

Potenziale des *Jatropha curcas*-Anbaus für eine nachhaltige Produktion von Biodiesel in Bolivien

–

**Am Beispiel einer Fallstudie in der bolivianischen Region
El Gran Chaco des Departamentos Santa Cruz**

Von der Fakultät für Architektur und Landschaft
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORIN DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.- Ing.)

genehmigte Dissertation

von M.Sc. Ing. Bauingenieurin Nirza Fabiola Castro Gonzáles
geboren am 5. September 1972, in Potosí, Bolivien

2015

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Michael Rode

Koreferent: Prof. Dr. Ing. Manfred Fishedick

Tag der Promotion: 20. August 2015

Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung

Nirza Fabiola Castro Gonzáles

Potenziale des *Jatropha curcas*-Anbaus für eine nachhaltige Produktion von Biodiesel in Bolivien

Am Beispiel einer Fallstudie in der bolivianischen Region
El Gran Chaco des Departamentos Santa Cruz

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4049-4

ISSN 2193-7575

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde durch Promotionsstipendien des Katholischen Akademischen Ausländer-Dienstes (KAAD) (erste Phase der Doktorarbeit 2008) und vor allem von der Reiner Lemoine-Stiftung (RLS, 2009-2011) gefördert. Die letzten Monate der Arbeit wurden durch ein Abschlussförderungsprogramm der Leibniz Universität Hannover gefördert. Ich möchte mich sehr bei den genannten Stiftungen und der Leibniz Universität Hannover für die finanzielle Unterstützung im Rahmen ihrer Stipendienprogramme bedanken. Ein besonderes Dankeschön geht an meinen Doktorvater Prof. Dr. Michael Rode für die vielen hilfreichen Hinweise und die geduldige Betreuung. Ein herzliches Dankeschön geht auch an meinen zweiten Betreuer Prof. Dr. Manfred Fishedick vom Wuppertal Institut (WI) für seine fachliche Unterstützung und die Möglichkeit, meine Arbeit im Doktoranden-Kolloquium des WI vorstellen und diskutieren zu können.

Es war ein langer Prozess von der ersten Idee bis zur Fertigstellung dieser Dissertation und dabei haben Kollegen, Familie und Freunde mich in vielfältiger Weise unterstützt. Ein Dankeschön geht insbesondere an Rosa Contreras, Jesús Serrano und Katharina Steinkraus für ihre Ermutigung, Motivation, und Unterstützung speziell in der Anfangsphase der Arbeit. Hervorheben möchte ich ferner Dr. Nina Buhr, die mir nicht nur mit ihrer fachlichen Kompetenz, sondern auch mit Korrekturlesen und Freundschaft sehr geholfen hat. Kristina Korus hat mich bei der Bearbeitung der ArcGIS-Datenbank, beim Korrekturlesen und bei der Erstellung der Karten mit viel Einsatz unterstützt. Ein großes Dankeschön geht an Robert Wittkuhn und insbesondere an Dr. Claudia Leskien für das Korrekturlesen der Arbeit. Ein weiteres Dankeschön von mir geht an Prof. Dr. Peter Schaumann des Instituts für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover für seine Kontakte an der Leibniz Universität Hannover.

Ich bedanke mich beim Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) für die Gewährleistung eines Auslandsstipendiums, das die Forschungsaufenthalte im Untersuchungsgebiet in Santa Cruz, Oruro und La Paz in Bolivien ermöglichte. Ich möchte Prof. Dr. Silverio Marquez der Universidad Nacional Ecológica in Santa Cruz und Gonzalo Villegas (Petrobras-Bolivia) danken, weil sie mir viele Kontakte und technische Informationen ermöglichten. Mein Dank geht auch an das technische Personal vom Forschungsprojekt Biodieselproduktion des Centro de Investigación Agrícola (CIAT, Forschungszentrum für Tropenlandwirtschaft), mir Einblicke in das Projekt zu gewähren. Ich möchte mich darüber hinaus bei Prof. Dr. Antonio Salas und seinen

II

Kollegen der Technischen Universität Oruro in Bolivien für die wertvollen fachlichen Diskussionen, Kontakte sowie Gastfreundschaft während meines Aufenthaltes am Carrera de Metalurgia y Ciencia de Materiales (Institut für Metallurgie und Materialwissenschaft und Werkstofftechnik) als Gastforscherin bedanken. Weitere Dankeschöns nach Bolivien gehen an Luis Goitia (Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad Mayor de San Andrés, La Paz), der sich immer für mich Zeit genommen und mir großzügig fachliche Informationen zur Verfügung gestellt hat sowie Prof. Dr. Milton Salas (wissenschaftliche und technologische Forschungsabteilung der Technischen Universität Oruro), der mich in der Anfangsphase der Arbeit sehr unterstützt hat.

