

Michael Stöhr und Peter Pickel

# Klimadesign von Pflanzenölkraftstoffen für landwirtschaftliche Maschinen

Der Einsatz von Biokraftstoffen in landwirtschaftlichen Maschinen ist eine Option, auf Klimaschutzanforderungen zu reagieren, mit denen Hersteller mobiler Arbeitsmaschinen aktuell konfrontiert werden. Es wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das die Berechnung der Treibhausgasemissionen (THGE) von Biokraftstoffen stringent, transparent und im Einklang mit der EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie (KQR) für komplexe Herstellungspfade erlaubt. Damit wurde gezeigt, dass sowohl mit Rapsöl- als auch mit Leindotterölkraftstoff THGE um mehr als 60 % reduziert werden können. Schlüsselparameter wurden identifiziert und Regeln für ein Klimadesign von Pflanzenölkraftstoffen formuliert.

## Schlüsselwörter

Pflanzenölkraftstoff, Treibhausgasemissionen, Klimaschutz, Mischfruchtanbau

## Keywords

Vegetable oil fuel, green house gas emissions, climate protection, mixed cultivation

## Abstract

Stöhr, Michael and Pickel, Peter

## Climate design of vegetable oil fuels for agricultural equipment

Landtechnik 67 (2012), no. 1, pp. 65–68, 1 figure, 1 table, 6 references

The use of biofuels in agricultural machinery is an option for complying with climate protection requirements that are presently discussed to be placed on manufacturers of mobile off-road machinery by the European Commission. A mathematical model has been developed that allows calculating greenhouse gas emissions (GHGE) of biofuels for complex production paths in a straightforward, transparent manner and in pattern with the EU's Fuel Quality Directive (FQD). Therewith it has been shown that both rape seed and camelina sativa oil fuels can save more than 60 % GHGE. Key parameters have been identified and rules for a climate design of vegetable oil fuels have been formulated.

Der Einsatz von Biokraftstoffen in landwirtschaftlichen Maschinen ist eine Option, auf Klimaschutzanforderungen zu reagieren, welche derzeit von der Europäischen Kommission an die Hersteller mobiler Arbeitsmaschinen herangetragen werden. Pflanzenöl ist ein interessanter Kandidat unter den Biokraftstoffen, da die Herstellung vom Acker bis zum Tank in landwirtschaftlichen Betrieben selbst erfolgen kann. Das in Deutschland überwiegend genutzte Rapsöl verfehlt jedoch beim Standard-Herstellungsprozess, der Eingang in die EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie (KQR) [1] gefunden hat, mit einer Einsparung von 57 % der Treibhausgasemissionen (THGE) gegenüber Dieselmotoren knapp die in der KQR ab 2018 geforderte Mindestreduktion von 60 %. Einen Ausweg bieten optimierte Anbau- und Herstellungsmethoden für Rapsöl, insbesondere aber von Phosphor, Alkali- und Erdalkalimetallen vollständig gereinigtes Öl aus in Mischfruchtanbauweise angebautem Leindotter (*Camelina sativa*). Dessen Einsatzfähigkeit in modernen Traktormotoren wurde kürzlich von John Deere im EU-Projekt 2ndVegOil nachgewiesen [2] und wird hier vorausgesetzt.

## Mathematisches Modell für THGE

Zum Zweck der gezielten Optimierung der THGE von Pflanzenölkraftstoffen wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das die Bestimmungen der KQR für komplexe Herstellungsprozesse in Berechnungsvorschriften umsetzt. Die für die durchgeführten Berechnungen relevanten Bestimmungen der KQR finden sich gleichlautend auch in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EER) [3]. Das entwickelte Modell ist äquivalent zum BioGrace GHG Tool in der öffentlichen Version 4 [4], im Gegensatz zu diesem aber insbesondere darauf ausgelegt, Prozessketten mit beliebig vielen Stufen und beliebig vielen Nebenerzeugnissen je Prozessstufe mit einer klaren Notation übersichtlich

zu erfassen. Damit können die THGE bei der Herstellung von Pflanzenölen im Mischfruchtanbau und vor allem der Einfluss von Änderungen der Eingangsparameter auf das Ergebnis stringent und transparent berechnet werden. Zugleich ist das Modell offen, weitere Verfahrensschritte oder mögliche weitere Nebenerzeugnisse zu berücksichtigen. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit eines zielgerichteten Klimadesigns von Pflanzenölkraftstoffen.

