

Quantitative Szenarioanalyse des Einsatzes
erneuerbarer Kraftstoffe im Verkehr bis 2050

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science (M.Sc.)“ im
Masterstudiengang Wirtschaftswissenschaften der Wirtschaftswissenschaftlichen
Fakultät der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Name: Eickenjäger



Vorname: Maria-Isabella



Prüfer: Prof. Dr. M. Breitner

Hannover, den 18. Januar 2012

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	iii
Abkürzungsverzeichnis.....	v
Listingverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	v
1 Einleitung.....	1
1.1 Relevanz und Motivation.....	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit.....	2
2 Theoretische Grundlagen.....	4
2.1 Verkehr.....	4
2.2 Kraftstoffe.....	5
3 Modellformulierung und Datengrundlage.....	16
3.1 Modellformulierung.....	16
3.1.1 Abgrenzung und Annahmen.....	16
3.1.2 Zusammenhänge.....	19
3.1.3 Modell.....	24
3.2 Datengrundlage.....	28
4 Dokumentation des Exceltools.....	45
4.1 Entwicklerdokumentation.....	45
4.2 Benutzerdokumentation.....	51
5 Szenarioanalyse.....	57
5.1 Beschreibung der Schlüssel- und Einflussfaktoren sowie der Szenarien	57
5.2 Ergebnisse der Szenarien.....	64
5.2.1 Ergebnisse des Szenarios 1.....	64
5.2.2 Ergebnisse des Szenarios 2.....	67
5.2.3 Ergebnisse des Szenarios 3.....	72
5.2.4 Ergebnisse des Szenarios 4.....	77
5.2.5 Ergebnisse des Szenarios 5.....	81
5.2.6 Ergebnisse des Szenarios 6.....	85
5.2.7 Ergebnisse des Szenarios 7.....	90
5.2.8 Ergebnisse des Szenarios 8.....	95
5.2.9 Ergebnisse des Szenarios 9.....	100
5.2.10 Ergebnisse des Szenarios 10.....	105

5.2.11	Ergebnisse des Szenarios 11.....	109
5.2.12	Ergebnisse des Szenarios 12.....	115
5.2.13	Ergebnisse des Szenarios 13.....	119
5.2.14	Ergebnisse des Szenarios 14.....	123
5.2.15	Ergebnisse des Szenarios 15.....	128
5.2.16	Ergebnisse des Szenarios 16.....	133
5.3	Vergleich und Interpretation der Szenarien.....	138
6	Kritische Erfolgsfaktoren und Konfliktpotentiale.....	146
6.1	Diskussion des Modells.....	146
6.2	Diskussion des Exceltools.....	150
7	Fazit und Ausblick.....	152
	Literaturverzeichnis.....	vii
	Anhang.....	xix

1 Einleitung

1.1 Relevanz und Motivation

Energie ist seit Beginn der Menschheit essenziell für das Überleben. Dies beginnt bei Feuer zum Wärmen und Kochen in der Steinzeit über Bewegungsenergie von Wasser zum Betrieb von Mühlen ab der Antike bis hin zu elektrischer Energie in der Moderne, die der Menschheit in vielerlei Hinsicht dient. Nachdem das Überleben generell gesichert ist, beeinflusst insbesondere die Verfügbarkeit von Energie die Lebensqualität. Diese nimmt mit steigender Verfügbarkeit der Energieversorgung zu, wie es bspw. durch die Effizienzsteigerungen bei der Erdölförderung im 19. Jahrhundert veranlasst wurde. Allerdings steht die Erdbevölkerung vor verschiedenen Problemen, die im Zusammenhang mit dem schnellen Verbrauch von fossilen Energieträgern entstehen. Diese sind bspw. der aus der Nutzung resultierende Klimawandel, radioaktive Belastung und die steigenden Energiepreise, die aufgrund der Endlichkeit fossiler Energien, des stetig steigenden Energiebedarfs und der daraus resultierenden Steigerung des Energiegewinnungsaufwands, entstehen. Für die Sicherung des Überlebens, auch zukünftiger Generationen und für die Gewährleistung einer hohen Lebensqualität, muss die Energiebereitstellung folgenden Kriterien gerecht werden: Energie muss verfügbar und umweltfreundlich sein, zweckmäßig genutzt und effizient umgewandelt werden.¹ Die Beachtung dieser Kriterien führt zu einem Wandel im Energiesektor, von fossilen zu unbegrenzt zur Verfügung stehenden, regenerativen Energieträgern.²

