Interdisziplinäres Praktikum

(Bachelorstudium)

aus den

Umweltsystemwissenschaften (USW):

Wasserstoff als Energieträger in der Mobilität

Umweltsystemwissenschaften

Karl-Franzens-Universität Graz

Endbericht

WS 2016/17

Organisation

Lehrende

Dipl.-Ing. Dr.techn. Klell Manfred
klell@hycenta.at

Dipl.-Ing. Schröck Andrea Maria, Bakk.rer.nat.
andrea.schroeck@uni-graz.at

Dipl.-Ing. Dr.techn. Trattner Alexander
trattner@hycenta.at

Studentische Organisatoren

Babin Markus
markus.babin@edu.uni-graz.at

Kontakt

Koordinationsbüro für Umweltsystemwissenschaften
Karl-Franzens-Universität Graz
Merangasse 18/EG, A – 8010 Graz
Tel.: +43 (0)316 380 – 1037 Fax: +43 (0)316 380 – 9585
E-Mail: usw.koordination@uni-graz.at

Inhaltsverzeichnis

Seite

Organisation I
Inhaltsverzeichnis II
Abbildungsverzeichnis V
Tabellenverzeichnis VII
Einführung 1
1 Produktion und Entsorgung/Recycling 2
1.1 Einleitung und Methodik 3
1.1.1 Einleitung 3
1.1.2 Methodik und Aufgabenaufteilung 3
1.2 Ressourcen 3
1.2.1 CO_2–Emissionen 5
1.2.2 Ressourcen-Aufstellung 6
1.3 Brennstoffzelle & Batterie 7
1.3.1 Brennstoffzelle 7
1.3.2 Batterie eines Elektrofahrzeuges 7
1.4 Materialkosten 8
1.4.1 Kostenaufstellung zu den jeweiligen Ressourcen 8
1.4.2 Preisentwicklung 9
1.5 Recycling 10
1.5.1 Einsparung von CO_2 bei der Produktion der einzelnen Fahrzeugtypen 10
1.5.2 Einsparung an Kosten durch Recycling 11
1.5.3 Der Abiotische Ressourcenverbrauch (ADP – Abiotic Depletion Potential) 12
1.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 13
1.6.1 Vergleich der CO_2–Emissionen zwischen Primär- und Sekundärproduktion 13
1.6.2 Vergleich von Materialkosten mit den Recycling-Preisen 14
1.6.3 Vergleich CO_2 und Preisvergleich 15
1.6.4 Schlussfolgerung und Lösungsvorschläge 15
2 Well-to-Tank 16
2.1 Einleitung 17
2.2 Theoretischer/konzeptioneller Hauptteil der Arbeit 17
2.3 Ökologischer Aspekt 19
2.3.1 Methodik 19
2.3.2 CO_2-Analyse 20
2.3.3 Diskussion 23
2.4 Ökonomischer Aspekt 24

2.4.1 Methodik 24
2.4.2 Ergebnisse 25
2.4.3 Diskussion 27
2.5 Technischer Aspekt 27
2.5.1 Methodik 27
2.5.2 Resultate 28
2.5.3 Diskussion 31
3 Tank-to-Wheel 32
3.1 Einleitung 33
3.1.1 Anmerkung 33
3.2 Energie am Rad / Fahrzyklus 33
3.3 Verbrennungsmotoren 34
3.3.1 Wirkungsgrade und Energiebedarf 35
3.3.2 Emissionen 37
3.3.3 Kosten 38
3.4 Batteriebetriebene Motoren 38
3.4.1 Wirkungskette 38
3.4.2 Wirkungsgrade 39
3.4.3 Emissionen 40
3.4.4 Kosten 40
3.5 H_2-Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug 40
3.5.1 Wirkungsgrade und Energiebedarf 41
3.5.2 Emissionen 42
3.5.3 Kosten 42
3.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 43
4 Rechtliche Aspekte, Sicherheit und Kundenanforderungen im Rahmen unterschiedlicher Antriebsstoffe 46
4.1 Einleitung 47
4.2 Rechtliche Rahmenbedingungen 47
4.3 Nutzwertanalyse 52
4.3.1 Grundlagen der Nutzwertanalyse 52
4.3.2 Zielsetzung 53
4.3.3 Nutzwertanalyse als Entscheidungshilfe bei einem Autokauf 53
4.4 Sicherheit 57
4.4.1 Benzin- und Dieselfahrzeuge 59
4.4.2 Erdgasfahrzeuge 59
4.4.3 Wasserstofffahrzeuge 59

4.4.4 Elektro- und Hybridfahrzeuge 60
4.5 Schlussfolgerungen 60
5 Zusammenfassung 61
5.1 Energieeffizienz 61
5.2 Ressourcenverbrauch und Emissionen 62
5.3 Kosten 62
6 Anhänge 64
6.1 Anhang Produktion und Entsorgung/Recycling 64
6.2 Anhang Well-to-Tank 68
6.3 Anhang Tank-to-Wheel 77
6.4 Anhang Rechtliche Aspekte, Sicherheit und Kundenanforderungen 78
6.4.1 Anhang 1: Fragebogen 78
6.4.2 Anhang 2: Kurze Darstellungen der Ergebnisse und Auswertungen des Fragenbogens 86
6.4.3 Anhang 3: Nutzwertanalyse 92
7 Literaturliste 94

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Export von Altfahrzeugen,.....12
Abbildung 2: Vergleich der CO_2-Emissionen in Primär- und Sekundärproduktion (Eigener Entwurf).....14
Abbildung 3: eigene Darstellung, Vergleich CO_2 und Preisvergleich.....15
Abbildung 4: Well-to-Tank Analyse Wasserstoff (Eigener Entwurf).....18
Abbildung 5: Well-to-Tank Analyse Elektrizität (Eigener Entwurf).....18
Abbildung 6: Well-to-Tank Analyse Diesel/Benzin (Eigener Entwurf).....19
Abbildung 7: Well-to-Tank Analyse Erdgas (Eigener Entwurf).....19
Abbildung 8: Vergleich fossilie Energieträger mit Wassersoff und Strom bei österreichischem Strom Mix (Eigener Entwurf).....21
Abbildung 9: Vergleich fossiler Energieträger mit Wasserstoff und Strom bei Verwendung des Ökomixes.(Eigener Entwurf).....22
Abbildung 10: Vergleich fossile Energieträger mit Wasserstoff bei dezentraler Versorgung und Verwendung des Ökomixes.(Eigener Entwurf).....22
Abbildung 11: Schwankungsbereich der TtW Emissionen von Wasserstoff und Strom bei unterschiedlichen Herstellungsverfahren und Stromzusammensetzungen. (Eigener Entwurf).....23
Abbildung 12 Betriebskosten von Wasserstoff bewertet mit dem Ökomix (Eigener Entwurf) 26
Abbildung 13: Kosten Kraftstoff €/100 km (Eigener Entwurf).....26
Abbildung 14: Well-to-Tank Wirkungsgrade Treibstoffe (Eigener Entwurf).....29
Abbildung 15: Verfügbare Energie (Eigener Entwurf).....30
Abbildung 16: Aufzuwendende Energie (Eigener Entwurf).....30
Abbildung 17: Relevante Wirkungsgrade der PEM-HD-Elektrolyse mit Ökostrom vor Ort (Eigener Entwurf).....31
Abbildung 18: Verhältnis benötigter Leistung zur PKW-Masse (Trattner et al., 2011).....34
Abbildung 19: Wirkungskette in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (eigene Darstellung).....35
Abbildung 20: Verbrauchskennfeld Ottomotor (van Basshuysen/Schäfer 2015, S. 28).....36
Abbildung 21: Wirkungskette Elektrofahrzeug (eigener Entwurf).....39
Abbildung 22: Wirkungskette im Wasserstoff-Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug (eigene Darstellung).....41
Abbildung 23: Vergleich Gesamtwirkungsgrad Tank-to-Wheel und Energiebedarf unterschiedlicher Antriebskonzepte (Eigener Entwurf).....43
Abbildung 24: Direkte CO_2- und H_2O-Emissionen (Eigener Entwurf).....44
Abbildung 25: Direkte CO_2-Emissionen im Vergleich (Eigener Entwurf).....44
Abbildung 26: Anschaffungs- und Treibstoffkosten (Eigener Entwurf).....45

Abbildung 27: Auswahl relevanter Kriterien mit übergeordneter Fragestellung 54
Abbildung 28: Energiebedarf für Bereitstellung und Betrieb (eigene Darstellung) 61
Abbildung 29: CO_2-Ausstoß bezogen auf 75.000 km Fahrleistung (eigene Darstellung).....62
Abbildung 30: Anschaffungs- und Treibstoffkosten bezogen auf 75.000 km Fahrleistung (eigene Darstellung) 63
Abbildung 31:Vergleich der CO_2-Emissionen beim VKM (Eigener Entwurf) Huber 65
Abbildung 32: Vergleich der CO_2-Emissionen beim HEV (Eigener Entwurf) Huber.....65
Abbildung 33: Vergleich der CO_2-Emissionen beim BZEV (Eigener Entwurf) Huber.....66
Abbildung 34: Vergleich der CO_2-Emissionen beim EV (Eigener Entwurf) Huber 66
Abbildung 35: Balkendiagramm zu Tabelle 6, Vergleich Materialkosten, Margeta 67
Abbildung 36: Balkendiagramm zu Tabelle 11, Vergleich Materialkosten und Recyclingpreise, Margeta 67
Abbildung 37: Wasserstoff Energiebedarf – Gruppiert in Module.....69
Abbildung 38: H_2Betriebskosten – Vergleich Strommix und Ökomix.....70
Abbildung 39: Verdichtung von Wasserstoff (Meier, Boris, 2014) 75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ressourcen, Reserven und Fördermengen (Eigener Entwurf, Quelle: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/) 4
Tabelle 2: CO_2-Emissionen bei der Produktion der einzelnen Fahrzeugtypen (Eigener Entwurf,Quelle: http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php, Frischenschlager 2010) 5
Tabelle 3: Materialzusammensetzung verschiedener PKW-Typen 6
Tabelle 4: Ressourcen für eine Brennstoffzelle 7
Tabelle 5: Seltene Erden für Li-Ionen-Akkumulator 8
Tabelle 6: Anfallende Kosten (Eigener Entwurf, Quellen: https://www.quandl.com, https://www.metalprices.com, http://www.infomine.com/, http://www.indexmundi.com/) 8
Tabelle 7: Preisentwicklung (Quellen unter anderem: https://knoema.com/ffzioof/aluminium-prices-forecast-long-term-to-2025;
http://www.tradingeconomics.com/commodity/cobalt/forecast;
https://www.statista.com/statistics/452028/average-annual-price-projection-for-li)..... 9
Tabelle 8: Einsparung bei der Produktion der einzelnen Fahrzeugtypen (Eigener Entwurf, Quelle:
https://www.regensburg.de/sixcms/media.php/121/broschuere_recycling_fuer_den_klimaschutz.pdf, Albus 2007, Förster 2015, Grimes 2008) 10
Tabelle 9: Einsparung beim Recycling (Eigens erstellte Tabelle, Quellen unter anderen: http://schrottpreise.eu/schrottpreise-liste/; http://www.schrottpreis.org/aluminium/; http://www.stahlpreise.eu/) 11
Tabelle 10: Abiotischer Ressourcenverbrauch (Eigener Entwurf, Quelle: https://enargus.fit.fraunhofer.de/pub/bscw.cgi/d4930453-2/*/*/Abiotischer%20Ressourcenverbrauch.html?op=Wiki.getwiki) 12
Tabelle 11: Zusammengestellt aus Tabelle 6 und Tabelle 9, die einzelnen Werte von jedem Fahrzeugtyp sind die berechneten Materialkosten, der Recycling-Preis neben dem Materialpreis dient nur dem Vergleich. 14
Tabelle 12: Energie und Kraftstoffbedarf (eigener Entwurf) 36
Tabelle 13: CO_2- und H_2O-Emissionen (eigene Darstellung) 37
Tabelle 14: Anschaffungs- und Betriebskosten (Eigener Entwurf) 38
Tabelle 15: Leistungen und Preise der Referenzfahrzeuge im Vergleich (Werte entsprechen den Werksangaben oder errechnen sich daraus) Stand Dezember 2016 48
Tabelle 16: Rechtliche Rahmenbedingungen für die Referenzfahrzeuge und den ReferenzfahrzeugnutzerInnen und deren Auswirkungen auf die Kosten für Anschaffung und Betrieb.....51

Tabelle 17: Bewertung der Handlungsalternativen durch Punktevergabe 55
Tabelle 18: Errechnung der Teil- und Gesamtnutzwerte 56
Tabelle 19: Sicherheitseigenschaften verschiedener Antriebsstoffe 58
Tabelle 20: CO_2 – Emissionen(Eigener Entwurf, Quelle: http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php, Frischenschlager 2010); Huber.....64
Tabelle 21: Einsparung durch Recycling (Eigener Entwurf, Quelle: https://www.regensburg.de/sixcms/media.php/121/broschuere_recycling_fuer_den_klimaschutz.pdf, Albus 2007, Förster 2015, Grimes 2008); Huber 64
Tabelle 22: CO_2eq/kWh, Anteil im EU Mix 68
Tabelle 23: Ökostrom Mix der Ökostrom AG, 2015 68
Tabelle 24: Umrechnungstabelle 69
Tabelle 25: Teilrechnungen Betriebskosten 70
Tabelle 26: –Zusammenfassung Betriebskosten (Eigener Entwurf, Quelle siehe Tabelle 25) 75
Tabelle 27: Wirkungsgrade und Heizwerte der fossilen Brennstoffe (h2data.de), (Spiegel online, 2007 & 2012) 75
Tabelle 28: Ökomix (oekostrom AG 2014) Ermittlung der Teilwirkungsgrade der Erzeugung 76
Tabelle 29: Strommix (Österreich 2014) Ermittlung der Teilwirkungsgrade der Erzeugung .76
Tabelle 30: Maintenance costs 77

Einführung

Wasserstoff, als ein in nahezu unbegrenzten Mengen auf der Erde verfügbares Element, ist ein Energieträger, mithilfe dessen Energie sowohl gespeichert als auch transportiert werden kann. Neben der Marktdominanz von Fossilen, sind zunehmende Forschung und Innovation im Bereich der Nutzbarmachung des Wasserstoffes nötig, denn ein umweltfreundliches Energiesystem mit Wasserstoff kann erst stattfinden, wenn dieser mithilfe erneuerbarer Energiequellen erzeugt wird. Der steigende Energiebedarf sowie die weltweit zunehmende Belastung der Umwelt sind Gründe, um vor allem im Bereich der Mobilität Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz und nachhaltigen Reduktion von Emissionen zu treffen.

Im Rahmen des Interdisziplinären Praktikums „Wasserstoff als Energieträger der Mobilität“ wurden konventionelle, fossile Treibstoffe wie Diesel, Benzin und Erdgas mit dem Einsatz alternativer Treibstoffe wie Hybrid, Strom oder Wasserstoff verglichen und ein grundlegender Bogen über die einzelnen Prozesse vom Bohrloch bis zum Rad und darüber hinaus gespannt. Die Ökobilanzierung dient dabei als eine Analysemethode, um die Umweltauswirkungen von Treibstoffen über deren gesamten Lebensweg aufzuzeigen. Dabei werden zahlreiche Effekte auf die Umwelt, von der Produktion über die Nutzungsphase bis hin zum Recycling, berücksichtigt und die Treibstoffe hinsichtlich ihrer Kosten, Emissionen und Wirkungsgrade, die über deren gesamten Lebenszyklus entstehen, miteinander verglichen.

Ziel dieses Berichts ist es, durch die Aufteilung des gesamten Prozesses Well-to-Wheel auf die Teilprozesse Well-to-Tank und Tank-to-Wheel, Einblick in Teilbereiche der Lebenszyklen verschiedener Treibstoffe zu erhalten. Darüber hinaus werden auch Aspekte wie die Produktion, das Recycling sowie Sicherheit, grundsätzliche rechtliche Rahmenbedingungen und Kundenanforderungen und -meinungen in den Vergleichen mitberücksichtigt. Die Komplexität von Mobilitätssystemen, die stark vernetzt sind und sich technologisch auf dem höchsten Niveau befinden, sowie die zunehmende Dringlichkeit zur Entwicklung neuer Innovationen und Techniken erfordern intelligente Umsetzungsstrategien und stetige Forschung im Bereich der Alternativenergie.

1 Produktion und Entsorgung/Recycling

Edelmayer Philip (NAWI)

Huber Markus (Geographie)

Margeta Marina (BWL)

1.1 Einleitung und Methodik

1.1.1 Einleitung

Oft werden beim Autokauf nur die Werte beachtet, welche das Fahrzeug während der Fahrt ausstößt, und die CO_2-Emissionen vor dem Kauf und nach dem Verkauf an den Schrotthändler vollkommen außer Acht gelassen. Dabei sind die Emissionen während der Rohstoffgewinnung nicht zu vernachlässigen und sollten bei der Wahl des Fahrzeugs beachtet werden. Um diese berechnen zu können, musste zuerst festgestellt werden, welche Ressourcen für die Herstellung und wie viel davon benötigt werden. Unter anderem wurden die Karosserie, der Tank, die Batterie und die Brennstoffzelle, je nach Autotyp, genauer unter die Lupe genommen. Folgend wurden auch die Kosten der einzelnen Materialien, der für die Produktion benötigten Ressourcen, für verschiedene Fahrzeugtypen anhand von aktuellen Preisen ausgerechnet und gegenübergestellt. Somit soll ein guter Vergleich in den Kategorien CO_2-Ausstoß und Kosten bei der Produktion und beim Recycling von Fahrzeugen geboten werden. Diese werden im folgenden Bericht dargestellt und erläutert. Berechnet wurden die Werte für die vorgegebenen Autotypen: mit Wasserstoff-Brennstoffzellen betriebene Fahrzeuge, E-Fahrzeuge, E-Hybrid-Fahrzeuge und mit einem Verbrennungskraftmotor betriebene Fahrzeuge.

1.1.2 Methodik und Aufgabenaufteilung

Als Quellen dienten Studien und Internetrecherchen. Die im Bericht und im Anhang dargestellten Tabellen wurden von den Gruppenmitgliedern eigenständig anhand der recherchierten Informationen erstellt.

Betont werden muss, dass innerhalb der Gruppe besonders auf Interdisziplinarität Wert gelegt wurde, wodurch jedes Mitglied einen guten Einblick in die jeweils anderen Themen gewinnen konnte. Dennoch wurde eine grobe Aufgabenzuteilung gemacht:

Herr Huber beschäftigte sich eingehend mit den Vorkommen der Ressourcen, wie viele noch auf der Erde vorhanden sind und wie viel CO_2-Emissionen beim Abbau und beim Recycling entstehen. Herr Edelmayer konzentrierte sich auf die Auflistung der benötigten Ressourcen, die benötigten Mengen und den Aufbau bzw. die Kosten einer Brennstoffzelle. Mit den vorhandenen Daten konnte Frau Margeta die Materialkosten berechnen und kalkulieren, wie viel der Kosten durch ein nachhaltiges Recycling eingespart werden können.

1.2 Ressourcen

Folgendes Kapitel gibt eine ungefähre Einschätzung davon, welche Mengen an Stahl, Kupfer und anderen Materialien auf der Erde verfügbar sind und welche jährlich produziert werden.

Unterschieden wird hier zwischen Ressourcen (auf der Erde verfügbare Mengen), Reserven (wirtschaftlich abbaubare Mengen) und Fördermengen (jährliche Produktion eines Materials). Die Daten stammen alle aus dem Jahr 2015.

Tabelle 1: Ressourcen, Reserven und Fördermengen (Eigener Entwurf, Quelle: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/)

	Ressourcen in t	**Reserven in t**	**Fördermengen in t/Jahr**
Eisen (Fe)	800 Mrd. Erz (davon 230 Fe)	190 Mrd. Erz (85 Fe)	1,64 Mrd.
Aluminium/Bauxit	55 bis 75 Mrd.	28 Mrd.	274 Mio.
Kupfer	3,5 Mrd.	720 Mio.	18,7 Mio.
Blei	2 Mrd.	89 Mio.	4,71 Mio.
Nickel	130 Mio.	79 Mio.	2,53 Mio.
Graphit	800 Mio.	230 Mio.	1,19 Mio.
Platin	100.000	66.000	178
Lithium	34 Mio.	14 Mio.	32.500

In obiger Tabelle sind die Werte zu Ressourcen, Reserven und Fördermengen der für ein Fahrzeug am Wesentlichsten nötigen Rohstoffe aufgelistet.

So gibt es zum Beispiel auf globaler Ebene etwa 190 Milliarden Tonnen Reserven an Eisen. Weltweit wird die Ressourcenmenge auf 800 Milliarden Tonnen Erz angenommen – 230 Milliarden davon sind Eisen.

Die jährliche Produktion an Stahl liegt bei ungefähr 1,64 Milliarden Tonnen (Fenton, 2016).

An Aluminium, welches hauptsächlich aus Bauxit hergestellt wird, ermittelt man etwa 28 Millionen Tonnen an Reserven. Die global verfügbaren Ressourcen liegen zwischen 55 und 75 Milliarden Tonnen Bauxit.

Die weltweite Produktion wird auf 274 Millionen Tonnen (Bauxit) bzw. 58,3 Millionen Tonnen (Aluminium) dotiert (Bray, 2016).

Es gibt auch Materialien, die eher selten zu finden sind. Dazu zählt zum Beispiel Platin. Laut aktuellen Berichten gibt es etwa 66 Millionen Kilogramm an Reserven. Außerdem fallen 178 Tausend Kilogramm in die Produktion. Die weltweite Verfügbarkeit der Ressource wird auf mehr als 100 Millionen Kilogramm geschätzt (Loferski, 2016). Durch die sehr knappen

Vorkommen und auch einer komplizierten Produktionsmethode ergibt sich der sehr hohe Verkaufspreis.

1.2.1 CO_2–Emissionen

Im Rahmen der Arbeit zum Teilbereich Produktion werden – wie in Tabelle 2 ersichtlich – zunächst die Emissionen der für den Fahrzeugbau benötigten Ressourcen ermittelt. Dabei wird die Belastung der Umwelt durch CO_2 in kg beschrieben.

Einen Großteil des Materials stellt dabei Stahl dar. Beim Bau eines Fahrzeugs mit Verbrennungskraftmotor (VKM) werden etwa 753 kg Stahl verarbeitet, das entspricht einem CO_2–Ausstoß von ungefähr 1160 kg. Auch Aluminium wird immer häufiger für die Herstellung verwendet. Damit wird bei ähnlicher Robustheit eine deutliche Senkung des Gewichts erreicht. Ein Großteil dieses Materials wird durch die sogenannte Schmelzflusselektrolyse hergestellt – hier entstehen etwa 80 – 90 % der gesamten CO_2–Emissionen (Frischenschlager, 2010).

Tabelle 2: CO_2-Emissionen bei der Produktion der einzelnen Fahrzeugtypen (Eigener Entwurf,Quelle: http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php, Frischenschlager 2010)

In kg CO_2	VKM	HEV	BZEV	EV
Eisen/Stahl	1160	1110	1070	990
Aluminium	15,6	15,6	15,6	17,42
Kupfer	55	220	440	440
Blei	38,66	38,66	-	38,66
Nickel	106	106	106	106
Graphit	26,1	26,1	26,1	26,1
Platin	18,61	18,61	18,61	18,61
Lithium	-	52,17	208,67	347,78
Glas	11,69	11,69	11,69	11,69

Anhand der Tabelle 2 werden die CO_2–Emissionen pro Fahrzeugtyp dargestellt. Darunter zählt der VW Golf als Referenz für VKM, HEV (Reichweite: 833 km, Leistung: 81 kW) und EV (Reichweite: 190 km, Leistung: 85 kW). Als Brennstoffzellenfahrzeug wird hier der Toyota Mirai (Reichweite: 502 km, Leistung: 114 kW) herangezogen.

Die Daten an CO_2 stammen allesamt aus dem Umweltbundesamt und wurden anschließend mit den ermittelten Werten der einzelnen Materialien hochgerechnet. Beim Vergleich der an

die Umwelt abgegebenen Schadstoffe fallen vor allem zwei Ressourcen auf. So entstehen bei der Verarbeitung von Graphit, welches unter anderem für die Herstellung der Elektroden beim Brennstoffzellenfahrzeug (BZEV) verwendet wird, lediglich 26,1 kg CO_2 pro Tonne des Materials. Dem genauen Gegenteil entspricht hier Platin – es wird für die Herstellung von Katalysatoren benötigt.

Die Gewinnung ist äußerst kompliziert, die CO_2–Emissionen pro Tonne belaufen sich auf etwa 12.408 Tonnen, damit ist dieser Prozess extrem umweltschädigend (Ittershagen, 2002).

1.2.2 Ressourcen-Aufstellung

Für die Berechnung der benötigten Ressourcen zum Bau eines Personenkraftfahrzeuges und deren Kosten werden ein Verbrennungskraftfahrzeug (VKM), ein Hybridelektrofahrzeug (HEV) und ein Brennstoffzellenfahrzeug (BZEV) miteinander verglichen. Zusätzlich wird noch ein Elektrofahrzeug (EV), dessen Reichweite an die anderen Fahrzeugtypen angepasst wurde, verwendet. Allerdings ist dieses Fahrzeug nicht produzierbar, da die Batterie für die Karosserie zu groß wäre. Zuletzt beinhaltet die Analyse noch ein tatsächlich produziertes Elektrofahrzeug (St. EV), welches nur eine Reichweite von 100 km hat.

Tabelle 3: Materialzusammensetzung verschiedener PKW-Typen

Materialzusammensetzung					
Material	Gesamt [kg/PKW]				
	VKM	HEV	BZEV	EV	St. EV
Stahl	753	723	693	645	482
Gusseisen	90	68	88	91	84
Aluminium	60	60	60	67	50
Glas	37	37	37	37	25
Kunststoffe	226	227	230	208	150
Gummi	62	62	62	54	40
NE/Metalle	40	40	40	40	40
Kupfer	10	40	80	80	80
Dämmstoff	20	20	20	20	14
Kobalt	0	5	24	217	40
Kohlenstoff	0	2	10	23	16
Lithium	0	3	2	100	20
Elektrolyt	0	6	5	250	50
Blei	20	20	0	20	20

Bei der Materialzusammensetzung (Tabelle 3) sind alle Ressourcen abgesehen von der Brennstoffzelle für alle Fahrzeuge aufgestellt. Die NE-Metalle beschreiben alle nicht separat aufgestellten Nichteisenmetalle beziehungsweise Edelmetalle, wie Nickel, Platin, Rhodium

und ähnliches. Die Brennstoffzelle wird im Folgenden noch einmal separat behandelt, da ihre Produktion sehr aufwendig und, im Vergleich zu den anderen Antriebsarten sehr teuer ist.

1.3 Brennstoffzelle & Batterie

1.3.1 Brennstoffzelle

Im Vergleich zu einem klassischen Elektrofahrzeug wird der für den Motor benötigte Strom nicht in einem Akku gespeichert, sondern mit einer Brennstoffzelle aus getanktem Wasserstoff und Luftsauerstoff erzeugt.

Das Herzstück einer Brennstoffzelle ist die sogenannte membrane electrode assembly (MEA). Sie besteht aus einer polymer electrolyte membrane (PEM) und einem gas diffusion layer (GDL). Die für einen m² MEA benötigten Ressourcen und ihre Kosten sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Ressourcen für eine Brennstoffzelle

Ressource	**Menge**	**Kosten**
Ionomer	50 g	124,6 €/kg
ePTFE	1 m^2	3,9 €/m^2
Pt_{40}/C_{60}	6,7 g	15,1 €/g
Lösungsmittel	393 g	0,2 €/kg
Kohlenstofffasern	30 g	17,1 €/kg
Phenolic resin	30 g	1,5 €/kg
Kohlenstoff rein	11 g	9,3 €/kg
PTFE	4 g	19,8 €/kg

Zusätzlich kommen auch noch die Kosten für die einzelnen Produktionsschritte hinzu was dazu führt, dass sich die Kosten eines Quadratmeters der MEA auf 142 € belaufen. In einem Brennstoffzellenkraftfahrzeug werden ungefähr 17 m^2 verbaut, dies führt zu einem Aufwand von 2.414 € – dieser Wert bezieht sich nur auf die Brennstoffzelle des Fahrzeuges.

1.3.2 Batterie eines Elektrofahrzeuges

Tabelle 5 zeigt die für eine Batterie benötigten NE-Metalle. Der Akku wird dabei angepasst, um die gleiche Reichweite wie ein Brennstoffzellenfahrzeug zu erreichen. Im Vergleich dazu ein Akkumulator eines Brennstoffzellenfahrzeuges (ungefähr 1,5 – 2 kWh) der als Ersatz für die sonst in Fahrzeugen verwendeten Blei-Akkumulatoren dient. Es ist zu erkennen, dass sehr große Mengen von Lithium und Kobalt benötigt werden um eine große Reichweite für ein Elektrofahrzeug zu erreichen.

Tabelle 5: Seltene Erden für Li-Ionen-Akkumulator

NE-Metalle (Li-Ionen Akku)		
Material	Li-Ionen Akku [kg/PKW]	
	BZEV	EV
Kobalt	5	200
Lithium	2,5	100
Elektrolyt (LiPF6)	6,4	250

1.4 Materialkosten

1.4.1 Kostenaufstellung zu den jeweiligen Ressourcen

Anhand der kg-Berechnung der notwendigen Ressourcen, wurde darauffolgend eine Kostenaufstellung erstellt. Die Preise pro Kilogramm sind aktuelle Preise auf dem Markt bzw. auf der Börse. Es wurden 4 – 7 Quellen zur Ermittlung der Preise jeder Materialien verwendet. Da es minimale Abweichungen zwischen den Werten gab, wurde ein Durchschnitt berechnet und dieser verwendet. Die meisten Ressourcen werden zu Dollar-Preisen gehandelt, dadurch wurden diese zu dem aktuellen Euro-Kurs von 1,07 in Euro umgerechnet. Die angegebenen Kosten beinhalten nur die Materialkosten, keine Fertigungskosten, da diese nicht ermittelt werden konnten.

Tabelle 6: Anfallende Kosten (Eigener Entwurf, Quellen: https://www.quandl.com, https://www.metalprices.com, http://www.infomine.com/, http://www.indexmundi.com/)

Material	Preis/kg	VKM	HEV	BZEV	EV	St. EV
Stahl	**0,356**	268,07 €	257,39 €	246,71 €	229,62 €	171,59 €
Gusseisen	**0,07 €**	6,30 €	4,76 €	6,16 €	6,37 €	5,88 €
Aluminium	**1,61 €**	96,60 €	96,60 €	96,60 €	107,87 €	80,50 €
Glas		220,00 €	220,00 €	220,00 €	220,00 €	220,00 €
Kunststoffe	**0,70 €**	158,20 €	158,90 €	161,00 €	145,60 €	105,00 €
Gummi	**1,72 €**	106,39 €	106,39 €	106,39 €	92,66 €	68,64 €
Gebrauchsmetalle	**2,00 €**	60,00 €	60,00 €	60,00 €	60,00 €	60,00 €
Nickel	**10,29 €**	102,87 €	102,87 €	102,87 €	102,87 €	102,87 €
Kupfer	**5,30 €**	53,00 €	212,00 €	424,00 €	424,00 €	424,00 €
Dämmstoff	**7,00 €**	140,00 €	140,00 €	140,00 €	140,00 €	98,00 €
Kobalt	**31,35 €**	- €	156,75 €	752,40 €	6.802,95 €	1.254,00 €
Kohlenstoff	**1,42 €**	- €	2,84 €	14,20 €	32,66 €	22,72 €
Lithium	**7,00 €**	- €	21,00 €	14,00 €	700,00 €	140,00 €
Elektrolyt	**20,00 €**	- €	120,00 €	100,00 €	5.000,00 €	1.000,00 €
Blei	**2,02 €**	40,40 €	40,40 €	- €	40,40 €	40,40 €
Gesamtkosten der Produktion		**1.251,83 €**	**1.699,90 €**	**2.444,33 €**	**14.105,00 €**	**3.793,60 €**
+ Brennstoffzelle (beinhaltet Fertigungskosten)				2.414 €		
				4.858,33 €		

Nach der Materialkosten-Rechnung ist klar ersichtlich, dass Fahrzeuge die mit einem Verbrennungsmotor betrieben werden und Hybridelektrofahrzeuge preislich deutlich im Vorteil sind. Diese brauchen keine oder geringere Mengen an den kostenintensivsten Materialien wie Kobalt, Lithium, Elektrolyten und Kupfer. Am teuersten sind, wegen des hohen Bedarfs der erwähnten Ressourcen, eindeutig Elektrofahrzeuge. Die Menge an Kupfer ist hierbei bei Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeug gleich. In der Kostenkalkulation für die Brennstoffzellenautos sind die Fertigungskosten der Brennstoffzellen mitberücksichtigt, wobei der Großteil Materialkosten sind.

1.4.2 Preisentwicklung

Tabelle 7: Preisentwicklung (Quellen unter anderem: https://knoema.com/ffzioof/aluminium-prices-forecast-long-term-to-2025; http://www.tradingeconomics.com/commodity/cobalt/forecast; https://www.statista.com/statistics/452028/average-annual-price-projection-for-li)

Ressource	Jahr	Preis in $	Jahr	Preis in $
Aluminium	2017	1,626	2025	2,100
Kobalt	2017	33,00	2020	26,20
Kupfer	2017	4,866	2025	7,00
Lithium	2017	7,69	2025	9,39
Nickel	2017	10,029	2025	20,00

Besonders interessant ist die Preisentwicklung von Lithium, Nickel, und Kobalt, da diese die kostenintensivsten Ressourcen sind:

1.4.2.1 Lithium

Über den Preisanstieg von Lithium lässt sich nur spekulieren, da der Bedarf zahlreicher Quellen nach sehr stark wächst. Dies wird bei wallstreet-online.de folgendermaßen beschrieben: „... Seit dem Jahr 2000 steigt die Nachfrage nach Lithium im Schnitt um 20 % pro Jahr an. Bis zum Jahr 2020 erwarten Branchenexperten Wachstumsraten von durchschnittlichen 12 %. Diese starke Nachfrage hat in den letzten Jahren für einen außergewöhnlich starken Aufwärtstrend beim Lithium-Preis gesorgt: Von $ 2.000/Tonne im Jahr 2004 hat sich der Preis mittlerweile auf knapp $ 6.000/Tonne verdreifacht..." (wallstreet-online.de, 2015). Der Preisanstieg hängt jedoch davon ab, wie schnell eine Technologie für das Recyceln von Lithium gefunden wird.

1.4.2.2 Kobalt

Verschiedener Quellen zufolge hat sich die Nachfrage seit 2004 verdreifacht. Zusätzlich hat der Einsatz zur Produktion von Hochleistungs-Batterien in der Hybrid-Technik für einen

Preisaufschwung gesorgt. Die meisten Reserven befinden sich jedoch in politisch unsicheren Regionen, was den Preis sehr unsicher macht.

1.4.2.3 Nickel

Es kam in letzter Zeit immer mehr zu Schließungen von Minen angesichts der gedrückten Preissituation, was den Kurs sinken ließ. Da jedoch in China für die Stahlproduktion nach einem Investitionsprogramm für den Gebäudebau vermehrt Nickel gebraucht wird, sollte dies den Nickelkonsum um jährlich 3,5 % anwachsen lassen. Durch Chinas zunehmende Investitionen könnte sich beim Nickelpreis auf längere Sicht ein Steigerungspotential entwickeln.

1.5 Recycling

1.5.1 Einsparung von CO_2 bei der Produktion der einzelnen Fahrzeugtypen

Nachdem ein eindeutiger Trend besteht, die verfügbaren Ressourcen der Erde zu schonen, muss nach und nach verstärkt auf nachhaltige Methoden zur Gewinnung jener umgestiegen werden. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Einsparung von CO_2–Emissionen durch den Verzicht des Produktionsschrittes des Abbaus.