**Optimierung der Klimabilanz von Rapsölkraftstoff**

Dieses Modell wurde zunächst am Beispiel des Standard-Herstellungsprozesses von reinem Rapsöl, welcher Eingang in die KQR und das BioGrace GHG Tool gefunden hat, getestet und verifiziert. Dann wurden Optimierungsmöglichkeiten für die Herstellung von Rapsöl ausgelotet. Entscheidend ist dabei die Anbauweise. Bei reinem Rapsöl werden 82 % der dem Öl zuzuordnenden THGE beim Anbau und nur 18 % in den nachfolgenden Prozessstufen erzeugt. Die größten Einzelbeiträge sind Feldemissionen von N<sub>2</sub>O, Stickstoffdüngerherstellung und Treibstoff für landwirtschaftliche Maschinen, welche 36 %, 32 % und 10 % der THGE verursachen. Der Mindestwert von 60 % THGE-Einsparung kann jedoch bereits dann erreicht werden, wenn das hergestellte Rapsöls selbst an Stelle von Diesel als Kraft- und Brennstoff für die weitere Herstellung von Rapsöl verwendet wird. In diesem Fall lassen sich die THGE des Rapsöls wie folgt beschreiben:

$$E_B = a + b \cdot I$$

Dabei bezeichnet E<sub>B</sub> die THGE des Rapsöls, I die spezifischen THGE aus der Verwendung von Dieselkraftstoff, a den Teil von E<sub>B</sub>, der nicht von der Verwendung des Teils des Dieselkraftstoffs bei der Rapsölherstellung stammt, welcher durch Rapsöl substituiert werden soll, und b einen Proportionalitätsfaktor. E<sub>B</sub> und a werden in g CO<sub>2-äq</sub>/MJ<sub>Öl im Tank</sub> angegeben (Bezugsgröße der THGE ist der Energiegehalt des letztendlich in den Tank gefüll-

ten Biokraftstoffs), I in g CO<sub>2-äq</sub>/MJ<sub>Diesel im Tank</sub> und b ist physikalisch dimensionslos. I ist die im Folgenden als veränderlich betrachtete, von der Art des substituierenden Stoffes abhängige Größe und hat für rein fossilen Diesel den Wert von 87,64 g CO<sub>2-äq</sub>/MJ<sub>Diesel im Tank</sub> [4], b ist eine Zahl kleiner 1, wenn der Ersatz des Diesels durch Rapsöl sinnvoll ist, d.h. dadurch weniger THGE erzeugt werden. Diese Bedingung lässt sich dadurch ausdrücken, dass E<sub>B</sub> kleiner als I ist. Daraus folgt dann, dass b kleiner 1 ist.

Wird nun bei der Herstellung des Rapsöls in einem fortlaufenden Prozess statt des Dieselkraftstoffs immer wieder ein Teil des erzeugten Rapsöls selbst eingesetzt, betragen die THGE des Rapsöls:

$$E_B = \lim_{n \rightarrow \infty} [a \cdot \sum_{i=0}^{n-1} b^i + I \cdot b^n] = \lim_{n \rightarrow \infty} [a \cdot \frac{1-b^n}{1-b} + I \cdot b^n] = \frac{a}{1-b}$$

Die Werte von a und b hängen davon ab, welcher Teil des Diesels durch Rapsöl substituiert wird, und welcher Teil der THGE damit dem konstanten Term a und welcher dem veränderlichen Term b·I zugeordnet wird. **Tabelle 1** zeigt die erzielbare THGE-Einsparung für verschiedene Substitutionsszenarien.