Einer der größten Energieverbraucher in Deutschland ist der Verkehrssektor, welcher einen Anteil von ca. 30 %³ am Endenergieverbrauch hat. Im Allgemeinen beschreibt der Begriff „Verkehr“ die räumliche Veränderung von Objekten, wie Nachrichten, Güter oder Personen.⁴ In dieser Arbeit bezieht sich der Begriff auf den motorisierten Personen- und Güterverkehr auf den Verkehrswegen Straßen, Trassen, Luftraum und Wasserstraßen. Da der Energiewandel nicht nur aufgrund sinkender öffentlicher Akzeptanz stattfindet, sondern ebenso durch politische Maßnahmen unterstützt wird, stellen sich die Fragen, welcher oder welche erneuerbaren Energieträger eine Energienachfragedeckung ermöglichen, sodass, wie in Abbildung 1 dargestellt, ein nachhaltiger Wandel erfolgt. Dies

¹ Vgl. Nitsch (2004), S. 4 f.

² Vgl. Graßl et al. (2003), S. 14 f.

³ Vgl. Radke (2011), S. 296 f.

⁴ Vgl. Ammoser und Hoppe (2006), S. 21.

wird im Verkehrssektor ermöglicht, in dem die Emissionen der Kraftstoffbereitstellung und -nutzung sinken. Gleichzeitig erfolgt eine Verbesserung des Umweltschutzes, die Nutzung der Kraftstoffe erfolgt ökonomisch, bspw. durch kostengünstige Kraftstoffe, Effizienzgewinne der Fahrzeuge und Kompatibilität der erneuerbaren Kraftstoffe mit vorhandenen Motoren sowie der Sicherung der Versorgung mit Kraftstoffen, Gewährleistung der mittel- und langfristigen Erzeugung unbegrenzter regenerativer Kraftstoffe.

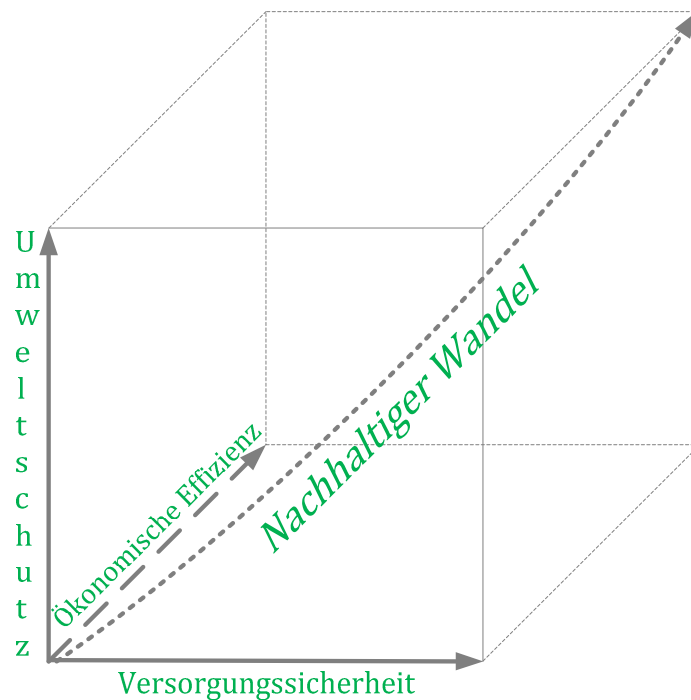


Abbildung 1: Anforderungsentwicklung
Quelle: Eigene Darstellung.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, im Rahmen einer Szenarioanalyse zu untersuchen, wie der Verbrauch fossiler Energie im Verkehrssektor, in Höhe von etwa 706 TWh⁵, bis zum Jahr 2050 durch erneuerbare Energieträger ersetzt werden kann. Hierfür erfolgt die Betrachtung verschiedener erneuerbarer Kraftstoffe sowie der Auswirkungen von politischen Maßnahmen auf den Austausch von fossilen durch eben diese erneuerbaren Kraftstoffe.

