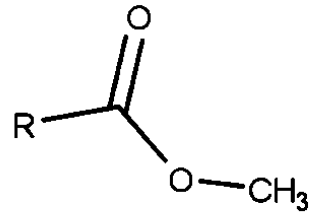


Synthese von Biodiesel aus Frittieröl



Mia Schweizer

Maturaarbeit im Fach Chemie

Kantonsschule Reussbühl Luzern

Oktober 2023

Betreuerin: Heidrun Schüssler



Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Theorie.....	2
2.1	Biodiesel aus Rapsöl.....	2
2.1.1	Rapsöl.....	2
2.1.2	Industrielle Biodieselherstellung.....	2
2.2	Umesterung.....	3
2.2.1	Basenkatalysierte Umesterung.....	3
2.2.2	Säurekatalysierte Umesterung.....	5
3	Material.....	7
4	Methoden.....	8
4.1	Synthese unter Rückfluss.....	8
4.2	Reinigungsverfahren.....	8
4.2.1	Extraktion mit Scheidetrichter.....	8
4.2.2	Trocknung.....	8
4.2.3	Abnutschen.....	9
4.3	Analysemethoden.....	9
4.3.1	Refraktometrie.....	9
4.3.2	Dichtebestimmung.....	9
4.3.3	Dünnschichtchromatografie.....	9
4.3.4	IR-Spektroskopie.....	10
5	Versuche und Messungen.....	11
5.1	Umesterung und Reinigung.....	11
5.2	Analyse.....	12
6	Resultate.....	14
6.1	Übersicht der Messdaten.....	14
6.2	Dünnschichtchromatographie.....	14
6.3	FTIR.....	15
7	Diskussion.....	18
7.1	Auswertung der Messdaten.....	18
7.2	Auswertung der Dünnschichtchromatographie.....	18

7.3	Vergleich der FTIR-Spektrogramme	19
7.4	Verbesserungsmöglichkeiten und Vergleich der Syntheserfolge	20
8	Reflexion	23
9	Zusammenfassung	24
10	Danksagung	25
11	Quellenverzeichnis	26
12	Abbildungsverzeichnis	28
13	Deklaration	29

1 Einleitung

«Benzin» und «Diesel» sind in der heutigen Zeit Begriffe, die nicht zuletzt durch die zunehmende Popularität von Elektroautos in den Köpfen vieler Menschen einen negativen Beiklang erhalten haben. Als fossil gewonnene Kraftstoffe nehmen die besagten Treibstoffe ein nicht kleinzuredendes Kapitel in der Klimawandeldiskussion ein und durch die zunehmende Sensibilisierung für Umweltschutz rücken nachhaltigere Kraftstoffe wie der Biodiesel mehr und mehr in den Fokus. Biodiesel erweist sich nicht nur als vielversprechende Alternative für Diesel, sondern lässt sich zudem im Schülerlabor synthetisieren, wodurch seine Herstellung im Rahmen einer Maturaarbeit realisiert werden konnte.

Meine Maturaarbeit einem Thema zu widmen, welches aktuelle Bezüge aufweist, war mir von Anfang an wichtig. Die Suche eines geeigneten Thema stellte sich jedoch als schwierig heraus, da viele meiner Ideen im Schülerlabor nicht verwirklicht werden konnten. Frau Schüsslers Idee Biodiesel herzustellen, schien daher als eine Thematik, die aktuelle Bezüge versprach und auch meine Neugier weckte, perfekt zu sein. Schritt für Schritt entwickelte sich das Thema meiner Maturaarbeit: Die säurekatalysierte und basenkatalysierte Synthese von Biodiesel aus Frittieröl.

Im Theoriekapitel der Arbeit gehe ich auf Biodiesel im Allgemeinen ein, wobei Rapsöl und die industrielle Biodieselherstellung im Zentrum stehen. Zudem wird die Theorie der Umesterung erläutert, wobei die Reaktionsmechanismen der basenkatalysierten und säurekatalysierten Umesterung getrennt anhand von MarvinSketch-Zeichnungen veranschaulicht werden.

Das Kapitel *Material* nennt die Herkunft des Frittieröls und des Biodiesels, den ich als Vergleichsstandard einsetzte.

Im Methodenteil der Arbeit werde ich die Synthesemethode, die Reinigungs- und Analyseverfahren aufgreifen.

Versuche und Messungen dient der Beschreibung des praktischen Teils der Arbeit, wobei ich die FTIR-Spektroskopie als Teil des Berzelius Projekts im Labor der PH St. Gallen durchführen durfte.

Das Kapitel *Resultate* enthält die Messdaten und Ergebnisse der Analyse, wobei diese in Form einer Tabelle bzw. in Form von Fotos und Spektrogrammen ersichtlich sind.

Im Diskussionsteil werde ich die Resultate der Analyse auswerten, interpretieren, sowie die Syntheseerfolge vergleichen und Verbesserungsmöglichkeiten darlegen.

2 Theorie

Im Theorieteil wird in einem ersten Schritt auf den Biodiesel im Allgemeinen kurz eingegangen und im spezifischen auf Rapsöl und die industrielle Biodieselherstellung. Danach folgt das Kapitel *Umesterung*, in welchem die Reaktionsmechanismen der säure- und basenkatalysierten Biodieselsynthesen beleuchtet werden.

2.1 Biodiesel aus Rapsöl

Als Kraftstoff, welcher aus pflanzlichen und tierischen Ölen oder Fetten hergestellt wird, dient der Biodiesel als nachhaltigere Alternative und Ergänzung zu fossilem Diesel. Er ist erneuerbar, biologisch abbaubar und zudem beinahe schwefelfrei. Die Synthese dieses flüssigen Fettsäuremethylesters findet über die Umesterung statt, deren Prozess neben einem Fett oder Öl, einen Alkohol und einen Katalysator erfordert. Als Alkohol wird oft Ethanol oder Methanol verwendet und in Europa ist der Gebrauch von Rapsöl am häufigsten. [1]

2.1.1 Rapsöl

Wie alle Pflanzenöle und Fette setzt sich das Rapsöl aus drei mit Glycerin veresterten Fettsäuren zusammen, sogenannte «Triglyzeride» (Abb.1). Bei Glycerin handelt es sich um einen dreiwertigen Alkohol, während Fettsäuren Carbonsäuren sind: Kohlenstoffketten mit einer in diesem Fall geraden Anzahl an Kohlenstoffatomen und einer Carboxylgruppe.

Grundsätzlich sind ungesättigte Fettsäuren von gesättigten Fettsäuren unterscheidbar, wobei gesättigte Fettsäuren keine Doppelbindung zwischen den Kohlenstoffatomen aufweisen, während einfach und mehrfach ungesättigte Fettsäuren eine oder mehrere Doppelbindungen zwischen den Kohlenstoffatomen besitzen. Bei den Fettsäuren des Rapsöls handelt es sich zu 50-65% um Ölsäure (einfach ungesättigt), zu 15-30% um Linolsäure (zweifach ungesättigt) und zu 5-13% um Linolensäure (dreifach ungesättigt). [2]

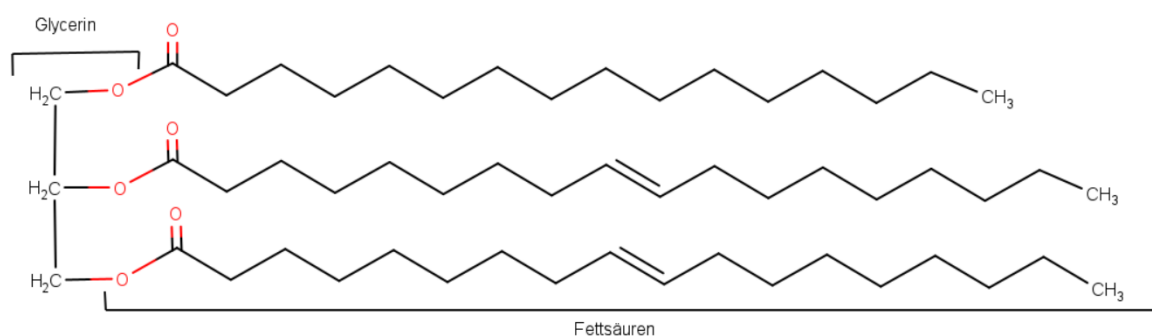


Abbildung 1 Beispiel eines Triglyzerids

2.1.2 Industrielle Biodieselherstellung

Das erste industrielle Biodieselherstellungsverfahren wurde 1977 entwickelt und in den 1990er Jahren wurden in Europa zunehmend kommerzielle Biodieselproduktionsanlagen gebaut. Heute, 33 Jahre später, hat sich das Verfahren der Biodieselherstellung auf der ganzen Welt verbreitet und unterscheidet sich in erster Linie in der Art des benutzten Pflanzenöls, das meist vom Herkunftsland der Firma abhängt. In Nordamerika wird beispielsweise oft Sojaöl benutzt,

während in Asien Palmöl eine beliebte Fettquelle ist. Der Prozess der Biodieselproduktion selbst erfolgt am Beispiel des Rapses kurzgefasst in vier Schritten: In einer Ölmühle wird Öl aus dem geernteten Raps gewonnen, im Rührkessel findet die Umesterung selbst statt, im Absetztank erfolgt die Gewinnung des Roh-Biodiesels sowie die Trennung von Nebenprodukten und der Wäscher dient durch verschiedene Reinigungsprozesse dem Entfernen überschüssigen Methanols. Der fertige Biodiesel wird danach entweder direkt als reiner Biokraftstoff oder in einem Gemisch mit fossilem Diesel an der Tankstelle angeboten oder in grossen Tanks gelagert. [1], [3], [4]

Die Recycling Energy AG ist eine der Biodieselproduzenten der Schweiz, die neben Ökostrom und Biogas den Biokraftstoff aus altem Frittieröl gewinnt, welches aus Rapsöl hergestellt wurde [5]. Der Biodiesel aus dieser Firma wird in dieser Arbeit als Versuchsstandard benutzt.