Durch diese Einschränkung fallen lediglich Schadstoffe bei Erfassung, Aufbereitung und der Verarbeitung an. Dabei werden je nach Material mehr oder weniger Emissionen eingespart (Albus, 2007).

Tabelle 8: Einsparung bei der Produktion der einzelnen Fahrzeugtypen (Eigener Entwurf, Quelle: https://www.regensburg.de/sixcms/media.php/121/broschuere_recycling_fuer_den_klimaschutz.pdf, Albus 2007, Förster 2015, Grimes 2008)

In kg CO_2	VKM	HEV	BZEV	EV
Eisen/Stahl	510	490	470	440
Aluminium	1,1	1,1	1,1	1,22
Kupfer	35,2	140,8	281,6	281,6
Blei	1,93	1,93	1,93	1,93
Nickel	11	11	11	11
Glas	0,94	0,94	0,94	0,94

Die Methode des Recyclings ist gegenwärtig jedoch nicht immer sinnvoll. Einerseits gibt es noch keine wirtschaftlichen Arbeitsweisen – dabei würden keine nennenswerten geringeren

Emissionen erzielt werden. Ein Beispiel dazu ist Lithium: auch wenn es diverse technische Möglichkeiten gibt, ist die Durchführung aufgrund des geringen oder fehlenden Unterschieds an Emissionen derzeit nicht rentabel.

Auf der anderen Seite gibt es von einigen Materialien noch reichlich Reserven, womit sich die Frage der möglichen Wiederverwertung noch nicht stellt – hierbei ist zum Beispiel Graphit zu nennen (Förster, 2015).

Bei der Sekundärproduktion (Recycling) von Stahl für ein Hybridfahrzeug (HEV) entstehen nur 490 kg CO_2, im Vergleich zur Primärproduktion entspricht das einer Einsparung von etwa 56 %. Bei der Wiederverwertung von Aluminium werden etwa beim wasserstoffbetriebenen Fahrzeug (BZEV) lediglich 1,1 kg CO_2 an die Umwelt abgegeben. Somit reduziert sich die Konzentration der Schadstoffe auf ein Minimum, diese entspricht einer Reduktion von 93 % (Albus, 2007).

1.5.2 Einsparung an Kosten durch Recycling

Bei der Berechnung der Kosteneinsparung wurden die Kilogramm-Angaben der Ressourcenaufstellung herangezogen und mit den jeweiligen aktuellen Schrottpreisen per Kilogramm hochgerechnet. Da seit 2015 Verwertungsbetriebe eine Verwertungsquote von mindestens 95 % des durchschnittlichen Gewichts der Altfahrzeuge zu erbringen haben, wurden die Gesamtersparnisse zusätzlich mit 0,95 multipliziert. Laut „schrottpreise.eu“ sind Halter bzw. Eigentümer eines Fahrzeugs grundsätzlich dazu verpflichtet, Altfahrzeuge an eine zertifizierte Rücknahmestelle zu übergeben. Andernfalls kann eine Ordnungswidrigkeit mit einem Bußgeld von bis zu 50.000 € geahndet werden. Ein Verwertungsnachweis wird von der Rücknahmestelle ausgestellt und muss bei der Abmeldung vorgewiesen werden (Vgl. schrottpreis.org). Leider ist der Kreislauf vom Kaufen, Verwenden und Recyceln eines Fahrzeugs noch immer ein Traum, denn über zwei Drittel der Altfahrzeuge werden verschifft und landen anderswo auf nicht nachhaltigen Mülldeponien.

Tabelle 9: Einsparung beim Recycling (Eigens erstellte Tabelle, Quellen unter anderen: http://schrottpreise.eu/schrottpreise-liste/; http://www.schrottpreis.org/aluminium/; http://www.stahlpreise.eu/)

Material	Preis/kg	VKM	HEV	BZEV	EV	St. EV
Stahl	**0,20 €**	150,60 €	144,60 €	138,60 €	129,00 €	96,40 €
Aluminium	**0,60 €**	36,00 €	36,00 €	36,00 €	40,20 €	30,00 €
Gebrauchsmetalle	**0,12 €**	3,60 €	3,60 €	3,60 €	3,60 €	3,60 €
Nickel	**10,20 €**	102,00 €	102,00 €	102,00 €	102,00 €	102,00 €
Kupfer	**4,25 €**	42,50 €	170,00 €	340,00 €	340,00 €	340,00 €
Kobalt	**24,89 €**	- €	124,45 €	597,36 €	5.401,13 €	995,60 €
Blei	**1,30 €**	26,00 €	26,00 €	- €	26,00 €	26,00 €
Gesamtersparnis Recycling		**360,70 €**	**606,65 €**	**1.217,56 €**	**6.041,93 €**	**1.593,60 €**
	95%	**342,67 €**	**576,32 €**	**1.156,68 €**	**5.739,83 €**	**1.513,92 €**

Abbildung 1: Export von Altfahrzeugen,

Quelle: http://www.schrottpreis.org/schrottpreis/

Dabei gibt es vermehrt Initiativen für das Recyceln von Fahrzeugen, da sich dieses zu einem immer lukrativeren Geschäft entwickelt. „Denn je größer das Angebot, desto geringer die Preise für die Materialien, aus denen zum Beispiel neue Fahrzeuge werden. Im Durchschnitt wiegt jedes Kfz-Wrack knapp eine Tonne, das macht bis zu 500.000 Tonnen Schrott – jedes Jahr.“ (Welt.de: Das Märchen vom würdigen Tod/2014)

1.5.3 Der Abiotische Ressourcenverbrauch (ADP – Abiotic Depletion Potential)

Der ADP gibt an, welche nicht regenerativen Ressourcen für die Herstellung eines Produkts aus der Umwelt entnommen werden müssen. Abiotisch heißt dabei, dass keine Lebewesen an der Bildung der Ressourcen beteiligt sind (vgl. enargus.fit.fraunhofer.de). Im Folgenden werden der ADP als auch die statische Reichweite der einzelnen Ressourcen verglichen.

Tabelle 10: Abiotischer Ressourcenverbrauch (Eigener Entwurf, Quelle: https://enargus.fit.fraunhofer.de/pub/bscw.cgi/d4930453-2//*/Abiotischer%20Ressourcenverbrauch.html?op=Wiki.getwiki)*

	Statische Reichweite in Jahren	ADP in kg/Jahr VKM	HEV	BZEV	EV
Eisen/Stahl	115,85	6,5	6,24	5,98	5,57
Aluminium	102,19	0,59	0,59	0,59	0,66
Kupfer	38,5	0,26	1,04	2,08	2,08
Blei	18,9	1,06	1,06	-	1,06
Nickel	31,23	1,6	1,6	1,6	1,6
Lithium	430,77	-	0,007	0,028	0,067

Bei der Produktion eines Elektrofahrzeuges (EV) werden zum Beispiel ungefähr 2,08 kg an nicht regenerativen Stoffen benötigt.

Die statische Reichweite gibt das Verhältnis der Reserven zu den jährlichen Fördermengen an – der Kehrwert davon ist der sogenannte Ressourcenverknappungsfaktor R.

Der abiotische Ressourcenverbrauch berechnet sich aus dem Produkt der Masse des Inputstoffs m und dem Ressourcenverknappungsfaktor R (Pieper, 2016).

Aus der statischen Reichweite wird ein Wert in Jahren berechnet. Aus diesem schließt man auf die Verfügbarkeit einer Ressource und wie lange diese bei konstantem Verbrauch noch vorhanden ist.

Anhand der Tabelle 10 kann man nun auf die Verfügbarkeit jener Materialien schließen. Bei den geringen Reserven an Blei würde man zum Beispiel etwa 19 Jahre auskommen, während die reichhaltigen Vorkommen an Lithium noch ungefähr 431 Jahre vorhanden sein werden.

1.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

1.6.1 Vergleich der CO_2–Emissionen zwischen Primär- und Sekundärproduktion

Wie in Abbildung 2 ersichtlich, gibt es teilweise deutliche Unterschiede zwischen Primär- und Sekundärproduktion.

Die höchsten CO_2–Emissionen pro Tonne werden bei der Herstellung von Aluminium erzeugt. Diese ergeben sich aus der Schmelzflusselektrolyse, dem Bauxitabbau und der Tonerdeherstellung. Auf der anderen Seite entstehen bei der Glasproduktion nur sehr geringe Mengen an CO_2.

Auch wenn bei Aluminium die größten Mengen an CO_2 an die Umwelt abgegeben werden, so reduzieren sich die Werte durch die Sekundärproduktion auf lediglich 7 %. Im Verhältnis hat man somit die größte Einsparung durch Recycling. Bei Kupfer ist dieser enorme Vorteil nicht in diesem Ausmaß gegeben. Vergleichswerte zu den einzelnen Fahrzeugtypen sind dem Anhang zu entnehmen.

Die Wichtigkeit der Durchführung von Recycling wird hier eindeutig hervorgehoben. Um die Umwelt auch in Zukunft zu schonen und die CO_2–Emissionen auf einen möglichst geringen Wert zu senken, sollte also auf eine weiterhin steigende Wiederverwertungsquote geachtet werden.

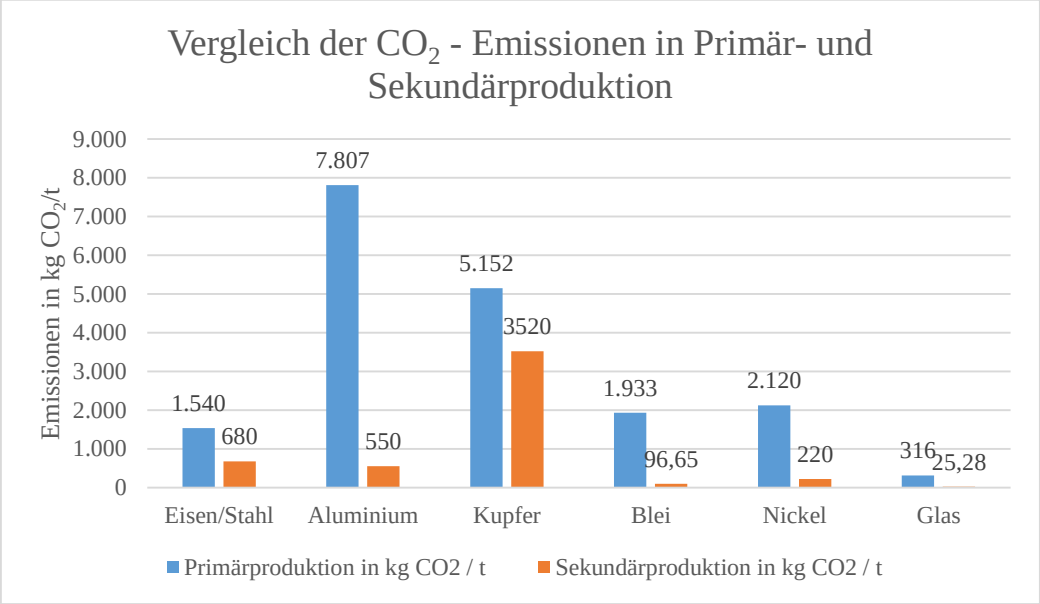


Abbildung 2: Vergleich der CO_2-Emissionen in Primär- und Sekundärproduktion (Eigener Entwurf)

1.6.2 Vergleich von Materialkosten mit den Recycling-Preisen

Da in die Recycling-Preise nicht alle Ressourcen einkalkuliert wurden, aus Mangel an verlässlichen Informationen, dient die Tabelle 11 nur einer sehr groben Veranschaulichung. Zum Beispiel gibt es, wie schon erwähnt, bei der Lithium-Wiederverwertung noch nicht genügend Technologien. Somit kann man nur die Behauptung in den Raum stellen, dass dieser Bereich besonders bei Elektroautos zukünftig eine große Rolle spielen wird.

Tabelle 11: Zusammengestellt aus Tabelle 6 und Tabelle **9***, die einzelnen Werte von jedem Fahrzeugtyp sind die berechneten Materialkosten, der Recycling-Preis neben dem Materialpreis dient nur dem Vergleich.*

Material	Rec-Preis/	Preis/kg	VKM	HEV	BZEV	EV	St. EV
Stahl	0,20 €	**0,36 €**	268,07 €	257,39 €	246,71 €	229,62 €	171,59 €
Aluminium	0,60 €	**1,61 €**	96,60 €	96,60 €	96,60 €	107,87 €	80,50 €
Gebrauchsmetalle	0,12 €	**2,00 €**	60,00 €	60,00 €	60,00 €	60,00 €	60,00 €
Nickel	10,20 €	**10,29 €**	102,87 €	102,87 €	102,87 €	102,87 €	102,87 €
Kupfer	4,25 €	**5,30 €**	53,00 €	212,00 €	424,00 €	424,00 €	424,00 €
Kobalt	24,89 €	**31,35 €**	- €	156,75 €	752,40 €	6.802,95 €	1.254,00 €
Blei	1,30 €	**2,02 €**	40,40 €	40,40 €	- €	40,40 €	40,40 €
Materialgesamtkosten			**620,94 €**	**926,01 €**	**1.682,58 €**	**7.767,71 €**	**2.133,36 €**
- Recycling-Preise			342,67 €	576,32 €	1.156,68 €	5.739,83 €	1.513,92 €
Restbetrag			**278,27 €**	**349,69 €**	**525,90 €**	**2.027,88 €**	**619,44 €**

Aus der Tabelle ist trotz der fehlenden restlichen Ressourcenwerte gut ersichtlich, dass sich das Recycling von Fahrzeugen geldlich sehr lohnt und gefördert werden sollte.

Beachtlich ist, dass gerade bei den kostspieligen Materialien der Schrottpreis sehr nahe dem „Neupreis“ liegt und es daher sehr profitabel ist diese wiederzuverwerten.

1.6.3 Vergleich CO_2 und Preisvergleich

Um einen nachvollziehbaren Vergleich herzustellen, wurden nur die Materialien in die Berechnungen mit einbezogen, die in der Tabelle 2 vorkommen. Dazu muss erwähnt werden, dass dadurch auch die Brennstoffzelle nicht in die Berechnung miteingeflossen ist, da von dieser keine CO_2-Werte bekannt sind. Dadurch sind auch die kostspieligen Materialien wie Kobalt und die Elektrolyte nicht in das Diagramm (Abbildung 3) mit einbezogen worden, was das Ergebnis erheblich verfälscht. Die Abbildung 35 bietet ein deutlich besseres Bild, was dir Kosten angeht.

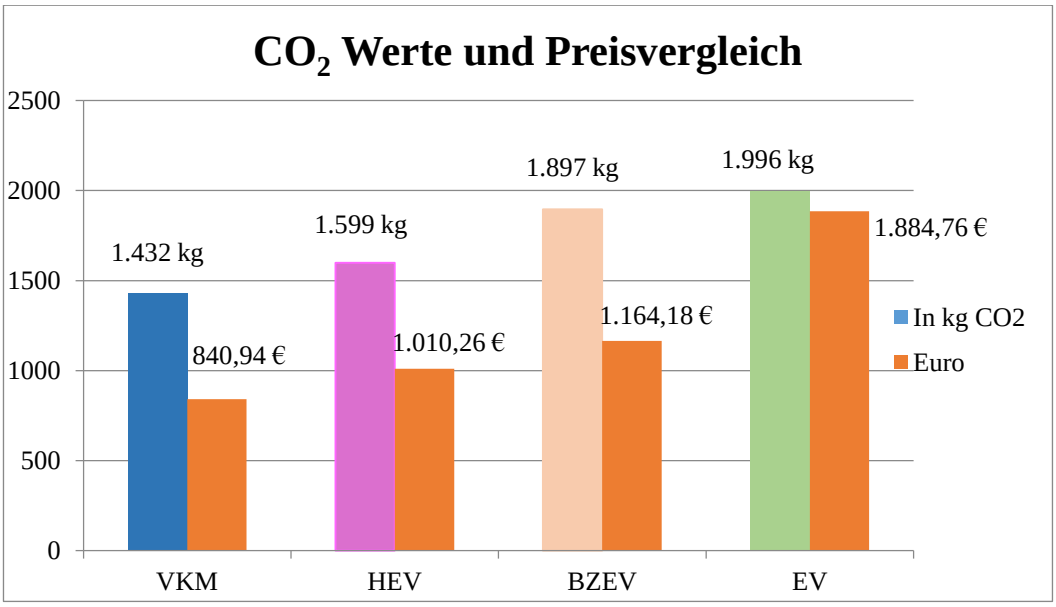


Abbildung 3: eigene Darstellung, Vergleich CO_2 und Preisvergleich

1.6.4 Schlussfolgerung und Lösungsvorschläge

Wenn dieses Wissen zum Thema Recycling für die Bevölkerung zugänglicher wäre, würde das vielleicht die Rücklaufrate der an Rücknahmestellen abgegebenen Autos erhöhen. Mehr Kampagnen in diese Richtung könnten das Bewusstsein für das Recyceln von Fahrzeugen stärken und somit die Umwelt vor Millionen von nicht ordnungsgemäß „verschrotteten“ Fahrzeugen schützen.

2 Well-to-Tank

Böhm Laura (BWL)

Leitgeb Thomas (NAWI)

Sabitzer Jakob (NAWI)

2.1 Einleitung

Im Rahmen des Interdisziplinären Praktikums „Wasserstoff als Energieträger in der Mobilität“ ist es Aufgabe der Gruppe 2, eine Well-to-Tank Analyse zu erstellen. Ziel dieser Analyse ist es, konventionelle Treibstoffe mit Wasserstoff und Elektrizität als Energieträger zu vergleichen. Zu diesem Zweck wird der Weg der Energieträger von seiner Herstellung bis zu ihrer Verfügbarkeit für den Endkunden (Tankstelle) nachgezeichnet. Entlang dieses Weges liegt das Hauptaugenmerk auf folgenden Fragestellungen:

1.) Ökologischer Aspekt: Wie stark ist die Umweltbelastung, welche von den Energieträgern verursacht wird, bevor sie in den Tank gelangen. Für die Bearbeitung dieses Aspekts ist Jakob Sabitzer zuständig.

2.) Ökonomischer Aspekt: Welche Kosten fallen auf diesem Wege an. Laura Böhm ist die Zuständige für diesen Aspekt.

3.) Technischer Aspekt: Wie viel Energie muss aufgewendet werden, um den Energieträger bereitstellen zu können (ausgedrückt durch den Wirkungsgrad). Thomas Leitgeb bearbeitet diesen Aspekt.

Mit der Beantwortung dieser Fragestellungen soll die Möglichkeit des Vergleichs zwischen verschiedenen Energieträgern der Mobilität gegeben werden, als Teilergebnisse fließen die Resultate in die Ökobilanz, welche ein ganzheitliches Bild der Thematik wiedergeben soll.

Energieaufwand, Schadstoffe und Kosten fallen nicht nur im Fahrbetrieb, sondern im gesamten Lebenszyklus an. Deshalb ist es auch wichtig, verschiedene Wege bis zum Tank zu verfolgen. Insbesondere beim Wasserstoff und beim Strom fallen Emissionen nur außerhalb des Fahrbetriebs an, deswegen ist es notwendig, verschiedene Herstellungsarten untereinander und mit fossilen Energieträgern zu vergleichen.

2.2 Theoretischer/konzeptioneller Hauptteil der Arbeit

In der Well-to-Tank Analyse wurde sowohl für Wasserstoff, als auch für Elektrizität und fossile Treibstoffe eine Systemabgrenzung durchgeführt. Die folgenden Abbildungen sollen einen Überblick über die Bereitstellung dieser Treibstoffe liefern. Abbildung 4 zeigt die Well-to-Tank Analyse für Wasserstoff. Die in Abbildung 4 blau gefärbten Blöcke, stellen die Ausgangsstoffe für die Herstellung von Wasserstoff dar, welche wiederum in rot gefärbt sind. Die violetten Blöcke stehen für die Bearbeitung des Treibstoffes und die Grünen für Transport und Speicherung. Abbildung 4 zeigt nicht alle möglichen Herstellungsvarianten, sondern nur diejenigen, welche aus ökologischer, ökonomischer und technischer Sicht

relevant erschienen. So ist zum Beispiel der flüssige Transport von Wasserstoff möglich, jedoch nicht so effizient wie der gasförmige und wird hier nicht weiter erörtert. Die Abkürzung HD steht für Hochdruck (ca. 350 bar) und ND (ca. 1 bar) steht für Niederdruck.

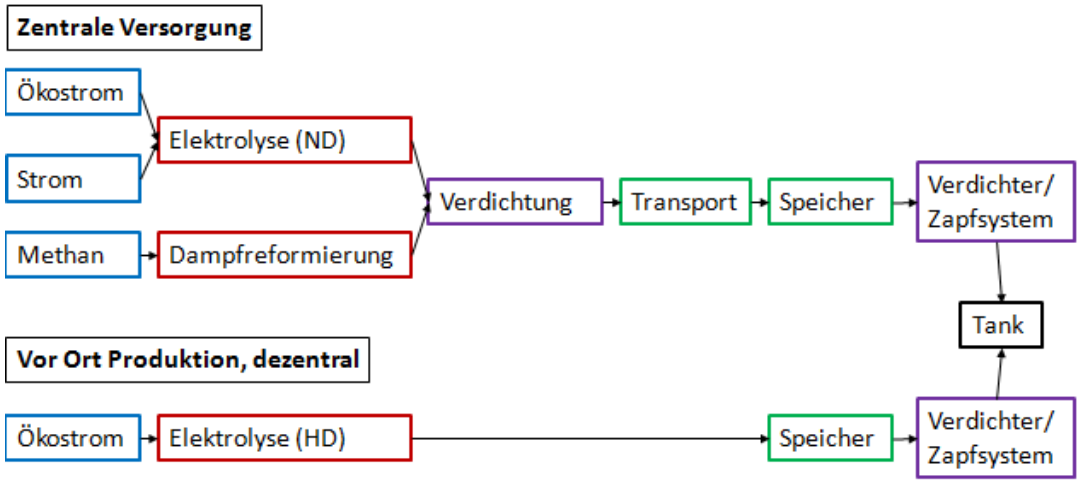


Abbildung 4: Well-to-Tank Analyse Wasserstoff (Eigener Entwurf)

Abbildung 5 veranschaulicht denselben Prozess für Elektrizität als Treibstoff. "T" wurde in **Abbildung 5** als Kürzel für etwaige Transformatoren verwendet, welche nach der Stromerzeugung durch diverse Anlagen für die Zusammenführung in einen Strommix beziehungsweise in einen Ökomix verwendet werden. Der Transport ist wieder grün gekennzeichnet.

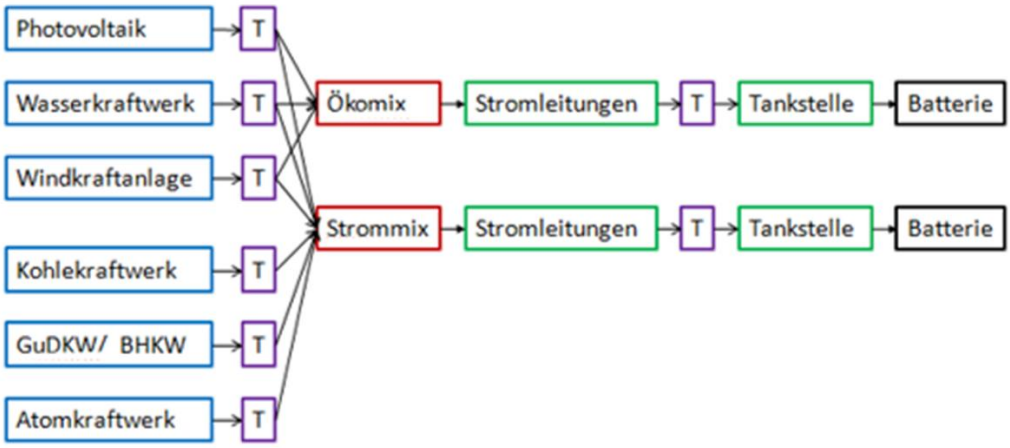


Abbildung 5: Well-to-Tank Analyse Elektrizität (Eigener Entwurf)

Der Ausgangsstoff in Abbildung 6, welcher die Grundlage für die Treibstoffe Diesel und Benzin ist, muss nicht erzeugt, sondern verarbeitet werden.

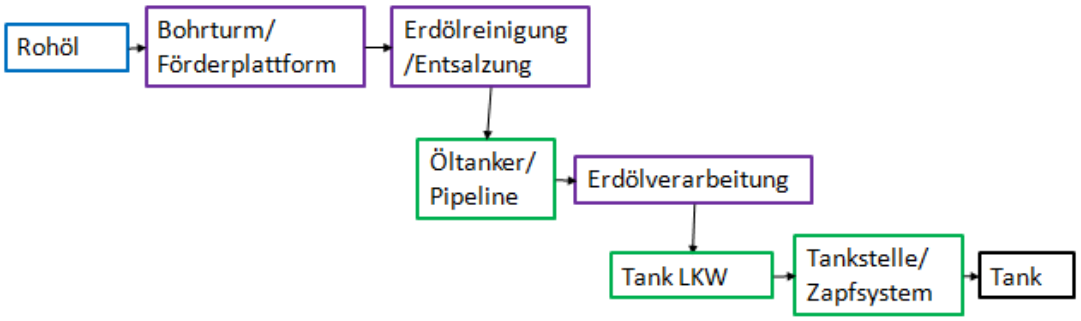


Abbildung 6: Well-to-Tank Analyse Diesel/Benzin (Eigener Entwurf)

Der in Abbildung 7 gezeigte Prozess für die Bereitstellung von Erdgas als Treibstoff ist nach demselben Farbmuster erstellt wie jener in Abbildung 6.

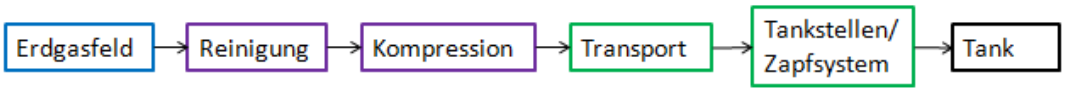


Abbildung 7: Well-to-Tank Analyse Erdgas (Eigener Entwurf)

2.3 Ökologischer Aspekt

2.3.1 Methodik

Für die fossilen Treibstoffe werden im Internet recherchierte Werte von Well-to-Tank Analysen verwendet.

Diesel: In der verwendeten Analyse wird angenommen, dass Rohöl über abweichende Transportwege zur Raffinerie Wien-Schwechat kommt, hier erfolgt die Dieselherstellung. Nach Verteilung erfolgt die Verteilung auf das Tankstellennetz und hier endet die Well-to-Tank Betrachtung (Capek, 2007; Öko-Institut: (GEMIS) 2007).

Benzin: Nach Erdölextraktion und -förderung erfolgt der Transport zur Raffinerie, wo Benzin daraus hergestellt wird. Anschließend erfolgt die Verteilung zum Tankstellennetz (Edwards et al., 2007).

Erdgas: Im hier betrachten Fall wird das Gas innerhalb der europäischen Union gewonnen und vor Ort verarbeitet. Im Anschluss folgt der Transport zum Tankstellennetz. Für Erdgas, welches weitere Wege zurücklegen muss (z.B. aus Russland kommend), würde sich der Wert auf Grund des höheren Energiebedarfs der langen Pipelines vergrößern (Edwards et al., 2007; Illini B., 2007).

Für die fossilen Brennstoffe wird ein durchschnittlicher Verbrauch von 5,84 L/100 km verwendet (beim Erdgas Äquivalenz Liter) (Edwards et al, 2007).

Die Literaturwerte sind in der Einheit g CO_2eq pro km angegeben. Für bessere Vergleichbarkeit wird der Bezug auf Energiewert in Einheit kWh des Treibstoffes umgerechnet. Für die Umrechnung werden folgende Werte herangezogen:

Diesel: 9,7 kWh/L; Benzin: 8,5 kWh/L; Erdgas: 12,3 kWh/kg (Kramer, 2010; Hahne, 2010)

Strom: Für die Ermittlung der anfallenden Emissionen des Strommixes bei dessen Erzeugung und Bereitstellung übers Netz wird der österreichische Strommix (Tabelle 22 im Anhang) herangezogen, mit den Werten für anfallende CO_2eq je Art der Energieerzeugung pro Einheit kWh kommt man über die prozentuellen Anteile auf für den Strommix anfallende CO_2eq. Für den Ökostrom wird ein österreichischer Ökomix (Tabelle 23 im Anhang) herangezogen. Die Netzverluste von durchschnittlich 5,7 % werden ebenfalls einbezogen: Die Emissionen erhöhen sich um 5,7 % (dieser Teil gelangt zwar nicht zum Verbraucher, muss aber trotzdem bereitgestellt werden) (E-Control Stromkennzeichnungsbericht 2015; Stöger, 2015; Statistisches Bundesamt, 2013).

Wasserstoff: Wasserstoff hat einen Energiegehalt von 33,33 kWh/kg. Für die technischen Wirkungsgrade von der Elektrolyse, den Transport und die Verdichtung werden die Werte der Energie- und Wirkungsgrad-Analyse verwendet, die Verweise sind dort zu finden. Für die Aufbringung des Stromes (für Wasserstoff Herstellung und Verdichtung) wird wiederum zwischen EU-Mix und Ökomix unterschieden. Bei der Dampfreformierung entstehen Emissionen, die der Verbrennung von Erdgas entsprechen [219 g CO_2eq/kWh] (Edwards et al., 2007; Illini B., 2007, linde-gas.de; h2data.de).

Um alle Werte in die funktionelle Einheit [g CO_2eq/100 km] zu bringen, werden die Ergebnisse mit der für 100 Fahrkilometer benötigten Energie multipliziert. Die dafür benötigen Werte stammen von der „Tank-to-Wheel“ Analyse.

2.3.2 CO_2-Analyse

Diesel: Für Diesel bekommt man nach Literaturangaben von Well-to-Tank Analysen auf einen Wert von 37,07 g CO_2eq/kWh. (Capek, 2007; Öko-Institut: (GEMIS) 2007)

Benzin: Für Benzin bekommt nach Literaturangaben einen Wert von 46,33 g CO_2eq/kWh. (Edwards et al, 2007)

Erdgas: Für Erdgas wird ein Wert von 26,34 g CO_2eq/kWh angegeben. (Edwards et al., 2007; Illini B., 2007)

Strom: Beim Strom wird zwischen dem österreichischen Strommix und einem Ökomix unterschieden. Hierbei ergibt sich in der Well-to-Tank Analyse ein CO_2eq von 21,8 g CO_2eq/kWh für den Ökomix, und 92,2 g CO_2eq/kWh für den österreichischen Strommix.

Wasserstoff: Da es bei Wasserstoff verschiedene Varianten der Herstellung und der Energiebereitstellung gibt, werden hierfür auch unterschiedliche Werte verglichen. (Hahne, 2010)

Abbildung 8 vergleicht fossile Energieträger mit Wasserstoff und Elektrizität, wobei der österreichische Mix für Herstellung und Verdichtung herangezogen wird, und die Elektrolysen erfolgen bei Niederdruck. In Abbildung 9 erfolgt der Vergleich analog, nur wird diesmal der Ökomix verwendet. In Abbildung 10 wird schließlich die dezentrale Versorgung, bei der die Hochdruckelektrolyse verwendet wird, zum Vergleich herangezogen.