Zum Schluss möchte ich mich bei meinen Eltern Emma und Agricio, meinen Geschwistern Nelson, Paul, Lenny und Jorge für den liebevollen Zuspruch ganz herzlich bedanken. Last but not least bedanke ich mich sehr bei meinem Ehemann Prof. Dr. Danyel Reiche für seine stetige Unterstützung, Motivation und Korrekturlesen.

Ich widme diese Arbeit meinem Sohn Johan-Fabio, der während der Erstellung dieser Arbeit geboren wurde. Johan-Fabio stellte sich bravurös verschiedener Betreuungssituationen in Bolivien, Deutschland, den U.S.A. und dem Libanon, wo mein Mann als Professor tätig ist, und entpuppte sich als unkompliziertes Kind.

Zusammenfassung

Bolivien muss mehr als die Hälfte seines Diesel-Bedarfs (2014 52,7 %) aus Venezuela und Argentinien importieren. Zugleich weist das südamerikanische Land großes Potenzial zur Biokraftstoffgewinnung aus Ölpflanzen wie *Jatropha curcas* (*J. curcas*) auf. Bolivien verfügt über ausreichend Land und geeigneten Boden zum Anbau von Ölpflanzen. Im Inland produzierter Biodiesel kann für das Land eine umweltfreundliche Möglichkeit für eine partielle Deckung seines steigenden Diesel-Bedarfs sein. Insbesondere die Nutzung von fortgeschritten erodierten Böden zum Anbau von *J. curcas* könnte eine gute Möglichkeit für eine nachhaltige Biodieselproduktion in Bolivien bieten. Das Hauptziel der Arbeit liegt daher in der Abschätzung des Anbaupotenzials von *J. curcas* auf erodierten Böden. Als Untersuchungsgebiet (UG) wurde El Gran Chaco im Departamento Santa Cruz in Bolivien ausgewählt. Dort sind rd. 7 Mio. ha Boden fortgeschritten erodiert, dies entspricht 86 % der Gesamtoberfläche des Untersuchungsgebiets. Zur Ermittlung des Anbaupotenzials werden aktuelle klimatische Bedingungen des Untersuchungsgebiets wie niedriger Niederschlag und Dürreanfälligkeit in Bezug auf die Grundbedürfnisse und Eigenschaften der *J. curcas*-Pflanze wie geringer Wasserbedarf, hoher Öl-Gehalt, Dürre-resistenz und Wachstumsfähigkeit auf unfruchtbaren Böden, Anpassungsfähigkeit an klimatische Bedingungen wie Niederschlag und lange Trockenzeiten untersucht. Neben ökologischen werden auch sozioökonomische Kriterien in die Abschätzung des Anbaupotenzials mit einbezogen.

Um der Zielsetzung der Arbeit gerecht zu werden, wurden vier Forschungsfragen formuliert:

Wie groß ist das nutzbare Potenzial von *J. curcas* zur Biodieselproduktion in der bolivianischen Region El Gran Chaco des Departamentos Santa Cruz bei den derzeitigen standörtlichen Bedingungen?

Wie müssen der Anbau von *J. curcas* und die Produktion von Biodiesel aus *J. curcas* gestaltet werden, damit sie ökologisch nachhaltig betrieben und zur Entwicklung der Region beitragen werden?

Welche sozioökonomischen Auswirkungen auf die Untersuchungsregion sind mit dem Anbau von *J. curcas* verbunden?