2.2 Umesterung

Bei der Umesterung handelt es sich um eine Gleichgewichtsreaktion, in welcher ein Ester in einen anderen überführt wird. Im Falle der Biodieselsynthese findet eine Umesterung der Fettsäuren des Frittieröls mittels Methanol in Fettsäuremethylester statt. Bei zwei Syntheseanläufen diente in dieser Arbeit die in Quelle [6] als möglicher Säurekatalysator aufgeführte Methansulfonsäure, in einem Syntheseanlauf das Natriumhydroxid. Diese zwei verschiedenen Katalysatoren gehen ebenfalls mit unterschiedlichen Reaktionsmechanismen einher, welche in den folgenden zwei Unterkapiteln vorgestellt werden. [2]

2.2.1 Basenkatalysierte Umesterung

In diesem Abschnitt wird der Umesterungs-Reaktionsmechanismus mit dem NaOH-Katalysator genauer erklärt. Als Quelle diente die Versuchsvorschrift von Prof. Dr. F. Vogel [2].

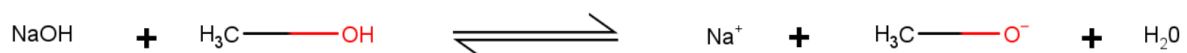


Abbildung 2 Reaktion zwischen Methanol und Katalysator

Die erste Reaktion findet zwischen dem Katalysator NaOH und dem Methanol statt. Das Sauerstoffatom des Methanols wird deprotoniert und das vom NaOH abgespaltene Hydroxidion bildet zusammen mit dem H⁺ Wasser. Natriumkationen entstehen und Methanolat-Anionen bilden das Zwischenprodukt der Reaktion. (Abb.2)

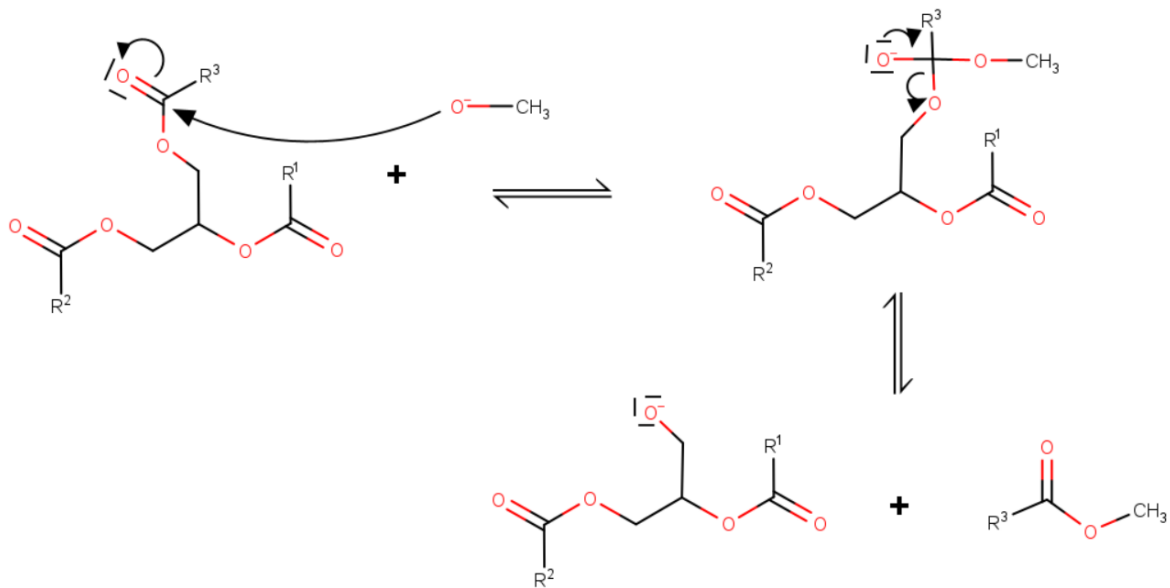


Abbildung 3 Nukleophiler Angriff des Methanolat-Anions und Eliminierung eines Methylesters

Wird nun die entstandene Mischung zum Rapsöl gegeben, findet ein nukleophiler Angriff des Methanolat-Anions jeweils bei der Estergruppe der Fettsäuren an das Carbonyl-Kohlenstoffatom statt. Das entstandene Produkt ist instabil. Es folgt die Eliminierung eines Methylesters. (Abb.3)

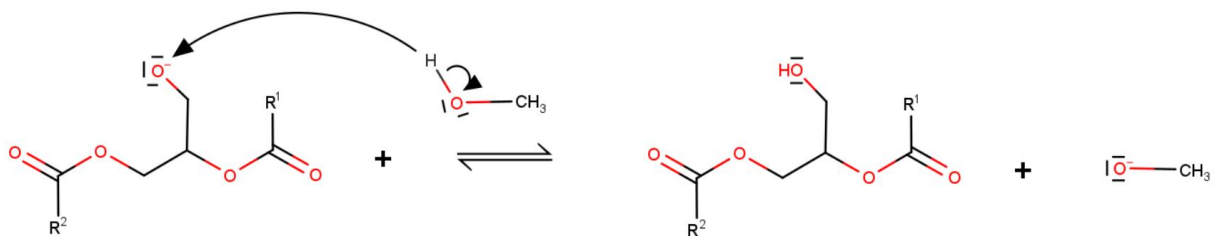


Abbildung 4 Protonen Übertragung mit Diglyzerid und Methanolat-Anion als entstandene Zwischenprodukte

In einem nächsten Schritt kommt es zu einer Protonen Übertragung vom Methanol zum negativ geladenen Sauerstoffatom, wobei dies die Entstehung eines neuen Methanolat-Anions zur Folge hat. (Abb.4)

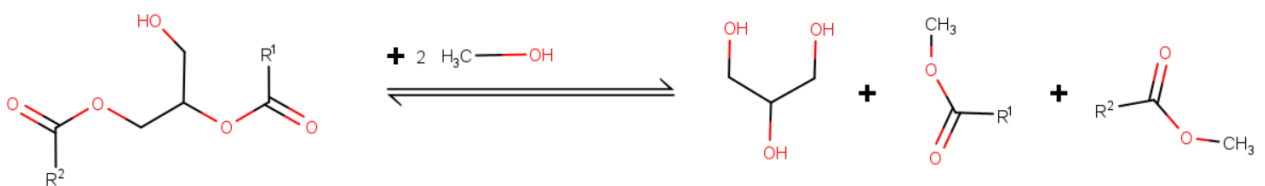


Abbildung 5 Umesterung der restlichen zwei Fettsäuren

Die Umesterung findet ebenfalls bei den anderen zwei Fettsäureresten statt. Methylester und Glycerin entstehen. (Abb.5)

2.2.2 Säurekatalysierte Umesterung

Für die Erläuterung der durch Methansulfonsäure katalysierten Umesterungs-Reaktion in diesem Abschnitt diente in Ermangelung einer ausführlichen Beschreibung des Reaktionsmechanismus der säurekatalysierten Umesterung das YouTube-Video «Saure Esterhydrolyse» von Mr. Sander als Quelle. Dieses Video wurde gewählt, weil die säurekatalysierte Umesterung nach dem gleichen Mechanismus wie die Esterhydrolyse erfolgt. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass der Alkohol an Stelle von Wasser am Carbokation angreift und als Produkt keine Carbonsäure, sondern ein neuer Ester entsteht.

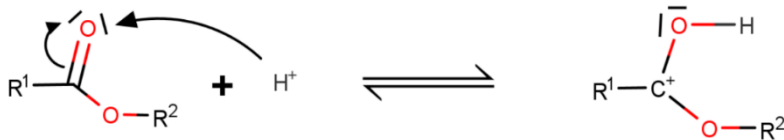


Abbildung 6 Protonierung des Carbonylsauerstoffatoms

In einem ersten Schritt kommt es durch die Methansulfonsäure zur Protonierung des Carbonylsauerstoffatoms des Rapsöls, was zur Bildung eines Carbokations führt. (Abb.6)

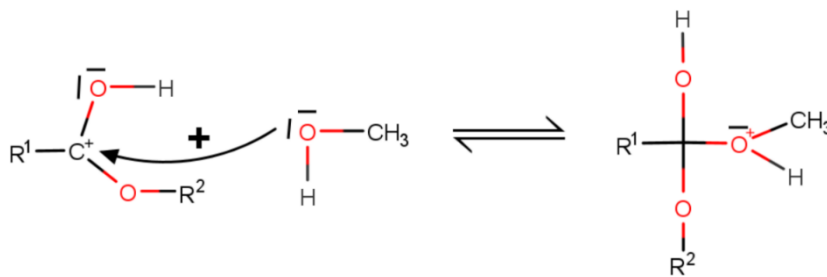


Abbildung 7 Nukleophiler Angriff des Methanols

Anschließend geschieht ein nukleophiler Angriff des Methanols an das positiv geladene Kohlenstoffatom. Das Produkt ist ein Oxoniumion. (Abb.7)

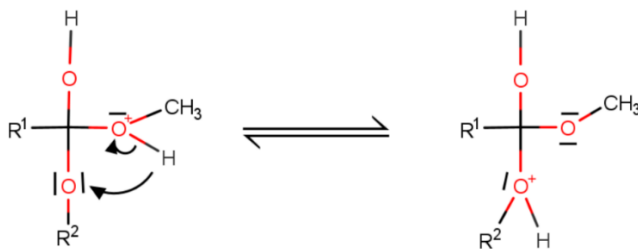


Abbildung 8 Intramolekulare Protonenwanderung

Die im nächsten Schritt erfolgende intramolekulare Protonenwanderung führt zur Entstehung eines neuen Oxoniumions. (Abb.8)

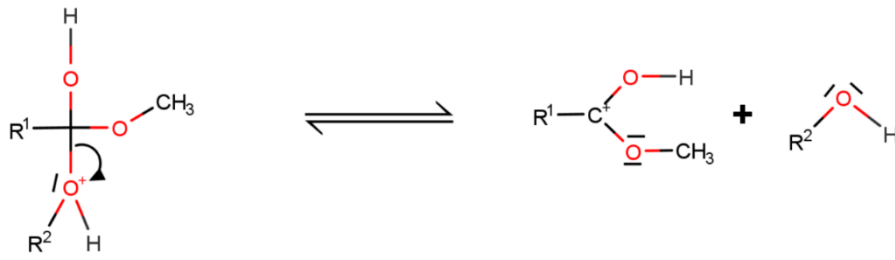


Abbildung 9 Eliminierung eines Alkoholmoleküls

Nun erfolgt die Abspaltung eines Alkoholmoleküls. (Abb.9)

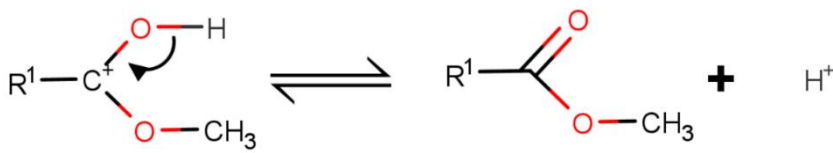


Abbildung 10 Deprotonierung

Der letzte Schritt besteht aus der Deprotonierung des protonierten Moleküls und so der Bildung des Fettsäuremethylesters.

