

Ökonomische und ökologische Relevanz von alternativen Energieformen im straßengebundenen gekühlten Güter- und Personentransport

Masterarbeit



Institut für Elektrische Anlagen
TU Graz

vorgelegt von
Stefan Bina

Betreuer
Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

Co-Betreuer
DI Thomas Wieland

Institutsleiter: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 - 7551
Telefax: (+43 316) 873 - 7553
<http://www.ifea.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / Juni - 2014



Danksagung

Jede Masterarbeit trägt die Handschrift des Erstellers, und doch ist sie niemals die Arbeit eines Einzelnen. Mein besonderer Dank gilt dem Institut für Elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz, allen voran Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert, der viel positiven Einfluss auf die vorliegende Arbeit nahm und mich in jeder Beziehung unterstützte.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Thomas Wieland für die fachliche Unterstützung, dafür dass er stets ein offenes Ohr für meine Fragen hatte und mich in jeder Lebenslage unterstützte.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Eltern und bei meinen Brüdern, die mir ermöglichten das Studium an der Technischen Universität Graz zu beginnen und dieses auch erfolgreich abzuschließen. Ein weiterer Dank gilt all meinen Freunden und Verwandten die mich während dieser Zeit begleiteten.

Abschließend möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Helmut Kurcz für die tolle Zusammenarbeit im Rahmen dieser Arbeit bedanken.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 18.06.2014



Stefan Bina

Kurzfassung

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, die technischen Möglichkeiten der Nutzung von Photovoltaik-Energieumwandlungsanlagen zur Energieeinsparung im gekühlten Straßen-transport, im Hinblick auf Bedingungen für die rechtliche Realisierung und nachhaltige Wirtschaftlichkeit, herauszuarbeiten und darzustellen.

Im Vorfeld werden aktuelle und zukünftige Kühltechnologien analysiert und nach deren Kompatibilität zur Photovoltaiktechnologie bewertet. Anhand dieser Ergebnisse werden konkrete Lösungen der Aufgabenstellung aufgezeigt und diskutiert. Zuletzt werden Bedingungen für die rechtliche Realisierung der dargebrachten Lösungen untersucht.

Durch die Einspeisung von Strom aus Photovoltaik-Energieerzeugungsanlagen in das Energiesystem der Kühlaggregate werden klimaschädliche Treibhausgase (CO_2 , CH_4) vermieden. Für die technische und rechtliche Machbarkeit ergeben sich mehrere Umsetzungsmöglichkeiten. Die Wirtschaftlichkeit der Lösungen lässt sich nur teilweise bestätigen.

Schlüsselwörter: Photovoltaik, Kühltransport, Kühlaggregat, Energieeinsparung, Kraftstoff einsparung, Treibhausgase

Abstract

The main objective of this thesis is to show and discuss technical possibilities for the usage of photovoltaic converter for energy savings in refrigerated road transport of goods, in view of the conditions for the legal realisation and sustainable profitability.

In a first step current and future refrigeration technologies are analysed and evaluated concerning their compatibility with photovoltaic technologies. Based on these results concrete solutions of the problem are demonstrated and discussed. Finally conditions for a legal realisation of the given solutions are examined.

Through usage of power from a photovoltaic converter to supply the refrigeration machines, climate-damaging greenhouse gases (CO_2 , CH_4) are avoided. For the technical and legal feasibility several solutions were found. The profitability of those solutions can only partly be confirmed.

Keywords: photovoltaic, refrigerated road transport of goods, refrigeration machine, energy savings, fuel savings, greenhouse gases

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	7
1. Einleitung	8
1.1. Einführung	8
1.2. Aufgabenstellung und Zielsetzung	9
1.3. Methoden und Überblick	9
2. Potentialanalyse	11
2.1. Marktpotential	12
2.2. Technologisches Potential	15
2.2.1. Energiemanagement von Kühltransporten	15
2.2.2. Analyse der Kühlsysteme aktueller Marktführer	20
2.2.3. Bewertung des technologischen Potentials	33
2.3. Energietechnisches Potential und monetäre Betrachtung der Kühltransporte	34
2.3.1. Nahtransport	38
2.3.2. Regionaltransport	38
2.3.3. Ferntransport	39
2.4. Entwicklungsszenarien	40
2.4.1. Politische Entwicklung	40
2.4.2. Wirtschaftliche Entwicklung	40
2.4.3. Ökologische Entwicklung	41
2.5. Alternative Möglichkeiten für Kühltransporte	43
2.5.1. Neue Antriebe für Nutzfahrzeuge	43
2.5.2. Alternative Energieerzeuger für Kühlaggregate	43
3. Technische und rechtliche Machbarkeit	45
3.1. Elektrotechnische Messung und Optimierung	45
3.2. Auswahl der Photovoltaiktechnologie	47
3.3. Technische Möglichkeiten und deren Umsetzungspotenzial	50
3.3.1. Nachrüstungen	51

3.3.2. Neuentwicklungen	59
3.4. Realisierungsbedingungen	62
3.4.1. Rechtliche Grundlagen	62
3.4.2. Typengenehmigung	64
3.4.3. Deklaration als Ladung	64
4. Ökonomische und ökologische Bewertung	66
4.1. Theoretische Grundlagen	67
4.1.1. Energiefluss	67
4.1.2. Kraftstoffverbrauch	68
4.1.3. Investitionskostenrechnung	70
4.1.4. Emissionen	74
4.2. Ökonomische Bewertung	75
4.2.1. Bewertung Konzept AC	75
4.2.2. Bewertung Konzept DC	77
4.3. Ökologische Bewertung	79
5. Schluss	80
Literaturverzeichnis	84
A. Anhang	91
A.1. Transportprofile	91
A.2. Ökonomische und ökologische Bewertung	92

Abkürzungsverzeichnis

AC	.....	Wechselstrom / Drehstrom
AvD	.....	Automobilclub von Deutschland
DC	.....	Gleichstrom
EG	.....	Europäische Gemeinschaft
ESB	.....	Ersatzschaltbild
EU	.....	Europäische Union bzw. European Union
FU	.....	Frequenzumrichter
IPCC	.....	Intergovernmental Panel on Climate Change
KA	.....	Kühlaggregat
Kfz	.....	Kraftfahrzeug
LiMa	.....	Lichtmaschine
LKW	.....	Lastkraftwagen
MPP	.....	Maximum Power Point
PKW	.....	Personenkraftwagen
PV	.....	Photovoltaik
SM	.....	Synchrongenerator/-maschine
STC	.....	Standardtestbedingungen / Standard Test Conditions
tkm	.....	Tonnenkilometer
UN	.....	United Nations
VKM	.....	Verbrennungskraftmaschine
VPI	.....	Verbraucherpreisindex
WR	.....	Wechselrichter
Δ_{Ein}	.....	Einschaltverhältnis
	.....	chemischer Straßenbetrieb
	.....	elektrischer Straßenbetrieb
	.....	Netzbetrieb
	.....	mechanischer Straßenbetrieb

1. Einleitung

1.1. Einführung

Im fünften Assessment Report (2013) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [1], wird erneut deutlich, dass der Klimawandel existiert und zu einem großen Teil vom Menschen verursacht wird. Es heißt darin: „Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig, und seit den 1950er Jahren, sind viele der beobachteten Änderungen über Jahrzehnte bis Jahrtausende noch nie dagewesen. Die Atmosphäre und die Ozeane haben sich aufgewärmt, die Schnee- und Eismengen sind zurückgegangen, der Meeresspiegel ist gestiegen, und die Konzentration der Treibhausgase hat sich erhöht.“ Die Fakten liegen klar auf der Hand, es heißt weiter „Der Gesamtstrahlungsantrieb, Maß für die Veränderung der Energiebilanz, ist positiv, und hat zu einer Aufnahme von Energie durch das Klimasystem geführt. Der größte Beitrag zum Gesamtstrahlungsantrieb wird durch den Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration seit 1750 verursacht.“

Innerhalb der Europäische Union (EU) ist man seit Jahren bedacht die Treibhausgasemissionen zu senken. Schon im Januar 2007 wurden einige Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Transportsektor von der Europäischen Kommission vorgeschlagen [2]. In der Strategie Europa 2020 hat man in den 20-20-20-Klimaschutzziele vereinbart die Treibhausgasemissionen bis 2020 um mindestens 20 % zu reduzieren [3]. Die daraus abgeleiteten Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele greifen in alle Treibhausgas emittierende Wirtschaftssektoren ein.