Welche Handlungsempfehlungen für einen nachhaltigen Anbau von *J. curcas* zur Biodieselproduktion im industriellen Maßstab können für Bolivien nach ökologischen und sozioökonomischen Kriterien gegeben werden?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden Standortkriterien von *J. curcas* (Temperatur, Frostrisiko, jährlicher Niederschlag, Nähe zu Flüssen bzw. Bewässerungsmöglichkeiten, Grundwasser, Hangneigung, Versickerungsrate des Bodens, Überschwemmungsrisiko und Dürregefahr) sowie ökologische Gesichtspunkte (Landbedeckung, erodierte Böden und Schutzgebiete im UG) sowie sozioökonomische Gesichtspunkte (landwirtschaftliche Nutzfläche, Infrastruktur und Nähe zu Siedlungsgebieten im UG) herausgearbeitet. Diese gründen auf einem Grundlagenteil mit der Recherche von Informationen zum *J. curcas*-Anbau und internationalen *J. curcas*-Untersuchungen zu Praxis-Erfahrungen sowie Informationen zum Untersuchungsgebiet basierend auf einer ArcGIS-Datenbank. Eine GIS-Analyse des Gesamtgebietes wird auf Basis der abgeleiteten ökologischen, sozioökonomischen und Standortkriterien durchgeführt. Dabei werden insbesondere die klimatische Faktoren des UG, Auftreten von Naturphänomenen bzw. Extremereignisse (Überschwemmung und Dürregefahr), Vegetationsbedeckung im Hinblick auf die Erosionsgefährdung und Flächennutzung, Anteil landwirtschaftlicher Nutzflächen und erodierter Böden nach ihrem Erosionstyp (Winderosion, Wasser- und Winderosion, Wassererosion) und Erosionsgrad (stark, mittel, leicht und keine Erosion), Flächenumfang, Schutzgebiete, vorhandene Infrastruktur und Siedlungsgebiete berücksichtigt.

Für die GIS-Analyse werden als Bestandteil der ArcGIS Datenbank auch Karten verwendet, die auf Basis technischer Informationen bzw. Grunddaten und digitaler Sachdaten bzw. Geodaten aus einer Studie der bolivianischen Regierung und dem Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen aus dem Jahr 2006 erstellt wurden.

Auf Grund der unterschiedlichen Charakteristiken des Bodens (Erosionstyp und -grad) und einer ungleichen Verteilung auf verschiedene Landgemeinden des UG ist eine Gesamtab schätzung des Anbaupotenzials von *J. curcas* auf erodierten Böden des gesamten Untersuchungsgebietes sehr aufwändig. Daher wird die Landgemeinde Charagua als konkretisiertes UG zur Abschätzung des Anbaupotenzials für *J. curcas* ausgewählt. Sie ist einerseits die größte Landgemeinde des Untersuchungsgebietes (ca. 85 % des UG) und besitzt andererseits den größten Anteil an erodierten Böden (rd. 6 Mio. ha). Für eine erste grobe Auswahl potenzieller Standorte für den *J. curcas*-Anbau wurden

zunächst folgende Faktoren in Betracht gezogen: Zustand des erodierten Bodens (Grad der Erosion), Bewässerungsmöglichkeiten für *J. curcas*-Plantagen sowie Berücksichtigung von Schutzgebieten, Ackerbauflächen und Land für Viehzucht. Dazu werden zwei kleinere Beispielflächen (BF1: 438.337 ha und BF2: 58.504 ha) festgelegt, die verschiedene Teilaspekte des gesamten Untersuchungsgebietes repräsentieren sollen. Die GIS-Analyse und Bewertung der Beispielflächen (BF1 und BF2) werden auf Basis der positiven, neutralen oder negativen Beurteilung der o. g. Kriterien für den möglichen Anbau von *J. curcas* durchgeführt.

Aus der ArcGIS-Analyse ergibt sich die Identifikation von Einschränkungen anhand nicht nur ökologischer, sondern auch sozioökonomischer Auswirkungen des *J. curcas*-Anbaus im industriellen Maßstab und für eine potenzielle Biodieselproduktion im UG. Eine hypothetische Gestaltung des *J. curcas*-Anbaus auf den Beispielflächen basiert auf der generellen Prozesskette (Vermehrung, Anbau, Pflege und Ernte, Transport, Lagerung, Pressung, Umesterung), der Verbindung der sozioökonomischen Auswirkungen des Anbaus von *J. curcas* in der Untersuchungsregion wie die Wirtschaftlichkeit und Produktionskosten von Biodiesel aus *J. curcas*, den Einflussfaktoren Regierung, Bauern bzw. Investoren und Ressourcen (Land und Wasser).

Die Ergebnisse lassen deutlich einschätzen, dass die bolivianische Region El Gran Chaco des Departamentos Santa Cruz aus ökologischer und sozioökonomischer Sicht ein großes nutzbares Potenzial zum Anbau von *J. curcas* zu einer nachhaltigen Biodieselproduktion hat. Diese Nachhaltigkeit basiert insbesondere auf der Nutzung erodierter Böden bei ihren derzeitigen standörtlichen Bedingungen (geringe Niederschläge, trockene Luft, Nährstoffarmut, etc.). Der Anbau von *J. curcas* stellt darüber hinaus eine große Chance für die Verbesserung der Qualität des erodierten Bodens dar. Er kann daher dazu beitragen, das landwirtschaftliche Potenzial der Untersuchungsregion zu erhöhen. Grundsätzlich ist *J. curcas* sehr gut an die klimatischen Bedingungen und den aktuellen ökologischen Zustand des Untersuchungsgebietes angepasst.