3 Material

Dieser kurze Abschnitt dient der Vorstellung der Materialien, welche nicht bereits im Schülerlabor vorhanden waren oder einfach bestellt werden konnten.

Das für diese Arbeit gebrauchte Frittieröl stammte aus der Mensa der Kantonsschule Reussbühl und besteht aus Rapsöl. Vor dem Gebrauch für die Biodieselsynthese wurde das Frittieröl mit einem 300 µm Sieb gereinigt (Abb.11). Als Vergleichsstandard für die Analysemethoden und Reinheitsuntersuchungen diente, wie bereits oben erwähnt, der Biodiesel der Recycling Energy AG. Die Firma bezieht unter anderem Frittieröl für ihre Biodieselproduktion von der Mensa der KSR. Für die Herstellung des Standards benutzte die Firma ebenfalls Natronlauge.



Abbildung 11 Reinigung des Frittieröls mit Sieb

4 Methoden

4.1 Synthese unter Rückfluss

Die im folgenden Abschnitt vorgestellte Synthesemethode wurde bei der säurekatalysierten als auch bei der basenkatalysierten Synthese verwendet.

Die Synthese unter Rückfluss basiert auf der Erwärmung von Reaktionsgemischen in Lösungsmitteln mit Hilfe eines Wasserbades. Da viele chemischen Reaktionen am Siedepunkt des Lösungsmittels durchgeführt werden, ist ein Rückflusssystem nötig, das den Verlust an Lösungsmittel verhindert.

Als ein solches Rückflusssystem dient ein Rückflusskühler. Senkrecht auf das Reaktionsgefäß aufgesetzt, wird im Rückflusskühler das verdampfte Lösungsmittel aufgefangen. Kühlflächen – eine Glasröhre, durch die meist Leitungswasser fließt – führen zum Kondensieren der Lösungsmitteldämpfe, welche dann in das Reaktionsgemisch zurücktropfen. [7] (Abb.12)



Abbildung 12 Synthese unter Rückfluss

4.2 Reinigungsverfahren

Anschließend folgen drei Methoden zur Reinigung des synthetisierten Biodiesels.

4.2.1 Extraktion mit Scheidetrichter

Der Scheidetrichter dient grundsätzlich der Trennung zweier nichtmischbarer Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte. In einem Scheidetrichter kann die unten im Glasgefäß angesammelte Flüssigkeit der höheren Dichte über einen Hahn in ein anderes Gefäß abgelassen werden. [8]

Im Zuge einer Extraktion mit dem Scheidetrichter (Abb.13) wird nun ein Stoff aus einer Lösung X extrahiert, indem ein Lösungsmittel hinzugegeben wird, welches den zu extrahierenden Stoff besser löst als die Lösung X und mit Lösung X nicht mischbar ist. Das Lösungsmittel mit dem gelösten, zu extrahierenden Stoff und die Lösung X bilden nach dem Ausschütteln und anschließenden Stehenlassen im Scheidetrichter zwei Phasen, welche getrennt werden können. [9]



Abbildung 13 Scheidetrichter

4.2.2 Trocknung

Von einer Trocknung wird bei einem Entzug von Flüssigkeiten aus einem Stoff gesprochen. Diese Flüssigkeit ist meist Wasser [10].

Für den Wasserentzug wurde in dieser Arbeit das neutrale Trocknungsmittel Natriumsulfat verwendet, welches eine hohe Wasserkapazität aufweist [11].

4.2.3 Abnutschen

Das Grundprinzip des Abnutschens ist die Trennung einer Suspension durch Unterdruck. Die Nutsche (Abb.14) ist ein Trichter mit flachem Boden und kleinen Öffnungen, welcher beim Abnutschen mit einem Filterpapier bedeckt ist. Zu diesem Büchnertrichter wird ebenfalls eine Membran- oder Wasserstrahlpumpe benötigt. Im Zuge des Abnutschens wird die Suspension in die Nutsche gegeben und mit der Pumpe der benötigte Unterdruck erzeugt. Auf dem Filterpapier bleibt der Feststoff als Filterkuchen zurück und im Auffanggefäß das flüssige Filtrat. [12]



Abbildung 14 Nutsche

In dieser Arbeit wurde die Nutsche verwendet, damit nach der Trocknung das Natriumsulfat aus dem Produkt zu entfernt werden konnte.

4.3 Analysemethoden

Im folgenden Abschnitt werden die Analysemethoden zur Untersuchung der Reinheit und Beschaffenheit der Syntheseprodukte aufgeführt.

4.3.1 Refraktometrie

Die Refraktometrie ist eine Messmethode zur Bestimmung der Brechungszahl eines Stoffes. Sie beruht auf den unterschiedlichen Geschwindigkeiten monochromatischen Lichtes in verschiedenen Medien und der aus dem Übergang des Lichtes von einem Medium zum anderen resultierenden Brechung des Lichtes. In einem Refraktometer ist dieses erste Medium ein Messprisma mit bekanntem Brechungsindex.



Abbildung 15 Refraktometer

Der Refraktometer (Abb.15) dient unter anderem der Identifizierung und Reinheitsprüfung von Stoffen. [13], [14]

4.3.2 Dichtebestimmung

Die Dichte als erster Vergleichspunkt zwischen dem synthetisierten Produkt und dem Referenzprodukt wird mit dem Pyknometer bestimmt, einem Gefäß, welches eine exakte Volumenmessung zulässt und dessen Gewicht im Voraus bestimmt wird.

4.3.3 Dünnschichtchromatografie

Die DC (Dünnschichtchromatografie) ist ein physikalisch-chemisches Trennverfahren, welches zur Analyse eines Stoffes bezüglich Reinheit und Zusammensetzung verwendet wird.

Auf eine stationäre Phase (meist eine Kieselgelplatte) wird das zu analysierende Stoffgemisch aufgetragen und in eine DC-Kammer gestellt. In dieser befindet sich die mobile Phase, ein sogenanntes Laufmittel. Das Laufmittel steigt durch die Kapillarkräfte die stationäre Phase nach oben. Während dieses Prozesses lösen sich die verschiedenen Bestandteile des Stoffgemisches unterschiedlich gut in der mobilen Phase und werden unterschiedlich weit die stationäre Phase

hochgetragen. Die Löslichkeit der verschiedenen Bestandteile des Stoffgemisches in der mobilen Phase hängt von der Polarität der mobilen Phase, der stationären Phase und der Bestandteile selbst ab, wobei das Prinzip gilt: Unpolares löst sich gut in Unpolarem und Polares gut in Polarem.

Unter dem UV-Licht oder durch Hilfschemikalien können diese Bestandteile des Stoffgemisches auf der stationären Phase sichtbar gemacht werden. Der Retentionsfaktor eines Bestandteils kann im Vergleich mit Literaturwerten zur Identifikation dieser Komponente herangezogen werden. Beim Retentionsfaktor handelt es sich um den Quotienten aus der Laufstrecke einer Komponente zur Laufstrecke des Fließmittels. Ein Co-Chromatogramm, bei dem neben dem zu untersuchenden Stoffgemisch vermutete Reinstoffe aufgetragen werden, erleichtert die Stoffidentifikation und umgeht die Berechnung eines R_f -Wertes durch einen direkten Laufstreckenvergleich. Allfällige Unreinheiten in einem Syntheseprodukt können so schnell ausgelotet werden. [15], [16]

4.3.4 IR-Spektroskopie

Als Analysemethode zur Identifikation und Reinheitsbestimmung eines Stoffes dient die IR-Spektroskopie der Deutung struktureller Charakteristika eines Stoffes, genauer der Ermittlung von funktionellen Gruppen. Das Bestrahlen einer Probe mit Infrarotstrahlung führt durch die Energie des absorbierten Lichtes zu Schwingungen der Bindungslängen und Bindungswinkel. Das transmittierte Licht wird von einem Detektor gemessen und mit Hilfe der Erfassung des prozentualen Anteils des transmittierten Lichts am eingestrahlten Licht in einem Spektrum sind Rückschlüsse auf die funktionellen Gruppen des Moleküls möglich. [17], [18]

Beim in dieser Arbeit verwendeten FTIR-Spektrometer (Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer) (Abb.16) erfolgt im Gegensatz zu anderen IR-Spektrometern die Analyse nicht durch die sequentielle Bestrahlung isolierter Wellenlängen, stattdessen ist die Analyse aller IR-Wellenlängen in einer Messung möglich. Dies führt zu einer Beschleunigung des Prozesses. Hauptbestandteil eines FTIR ist ein Michelson-Interferometer, dieses besteht aus einem Spiegelsystem und funktioniert wie folgt: Der Infrarotstrahl trifft auf den Strahlteiler und wird aufgespalten, der eine abgespaltene Einzelstrahl trifft auf einen festen Spiegel und wird reflektiert, der andere Einzelstrahl trifft auf einen beweglichen Spiegel, die beiden Strahlen werden zusammengeführt, detektiert und ein Interferogramm wird erstellt. Die Fourier-Transformation führt zur Darstellung dieses Interferogramms als Einkanal-IR-Spektrum. [19], [20]



Abbildung 16 FTIR-Spektrometer

5 Versuche und Messungen

In diesem Kapitel wird die Synthese, Reinigung und Analyse des Biodiesels beschrieben. Wie bereits im Kapitel *Umesterung* angesprochen wurden in dieser Arbeit zwei Synthesen mit Säure als Katalysator durchgeführt und eine Synthese mit Basenkatalysator.

5.1 Umesterung und Reinigung

Zur verbesserten Übersicht werden zuerst das Verfahren der Umesterung, also die Syntheseschritte, wie auch die Reinigung kurz beschrieben, und danach in Form einer Tabelle die für den jeweiligen Syntheseansatz spezifischen Angaben aufgeführt (Tbl.1).