Die Emissionen im Transportsektor machen gut ein Viertel aller Treibhausgasemissionen innerhalb der EU aus, wobei jene im Straßentransport den größten Teil verursachen [4]. Trotz Anstrengungen seitens der Automobilindustrie die gesetzlich festgelegten kilometerbezogenen Emissionen zu reduzieren, werden nur marginale Rückgänge erwartet.

1.2. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Zuge dieser Arbeit wird die technische und wirtschaftliche Machbarkeit und Relevanz von Photovoltaik-Energieerzeugungsanlagen zur Energieeinsparung im gekühlten Straßengütertransport analysiert und diskutiert.



Abbildung 1.1.: (a) Ferntransporter [5] (b) LKW mit integrierter Photovoltaik-Technologie [6]

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, die technischen Möglichkeiten der Nutzung von Photovoltaik-Energieerzeugungsanlagen zur Energieeinsparung im gekühlten Straßen-transport, im Hinblick auf Bedingungen für die rechtliche Realisierung und nachhaltige Wirtschaftlichkeit, herauszuarbeiten und darzustellen.

Folgenden Fragestellungen werden in der Arbeit behandelt:

- Sind Photovoltaik-Energieerzeugungsanlagen zur Energieeinsparung im gekühlten Straßengütertransport markttechnisch relevant?
- Wie sind Photovoltaik-Energieerzeugungsanlagen im gekühlten Straßengütertransport technisch/rechtlich umsetzbar?
- Sind Photovoltaik-Energieerzeugungsanlagen im gekühlten Straßengütertransport wirtschaftlich und ökologisch relevant?

1.3. Methoden und Überblick

In der vorliegende Arbeit werden Möglichkeiten zur Energieeinsparung im gekühlten Straßengütertransport aufgezeigt, die Machbarkeit der aufgezeigten Lösungen diskutiert und die sich daraus ergebende Energie- sowie CO₂-Einsparung bewertet.

Im Vorfeld wird die Relevanz der Energieeinsparung durch Photovoltaik-Energieumwandlungsanlagen in Kapitel 2 analysiert. Dazu stützt man sich auf statistischen Auswertungen des europäischen Güterwarenverkehrs und auf Analysen aktueller und zukünftiger Kühltechnologien. Sowie auf Bewertungen dieser, auf aktuelle und zukünftige Entwicklungsszenarien im gekühlten Straßengütertransportsektor und auf die Bewertung alternativer Möglichkeiten für Kühltransporte.

Die Frage der technischen und rechtlichen Machbarkeit wird in Kapitel 3 geklärt. Zuerst werden aktuelle Technologien für Photovoltaikmodule analysiert. Im nächsten Schritt wird festgestellt, welche Möglichkeiten zur Umwandlung elektrischer Energie in Kälteenergie zur Verfügung stehen. Dann werden konkrete Lösungen der Aufgabenstellung als Konzepte für Nachrüstungen von aktuellen Installationen und für Neuentwicklungen aufgezeigt und diskutiert. Zuletzt werden Bedingungen für die rechtliche Realisierung der dargebrachten Konzepte untersucht.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit den ökonomischen und ökologischen Auswirkungen durch die Implementierung der vorgeschlagenen Lösungen. Anfangs werden dabei die zu untersuchenden Systeme vorgestellt und die theoretischen Grundlagen erläutert.

Die Ergebnisse der Einzelkapitel bilden entscheidende Faktoren für eine ganzheitliche Bewertung der Machbarkeit. Dazu werden im Abschluss, in Kapitel 5, die einzelnen Faktoren im Hinblick auf eine nachhaltige Unternehmensentwicklung gewichtet und superpositioniert, um eine Gesamtaussage über die Machbarkeit zu erreichen.

2. Potentialanalyse

Wie bereits in der Einführung erwähnt, zielt diese Arbeit nicht nur auf die Bewertung der rein technischen Machbarkeit ab, sondern schließt alle rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sowie Trends mit ein, um eine ganzheitliche Bewertung im Sinne einer nachhaltigen Unternehmensstrategie abgeben zu können. In Abgrenzung zu den anderen Kapiteln beschäftigt sich Kapitel 2 mit den technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und Trends innerhalb des straßengebundenen Gütertransports. Kapitel 3 fokussiert auf die technische und rechtliche Machbarkeit und Kapitel 4 auf ökonomische, ökologische und firmentechnische Auswirkungen.

Anhand von statistischen Auswertungen des europäischen Güterwarenverkehrs werden in Abschnitt 2.1 Potentialmärkte definiert. Der weltweite straßengebundene Kühltransportsektor wird von den drei Unternehmen, Carrier Transicold, Ingersol Rand (Thermo King) und dem deutschen Unternehmen Frigoblock dominiert. Abschnitt 2.2.1 analysiert zuerst welche Kühltechnologien aktuell im straßengebundenen Gütertransport eingesetzt werden und anschließend die breite Produktpalette dieser Unternehmen, um potentielle Anknüpfungspunkte für die Photovoltaiktechnologie (PV-Technologie) zu finden.

Durch eine Bewertung aktueller Kühltechnologien in Abschnitt 2.3 wird im Vorfeld das wirtschaftliche Potential für Technologien zur Energieeinsparung generell abgeschätzt.

Im Sinne der nachhaltigen Unternehmensentwicklung ist es für eine Unternehmung stets wichtig über aktuelle und zukünftige Trends informiert zu sein, um dann entsprechend, schon im Vorhinein, auf den Markt oder auf rechtliche Änderungen reagieren zu können. Der Abschnitt 2.4 untersucht zukünftige Entwicklungsszenarien im gekühlten Straßen-gütertransportsektor und Abschnitt 2.5 bewertet aktuelle alternativer Möglichkeiten für Kühltransporte.

2.1. Marktpotential

Als Potentialmärkte werden Länder mit hoher nationaler straßengebundener Gütertransportleistung definiert. Zur Identifikation dieser Potentialmärkte wird die statistischen Auswertung der europäischen Kommission, Eurostat [7] herangezogen. Bedingt durch die Aufgabenstellung fokussiert man sich auf den südeuropäischen Raum, welcher höhere Energieerträge erwarten lässt, und teilt die Transportleistung des straßengebundenen Güterverkehrs in Gesamt- und Nahrungsmitteltransportleistung auf. Eine explizite Statistik über die Transportleistung gekühlter Transporte ist in der Datenbank von Eurostat nicht auffindbar. Unter der Annahme, dass Nahrungsmittel meist gekühlt transportiert werden, greift man auf den Datensatz der Nahrungsmitteltransporte zurück [8].