Aus den Ergebnissen werden Handlungsempfehlungen für die nationale und regionale Regierung, für Bauern und Investoren zur Ableitung von ökologischen und sozioökonomischen Förderungsstrategien zur Biodieselproduktion aus *J. curcas* im UG entwickelt. Die 22 Handlungsempfehlungen leiten sich dabei sowohl von den identifizierten Auswirkungen des *J. curcas*-Anbaus in Bolivien, als auch von verschiedenen *J. curcas*-Anbau-Erfahrungen weltweit ab.

Für Länder wie Bolivien mit entsprechenden klimatischen Bedingungen, genügend Ackerfläche, geringer Bevölkerungsdichte (Bolivien: 10,3 Einwohner pro km²) und damit ausreichender Flächen-Verfügbarkeit, sowie Anfälligkeit für Krisen wie Nahrungsmittel- und Energieknappheit, kann der Anbau von Biokraftstoffpflanzen ein Beitrag für wirtschaftliches Wachstum sein und regionale Probleme, etwa den steigenden Dieselbedarf teilweise zu decken, lösen helfen. Der Vorteil des *J. curcas*-Anbaus auf erodierten Böden besteht darin, dass keine direkte Konkurrenz zum Lebensmittelanbau besteht und dass die Pflanze heimisch im UG ist. Auch steht der *J. curcas*-Anbau wegen der Toxizität der Pflanze nicht in direkter Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion.

Schlagworte

Biokraftstoffe, Biodiesel, *Jatropha curcas*, Bolivien, erodierte Böden.

Abstract

Bolivia must import more than half of its fuel (52.7 % in 2014) from Venezuela and Argentina. At the same time the South-American country has a large potential for bio-fuel production from oil plants such as *Jatropha curcas* (*J. curcas*). Bolivia possesses sufficient land and suitable soil to cultivate oil plants. Thus, domestically produced biofuel can pose an environmentally friendly alternative for Bolivia's ever increasing fuel demand. The development of *J. curcas* cultivation on Bolivia's highly degraded soils could make sustainable biofuel production possible. The main target of this thesis is to estimate yields for *J. curcas* from degraded soils. El Gran Chaco in the Departamento Santa Cruz was chosen as investigation area as it features around 7m ha vastly degraded land surface, which is about 86% of the total land surface in this area. To determine yield potentials, current climate conditions of the investigation area such low precipitation and drought occurrence were explored in relation to plant demand and characteristics of *Jatropha curcas* namely water requirement, high oil content, drought resistance and growth potential on meager soils, adaptability to low rainfall and long droughts. Apart from ecological criteria socio-economic criteria were included in determining the yield potential.

4 research questions were developed for the research objective:

How big is the utilizable potential of *J. curcas* for biofuel production in the Bolivian region of El Gran Chaco in the Departamento Santa Cruz at the current local conditions?

How does cultivation of *J. curcas* and production of biofuel have to be developed so that they become ecologically sustainable and help advance the region.

Which socio-economic effects will the cultivation of *J. curcas* have on the investigation area?

Which recommended procedures for a sustainable biofuel production from *J. curcas* in Bolivia could be phrased considering ecological and socio-economic criteria?

To answer these questions, site criteria of *J. curcas* (temperature, frost probability, annual rainfall, distance to rivers or irrigation, ground water, gradient, soil percolation rate, flood risk and drought risk) as well as ecological aspects (surface coverage, de-

graded soils, and sanctuaries in the investigation area) and socio-economic considerations (farmland, infrastructure, and distance to settlements in the investigation area) were investigated. Background information are based on research regarding *J. curcas* cultivation and international *J. curcas* studies concerned with practical experience; information about the investigation area draws from an ArcGIS database. A GIS analysis of the entire territory is conducted on the basis of the derived ecological, socio-economic, and site criteria. The climate conditions of the investigation area namely natural phenomena (floods, droughts), vegetation coverage with regard to erosion risk and land utilization, ratio of agricultural land and degraded soils according to their type of erosion (high, medium, low, and no erosion), total area, sanctuaries, existing infrastructure, and settlement area were considered especially.