Angelehnt ist die Synthese unter Rückfluss an Anleitung [2]. Veränderungen wurden unter anderem an den Edukten vorgenommen wurden, wobei bei den säurekatalysierten Synthesen experimentell ebenfalls im Ablauf Optimierungen vorgenommen wurden.

In einem ersten Schritt wurden das Methanol und der Katalysator mit Hilfe eines Rührfisches vermischt. Parallel dazu wurden das Frittieröl und ein Rührfisch in einen Rundkolben gegeben und über einem Wasserbad erhitzt. Nach dem Erreichen der Solltemperatur wurde das Methanol-Katalysator-Gemisch mittels Tropftrichter dem Öl beigefügt und für 2 Stunden gerührt. Im Anschluss an die Synthese wurde das Rohprodukt im Eisbad abgekühlt. Zu beachten ist, dass beim säurekatalysierten Biodiesel 1.0 auf das vorherige Mischen des Methanols und des Katalysators probeweise verzichtet wurde. Das Methanol und der Katalysator wurden also nacheinander zum Öl gegeben.

Bezüglich der Reinigung orientierte sich die Extraktion mit dem Scheidetrichter ebenfalls an Anleitung [2]. Beim basenkatalysierten und säurekatalysierten Biodiesel 1.0 wurden zwei Extraktionen durchgeführt, wobei bei der jeweils letzten Extraktion die Scheidetrichter mit den Flüssigkeiten über die Nacht stehen gelassen wurden. Beim säurekatalysierten Biodiesel 2.0 wurde auf einen zweiten Extraktionsdurchgang und das Stehenlassen über Nacht verzichtet. Zur Trocknung wurde den Biodieseln über Nacht Natriumsulfat beigefügt und das Gemisch am nächsten Tag abgenutscht. Als Beobachtung an dieser Stelle anzumerken ist, dass sich bei der Extraktion mit dem Scheidetrichter des säurekatalysierten Biodiesels 1.0 die obere der beiden Phasen als wässrige herausstellte. Aus diesem Grund wurde die ins Becherglas abgegossene Phase für die erneute Extraktion mit dem Scheidetrichter benutzt und die obere, wässrige Phase verworfen.

Tabelle 1 Synthese- und Reinigungsspezifikationen

	Basenkatalysiert	Säurekatalysiert 1.0	Säurekatalysiert 2.0
Edukte	- 80ml Methanol - 150ml Frittieröl	- 80ml Methanol - 150ml Frittieröl	- 80ml Methanol - 150ml Frittieröl
Katalysator	1.5g NaOH	2.7g Methansulfonsäure	4g Methansulfonsäure
Temperatur	60°C	60°C	70°C
Extraktion mit dem Scheidetrichter	1x 20ml Salzsäure und 20ml Wasser 1x 40ml Salzsäure und 40ml Wasser	1x 20ml Salzsäure und 20ml Wasser 1x 40ml Wasser	1x 40ml Wasser
Trocknung	13g Natriumsulfat	13g Natriumsulfat	8g Natriumsulfat

5.2 Analyse

Analysiert wurden die drei synthetisierten Biodiesel, das Frittieröl und der Biodiesel von Recycling Energy. Dabei wurde die Refraktometrie angewendet, die Dichte bestimmt, die Dünnschichtchromatografie und die IR-Spektroskopie durchgeführt.

Auf das Refraktometer wurden jeweils ein bis zwei Tropfen des zu untersuchenden Stoffes gegeben. Nach der Messung wurde anschliessend das Gerät mit Ethanol gesäubert.

Zur Dichtebestimmung wurde ein Pyknometer mit einem Volumen von 50.19ml (Abb.17) verwendet. Dazu wurde vorab das Gewicht des Pyknometers bestimmt. Danach wurde die Flüssigkeit, deren Dichte zu bestimmen war, eingefüllt und das Pyknometer mit seinem neuen Inhalt gewägt. Durch das Subtrahieren des Gewichtes des leeren Pyknometers vom Gewicht des Pyknometers gefüllt mit der Flüssigkeit und dem anschliessenden Dividieren durch das Volumen des Pyknometers, wurde die Dichte der Flüssigkeit bestimmt. Für die Analyse aller Stoffe wurde das gleiche Pyknometer verwendet.



Abbildung 17 Pyknometer

Für die Dünnschichtchromatografie wurde als stationäre Phase die vergleichsweise polare Kieselgelplatte verwendet. Das eher unpolare Laufmittel wurde der Anleitung [2] folgend aus 73ml Hexan, 25ml Diethylether und 2ml Eisessig hergestellt. Zwecks Untersuchung und direktem Vergleich der drei synthetisierten Biodiesel, des Frittieröls und des gekauften

Biodiesels wurde ein Co-Chromatogramm erstellt. Es wurden von allen Produkten je drei Tropfen auf die Startlinie der DC-Platte getupft und in die DC-Kammer gestellt. Nach dem Erreichen einer geeigneten Höhe der Laufmittelfront wurde die DC-Platte unter ultraviolettem Licht betrachtet.

Bei der FTIR-Spektroskopie musste das Computerprogramm aufgestartet werden und ein paar Tropfen der zu untersuchenden Flüssigkeit auf die Messfläche gegeben werden. Das Computerprogramm berechnete die Transmissionsspektren, welche danach zu Absorptionsspektren umgewandelt oder mit bereits erstellten Spektren verglichen werden konnten.

6 Resultate

Das nun folgende Kapitel dient der Auflistung der Ergebnisse, welche aus den Analysen gewonnen wurden.

6.1 Übersicht der Messdaten

Tabelle 2 Messdaten: Brechungsindex, Dichte, Masse

	Frittieröl	Biodiesel von Recycling Energy	Basenkatalysierter Biodiesel	Säurekatalysierter Biodiesel 1.0	Säurekatalysierter Biodiesel 2.0
Brechungsindex	1.4725	1.4530	1.454	1.47	1.462
Dichte (kg/L)	0.918	0.879	0.879	0.915	0.904
Masse (g)			105.6 Ausbeute: 80%	90.33	128.66

6.2 Dünnschichtchromatographie

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der Dünnschichtchromatographie dargestellt (Abb.18). Die Nummerierung ist wie folgt zu verstehen: 1. Biodiesel basenkatalysiert, 2. Biodiesel von Recycling Energy, 3. Frittieröl, 4. Biodiesel säurekatalysiert 2.0, 5. Biodiesel säurekatalysiert 1.0. Die Interpretation dieses Co-Chromatogramms wird im Diskussionsteil erfolgen.

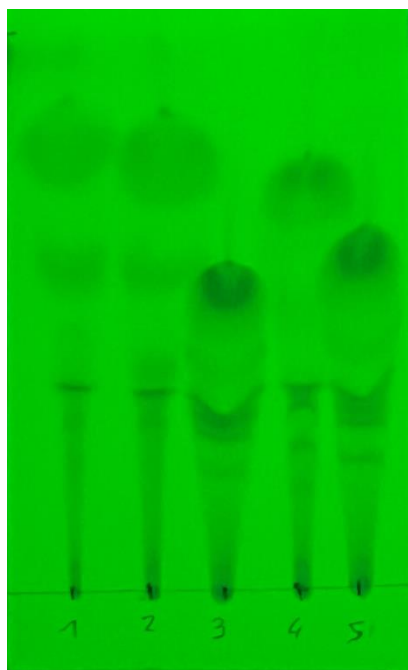


Abbildung 18 Co-Chromatogramm: 1. Biodiesel basenkatalysiert, 2. Biodiesel von Recycling Energy, 3. Frittieröl, 4. Biodiesel säurekatalysiert 2.0, 5. Biodiesel säurekatalysiert 1.0

6.3 FTIR

Im folgenden Abschnitt werden die IR-Spektren der FTIR-Spektroskopie dargestellt. Auf der y-Achse wird die Transmittanz (Durchlässigkeit) in Prozent dargestellt und auf der x-Achse die Wellenzahl in cm^{-1} . Die Spektren der selbstkatalysierten Biodiesel wurden jeweils überlagert mit dem Spektrum des Biodiesels von Recycling Energy und im Falle der säurekatalysierten Biodiesel wurde ebenfalls eine Überlagerung der Spektren mit dem Spektrum des Frittieröls vorgenommen.

Das erste Spektrum (Abb.19) zeigt eine Überlagerung des Spektrums des Biodiesels von Recycling Energy und des basenkatalysierten Biodiesels.

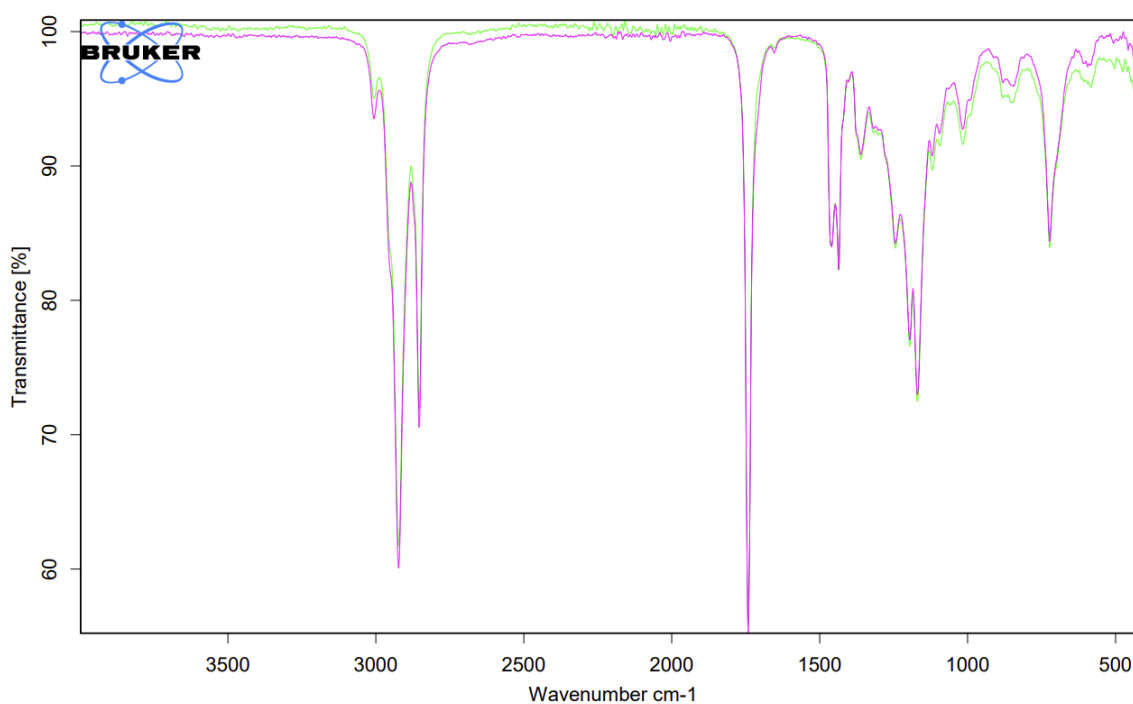


Abbildung 19 Biodiesel von Recycling Energy (grün) und basenkatalysierter Biodiesel (pink)

Das folgende Spektrum (Abb.20) zeigt die Überlagerung des Spektrums säurekatalysierten Biodiesels 1.0 und des Spektrums des Biodiesels von Recycling Energy, gefolgt von der Überlagerung des Spektrums des Frittieröls und des säurekatalysierten Biodiesels 1.0 (Abb.21).