Der südeuropäische Raum umfasst laut United Nations (UN) in folgende Länder: Albanien, Andorra, Bosnien & Herzegovina, Kroatien, Gibraltar, Griechenland, Italien, Mazedonien, Malta, Montenegro, Portugal, San Marino, Serbien, Slowenien, Spanien, Zypern und Vatikanstadt. Wegen der statistischen Ressourcen beschränkt man sich nur auf den aktuellen EU-Raum [7]. Unter dem Aspekt der länderverbindenden Ferntransporte inkludiert man Österreich, Frankreich und die Schweiz in die Statistik, da diese Länder beide Teile Südeuropas miteinander verbinden. Abbildung 2.1 zeigt die Länder Südeuropas laut UN-Definition mit Dunkelblau hinterlegt auf der linken Seite und die letztendlich gewählten Schwerpunktländer mit Rot hinterlegt auf der rechten Seite.

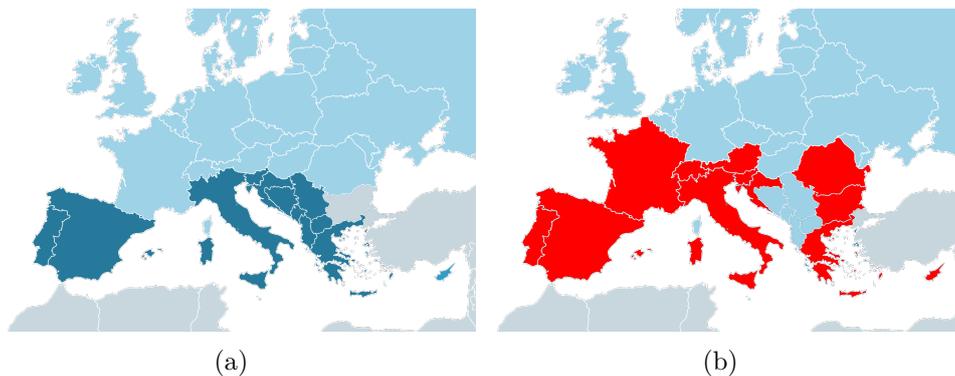


Abbildung 2.1.: Südeuropa: (a) Südeuropa lt. UN-Definition; (b) gewählte EU Länder lt. Beschreibung [7] [9]

Zunächst stellt man fest, welches Land den höchsten Anteil an straßengebundenen Gütertransport aufweist, siehe dazu Abbildung 2.2.

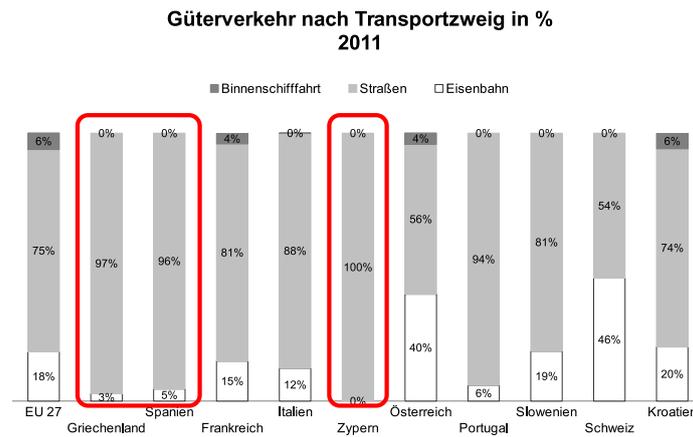


Abbildung 2.2.: Vergleich der Güterverkehrswege der Länder in Südeuropa nach Transportleistung [%] [7]

Relativ betrachtet sind Griechenland, Spanien und Zypern hier führend, aber erst eine Betrachtung der absoluten Transportleistung in Tonnenkilometer (tkm) ¹ gibt Aufschluss über das Marktpotential für die Photovoltaiktechnologie in diesem Marktsegment. Die absolute Transportleistung, aufgeteilt in Gesamt- und Nahrungsmitteltransportleistung der Länder Südeuropas, ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

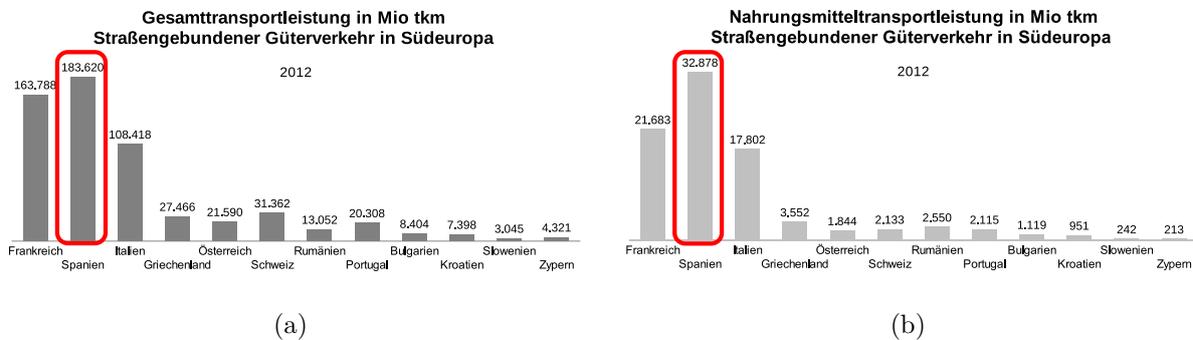


Abbildung 2.3.: Vergleich der (a) Gesamt- und (b) Nahrungsmitteltransportleistung in den Ländern Südeuropas [Mio tkm] [7]

Ersichtlich ist hierbei die große Transportleistung in Spanien, Italien und Frankreich im Vergleich zu den anderen Schwerpunktländer Südeuropas. Spanien ist auf Grund der

¹ Tonnenkilometer (tkm) bezieht sich auf die Beförderungsleistung von Gütern. Diese wird durch die Multiplikation der beförderten Menge in Tonnen und der zurückgelegten Wegstrecke in Kilometern bemessen. Ein tkm entspricht demnach der Beförderung von 1 Tonne Gewicht über die Distanz von 1 Kilometer.

höchsten Transportleistung und geographisch optimalen Lage für die Photovoltaiknutzung besonders interessant. In Abbildung 2.4 betrachtet man auch die Entwicklungen bezüglich der Transportleistung und den Nutzfahrzeugbestand im straßengebundenen Gütertransportsektor in Spanien.

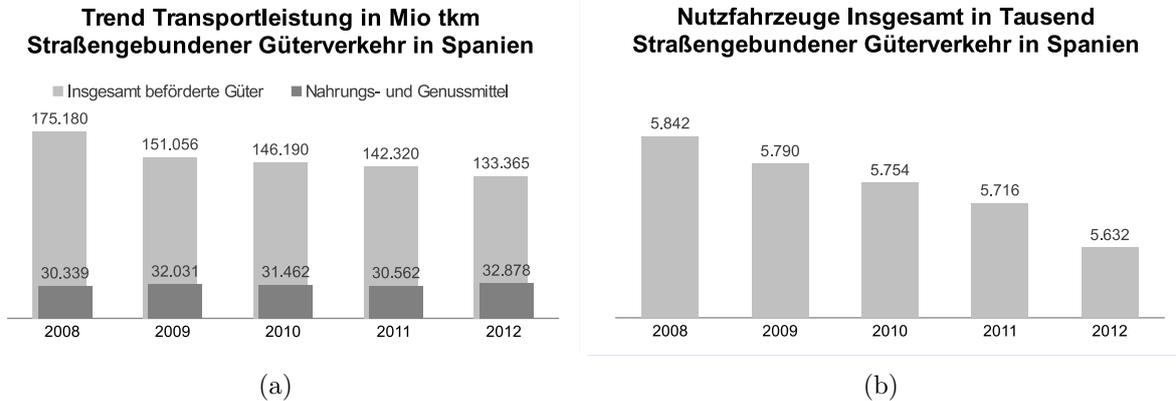


Abbildung 2.4.: Entwicklung (a) der straßengebundenen Transportleistung [Mio tkm] und (b) des Bestands an Nutzfahrzeugen [Tausend] in Spanien (2008 - 2012) [7]

Die Entwicklung der Transportleistung von Nahrungsmitteltransporte in Spanien von 2008 bis 2012, siehe Abbildung 2.4 (a), nimmt im Vergleich zur Gesamttransportleistung sogar leicht zu. Der Bestand an Nutzfahrzeugen jedoch ab, Abbildung 2.4 (b).