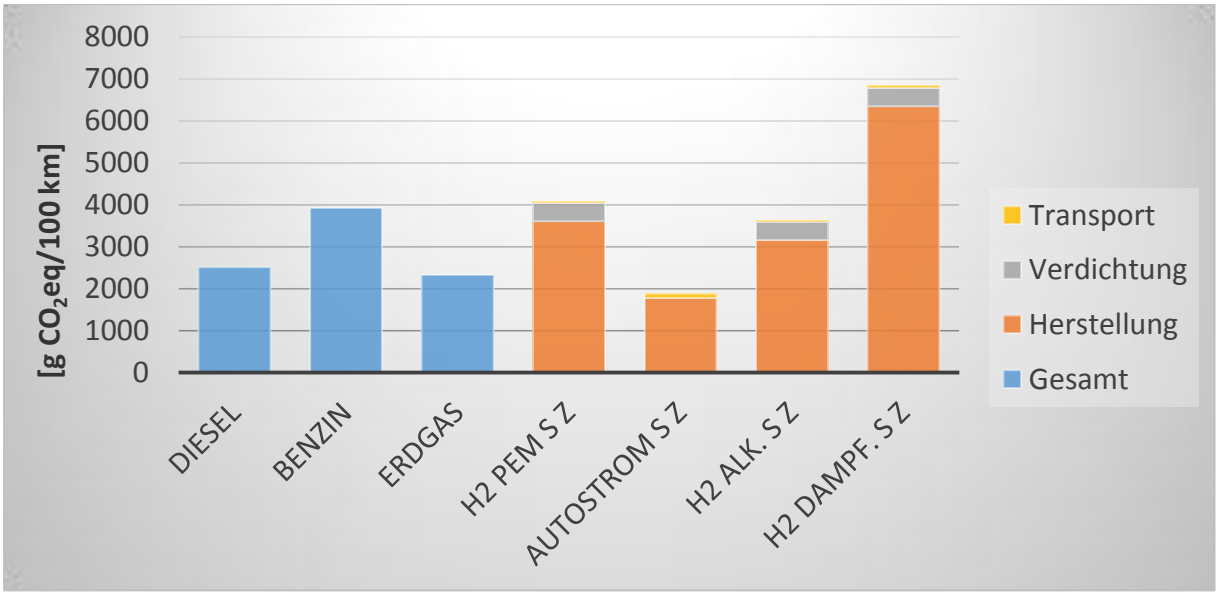


Abbildung 8: Vergleich fossilie Energieträger mit Wassersoff und Strom bei österreichischem Strom Mix (Eigener Entwurf)

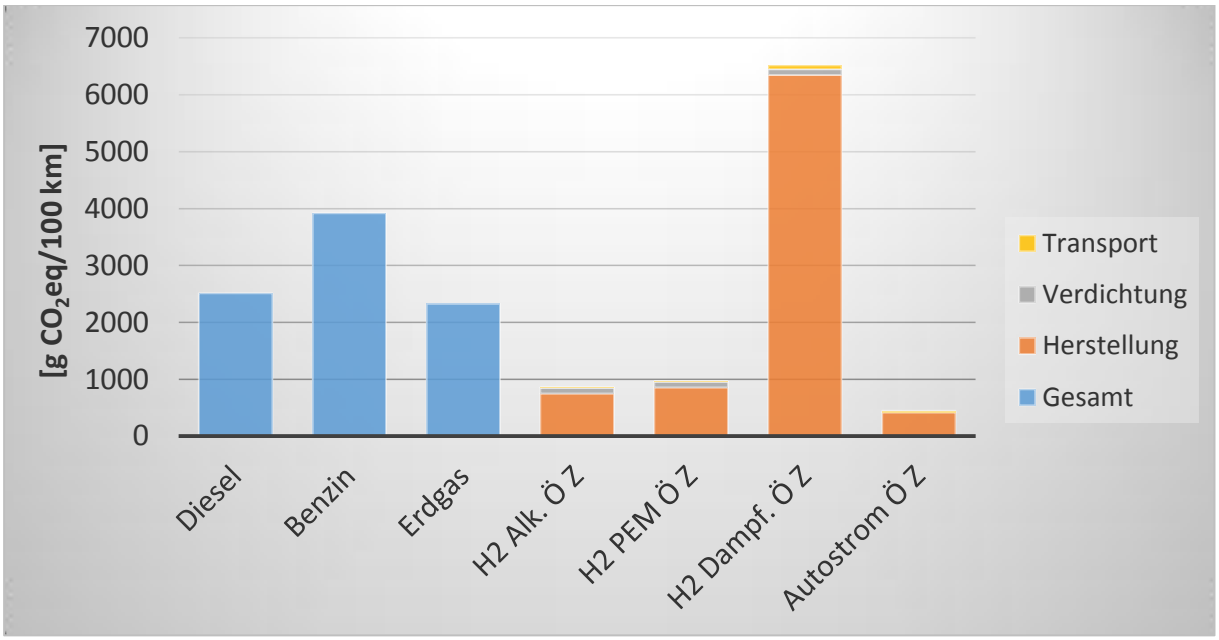


Abbildung 9: Vergleich fossiler Energieträger mit Wasserstoff und Strom bei Verwendung des Ökomixes.(Eigener Entwurf)

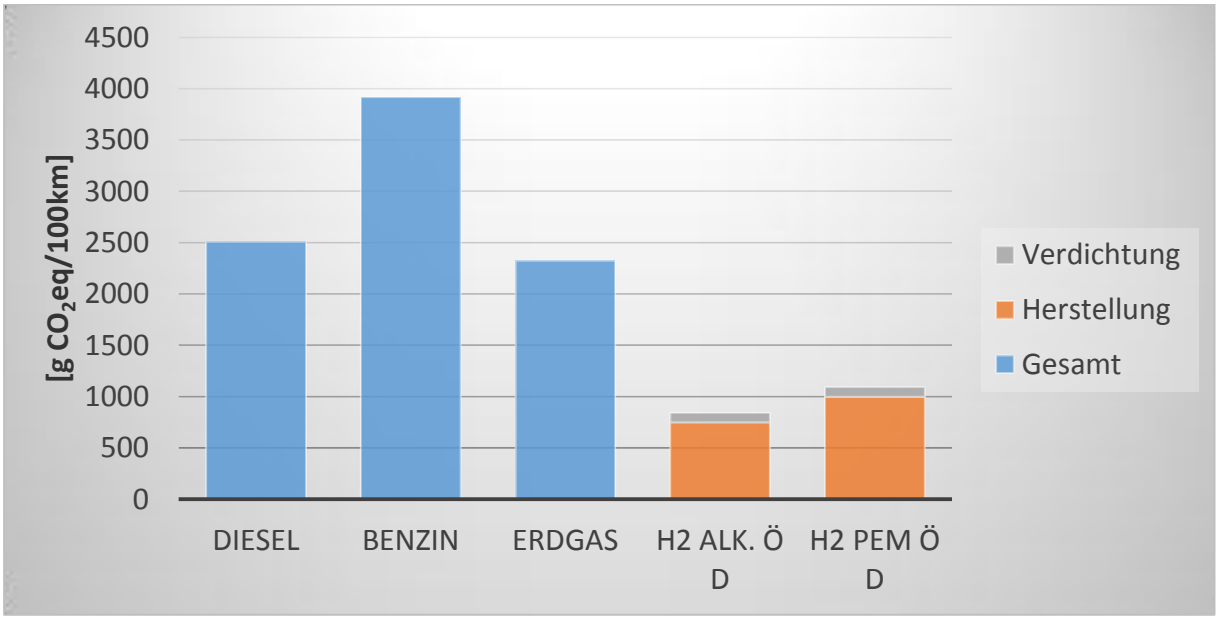


Abbildung 10: Vergleich fossile Energieträger mit Wasserstoff bei dezentraler Versorgung und Verwendung des Ökomixes.(Eigener Entwurf)

Verwendete Kürzel in den Diagrammen:

Z…Zentral; Niedrigdruck-Elektrolyse

D…Dezentral; Hochdruckelektrolyse

Ö…Ökostrom

S…Strommix

Alk…Alkalische Elektrolyse

PEM…Proton Exchange Membran

Dampf…Dampfreformierung

2.3.3 Diskussion

In Abbildung 11 ist klar ersichtlich, wie stark der ökologische Vorteil von Wasserstoff und Strom als Energieträger in der Mobilität von der Art der Erzeugung und der primären Stromerzeugung abhängt. Am meisten Emissionen verursacht die Dampfreformierung, mit 7000 g CO_2eq/100 km in etwa 7-mal so viel wie die dezentrale Versorgung mit alkalischer Hochdruckelektrolyse. Die ökologische Bilanz der Energieträger-Bereitstellung hängt von der primären Stromerzeugung, und auf Grund des besseren Wirkungsgrades der alkalischen Elektrolyse auch von der Art der Elektrolyse ab. Bei Verwendung des österreichischen Strommixes für Herstellung und Verdichtung werden etwa bei der zentralen Versorgung mit Wasserstoff aus der PEM-Elektrolyse mit etwa 4100 g CO_2eq/100 km fast 5-mal so viel Emissionen verursacht, als etwa bei der zentralen Versorgung mit Wasserstoff aus der alkalischen Elektrolyse bei Verwendung von Ökostrom.

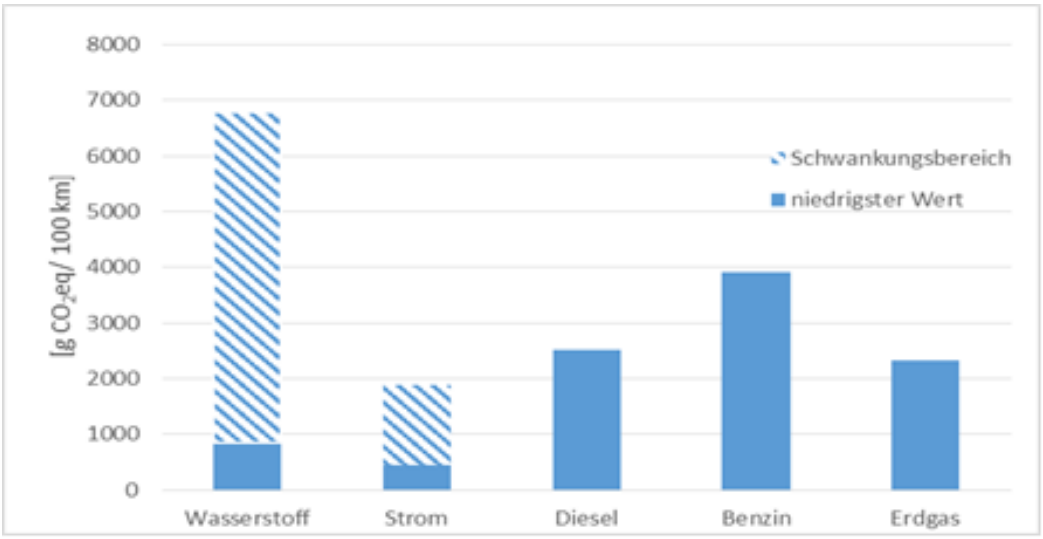


Abbildung 11: Schwankungsbereich der TtW Emissionen von Wasserstoff und Strom bei unterschiedlichen Herstellungsverfahren und Stromzusammensetzungen. (Eigener Entwurf)

Die im gegenwärtigen Strommix anfallenden Emissionen sind so groß, dass ein Wandel in der Mobilität mit einem Wandel der Stromerzeugung einhergehen muss, wenn er erfolgreich sein soll.

Kritisch zu betrachten bei den verwendeten Werten ist, dass sich die Ergebnisse bei Verwendung anderer Stromzusammensetzungen bzw. veralteter Wirkungsgrade rasch ändern können. Beim EU-Strommix etwa fallen 331 g CO_2eq/kWh, und einen technischen Wirkungsgrad von 0,6 bei der alkalischen Niederdruckelektrolyse. Würde man diese Werte verwenden, käme man hierbei auf einen Wert von ca. 16.000 g CO_2eq/kWh, mehr als

doppelt so viele Emissionen als bei der Dampfreformierung. Deshalb ist es wichtig, aktuelle und relevante Daten zu verwenden (IEA, 2011).

2.4 Ökonomischer Aspekt

In diesem Teil der Arbeit werden den Blöcken Herstellung, Transport und Tankstelle des Flussdiagramms die Betriebskosten zugeordnet. Am genauesten wird auf den Energieträger Wasserstoff eingegangen, wobei auch hier nur die wichtigsten Wege des Flussdiagrammes nachgerechnet werden.

Weiteres wird auch der Endpreis der Energieträger für Mobilität für die Verbraucher bei allen Energieträgern kurz betrachtet.

2.4.1 Methodik

Wasserstoff

Für die Berechnung der Betriebskosten wurde zuerst im Internet recherchiert, wieviel Energie [in kWh/kg(H_2)] einem Produktionsabschritt zugeführt werden muss (siehe Anhang; Abbildung 37). Bei Wasserstoff handelt es sich dabei um die Energieträger Strom, Methan (Dampfreformierung) und Diesel (Transport). Im zweiten Schritt wurde der Energiebedarf mit aktuellen Durchschnittspreisen (Stand: 12.1.2017) in Österreich bewertet (Stromliste.at; Oeamtc.at; 2017).

Für den österreichischen Strommix sowie Ökostromix wurden jeweils dem durchschnittlichen Strompreis am nächsten gelegene Stromanbieter ausgewählt – von MyElectric: "Der Nächtliche" und von PST: "Ökostrom Nacht".

Die Umrechnungstabelle, in der Cent/kWh für Strom, Diesel und Methan berechnet wurden, befindet sich im Anhang (Tabelle 24, Stadtwerke Emmedingen; 2012).

Kosten für den Verbraucher

Es wird auf aktuelle Durchschnittspreise in Österreich Bezug genommen. Für Umrechnungen wurde die Umrechnungstabelle für Wasserstoff von der Linde Gas GmbH (2017) verwendet.

2.4.2 Ergebnisse

Wasserstoff-Betriebskosten

In Abbildung 12 sind die anfallenden Betriebskosten für die verschieden Alternativen von der Wasserstoffherstellung bis zur Bereitstellung des Wasserstoffs an der Tankstelle abgebildet. Folgende Alternativen wurden dabei berechnet:

- Zentrale Wasserstoffherstellung über Dampfreformierung und Transport des komprimierten Wasserstoffs zur Tankstelle
- Zentrale Wasserstoffherstellung über alkalische Niederdruckelektrolyse und Transport des komprimierten Wasserstoffs zur Tankstelle
- Zentrale Wasserstoffherstellung über PEM-Elektrolyse und Transport des komprimierten Wasserstoffs zur Tankstelle
- Dezentrale vor Ort Wasserstoffherstellung über alkalische Hochdruckelektrolyse
- Dezentrale vor Ort Wasserstoffherstellung über PEM-Elektrolyse

Beim Transport wurde die Verwendung eines 40-Tonnen-Dieseltrucks angenommen, welcher 30 l/100 km verbraucht (Sartory et al., 2017).

Aus der Abbildung 12 ist ersichtlich, dass die Alternative „Zentrale Dampfreformierung bei der Wasserstoffherstellung mit Transport des Wasserstoffes zur Tankstelle“ die geringsten Betriebskosten aufweist.

Die Wasserstoffkosten an der Tankstelle bei der zentralen Erzeugung werden neben den Erdgasgestehungs- und Reformierungskosten hauptsächlich durch den Transport und Verdichtung des Wasserstoffes bestimmt. Bei einer Vor-Ort-Elektrolyse (durch die Verwendung einer HD-Elektrolyse) würden diese Kosten nicht anfallen.

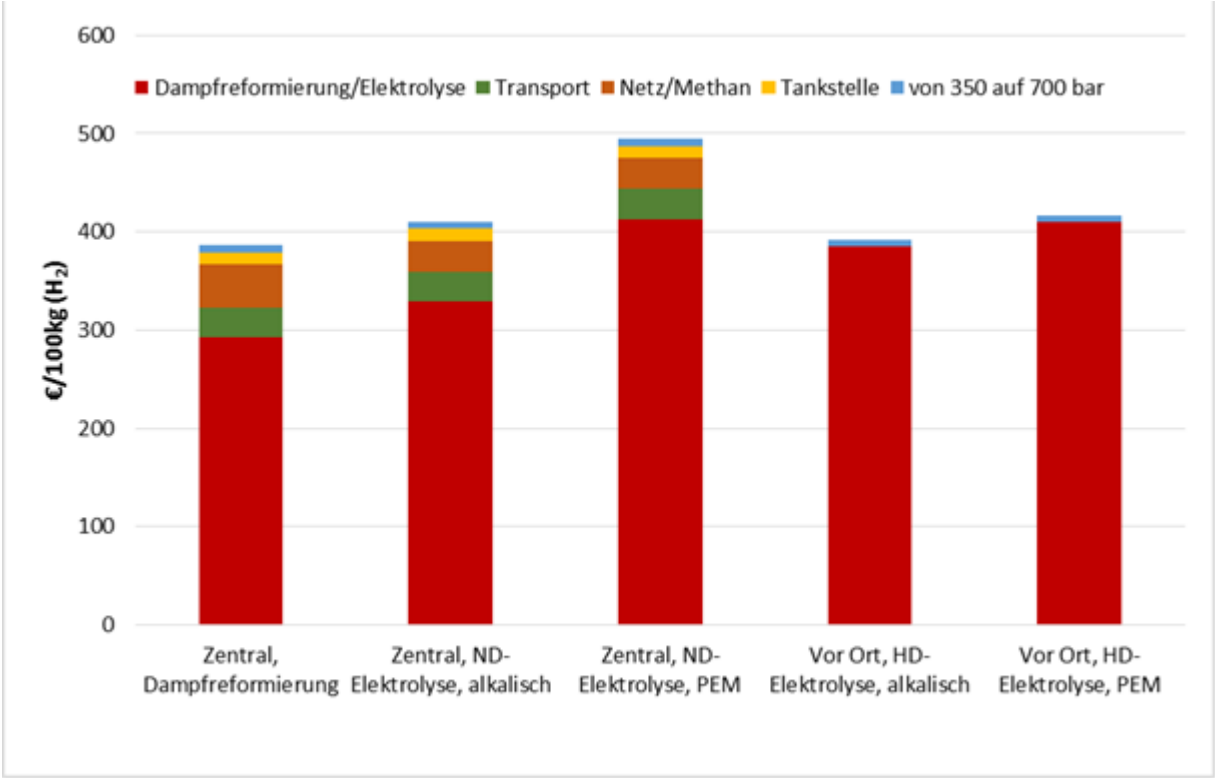


Abbildung 12 Betriebskosten von Wasserstoff bewertet mit dem Ökomix (Eigener Entwurf) Quelle: Sartory et al., 2017; Smolinka, 2011; Leichtfried, 2007; stromliste.at, oeamtc.at)

Da die Differenz der momentanen Durchschnittspreise von österreichischem Strommix und Ökomix sehr klein ist, werden aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nur die Betriebskosten für die einzelnen Module auf Basis des österreichischen Ökomixes angeführt. Im Anhang (Abbildung 38) befindet sich eine Gegenüberstellung der Betriebskosten bewertet mit österreichischem Strommix und Ökomix. Weiters befinden sich im Anhang die Teilrechnungen und die Zusammenfassung der Ergebnisse in tabellarischer Form (Tabelle 25).

Kosten für den Verbraucher

Aus Abbildung 13 sind die Kosten pro 100 km für den Kunden ersichtlich.

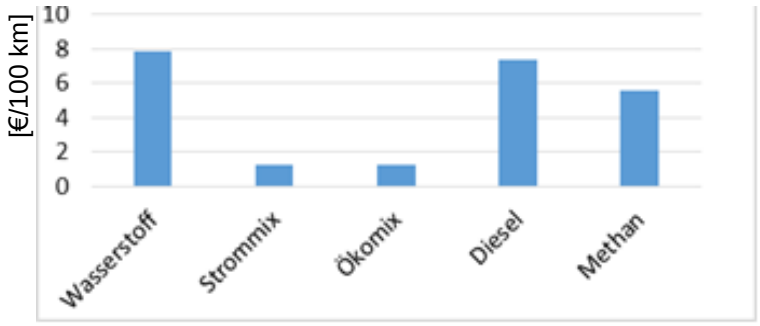


Abbildung 13: Kosten Kraftstoff €/100 km (Eigener Entwurf)

2.4.3 Diskussion

Wasserstoff

Obwohl die Dampfreformierung zurzeit weniger kostenintensiv als die Elektrolyse ist, ist die Alternative Wasserstoff auf Basis „Vor-Ort-Produktion, HD-Elektrolyse, alkalisch“ bei Betrachtung der gesamten Betriebskosten attraktiv. Bei dieser Alternative fallen keine Kosten für den Wasserstofftransport an und durch die Vor-Ort-Produktion von Ökostrom wird kein Netzanschluss benötigt.

Die Ergebnisse sind in der Hinsicht immer wieder kritisch zu hinterfragen, da sich in der Realität die Einsatzstoffkosten von Erdgas, oder je nach Größe und Durchsatzkraft der Energieverbrauch und damit die Kosten einer entsprechenden Anlage und damit die Wasserstoffkosten verändern.

Verbraucherkosten für Mobilität

Bei den Kraftstoffen ist zu beachten, dass sich die Energieträger in verschiedenen Phasen der industriellen Entwicklung befinden. Momentan ist der Energieträger Strom kostentechnisch deutlich dem Wasserstoff und den herkömmlichen Energieträgern Diesel und Methan für Mobilität gegenüber im Vorteil. Aufgrund der geringen CO_2-Emissionen für Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energie im Vergleich zu den Alternativen ist es zu erwarten, dass politische Lenkungsmaßnahmen über Förderungen und Steuerabgaben (cleanenergypartnership.de (2017)) die Attraktivität von Wasserstoff für die Mobilität gewinnen wird.

2.5 Technischer Aspekt

2.5.1 Methodik

In der Elektrolyse wird einerseits Hochdruck- und Niederdruckelektrolyse unterschieden. Außerdem kann eine Unterscheidung durch den eingesetzten Elektrolyten erfolgen. Höchste Wirkungsgrade bei ca. 80 % erreichen Großanlagen mit alkalischer Elektrolyse. Am weitesten verbreitet ist allerdings die PEM-Elektrolyse (proton exchange membrane), mit Wirkungsgrade bis 70 %. Wasserstoff wird meist unter Druck benötigt, daher bietet sich die Hochdruckelektrolyse an. Die Wirkungsgrade liegen etwas unter denen atmosphärisch betriebener Elektrolyseure, dafür ist dann der Wirkungsgrad in der Verdichtung höher. Annahme für Hochdruckelektrolyse Alkalisch: 80 % PEM: 60 % (Donner, 2015). In der Dampfreformierung werden Wirkungsgrade von 80 % (Eichlseder et al., 2012) erzielt. Für die Verdichtung von Wasserstoff entstehen Verluste, welche sich aus der notwendigen

Kompressionsenergie dividiert durch den Heizwert ergeben und in Abbildung 39 (Siehe Anhang; Meier, 2014) dargestellt werden. Für eine Verdichtung von 1 bar auf 1000 bar sind 12 % Verluste zu erwarten und der Wirkungsgrad ergibt sich daraus zu 88 %. Startet die Verdichtung erst bei 350 bar belaufen sich die Verluste auf 3 % und man erhält einen Wirkungsgrad von 97 %.

Die Wirkungsgrade für den Transport sind im gasförmigen Zustand ca. 99 %. Die Diffusion von gasförmigen Wasserstoff ist so gering, dass sie in der Wirkungsgradberechnung praktisch vernachlässigbar ist (Müller, 2013; cleanenergypartnership.de).

Für die Elektrizitätsanalysen wurde der Österreichische Strommix (Energie-Control Austria, 2015) aus dem Jahr 2014 und der Ökomix (oekostrom AG, 2014) der Firma oekostrom AG aus dem Jahr 2014 herangezogen. Die Tabelle 28 und Tabelle 29 hierzu sind im Anhang zu finden. Angaben zu den Wirkungsgraden verschiedener Kraftwerke sind oft verschieden. Es wurde versucht möglichst unparteiische und aktuelle Quellen zu verwenden (weltderphysik.de; Antonanzas et al, 2015).

Der Übertragungsverlust in Mitteleuropa beläuft sich auf 6 % (Wirkungsgrad = 94 %). Er setzt sich zusammen aus: Ohmschen Verlust, Verluste durch Koronaentladung, Blindleistungskompensation und Leistungstransformation. (Statistisches Bundesamt, 2013)

Für die fossilen Brennstoffe wurden Wirkungsgrade für den gesamten Prozess verwendet, da Angaben zu den einzelnen Teilprozessen nicht zugänglich waren. Diese sind in Tabelle 27 (Siehe Anhang; Spiegel online, 2007 & 2012) festgehalten.

2.5.2 Resultate

Die folgenden Abkürzungen wurden für die einzelnen Wasserstoffmethoden gewählt:

Z…Zentral; Niedrigdruck-Elektrolyse
D…Dezentral; Hochdruckelektrolyse
Ö…Ökostrom
S…Strommix
Alk…Alkalische Elektrolyse
PEM…Proton Exchange Membran
Dampf…Dampfreformierung

In Abbildung 14 sind sowohl die Wirkungsgrade der fossilen Treibstoffe als auch der Elektrizität und der verschiedenen Wasserstoffmethoden für die Well-to-Tank Analyse abgebildet.

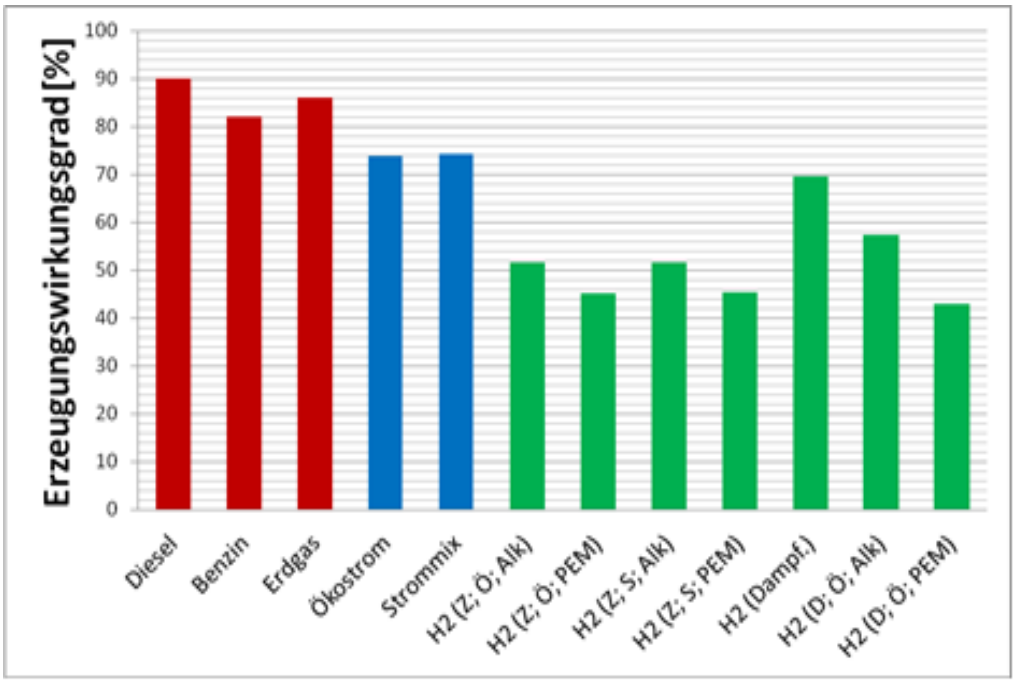


Abbildung 14: Well-to-Tank Wirkungsgrade Treibstoffe (Eigener Entwurf)

Die verfügbare Energie pro 100 Kilogramm Treibstoff kann aus Abbildung 15 abgelesen werden. Bis auf Elektrizität existieren für alle betrachteten Treibstoffarten untere Heizwerte, welche den Energiegehalt eines Kilogramms Treibstoff angeben. Für Wasserstoff beträgt dieser Heizwert 33,33 kWh/kg. Deutlich geringere Werte erhält man für fossile Treibstoffe. Multipliziert mit den Wirkungsgraden der einzelnen Treibstoffe und hochgerechnet auf 100 Kilogramm erhält man die Ergebnisse in Abbildung 15. Im Gegensatz zu den Wirkungsgraden schneidet Wasserstoff in dieser Analyse aufgrund des höheren Energiegehalts besser ab als alle fossilen Treibstoffe.

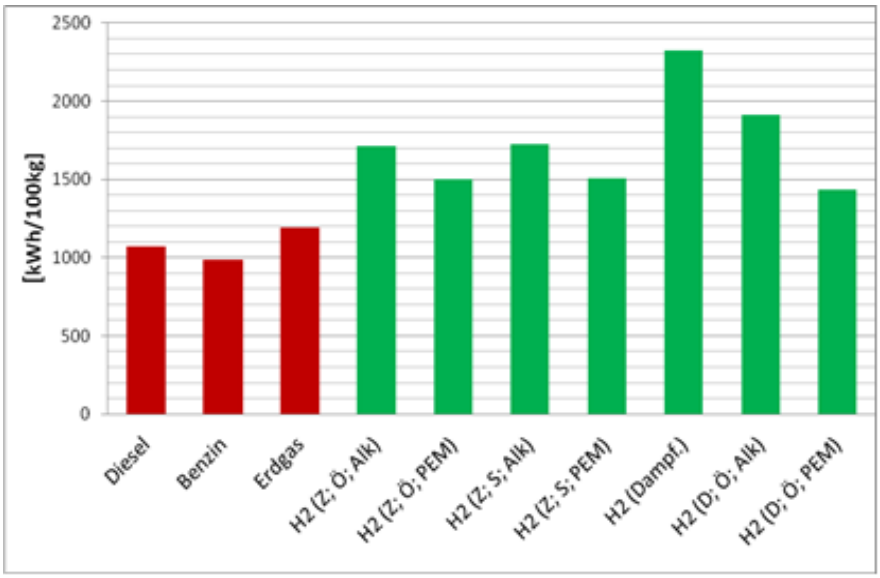


Abbildung 15: Verfügbare Energie (Eigener Entwurf)

Bei Abbildung 16 handelt es sich um eine Addition der notwendigen Energie, um ein Fahrzeug 100 Kilometer fortzubewegen (orange) aus der Tank-to-Wheel Analyse, und der entstehenden Verlustenergie in der Herstellung (rot). Wasserstofferzeugung hat zwar zurzeit noch größere Verluste als die Bereitstellung fossiler Brennstoffe, dies wird jedoch durch die effizientere Energienutzung im Betrieb kompensiert.

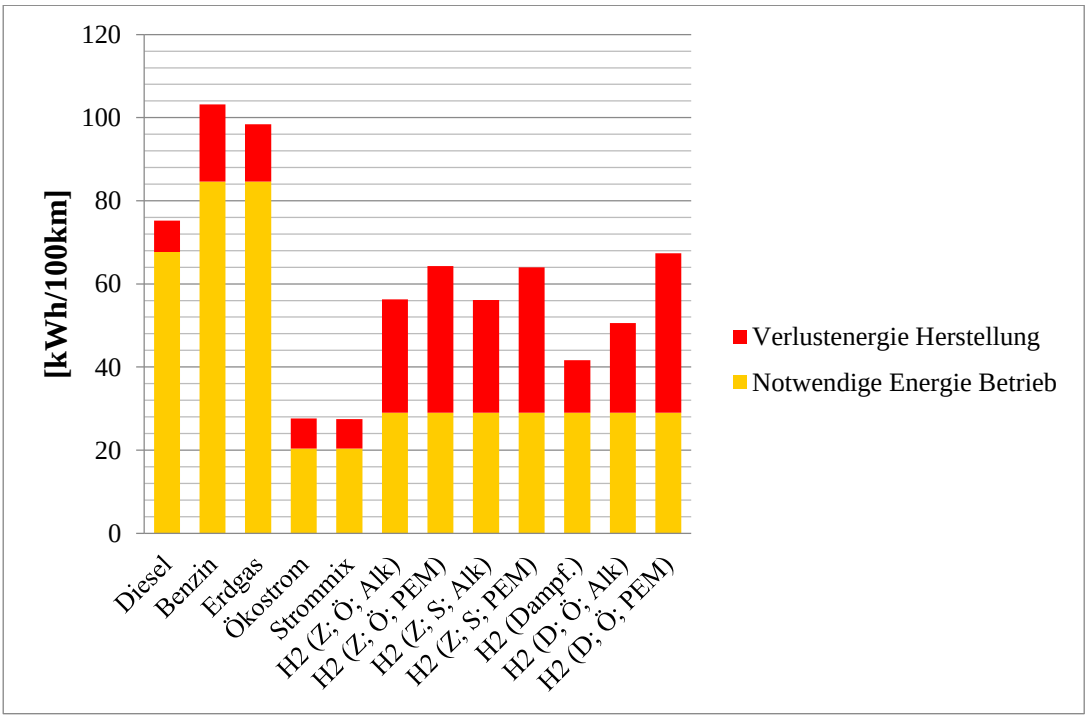


Abbildung 16: Aufzuwendende Energie (Eigener Entwurf)

2.5.3 Diskussion

Um die technische Relevanz von Wasserstoff als Treibstoff zu erhöhen, sollte eine Steigerung der Wirkungsgrade in der PEM-HD-Elektrolyse und in der primären Energieerzeugung angestrebt werden. Beides würde die Verwendung der PEM-HD-Elektrolyse mit Ökostrom vor Ort fördern, welche aus ökologischer Sicht wohl die sinnvollste Variante zur Wasserstoffherstellung ist. Die Wirkungsgrade für dieses Verfahren sind in Abbildung 17 dargestellt. Für den Wirkungsgrad des Ökostroms ist zu bedenken, dass sich dieser zwar aus Nutzen dividiert durch Aufwand errechnet, Wasser-, Wind- und Solarenergie jedoch natürlich zur Verfügung stehen und diese nicht wirklich bereitgestellt werden müssen. Ein generelles Umdenken in der Einschätzung primärer erneuerbarer Energiequellen ist an dieser Stelle vielleicht zielführend.

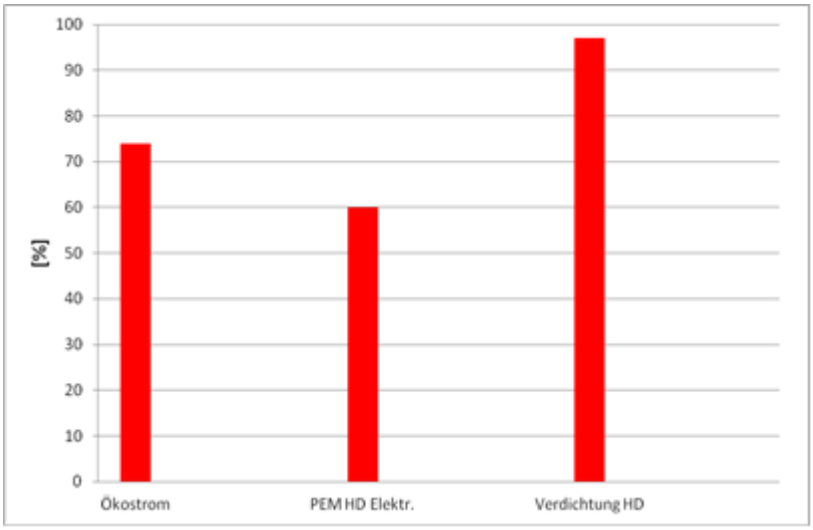


Abbildung 17: Relevante Wirkungsgrade der PEM-HD-Elektrolyse mit Ökostrom vor Ort (Eigener Entwurf)

3 Tank-to-Wheel

Babin Markus (NAWI)

Eisner Sonja (NAWI)

Wechsler Michael (Geographie)

3.1 Einleitung

Im Bereich der Mobilität war in den letzten Jahren ein ständiger Fortschritt im Bereich alternativer Antriebe zu beobachten. Zur Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Antriebsformen werden Ökobilanzen herangezogen. Ein Teil dieser Bilanzen nimmt der Bereich Tank-to-Wheel ein, womit sich dieses Kapitel auseinandersetzt.

In der folgenden Arbeit wird versucht, eine Vergleichbarkeit zwischen den drei Antriebsarten Verbrennungsmotor, Elektrofahrzeug und Brennstoffzellenfahrzeug herzustellen. Dies wird mithilfe von Wirkungsgraden und Energiebedarf, Emissionen und Kosten durchgeführt. Um einen guten Vergleich der verschiedenen Antriebsarten anstellen zu können, wird die Energie am Rad in kWh/100 km berechnet und auch die Kosten dementsprechend angepasst. Damit auch die recherchierten und berechneten Werte mit den angegebenen Daten von Herstellern verglichen werden konnten, wurden als Referenzfahrzeuge der Volkswagen Golf 7, der Volkswagen E-Golf und der Toyota Mirai auserkoren. Ziel dieser Arbeit ist es, die drei erwähnten Antriebsarten gegenüberzustellen und diese Unterschiede messbar zu machen.

Im ersten Teil der Arbeit wird auf die Aspekte des Verbrennungsmotors mit herkömmlichen Brennstoffen eingegangen, wobei hier sowohl der Ottomotor als auch der Dieselmotor behandelt wird. Im zweiten Teil wird anschließend das Elektrofahrzeug erläutert und im dritten Teil wird die Brennstoffzelle thematisiert. Dabei werden in jedem Abschnitt die Wirkungskette, die Wirkungsgrade, die Emissionen und die Kosten behandelt.

3.1.1 Anmerkung

Nachfolgende Seiten stützen sich auf Ausarbeitungen einzelner Studierender. Angeführte Studierende haben folgende Kapitel ausgearbeitet:

- Markus Babin (3.3)
- Michael Wechsler (3.4)
- Sonja Eisner (3.5)

3.2 Energie am Rad / Fahrzyklus

Neben einer umfangreichen Literaturrecherche ist es auch notwendig, eigene Berechnungen durchzuführen. Um einen guten Vergleich der verschiedenen Antriebsarten anstellen zu können, wird die Energie am Rad in kWh/100 km berechnet.

Es wird ein Kraftfahrzeug der Mittelklasse mit einer Masse von 1.600 kg angenommen (gilt für alle Antriebsarten).

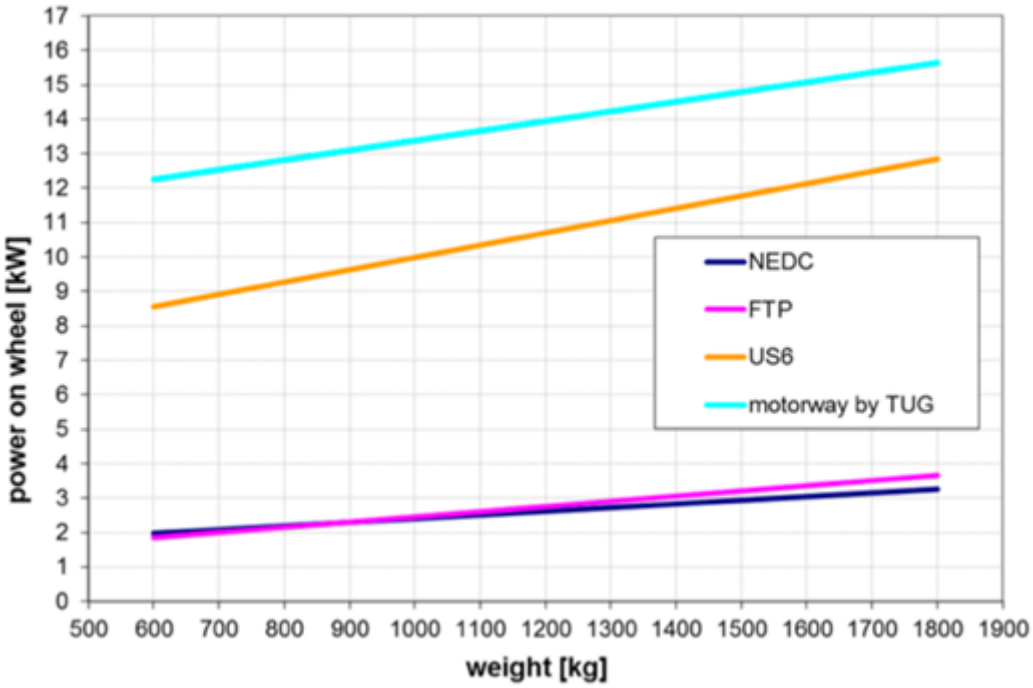


Abbildung 18: Verhältnis benötigter Leistung zur PKW-Masse (Trattner et al., 2011)

Für die Ökobilanzberechnungen wird die Energie am Rad des Fahrzyklus "motorway by TUG" (= Common Artemis Driving Cycle mit einer Maximalgeschwindigkeit auf der Autobahn von 130 km/h) herangezogen. Die Leistung für den Mittelklassewagen wird in Abbildung 18 abgelesen und beträgt 15,1 kW. Die Durchschnittsgeschwindigkeit des Fahrzyklus Common Artemis Driving Cycle beträgt 97,0 km/h. Da die Energie am Rad mit Leistung / Durchschnittsgeschwindigkeit * 100 berechnet wird, ergibt das infolgedessen 15,6 kWh/100 km. Aufbauend auf diesem Ergebnis wurden alle weiteren eigenen Berechnungen durchgeführt.