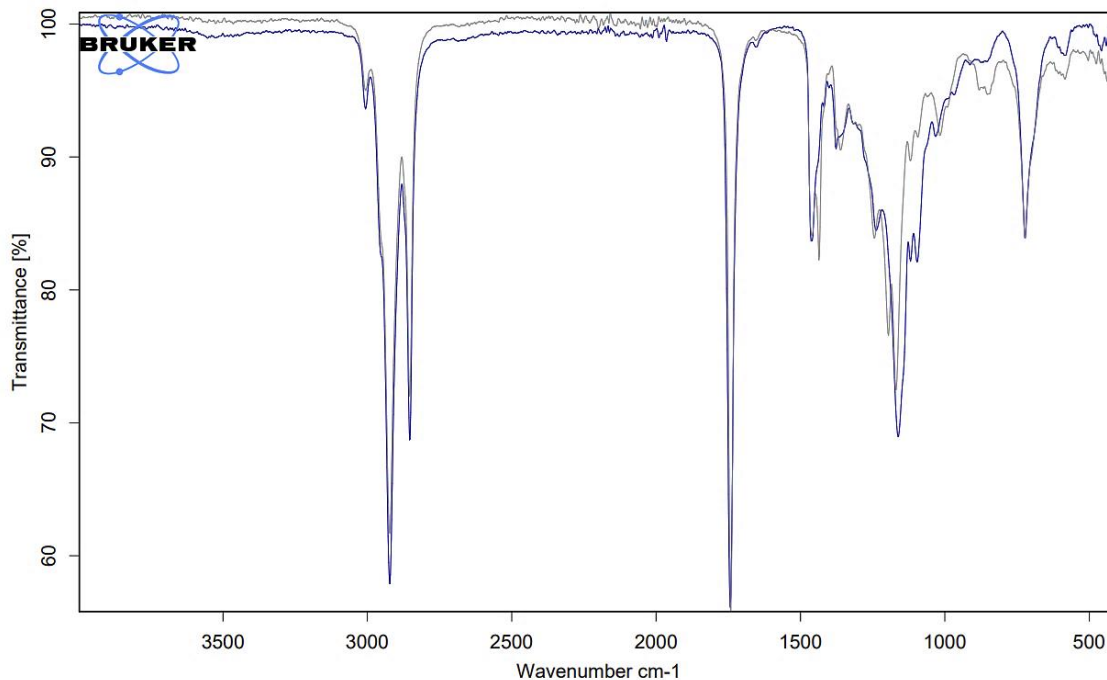


Abbildung 20 Biodiesel von Recycling Energy (grau) und säurekatalysierter Biodiesel 1.0 (blau)

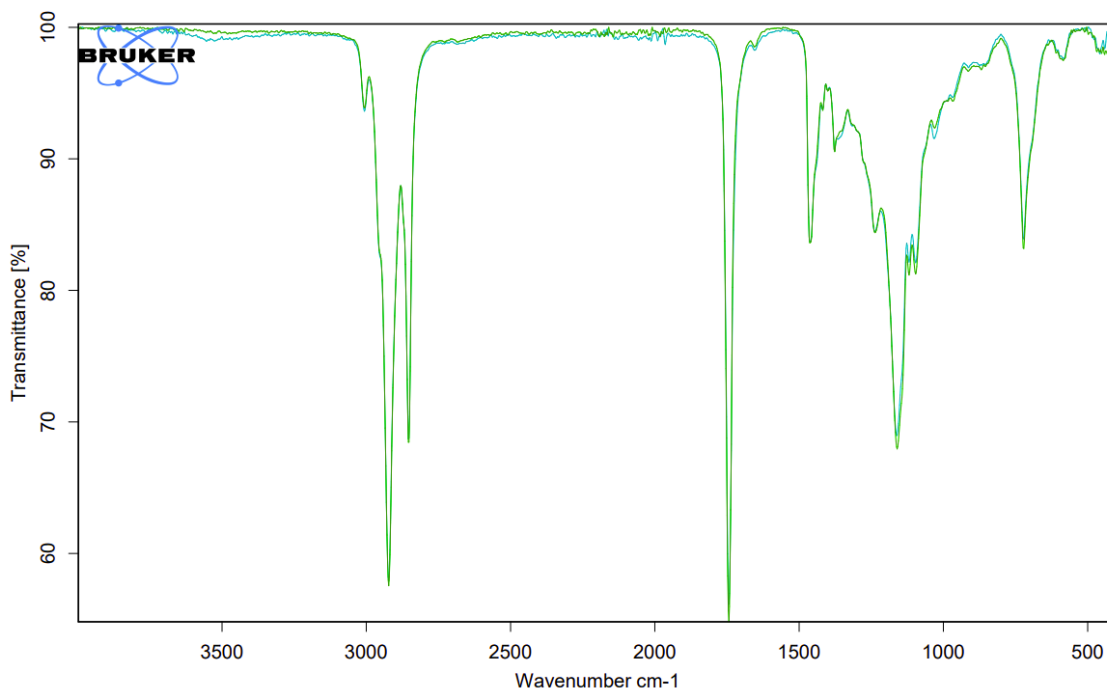


Abbildung 21 Frittieröl (grün) und säurekatalysierter Biodiesel 1.0 (blau)

Das erste Spektrum dieser Seite (Abb.22) zeigt die Überlagerung des Spektrums des säurekatalysierten Biodiesels 2.0 und des Spektrums des Biodiesels von Recycling Energy. Das zweite (Abb.23) veranschaulicht die Überlagerung des Spektrums des säurekatalysierten Biodiesels 2.0 und des Spektrums des Biodiesels von Recycling Energy.

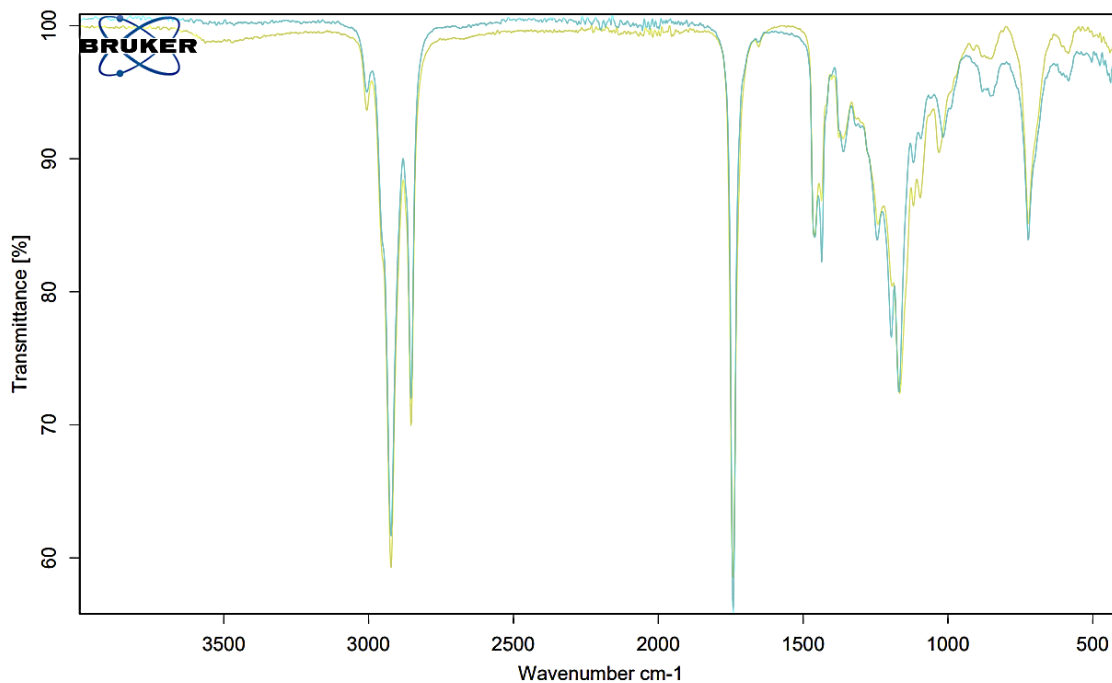


Abbildung 22 Biodiesel von Recycling Energy (blau) und säurekatalysierter Biodiesel 2.0 (gelb)