Die THGE-Einsparung wurde nach der Formel berechnet, welche durch die KQR vorgegeben ist:

$$\text{EINSPARUNG} = (E_F - E_B) / E_F$$

Dabei wurde für die THGE des Dieselreferenzkraftstoffs, E<sub>F</sub>, der Wert von 87,64 g CO<sub>2-äq</sub>/MJ<sub>Diesel im Tank</sub> verwendet. Die KQR benennt als Referenzwert 83,8 g CO<sub>2-äq</sub>/MJ<sub>Diesel im Tank</sub>, was nach Meinung der Autoren eine Inkonsistenz innerhalb der KQR darstellt und in Widerspruch zu den Quellen steht, auf die sich die KQR maßgeblich stützt [1; 4; 5].

Teilt man diese Ansicht nicht und nimmt stattdessen für E<sub>F</sub> den in der KQR angegebenen Wert von 83,8 g CO<sub>2-äq</sub>/MJ<sub>Öl im Tank</sub>, erhält man für die THGE-Einsparung ohne Dieselsubstitution

Tab. 1

THGE-Einsparung von mehr als 60 % dank Substitution von Diesel durch Rapsöl bei dessen Herstellung  
 Table 1: GHGE saving exceeding 60 % thanks to substitution of diesel by rape seed oil in a continuous rape seed oil production process

Ersatz von Diesel durch Rapsöl bei... Substitution of diesel through rapeseed oil for...	a [g CO <sub>2-äq</sub> /MJ] <sub>Öl im Tank</sub> a [g CO <sub>2-äq</sub> /MJ] <sub>Oil in tank</sub>	b	E <sub>B</sub> [g CO <sub>2-äq</sub> /MJ] <sub>Öl im Tank</sub> E <sub>B</sub> [g CO <sub>2-äq</sub> /MJ] <sub>Oil in tank</sub>	THGE-Einsparung GHGE saving
Keinem Prozessschritt/No process step	36,051	0,000	36,051	58,86 %
Anbau/Cultivation	32,358	0,042	33,782	61,45 %
Anbau und Rapssaattransport Cultivation and rape seed transport	31,989	0,046	33,544	61,72 %
Anbau und Rapsöltransport Cultivation and rape seed oil transport	32,178	0,044	33,666	61,59 %
Anbau und Rapssaat- und -öltransport Cultivation and rape seed and rape seed oil transport	31,809	0,048	33,427	61,86 %
Anbau, Rapssaattrocknung und Rapssaat- und -öltransport Cultivation, rape seed drying, and rape seed and rape seed oil transport	31,793	0,049	33,416	61,87 %

durch Rapsöl (erste Zeile in **Tabelle 1**) statt 58,86 % den etwas geringeren Wert von 56,98 %, also die in der KQR aufgeführte und auch vom BioGrace GHG Tool berechnete Einsparung von gerundet 57 %. Für die THGE-Einsparung mit Dieselsubstitution erhält man dann Werte zwischen 59,69 und 60,12 %, erreicht also, gerundet auf die erste Stelle vor dem Komma, auch den Mindestwert von 60 %. Dieses Ergebnis ist mithin unabhängig von der Position, die man hinsichtlich der aufgezeigten Inkonsistenz in der KQR einnimmt.

### THGE von Leindotterölkraftstoff aus Mischfruchtanbau

Im nächsten Schritt wurde das Modell für eine Berechnung der THGE von Leindotteröl aus Mischfruchtanbau mit Weizen angewandt. Mischfruchtanbau von Getreide mit Leindotter ermöglicht, den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln signifikant zu verringern [5] und bereitet so einer umfassenden Ökologisierung der Landwirtschaft den Weg. Der Leindotteranteil stellt einen Biokraftstoff ohne großen zusätzlichen Flächenbedarf bereit - im Spannungsfeld von Nahrungs- und Energieproduktion ein gewichtiger Aspekt. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 1** gezeigt. Die Mindesteinsparung von 60 % der THGE wird für Leindotteröl aus Mischfruchtanbau mit Weizen (CS-W Kurven) für einen großen Bereich von Mischungsverhältnissen deutlich überschritten.