Das Marktpotential N_{Markt} für den spanischen straßengebundenen Gütertransportsektor an Nutzfahrzeugen, welche mit Photovoltaik-Energieerzeugungsanlagen zur Energieeinsparung ausgerüstet werden können, ergibt sich aus der Anzahl der Nutzfahrzeuge für Nahrungsmittel $N_{Nahrung}$. Es wird aus dem Verhältnis von Nahrungsmitteltransportleistung $P_{Nahrung}$ zu Gesamttransportleistung P_{Gesamt} , multipliziert mit der Gesamtanzahl an Nutzfahrzeugen N_{Gesamt} , errechnet, siehe Gleichung (2.1).

$$N_{Markt} = N_{Nahrung} = \frac{P_{Nahrung}}{P_{Gesamt}} \cdot N_{Gesamt} \quad (2.1)$$

Im Jahr 2012 beträgt das Marktpotential N_{Markt} noch immer stattliche 1 Million Fahrzeuge [7].

2.2. Technologisches Potential

Zu Beginn in Abschnitt 2.2.1 folgt eine Auflistung und Beschreibung folgender Kühltechnologien, siehe Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1.: Aktuelle und zukünftige Kühltechnologien im gekühlten Straßengütertransport

Aktuelle Kühltechnologien	Zukünftige Technologien
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kompressionskältetechnik [10][11][12] ▪ Eutektische Systeme [10] [12] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CO₂-Technologie [13] ▪ Zeolith-Technologie [14] ▪ Schukey-Technologie [15] ▪ Photovoltaik-Technologie [6]

Abschnitt 2.2.2 und 2.2.3 konzentrieren sich auf die Analyse und Bewertung der Produktpalette der drei weltgrößten Hersteller, Carrier Transicold [10], Ingersol Rand (Thermo King) [11] und Frigoblock [12], von Kühltechnologien, um potentielle Anknüpfungspunkte für die Photovoltaiktechnologie herauszuarbeiten.

2.2.1. Energiemanagement von Kühltransporten

Das Energiemanagement im Kühl-LKW ist für die bedarfsgerechte und effiziente Erzeugung, Wandlung, Verteilung und Nutzung der benötigten Kühlenergie verantwortlich. Dies kann durch Einsatz verschiedenster Technologien, hier **Kühltechnologien** genannt, erfolgen. In diesem Abschnitt wird vermehrt auf die Erzeugung und Wandlung von Kühlenergie eingegangen.

Die Kompressionskältetechnik ist besonders weit verbreitet und kommt oft zur Anwendung. Aus diesem Grund wird hier näher darauf eingegangen.

2.2.1.1. Kompressionskältetechnik

Mobile Kompressionskälteanlagen für den straßengebundenen Gütertransport, im folgenden auch **Kühlaggregate** genannt, stellen den Großteil an mobilen Kälteaggregaten dar. Diese Systeme basieren auf dem linksläufigen Kreisprozess, der auch thermodynamischer Kälteprozess genannt wird. In Abbildung 2.5 (a) ist der Prozess als Blockschaltbild abgebildet und Abbildung 2.5 (b) stellt ein aktuelles Kühlaggregat (KA) der Firma Frigoblock dar.

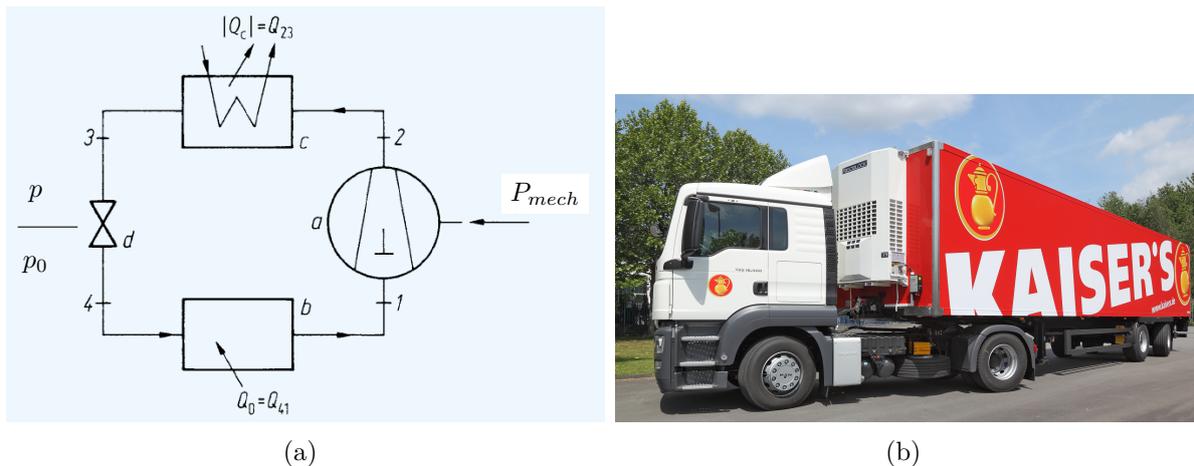


Abbildung 2.5.: (a) Schema einer einstufigen Verdichterkältemaschine [16]; (b) Frigoblock Kälteanlage (HK 25 SL) an LKW-Sattelanhänger [12]

Der Verdampfer (b) nimmt den aus der Umgebung zugeführten Wärmestrom \dot{Q}_0 auf, und verdampft bei niedrigem Druck und tiefer Temperatur flüssiges Kältemittel (z.B.: CO_2 oder R410A) innerhalb des Kreislaufes. Der dabei entstehende Dampf wird vom Verdichter (a), im folgenden auch Kühlkompressor genannt, angesaugt und verdichtet. Das Kältemittel wird im wasser- oder luftgekühlten Verflüssiger (c) wieder verflüssigt. Je wärmer das Kühlwasser bzw. die Kühlluft ist, umso höher ist der Verflüssigungsdruck. Der Leistungsbedarf P_{mech} des Verdichters wird von dem Druckverhältnis Verflüssigungsdruck zu Verdampfungsdruck beeinflusst. Nun wird das verflüssigte und gegebenenfalls unterkühlte, unter Druck p stehende Kältemittel durch die Drossleinrichtung (d) auf den niedrigeren Druck p_0 entspannt. Dabei erfolgt eine Teilverdampfung des Kältemittels. Dieses Zweiphasengemisch wird dem Verdampfer erneut zugeführt [16]. Der Antrieb des Verdichters kann mechanisch, hydraulisch oder elektrisch erfolgen. Erfolgt der Antrieb elektrisch, bietet diese Technologie großes Potential für den gemeinsamen Einsatz mit der Photovoltaiktechnologie zur Treibstoffeinsparung.