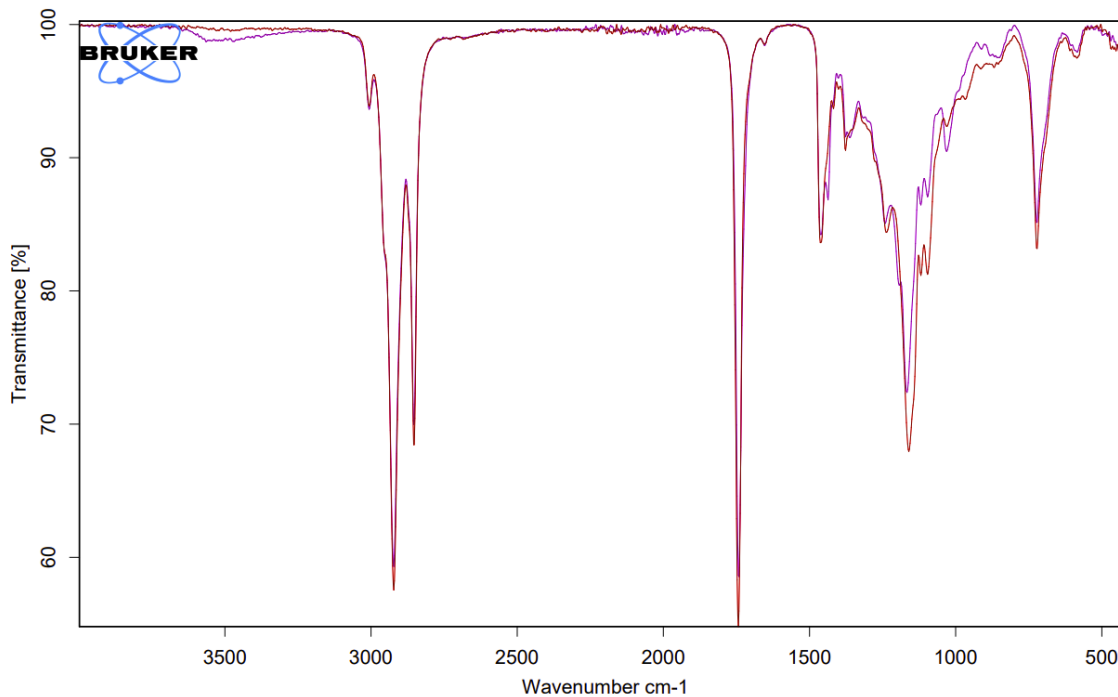


Abbildung 23 Frittieröl (rot) und säurekatalysierter Biodiesel 2.0 (violett)

7 Diskussion

In diesem Kapitel werden zuerst die Ergebnisse aus *Resultate* ausgewertet und verglichen, danach erfolgt eine Analyse der Syntheseerfolge, sowie Verbesserungsvorschläge. Zum Schluss werden die zwei Syntheseansätze mit den unterschiedlichen Katalysatoren kurz einander gegenübergestellt. Als Referenz für eine gelungene Biodieselsynthese, also ein Syntheseerfolg, dient der Biodiesel von Recycling Energy. Anzumerken ist, dass in die Diskussion die Möglichkeit des Vorkommens von freien Fettsäuren im Frittieröl miteinbezogen wurde, da in Frittieröl aufgrund der Hydrolyse während des Frittierens vermehrt freie Fettsäuren vorkommen können [21].

7.1 Auswertung der Messdaten

Der Brechungsindex und die Dichte lassen eine erste Abschätzung des Syntheseerfolgs der Produkte zu. Grosse Ähnlichkeit mit den Werten des Biodiesel von Recycling Energy weist auf eine erfolgreiche Umesterung hin, während eine Annäherung an die Werte des Frittieröls auf einen Synthesemisserfolg hindeutet. Nach diesem Bewertungsansatz lassen die Dichte und der Brechungsindex des basenkatalysierten Biodiesels bereits eine gelungene Synthese vermuten. Die Ähnlichkeit zwischen den Werten des säurekatalysierten Biodiesels 1.0 und den Werten des Frittieröls ist hingegen ein Indikator für eine nicht stattgefundene Umesterung. Die Werte des säurekatalysierten Biodiesels 2.0 liegen zwischen denen des Biodiesels von Recycling Energy und denen des Frittieröls, was daraufhin deutet, dass die Synthese nur teilweise erfolgreich war.

Eine Ausbeuteberechnung erübrigt sich bei den säurekatalysierten Biodieseln, da hier kein annähernd reiner Biodiesel entstanden ist und Restprodukte sowie übriggebliebene Zwischenprodukte die Berechnung verfälschen würden. Bei der basenkatalysierten Synthese ergab sich eine Ausbeute von 80%, wobei von einer molaren Masse von 900g/mol beim Rapsöl ausgegangen wurde und von 300g/mol beim Biodiesel. Ohne eine Beeinflussung des Reaktionsgleichgewichts liegt eine durchschnittliche Ausbeute von Biodiesel gemäss Quelle [2] bei 66%, was die errechnete Ausbeute von 80% des basenkatalysierten Biodiesels zu einer relativ hohen Ausbeute macht.

7.2 Auswertung der Dünnschichtchromatographie

Der Vergleich der Laufstrecken des basenkatalysierten Biodiesels und desjenigen von Recycling Energy auf dem Co-Chromatogramm (S.14 | Abb.18) zeigt, dass die Produkte nahezu identisch sind. Diese Analyse weist also ebenfalls auf einen Syntheseerfolg des basenkatalysierten Biodiesels hin. Bei beiden Biodieseln sind je drei Flecken auf dem Chromatogramm ersichtlich, welche neben dem gewollten Produkt vermutlich von restlichen Partial- und Triglyzeriden stammen, die in Biodiesel vorkommen können [22]. Die obersten Flecken beim basenkatalysierten Biodiesels als auch desjenigen von Recycling Energy sind mutmasslich auf die Fettsäuremethylester zurückzuführen, da Fettsäuremethylester auf Kieselgel mit vergleichweisem unpolarem Fließmittel in der Regel einen grösseren R_f -Faktor als Triglyceride

aufweisen [23]. Die restlichen Flecken könnten dann vermutlich den Triglyzeriden, Diglyzeriden, Monoglyzeriden oder freien Fettsäuren zugeordnet werden.

Der säurekatalysierte Biodiesel 1.0 weist bezüglich seiner Laufstrecke eine grosse Ähnlichkeit zum Frittieröl auf. Dies stützt die Vermutung, dass kaum eine Umesterung erfolgt ist. Der oberste Fleck auf dem Chromatogramm entspricht vermutlich den Triglyzeriden und der untere dunkle Streifen könnte auf die freien Fettsäuren zurückzuführen sein, da der Retentionsfaktor bei Triglyzeriden höher ist als bei den freien Fettsäuren [23]. Die Abweichung der Laufstrecke des Biodiesels 1.0 von der Laufstrecke des Frittieröls könnte aus unterschiedlich hohem Auftragen des Produktes auf das Chromatogramm resultiert sein.

Die Zwischenstufe des säurekatalysierten Biodiesels 2.0 auf dem Chromatogramm lässt auf einen höheren Grad der Umesterung im Vergleich zum säurekatalysierten Biodiesel 1.0 schliessen. Jedoch scheint die Umesterung nach wie vor nicht so erfolgreich gewesen zu sein wie beim basenkatalysierte Biodiesel. Grund für die Abweichung von der Chromatogramm-erscheinung des basenkatalysierten Biodiesels könnte sein, dass Mono- und Diglyzeride noch in einem höheren Masse als beim basenkatalysierten Biodiesel im Produkt vorhanden sind. Triglyzeridmoleküle sind in diesem Produkt aufgrund der erfolgreicherer Umesterung vermutlich nicht mehr so zahlreich wie im säurekatalysierten Biodiesel 1.0.

7.3 Vergleich der FTIR-Spektrogramme

Zur Vereinfachung der Interpretation wird in einem ersten Schritt der Fingerprintbereich aussen vorgelesen und die Peaks zwischen 3500 cm^{-1} – 1500 cm^{-1} betrachtet. In diesem Bereich ist bezüglich aller Spektren (S. 15-17 | Abb.19-23) eine relativ genaue Übereinstimmung ersichtlich und daher lässt sich die Zuordnung der Peaks zu funktionellen Gruppen in einer Analyse durchführen. Der Peak bei 1750 cm^{-1} mit der höchsten Absorption lässt sich hierbei vermutlich der C=O Bindung der Estergruppe zuordnen, die drei Peaks zwischen ungefähr 3100 cm^{-1} – 2750 cm^{-1} sind wahrscheinlich auf C-H Bindungen zurückzuführen. Der erste (von links nach rechts) und kleinste der drei Peaks könnten auf die bei dieser Wellenzahl angeregten Streckenschwingungen der Alkene zurückzuführen sein. Diese Doppelbindungen sind im Frittieröl bei den ungesättigten Fettsäuren zu finden und im Biodiesel in den Fettsäuremethylestern, welche aus ungesättigten Fettsäuren entstanden sind. Der zweite und der dritte Peak weisen möglicherweise auf die Streckenschwingung der Alkane im Biodiesel und Frittieröl hin.

Im zweiten Schritt wird nun auf den Fingerprintbereich eingegangen. Dieser Bereich charakterisiert den ganzen Stoff und dient nicht in erster Linie der Zuordnung funktioneller Gruppen. Die Spektren des Biodiesels von Recycling Energy und des basenkatalysierten Biodiesels (S.15 | Abb.19) zeigen eine starke Übereinstimmung. Dies deutet auf eine grosse molekulare Ähnlichkeit hin und unterstützt somit die Ergebnisse der anderen Analysemethoden. Auch im Vergleich mit dem biodieseltypischen Spektrum der Quelle [24] weist der basenkatalysierte Biodiesel beim Peak 1500 cm^{-1} und dreispitzigen Peak $1200\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ die für den Biodiesel charakteristischen Strukturen auf.

Die Spektren des säurekatalysierten Biodiesel 1.0 und des Frittieröls (S.16|Abb.21) sind fast deckungsgleich, was den Verdacht verstärkt, dass die Umesterung bei dieser Synthese nicht stattgefunden hat. Die Form der Peaks bei 1500cm^{-1} und $1200\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ sind ziemlich eindeutige Charakteristika des Rapsöls [24].

Das Spektrum des säurekatalysierten Biodiesels 2.0 ist weder mit dem Biodiesel von Recycling Energy (S.17|Abb.22), noch mit dem des Frittieröls deckungsgleich (S.17|Abb.23). Der Vergleich mit dem für den Biodiesel typischen und dem für das Rapsöl typischen Fingerprintbereich [24] weist den säurekatalysierte Biodiesel 2.0 mit seinem Spektrum erneut als eine Zwischenform aus. Der Fingerprintbereich dieses Syntheseversuches deutet demnach auf eine teilweise gelungene Umesterung hin.

7.4 Verbesserungsmöglichkeiten und Vergleich der Syntheseerfolge

Zuerst wird nun auf einen Aspekt eingegangen, dessen stärkere Beachtung zur Verbesserung aller Syntheseresultaten führen könnte.