Der Schlüsselparameter ist das Heizenergie-Treibhausgas-Emissionen-Verhältnis (HEV), d.h. das Verhältnis des unteren Heizwerts der produzierten Frucht zu den mit dem Anbau verbundenen THGE. Weizen hat ein besseres HEV als 36,79 MJ/g CO<sub>2-eq</sub>. Nach unseren Berechnungen ist dies der Minimalwert, den eine Ölfrucht haben muss, damit das Öl die Mindestminderung der THGE von 60 % erreicht; vorausgesetzt, die Ölfrucht wird in ähnlicher Weise weiterverarbeitet wie

Raps beim Standard-Rapsölproduktionsprozess (siehe schwarze horizontale Kurve für eine fiktive Mischung in **Abbildung 1**, bei der beide Komponenten ein HEV von 36,79 MJ/g CO<sub>2-eq</sub> haben. Der Minimalwert für das HEV ist ein anderer, wenn Abweichungen vom Standard-Rapsölproduktionsprozess erfolgen (z.B. andere Ölausbeute beim Pressen), doch der Unterschied ist in den meisten Fällen gering.

Das hohe HEV des Weizens kompensiert also für einen weiten Bereich von Mischungen das niedrige HEV von Leindotter. Würde Leindotter mit einer Frucht X mit gleichem HEV kombiniert, bliebe die THGE-Minderung für alle Mischungen unter 60 % (s. CS-X Kurven).

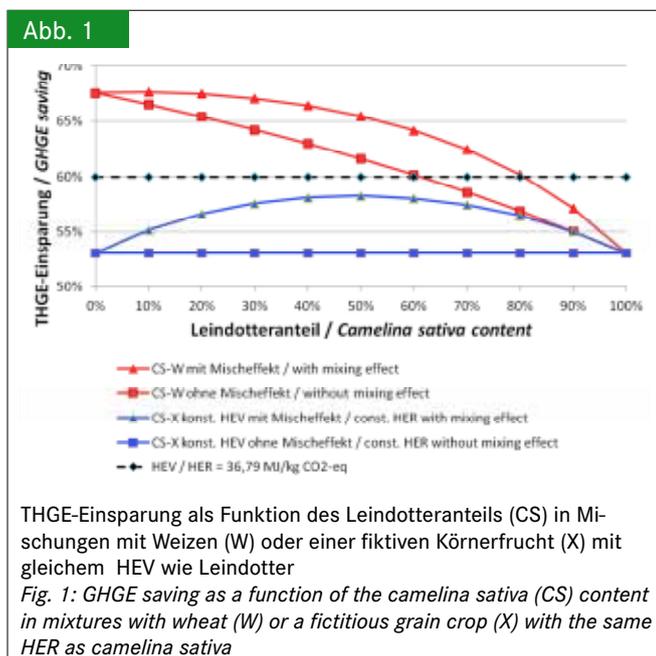
Versuche mit Mischfruchtanbau haben gezeigt, dass damit ein höherer Ertrag der Fruchtspartner erzielt werden kann als man bei einer linearen Interpolation der Reinkulturerträge erwarten würde [6; 7]. Darum wurden die Erträge nicht nur linear, sondern auch anhand von Literaturwerten mit einer quadratischen Funktion interpoliert. Die gekrümmten Kurven in **Abbildung 1** zeigen im Vergleich zu den Geraden den Effekt dieser quadratischen Interpolation, d.h. den Effekt der höheren Erträge, die beim Mischfruchtanbau im Vergleich zu Reinkulturen erzielt werden können. Der Mischeffekt führt zu einem Gewinn von mehreren Prozent THGE-Einsparung!

Die Methode des Mischfruchtanbaus von Öl- mit Körnerfrüchten bietet folglich eine wirkungsvolle Möglichkeit zur Reduktion der dem Pflanzenölkraftstoff zuzuordnenden THGE mittels eines gezielten Klimadesigns. Der entscheidende Parameter ist das HEV, gefolgt von den Parametern, die den Mehrertrag dank des Mischeffekts beschreiben. Anhand dieser Parameter können geeignete Mischungen von Ölpflanzen mit anderen Früchten ausgewählt werden.