The GIS analysis is using maps from the ArcGIS database; these maps are based on technical information, digital data and geodata respectively from a 2006 study co-conducted by the Bolivian government and the development program of the United Nations.

Due to different characteristics of the soils (type of erosion and erosion degree) and an uneven allocation to different communities it is very difficult to determine the yield potential of *J. curcas* on degraded soils in the total investigation area. Therefore, the community of Charagua was chosen concretized investigation area to estimate yield potential for *J. curcas*. Charagua is, firstly, the community with the largest land area in the investigation area (about 85% of the investigation area) and, secondly, features the largest part of degraded land (about 6m ha). For a first selection of potential locations for a *J. curcas* cultivation the following aspects were considered: soil status (degree of erosion), irrigation possibilities for *J. curcas* plantations as well as presence of sanctuaries, farmland, and pasture land. For that two smaller mock sites (BF1: 438.337 ha and BF2: 58.504 ha) were chosen to represent different aspects of the total investigation area. The GIS analysis and evaluation of the mock sites (BF1 and BF2) result in a positive, neutral, or negative assessment of the above mentioned criteria with respect to a possible *J. curcas* cultivation.

The ArcGIS analysis identifies not only ecological but also socio-economic effects of an industrial *J. curcas* cultivation that limits a potential biofuel production in the investigation area. The design of a mock *J. curcas* cultivation on BF1 and BF2 is based on the general process chain (reproduction, cultivation, nursing and harvest, transport,

storage, extraction, transesterification), the connection of socio-economic effects of the *J. curcas* cultivation with the investigation area like profitability and production costs of biofuel from *J. curcas*, and other factors such as government, farmers, investors and resources (land and water) respectively.

The research results, considering ecological and socio-economic aspects, suggest that the Bolivian region El Gran Chaco in the Departamento Santa Cruz shows a large utilizable potential for the cultivation of *J. curcas* for a sustainable biofuel production. Sustainability is given due to the utilization of degraded land and current local conditions (low rainfall, very low humidity, low soil nutrients etc). A cultivation of *J. curcas* also enhances the quality of the degraded soil and can thus increase the agricultural potential of the investigation area. *J. curcas* is well adjusted to the climate conditions and current ecological state of the investigation area.

Recommended procedures have been developed from the results of the study for the national and regional governments, for farmers, and investors in order to derive ecological and socio-economic strategies that support biofuel production from *J. curcas* in the investigation area. Those 22 recommended procedures were deduced from the identified effects of a *J. curcas* cultivation in Bolivia as well as from various experiences with the cultivation of *J. curcas* worldwide.

A cultivation of biofuel plants can contribute to economic growth and help to partly solve regional challenges such as growing fuel demand for countries like Bolivia; that means countries with corresponding climate conditions, sufficient agricultural land, scarce population (Bolivia: 10.3 inhabitants/km²) thus enough land, and susceptibility to food and energy shortage. The advantage of a cultivation of *J. curcas* on degraded land lies in the fact that it is an endemic plant and there is no direct competition to food plant cultivation. Also, there is no direct competition to food production as *J. curcas* is toxic.

Keywords

Biofuels, Biodiesel, *Jatropha curcas*, Bolivia, eroded soils.

Inhaltverzeichnis

Zusammenfassung.....	III
Abstract.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	XIV
Tabellenverzeichnis.....	XVI
Abkürzungsverzeichnis.....	XIX
1 Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Problemstellung in Bolivien.....	5
1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen.....	9
1.4 Untersuchungsrahmen	10
1.5 Vorgehen.....	11
2 Grundlagen	18
2.1 <i>Jatropha curcas</i>	18
2.1.1 Eigenschaften	25
2.2 Biodieselproduktion aus <i>Jatropha curcas</i>	34
2.2.1 Anbau	41
2.2.1.1 Vermehrung	42
2.2.1.2 Pflege	46
2.2.1.3 Ernte	51
2.2.2. Trocknung, Transport und Lagerung	52
2.2.3 Ölgewinnung	53
2.2.4 Umesterung	56
2.3 Weitere Nutzungsmöglichkeiten	58