3.3 Verbrennungsmotoren

Bei Fahrzeugen mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren muss zwischen zwei Varianten unterschieden werden: dem Ottomotor mit Benzin oder Erdgas als Kraftstoff und dem Dieselmotor. Dennoch ist die Wirkungskette im Fahrzeug bei beiden Typen nahezu gleich, siehe hierzu Abbildung 19.

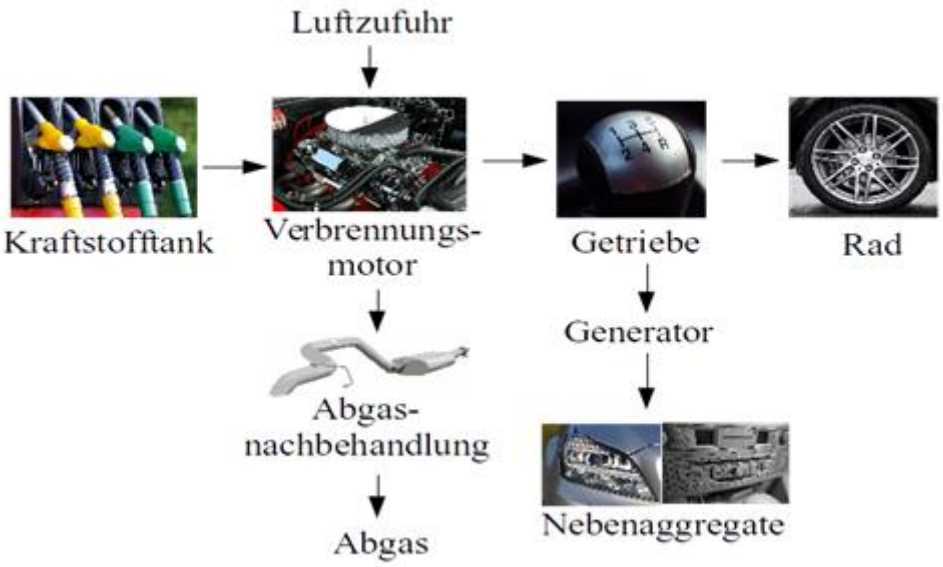


Abbildung 19: Wirkungskette in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (eigene Darstellung)

Das Zentrum der Wirkungskette bildet der Verbrennungsmotor, bei dem chemische Energie aus dem Kraftstoff in Wärme und anschließend in mechanische Energie umgewandelt wird. Diese wird nun über das Getriebe an die Räder weitergeleitet. Beachtenswert sind außerdem die Nebenaggregate als weitere Energieverbraucher sowie die Abgase und ihre Nachbehandlung, die sich auch für die Umweltauswirkungen verantwortlich zeichnen.

3.3.1 Wirkungsgrade und Energiebedarf

In weiterer Folge wird der Gesamtwirkungsgrad sowie der Energiebedarf im Kraftstoff in Abhängigkeit von der am Rad benötigten Energie berechnet. Zunächst wird für den Wirkungsgrad des Getriebes ein Wert von 92 % angenommen (Schreiner, 2015), daraus folgt, dass pro kWh am Rad 1,087 kWh vom Motor produziert werden müssen. Zur weiteren Berechnung muss zwischen den unterschiedlichen Motortypen, den Kraftstoffen sowie der Betriebsart unterschieden werden:

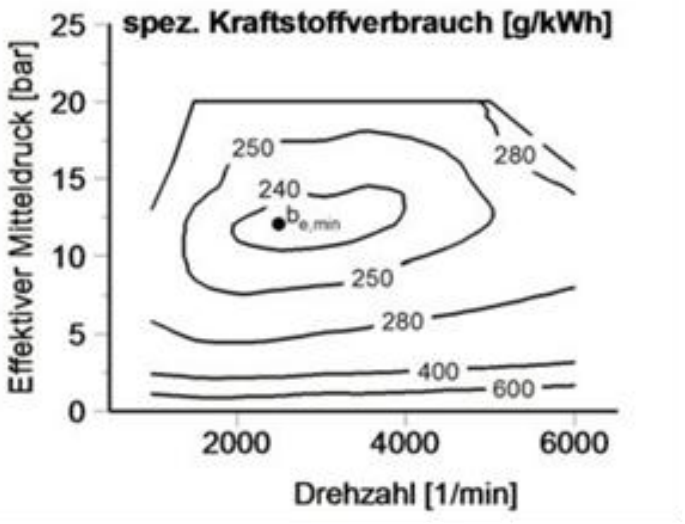


Abbildung 20: Verbrauchskennfeld Ottomotor (van Basshuysen/Schäfer 2015, S. 28)

Dieselmotoren erreichen im Bestpunkt einen Wirkungsgrad von etwa 45 %, bei Ottomotoren liegt dieser bei bis zu 35 % (Eichlseder et al., 2012). Dieser Bestpunkt liegt im Bereich von mittleren bis hohen Lasten sowie geringer Drehzahl und kann in einem sogenannten Verbrauchskennfeld dargestellt werden (siehe Abbildung 20). Hierbei ist zu beachten, dass der aufgetragene spezifische Kraftstoffverbrauch umgekehrt proportional zum Wirkungsgrad ist, somit bezeichnen kleinere Werte einen besseren Wirkungsgrad.

Im realen Betrieb, vor allem im Stadtverkehr, wird dieser bestmögliche Wirkungsgrad jedoch nicht erreicht, daher werden in weiterer Folge Berechnungen für geschätzte Realwirkungsgrade durchgeführt (Eichlseder et al., 2007). Die Ergebnisse hiervon sind in Tabelle 12 angeführt. Zur Berechnung des Kraftstoffbedarfes werden die jeweiligen Heizwerte (Schreiner, 2015) herangezogen.

Tabelle 12: Energie und Kraftstoffbedarf (eigener Entwurf)

	Motor-wirkungs-grad	Gesamt-wirkungs-grad	Energie-bedarf (kWh/kWh Rad)	Energie-bedarf (kWh/100 km)	Kraftstoffbedarf (kg/100 km)
Dieselmotor	0,25	0,23	4,35	68	5,7
Ottomotor (Benzin)	0,20	0,18	5,44	85	7,3
Ottomotor (Erdgas)	0,20	0,18	5,44	85	6,1

Mit den jeweiligen Dichten von Benzin und Diesel, 0,76 kg/l und 0,84 kg/l (Schreiner, 2015), kann deren Treibstoffbedarf in Litern berechnet werden, wobei sich ein Bedarf von 7,5 l Diesel beziehungsweise 8,7 l Benzin je 100 km Fahrbetrieb ergibt. Bei Erdgas ist das

Volumen naturgemäß von der Speicherart und der Betankung abhängig, wobei sich in Europa die Speicherung in gasförmigem Zustand bei 200 bar durchgesetzt hat (Van Basshuysen, 2015). Im Allgemeinen wird der Kraftstoffbedarf bei Erdgasfahrzeugen in kg angegeben und beträgt in diesem Fall 6,1 kg Erdgas je 100 km Fahrbetrieb.

3.3.2 Emissionen

Bei den Verbrennungsprozessen im Motor reagieren Kohlenwasserstoffe aus dem Treibstoff mit Luftsauerstoff. Dabei entstehen im Idealfall nur CO_2 und Wasser, dies ist in der Realität jedoch nicht der Fall. Dennoch sind in Tabelle 13 die direkten CO_2- sowie H_2O-Emissionen unter Annahme einer vollständigen Verbrennung angeführt, wobei einfache Mengenbilanzen und Stoffzusammensetzungen (Schreiner, 2015) als Berechnungsgrundlage dienten.

Tabelle 13: CO_2- und H_2O-Emissionen (eigene Darstellung)

	CO_2-Emissionen (kg CO_2/kg Kraftstoff)	CO_2-Emissionen (kg CO_2/100 km)	H_2O-Emissionen (kg H_2O/kg Kraftstoff)	H_2O-Emissionen (kg H_2O/100 km)
Diesel	3,15	17,9	1,26	19,7
Benzin	3,08	22,3	1,26	19,7
Erdgas	2,75	16,5	2,25	35,1

Neben CO_2 entstehen bei der Verbrennung auch CO, unverbrannte Kohlenwasserstoffe sowie Stickoxide. Diese Abgasbestandteile werden zunächst im Katalysator nachbehandelt, unter anderem wird CO oxidiert und die Stickoxide zu Luftstickstoff reduziert. Ermöglicht wird dies durch die Verwendung von Edelmetallen wie beispielsweise Palladium oder Platin als Katalysatoren. Zur NO_x-Reduktion werden vermehrt aktive Katalysatoren auf Harnstoffbasis eingesetzt, die für selektive Reduktion sorgen (Van Basshuysen/Schäfer, 2015). Bei Dieselmotoren wird die Abgasnachbehandlung durch die vermehrte Entstehung von Rußpartikeln im Motor zusätzlich erschwert, diese müssen mit Filtern aus dem Abgasstrom entfernt werden.

Vergleichswerte aus Emissions-Realtests zeigen, dass die NO_x-Emissionen bei Diesel-PKWs im Bereich von 0,2 g/km und bei PKWs mit Ottomotor bei knapp unter 0,1 g/km liegen. Beim Partikelausstoß muss insbesondere hinsichtlich des Fahrzeugalters differenziert werden: alte Dieselfahrzeuge emittieren im Bereich von 30 bis 100 mg/km, bei modernen Fahrzeugen reduziert sich der Ausstoß auf unter 5 mg/km. Damit liegen diese Fahrzeuge teilweise sogar geringfügig besser als Fahrzeuge mit Ottomotor. Direkte CO-Emissionen wiederum liegen bei Diesel-PKWs heutzutage um 0,2 g/km, bei jenen mit Benzin liegen sie im Normalfall etwas höher (0,3 – 0,4 g/km), bei hohen Geschwindigkeiten steigen sie jedoch rapide an.

Schlussendlich ist der Ausstoß von unverbrannten Kohlenwasserstoffen bei allen Fahrzeugtypen mittlerweile relativ niedrig (Eichlseder et al., 2009).

Auf Grund der relativ geringen Ausstoßmenge und der vernachlässigbaren Treibhausgaspotentiale können diese Stoffe bei der Berechnung vernachlässigt werden, daher werden in erster Linie die direkten CO_2-Emissionen betrachtet.

3.3.3 Kosten

Die derzeitigen Anschaffungskosten der Referenzfahrzeuge laut ADAC Autodatenbank (2017) sind in Tabelle 14 angegeben. Des Weiteren finden sich in dieser Tabelle die vom ADAC berechneten Gesamtkosten je 100 km. Diese beinhalten bei einer Haltedauer von fünf Jahren und einer jährlichen Fahrleistung von 15.000 km sowohl Tank-, Betriebs- und Wartungskosten als auch die Anschaffungskosten. Zusätzlich sind die derzeitigen Treibstoffkosten (bmwfw 2017), auf 100 km hochgerechnet, angeführt.

Tabelle 14: Anschaffungs- und Betriebskosten (Eigener Entwurf)

	Anschaffungskosten €	Gesamtkosten €/100 km	Treibstoffkosten €/100 km
Diesel	23.050	44,4	8,04
Benzin	20.500	44,5	9,85
Erdgas	24.100	41,8	6,07

3.4 Batteriebetriebene Motoren

Elektrofahrzeuge werden im Laufe der letzten Jahre zu einer immer größeren Alternative. Dies betrifft allerdings aufgrund der vergleichsweise geringen Reichweite von 130 – 190 km (Porsche 2016) vor allem den städtischen Bereich. Die Anschaffung von Elektrofahrzeugen wird in Österreich von Stadt und Land auch immer wieder mit neuen Aktionen gefördert, wie beispielsweise mit einer Prämie von 4.000 € bei der Neuanschaffung eines Elektrofahrzeugs ab März 2017 (Die Presse, 2016). Demzufolge wird auch diese Antriebskraft in dieser Arbeit in Betracht gezogen und auf deren Energiebedarf, den Emissionen und die Kosten eingegangen.

3.4.1 Wirkungskette

Etwas anders als bei einem Verbrennungsmotor mit herkömmlichen Brennstoffen zeigt sich die Wirkungskette bei Elektrofahrzeugen (siehe Abbildung 21). So sind die Batterie und der elektrische Antriebsstrang die zentralen Komponenten eines jeden Fahrzeugs. Eine weitere Besonderheit ist die so genannte Rekuperation. „Bei dieser sogenannten Rekuperation

arbeitet die Maschine als Generator und wandelt Bremsenergie wieder in elektrische Energie um, die dann über den Umrichter in der Batterie gespeichert wird.“ (Kampker et al., 2013) Des Weiteren ist zu erwähnen, dass das Getriebe in Elektrofahrzeugen zum Teil überflüssig ist. So benötigen Automobile, die mit permanentmagneterregten Synchronmotor betrieben werden, kein mechanisches Getriebe, da sich diese Maschinen für einen großen Drehzahlbereich mit hohen Wirkungsgraden und hohen Drehmomentdichten dimensionieren lassen. Dennoch wird, wie zum Beispiel beim E-Golf, ein einstufiges Getriebe eingebaut.

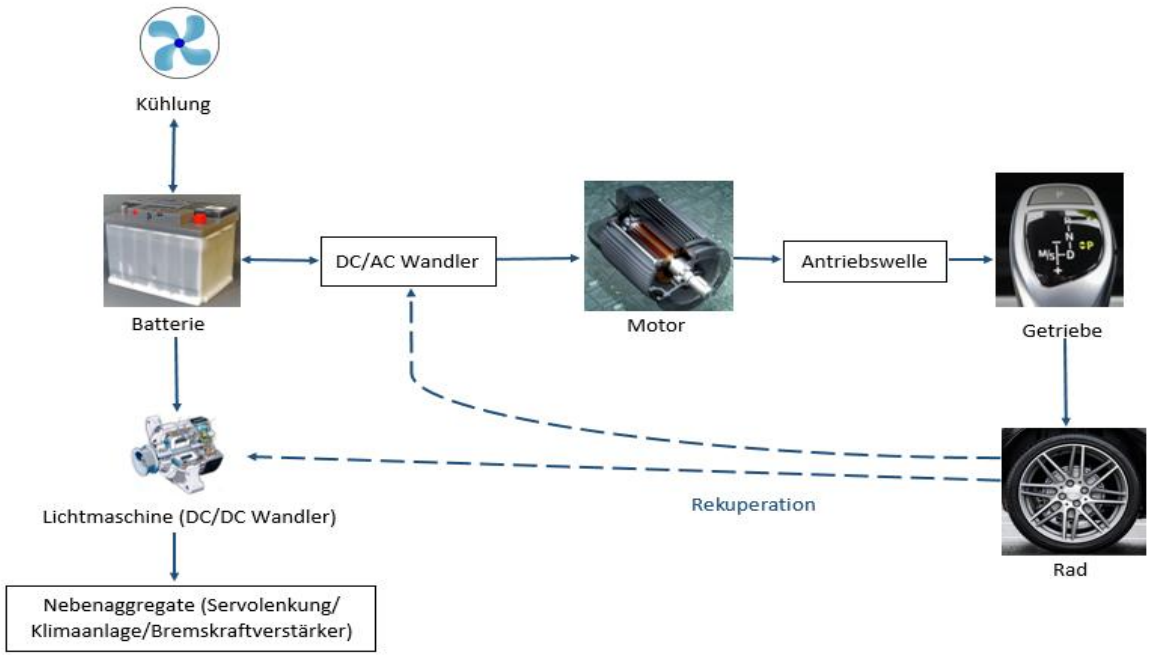


Abbildung 21: Wirkungskette Elektrofahrzeug (eigener Entwurf)

3.4.2 Wirkungsgrade

Auch der Wirkungsgrad eines Elektrofahrzeuges unterscheidet sich sehr stark von dem eines Automobils mit Verbrennungsmotor. So werden in diesem Kapitel sowohl die Wirkungsgrade einzelner Komponenten eines elektrisch betriebenen Fahrzeuges als auch der Gesamtwirkungsgrad betrachtet.

Für den Wirkungsgrad wird in diesem Fall der Wirkungsgrad des Motors, des DC/AC-Wandlers und der Batterie berücksichtigt. Für den Motor wird hierbei ein permanenterregter Synchronelektromotor herangezogen, da dieser im Referenzfahrzeug, dem E-Golf, eingebaut ist. Der Wirkungsgrad des Motors wird hier mit 97,5 % angenommen (Leroy Somer). Für den Gleichspannungswandler wird ein Wirkungsgrad von 92 % angenommen. Bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen wird als Batterie in den meisten Fällen ein Lithium-Ionen-Akkumulator verwendet. Diese Art der Batterietechnologie weist Wirkungsgrade um die 95 % (Statista, 2012) auf. Wichtig ist dabei allerdings das Temperaturmanagement der

Batterie. So fallen die Leistungsdaten bei Temperaturen unterhalb von 0 °C zunächst leicht und dann sehr deutlich ab. Bei −30 °C kann man von weniger als einem Zehntel der Leistung, die bei +20 °C erzielt wird, ausgehen. Somit ergibt sich schlussendlich ein Gesamtwirkungsgrad von 0,852, was einer benötigten Leistung von 1,17 kWh/kWh Rad entspricht. Daher benötigt man 18,25 kWh/100 km Energie am Rad. Hier ist allerdings zu erwähnen, dass in dieser Rechnung nicht alles berücksichtigt wurde, wie beispielsweise die Nebenaggregate. So finden sich die Werte des TtW-Wirkungsgrads in der Literatur um die 76 %, was einer Leistung von 1,31 kWh/kWh Rad entspricht (Betram, Bongard, 2014).

3.4.3 Emissionen

Elektrofahrzeuge erzielen in einem Bericht des Umweltbundesamtes zum Thema Ökobilanz und Emissionen ein gutes Ergebnis im Vergleich zu den anderen untersuchten Antrieben. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass im Bereich Tank-to-Wheel keine Emissionen anfallen.

3.4.4 Kosten

Bei den Kosten zeigt sich ein spannendes Bild. So ist natürlich der Grundpreis beim E-Golf mit 34.900 € um einiges höher als beim gleichen Modell mit Verbrennungsmotor. Dagegen sind die Betriebskosten sehr gering, da diese großteils aus dem Strompreis ermittelt werden (Giuliani, 2014). Dieser beträgt im Moment in Graz bei 13,76 Cent/kWh (E-control, 2016). Womit sich ein Preis von 2,51 € für die Reichweite von 100 km ergibt. Allerdings sind im Zuge eines Fahrzeugkaufs auch weitere Kosten zu berücksichtigen. Die Werkstattpreise sowie die Reifenkosten verhalten sich ähnlich wie die der Automobile mit Verbrennungsmotoren. (Giuliani, 2014). Zusätzlich besteht eine Garantie von 8 Jahren oder 160.000 km auf die Batterie, die bei den Elektrofahrzeugen sehr teuer ist. Neben den hohen Anschaffungskosten stellt außerdem die Wertstabilität ein großes Problem beim Kauf eines Elektrofahrzeuges dar. So schrecken laut einem Bericht des ADAC viele Interessenten vor einem Gebrauchtwagenkauf aus Angst vor teuren Folgereparaturen zurück. Deswegen wird dem E-Golf im vierjährigen Kalkulationszeitraum ein nur mäßiger Restwertverlauf prognostiziert. So rentiert es sich laut ADAC im Moment noch nicht, ein Elektrofahrzeug nur aufgrund der Kosten einem Automobil mit herkömmlichen Brennstoffen vorzuziehen.

3.5 H_2-Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug

Als Brennstoffzelle (BZ) in der Fahrzeugtechnik wird vor allem die Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (NT-PEMFC) verwendet (Tschöke, 2015, S.109), der Wasserstoff als Reduktionsmittel und Sauerstoff aus der Umgebungsluft als Oxidationsmittel dient. Einzelne Brennstoffzellen werden zu einem Stack

hintereinandergeschaltet, um höhere Spannungen zu erzielen. Der Wasserstoff befindet sich im Fahrzeug in Tanks, die entweder unter einem Druck von 350 bar oder 700 bar stehen. *Abbildung **22*** veranschaulicht die vereinfachte Wirkungskette im Fahrzeug.

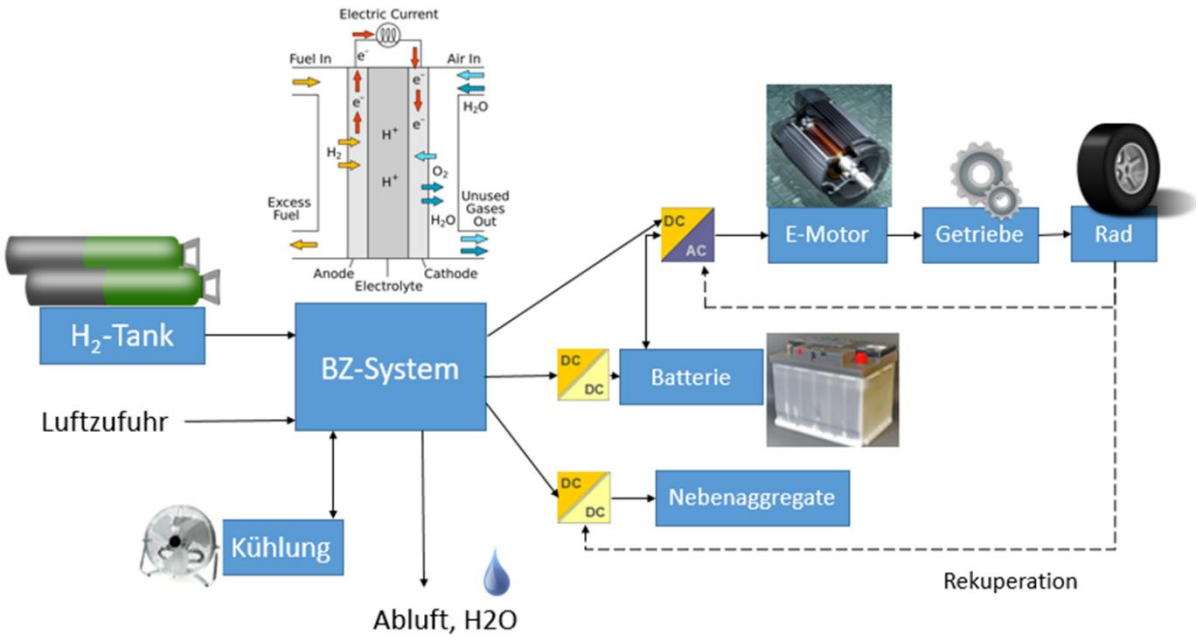


Abbildung 22: Wirkungskette im Wasserstoff-Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug (eigene Darstellung)

Wie bei einem rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeug wirkt ebenso Rekuperation in die Wirkungskette, siehe Kapitel 3.4.1

3.5.1 Wirkungsgrade und Energiebedarf

Bei Brennstoffzellenfahrzeugen wird der Elektromotor direkt mit dem Strom, den der BZ-Stack im Fahrzeug produziert, betrieben. Darin liegt der grundlegende Unterschied zu rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen. Da der Elektroantrieb sonst dem elektrischen Antriebsstrang im Kapitel 3.4.2 gleicht, werden dieselben Werte für die Wirkungsgrade des Elektromotors und des DC/AC Wandler für die Berechnung des Gesamtwirkungsgrades verwendet. Als elektrischer Wirkungsgrad der NT-PEMFC wird 60 % (Eichlseder et al., 2012) und für ein Planetengetriebe 97 % angenommen (Lu/Jin, 2011). Damit ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von 0,52 und somit eine benötigte Leistung von 30 kWh/100 km. Jedoch wurden Nebenaggregate nicht in die Rechnung miteinbezogen. Mithilfe der volumetrischen Energiedichten von Wasserstoff 0,8 kWh/l bei 350 bar und 1,3 kWh/l bei 700 bar kann der Kraftstoffbedarf in Litern pro 100 km bei einem Gesamtwirkungsgrad von 52 % errechnet werden (Lehmann/Luschtinetz, 2014) und ergibt sich bei 350 bar im Tank zu

0,86 kg H_2/100 km bzw. zu 0,9 kg H_2/100 km bei 700 bar im Tank. Die Werte für den Gesamtwirkungsgrad in der Literatur liegen niedriger, nämlich von 30 – 50 % (Eichlseder et al., 2012). Jedoch „berichten japanische Hersteller über verbesserte Brennstoffzellensysteme, die im LA-4 Stadtzyklus Gesamtwirkungsgrade der Fahrzeuge bis 60 % erreichen“ (Eichlseder et al., 2012).

3.5.2 Emissionen

Dadurch dass im Bereich Tank-to-Wheel nur die Emission berücksichtigt werden, die allein im Fahrzeugbetrieb erzeugt werden, fallen beim H_2-Brennstoffzellenfahrzeug keine CO_2-Emissionen an. Denn als einziges Produkt in der Brennstoffzelle entsteht Wasser, da Wasserstoff an der Anode oxidiert und Sauerstoff an der Kathode reduziert wird. Weil Wasser jedoch ein Treibstoffpotenzial von 0,04 besitzt, erzeugt das H_2-Brennstoffzellenfahrzeug CO_2-Äquivalente. „Der Anteil des anfallenden flüssigen Wassers ist unter anderem von der Umgebungstemperatur und der Betriebstemperatur der Brennstoffzelle abhängig.“ (Salchenegger, 2006). Da der flüssige Anteil nicht exakt bestimmbar ist, wird angenommen, dass das gesamte erzeugte Wasser als Wasserdampf an die Umwelt abgegeben wird. Bei einer Produktion von 7,5 l H_2O/100 km (Frankfurter Allgemeine, 2015) und mit Hilfe der Dichte von Wasser bei 100 °C von 0,9584 g/ml entstehen 0,3 kg CO_2-Äquivalente/100 km (Universität Oldenburg, 2016). Wegen der kurzen Lebensdauer des Wasserstoffs von ca. 1 Woche in Bodennähe und der geringen Emissionswerte ist „das Treibhauspotential von Wasserdampf in Bodennähe (...) daher als vernachlässigbar zu betrachten“ (Salchenegger, 2006).

3.5.3 Kosten

Durch den kostenintensiven Platineinsatz für die Brennstoffzelle und der bisher geringen Stückzahl an produzierten Fahrzeugen ergibt sich ein zurzeit noch hoher Anschaffungspreis von 78.000 €. Zusätzlich wird eine Garantie bis zu 100.000 km bzw. 5 Jahren geboten (ADAC 2017; Toyota 2017). Alternativ zum Neukauf ist es möglich ein H_2-Brennstoffzellenfahrzeug um ca. 1250 € zu leasen, wobei „unter anderem Versicherung, Service, Hauptuntersuchung, sowie Sommer- und Winterreifen“ im Angebot inkludiert sind (Autobild, 2015). Die Treibstoffkosten sind vergleichbar mit denen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, da bei einem angenommenen Wasserstoffpreis von 9,5 €/kg H_2 sich die Kosten auf 8,55 €/100 km belaufen (Spiegel Online, 2012). Ebenfalls müssen die Wartungskosten berücksichtigt werden, die bezogen auf 5 Jahre und einer gefahrenen Kilometeranzahl von 100.000 km 49,5 €/100 km ausmachen. Die detaillierte Auflistung der Wartungskosten ist dem Anhang zu entnehmen (Tabelle 30).

3.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Abbildung 23 zeigt die bisher behandelten Antriebskonzepte – Diesel, Benzin, Erdgas, Batterie und H_2-Brennstoffzelle – im direkten Vergleich hinsichtlich Wirkungsgrad und Energiebedarf im Kraftstoff je 100 km Fahrleistung. Am günstigsten liegt hierbei das batteriebetriebene Fahrzeug, gefolgt vom Brennstoffzellenfahrzeug. Fahrzeuge mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren liegen nahezu gleichauf und mit dem Wirkungsgrad deutlich niedriger.

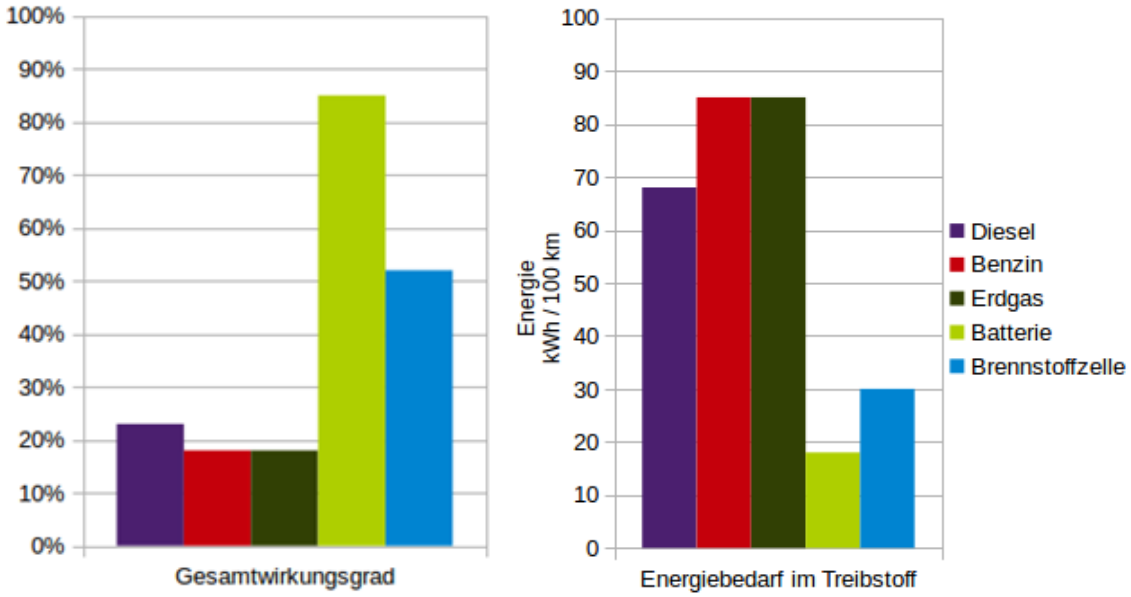


Abbildung 23: Vergleich Gesamtwirkungsgrad Tank-to-Wheel und Energiebedarf unterschiedlicher Antriebskonzepte (Eigener Entwurf)

In Abbildung 24 sind die direkten Emissionen von CO_2 und Wasser angegeben. Wie zu erwarten emittieren die beiden Elektrofahrzeugtypen im Betrieb keinerlei Kohlendioxid, weiteres sind die Wasseremissionen bei der Brennstoffzelle mit jenen der Verbrennungsmotoren vergleichbar. Der Beitrag der H_2O-Emissionen zum Treibhauseffekt ist jedoch vernachlässigbar.

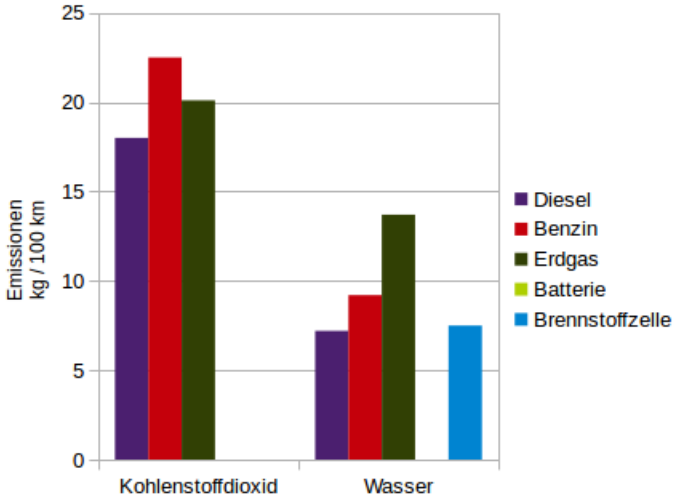


Abbildung 24: Direkte CO_2- und H_2O-Emissionen (Eigener Entwurf)

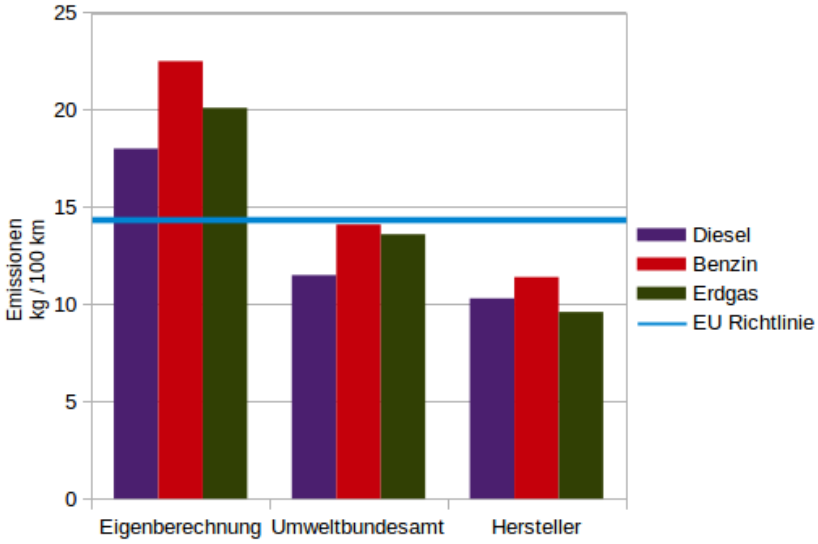


Abbildung 25: Direkte CO_2-Emissionen im Vergleich (Eigener Entwurf)

Wenn die berechneten Werte mit anderen Studien und den Herstellerangaben verglichen werden, ergeben sich offensichtliche Unterschiede: In Abbildung 25 sind Werte aus einem Report des Umweltbundesamtes (Pötscher et al., 2014) und die Herstellerangaben laut ADAC (2017) mit den Eigenberechnungen verglichen. Weiteres ist der Grenzwert laut EU-Richtlinie für direkte CO_2-Emissionen (EU, 2009) eingetragen. Klar zu sehen ist, dass die hier berechneten Werte deutlich höher als die Vergleichswerte ausfallen und die EU-Richtlinie überschreiten. Eine Ursache für diese Diskrepanz ist bei den unterschiedlichen Fahrzyklen zu finden, da diese entscheidend den Verbrauch und damit auch den Schadstoffausstoß beeinflussen.

Es scheint kaum verwunderlich, dass die Emissionswerte der Hersteller an deutlich niedrigeren Werten zu finden sind – sind sie doch bestrebt, durch geeignete Wahl von Fahrzyklus und Bedingungen, ihr Fahrzeug bestmöglich zu präsentieren.