Bei der Synthese von Biodiesel handelt es sich – wie bereits im Theorieteil erwähnt – um eine Gleichgewichtsreaktion. Bei einer solchen reversiblen Reaktion ist es schwierig eine sehr hohe Ausbeute zu erhalten, nichtsdestotrotz besteht die Möglichkeit einer Ausbeuteerhöhung durch die Anwendung des Prinzips des kleinsten Zwanges. Die Umsetzung dieses Prinzipes sollte eine Gleichgewichtsverschiebung bewirken. Bezogen auf diese Arbeit ist eine Gleichgewichtsverschiebung durch eine Stoffmengenänderung und Temperaturänderung möglich. Durch die Wahl eines Verhältnisses von ca. 1:13 zwischen der Stoffmenge des Frittieröls und der des Methanols wurde der stöchiometrische Überschuss eines Edukts bereits gewährleistet und das Prinzip des kleinsten Zwanges bezüglich eines Aspektes angewendet. Ob eine weitere Stoffmengenerhöhung des Eduktes zu einer noch höheren Ausbeute geführt hätte, ist fraglich. Eine wiederholte Entfernung des Produktes während der Synthese hätte jedoch höchstwahrscheinlich zu einer noch grössere Gleichgewichtsverschiebung in Richtung Produkt geführt. Ebenfalls hätte eine Temperaturerhöhung – da die Reaktion endotherm ist – die Ausbeute wahrscheinlich vergrössern können. [25], [26]

Eine grössere Katalysatormenge soll sich gemäss Quelle [2] gleichfalls positiv auf die Reaktion auswirken.

Nun erfolgt eine Einschätzung jedes einzelnen Produktes bezüglich seines Syntheseerfolges und eine Auflistung möglicher Gründe für Misserfolge. Im Anschluss werden die drei Syntheseprodukte kurz verglichen.

Beim basenkatalysierten Produkt kann aufgrund seiner hohen Übereinstimmung mit dem Biodiesel von Recycling Energy in den verschiedenen Analysemethoden von einem Syntheseerfolg, also auch einer erfolgreichen Umesterung ausgegangen werden. Bei den Verunreinigungen, die auf der Dünnschichtchromatographie erkennbar waren, handelt es sich höchstwahrscheinlich um Partial- und Triglyzeride, deren Restvorkommen im Biodiesel typisch

sind [22]. Bei der Synthese ergaben sich keine Komplikationen und aufgrund des Syntheseerfolges erübrigt sich eine Untersuchung der Probleme. Bezüglich der Ausbeute bleibt offen, ob eine Gleichgewichtsverschiebung durch eine Temperaturerhöhung möglich gewesen wäre und ob eine längere Verweilzeit, so wie eine Erhöhung der Katalysatormenge zu einer höheren Ausbeute geführt hätten.

Der säurekatalysierte Biodiesel 1.0 kann als Misserfolg verbucht werden, die Umesterung hat hier nicht oder nur sehr gering stattgefunden.

Der Hauptfaktor für die fehlgeschlagene Synthese ist möglicherweise, dass bis auf kleine Änderung die gleiche Syntheseanleitung wie für die basenkatalysierte Synthese verwendet wurde. Die säurekatalysierte Synthese wurde zur selben Zeit gestartet und beendet wie die basenkatalysierte unter der fälschlichen Annahme einer gleichlangen Verweilzeit. Die säurekatalysierte Reaktion läuft allerdings 4000mal langsamer ab als die basenkatalysierte [26]. Die Verweilzeit wurde demnach ziemlich sicher zu kurz gewählt. Aber auch die Reaktionstemperaturen der beiden Synthesemethoden unterscheiden sich: Während 60°C für die basische Synthese mit einer Reaktionstemperatur zwischen 25°C und 100°C adäquat gewählt ist, liegt die Reaktionstemperatur der säurekatalysierten Synthese zwischen 70°C und 120°C [26]. Eine Temperaturerhöhung wäre daher nicht nur aufgrund einer so ermöglichten Gleichgewichtsverschiebung von Vorteil, sondern nötig, um die Reaktion überhaupt zu ermöglichen. Eine weitere mögliche Erklärung für den Misserfolg der Synthese ist, dass die Menge an Katalysator zu gering war. Vor allem bei einem hohen Gehalt an freien Fettsäuren wäre mehr Katalysator nötig [26].

Die säurekatalysierte Synthese 2.0 ist weder wirklich als Erfolg noch als Misserfolg anzusehen. Die Ergebnisse der Analysen deuten darauf hin, dass Fettsäuremethylester entstanden sind, jedoch höchstwahrscheinlich ebenfalls restliche Triglyzeride und eine vergleichsweise grosse Menge an Diglyzeriden und Monoglyzeriden vorhanden sind.

Bezüglich des Syntheseprozesses sind ähnliche Fehler unterlaufen wie bei der säurekatalysierten Synthese 1.0, jedoch wurde eine grössere Menge an Methansulfonsäure verwendet und beim Hinzufügen des Methanol-Sulfonsäure-Gemisches wurde eine Temperatur von 70°C gewählt. Dies könnten Faktoren sein, welche die Synthese 2.0 erfolgreicher machten. Welchen Anteil das vorherige Mischen von Methansulfonsäure und Methanol als kleine Anpassung des Syntheseprozesses am erhöhten Syntheseerfolg hatte, ist schwierig auszuloten. Unklar ist auch, welcher Anteil am grösseren Erfolg den Anpassungen bei der Reinigung zu kommt.

Abschliessend kann im Vergleich die basenkatalysierte als erfolgreichere Synthese deklariert werden, da die Umesterung erfolgreich war und die Ausbeute relativ hoch. Ob die basenkatalysierte Synthesemethode an sich der säurekatalysierten Synthesemethode überlegen ist, lässt sich anhand dieser Arbeit nicht bestimmen, da bei der säurekatalysierten Synthese von fehlerhaften Durchführungen ausgegangen werden kann. Mit Blick auf die Literatur scheint sich

die säurekatalysierte Synthese besser für die Umesterung von Ölen mit freien Fettsäuren zu eignen, da der Säurekatalysator auch die Veresterung freier Fettsäuren katalysieren kann und nicht nur die Umesterung von Triglyzeriden [26]. Dem Gegenüber ist die basenkatalysierte Synthese auf Grund der kürzeren Verweilzeit bezüglich der Reaktionszeit überlegen. Das NaOH kann jedoch keine Veresterung katalysieren und für die Verhinderung von starker Seifenbildung wurde die Extraktion durch den Scheidetrichter benötigt [2]. Welche Methode für die Synthese geeigneter ist, hängt daher von Umständen wie der verfügbaren Zeit und der Qualität der Edukte ab wie auch vom Ziel der Herstellung.

8 Reflexion

Rückblickend bin ich mit der Wahl des Themas meiner Maturaarbeit ausgesprochen zufrieden. Nicht nur hat sie mir gezeigt, dass mit einer guten Anleitung und der richtigen Unterstützung auch Produkte im Schülerlabor synthetisierbar sind, deren Synthese ich nur in einem professionellen Chemielabor für möglich gehalten hätte; auch hatte ich die Möglichkeit meine Syntheseprodukte mit verschiedenen Analysemethoden zu untersuchen und so neue chemische Verfahren zu entdecken und verstehen. Unter anderem bin ich dankbar dafür, dass ich meine Produkte mit Hilfe der FTIR-Spektroskopie im Hochschullabor der PH St. Gallen analysieren durfte.

Meine Syntheseerfolge betrachtend, sehe ich definitiv noch Verbesserungspotenzial bei meiner praktischen Arbeit, vor allem bei den säurekatalysierten Syntheseansätzen. Trotzdem haben gerade diese fehlgeschlagenen oder teilweise fehlgeschlagenen Synthesen durch ihre Initiierung einer intensiven Fehleranalyse zu einer ausführlicheren Auseinandersetzung mit der ganzen Thematik geführt.

Auch aus dem Schreibprozess konnte ich viel mitnehmen wie Zeitmanagement, das Trainieren von Disziplin und das Überwinden von Problemen und Hindernissen. Anspruchsvoll fand ich vor allem die Diskussion der Ergebnisse, galt es doch, den roten Faden nicht zu verlieren und nicht übermässig ins Detail zu gehen. Ich musste mich darin üben, nicht auf jede Interpretationsmöglichkeit genaustens einzugehen, da dies nur zu einem Spekulationsteppich verschiedener und sich verzweigender Interpretationsfäden geführt und den Rahmen gesprengt hätte.

Im Überblick lässt sich sagen, dass meine Maturaarbeit bezüglich verschiedener Aspekte eine nützliche Erfahrung war vor allem in Hinblick auf das Studium und andere Schreibproduktionen, auch wenn der Prozess oft nervenaufreibend und sehr anstrengend war.

9 Zusammenfassung

Der praktische Teil dieser Arbeit umfasste die Synthese von Biodiesel aus Frittieröl, wobei diese einmal basenkatalysiert durchgeführt wurde und zweimal säurekatalysiert, als auch die Analyse der Produkte. Im schriftlichen Teil wurde die Thematik des Biodiesels nach einer kurzen Einleitung über theoretische Grundlagen zu Rapsöl, der industriellen Biodieselherstellung, als auch der Umesterung mitsamt den Reaktionsmechanismen der basenkatalysierten und säurekatalysierten Umesterung nähergebracht. Die Kapitel *Material* und *Methoden* dienen der Vorstellung der für den praktischen Teil benötigten Materialien, der Erläuterung der Synthese unter Rückfluss wie auch der Reinigungsverfahren und der Analysemethoden. Die Dokumentationen der praktischen Prozesse der Arbeit und die Ergebnisse aus den Kapitel *Versuche und Messungen* und *Resultate* boten die Grundlage für die in Kapitel *Diskussion* ausgeführten Auswertungen, Interpretationen, Verbesserungsvorschläge und Vergleiche.

Die Auswertungen der verschiedenen Analysemethoden deckten den basenkatalysierten Biodiesel im Vergleich zu den alternativen Synthesemethoden relativ zum Standard als grössten Syntheserfolg auf, wobei offenbleibt, ob gewisse Anpassungen am Synthesevorgehen die Ausbeute hätten vergrössern können. Der säurekatalysierte Biodiesel 2.0 konnte aufgrund seiner grösseren Übereinstimmung mit dem Standard im Vergleich zum säurekatalysierten Biodiesel 1.0 als erfolgreichere Synthese verbucht werden. Beim säurekatalysierten Biodiesel 1.0 hat die Umesterung vermutlich nicht oder kaum stattgefunden. Beide Syntheseansätze hätten jedoch noch Verbesserungspotential, was das Wählen der Verweilzeit, der Temperatur und der Menge des Katalysators betrifft. Welche Synthesemethode an sich überlegen ist, hängt ganz von den Zielen und Mitteln des Herstellers oder der Herstellerin ab.