2.2.1.2. Eutektische Systeme

Eutektische Systeme gehören zu den Kältespeichersystemen. Die Kältemenge wird in wässrigen Salzlösungen gespeichert, welche sich in wasserdampfdichten Polyethylenkugeln befindet. Diese Kugeln bilden in Behältnisse aus Stahl, Kunststoff oder Beton verschiedenster Form das Speichersystem. Die Kälteerzeugung erfolgt ortsfest. Dazu werden die Kugeln durch Glykolsole bis zum Übergang von der flüssigen in die feste Phase abgekühlt. Glykolsole ist eine mit Salzen und Glykolen versetzte wässrigen Lösung. Kältespeichersysteme können im Vergleich zur Kompressionskältetechnik in der mobilen

Anwendung nur für eine bestimmte Zeit, bis die Wärmespeicherkapazität der Kugeln gesättigt ist, eingesetzt werden. Der Vorteil im Einsatz dieser Systeme liegt in der Einsparung von Energiekosten durch den Betrieb der Kälteerzeugung während der Niedertarifzeit [16]. Wegen der ortsfesten Kälteerzeugung und des geringen Stromverbrauchs im Betrieb, ist diese Technologie für den gemeinsamen Einsatz mit der Photovoltaiktechnologie zur Treibstoffeinsparung ungeeignet.

2.2.1.3. CO₂-Technologie

Die CO₂-Technologie kann in diesem Fall zu den Verdunstungskühlverfahren gezählt werden. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

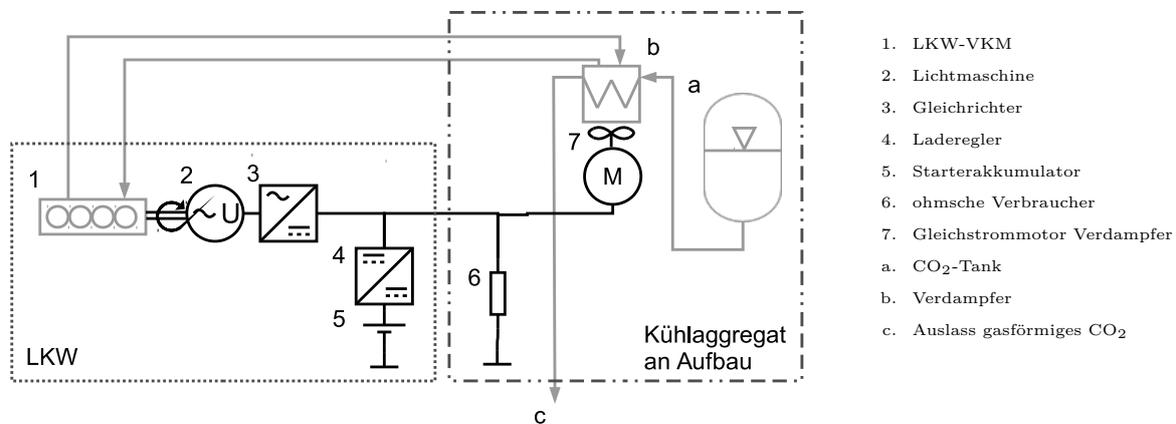


Abbildung 2.6.: Kühlsystem 11: Ersatzschaltbild (ESB) und Legende eines CO₂-Kühlsystem [13]

Flüssiges Kohlendioxid, in einem am Fahrgestell befüllbaren Tank *a* aufbewahrt, fließt vom Tank in den Verdampfer *b* im Laderaum. Elektrisch betriebene Ventilatoren erzeugen einen Luftstrom um die Kühlschlangen. Durch das Verdunsten des flüssigen Kohlendioxids werden die Kühlschlangen und die Luft, die diese umströmt, gekühlt. Je nach Ausführung verbleibt das Gas im Laderaum, oder wird nach dem Kühlvorgang, über einen Auslass *c*, aus dem Fahrzeug in die Atmosphäre geleitet [13]. Wegen des geringen Stromverbrauchs im Betrieb, ist diese Technologie für den gemeinsamen Einsatz mit der Photovoltaiktechnologie zur Treibstoffeinsparung ungeeignet.

2.2.1.4. Schukey-Technologie

Die Schukey-Technologie vereint den Kompressions- und Expansionsprozess höchst effizient in einer einzigen Maschine und kann unter anderem als Kühlaggregat eingesetzt

unter Umgebungstemperatur abgekühlt (kalte Luft T_4). Die kalte Luft kann bereits zur Kühlung verwendet werden.

- Will man die Luft T_4 weiter abkühlen, führt man sie dem Prozess von neuem zu, T_4 entspricht dabei $T_{1,neu}$.

2.2.1.5. Zeolith-Technologie

Die Zeolith-Technologie beruht auf der Adsorptionstechnologie und bedient sich der Eigenschaft des kristallinen Minerals Zeolith, Wasserdampf anzusaugen (zu adsorbieren), in seine poröse Struktur einzubinden und dabei Wärme hoher Temperatur abzugeben. Zum Antrieb wird lediglich Wärme benötigt, die mittels Strom, Sonne oder Gas bereitgestellt werden kann. Zudem ist das Verfahren ist umweltverträglich und betriebssicher [14]. Die Funktionsweise des Prinzips beruhend auf geschlossene Adsorption- und Desorptionszyklen wird im Folgendem anhand von Abbildung 2.8 erklärt.

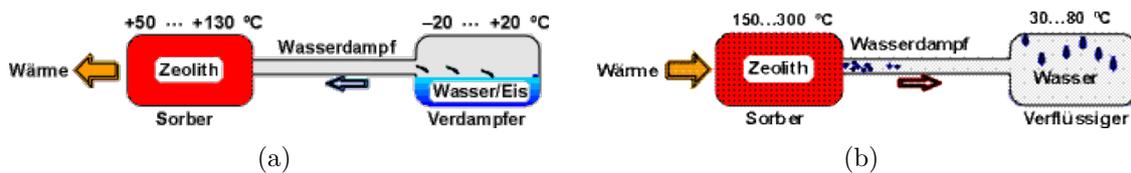


Abbildung 2.8.: Zeolith-Sorptionsprozesse (a) Adsorptionszyklus; (b) Desorptionszyklus [19]

Erfolgt der geschlossene Adsorptionszyklus in luftleeren Behältern, geschieht das Ansaugen des Dampfes von der Wasseroberfläche im Verdampfer-Behälter mit solcher Heftigkeit, dass sich aufgrund der hohen Verdampfungskälte der Rest des Wassers stark abkühlt und zu Eis gefriert. Es kann dann zum Kühlen und Klimatisieren genutzt werden. Durch ein zusätzliches Ventil zwischen den beiden Behältern, kann die Kälteerzeugung unbegrenzt lange ohne Energieverlust unterbrochen werden. Dieser erste Teilprozess (Adsorption) der Energiewandlung läuft solange, bis der Zeolith mit Wasser gesättigt ist. Eine Umkehrung dieses Vorgangs erfolgt in einem zweiten Teilprozess (Desorption) durch Wärmezufuhr in den Zeolith. Dazu heizt man das Wasser dampfförmig aus dem Zeolith heraus (desorbiert) und es verflüssigt sich wieder im Verdampfer-Behälter. Eine nahezu kontinuierliche Kälteerzeugung erreicht man, wenn man zwei oder mehrere Sorptionsaggregate phasenversetzt betreibt [19].