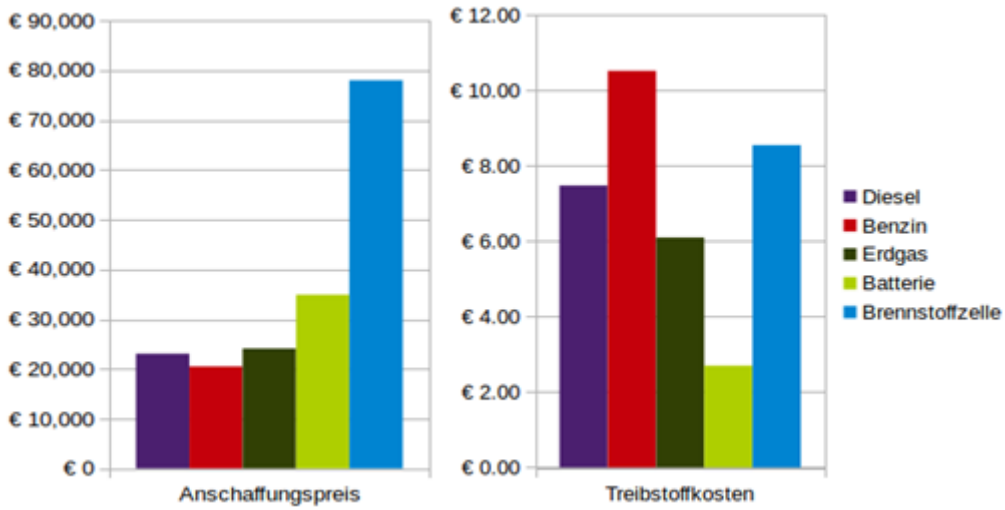


Abbildung 26: Anschaffungs- und Treibstoffkosten (Eigener Entwurf)

Zu guter Letzt sind in Abbildung 26 die Anschaffungs- und Treibstoffkosten der unterschiedlichen Technologien miteinander verglichen. Während die batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge bei höherem Kaufpreis gegenüber herkömmlichen Diesel-, Benzin-, und Erdgasfahrzeugen von den niedrigeren Treibstoffkosten profitieren, können die Brennstoffzellenfahrzeuge keinen solchen Bonus aufweisen: die Treibstoffpreise sind vergleichbar mit jenen der herkömmlichen Brennstoffe, jedoch sind die Anschaffungskosten noch im sehr hohen Bereich. Da Serienfahrzeuge mit derartigem Antrieb jedoch erst seit kurzem auf dem Markt erhältlich sind, ist in Zukunft mit Preissenkungen zu rechnen.

4 Rechtliche Aspekte, Sicherheit und Kundenanforderungen im Rahmen unterschiedlicher Antriebsstoffe

Dr. Gstirner Gernot (Geographie/Jus)

Konrad Birgit (NAWI)

Pusterhofer Kerstin (VWL)

4.1 Einleitung

Der Verkehr verursacht etwa ein Viertel der Treibhausgasemissionen in Österreich und ist eine der Hauptursachen für die Luftverschmutzung und den Treibhauseffekt. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren sind zudem Mitverursacher von Feinstaub. Mit alternativen Antriebsarten im Straßenverkehr ist es möglich, diese Emissionen nachhaltig zu reduzieren und dadurch die Treibhausgasbilanz im Transportsektor zu verbessern.

Ziel dieses Kapitels war, die Verwendung von fossilen Treibstoffen Diesel, Benzin und Erdgas mit dem Einsatz alternativer Treibstoffe wie Hybrid, Strom oder Wasserstoff zu vergleichen und einen grundlegenden Bogen über Themenstellungen wie Sicherheit, rechtliche Rahmenbedingungen und Kundenanforderungen an die jeweiligen Treibstoffe, im Zuge der Nutzwertanalyse, zu spannen.

Die Arbeit soll Unterschiede zwischen den Antriebsarten herausarbeiten und später jene Treibstoffe ausfindig machen, die ökonomisch sowie auch ökologisch die geringsten Kosten bzw. Schäden verursachen, bei welchen Sicherheit und deren soziale Akzeptanz gegeben sind und für welche grundlegende rechtliche Voraussetzungen geschaffen werden können, um in weiterer Folge einen geeigneten, zukünftigen Flottenmix zu bestimmen.

Die Inhalte zu den rechtlichen Rahmenbedingungen wurden von Herrn Dr. Gernot Gstirner aufbereitet und im Folgenden dargestellt. Die Nutzwertanalyse basiert auf Recherchen und Literaturvergleichen von Frau Kerstin Pusterhofer. Alle Informationen rund um die Sicherheit, als letzter inhaltlicher Punkt des Endberichts, sind zurückzuführen auf Ausarbeitungen von Frau Birgit Konrad.

4.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Hier werden die gegenwärtigen unterschiedlichen rechtlichen Rahmenbedingungen in Österreich für den Ankauf und den Betrieb von Personenkraftwagen (PKW) mit unterschiedlichen Antrieben miteinander verglichen, nämlich Brennstoffzellenantrieb, batteriebetriebener Elektroantrieb und Verbrennungskraftmotor (VKM). Alle angeführten Gesetze sind österreichische Bundesgesetze, soweit nicht ausdrücklich eine andere Quelle angeführt wird.

Im Einzelnen werden das anwendbare Steuerrecht und die anwendbaren Förderungen untersucht. Schließlich werden für bestimmte Referenzfahrzeuge und den angeführten PKW-Nutzertypus die wirtschaftliche Auswirkung der jeweiligen Rechtslage berechnet, beim Kraftstoff wird der Kraftstoffpreis miteinander verglichen. Benzin und Dieselfahrzeuge

werden in derselben Kategorie geführt, weil sich die rechtlichen Regelungen bis auf einen geringen Unterschied in der Mineralölsteuer gleichen.

Tabelle 15: Leistungen und Preise der Referenzfahrzeuge im Vergleich (Werte entsprechen den Werksangaben oder errechnen sich daraus) Stand Dezember 2016

	Toyota Mirai	**VW E-Golf**	**VW Golf 1,2 TSI** (Angaben lt. Autoportal „angurten.de“)
Reichweite	502 km	190 km	833 km [1)]
Leistung	114 kW	85 kW	81 kW
von 0 auf 100 km/h	9,6 s	10,4 s	9,9 s
Treibstoff für 100 km	0,76 kg H_2	12,7 kWh	6 l Superbenzin (lt. Fahrtest www.heise.de)
Garantie		Batterie: 8 Jahre oder 160.000 km	
Listenpreise inkl USt und NoVA (Normverkehrsabgabe) in Österreich	78.540 €	34.900 €	23.020 €

[1)] 6 l Verbrauch/100 km bei einem 50 l-Tank = Reichweite von 833 km

Die unterschiedlichen wirtschaftlichen Auswirkungen der jeweiligen rechtlichen Regelungen werden für eine Referenz-Fahrzeugnutzerin/einen Referenz-Fahrzeugnutzer berechnet: Dies ist jemand aus der Geschäftsführung oder eine Angestellte/ein Angestellter einer GmbH, mit einem Jahresbruttogehalt zwischen 31.000 € und 60.000 €, der den PKW zu 50 % betrieblich und zu 50 % privat nutzt und durchschnittlich eine Fahrstrecke von 13.000 km pro Jahr (durchschnittliche Jahreskilometerleistung in Österreich laut Autorevue.at) zurücklegt. Fahrzeugeigentümer ist die GmbH.

Eine Landesförderung wird derzeit u.a. vom Land Steiermark (gemäß Ökoförderungen 2017 Land Steiermark) gewährt und zwar für die Anschaffung von batteriebetriebenen Elektro-PKWs in der Höhe von 25 % der Anschaffungskosten, max. 5.000 €, limitiert auf die Auszahlung eines verfügbaren Fonds; auch Ladestationen werden in der Höhe von 25 % der Anschaffungskosten, mit max. 1.000 €. gefördert.

Die ab Jänner 2017 gewährte Bundesförderung des Verkehrsministeriums (BMVIT) gemeinsam mit dem Umweltministerium (BMLFUW) für Elektro-PKWs, batteriebetrieben oder mit Brennstoffzellenantrieb, in der Höhe von 4.000 € ist auf PKWs bis zu einem Nettolistenpreis von 50.000 € eingeschränkt. Die Brennstoffzellen-PKWs (Toyota Mirai, Honda Clarity und Hyundai iX35 Fuel Cell) notieren aber mit Nettolistenpreisen von über

50.000 € und fallen daher aus der Förderung heraus. Bundes- und Landesförderung schließen sich allerdings einander aus.

Der Verkauf der Fahrzeuge und der Kraftstoffe unterliegt der 20 %-igen USt. Die Anschaffung des Fahrzeugs berechtigt unsere Referenzperson bei den beiden Elektromotorvarianten zum Vorsteuerabzug, bei VKM nicht. Die Normverkehrsabgabe (NoVA) ist von der Verkäuferin oder dem Verkäufer des Fahrzeuges in den Listenpreis einzuberechnen und abzuführen.

Einkommensteuerrechtlich muss der/die DienstnehmerIn (DN), der/die einen Dienst-PKW privat nutzt, diese Nutzung als Sachbezug versteuern. Gemäß Sachbezugswerteverordnung v. 1.9.2015 zum EStG sind Brennstoffzellen- und batteriebetriebene Fahrzeuge allerdings davon befreit, für diese muss daher kein Sachbezug angesetzt werden. Für Benzin- und Diesel-PKWs bis zu einem Ausstoß von 130 g CO_2/km ist bei einer privaten km-Leistung ab 6000 km/a ein Sachbezug von 1,5 % der Anschaffungskosten pro Monat (pm) anzusetzen, und für Fahrzeuge mit einem Ausstoß ab 130 g CO_2/km sind 2 % der Anschaffungskosten pro Monat anzusetzen.

Laut Versicherungssteuergesetz 1953 ist von der Kraftfahrhaftpflichtversicherung neben der Versicherungssteuer die motorbezogene Versicherungssteuer zu berechnen und abzuführen. Dies ist abhängig von der Motorstärke: 0,62 – 0,75 € je kW und Monat, ab dem 25. kW des KFZ.

Über die USt hinaus wird für den Verkauf von Wasserstoff keine Abgabe eingehoben (Preis in Österreich laut mycar.net: 9,00 €/kg H_2). Beim Verkauf von Strom ist lt. Elektrizitätsabgabegesetz 1996 in der geltenden Fassung (idgF) eine Energieabgabe von 0,015 €/kWh (= 1,5 Cent/kWh) abzuführen. Die Mineralölsteuer beträgt für Benzin 0,482 €/l und für Diesel 0,397 €/l lt. Mineralölsteuer-Gesetz 1995 idgF.

Nach der Grazer Parkgebührenverordnung (§ 3 Z 7) sind Brennstoffzellenfahrzeuge und batteriebetriebene Fahrzeuge von der Parkgebühr in der blauen und in der grünen Zone befreit.

Die jeweiligen Wartungskosten werden rechtlich gleichbehandelt und daher hier nicht untersucht.

Tabelle 16 enthält einen Kostenvergleich für die Referenzperson nach Steuern und Förderungen bei Anschaffung und Betrieb der Referenzfahrzeuge. Hierbei liegt das Brennstoffzellenfahrzeug derzeit am höchsten. Das VKM-Fahrzeug liegt zwar in der Anschaffung knapp unter dem batteriebetriebenen Elektrofahrzeug, bei den Betriebskosten

ist es aber ca. zehnmal so hoch. Daher ist das batteriebetriebene Elektrofahrzeug bereits nach einem Betrieb von 6 Monaten insgesamt deutlich am kostengünstigsten. Dieser Kostenvorsprung wird beim Betrieb jährlich um ca. 2.700 € ausgebaut.

Nach dem Ergebnis dieser Studie sind bezüglich Flottenmix im Hinblick auf Reichweite, Lademöglichkeiten und Kosten in folgenden gewerblichen Einsatzbereichen Elektrofahrzeuge zu allererst zu empfehlen:

Taxis, Handwerker-Services, Hauskrankenpflege von Ärzteschaft und Pflegepersonal, städtische Versorgungsunternehmen, Müllabfuhr, der städtische öffentliche Verkehr, Zustelldienste oder ähnliches – in diesen Einsatzbereichen reicht die Reichweite von Elektrofahrzeuges oft schon aus, die Ladezeit kann eingeteilt werden, und die Ladeinfrastruktur kann leicht hergestellt werden oder besteht schon. Der volle Kostenvorteil der Elektrofahrzeuge kommt aber nur zum Tragen, wenn die fossilen Fahrzeuge bei deren Ausrangieren durch Batterie-Elektro-Fahrzeuge ersetzt werden.

Für die Privatperson entfallen aber die Steuernachlässe, sodass die Förderung hier bisher nicht gegriffen hat. In Salzburg erhält man seit Jahresbeginn 2016 als Privatperson bis zu 6.000 € beim Kauf eines Elektroautos. Von diesem Angebot haben laut Presseberichten des ÖAMTCs bis Anfang September aber lediglich 35 Autofahrerinnen und Autofahrer Gebrauch gemacht.

Ausblick lt. Mobilegeeks.de: Nach einer EU-Richtlinie in Ausarbeitung ist geplant, bei Errichtung und Renovierung von Gebäuden ab 2019 die Errichtung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge vorzuschreiben. Dies soll in den lokalen Bauordnungen umgesetzt werden.

Rechtliche Absicherung der Geschädigten bei Brand eines Brennstoffzellenfahrzeugs/batteriebetriebenen Fahrzeugs: Die Geschädigten sind durch die KFZ Pflichthaftpflichtversicherung des Fahrzeugs mindestens bis zu 7 Mio. € versichert. Auch bei unverschuldeten Fehlern in der Beschaffenheit des Fahrzeuges wird gedeckt. Daneben haben die Geschädigten die Produkthaftung zur Verfügung und bei Ladestellen die umfassende Vertragshaftung der Ladestation, diese auch mit Schutzwirkung zugunsten Dritter.

Tabelle 16: Rechtliche Rahmenbedingungen für die Referenzfahrzeuge und den ReferenzfahrzeugnutzerInnen und deren Auswirkungen auf die Kosten für Anschaffung und Betrieb

	Brennstoffzellen-Fahrzeug	**batterie-betriebenes Fahrzeug**	**Benzin-/Diesel-Fahrzeug**
Listenpreis (inkl. NoVA und USt) der Referenz-KFZs	78.540 €	34.900 €	23.020 €
Steuern auf die Anschaffung			
Normverkehrsabgabe (NoVA) lt. Normverkehrsabgabe-gesetz 1991 idgF.	keine NoVA	keine NoVA	NoVA abhängig vom CO_2 Ausstoß
Umsatzsteuer auf Ankauf des PKWs und Kraftstoff lt. Umsatzsteuergesetz 1994 idgF.	20 %	20 %	20 %
vorsteuerabzugsfähig	ja	ja	nein
Förderungen für die Anschaffung			
Bundesförderung	Fahrzeuge fallen nicht in die geförderte Preiskategorie	ab Jänner 2017 - 4.000 € (bei Landesförderung ausgeschlossen)	nein
Förderung des Landes Steiermark	gilt nicht für H_2-PKWs	- 5.000 €	nein
Kaufpreis nach Steuer/Förderung	**65.450 €**	**24.083 €**	**23.020 €**
laufende Kosten pro Jahr			
Einkommensteuerrechtliche Behandlung als Dienst-PKW lt. Sachbezugswerteverordnung v. 1.9.2015 zum EStG	einkommensteuer-frei	einkommensteuer-frei	114 g CO_2/km: 23.020 € * 1,5 % * 12 m = 4.143,60 €/a * 42 % (ESttarif)= 1.740 €/a
Steuern und Gebühren auf die Nutzung pro Jahr			
Versicherungssteuergesetz 1953	Befreiung	Befreiung	56 * 0,7 € = 39,2 * 12 m = 470,40 €/a
Kraftstoffpreis inkl. Steuer für 13.000 km/a	0,76 kg/100 km * 9,00 €/kg * 13.000 km/a = 889,20 €/a	12,7 kW/100 km * 0,20 €/kW * 13.000 km/a = 330,20 €/a	6 l/100 km * 1,20 €/l * 13.000 km/a = 936 €/a
Summe: Steuern + Kraftstoffpreis pro Jahr	**889,20 €/a**	**330,20 €/a**	**3.146 €/a**

4.3 Nutzwertanalyse

Zu Beginn werden die Grundlagen der Nutzwertanalyse aufgezeigt, sowie Begründungen für die Durchführung dieser Analyse dargestellt. Im Weiteren soll das Ziel der Untersuchung konkretisiert und mittels eines Fragebogens als Erhebungsmethode unterstrichen werden. Einen vollständigen Überblick soll schließlich die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse auf das konkrete Beispiel eines Autokaufes geben (Anhang 1: Fragebogen).

4.3.1 Grundlagen der Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse, in der Praxis auch Scoring-Modell genannt, dient als eine Methode zur Entscheidungsfindung. Dadurch wird versucht, unterschiedlichen Handlungsalternativen einen Nutzwert beizumessen. Auf Basis dieses errechneten numerischen Nutzwertes soll von den Entscheidungsträgen jenes Szenario gewählt werden, das den größtmöglichen Nutzen stiftet. Die Anwendung dieser Analyse reicht von einfachen Entscheidungssituationen bis hin zu hochkomplexen Verfahren (Kerth et al., 2005, S.239).

Winkelhofer (2005, S. 141) gliedert den Ablauf einer Nutzwertanalyse wie folgt:

1) Auswahl aller relevanten Kriterien

2) Gewichtung der einzelnen Kriterien

3) Bewertung der Handlungsalternativen

4) Berechnung des Nutzwertes für die einzelnen Alternativen

Im ersten Schritt werden alle für die Entscheidung wichtigen Kriterien festgelegt. Ein Kriterienkatalog soll Überblick über die gesamte Fragestellung verleihen, die nach Durchführung der Analyse beantwortet werden soll. Bei der Gewichtung der Kriterien ist laut Winkelhofer (2005, S. 141) darauf zu achten, dass „die Summe der einzelnen Anteile zusammen 100 % ergeben“. Im nächsten Schritt werden alle zur Wahl stehenden Alternativen bewertet, in dem über unterschiedliche Verfahren, wie zum Beispiel einer Punktevergabe von 50 (sehr gut) bis 10 (schlecht), dimensionslose Nutzwerte generiert werden. Durch Multiplikation der vergebenen Punkte mit der zuvor festgelegten Gewichtung ergeben sich Teil-Nutzwerte. In der vierten und letzten Stufe wird der Gesamtnutzwert für die jeweiligen Alternativen errechnet, indem die Summe der einzelnen Teil-Nutzwerte gebildet wird. Die Entscheidung wird zugunsten der Alternative mit dem höchsten Gesamtnutzen getroffen (Winkelhofer, 2005, S.141).

4.3.2 Zielsetzung

Primäres Ziel der Arbeit ist, den Einsatz von fossilen Treibstoffen wie Diesel, Benzin und Erdgas mit alternativen Antrieben, wie dem Elektroantrieb mit Akku oder Wasserstoff sowie dem Hybridantrieb zu vergleichen. In diesem Abschnitt liegt der Fokus vor allem auf der Analyse der Wahrnehmung dieser unterschiedlichen Treibstoffe beim Autokauf und darauf, welchen Einfluss diese auf die Wahl eines Autos nehmen können.

Die Durchführung einer Umfrage liefert dazu konkrete Daten, um nach Auswertung dieser, allgemeine und aussagekräftige Annahmen treffen zu können. Auf Basis dieser Erhebung liefert die Nutzwertanalyse schließlich eine Antwort auf die im Kriterienkatalog zuvor festgelegte Fragestellung.

Die Motivation für die Anwendung eines Scoring-Modells liegt darin, Transparenz und Objektivität in einem Entscheidungsprozess zu integrieren. Vor allem komplexe Entscheidungsprozesse mit einer hohen Anzahl an Handlungsoptionen erfordern oft mehr als eine subjektive, persönliche Intuition um bessere Vergleichbarkeit zu erhalten (Winkelhofer, 2005, S.142).

4.3.3 Nutzwertanalyse als Entscheidungshilfe bei einem Autokauf

Angelehnt am Leitfaden von Kühnapfel (2014, S. 5 ff) wird die Nutzwertanalyse im Folgenden anhand eines Autokaufes verdeutlicht.

Der Kunde oder die Kundin hat die Wahl zwischen Elektrofahrzeugen, betrieben mit Akku oder Wasserstoff, Hybridautos oder Autos, welche die üblichen fossilen Treibstoffe wie Diesel, Benzin oder Erdgas verwenden. Es soll auf Basis der Nutzwertanalyse entschieden werden können, für welche Alternative sich der Kunde entscheiden wird. Alle relevanten Kriterien für einen Autokauf werden in nachfolgender Abbildung 27 dargestellt. (Anhang 3: Nutzwertanalyse)

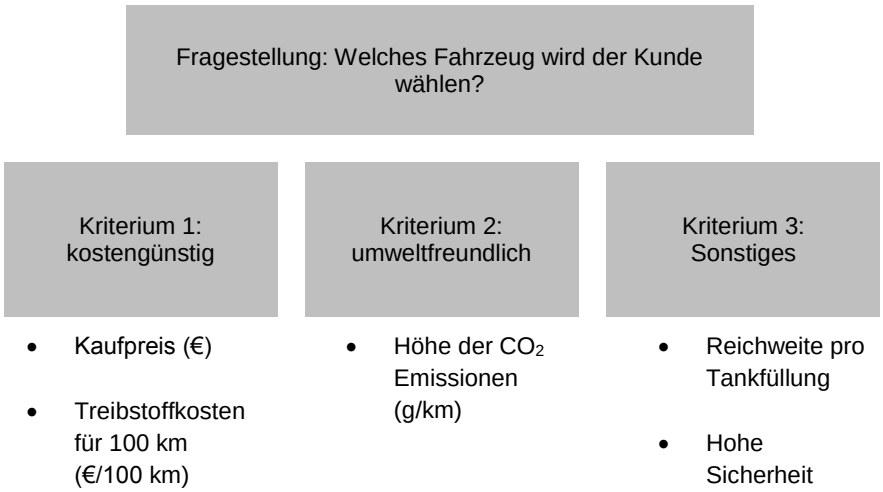


Abbildung 27: Auswahl relevanter Kriterien mit übergeordneter Fragestellung

Die Gewichtung der Kriterien hängt vom Werturteil des Kunden ab und kann somit zwischen den Individuen stark variieren. So wird zum Beispiel ein Kunde der täglich weite Strecken zurücklegt, die Reichweite pro Tankfüllung stärker gewichten als ein Stadtautofahrer, der nur kurze Strecken zurücklegen muss.

Für die Überführung der Kriterien in einen dimensionslosen Nutzwert werden Nutzenfunktionen erstellt, die im Folgenden tabellarisch (Tabelle 17) dargestellt werden. Alle Handlungsalternativen und deren Abstufungen werden durch Vergabe von Punkten zwischen 10 und 50 bewertet.

Tabelle 17: Bewertung der Handlungsalternativen durch Punktevergabe

Kaufpreis [€]	Treibstoffkosten für 100 km [€/100km]	CO_2-Emissionen [g/km]	Sicherheitsempfinden	Reichweite pro Tankfüllung [km]	Nutzwert
15.000 – 29.999 (preiswert)	1,00 – 2,95 (sparsam)	32 – 56 (umweltfreundlich)	sehr sicher	600 – 1000 (hohe Reichweite)	**50**
30.000 – 39.999	3,00 – 5,95	57 – 88			**40**
40.000 – 55.499	6,00 – 8,95	89 – 110		201 – 599	**30**
56.000 – 79.999	9,00 – 11,95	101 – 130			**20**
Über 80.000 (nicht preiswert)	Über 12 (nicht sparsam)	131 – 160 (hohe Emissionen)	sehr unsicher	100 – 200 (niedrige Reichweite)	**10**

Im letzten Schritt wird der Teil-Nutzwert der jeweiligen Alternative durch Multiplikation des zuvor bestimmten Nutzwertes mit der Gewichtung errechnet, um schlussendlich durch Aufsummierung der Teil-Nutzwerte die Gesamtnutzen der Handlungsalternativen miteinander vergleichen zu können. Die Alternative mit dem höchsten Gesamtnutzen wird vom Kunden präferiert. Die Errechnung der Teilnutzwerte wurde ebenso wie die Gewichtung der einzelnen Kriterien anhand der Umfragedaten errechnet und wird in *Anhang 3: Nutzwertanalyse* näher erläutert.

Tabelle 18: Errechnung der Teil- und Gesamtnutzwerte

Kriterien	**Gewich-tung**	**Diesel**		**Benzin**		**Erdgas**		**Strom**		**Hybrid**		**Wasserstoff**	
		Nutzwert	Teil-Nutzwert	Nutzwert	Teil-Nutzwert	Nutzwert	Teil-Nutzwert	Nutzwert	Teil-Nutzwert	Nutzwert	Teil-Nutzwert	Nutzwert	Teil-Nutzwert
Kaufpreis	0,2157	40	8,628	40	8,628	40	8,628	10	2,157	10	2,157	10	2,157
Treibstoff kosten für 100 km	0,2092	20	4,184	20	4,184	20	4,184	50	10,46	50	10,46	30	6,276
CO_2 Emissio-nen	0,1307	10	1,307	10	1,307	10	1,307	50	6,535	50	6,535	50	6,535
Sicher-heitsem-pfinden	0,2549	50	12,745	50	12,745	10	2,549	40	10,196	30	7,647	10	2,549
Reichweit e pro Tankfüllu ng	0,1895	50	9,475	50	9,475	50	9,475	30	5,685	30	5,685	30	5,685
Gesamt-nutzwert		36,339		36,339		26,143		35,033		32,484		23,202	

Je nach Nutzenfunktionen und Gewichtung können die Kennzahlen unterschiedliche Ergebnisse liefern. Aufgrund der Datenbasis, aus der durchgeführten Umfrage mit 63 TeilnehmerInnen, liefern nach wie vor die konventionellen und bekanntesten Treibstoffe wie Diesel oder Benzin und die damit betriebenen Fahrzeuge die größten Gesamtwerte für die Befragten. Den geringsten Nutzwert liefert, laut dieser Analyse, das wasserstoffbetriebene Fahrzeug. Grund dafür könnte unter anderem die geringe Bekanntheit, sowie die Ungewissheit im Umgang mit diesem alternativen Treibstoff sein.

Diese Untersuchung zeigt zudem, dass Aufklärungsarbeit in Bezug auf alternative und umweltfreundliche Antriebsarten und Innovationen zukünftig unerlässlich ist, um einen Übergang möglich zu machen.

4.4 Sicherheit

Eine Umfrage über das Sicherheitsgefühl im Umgang mit unterschiedlichen Antriebsstoffen hat ergeben, dass sich nur 3 % der Befragten bei Wasserstoff betriebenen PKWs und 50 % der Befragten bei Benzin- bzw. Dieselfahrzeugen sicher fühlen (Anhang 2: 6.4.2). Um den Umgang mit den verschiedenen Antriebsstoffen sicher zu gestalten, muss man über deren Eigenschaften und über die technischen Anwendungen Bescheid wissen. In Tabelle 19 sind u.a. Gefahrensymbole und wichtige Eigenschaften wie z.B. Temperaturpunkte (Flammpunkt, Siede- und Zündtemperaturen) der unterschiedlichen Antriebsstoffe (Eichlseder et al., 2012, S 153) aufgelistet.

Tabelle 19: Sicherheitseigenschaften verschiedener Antriebsstoffe

Bezeichnung	**Benzin, Ottokraftstoff**	**Diesel, Dieselkraftstoff**	**Erdgas (v.a. Methan)**	**Wasserstoff**	**Batterie (Lithium-Ionen)**
Summenformel	aus vielen verschiedenen Kohlenwasserstoffen	aus vielen verschiedenen Kohlenwasserstoffen	CH_4 (Methan)	H_2	zB. $LiCoO_2$ oder $LiFePO_4$
Dichte (flüssig)	750 – 770 kg/m^3	820 – 845 kg/m^3	423 kg/m^3	70,8 kg/m^3	k.A.
Dichte (gasförmig)	k.A.	k.A.	0,716 kg/m^3	0,090 kg/m^3	k.A.
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung bzw. Kennzeichnung Hochspannung					Hochspannung
EU-Gefahrstoffkennzeichnung					k.A.
Geruch	Benzingeruch	Dieselgeruch	geruchlos (Odorierung)	geruchlos (Odorierung)	geruchlos
Siedetemperatur (1,013 bar)	30 °C – 190 °C	210 °C – 355 °C	-162 °C	-253 °C	k.A.
Zündtemperatur (°C) und Temperaturklasse	230 °C – 450°C / T3	250 °C / T3	595 °C / T1	585 °C / T1	k.A.
Flammpunkt	<- 21 °C	> 55 °C	-188 °C	-270,8 °C	k.A.
Zündenergie	0,24 mJ	0,24 mJ	0,28 mJ	0,017 mJ	k.A.
Flammentemperatur (Österr. Bundesfeuerwehrverband, 2010)	2.000 °C – 2.500 °C	2.000 °C – 2.500 °C	bis 2.000 °C	ca. 2.300 °C in Luft ca. 2.700 °C in Sauerstoff	k.A.
Verbrennungsgeschwindigkeit	0,40 m/s	0,40 m/s	0,42 m/s	2,30 m/s	k.A.
Heizwert / spez. Energieinhalt	11,5 kWh/kg	11,9 kWh/kg	13,9 kWh/kg	33,3 kWh/kg	0,15 kWh/kg

4.4.1 Benzin- und Dieselfahrzeuge

Benzin und Diesel sind hochentzündlich und gesundheitsgefährdend (siehe Tabelle 19). Die Dämpfe schaden der Gesundheit, wie auch der Feinstaub und die CO_2-Emissionen, die durch die Treibstoffverbrennung entstehen. Geraten die Treibstoffe in den Wasserkreislauf bedeutet das eine Gefahr für die Umwelt.

4.4.2 Erdgasfahrzeuge

Erdgas ist hochentzündlich und steht in Behältern unter Druck. Bei Überdruck im Erdgastank eines Fahrzeugs wird ein Überdruckventil geöffnet und der gesamte Tankinhalt strömt nach oben (nicht seitlich!) rasch aus. Erdgas ist geruchlos und wird daher odoriert, um ein Ausströmen des Gases schneller wahrnehmen zu können. Im Fahrzeug werden Gassensoren eingebaut. Durch die geringe Dichte sammelt sich Erdgas in geschlossenen Räumen oben an. Zündquellen sind unbedingt zu vermeiden.

4.4.3 Wasserstofffahrzeuge

Da Wasserstoff hochentzündlich ist, müssen hier besondere Sicherheitsvorkehrungen beachtet werden. Auch energiearme Funken wie z.B. bei elektrostatischer Aufladung können zur Zündung führen, daher muss der Wasserstoff von Hitze und Funken ferngehalten werden (Rauchen miteingeschlossen). Bei Überdruck im Wasserstofftank eines Fahrzeuges wird ein Überdruckventil geöffnet und der gesamte Tankinhalt strömt nach oben (nicht seitlich!) rasch aus. Wasserstoff entzündet sich nur, wenn entsprechender Sauerstoff innerhalb der Zündgrenzen vorhanden ist und zusätzlich Fremdenergie eingebracht wird. Eine thermische Zündung erfolgt erst ab Temperaturen von 560 °C. Da der brennende Wasserstoff bei Tageslicht nicht sichtbar ist, wird seitens der Feuerwehr eine Wärmebildkamera verwendet oder ein Besentest durchgeführt (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, 2010).

Wasserstoff kann durch Diffusion die Eigenschaften von Werkstoffen beeinflussen. Daher ist bei wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen die Auswahl des richtigen Werkstoffs besonders zu berücksichtigen. Die Fahrzeugkarosserie wird in mehreren Kammern unterteilt und es werden Wasserstoffsensoren platziert. Im Fahrzeug gibt es automatische und manuelle Notabschalteinrichtungen, damit die Wasserstoffzufuhr unterbrochen und alle elektrischen Verbraucher ausgeschaltet werden können.

Bei einem unkontrollierten Gasaustritt (nicht brennend) sammelt sich in geschlossenen Räumen (z.B. einer Tiefgarage) das Gasgemisch oben an, da die Dichte geringer als die der Luft ist. Zündquellen sind zu vermeiden.

4.4.4 Elektro- und Hybridfahrzeuge

Im Batteriekreis der Elektro- und Hybridfahrzeuge kommt es zu 400 Volt Gleichspannung und bis zu 650 Volt Wechselspannung im Motorkreis. Stromführende Leitungen sind zur besseren Erkennung in der Farbe Orange ausgeführt. Bei einem schweren Verkehrsunfall wird die Spannung des Fahrzeuges von der Feuerwehr überprüft. Wenn der Akkumulator eine Beschädigung erfahren hat, kann es zu einem Kurzschlussstrom kommen, der wiederum eine sehr hohe Reaktionstemperatur hervorruft. Eine Wärmebildkamera gibt darüber Auskunft. Ein etwaiger Elektrolytaustritt (z.B. Kaliumhydroxid oder Flusssäure) bedeutet für die Gesundheit und die Umwelt eine Gefahr (Mörk-Mörkenstein, 2016). Lithium-Ionen-Akkus sind hermetisch gekapselt. Bei Beschädigungen reagiert das Lithium-Metall aber heftig mit Wasser. Durch die Reaktion des Lithiums mit dem Löschwasser entsteht Wasserstoff (zündfähiges Gas).

4.5 Schlussfolgerungen

Neben den herkömmlichen fossilen Treibstoffen gibt es zahlreiche alternative Antriebsstoffe, die bestimmte Vor- und Nachteile, sowohl im Umgang als auch in der Nutzbarmachung mit sich bringen. Vor allem aber durch steigende Preise fossiler Treibstoffe und die zunehmende Dringlichkeit, neue umweltschützende Innovationen und Techniken zu entwickeln, wird zukünftig ein Umstieg auf alternative, umweltfreundlichere Treibstoffe zu verzeichnen sein.

5 Zusammenfassung

Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel zusammengefasst, wobei das Hauptaugenmerk auf den drei anfangs erwähnten Säulen liegt.

5.1 Energieeffizienz

Ein behandelter Aspekt ist die Energieeffizienz der unterschiedlichen Technologien, wobei Berechnungen bezüglich der Wirkungsgrade und in weiterer Folge des Energiebedarfs pro 100 Fahrtkilometern durchgeführt wurden. Ergebnisse dazu sind in Abbildung 28 dargestellt. In Gelb ist hierbei der Energieaufwand im tatsächlichen Betrieb (Tank-to-Wheel) und in Rot der Energieaufwand in der Bereitstellung (Well-to-Tank) aufgetragen.

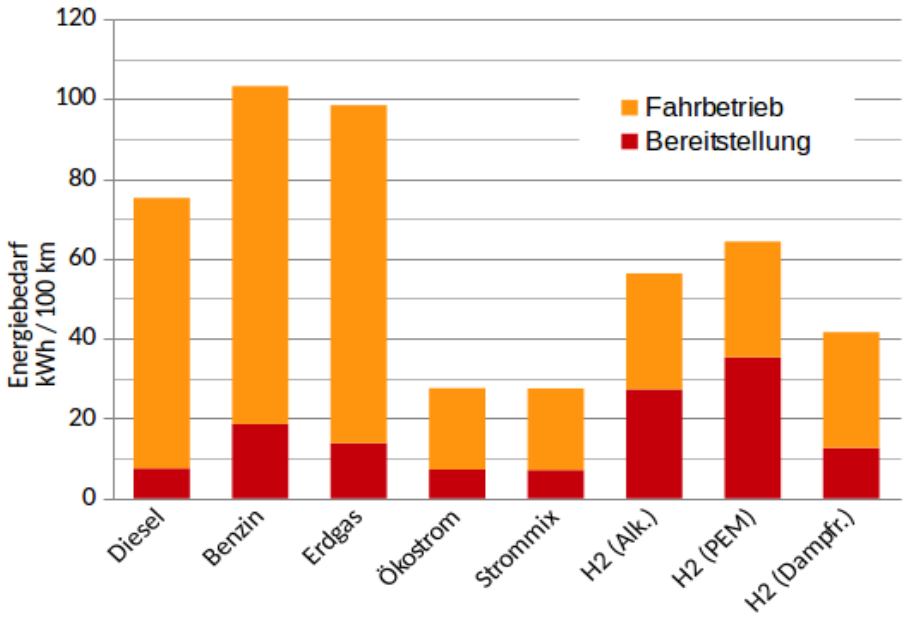


Abbildung 28: Energiebedarf für Bereitstellung und Betrieb (eigene Darstellung)

Auffallend dabei ist, dass bei allen Treibstoffarten, mit Ausnahme von Wasserstoff, der Anteil der im Fahrbetrieb benötigten Energie deutlich höher ist als jener zur Energiebereitstellung. Insgesamt am energieeffizientesten sind Elektrofahrzeuge, gefolgt von Brennstoffzellenfahrzeugen und schließlich Fahrzeugen mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren. Bei Wasserstoff spielt insbesondere die Art der Treibstoffherstellung eine große Rolle, so weist beispielsweise die Dampfreformierung im Vergleich zu den Elektrolyseverfahren einen besseren Wirkungsgrad auf.