Nachdem im **Kapitel 1** die Relevanz und Motivation der Arbeit sowie die Zielsetzung beschrieben wurden, erläutert **Kapitel 2** die Grundlagen des Verkehrssektors und be-

⁵ Vgl. Radke (2011), S. 297.

schreibt die Zusammensetzung des Verkehrs in Deutschland. Ferner findet eine Einführung in die diversen Kraftstoffe bzw. Energieträger statt, die für den Verkehrssektor genutzt werden können und die zum Teil näher in dieser Arbeit betrachtet werden. In dem **Kapitel 3** erfolgt die Vorstellung des Modells zur Simulation der Auswirkung von Einflussfaktoren auf den Kraftstoffmarkt sowie der bei der Erstellung getroffenen Annahmen. Hierfür werden die qualitativen und quantitativen Zusammenhänge erläutert. Zusätzlich erfolgt die Schilderung der Daten sowie deren Gewinnung. Um eine differenzierte Szenarioanalyse auf Grundlage veränderter politischer Rahmenbedingungen abzubilden, erfolgt die Implementierung des Modells in einer Excel-Datei. Zusätzlich stellt diese Datei eine Benutzeroberfläche zur Verfügung, mit der der Nutzer die Auswirkung diverser politischer Vorgaben simulieren kann. Daher wird in **Kapitel 4** die Excel-Datei vorgestellt. Hierfür erfolgt zunächst in Kapitel 4.1 die Vorstellung des Inhalts der einzelnen Tabellenblätter und die nähere Beschreibung wichtiger Stellen des implementierten Visual Basic for Applications (VBA)-Quelltextes. Diese werden zum einen für die Umsetzung des Modells und zum anderen für die Implementierung der Benutzeroberfläche benötigt. Folgend erläutert Kapitel 4.2 die Bedienung der Benutzeroberfläche. Das **Kapitel 5** stellt die unterschiedlichen Szenarien vor, die sich durch diverse, dort ausführlicher erläuterte, Eingaben auf der Benutzeroberfläche ergeben. Hierbei erfolgen außerdem Interpretationen, die Rückschlüsse auf die Realität erlauben. In dem **Kapitel 6** erfolgt die kritische Betrachtung und Bewertung des in Kapitel 3 aufgestellten Modells und des in Kapitel 4 beschriebenen Exceltools. Zusätzlich werden die Grenzen des Modells aufgezeigt. Das Fazit in **Kapitel 7** gibt eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit, eine Handlungsempfehlung und schließt mit einem Ausblick.

7 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Möglichkeit der zukünftigen Substitution fossiler Kraftstoffe durch den Einsatz von erneuerbaren Energieträgern im Verkehrssektor mithilfe einer Szenarioanalyse zu untersuchen. Hierfür wurde zunächst eine Grundlage, durch die Beschreibung der Ist-Situation des Verkehrssektors sowie der fossilen Kraftstoffe und deren erneuerbarer Substitute, geschaffen. Weiterhin erfolgte die Formulierung eines Modells und dessen Implementierung in Excel um diverse Szenarien zu simulieren.

Die Ergebnisse der Simulation decken sich mit den Tendenzen der Literatur⁵² und zeigen, dass es generell möglich ist, den Anteil der erneuerbaren Energieträger am Gesamtverbrauch bis zum Jahr 2050 auf 100 % zu erhöhen. In den Szenarien erfolgt insbesondere die Verwendung von Biodiesel und Strom aus erneuerbaren Energiequellen. Weiterhin zeigen die Ergebnisse der Simulation, dass der Gesamtenergiebedarf des deutschen Verkehrssektors sinkt. Dieses wird zum einen erreicht durch eine sinkende Bevölkerungszahl, bei konstanter Mobilitätspräferenz und zum anderen durch effizienter konzipierte Fahrzeuge. Weiterhin verdeutlichen die Szenarien aber auch, dass es nötig ist, die Substitution der fossilen Kraftstoffe durch Biokraftstoffe sowie regenerativ erzeugten Strom mithilfe von politischen Maßnahmen zu unterstützen, um eine effiziente Grundlage für einen nachhaltigen Wandel zu bilden. Besonders erfolgversprechend ist hierbei, wie die Szenarien 9 und 10 zeigen, die geringere, langfristig wirkende Reduktion der Höhe der Energiesteuerbefreiung bei gleichzeitiger Einführung einer Strafsteuer. Diese wird auf den Ausstoß von Emissionen erhoben, die durch die Kraftstoffbereitstellung und -nutzung entstehen. Obwohl die Ergebnisse der Szenarien mit einer hohen Strafsteuer besser ausfallen, sollte diese dennoch nicht zu hoch gewählt werden, um einen langsamen Übergang zu vollziehen, bei dem die Bevölkerung und die Unternehmen nicht zu stark unter ökonomischen Druck gesetzt werden. Des Weiteren sind die Simulationsergebnisse besser, in denen die Importe nicht beschränkt wurden. Jedoch sollte auch hierbei beachtet werden, dass die Kraftstoffimporte nicht zum Nachteil der eigenen Produktionskapazitäten und damit erneut zu einer Abhängigkeit von den Exportländern führen. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass in diesen Ländern der Anbau der Kraftstoffrohstoffe zu Landnutzungsänderungen oder Raubbau führt und