2.2.1.6. Photovoltaik-Technologie

Die Photovoltaiktechnologie ist keine eigenständige Technologie zur Kälteerzeugung, sondern vielmehr eine Hilfstechnologie zur Energieerzeugung für den Antrieb anderer hier vorgestellter Kühl-Technologien, insbesondere Kompressionskältetechnik, Schukey-Technik und Zeolith-Technik. In Kapitel 3 wird im Detail darauf eingegangen.

2.2.2. Analyse der Kühlsysteme aktueller Marktführer

Die drei international tätigen Unternehmen Carrier Transicold, Ingersol Rand (Thermo King) und Frigoblock decken mit ihrer Produktpalette einen weiten Bereich mobiler Kühltransportlösungen ab. Im gekühlten Straßengütertransport bieten sie gemeinsam 11 unterschiedliche Kühlsysteme für verschiedene Fahrzeugklassen und Einsatzbereiche an.

In Tabelle 2.2 sind diese nach Fahrzeugklassen unterteilt und zusätzlich mit Symbolen zur Kennzeichnung ihrer Betriebsart versehen.

Tabelle 2.2.: Produktpalette der drei weltgrößten Hersteller von Kühlaggregaten, Carrier Transicold, Ingersol Rand (Thermo King) und Frigoblock (Stand 15.2.2014) [10] [11] [12]

Nr.	Kühlsystem Beschreibung	Fahrzeugart			
		Lieferwagen	Transporter & Leicht-LKW	LKW	LKW mit Sattelaufleger
	1. Generator, von LKW-VKM angetrieben, oder Netz speisen Drehstrommotoren für Kompressor und Komponenten		Frigoblock: FK-Serie	Frigoblock: FK-Serie	Frigoblock: HK-Serie
	2. Generator, von LKW-VKM angetrieben, oder Netz speisen über Inverter Drehstrommotoren für Kompressor und Komponenten		Carrier Transicold: Pulsor	Frigoblock: FK i-Serie	
	3. LiMa (90 Ah Batterie, 125 A LiMa) oder Netz (1-phasig) speisen Komponenten und Antrieb für Kompressor (12 V DC)	Carrier Transicold: Neos Thermo King: B-Series	Carrier Transicold: Neos Thermo King: B-Series		
	4. LKW-VKM treibt Kompressor direkt an. Andere Komponenten werden über Fahrzeugbordnetz versorgt		Carrier Transicold: Viento Thermo King: C-Series		
	5. LKW-VKM direkt oder Netz über Elektromotor treibt Kompressor an, andere Komponenten werden über Fahrzeugbordnetz versorgt		Carrier Transicold: Xarios, Zephyr Thermo King: V-Series 100-300, V-500, V-600, V-700 Spectrum, V-800		
	6. Integrierte Diesel-VKM direkt, oder Elektromotor über Netz treibt alle Komponenten über Keilriemen an			Carrier Transicold: Supra (City), Oasis Thermo King: T-Series (Spectrum, Whisper), UT-Series	Carrier Transicold: Maxima (S, T) Thermo King: SLX-Series
	7. Integrierte Diesel-VKM treibt alle Komponenten über Keilriemen an				Carrier Transicold: Maxima R, X2, Vector 1550 alt & 1950 alt
	8. Hydraulikpumpe, von LKW-VKM angetrieben, treibt über Hydraulikmotor und Keilriemen alle Komponenten an			Carrier Transicold: Supra Z	
	9. Generator, von integrierter oder externer Diesel-VKM angetrieben, oder Netz speisen Drehstrommotoren für Kompressor und Komponenten				Carrier Transicold: Vector 1550 neu, 1850 & 1950 neu (City), Vector 1800, 1800 Mt Frigoblock: HD-Serie
	10. Eutektische Aggregate - Kältespeicher wird ortsfest aktiviert. Strom wird lediglich zur Steuerung verwendet			Carrier Transicold: Vatna Frigoblock: Eutektisches System	
	11. CO2-Kühltechnologie - Flüssiges CO2 kühlt Kühlschlangen im Laderaum. Strom nur für Steuermodul verwendet. Temperaturregelung mittels heißem Kühlwasser der LKW-VKM oder integrierter Dieselheizung			Thermo King: CT-10 / CT-10 Spectrum	Thermo King: CT-15 / CT-15 Spectrum

Legende:

... elektrischer Straßenbetrieb

... Netzbetrieb

... mechanischer Straßenbetrieb

... chemischer Straßenbetrieb

Im Folgenden geht man näher auf diese aktuell eingesetzten Kühlsysteme ein und bewertet diese nach Kompatibilität zur Photovoltaiktechnologie. Dabei wird auf folgende Punkte eingegangen:

- Technologisches Potential
- Wahl des Einspeisepunktes

Die in den Unterabschnitten dargestellten schematischen Ersatzschaltbilder der Kühlsysteme und deren Funktion, sind aus diversen Beschreibungen, Reparaturanleitungen und schematischen Darstellungen des jeweiligen Herstellers entnommen [10] [11] [12].

2.2.2.1. Kühlsystem 1

Kühlsystem 1 wird vorwiegend von dem Unternehmen Frigoblock als FK- und HK-Serie vertrieben und ist für die fünf Fahrzeugklassen, Transporter, Leicht-LKW, Mittel- und Schwer-LKW, sowie LKW mit Sattelaufleger verfügbar. Die Nennleistung der Modelle variiert zwischen 4,4 kW und 15,3 kW [12]. Abbildung 2.9 zeigt den schematischen Aufbau.

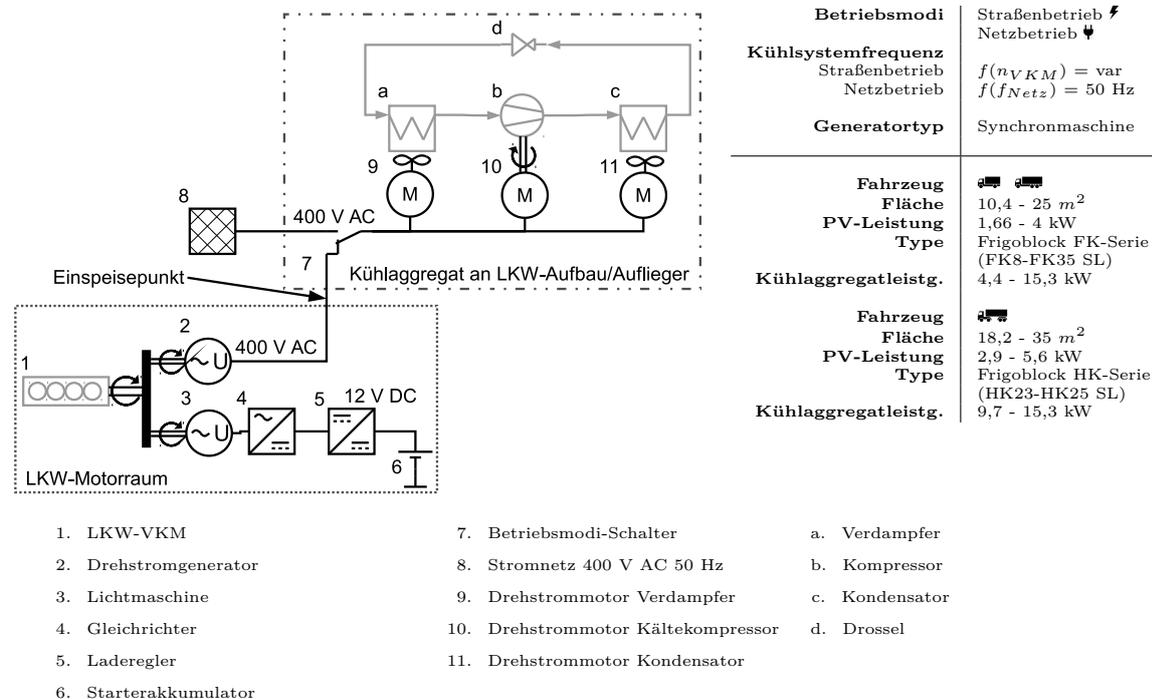


Abbildung 2.9.: Kühlsystem 1: ESB, technische Daten, Einsatzbereich und Legende [12]