5.2 Ressourcenverbrauch und Emissionen

Der nächste Punkt, der besondere Beachtung verdient, ist die Umweltauswirkung der Technologien, ein Teil davon ist der Ressourcenverbrauch. Bei manchen der eingesetzten Rohstoffen sind die bisher bekannten Vorkommen stark limitiert oder befinden sich in unsicheren Regionen. Deutliche Unterschiede gibt es im Ressourcenbedarf zwischen den unterschiedlichen Antriebsarten, so werden beispielsweise Kupfer, Kobalt und Lithium bei Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen in weitaus größeren Mengen gebraucht als bei herkömmlichen Benzin- oder Dieselfahrzeugen. Recycling kann bei Ressourcenverknappung von manchen Rohstoffen Abhilfe schaffen.

Sämtliche Prozesse, angefangen bei der Förderung und Verarbeitung von Rohstoffen, über die Bereitstellung der Energie bis hin zum Betrieb selbst, emittieren Schadstoffe. In Abbildung 29 ist der CO_2-Ausstoß in diesen drei Lebensphasen des Fahrzeugs angegeben, bezogen auf 75.000 km Fahrleistung. Hierbei wird sichtbar, dass der Emissionsanteil der Produktion sehr gering ausfällt, bei längerer Lebenszeit wird er dementsprechend noch unbedeutender. Durch den Ausstoß im direkten Betrieb schneiden die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren auch wesentlich schlechter ab als die Alternativen, bei Brennstoffzellenfahrzeugen spielt erneut die Herstellung des Wasserstoffs eine große Rolle.

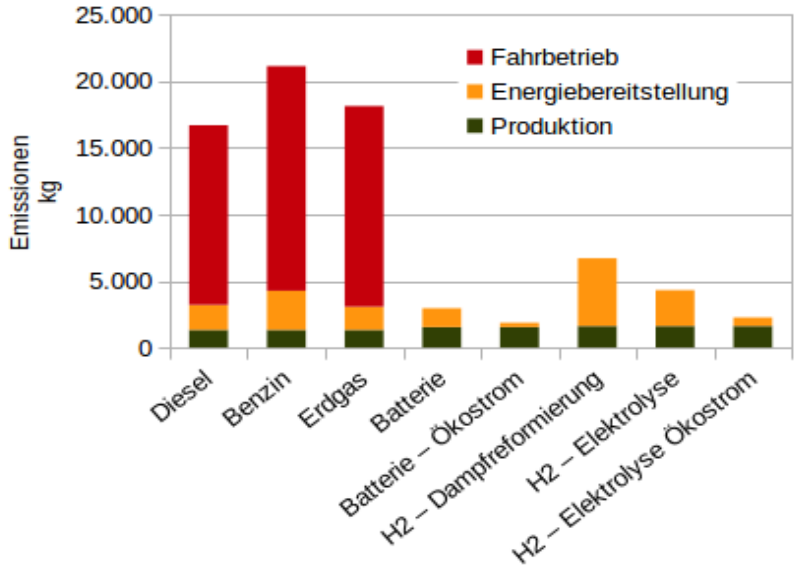


Abbildung 29: CO_2-Ausstoß bezogen auf 75.000 km Fahrleistung (eigene Darstellung)

5.3 Kosten

Neben dem subjektiven Sicherheitsempfinden spielen die Kosten für den Konsumenten die größte Rolle beim Autokauf. Werte zu Anschaffungspreis und Treibstoffkosten sind daher in

Abbildung 30 dargestellt. Relativ gesehen spielen hier die initialen Kosten eine größere Rolle als diejenigen für Treibstoff, wobei die Betriebskosten jedoch nicht betrachtet wurden. Der finanzielle Vorsprung von herkömmlichen Treibstoffen insbesondere gegenüber Brennstoffzellen lässt sich unter anderem durch deren geringe Marktpräsenz und Unsicherheiten von Seiten der Bevölkerung erklären.

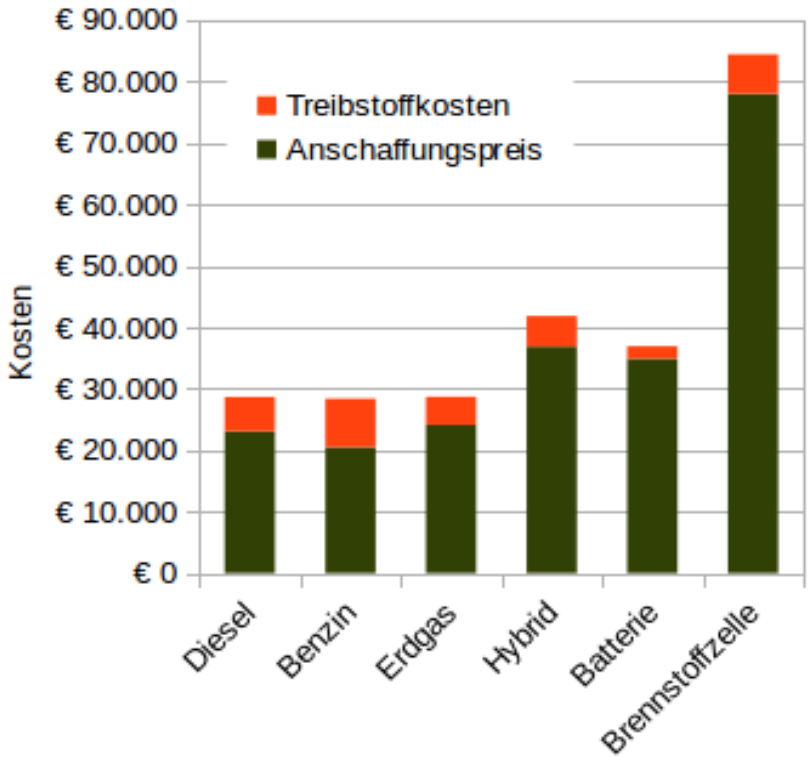


Abbildung 30: Anschaffungs- und Treibstoffkosten bezogen auf 75.000 km Fahrleistung (eigene Darstellung)

Abgesehen vom Finanziellen schneiden Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge deutlich besser ab als herkömmliche Antriebe. Neben der aktiven Forschung zu erhöhter Reichweite für Batterien und der Kostenreduktion von Brennstoffzellen sind daher in Zukunft Politik und Autoklubs gefordert, zu informieren und vermehrt durch Förderungen und Initiativen die Attraktivität der alternativen Antriebskonzepte zu fördern.

6 Anhänge

6.1 Anhang Produktion und Entsorgung/Recycling

Tabelle 20: CO_2 – Emissionen(Eigener Entwurf, Quelle: http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php, Frischenschlager 2010); Huber

	CO_2 – Emissionen in kg CO_2 / t
Eisen/Stahl	1.540
Aluminium	7.807
Kupfer	5.152
Blei	1.933
Nickel	2.120
Graphit	26,1
Platin	12.408.000
Lithium	17.389
Glas	316

Tabelle 21: Einsparung durch Recycling (Eigener Entwurf, Quelle: https://www.regensburg.de/sixcms/media.php/121/broschuere_recycling_fuer_den_klimaschutz.pdf, Albus 2007, Förster 2015, Grimes 2008); Huber

	Emissionen in kg CO_2 / t
Eisen/Stahl	680
Aluminium	550
Kupfer	3520
Blei	96,65
Nickel	220
Glas	25,28

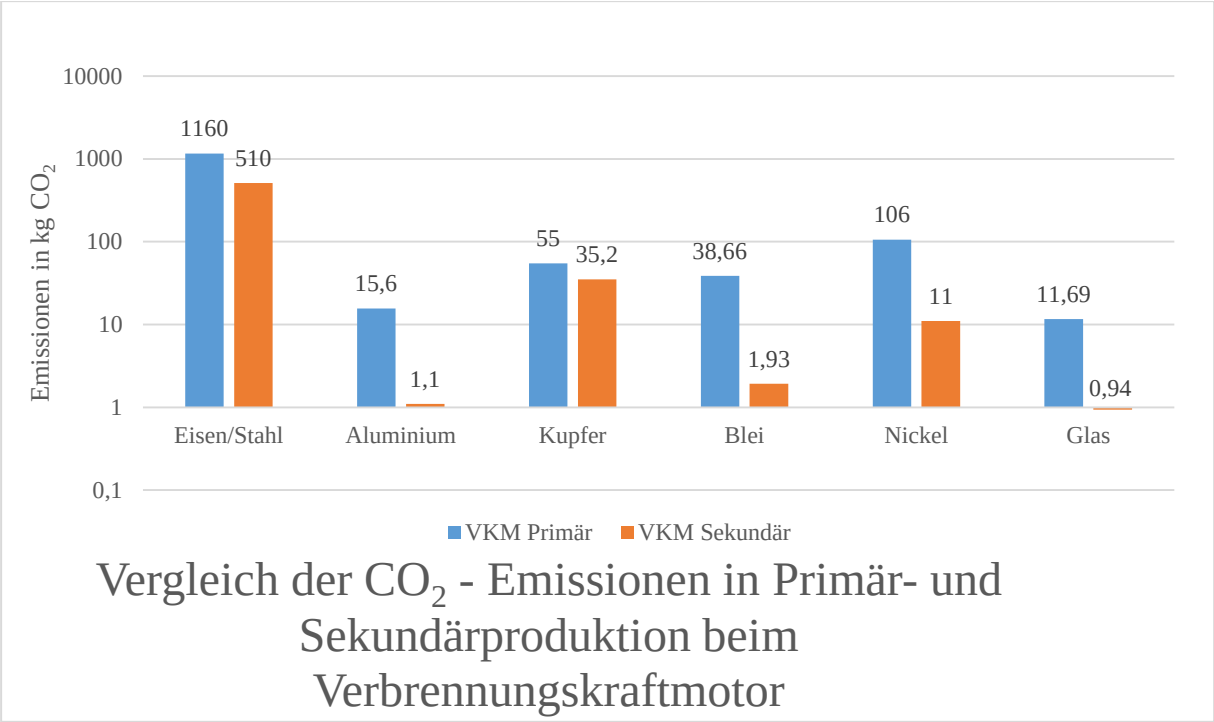


Abbildung 31:Vergleich der CO_2-Emissionen beim VKM (Eigener Entwurf) Huber

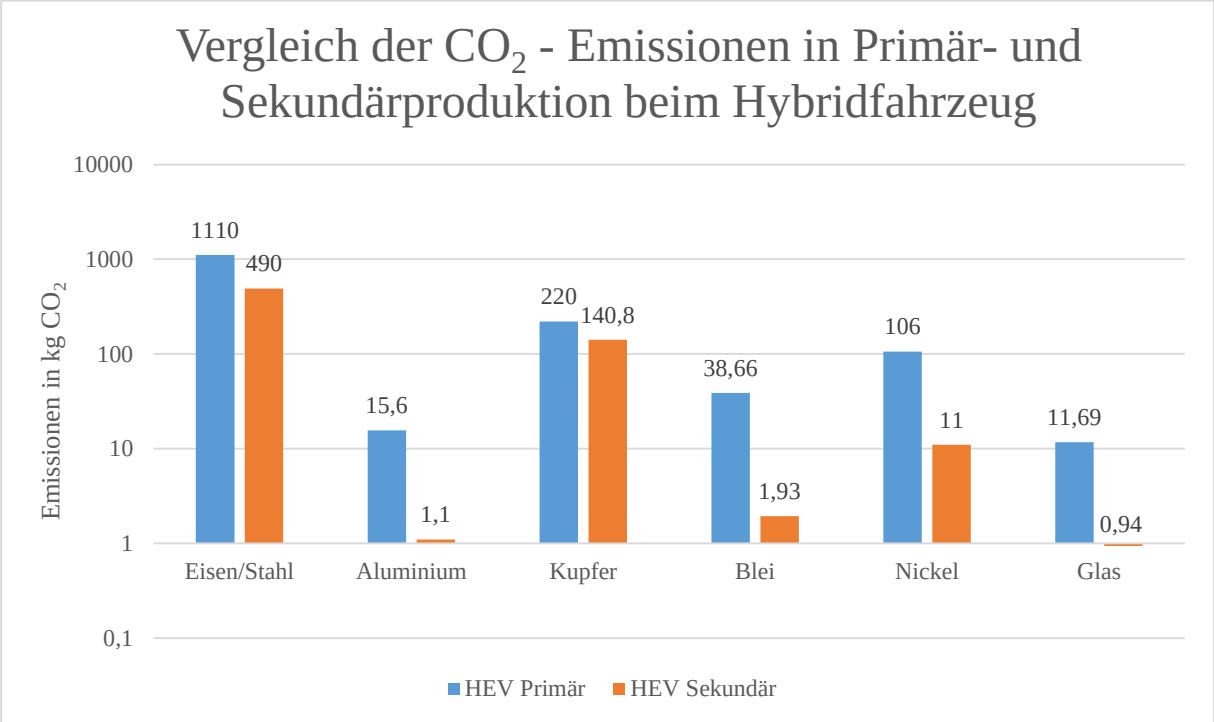


Abbildung 32: Vergleich der CO_2-Emissionen beim HEV (Eigener Entwurf) Huber

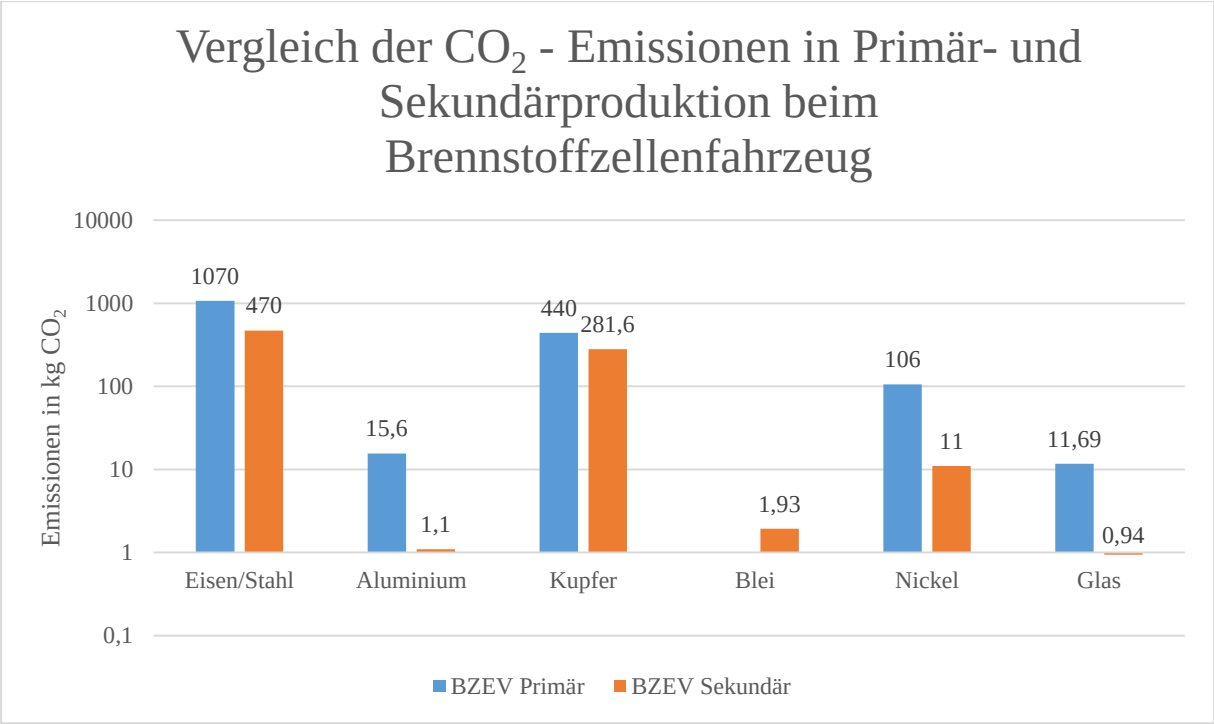


Abbildung 33: Vergleich der CO_2-Emissionen beim BZEV (Eigener Entwurf) Huber

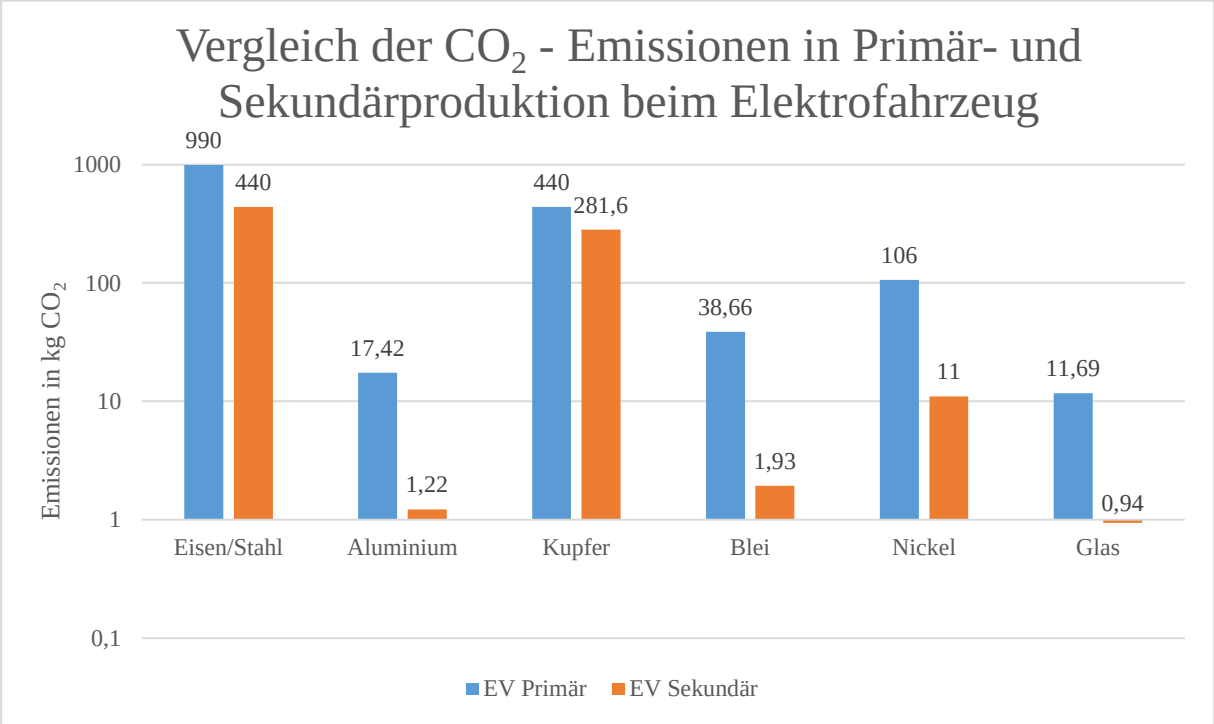


Abbildung 34: Vergleich der CO_2-Emissionen beim EV (Eigener Entwurf) Huber

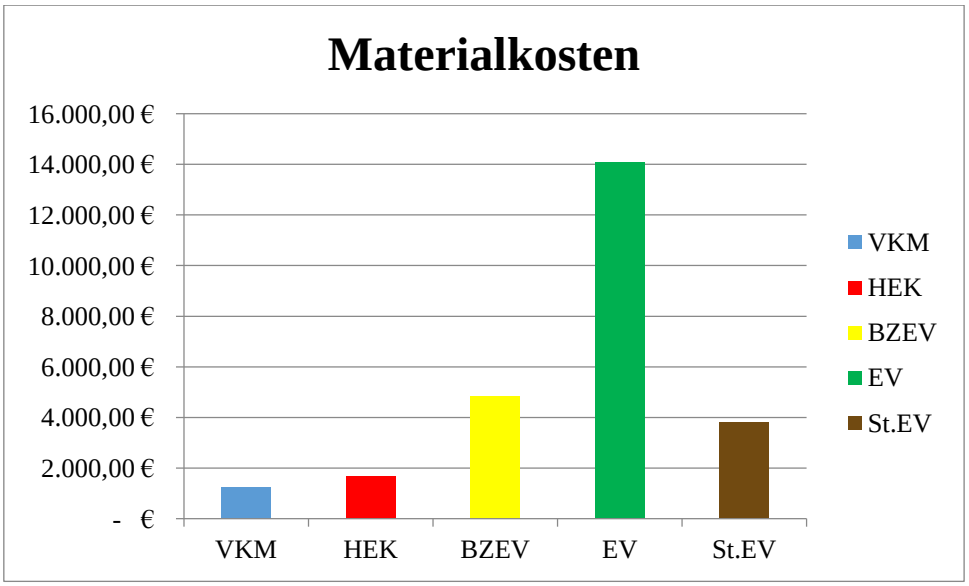


Abbildung 35: Balkendiagramm zu Tabelle 6, Vergleich Materialkosten, Margeta

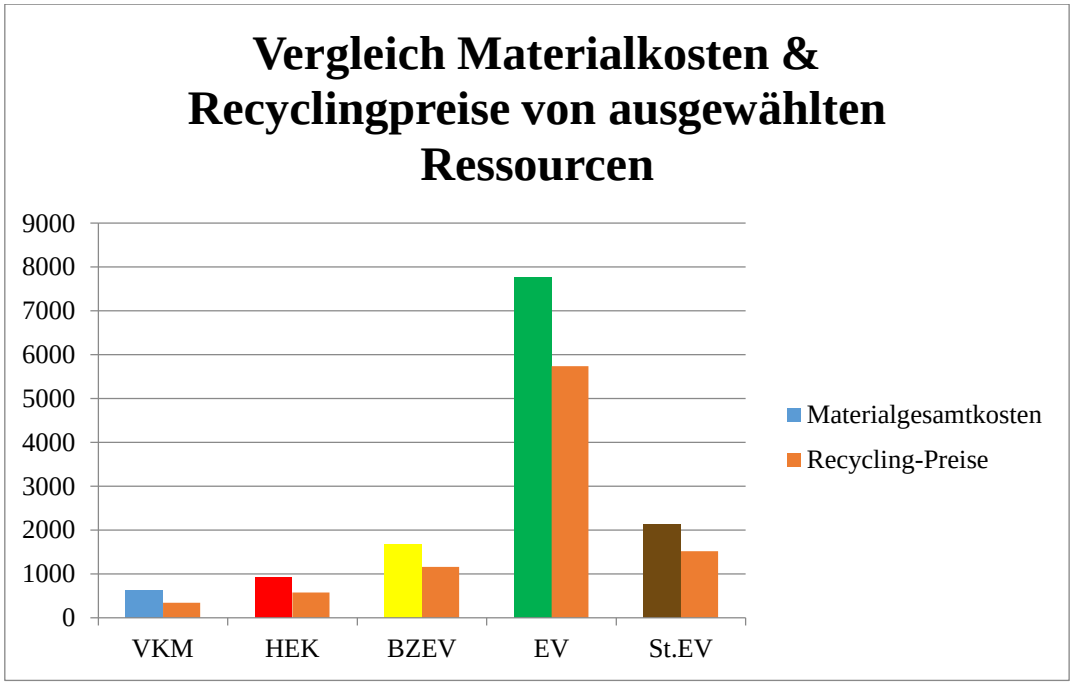


Abbildung 36: Balkendiagramm zu Tabelle 11, Vergleich Materialkosten und Recyclingpreise, Margeta

6.2 Anhang Well-to-Tank

zu Kapitel 2.3

Tabelle 22: CO_2eq/kWh, Anteil im EU Mix

	CO_2eq/kWh	Anteil in %
Kohle	1081	3,63
Öl	905	0
Erdgas	458	6,72
Wind	23	6,45
Wasser	10	77,3
Sonnenenergie	83	0,77
Biomasse	202	3,61
Nuklear	33	0,11
Sonstige		1,41

Tabelle 23: Ökostrom Mix der Ökostrom AG, 2015

	CO_2eq/kWh	Anteil in %
Wasserkraft	10	74,79
Windenergie	23	18,09
Biomasse	202	3,35
Sonnenenergie	83	2,73
Sonstige		1,04

zu Kapitel 2.4

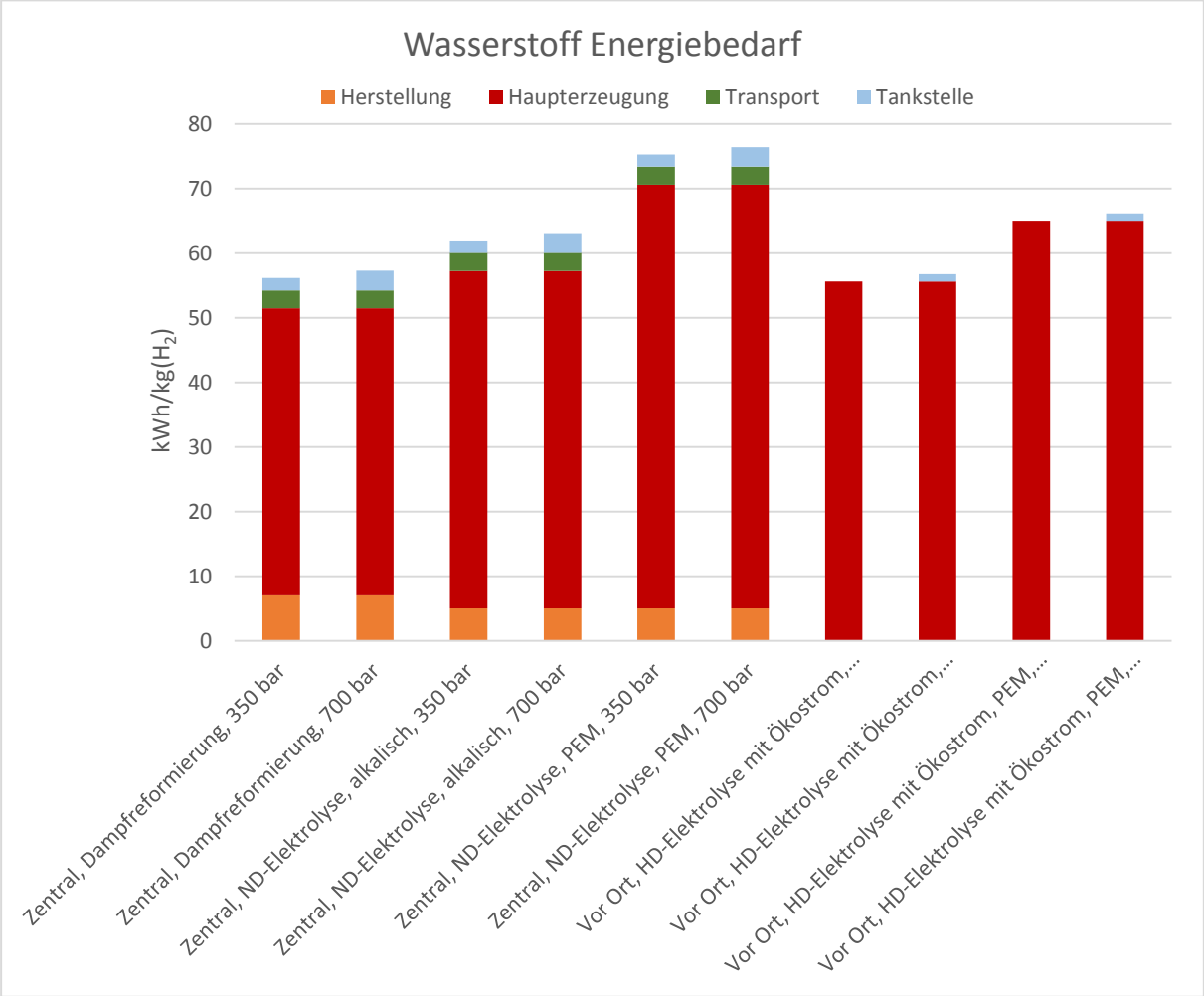


Abbildung 37: Wasserstoff Energiebedarf – Gruppiert in Module

Tabelle 24: Umrechnungstabelle

		ct/kWh
Wasserstoff		
Strommix	My electric (Der nächtliche)	5,99
Ökomix	PST (Ökostrom nacht)	6,3
Diesel	1,079[€/l] / 9,86[kWh/l]	10,9
Methan	0,849[€/kg] / 12,87 [kWh/kg]	6,59

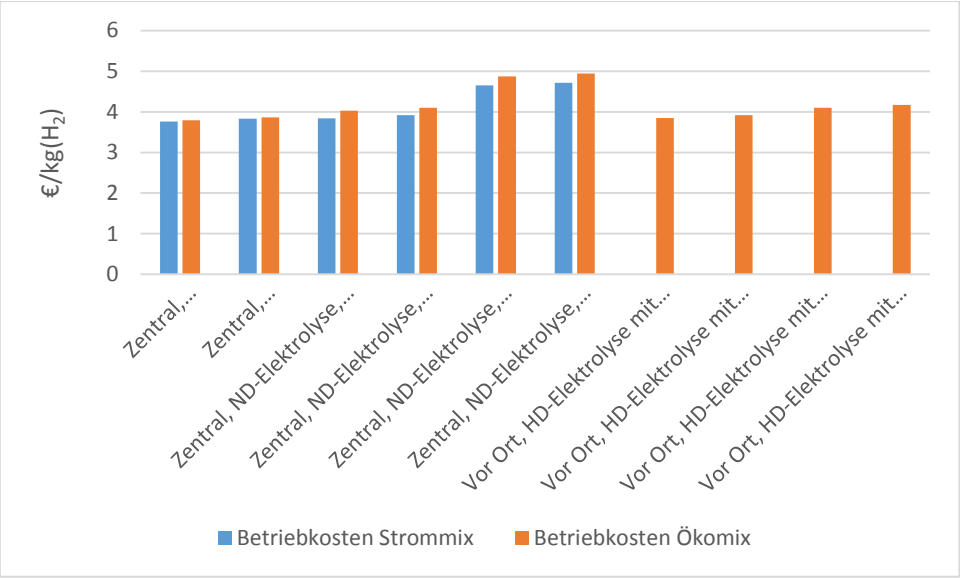


Abbildung 38: H_2Betriebskosten – Vergleich Strommix und Ökomix

Legende: gelb…Methan, rot…Diesel

Tabelle 25: Teilrechnungen Betriebskosten

			Quelle	Kosten (Mix)	Kosten (Öko)
[EH]		[kWh/kg (H_2)]		[Cent/kg (H_2)]	[Cent/kg (H_2)]
Zentral, Dampfreformierung, 350 bar					
Herstellung					
	Methan Gewinnung+Pipeline	4,94	(Sartory et al., 2017)	29,5906	31,122
	Pipeline	low	(IEA, 2015)		
	Dampfreformierung	44,4	(Sartory et al., 2017)	292,296	292,296
	Compressor (5-200 bar)	2,1	(Sartory et al., 2017)	12,579	13,23
Transport					
	Flaschenbündel 300 bar				
	Trailer gasförmig 200 bar	2,8 (high)	(Sartory et al., 2017), (IEA, 2015)	30,52	30,52
	Flüssigtanker	medium	(IEA, 2015)		
Tankstelle					
a)	Compressor (15-350 bar)	1,9	(Sartory et al., 2017)	11,381	11,97
	Speicher (350 bar)				
	Flüssigtankstelle (350 bar)				

Summe				**376,3666**	**379,138**
Zentral, Dampfreformierung, 700 bar					
Herstellung					
	Methan Gewinnung+Pipeline	4,94	(Sartory et al., 2017)	29,5906	31,122
	Pipeline	low	(IEA, 2015)		
	Dampfreformierung	44,4	(Sartory et al., 2017)	292,296	292,296
	Compressor (5-200 bar)	2,1	(Sartory et al., 2017)	12,579	13,23
Transport					
	Flaschenbündel 300 bar				
	Trailer gasförmig 200 bar	2,8 (high)	(Sartory et al., 2017), (IEA, 2015)	30,52	30,52
	Flüssigtanker	medium	(IEA, 2015)		
Tankstelle					
b)	Compressor (15-350 bar)	1,9	(Sartory et al., 2017)	11,381	11,97
	Compressor (350-1000 bar)	0,8	(Sartory et al., 2017)	4,792	5,04
	Speicher (1000 bar)				
	Vorkühlen	0,33	(Sartory et al., 2017)	1,9767	2,079
	GH2 Tankstelle (700 bar)				
Summe				**383,1353**	**386,257**
Zentral, ND-Elektrolyse, alkalisch, 350 bar					
Herstellung					
	Elektrizität vom Netz	***2,92***	(Sartory et al., 2017)	***17,4908***	*18,396*
	ND Elektrolyse (1 bar)				
1.	*alkalisch*	52,217	(Smolinka, 2011)	***312,77983***	*328,923*
	Compressor (5-200 bar)	***2,1***	(Sartory et al., 2017)	12,579	*13,23*
Transport					
	Flaschenbündel 300 bar				
	Trailer gasförmig 200 bar	2,8 (high)	(Sartory et al., 2017), (IEA, 2015)	30,52	30,52
	Flüssigtanker	medium	(IEA, 2015)		
Tankstelle					
a)	Compressor (15-350 bar)	1,9	(Sartory et al., 2017)	11,381	11,97
	Speicher (350 bar)				