### Regeln für ein Klimadesign von Pflanzenölkraftstoffen

Aus den erzielten Ergebnissen lassen sich Regeln für ein Klimadesign von Pflanzenölkraftstoffen ableiten. Im Folgenden werden diese für die Herstellung von Pflanzenölkraftstoffen aus Mischfruchtanbau formuliert:

1. Einer der beiden Mischungspartner sollte ein HEV von mehr als 36,79 MJ/kg CO<sub>2-eq</sub> haben, wenn die Ölausbeute bei der Pressung gemessen am unteren Heizwert und die THGE der dem Anbau folgenden Prozesskette genauso hoch sind wie beim Standard-Rapsölproduktionsprozess. Ansonsten gilt ein neu zu berechnender, leicht abweichender Mindestwert.
2. Es sollte zunächst eine Ölfrucht mit einem möglichst hohen HEV gewählt werden.
3. Wenn die Ölfrucht den erforderlichen Mindestwert des HEV nicht erreicht, sollte sie mit einer Körnerfrucht kombiniert werden, deren HEV den Mindestwert überschreitet.
4. Wenn Punkt 3 greift, sollte das Verhältnis beider Früchte so gewählt werden, dass für die Mischung der Mindestwert des HEV überschritten wird. Je geringer das HEV der Ölfrucht ist und je weniger die beigesellte Frucht den Mindestwert für das HEV überschreitet, desto höher muss der Anteil der beigesellten Frucht sein.



5. Überschreitet die Mischung für einen breiten Bereich von Mischungsverhältnissen den Mindestwert des HEV, sollte die Mischung so gewählt werden, dass die Synergie-Effekte maximal werden. Es können dann neben der Optimierung der Klimabilanz auch noch weitere Optimierungsziele verfolgt werden.
6. Das hergestellte Pflanzenöl sollte so weit wie möglich selbst wieder als Heiz- und Kraftstoff bei seiner eigenen Produktion eingesetzt werden, zuallererst als Kraftstoff in den landwirtschaftlichen Maschinen, die beim Anbau zum Einsatz kommen, dann in einem BHKW, das Strom und Wärme für die Ölsaattrocknung und -pressung produziert. Als Drittes kommt sein Einsatz als Heiz- und Kraftstoff in der näheren Region in Frage, etwa bei benachbarten landwirtschaftlichen Betrieben.

### Weiterer Forschungsbedarf und Anpassung des gesetzlichen Rahmens

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der funktionalen Zusammenhänge von N<sub>2</sub>O-Feldemissionen, Stickstoffdüngung, Bodenbeschaffenheit und Klima/Wetter. Es ist bei dieser Arbeit auch offensichtlich geworden, dass THGE-Berechnungen mit europäischen Mittelwerten, wie sie von der KQR zugrunde gelegt werden, zu sehr großen Differenzen zu den tatsächlichen THGE unter realen Anbau- und Herstellungsbedingungen führen. Hier besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Möglichkeiten, eine genauere Berechnung mittels regionaler Differenzierung mit einem sinnvollen Aufwand durchzuführen.

Bei der Arbeit fiel eine Inkonsistenz in der Verwendung des THGE-Referenzwerts für Dieselkraftstoff in der KQR und ihrer Umsetzung auf. Dies bedarf einer Bereinigung bei der nächsten Überarbeitung der KQR. Die Autoren plädieren ferner dafür, bei der Berücksichtigung von Kohlenstoffbestandsänderungen infolge indirekter Landnutzungsänderungen eine Unerheblichkeitsgrenze für Biokraftstoffe aus landwirtschaftlicher Produktion zu ziehen, sofern diese im landwirtschaftlichen Betrieb selbst oder in der näheren Region verwendet werden. So könnte es als unerheblich gelten, wenn maximal 10 % der Ackerfläche eines Landes oder einer Region für die Produktion von Biokraftstoffen zur Eigenbedarfsdeckung der Landwirtschaft und landwirtschaftsnaher Verbraucher verwendet werden.

Um die regional sehr unterschiedlichen realen THGE präziser zu erfassen, bietet sich eine Zusammenarbeit mit Regionalmarken an, die Produkte einer Region kennzeichnen. Für Biokraftstoffe, für deren THGE-Berechnung regional typische Kennwerte verwendet wurden, könnte dies damit legitimiert werden, dass diese Biokraftstoffe nach dem Zertifizierungssystem einer Regionalmarke zertifiziert werden.