Diese System verfügt über die beiden möglichen Betriebsarten elektrischer Straßenbetrieb sowie Netzbetrieb. Die Antriebe des Kühlsystems für den Verdichter oder Kältekompressor das Verdampfergebläse, und das Kondensatorgebläse werden dreiphasig mit 400-V-Drehstrom betrieben. Die benötigte Energie wird im elektrischen Straßenbetrieb

von dem zusätzlich mit der Verbrennungskraftmaschine (VKM) gekoppelten Drehstromgenerator bereitgestellt. Dafür wird ein Synchrongenerator mit Erregerspannungssteuerung verwendet. Im Netzbetrieb stellt das öffentliche Netz diese Energie zur Verfügung. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Speisefrequenz im elektrischen Straßenbetrieb stark variiert, aber im Netzbetrieb die üblichen 50 Hz besitzt.

Der rein elektrische Antrieb bietet großes Potential für die Einspeisung von PV-Strom. Es bieten sich zwei Punkte zur Einspeisung an, entweder über den Drehstromanschluss für das öffentliche Netz im Netzbetrieb (8), oder in das Inselsystem des Synchrongenerators (2). Erstere Möglichkeit bedingt eine vollkommene Versorgung des Kühlaggregates mit photovoltaisch umgewandelter Energie. Nach dem Stand der Technik und auf Grund der limitierten Dachfläche des LKW, stellt dieser Einspeisepunkt über den Drehstromanschluss keine Option dar. Aus diesem Grund kann die von der Photovoltaik umgewandelte Energie nur unterstützend wirken, in dem sie den Synchrongenerator entlastet. Der Einspeisepunkt ist, wie in Abbildung 2.9 eingezeichnet, zwischen (2) und (7) zu wählen.

2.2.2.2. Kühlsystem 2

Kühlsystem 2 stellt eine Weiterentwicklung zu System 1 dar. Es wird derzeit von den Unternehmen Frigoblock in der FK*i*-Serie und von Carrier Transicold, unter dem Produktnamen Pulsor, für die vier Fahrzeugklassen Transporter, Leicht-LKW, Mittel- und Schwer-LKW vertrieben. Die Generatorleistung der FK*i*-Serie Modelle beträgt 16,1 kW und die Nennleistung der Pulsor Modelle variiert zwischen 4,5 kW und 5,2 kW [10] [12]. Abbildung 2.10 zeigt den schematischen Aufbau.

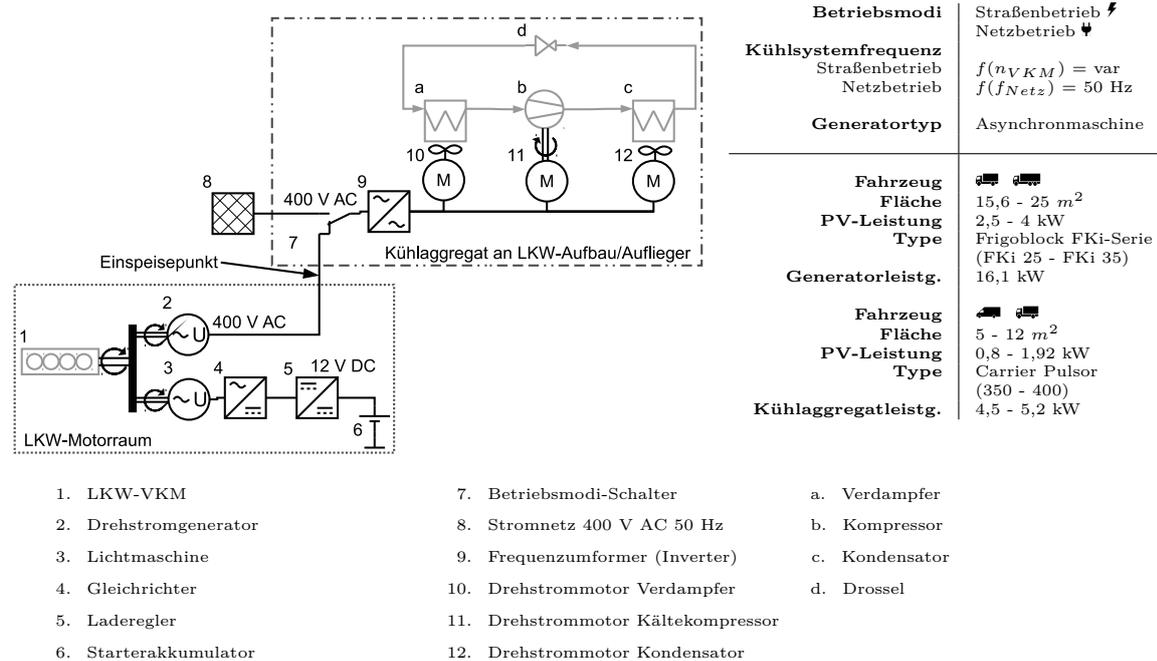


Abbildung 2.10.: Kühlsystem 2: ESB, technische Daten, Einsatzbereich und Legende [10] [12]

Wie System 1 verfügt dieses über die beiden möglichen Betriebsarten elektrischer Straßenbetrieb und Netzbetrieb. Im Unterschied dazu kommt ein Asynchrongenerator zum Einsatz.

Die eigentliche Weiterentwicklung ist der integrierte Frequenzumrichter, der für eine feinere Leistungsregelung der Kühlaggregatantriebe und damit auch für eine feinere Temperaturregelung, bei gleichzeitiger Kraftstoffeinsparung, sorgt.

Auch hier bietet der rein elektrische Antrieb großes Potential für die Einspeisung von photovoltaisch mobil umgewandelter Energie. Die Wahl des Einspeisepunktes gestaltet sich analog zu Kühlsystem 1.

2.2.2.3. Kühlsystem 3

Kühlsystem 3 ist für den Einsatz in den drei Fahrzeugklassen Lieferwagen, Transporter und Leicht-LKW konzipiert und wird von Carrier Transicold unter dem Produktnamen Neos und von Ingersol Rand (Thermo King) unter B-Series vertrieben. Die Nennleistung der Neos Modelle beträgt 1,5 kW und der B-Series Modelle im Straßenbetrieb 1,3 kW und im Netzbetrieb 0,75 kW [10] [11]. Abbildung 2.11 zeigt den schematischen Aufbau.