10 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich besonders meiner Betreuerin, Frau Schüssler, danken, die diese Arbeit erst ermöglichte. Sie brachte mich nicht nur auf das Thema meiner Maturaarbeit, sondern war auf dem ganzen Weg meiner Arbeit bereit sehr viel Zeit zu investieren. Sei es im Labor während des praktischen Teils meiner Arbeit, bei der Organisation des Labortags an der PHSG oder bei der Beantwortung meiner Fragen per Mail oder in ausführlichen Gesprächen, sie stand mir stets mit Hilfestellung in Form von Erläuterungen und konstruktiver Kritik zur Seite.

Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Alfred Steinbach von der PHSG, der mir den Aufenthalt im Hochschullabor im Rahmen des Berzelius-Projektes und so die Analyse mit der FTIR-Spektroskopie ermöglichte. Dabei möchte ich auch Dr. Adrian Brugger einen grossen Dank aussprechen, der mir während des ganzen Labortags bei technischen Problemen und mit hilfreichen Erklärungen beistand.

Der Recycling Energy AG möchte ich für das grosszügige Zurverfügungstellen des Vergleichsstandards danken und der Mensa der Kantonsschule Reussbühl für das Frittieröl.

Ein grosser Dank gilt auch meinem Vater für das Korrekturlesen.

11 Quellenverzeichnis

- [1] StudySmarter, (Jahr unbekannt): Biodiesel
<https://www.studysmarter.de/schule/chemie/anorganische-chemie/biodiesel/>
[Stand: 30.6.2023]
- [2] Prof. Dr. F. Vogel, Energetische Nutzung von Biomasse, FHNW, 2021, Seite 2-6
- [3] Wirtz, (2021): Wie wird Biodiesel hergestellt?
<https://www.wirtz-oel.de/blog/Wie-wird-Biodiesel-hergestellt-.3435c.php> [Stand: 7.8.2023]
- [4] Agentur für erneuerbare Energien, (Jahr unbekannt): Wie wird Biodiesel hergestellt?
<https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/wie-wird-biodiesel-hergestellt>
[Stand: 7.8.2023]
- [5] Recycling Energie AG, (Jahr unbekannt): Porträt
<https://www.recycling-energie.ch/ueber-uns/portraet/> [Stand: 30.6.2023]
- [6] Google Patents, (Jahr unbekannt): Verfahren zur Herstellung von Biodiesel durch saure Umesterung sowie die Verwendung einer Sulfonsäure als Katalysator bei der Herstellung von Biodiesel
<https://patents.google.com/patent/DE102009037579A1/de> [Stand: 20.9.2023]
- [7] Die Chemie-Schule, (Jahr unbekannt): Rückflusskühler
<https://www.chemie-schule.de/KnowHow/R%c3%bcckflussk%c3%bchler> [Stand: 17.4.2023]
- [8] Chemie.de, (Jahr unbekannt): Scheidetrichter
<https://www.chemie.de/lexikon/Scheidetrichter.html> [Stand: 18.4.2023]
- [9] Die Chemie-Schule, (Jahr unbekannt): Scheidetrichter
<https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Scheidetrichter> [Stand: 20.4.2023]
- [10] Chemie.de, (Jahr unbekannt): Trocknung
<https://www.chemie.de/lexikon/Trocknung.html> [Stand: 20.4.2023]
- [11] Wikipedia, (2022): Trocknungsmittel
<https://de.wikipedia.org/wiki/Trocknungsmittel> [Stand: 20.4.2023]
- [12] Die Chemie-Schule, (Jahr unbekannt): Nutsche
<https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Nutsche> [Stand: 9.7.2023]
- [13] Die Chemie-Schule, (Jahr unbekannt): Refraktometer
<https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Refraktometer> [Stand: 21.4.2023]
- [14] Spektrum, (Jahr unbekannt): Refraktometrie
<https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/refraktometrie/7877> [Stand: 21.4.2023]
- [15] Heidrun Schüssler, DC-Chromatographie von Schmerzmitteln, KSR Chemiepraktikum, 2020, Seite 1

- [16] DocCheck, (2020): Dünnschichtchromatographie
<https://flexikon.doccheck.com/de/D%C3%BCnnschichtchromatographie> [Stand: 21.4.2023]
- [17] M. Sc. Ludger Schöttner, Spektroskopische Untersuchungen an oxydischen Modelloberflächen, Dissertation: Karlsruher Instituts für Technologie, 2019, Seite 4
- [18] Heidrun Schüssler, IR-Spektroskopie, 2017, Seite 1
- [19] Physik für alle, (Jahr unbekannt): FTIR-Spektrometer
<https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/FTIR-Spektrometer> [Stand: 2.7.2023]
- [20] Bruker.com, (Jahr unbekannt): FT-IR Spektroskopie Grundlagen
<https://www.bruker.com/content/bruker/int/de/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-routine-spectrometer/what-is-ft-ir-spectroscopy.html> [Stand: 2.7.2023]
- [21] Filtrox, (Jahr unbekannt): Der Prozess vom Abbau des Frittieröls
<https://www.filtrox.com/ch/blog/2023/06/28/der-prozess-vom-abbau-des-frittieroels/>
[Stand: 15.7.2023]
- [22] Wikipedia, (2023): Biodiesel
https://de.wikipedia.org/wiki/Biodiesel#Chemische_Zusammensetzung [Stand:13.9.2023]
- [23] Dr. Bernd Schilling, Chemie - Praktikum für die Oberstufe, Ernst Klett Verlag GmbH: Stuttgart, 1.Auflage, 1999
- [24] Autor unbekannt, Nachweis und quantitative Bestimmung von Biodiesel und Gemischen auf Rapsölbasis, Shimadzu News, 2007, S.14-16
- [25] Die Chemie-Schule (Jahr unbekannt): Prinzip vom kleinsten Zwang
https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Prinzip_vom_kleinsten_Zwang [Stand: 15.7.2023]
- [26] Dipl.-Ing. Irmela Kofler, Hochdruckveresterung höhermolekularer Fettsäuren, Dissertation: Technische Universität Graz, 2010

12 Abbildungsverzeichnis

Titelbild: gezeichnet mit Marvin Sketch und fotografiert von Mia Schweizer (Inhalt der Reagenzgläser von links nach rechts: basenkatalysierter Biodiesel, säurekatalysierter Biodiesel 2.0, säurekatalysierter Biodiesel 1.0)

Abbildung 1: gezeichnet von Mia Schweizer mit Marvin Sketch	2
Abbildung 2: gezeichnet von Mia Schweizer mit Marvin Sketch	3
Abbildung 3: gezeichnet von Mia Schweizer mit Marvin Sketch	4
Abbildung 4: gezeichnet von Mia Schweizer mit Marvin Sketch	4
Abbildung 5: gezeichnet von Mia Schweizer mit Marvin Sketch	4
Abbildung 6: gezeichnet von Mia Schweizer mit Marvin Sketch	5
Abbildung 7: gezeichnet von Mia Schweizer mit Marvin Sketch	5
Abbildung 8: gezeichnet von Mia Schweizer mit Marvin Sketch	5
Abbildung 9: gezeichnet von Mia Schweizer mit Marvin Sketch	6
Abbildung 10: gezeichnet von Mia Schweizer mit Marvin Sketch	6
Abbildung 11: fotografiert von Mia Schweizer an der KSR	7
Abbildung 12: fotografiert von Mia Schweizer an der KSR	8
Abbildung 13: fotografiert von Mia Schweizer an der KSR	8
Abbildung 14: fotografiert von Mia Schweizer an der KSR	9
Abbildung 15: fotografiert von Mia Schweizer an der KSR	9
Abbildung 16: fotografiert von Mia Schweizer an der PHSG	10
Abbildung 17: fotografiert von Mia Schweizer an der KSR	12
Abbildung 18: fotografiert von Mia Schweizer an der KSR	14
Abbildung 19: erstellt von Mia Schweizer an der PHSG	15
Abbildung 20: erstellt von Mia Schweizer an der PHSG	16
Abbildung 21: erstellt von Mia Schweizer an der PHSG	16
Abbildung 22: erstellt von Mia Schweizer an der PHSG	17
Abbildung 23: erstellt von Mia Schweizer an der PHSG	17
Tabelle 1: erstellt von Mia Schweizer	12
Tabelle 2: erstellt von Mia Schweizer	14

13 Deklaration

a) Deklaration: Ich erkläre hiermit,

- dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und unter Benutzung der angegebenen Quellen verfasst habe.
- dass ich auf eine eventuelle Mithilfe Dritter in der Arbeit ausdrücklich hinweise.
- dass ich vorgängig die Schulleitung und die betreuenden Lehrpersonen informiere, wenn ich diese Maturaarbeit bzw. Teile oder Zusammenfassungen davon veröffentlichen werde und/oder Kopien dieser Arbeit zur weiteren Verbreitung an Dritte aushändigen werde.
- dass mir die möglichen Folgen eines Plagiats bekannt sind (vgl. Weisung Unredlichkeiten, SRL 506),

b) Einverständnis zur Plagiatsprüfung

Ich nehme zur Kenntnis, dass meine Arbeit zur Überprüfung der korrekten und vollständigen Angabe der Quellen mit Hilfe einer Software (Plagiatserkennungstool) geprüft werden kann. Zu meinem eigenen Schutz wird die Software auch dazu verwendet, später eingereichte Arbeiten mit meiner Arbeit elektronisch zu vergleichen und damit Abschriften und eine Verletzung meines Urheberrechts zu verhindern. Falls Verdacht besteht, dass mein Urheberrecht verletzt wurde, erkläre ich mich damit einverstanden, dass die Schulleitung meine Arbeit zu Prüfzwecken herausgibt.

Unterschrift für a) und b):

Ort: Luzern

Datum: 8.10.2023

Name, Vorname: Schweizer, Mia

Unterschrift: 