### Schlussfolgerung

Es wurde der Nachweis erbracht, dass reine Pflanzenölkraftstoffe in Dieselmotoren 60 % und mehr der THGE einsparen können. Dies gelang durch eine umfassende mathematische

Modellierung und Berechnungen von THGE zu Pflanzenölproduktionspfaden in Übereinstimmung mit der KQR 2009/30/EG. Damit bieten reine Pflanzenölkraftstoffe eine Option, auf Klimaschutzanforderungen zu reagieren, welche derzeit von der Europäischen Kommission an die Hersteller mobiler Arbeitsmaschinen herangetragen werden.

Ein besonders interessanter Kandidat unter den in Feldversuchen erfolgreich in modernen Traktoren eingesetzten Biokraftstoffen ist Leindotteröl aus Mischfruchtanbau. Leindotteröl erlaubt nicht nur, mittels eines gezielten Klimadesigns THGE-Einsparungen von nahezu 70 % gegenüber Diesel zu erzielen, sondern bereitet auch einer umfassenden Ökologisierung der Landwirtschaft den Weg und stellt einen Biokraftstoff ohne großen zusätzlichen Flächenbedarf bereit – im Spannungsfeld von Nahrungs- und Energieproduktion ein gewichtiger Aspekt.

### Literatur

- [1] Richtlinie 2009/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009
- [2] Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009, [www.2ndvegoil.eu](http://www.2ndvegoil.eu)
- [3] BioGrace GHG Tool vs4-public, [www.biograce.net](http://www.biograce.net)
- [4] JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration, Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context" Version 3c, Annex 1, S. 16 und 19
- [5] Paulsen, H. M. (2007) Mischfruchtanbausysteme mit Ölpflanzen im ökologischen Landbau: 1. Ertragsstruktur des Mischfruchtanbaus von Leguminosen oder Sommerweizen mit Leindotter (*Camelina sativa* L. Crantz). *Landbauforschung Völkenrode* 57(1), S. 107-117
- [6] Gollner, G.; Gabler, C.; Grausgruber-Gröger, S.; Friedel, J. K.; Grausgruber, H.; Freyer, B. (2010): Körnerleguminosen in Mischkulturen mit Leindotter (*Camelina sativa*) im Ökologischen Landbau unter pannonischen Standortbedingungen. *Journal für Kulturpflanzen* 62 (11), S. 402-408

### Autoren

**Dr. Michael Stöhr**, Physiker, arbeitet seit 2000 als Director for International and Energy Projects bei der B. A. U. M. Consult GmbH, München. Im Projekt 2ndVegOil unterstützte er John Deere als externer Berater bei der Koordination des Projektes und war u. a. für die Durchführung des Project Assessment verantwortlich.

**Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel** war von 2000-2010 Professor für Landtechnik an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberge und arbeitete seit 2007 als Manager Tractor Applications bei den John Deere Werken Mannheim. Seit 2010 ist er stellvertretender Direktor des John Deere European Technology Innovation Center in Kaiserslautern. Er koordinierte das EU-Forschungsprojekt 2ndVegOil.

### Danksagung und Hinweise

Diese Publikation wurde im Zusammenhang mit dem EU-Forschungsprojekt 2ndVegOil erstellt. Dieses wurde von der Europäischen Kommission im 7. EU-Forschungsrahmenprogramm unter der Fördernummer N° TREN/FP7EN/219004/"2ndVegOil" finanziell unterstützt.

Die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Jener gibt nicht unbedingt die Meinung der Europäischen Gemeinschaften wieder. Die Europäische Kommission ist nicht verantwortlich für die Nutzung der darin enthaltenen Informationen.

Eine ausführliche Darstellung des mathematischen Modells und der durchgeführten Berechnungen erschien im Dezember 2011 als Monographie in der Reihe „Agrartechnische Schriften aus Halle“ und kann vom Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Hr. Axel Bachner, [axel.bachner@landw.uni-halle.de](mailto:axel.bachner@landw.uni-halle.de), bezogen werden. Eine englische Fassung der Monographie ist in Vorbereitung.