	Flüssigtankstelle (350 bar)				
Summe				**384,75063**	**403,039**
Zentral, ND-Elektrolyse, alkalisch, 700 bar					
Herstellung					
	Elektrizität vom Netz	***2,92***	(Sartory et al., 2017)	***17,4908***	***18,396***
	ND Elektrolyse (1 bar)				
1.	*alkalisch*	52,217	(Smolinka, 2011)	***312,77983***	***328,923***
	Compressor (5-200 bar)	***2,1***	(Sartory et al., 2017)	12,579	***13,23***
Transport					
	Flaschenbündel 300 bar				
	Trailer gasförmig 200 bar	2,8 (high)	(Sartory et al., 2017), (IEA, 2015)	30,52	30,52
	Flüssigtanker	medium	(IEA, 2015)		
Tankstelle					
b)	Compressor (15-350 bar)	1,9	(Sartory et al., 2017)	11,381	11,97
	Compressor (350-1000 bar)	0,8	(Sartory et al., 2017)	4,792	5,04
	Speicher (1000 bar)				
	Vorkühlen	0,33	(Sartory et al., 2017)	1,9767	2,079
	GH2 Tankstelle (700 bar)				
Summe				**391,51933**	**410,158**
Zentral, ND-Elektrolyse, PEM, 350 bar					
Herstellung					
	Elektrizität vom Netz	***2,92***	(Sartory et al., 2017)	***17,4908***	***18,396***
	ND Elektrolyse (1 bar)				
2.	*PEM*	***65,549***	(Leichtfried, 2007)	***392,63851***	***412,9587***
	Compressor (5-200 bar)	***2,1***	(Sartory et al., 2017)	12,579	***13,23***
Transport					
	Flaschenbündel 300 bar				
	Trailer gasförmig 200 bar	2,8 (high)	(Sartory et al., 2017), (IEA, 2015)	30,52	30,52
	Flüssigtanker	medium	(IEA, 2015)		
Tankstelle					
a)	Compressor (15-350	1,9	(Sartory et	11,381	11,97

	bar)		al., 2017)		
	Speicher (350 bar)				
	Flüssigtankstelle (350 bar)				
Summe				**464,60931**	**487,0747**
Zentral, ND-Elektrolyse, PEM, 700 bar					
Herstellung					
	Elektrizität vom Netz	***2,92***	(Sartory et al., 2017)	***17,4908***	***18,396***
	ND Elektrolyse (1 bar)				
2.	*PEM*	***65,549***	(Leichtfried, 2007)	***392,63851***	***412,9587***
	Compressor (5-200 bar)	***2,1***	(Sartory et al., 2017)	12,579	***13,23***
Transport					
	Flaschenbündel 300 bar				
	Trailer gasförmig 200 bar	2,8 (high)	(Sartory et al., 2017), (IEA, 2015)	30,52	30,52
	Flüssigtanker	medium	(IEA, 2015)		
Tankstelle					
b)	Compressor (15-350 bar)	1,9	(Sartory et al., 2017)	11,381	11,97
	Compressor (350-1000 bar)	0,8	(Sartory et al., 2017)	4,792	5,04
	Speicher (1000 bar)				
	Vorkühlen	0,33	(Sartory et al., 2017)	1,9767	2,079
	GH2 Tankstelle (700 bar)				
Summe				**471,37801**	**494,1937**
Vor Ort, HD-Elektrolyse (Ökostrom), alkalisch, 350 bar					
	vor Ort Elektrizität				
	HD Elektrolyse (350 bar)				
	alkalisch	61,105	(Smolinka, 2011)		**384,9615**
a)	Speicher (350 bar)				
	Flüssigtankstelle (350 bar)				
Summe					**384,9615**
Vor Ort, HD-Elektrolyse (Ökostrom), alkalisch, 700 bar					

	vor Ort Elektrizität				
	HD Elektrolyse (350 bar)				
	alkalisch	61,105	(Smolinka, 2011)		384,9615
b)	Compressor (350-1000 bar)	0,8	(Sartory et al., 2017)		5,04
	Speicher (1000 bar)				
	Vorkühlen	0,33	(Sartory et al., 2017)		2,079
	GH2 Tankstelle (700 bar)				
Summe					**392,0805**
Vor Ort, HD-Elektrolyse (Ökostrom), PEM, 350 bar					
	vor Ort Elektrizität				
	HD Elektrolyse (350 bar)				
	PEM	65	(Leichtfried, 2007)		**409,5**
a)	Speicher (350 bar)				
	Flüssigtankstelle (350 bar)				
Summe					**409,5**
Vor Ort, HD-Elektrolyse (Ökostrom), PEM, 700 bar					
	vor Ort Elektrizität				
	HD Elektrolyse (350 bar)				
	PEM	65	(Leichtfried, 2007)		409,5
b)	Compressor (350-1000 bar)	0,8	(Sartory et al., 2017)		5,04
	Speicher (1000 bar)				
	Vorkühlen	0,33	(Sartory et al., 2017)		2,079
	GH2 Tankstelle (700 bar)				
Summe					**416,619**

Tabelle 26: –Zusammenfassung Betriebskosten (Eigener Entwurf, Quelle siehe Tabelle 25)

Wasserstoff	Energieverbrauch	Betriebkosten Strommix	Betriebkosten Ökomix
[EH]	kWh/kg(H_2)	€/kg(H_2)	€/kg(H_2)
Zentral, Dampfreformierung, 350 bar	56,18	3,76	3,79
Zentral, Dampfreformierung, 700 bar	57,31	3,83	3,86
Zentral, ND-Elektrolyse, alkalisch, 350 bar	61,937	3,84	4,03
Zentral, ND-Elektrolyse, alkalisch, 700 bar	63,067	3,92	4,1
Zentral, ND-Elektrolyse, PEM, 350 bar	65	4,65	4,87
Zentral, ND-Elektrolyse, PEM, 700 bar	76,399	4,71	4,94
Vor Ort, HD-Elektrolyse mit Ökostrom, alkalisch, 350 bar	55,6		3,85
Vor Ort, HD-Elektrolyse mit Ökostrom, alkalisch, 700 bar	56,73		3,92
Vor Ort, HD-Elektrolyse mit Ökostrom, PEM, 350 bar	65		4,1
Vor Ort, HD-Elektrolyse mit Ökostrom, PEM, 700 bar	66,13		4,17

zu Kapitel 2.5

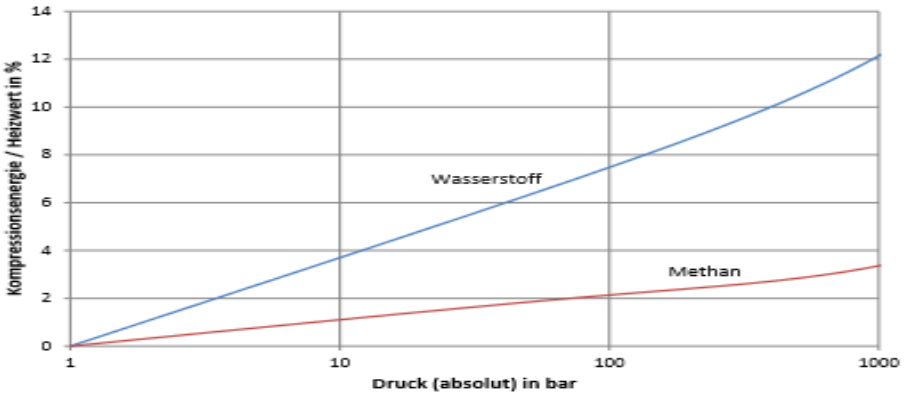


Abbildung 39: Verdichtung von Wasserstoff (Meier, Boris, 2014)

Tabelle 27: Wirkungsgrade und Heizwerte der fossilen Brennstoffe (h2data.de), (Spiegel online, 2007 & 2012)

	Diesel	**Benzin**	**Erdgas**
Wirkungsgrad	**90%**	**82%**	**86%**
Unterer Heizwert	11,9 kWh/kg	12,0 kWh/kg	13,9 kWh/kg

Tabelle 28: Ökomix (oekostrom AG 2014) Ermittlung der Teilwirkungsgrade der Erzeugung

	Sonnenergie	Wasserkraft	Windenergie	Biomasse	Sonst. Ökoenergie
Wirkungsgrad	25 %	90 %	50 %	37 %	35 %
Prozentueller Anteil	2,73 %	74,79 %	18,09 %	3,35 %	1,04 %
Teilwirkungsgrad	0,68 %	67,31 %	9,05 %	1,24 %	0,36 %

Tabelle 29: Strommix (Österreich 2014) Ermittlung der Teilwirkungsgrade der Erzeugung

	Wirkungsgrad	Prozentueller Anteil	Teilwirkungsgrad
Wasserkraft	90 %	77,30 %	69,57 %
Windenergie	50 %	6,45 %	3,23 %
Sonnenenergie	25 %	0,77 %	0,19 %
Biomasse	37 %	3,61 %	1,34 %
Biogas	40 %	0,93 %	0,37 %
Deponie- & Klärgas	40 %	0,04 %	0,02 %
Erdgas	40 %	6,72 %	2,69 %
Kohle	35 %	3,63 %	1,27 %
Bekannte sonstige Energieträger	35 %	0,28 %	0,1 %

6.3 Anhang Tank-to-Wheel

Tabelle 30: Maintenance costs

Maintenance costs for iX35 (LM) FCEV

month			12		24		36		48		60	
mileage			10.000	20.000	30.000	40.000	50.000	60.000	70.000	80.000	90.000	100.000
description / time		Price / item	1,3	2,6	1,8	2,6	1,3	3,1	1,3	2,6	1,8	2,6
FCEV airfilter	28113-4W000	59,50 €	59,50 €	59,50 €	59,50 €	59,50 €	59,50 €	59,50 €	59,50 €	59,50 €	59,50 €	59,50 €
Ionen filter	25831-4W000	147,67 €	147,67 €	147,67 €	147,67 €	147,67 €	147,67 €	147,67 €	147,67 €	147,67 €	147,67 €	147,67 €
FCEV coolant	07100-4WA20	34,22 €	17,11 €	17,11 €	17,11 €	17,11 €	17,11 €	718,62 €	17,11 €	17,11 €	17,11 €	17,11 €
A/C filter	97133-2E250	29,80 €			29,80 €			29,80 €			29,80 €	
Batterie FB	95413-3A000	4,68 €				4,68 €				4,68 €		
Brake fluid	DOT4 / 0,8l	18,37 €				14,70 €				14,70 €		
A/C gas	R134a / 15g	30,00 €				4,50 €				4,50 €		
Full time costs / Arbeitszeit		89,00 €	115,70 €	231,40 €	160,20 €	231,40 €	115,70 €	275,90 €	115,70 €	231,40 €	160,20 €	231,40 €
Full parts costs			224,28 €	224,28 €	254,08 €	248,16 €	224,28 €	955,59 €	224,28 €	248,16 €	254,08 €	224,28 €
current date 04.12.2015			339,98 €	455,68 €	414,28 €	479,56 €	339,98 €	1.231,49 €	339,98 €	479,56 €	414,28 €	455,68 €
											Total costs	4.959,46 €

Fronius 4.12.2015

11.12.201

6.4 Anhang Rechtliche Aspekte, Sicherheit und Kundenanforderungen

6.4.1 Anhang 1: Fragebogen

KARL-FRANZENS-UNIVERSITÄT GRAZ
UNIVERSITY OF GRAZ

Umfrage im Rahmen der Lehrveranstaltung
IP – Wasserstoff als Energieträger in der Mobilität

Befragung zu Autokauf und Treibstoffwahl

Auf den nächsten Seiten werden Ihnen einige Fragen gestellt. Lesen Sie sich die Fragen bitte aufmerksam durch und kreuzen Sie die Antwort an, die Sie spontan für die Beste halten. Bitte beantworten Sie jede Frage.
All Ihre Antworten und Angaben werden vertraulich behandelt und personenunabhängig für wissenschaftliche Zwecke verwendet.
Wir danken Ihnen herzlichen für Ihre Teilnahme an unserer Umfrage.

Angaben zu Ihrer Person

1. Geschlecht ☐ männlich ☐ weiblich
2. Alter ☐ unter 20 ☐ 20 – 30 ☐ 31 – 50 ☐ über 50
3. Wo wohnen Sie ☐ Stadt ☐ Land
4. Was trifft auf Sie zu? (Mehrfachnennungen möglich)

☐ in Ausbildung (Lehre, Studium, usw.)
☐ erwerbstätig (geringfügig, Teilpension, Karenz, Krankengeld, freie/r DienstnehmerIn)
☐ erwerbstätig (Teilzeit/Vollzeit)
☐ nicht erwerbstätig (PensionistIn, Haushaltsführende Person)
☐ arbeitslos/arbeitssuchend

5. Was ist Ihre höchste abgeschlossene Ausbildung?

   ☐ Pflichtschule
   ☐ Lehre
   ☐ Berufsbildende mittlere Schule (inkl. mittlere Schulen des Gesundheitswesens sowie Meister- und Werkmeisterprüfung)
   ☐ Allgemein bildende höhere Schule (AHS)
   ☐ Berufsbildende höhere Schule (BHS)
   ☐ Hochschule (Universität, Fachhochschule, Kolleg, etc.)

6. Wie viele Personen – Sie eingeschlossen – leben in Ihrem Haushalt?

Personen insgesamt: _____ [Personen]
davon
Personen ab 18 Jahren: _____ [Personen]
Jugendliche von 15-17 Jahren: _____ [Personen]
Kinder/Jugendliche von 6-14 Jahren: _____ [Personen]
Kinder unter 6 Jahren: _____ [Personen]

7. Wie viele Personen tragen insgesamt – Sie eingeschlossen – zum Einkommen Ihres Haushaltes bei?

_____ [Personen]

Ihre Mobilitätssituation

8. Besitzen Sie ein Auto?

☐ Ja ☐ Nein

9. Wenn ja, welchen Treibstoff bzw. welchen Antrieb nutzt Ihr Auto?

☐ Benzin
☐ Diesel
☐ Erdgas
☐ Elektroantrieb mit Akku
☐ Hybridantrieb
☐ Elektroantrieb mit Wasserstoff
☐ weiß nicht

10. Wenn ja, welcher Größenklasse entspricht Ihr derzeitiges Auto?

☐ Kleinstwagen
(z.B. VW Lupo, Fiat Panda usw.)

☐ Kleinwagen
(z.B. Peugeot 206, VW Polo, Seat Ibiza usw.)

☐ Kompaktklasse (Untere Mittelklasse)
(z.B. VW Golf, Opel Astra, Audi A3 usw.)

☐ Mittelklasse
(z.B. Audi A4, VW Passat, BMW 3er usw.)

☐ Obere Mittelklasse
(z.B. Audi A6, BMW 5er, Toyota Avensis usw.)

☐ Luxusklasse
(z.B. Mercedes 5-Klasse, Audi A8, BMW 7er usw.)

☐ Vans
(z.B. Seat Alhambra, VW Sharan usw.)

☐ Geländewagen
(z.B. BMW X3, VW Touareg, Land Rover usw.)

11. Wenn ja, Wie viele Kilometer legen Sie täglich durchschnittlich mit dem Auto zurück?

☐ 0-5 km
☐ 5-20 km
☐ 20-50 km
☐ 50-100 km
☐ über 100 km

12. Wie viele Kilometer wollen Sie mindestens ohne einen Tankstopp zurücklegen können?

☐ 0-5 km
☐ 5-20 km
☐ 20-50 km
☐ 50-100 km
☐ über 100 km

13. Wie hoch darf Ihrer Meinung nach die maximale Distanz bis zur nächsten Tankstelle sein?

☐ 0-5 km
☐ 5-20 km
☐ 20-50 km
☐ 50-100 km
☐ über 100 km

Ihr nächster Autokauf

14. Worauf achten Sie beim Autokauf am meisten? Nennen Sie bitte 3 Punkte.

a) _____
b) _____
c) _____

15. Für welche Größenklasse würden Sie sich entscheiden? (max. 2 Nennungen möglich)

☐ Kleinstwagen
(z.B. VW Lupo, Fiat Panda usw.)

☐ Kleinwagen
(z.B. Peugeot 206, VW Polo, Seat Ibiza usw.)

☐ Kompaktklasse (Untere Mittelklasse)
(z.B. VW Golf, Opel Astra, Audi A3 usw.)

☐ Mittelklasse
(z.B. Audi A4, VW Passat, BMW 3er usw.)

☐ Obere Mittelklasse
(z.B. Audi A6, BMW 5er, Toyota Avensis usw.)

☐ Luxusklasse
(z.B. Mercedes 5-Klasse, Audi A8, BMW 7er usw.)

☐ Vans
(z.B. Seat Alhambra, VW Sharan usw.)

☐ Geländewagen
(z.B. BMW X3, VW Touareg, Land Rover usw.)

16. Wie wichtig sind Ihnen folgende Kriterien bei der Wahl Ihres zukünftigen Autos? Beurteilen Sie die Kriterien nach Wichtigkeit (von sehr wichtig bis sehr unwichtig) und setzen sie pro Zeile nur ein Kreuz.

	sehr wichtig	wichtig	weder noch	unwichtig	sehr unwichtig
geringer Kaufpreis (Anschaffungskosten)	☐	☐	☐	☐	☐
hohes Beschleunigungsvermögen	☐	☐	☐	☐	☐
geringe Umweltauswirkungen (Emissionen, Abgaswerte)	☐	☐	☐	☐	☐
hohe Sicherheit	☐	☐	☐	☐	☐
Treibstoffart (Benzin, Wasserstoff, usw.)	☐	☐	☐	☐	☐
Statussymbol (Marke, Design)	☐	☐	☐	☐	☐
niedriger Treibstoffverbrauch	☐	☐	☐	☐	☐
niedrige Betankungsdauer/Ladedauer (variiert nach Treibstoffart)	☐	☐	☐	☐	☐
niedrige Wartungskosten (Instandhaltung des Fahrzeugs)	☐	☐	☐	☐	☐
hohe Reichweite pro Tankfüllung (variiert je nach Treibstoffart)	☐	☐	☐	☐	☐
möglichst wenig Innengeräusch	☐	☐	☐	☐	☐
niedrige Treibstoffkosten	☐	☐	☐	☐	☐

17. Wählen Sie aus den Kriterien oberhalb die drei Wichtigsten und reihen Sie diese wie folgt:
    Platz 1 = am Wichtigsten
    1. Platz:_____
    2. Platz:_____
    3. Platz:_____

18. Für welchen Treibstoff bzw. welche Antriebsart würden Sie sich am ehesten entscheiden?

Bitte reihen Sie Ihre 3 Favoriten! 1 = am ehesten; 2 = möglicherweise; 3 = wenn 1 und 2 nicht zur Verfügung stehen.

☐ Benzin

☐ Diesel

☐ Erdgas

☐ Elektroantrieb mit Akku

☐ Hybridantrieb

☐ Elektroantrieb mit Wasserstoff

19. Warum bevorzugen die oben von Ihnen gewählten 3 Antriebsarten gegenüber den nicht gewählten?

(z.B. Sicherheit, Reichweite pro Tankfüllung, Umweltauswirkungen, usw.)

Nennen Sie bitte 3 Punkte.

a) _____
b) _____
c) _____

20. Bitte geben Sie in nachfolgender Tabelle an, welche der Eigenschaften Sie bei Ihrem nächsten Autokauf stärker beeinflussen werden. Bitte machen Sie pro Zeile nur ein Kreuz.

günstiger Kaufpreis	☐	oder	☐	niedriger Treibstoffverbrauch
hohe Sicherheit	☐	oder	☐	gute Beschleunigung
wenige und saubere Abgase	☐	oder	☐	gutes Design des Autos
niedriger Treibstoffverbrauch	☐	oder	☐	bevorzugter Treibstoff (Benzin, Diesel, Wasserstoff)
lange Reichweite pro Tankfüllung	☐	oder	☐	wenige und saubere Abgase
geringe Wartungskosten	☐	oder	☐	kurze Betankungs-, Ladedauer
bevorzugter Treibstoff (Benzin, Diesel, Wasserstoff)	☐	oder	☐	hohe Sicherheit
gutes Design des Autos	☐	oder	☐	günstiger Kaufpreis
gute Beschleunigung	☐	oder	☐	wenig Innenlärm
kurze Betankungs-, Ladedauer	☐	oder	☐	lange Reichweite pro Tankfüllung
niedriger Treibstoffverbrauch	☐	oder	☐	geringe Wartungskosten

21. Wenn Sie noch kein Elektroauto besitzen, käme für Sie der Ankauf eines Elektroautos mit Akku in Frage, wenn

	Ja	Nein
• die Kosten für Anschaffung und Betrieb insgesamt 10 % geringer wären als bisher (z.B. Minderung der Anschaffungskosten um ca. 3000€)	☐	☐
• das Auto eine Reichweite von mehr als 190 km hätte	☐	☐
• das Ladenetz in Mitteleuropa ähnlich dicht wie das Tankstellennetz wäre	☐	☐
• die Ladezeit zur Vollladung Ihrer Batterie nicht mehr als eine 1/2 Stunde betragen würde	☐	☐
• alle oben genannten Bedingungen zutreffen würden	☐	☐

22. Wenn Sie noch kein Elektroauto besitzen, käme für Sie der Ankauf eines Elektroautos mit Wasserstoffantrieb in Frage, wenn

	Ja	Nein
• die Kosten für Anschaffung und Betrieb insgesamt 10 % geringer wären als bisher (z.B. Minderung der Anschaffungskosten um ca. 8000€)	☐	☐
• die Sicherheit des Fahrzeuges der Sicherheit eines benzinbetriebenen Fahrzeuges entsprechen würde	☐	☐
• das Tankstellennetz für Wasserstoff in Mitteleuropa ähnlich dicht wie das Tankstellennetz für Benzin wäre	☐	☐
• alle oben genannten Bedingungen zutreffen würden	☐	☐

Ihre Meinung zu unterschiedlichen Antriebsarten

23. Welche Eigenschaften verbinden sie mit einem herkömmlichen fossil betriebenen Fahrzeug?
(Diesel, Benzin, Erdgas)

sparsam im Betrieb	○-○-○-○-○	nicht sparsam im Betrieb (Treibstoff- und Wartungskosten)
umweltfreundlich	○-○-○-○-○	hohe Emissionen
preiswert (Anschaffung)	○-○-○-○-○	teuer (Anschaffung)
große Reichweite	○-○-○-○-○	kleine Reichweite

24. Welche Eigenschaften verbinden Sie mit einem Elektrofahrzeug?
(Strom, Hybrid)

sparsam im Betrieb		nicht sparsam im Betrieb (Treibstoff- und Wartungskosten)
umweltfreundlich		hohe Emissionen
preiswert (Anschaffung)		teuer (Anschaffung)
große Reichweite		kleine Reichweite

25. Welche Eigenschaften verbinden Sie mit einem durch Wasserstoff angetriebenem Fahrzeug?

sparsam im Betrieb		nicht sparsam im Betrieb (Treibstoff- und Wartungskosten)
umweltfreundlich		hohe Emissionen
preiswert (Anschaffung)		teuer (Anschaffung)
große Reichweite		kleine Reichweite

26. Welches Sicherheitsempfinden haben Sie im Umgang mit folgenden Treibstoffen?

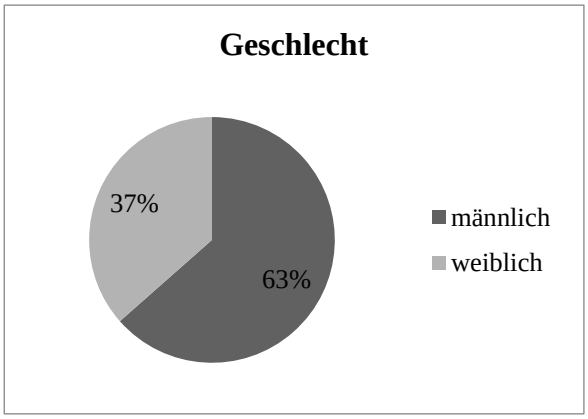
	Sehr sicher				Sehr unsicher
Benzin/Diesel	☐	☐	☐	☐	☐
Erdgas	☐	☐	☐	☐	☐
Strom	☐	☐	☐	☐	☐
Hybrid	☐	☐	☐	☐	☐
Wasserstoff	☐	☐	☐	☐	☐

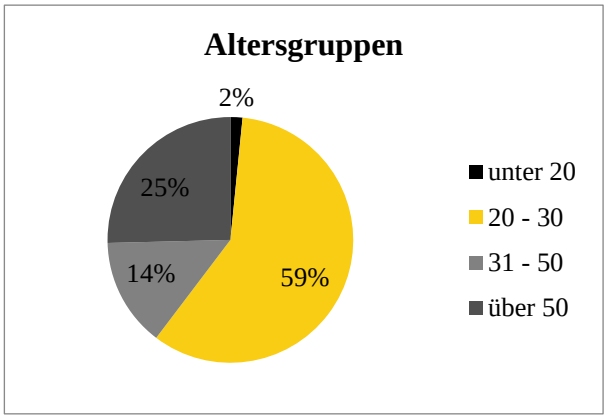
27. Sind Sie informiert über den Umgang mit folgenden Treibstoffen?

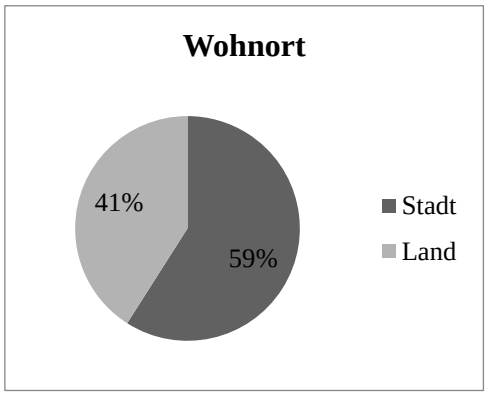
	Ja	Nein
Benzin/Diesel	☐	☐
Erdgas	☐	☐
Strom	☐	☐
Hybrid	☐	☐
Wasserstoff	☐	☐

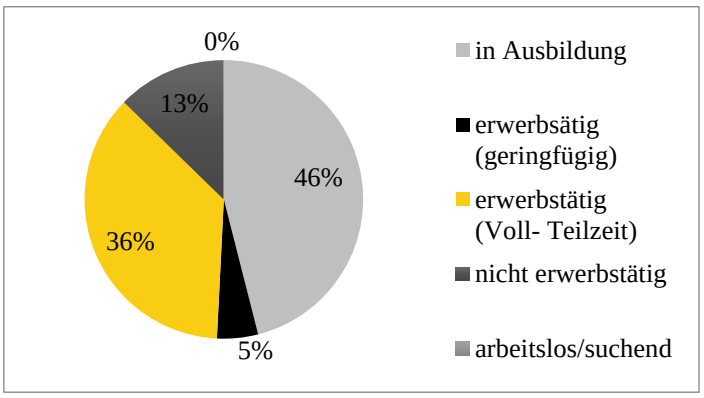
6.4.2 Anhang 2: Kurze Darstellungen der Ergebnisse und Auswertungen des Fragenbogens

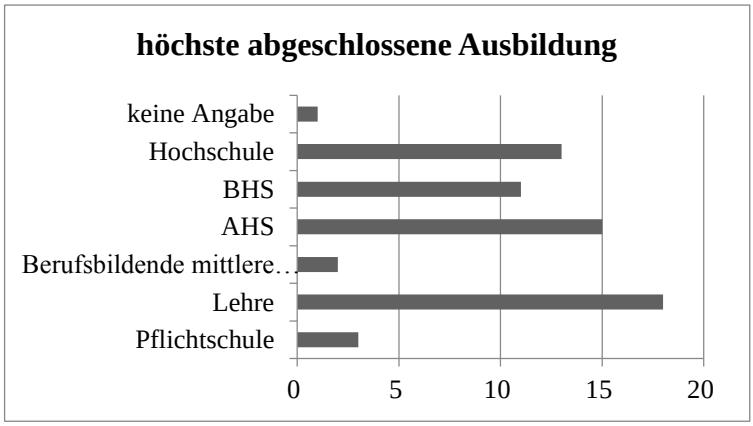
Auswertung der Personenangaben zur Veranschaulichung welche Personengruppen bei der Umfrage erreicht wurden. In Summe haben 63 Personen an der Befragung teilgenommen.







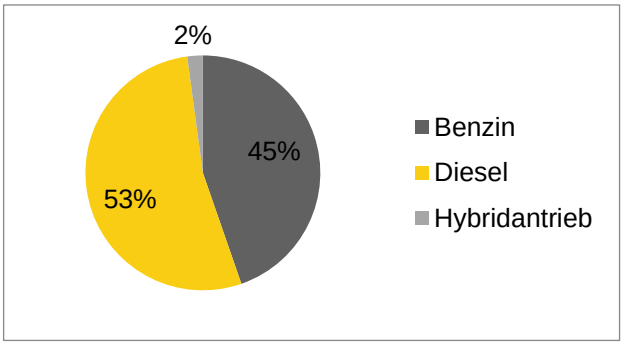




19 Personen gaben an in einem Haushalt mit vier Personen zu leben, 15 Personen in einem Haushalt mit zwei Personen und 14 Probanden gaben an in einem Singlehaushalt zu leben. In rund 30 von 63 Haushalten von tragen zwei Personen zum Haushaltseinkommen bei, gefolgt von 17 Personen die angegeben haben ihr Einkommen allein zu verdienen.

Auswertung der Mobilitätssituation der Befragten um einen Überblick über den Ist-Zustand zu erhalten

Genau 75% der Befragten besitzen ein Fahrzeug. Von diesen 75% setzen sich die unterschiedlichen Fahrzeuge mit unterschiedlichen Treibstoffarten wie in folgendem Diagramm zu zusammen:



Keiner der Befragten besitzt entweder ein Elektrofahrzeug betrieben durch Akku oder Wasserstoff, noch ein Erdgas betriebenes Fahrzeug. Der Großteil der Fahrzeugbesitzer aus unserer Umfrage (15 Personen) besitzen Mittelklasse Fahrzeuge oder Fahrzeuge aus der Kompaktklasse (14 Personen) und 22 der befragten Personen, legen täglich durchschnittlich 5 bis 20 km zurück und würden somit auch eine maximale Distanz von 5 – 20 km zur nächsten Tankstelle in Kauf nehmen.

Auswertung der Fragen zum nächsten Autokauf

Aus der offenen Frage (Frage 14), worauf bei einem Autokauf am meisten geachtet wird, ergaben sich folgende drei immer wiederkehrende Kriterien welche genannt wurden:

1) Preis
2) Verbrauch
3) Ausstattung

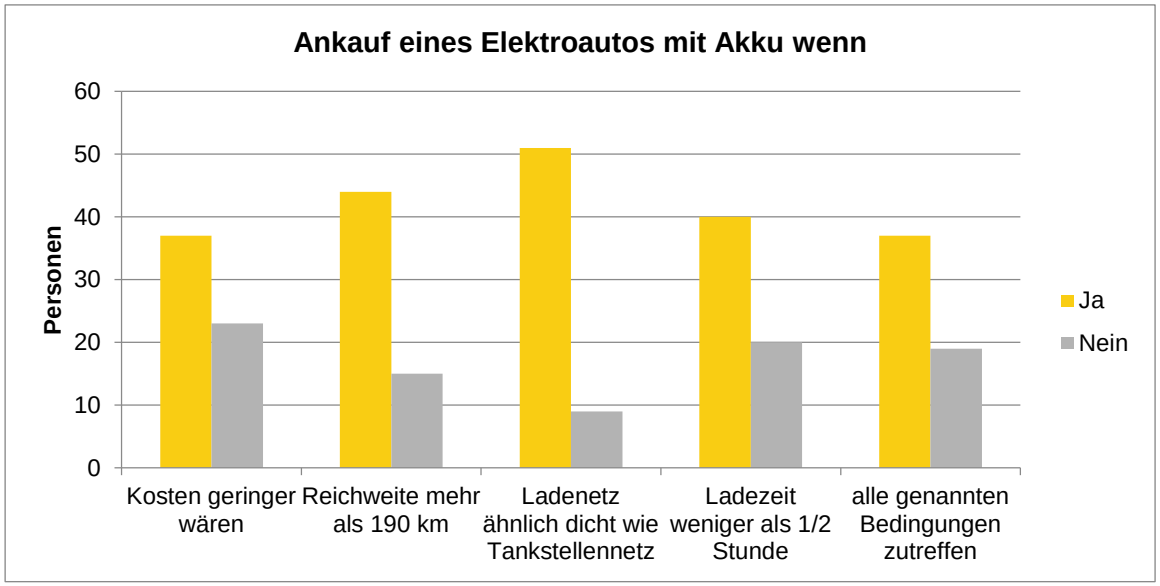
Auch Optik und Aussehen sowie PS und Leistung wurden vergleichsweise oft genannt.
23 der Befragten Personen (ca. 14%) würden sich als nächstes ein Kompaktklasse Fahrzeug wie beispielsweise einen VW Golf oder Audi A3 zulegen, gefolgt von 22 Personen (ca. 13 %) die einen Mittelklassewaagen und 21 Personen die einen Kleinwagen wie zum Beispiel Peugeot 206 bevorzugen würden.

Auf die Frage welche Kriterien der angegebenen aus Frage 16 die wichtigsten seien, ergab sich folgende Reihung:

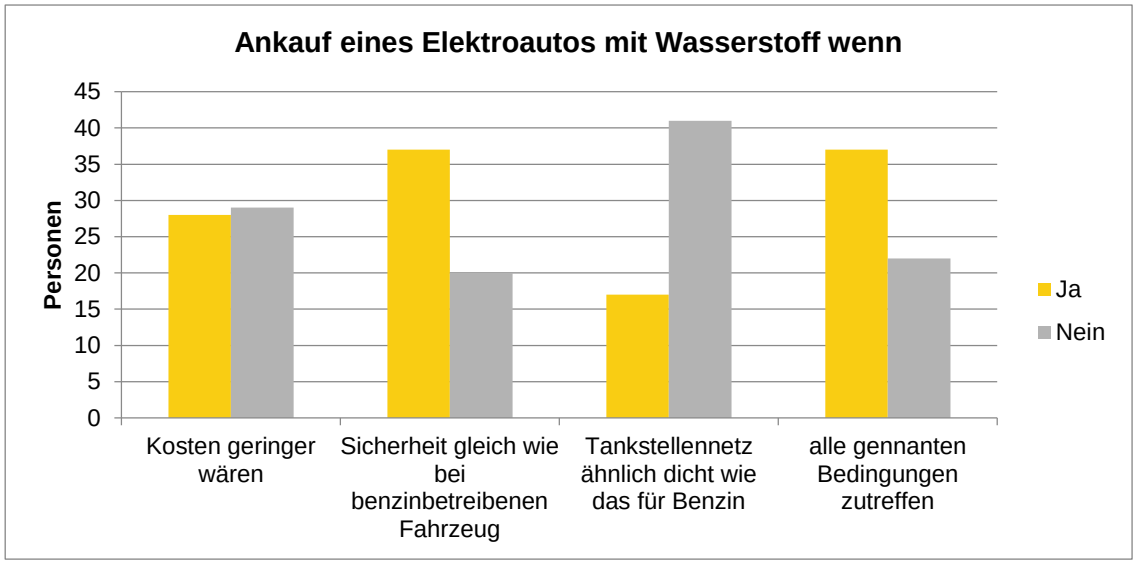
4) Hohe Sicherheit
5) Geringer Kaufpreis
6) Niedriger Treibstoffverbrauch und niedrige Wartungskosten
7) Niedrige Treibstoffkosten

Am wenigsten relevant sind Kriterien wie Treibstoffart, niedrige Betankungs- und Ladedauer sowie das Fahrzeug als Statussymbol.

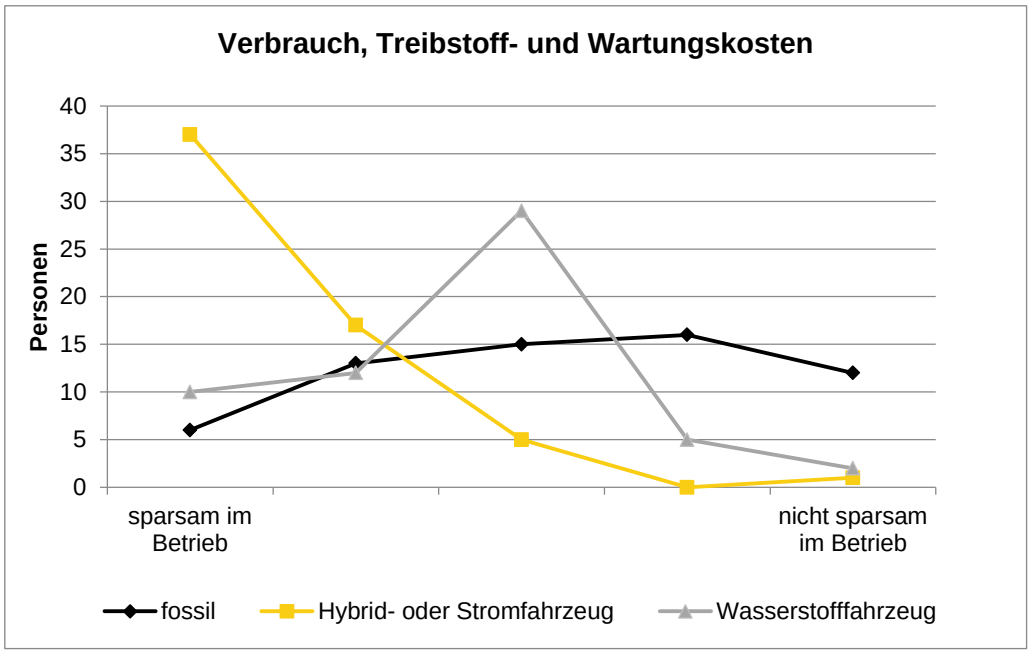
Bei der Wahl zum Treibstoff und zur Antriebsart würde sich die Auswahl folgendermaßen gliedern: Diesel, sollte dieser Treibstoff nicht zur Verfügung stehen würden die meisten Befragten den Hybridantrieb wählen und sollten Diesel und Hybridantrieb nicht verfügbar sein wäre der Elektroantrieb mit Akku für die meisten Befragten die bevorzugte Alternative.
Gründe welche für die Auswahl von Diesel als beliebtesten Treibstoff sprechen sind unter anderem die erzielbare Reichweite, die bei fossilbetriebenen Fahrzeugen höher liegt, die bisherigen positiven Erfahrungen und die ausreichende Verfügbarkeit von Tankstellen. Der Hybridantrieb und das Elektroauto mit Akku werden vorrangig aufgrund der Möglichkeit zu Einsparung von Umweltauswirkungen, der Senkung von Treibstoffkosten sowie aufgrund des Fortschritts- und Innovationsgedankens gewählt. Auch die Sicherheit spielt bei der Wahl des geeigneten Treibstoffes eine wesentliche Rolle.