2.4 Standortvoraussetzungen zum Anbau von <i>Jatropha curcas</i> in Bolivien	69
2.4.1 Mögliche Anbaugelände für die <i>Jatropha curcas</i> -Pflanze in Bolivien...	70
2.4.1.1 Untersuchung vom <i>Jatropha curcas</i> -Anbau in der Agrarversuchsstation Saavedra.....	71
3 Bolivien als Fallstudie – Ergebnisse der Situationsanalyse des Untersuchungsgebietes El Gran Chaco in Santa Cruz.....	79
3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes: El Gran Chaco in Santa Cruz	80
3.2 Ökologische und sozioökonomische Probleme	82
3.2.1 Geomorphologie	87
3.2.2 Klima	88
3.2.3 Boden und Erosion im Gran Chaco	88
4 Methodik der Abschätzung des Anbaupotenzials von <i>Jatropha curcas</i> in der bolivianischen Region	97
4.1 Abschätzung des Potenzials zum <i>Jatropha curcas</i> -Anbau auf erodierten Böden im Untersuchungsgebiet für Biodieselproduktion	97
4.1.1 Ableitung von Standortkriterien zum <i>Jatropha curcas</i> -Anbau Sowie von ökologischen und sozioökonomischen Kriterien für die Standortfindung zur Biodieselproduktion.....	97
4.1.2 GIS-Analyse	100
4.1.2.1 GIS-Analyse des Gesamtgebietes	101
4.1.2.2 GIS-Analyse des konkretisierten Untersuchungsgebietes (Charagua).....	105
4.1.3 Analyse und Bewertung der Beispielflächen	105

4.2 Identifikation von Einschränkungen anhand von sozioökonomischer Auswirkungen für den Anbau von <i>Jatropha curcas</i> im industriellen Maßstab und für eine potenzielle Biodieselproduktion im Unter- suchungsgebiet.....	109
5 Darstellung der Ergebnisse	111
5.1 Abschätzung des Potenzials zum <i>Jatropha curcas</i> -Anbau auf erodierten Böden im Untersuchungsgebiet - Ergebnisse der GIS-Analyse zur Erosion.....	111
5.2 Bewertung des Anbaupotenziales der Beispielflächen.....	124
5.2.1 Zusammenfassung der ökologischen Eigenschaften von <i>Jatropha curcas</i> als Basis zur Potenzialabschätzung auf den Beispielflächen.....	124
5.2.2 Anwendung der Bewertungskriterien an den zwei Beispielflächen.....	125
5.2.3 Bedeutung des <i>Jatropha curcas</i> -Anbaus in den Landgemeinden und im Untersuchungsgebiet.....	141
5.3 Optimierung des <i>Jatropha curcas</i> -Anbaus auf den Beispielflächen und im Untersuchungsgebiet.....	144
5.4 Welche sozioökonomischen Auswirkungen auf das Untersuchs- gebiet sind mit dem Anbau von <i>Jatropha curcas</i> verbunden?.....	148
5.5 Identifizierung von Hemmnissen einer Biodieselproduktion aus <i>Jatropha curcas</i> in Bolivien.....	153
6 Diskussion.....	160
6.1 Ergänzende Aspekte zu den Ergebnissen der Arbeit.....	174

7 Welche Handlungsempfehlungen für einen nachhaltigen Anbau von <i>Jatropha curcas</i> zur Biodieselproduktion im industriellen Maßstab können für Bolivien nach ökologischen und sozioökonomischen Kriterien gegeben werden?.....	183
7.1 Handlungsempfehlungen zur Biodieselproduktion aus <i>Jatropha curcas</i> in Bolivien im Allgemeinen.....	184
7.1.1 Handlungsempfehlungen für die nationale Regierung.....	185
7.1.2 Handlungsempfehlungen für die Bauern bzw. Investoren.....	193
7.2 Handlungsempfehlungen für Biodieselproduktion aus <i>Jatropha curcas</i> im Untersuchungsgebiet.....	195
7.2.1 Handlungsempfehlungen für die regionale Regierung.....	196
7.2.2 Handlungsempfehlungen für die Bauern bzw. Investore.....	202
8 Fazit und Ausblick	205
9 Quellenverzeichnis	207
10 Kartenanhang.....	225
Karte 1/10: Übersichtskarte	
Karte 2/10: Erosionsgrad	
Karte 3/10: Erosionstyp	
Karte 4/10: Vegetation	
Karte 5/10: Nutzung	
Karte 6/10: Nutzung und Erosion	
Karte 7/10: Lage der Beispielflächen	
Karte 8/10: Details Beispielfläche 1	
Karte 9/10: Details Beispielfläche 2	
Karte 10/10: Mögliche Anbindung der Beispielflächen an Infrastruktur	