkm. Für frühere Zeitpunkte stehen keine vergleichbaren Daten zur Verfügung (berechnet aufgrund von Angaben in Max Herry, Verkehr in Zahlen Österreich, Wien 2003; Statistik Austria, Verkehrsstatistik – Güterverkehr – Verkehrsleistungen. Schnellbericht 3.6, Wien 2001).
- 45 Ohne innerbetrieblichen Transport, berechnet nach Herry, Verkehr, wie Anm 44; Statistik Austria, Verkehrsstatistik, wie Anm. 44.
- 46 Zwischen 1930 und 2000 wurde die Fleischproduktion verdreifacht, während die Milcherzeugung nur um den Faktor 1,5 stieg (eigene Berechnungen).
- 47 Räumliche Ausdifferenzierung und betriebliche Spezialisierung sind wichtige Voraussetzungen für die Industrialisierung der Agrarproduktion und die Steigerung der Flächen- und Arbeitsproduktivität.
- 48 Einer groben Schätzung zufolge hat sich zwischen dem frühen 19. Jahrhundert und 2000 die Transportintensität von landwirtschaftlicher Biomasse von weniger als 10 auf über 1.000 tkm/Kopf und Jahr erhöht (eigene Berechnungen auf Basis Marina Fischer-Kowalski u.a., Modelling scenarios of transport across history from a socio-metabolic perspective, in: Review Fernand Braudel Center 27 (2004) H. 4, 307–342; Herry, Verkehr, wie Anm. 44.
- 49 *Geschlossen* ist hier nur im Sinne von sozioökonomischen Material- und Energieflüssen zu verstehen.
- 50 Unter natürlichen Prozessen werden hier feuchte und trockene Deposition aus der Luft und pflanzliche Fixierung verstanden.
- 51 Siehe Fridolin Krausmann, Land-use change and socio-economic metabolism in Austria. Part I: driving forces of land-use change: 1950–1995, in: Land Use Policy 20 (2003) H. 1, 1–20.

- 52 Die Steigerung der Energieeffizienz der Landwirtschaft steht im Zusammenhang mit dem Anstieg der Energiepreise seit den 1970er Jahren und politischen Maßnahmen zum effizienteren Einsatz von Agrartechnologien (etwa Dünge- und Pflanzenschutzmitteleinsatz): Krausmann, Land-use change, wie Anm. 51.
- 53 Siehe auch Ulrich Müller-Herold/Rolf Peter Sieferle, Surplus and Survival: Risk, Ruin and Luxury in the Evolution of Early Forms of Subsistence, in: *Advances in Human Ecology* 6 (1998) 201–220.
- 54 A. S. Mather/C. L. Needle, The forest transition: a theoretical basis, in: *Area* 30 (1998) H. 2, 117–124.
- 55 Vergleiche Rita Gudermann, Der Take-off der Landwirtschaft im 19. Jahrhundert und seine Konsequenzen für Umwelt und Gesellschaft, in: Karl Ditt u.a. (Hg.), *Agrarmodernisierung und ökologische Folgen*. Westfalen vom 18. bis zum 20. Jahrhundert, Paderborn 2001, 47–85.
- 56 Vgl. Wilhelm Abel, *Agrarkrisen und Agrarkonjunktur. Eine Geschichte der Land- und Ernährungswirtschaft Mitteleuropas seit dem hohen Mittelalter*, Hamburg/Berlin 1978; B. H. Slicher van Bath, *The Agrarian History of Western Europe 500–1850*, London 1963; David B. Grigg, *The Transformation of Agriculture in the West*, Oxford 1992.