⁵² Vgl. hierzu: Benignus (2010), Klaus et al. (2010), Nitsch et al. (2010) und Schmid et al. (2010).

somit der globale Umweltschutz nicht gewährleistet werden kann. Ergänzend ist daher empfehlenswert die Biokerosinproduktion aus heimischen Pflanzen auf ihre Umsetzbarkeit zu überprüfen und gegebenenfalls durchzuführen.

Des Weiteren ist es sinnvoll, die vom Staat gestellten finanziellen Mittel abhängig von den Kraftstoffeigenschaften und -voraussetzungen zu verteilen. Dies könnte zu einer stärkeren Förderung von Kraftstoffen führen, die bspw. flächeneffizienter oder mit vorhandenen Fahrzeugmotoren kompatibel sind. Hieraus folgt eine Zunahme der Kapazität und der Verbraucherakzeptanz, sodass schnellstmöglich die Substitution von fossilen mit erneuerbaren Kraftstoffen erfolgt. Ein Beispiel für die Kapazitätzunahme ist die Erschließung von zusätzlichen Rohstoffkapazitäten, bspw. durch die Erweiterung der Gülleenutzung oder durch von Tieren ausgestoßenes Methan. Dadurch wird zusätzlich der Entstehung von Konkurrenz mit der Lebensmittelindustrie entgegengewirkt. Dennoch sollten die Förderungsmaßnahmen, die eine Auswahl an Alternativen berücksichtigen, der Fokussierung auf einen Kraftstoff vorgezogen werden. Die Gründe hierfür sind zum einen die Möglichkeit auf exogene Einflüsse zu reagieren und zum anderen Abhängigkeiten, wie zuvor beschrieben, zu vermeiden. Zudem ist es zweckmäßig, die regenerative Kraftstoffproduktion, insbesondere die reststoffbasierte, effizienter zu gestalten. Ferner sollte an der Effizienzsteigerung von Fahrzeugen gearbeitet werden. Durch Reduzierung des Fahrzeuggewichts oder Energierückgewinnungsmaßnahmen werden zusätzliche Energieeinspareffekte bewirkt.

Obwohl es möglich ist, die Ergebnisse der Szenarien auf Kraftstoffe mit ähnlichen Eigenschaften und Voraussetzungen zu übertragen, sollte bei der Betrachtung der Szenarien generell beachtet werden, dass sich das Modell auf den deutschen Kraftstoffmarkt bezieht. Abweichende Faktoren, wie bspw. Bevölkerungszahlen oder Flächenkapazitäten, verhindern, die Szenarien ohne Angleichung für andere Länder zu übernehmen. Zudem ist es für weitere Simulationen notwendig die Daten zu pflegen, um fundierte Ergebnisse zu gewährleisten. So war es zum Zeitpunkt der Simulation nicht möglich diverse Parameter valide zu belegen. Bezeichnend hierfür ist die Entwicklung der Produktionskapazität für regenerative Kraftstoffe, deren Produktionsanlagen sich derzeit noch in der Test- und Entwicklungsphase befinden. Für diese liegen noch keine validen Daten vor, da noch keine standardisierte Produktion erfolgt.

Diese Ausführungen, wie auch jene in Kapitel 6.1, bilden die Grundlage in einem weiteren Schritt das Modell sowie das Exceltool zu erweitern. So könnten weitere Kraftstoffe und Konkurrenzfaktoren, aber auch geänderte Herstellungsverfahren, in Zukunft zu abweichenden Ergebnissen führen.