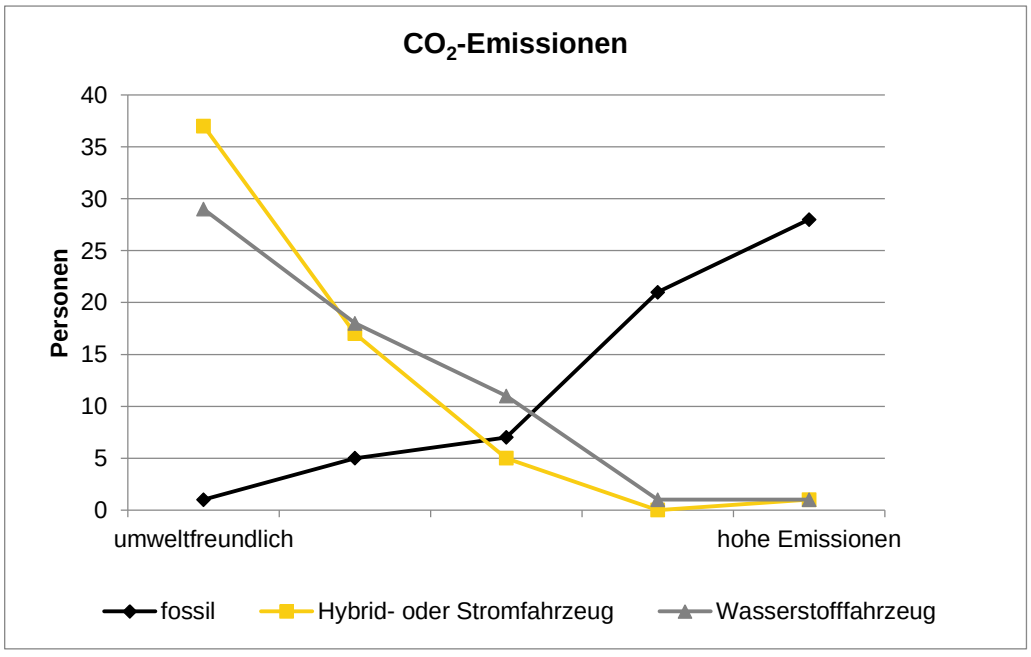


In jedem Fall würde mehr als die Hälfte der Befragten einen Ankauf eines Elektrofahrzeugs mit Akku in Erwägung ziehen.

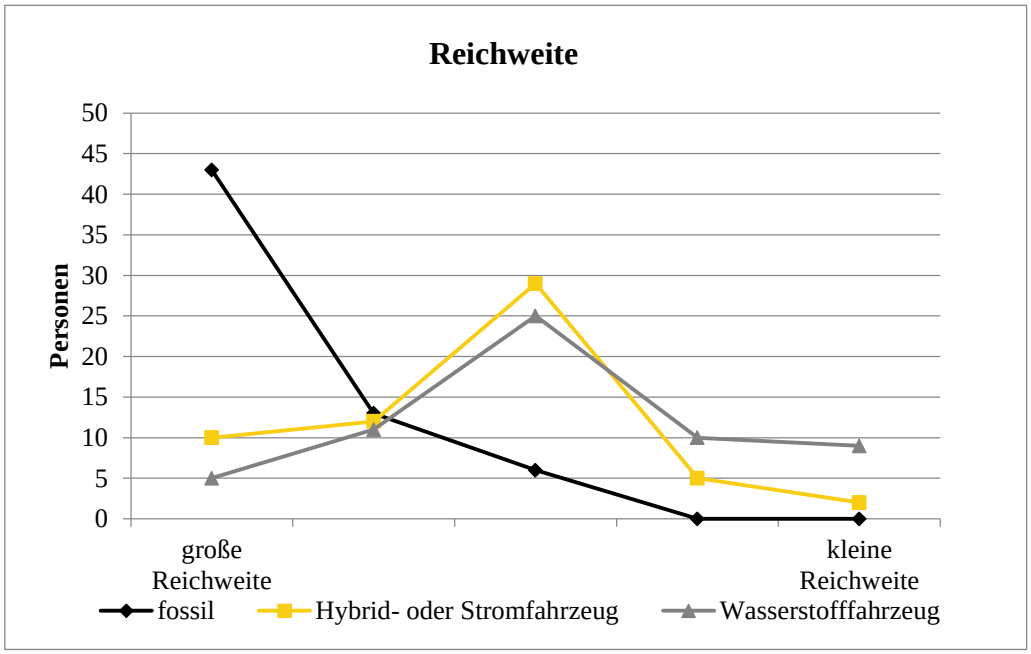


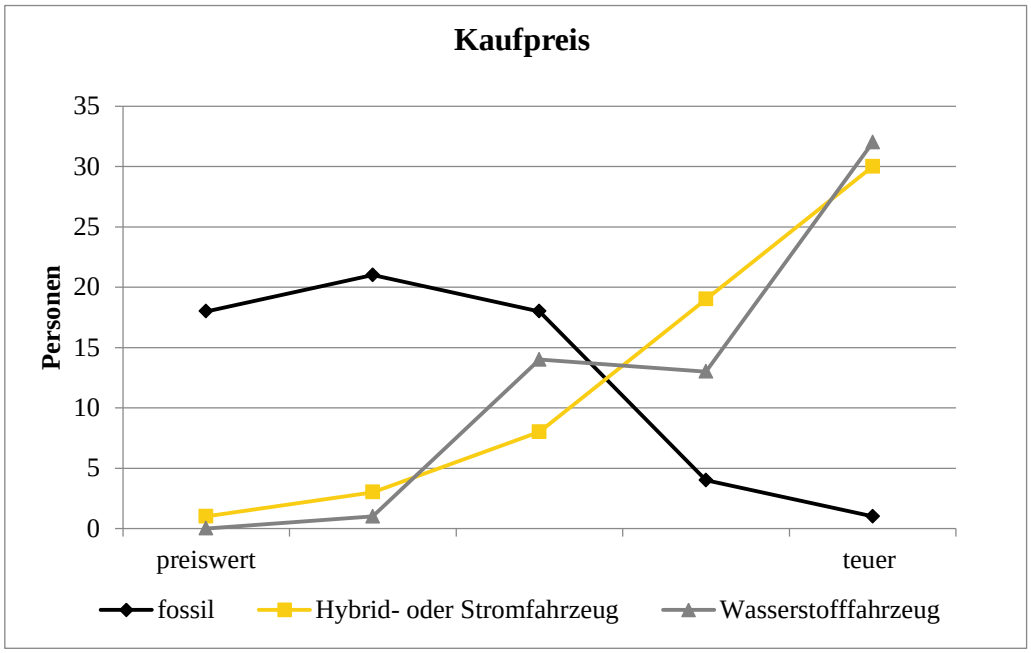
Im Folgenden werden die unterschiedlichen Eigenschaften, die die Befragten mit unterschiedlichen Antriebsarten verbinden, miteinander verglichen.



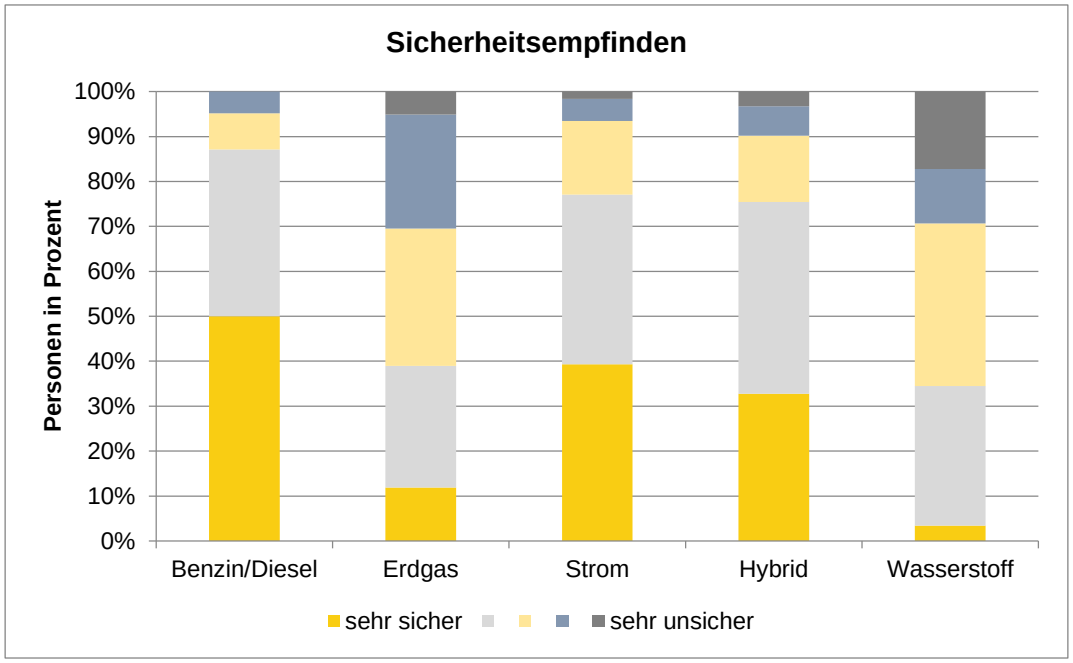


Hybrid- und Stromfahrzeuge werden im Vergleich zu fossilbetriebenen Fahrzeugen als sehr sparsam angesehen. Die Emissionen von Wasserstoffbetriebenen sowie Hybrid und Stromfahrzeugen gelten als gering wohingegen die Emissionen von fossilbetriebenen Fahrzeugen als sehr hoch eingeschätzt werden.

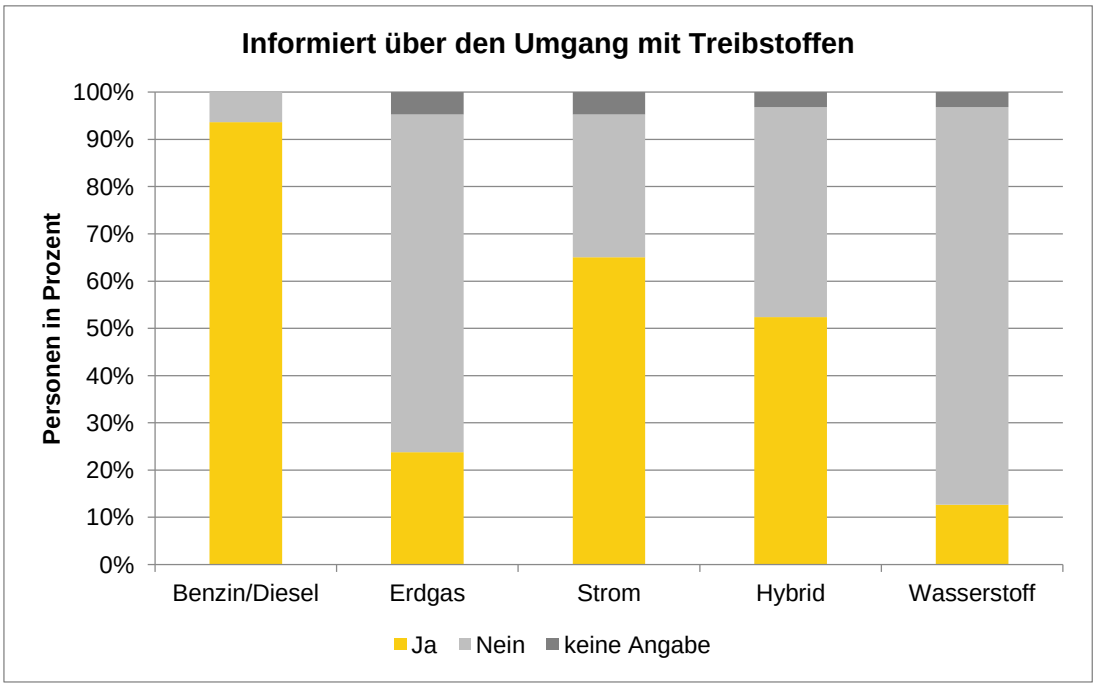




Die Reichweite von fossilbetriebenen Fahrzeugen wird im Vergleich zu den anderen höher eingeschätzt. Die Reichweite der Hybrid- Strom und Wasserstofffahrzeuge wird von den Befragten im Mittelfeld liegend eingeschätzt. Benzin-, Diesel-, oder Erdgas Fahrzeuge werden als eher preiswert eingeschätzt, wohingegen Hybrid- und Stromfahrzeuge sowie Wasserstofffahrzeuge als teuer in der Anschaffung angesehen werden.



Das Sicherheitsempfinden ist bei den konventionellen Treibstoffen, wie Benzin und Diesel am höchsten, wohingegen Wasserstoff und Erdgas für die Befragten am wenigsten sicher wirken. Dieses steht in engem Zusammenhang mit der Information die die Befragten über den Umgang mit den jeweiligen Treibstoffen haben, so sind diese am wenigsten sicher in der Handhabung von Wasserstoff und Erdgas, dass sich im geringeren Sicherheitsempfinden widerspiegelt.



6.4.3 Anhang 3: Nutzwertanalyse

Die sich aus der Umfrage ergebenden wichtigsten Kriterien bei einem Autokauf sind neben, hoher Sicherheit, einem geringen Kaufpreis, der möglichst niedrige Treibstoffverbrauch und niedrige Wartungskosten über die Dauer des Betriebes.

Für die Durchführung der Nutzwertanalyse werden der Kaufpreis und die Treibstoffkosten für 100 km anstatt des Treibstoffverbrauches für 100 km als Kriterien festgelegt, da der Treibstoffverbrauch im Vergleich zu den Treibstoffkosten die Einheit Liter/100 km voraussetzt und diese nicht für alle unterschiedlichen Antriebsarten, die im Zuge der Nutzwertanalyse miteinander verglichen werden, herangezogen werden kann.

Die Höhe der CO_2-Emissionen sowie die Reichweite pro Tankfüllung werden laut der Umfrage zwar nicht als die wichtigsten Kriterien festgelegt, stellen dennoch Interessante Kriterien da, auf deren Basis die unterschiedlichen Antriebsarten gut miteinander verglichen werden können und werden daher auch in der Nutzwertanalyse mitberücksichtig.

Die Errechnung der Nutzwerte sowie der Gewichtung, die für die Durchführung der Nutzwertanalyse wesentlich sind und auf Dateninformationen der Umfrage basieren, werden im Folgenden dargestellt.

Kaufpreis [€]	**Treibstoffkosten für 100 km [€/100 km]**	**CO_2-Emissionen [g/km]**	**Sicherheitsempfinden**	**Reichweite pro Tankfüllung [km]**	**Nutzwert**
15.000 – 29.999 (preiswert)	1,00 – 2,95 (sparsam)	32 – 56 (umweltfreundlich)	sehr sicher	600 – 1000 (hohe Reichweite)	50
30.000 – 39.999	3,00 – 5,95	57 – 88			40
40.000 – 55.499	6,00 – 8,95	89 – 110		201 – 599	30
56.000 – 79.999	9,00 – 11,95	101 – 130			20
Über 80.000 (nicht preiswert)	Über 12 (nicht sparsam)	131 – 160 (hohe Emissionen)	sehr unsicher	100 – 200 (niedrige Reichweite)	10

Anhand der obenstehenden Tabelle und den Daten aus der Umfrage die in den zuvor dargestellten Diagrammen gezeigt werden, ergeben sich folgende Zahlen für die Nutzwerte.

Nutzwerte		**Kaufpreis [€]**	**Treibstoffkosten für 100 km [€/100km]**	**CO_2-Emissionen [g/km]**	**Sicherheitsempfinden**	**Reichweite pro Tankfüllung [km]**
Fossil betriebene Fahrzeuge	Diesel	40	20	10	50	50
	Benzin	40	20	10	50	50
	Erdgas	40	20	10	10	50
Hybrid-Stromfahrzeuge	Strom	10	50	50	40	30
	Hybrid	10	50	50	30	30
Wasserstofffahrzeuge	Wasserstoff	10	30	50	10	30

Für die Berechnung der Gewichte ergeben sich folgende Werte.

Berechnung der Gewichtung	**Kaufpreis [€]**	**Treibstoffkosten für 100 km [€/100km]**	**CO_2-Emissionen [g/km]**	**Sicherheitsempfinden**	**Reichweite pro Tankfüllung [km]**	**Gesamt**
Personen absolut	33	20	39	29	32	153
Personen in %	21,57%	20,92%	13,07%	25,49%	18,95%	100%

7 Literaturliste

ADAC (2017). Autodatenbank Vergleich VW Golf. https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/Vergleich.aspx?id1=240864&id2=240900&id3=239804. Zugriff 21.01.2017.

ADAC (2017). Hyundai ix35 Fuel Cell. https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/detail.aspx?KFZID=245820&info=Hyundai+ii35+Fuel+Cell+. Zugriff 21.01.2017.

ADAC (2017). Toyota Mirai. https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/detail.aspx?KFZID=251604&info=Toyota+MiMir+. Zugriff 21.01.2017.

Alia-Martinez, M., Antonanzas, J., Antonanzas-Torres, F., Martinez de Pison, F.-J. (2015). Towards the hybridization of gas-fired power plants: A case study of Algeria. Renewable and Sustainable Energy Reviews 51. Amsterdam: Elsevier Ltd.

Autobild (2015). Das kostet der Toyota Mirai. http://www.autobild.de/artikel/toyota-mirai-fcv-vorstellung-und-preis-5178340.html. Zugriff 21.01.2017.

Autorevue (2014). Statistik: Rückgang der PKW-Nutzung. http://autorevue.at/autowelt/oesterreich-pkw-kilometer. Zugriff 09.01.2017

Bertram, M., Bongard, S. (2014). Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr, Grundlagen, Einflussfaktoren und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Wiesbaden: Springer-Verlag.

Bernhart, W., Riederle, S., Yoon, M. (2013). Fuel cells A realistic alternative for zero emission?. München: Roland Berger Strategy Consultants

Beziat, J-C., Edwards, R., Larivé, J.-F. (2007). Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context - Well-to-wheels report. Luxembourg: European Commission Joint Research Centre Institute for Energy and Transport.

BMVIT (2017). Österreich wird elektrofit. https://infothek.bmvit.gv.at/e-mobilitaetspaket/. Zugriff 20.1.2017

BMWFW (2017). Spritpreisrechner. http://www.spritpreisrechner.at/. Zugriff 21.01.2017.

Bray, E. (2016). Bauxite and Alumina. Statistics and Information. https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/bauxite/. Zugriff 10.12.2016.

Capek, C. (2007). Jahresbericht 2007. Wien: Fachverband der Mineralölindustrie Österreichs (FVMI).

Clean Energy Partnership (2016). H2 TECHNOLOGIE https://cleanenergypartnership.de/faq/wasserstoffinfrastruktur/. Zugriff 10.12.2016

Die Presse (2016). 4000 Euro Prämie und grüne Nummerntaferl für E-Autos. http://diepresse.com/home/wirtschaft/economist/5122988/4000-Euro-Praemie-und-grune-Nummerntaferl-fur-EAutos?from=rss&utm_source=dlvr.it&utm_medium=twitter&utm_campaign=diepressecom. Zugriff 29.11.2016.

Donner, S. (2015). Aus Wind mach Wasserstoff. Technology Review 9/2015. Hannover: Heise Medien

EdPlus (2009). Rohölförderung kostet durchschnittlich 7,70 Dollar pro Barrel http://www.ed-info.de/edplus/ArtikelAnsichtArc.php?newsId=159. Zugriff 04.01.2017

E-Control Austria, (2015). Stromkennzeichnungsbericht 2015. Wien: Energie-Control Austria

E-control (2016). Was kostet eine Kilowattstunde. https://www.e-control.at/konsumenten/strom/strompreis/was-kostet-eine-kwh/-/asset_publisher/AGb0fFV4c3Hl/content/was-kostet-eine-kwh-strom-?inheritRedirect=false&redirect=https%3A%2F%2Fwww.e-control.at%2Fkonsumenten%2Fstrom%2Fstrompreis%2Fwas-kostet-eine-kwh%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_AGb0fFV4c3Hl%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-1%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2. Zugriff 11.01.2017.

Ecopoint Inc (2016). Driving Cycles. https://www.dieselnet.com/standards/cycles/. Zugriff 28.10.2016.

Eichlseder, H., Hausberger, S., Wimmer, A. (2007). Zukünftige Otto-DI-Brennverfahren-Thermodynamische Potenziale und Grenzen im Vergleich zu Dieselmotoren. Graz: TU Graz.

Eichlseder, H., Hausberger, S., Luz, R., Rexeis, M., Zallinger, M. (2009). Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3. Graz: TU Graz

Eichlseder, H., Klell, M. (2012). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Graz: Springer Vieweg.

Energie leben (2012). Toyota will Lithium-Ionen- Batterien recyclen http://www.energieleben.at/toyota-will-lithium-ionen-batterien-recyclen/. Zugriff 11.01.2017

EU (Hrsg.) (2009). Verordnung (EG) Nr. 443/2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO_2-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Straßburg: Europäisches Parlament

Fenton, M. (2016). Iron and Steel. Statistics and Information. https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel/. Zugriff 17.12.2016

Finanzen.at. (2017). Aktueller Nickel in USD je Tonne. http://www.finanzen.at/rohstoffe/nickelpreis?rd=fn. Zugriff 19.01.2017

Flanagan, D. (2016). Copper. Statistics and Information. https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/. Zugriff 14.12.2016

Förster, A. (2015). Anorganische Rohstoffe – Sicherung der Rohstoffbasis von morgen. Positionspapier des Temporären Process-Net Arbeitskreises „Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft“. Frankfurt am Main: Temporärer Process-Net Arbeitskreis „Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft“

Frankfurter Allgemeine (2010). Produktionsüberschüsse bei Kobalt absehbar http://www.faz.net/aktuell/finanzen/devisen-rohstoffe/energie-und-rohstoffe-produktionsueberschuesse-bei-kobalt-absehbar-1792530.html. Zugriff 10.01.2017

Frankfurter Allgemeine (2015). Unterwegs mit dem Wasserstoffauto. http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/auto-verkehr/mit-dem-wasserstoffauto-toyota-mirai-durch-deutschland-13977499.html?printPagedArticle=true#pageIndex_2. Zugriff 21.01.2017.

Frischenschlager, H., Karigl, B., Lampert, C., Pölz, W., Schindler, I., Tesar, M. (2010). Klimarelevanz ausgewählter Recycling-Prozesse in Österreich. Wien: Umweltbundesamt

Fritz, D., Heinfellner, H., Lichtblau, G., Pölz, W., Schodl, B. (2016). Ökobilanz alternativer Antriebe, Fokus Elektrofahrzeuge. Wien: Umweltbundesamt.

Garche, J., Günther, M., Smolinka, T. (2011). Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Berlin: NOW GMBH

Giuliani, S. (2014). ADAC Autotest. VW e-Golf.

Grimes, S. (2008). Report of the Environmental Benefits of Recycling. Brüssel: Bureau of International Recycling

Hahne, E. (2010). Technische Thermodynamik: Einführung und Anwendung. 3. Auflage. Berlin: Oldenbourg Verlag

Heise Autos (2015). Beförderungsmitte. https://www.heise.de/autos/artikel/VW-Golf-1-2-TSI-mit-110-PS-im-Fahrbericht-Befoerderungsmitte-2514473.html?artikelseite=3. Zugriff 09.01.2017

Illini, B. (2007). Ökologische Bewertung alternativer Kraftstoffe und Aktualisierung der Studie 2006 - Sind erdgasbetriebene Fahrzeuge umweltfreundlicher als benzin- bzw. dieselbetriebene Fahrzeuge? Wien: ÖVK - Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik

Indexmundi.com (2017). Lead Futures End of Day Settlement Price. http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=lead&months=360. Zugriff 10.01.2017

IEA (Hrsg.) (2011). Energy Statistics Division 08/2011. Paris: International Energy Agency

IEA (Hrsg.) (2015). Technology Roadmap: Hydrogen and Fuelcells. Paris: International Energy Agency

Interseroh (Hrsg.) (2008). Recycling für den Klimaschutz. Ergebnisse der Studie von Fraunhofer UMSICHT und INTERSEROH zur CO_2 – Einsparung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen.

Jaskula, B (2016). Lithium. Statistics and Information. https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/ Zugriff 14.12.2016

Jin, J., Lu, E. (2011). Planetary Gear – CS 285 Solid Modelling. https://people.eecs.berkeley.edu/~sequin/CS285/2011_REPORTS/CS285%20final%20paper_Eric&Jessie.pdf, Zugriff 20.01.2017.

Junker, B. (2016). Lithium - Zahlreiche Rohstoff-Juniors wollen vom Preisanstieg profitieren http://www.goldinvest.de/index.php/lithium-zahlreiche-rohstoff-juniors-wollen-vom-preisanstieg-profitieren-33628. Zugriff 10.01.2017

Justl, M., Klell, M., Salman, P., Sartory, M., Trattner, A., Wahlmüller, E. (2017): Modular Concept of a Cost-Effective and Efficient On-Site Hydrogen Production Solution. SAE paper, SAE World Congress 2017

Kampker, A., Schnettler, A., Vallee, D. (2013). Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Kerth, K., Pütmann, R. (2005). Die besten Strategietools in der Praxis: Welche Werkzeuge brauche ich wann? Wie wende ich sie an? Wo liegen die Grenzen? 6. Auflage. München: Hanser

Knoema.de (2016). Copper Prices Forecast: Long Term 2016 to 2025 | Data and Charts. http://knoema.de/prujshc/copper-prices-forecast-long-term-2016-to-2025-data-and-charts. Zugriff 08.01.2017

Kramer, M. (Hrsg.) (2010). Integratives Umweltmanagement. Systemorientierte Zusammenhänge zwischen Politik, Recht, Management und Technik. Wiesbaden: Springer-Verlag

Kühnapfel, J (2014). Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer-Verlag

Lehmann, J., Luschtinetz, T. (2014). Wasserstoff und Brennstoffzellen – Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff. Berlin: Springer Vieweg.

Leichtfried, F. (2007). Wasserstofferzeugung mittels PEM-Elektrolyse: Unterbrechungsfreie Versorgung mit ultrareinem Wasserstoff aus Wasser und Strom http://www.a3ps.at/site/sites/default/files/conferences/2007_12_13_A3PS_H2_BZ_Konferenz/02_PARALLEL_SESSION_1/01_H2_Herstellung_und_Reinigung/04_Biovest_Leichtfried.pdf. Zugriff 04.01.2017

Linde Gas (2017). Rechnen Sie mit Wasserstoff. http://www.linde-gas.at/internet.lg.lg.aut/de/images/1007_rechnen_sie_mit_wasserstoff_v110550_169419.pdf?v=1.0. Zugriff 12.01.2017

Loferski, P. (2016). Platinum-Group Metals. Statistics and Information. https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/. Zugriff 10.12.2016

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (2016). Wasserstoff Daten. h2data.de Zugriff 09.12.2016

Matula, E. (2016). Nickel: Ausblick auf die Preisentwicklung 2016/2017 http://www.miningscout.de/blog/2016/07/12/nickel-ausblick-auf-die-preisentwicklung-2016-2017/. Zugriff 14.01.2017

Mörk-Mörkenstein, R. (2016). Elektro- und Hybridfahrzeuge. Überlegungen zu Sicherheitsfragen beim Feuerwehreinsatz http://www.bundesfeuerwehrverband.at/uploads/media/4_Elektro-_und_Hybridfahrzeuge_Moerk-Moerkenstein.pdf. Zugriff 31.10.2016

Müller, T. (2013): Diffusion von Wasserstoff. Wermelskirchen: Energienovum

OEAMTC (2017). https://www.oeamtc.at/spritapp/SimpleSearch.do?spritaction=doSimpleSearch&page=1; Zugriff 12.01.2017

Oekostrom AG (Hrsg.) (2014). Stromkennzeichnung 2015

Öko-Institut (Hrsg.) (2007). Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS). Freiburg.

Österreichischer Bundesfeuerwehrverband (2010). Alternative Antriebe - Alternative Treibstoffe in Fahrzeugen und Gebäuden. 1. Ausgabe. http://www.bundesfeuerwehrverband.at/fileadmin/user_upload/Downloads/Infoblaetter/SG_4.6_Schadstoffe/E20_Alternative-Antriebe_V1.0.pdf. Zugriff 31.10.2016

Olson, D. (2016). Graphite. Statistics and Information. https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/graphite/. Zugriff 14.12.2016

Pannenbäcker, J. (2016). Blei. http://www.schrott24.at/altmetall-ankauf/blei/. Zugriff 10.12.2016.

Peter, B. (2014). Hyundai ix35 FCEV vs. Toyota Mirai. http://www.mycar.net/auto/hyundai/ix35-fcev/442-hyundai-ix35-fcev-vs-toyota-mirai.html. Zugriff 14.02.2017

Pieper, C. (2016). Abiotischer Ressourcenverbrauch. https://enargus.fit.fraunhofer.de/pub/bscw.cgi/d4930453-2/*/*/Abiotischer%20Ressourcenverbrauch.html?op=Wiki.getwiki. Zugriff 10.01.2017

Pötscher, F., Kutschera, U., Lichtblau, G., Pölz, W., Schreiber, H., Winter, R. (2014). Ökobilanz alternativer Antriebe – Elektrofahrzeuge im Vergleich. Wien: Umweltbundesamt.

Porsche Austria GmbH & Co OG, Produktmanagment VW PKW (Hrsg.) (2016). Der e-Golf.

Ralph, J. (2016). Lithium - The Problem With Prices. http://www.crugroup.com/about-cru/cruinsight/Lithium-The_Problem_With_Prices. Zugriff 14.01.2017

Rubel, B. (2016). EU: Elektroauto-Ladestation bei Neubauten ab 2019 Pflicht. https://www.mobilegeeks.de/news/elektroauto-ladestationen-neubauten-pflicht/. Zugriff 09.01.2017

Salchenegger, S. (2006). Emissionen von Wasserstofffahrzeugen. http://ww3.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0012.pdf. Zugriff 21.01.2017.

Schmerold, O. (2016). Kaufförderung für Elektroautos macht derzeit keinen Sinn. http://www.oeamtc.at/portal/kauffoerderung-fuer-elektroautos-macht-derzeit-keinen-sinn+2500+1658976. Zugriff 09.01.2017

Schmitt, H. (2015). ELECTRORETURN-Blog - Elektroschrott unter der Lupe: Recyceln von Lithium
https://blog.deutschepost.de/electroreturn/lithium-recycling/. Zugriff 12.01.2017

Schnebele, E. (2016). Nickel. Statistics and Information.
https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/nickel/. Zugriff 13.12.2016

Schreiner, K. (2015). Basiswissen Verbrennungsmotor. Konstanz: Springer Vieweg.

Schrottpreis (2017). http://www.schrottpreis.org/ Zugriff 15.01.2017

Somer, L. (Hrsg.) (2008). LSRPM, Synchronmotoren mit Permanentmagneten Gehäuse Aluminiumlegierung – 0,75 bis 400 kW, Technischer Katalog.

Spiegel Online, (2007). Profitdenken schlägt Umweltschutz.
http://www.spiegel.de/wirtschaft/erdgas-verschwendung-profitdenken-schlaegt-umweltschutz-a-504278.html. Zugriff 18.01.2017

Spiegel Online, (2012). Erdgas - In den Wind geblasen.
http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/bei-der-oelfoerderung-wird-oft-erdgas-verbrannt-a-854125.html. Zugriff 19.01.2017

Spiegel Online (2012). Die Wasserstoff-Offensive des Peter Ramsauer.
http://www.spiegel.de/auto/aktuell/brennstoffzelle-der-bessere-kraftstoff-fuer-elektroautos-a-835997.html. Zugriff 21.01.2017.

Stadtwerke Emmedingen (2012). Vergleichbarkeit der Kraftstoffe Erdgas, Super und Diesel.
http://swe-emmendingen.de/wp-content/uploads/2012/09/erdgas_tankstelle_umrechnung.pdf. Zugriff 12.01.2017

Statista (2012). Wirkungsgrade verschiedener Stromspeicher im Jahr 2012.
https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156269/umfrage/wirkungsgrade-von-ausgewaehlten-stromspeichern/, Zugriff 28.11.2016.

Statistisches Bundesamt (2013). Monatsbericht über die Elektrizitätsversorgung. Bilanz

Stromliste (2017). Wie funktionieren Nachtstromtarife in Österreich. http://stromliste.at/strompreis/tarifarten/unterbrechbar/nachtstrom. Zugriff 12.01.2017

Stummer, T. (2016). Ökoforderungen 2017. http://www.wohnbau.steiermark.at/cms/ziel/113383975/DE/#tb11. Zugriff 15.11.2016

Tolcin, A. (2016). Lead. Statistics and Information. https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lead/. Zugriff 13.12.2016

Toyota (Hrsg.) (2017). Sorgenfrei durch Garantie. https://www.toyota.at/service-and-accessories/service-garantie/garantie.json. Zugriff 21.01.2017.

Trattner, A., Pertl, P., Schmidt, S., Sato, T. (2011). Novel Range Extender Concepts for 2025 with Regard to Small Engine Technologies. JSAE 20119596 / SAE 2011-32-0596.

tradingeconomics.com (2016): Forecast for Covalt 2016-2020 http://www.tradingeconomics.com/commodity/cobalt/forecast. Zugriff 10.01.2017

Tschöke, H. (Hrsg.) (2015). Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs - Basiswissen. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2000). http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php. Zugriff 18.01.2017

Van Basshuysen, R., Schäfer, F. (Hrsg.) (2015). Handbuch Verbrennungsmotor. Bad Wimpfen/Hamm: Springer Vieweg.

Van Basshuysen, R. (Hrsg.) (2015). Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb. Bad Wimpfen: Springer Vieweg.

Wallstreet Online (2015). Lithium-Boom. Kalifornien verbietet Verbrennungsmotoren. http://www.wallstreet-online.de/nachricht/7885734-lithium-boom-kalifornien-verbietet-verbrennungsmotoren. Zugriff 15.01.2017

WELTN24 (2014). Das Märchen vom würdigen Tod deutscher Autos. https://www.welt.de/wirtschaft/article135896133/Das-Maerchen-vom-wuerdigen-Tod-deutscher-Autos.html. Zugriff 10.01.2017

Wiesenberger, H., Winter, B. (2010). Klimarelevanz ausgewählter Recycling-Prozesse in Österreich. Wien: Umweltbundesamt

Winkelhofer, G. (2009). Management- und Projektmethoden: Ein Leitfaden für IT, Organisation und Unternehmensentwicklung. 3. Auflage. Berlin: Springer

weltderphysik.de (2016). Sonne, Wind und Kerne: Woher kommt die Energie? http://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/energie/energiequellen/. Zugriff 04.01.2017