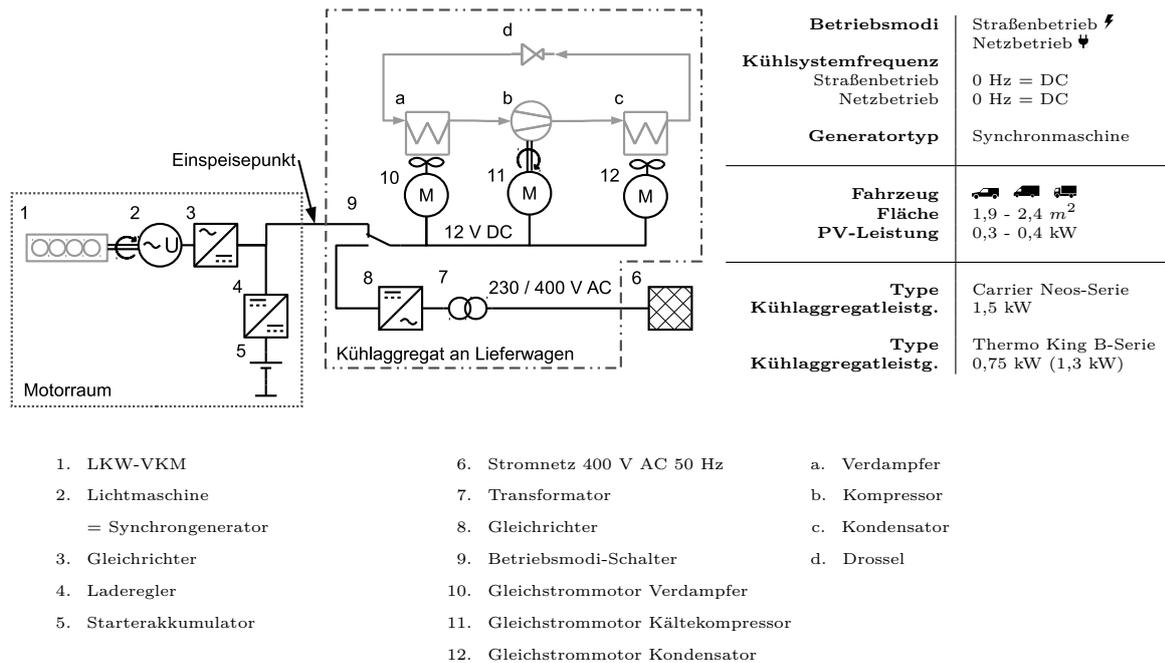


Abbildung 2.11.: Kühlsystem 3: ESB, technische Daten, Einsatzbereich und Legende [10] [11]

Wie die beiden zuvor beschriebenen Kühlsysteme kann es im elektrischen Straßenbetrieb und Netzbetrieb betrieben werden, wobei die Antriebe mit 12-V-Gleichstrom betrieben werden. Die benötigte Energie wird im elektrischen Straßenbetrieb entweder von einem separaten Synchrongenerator, oder von der Lichtmaschine des Fahrzeugs (LiMa) über einen Gleichrichter bereitgestellt. Im Netzbetrieb stellt das öffentliche Netz über eine einphasige Einspeisung und einem Gleichrichter diese Energie zur Verfügung. Um einen ausfallsicheren Betrieb gewährleisten zu können, sollten die Fahrzeuge mit einer leistungsstarken LiMa mit einer Ausgangsleistung von 125 A und einem Starterakkumulator mit einer Kapazität von mindestens 90 Ah ausgestattet sein.

Das im Straßenbetrieb mit Gleichspannung angetriebene Kühlsystem ermöglicht die Einsparung eines Wechselrichters im Photovoltaiksystem. Aus diesem Grund ist der Einspeisepunkt, wie in Abbildung 2.11 eingezeichnet, vom wirtschaftlichen und energetischen

Standpunkt betrachtet zwischen (3) und (9) zu wählen.

2.2.2.4. Kühlsystem 4

Kühlsystem 4 wird von Carrier Transicold unter dem Produktnamen Viento und von Ingersol Rand (Thermo King) unter C-Series für die beiden Fahrzeugklassen Transporter und Leicht-LKW vertrieben [10] [11]. Abbildung 2.12 zeigt den schematischen Aufbau.

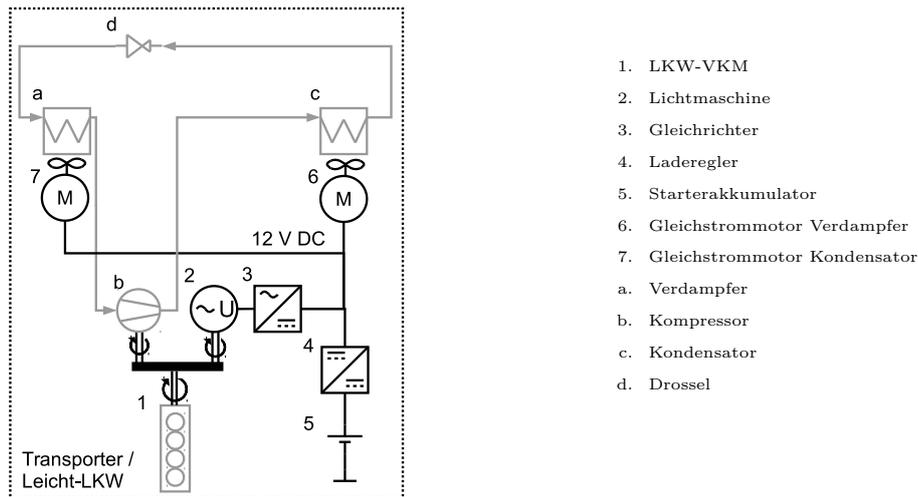


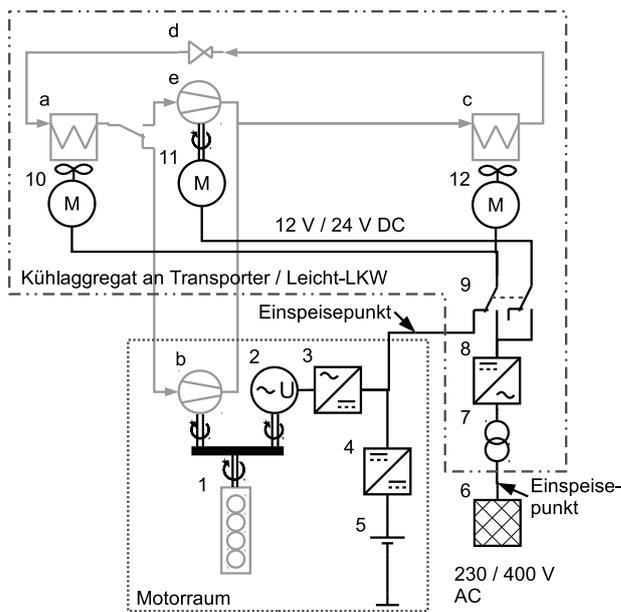
Abbildung 2.12.: Kühlsystem 4: ESB und Legende [10] [11]

Der Kältekompressorantrieb wird von der Fahrzeugverbrennungskraftmaschine (LKW-VKM) direkt betrieben. Alle anderen Komponenten werden von dem Fahrzeugbordnetz versorgt.

Dieses vorwiegend mechanisch angetriebene System bietet ein zu geringes Potential zur Energieeinsparung durch mobile Photovoltaiktechnologie.

2.2.2.5. Kühlsystem 5

Kühlsystem 5 wird von Carrier Transicold unter den Produktnamen Xarios und Zephyr und von Ingersol Rand (Thermo King) unter V-Series für die beiden Fahrzeugklassen Transporter und Leicht-LKW vertrieben. Die Nennleistung der Xarios Modelle variiert zwischen 1 kW und 4 kW, beträgt für die Zephyr Modelle 1,8 kW und variiert bei den V-Series Modellen im Netzbetrieb zwischen 1,6 kW und 8,3 kW und im Straßenbetrieb zwischen 0,25 kW und 0,6 kW [10] [11]. Abbildung 2.13 zeigt den schematischen Aufbau.



Betriebsmodi	Straßenbetrieb ⚡ Netzbetrieb ⚡
Kühlsystemfrequenz	Straßenbetrieb 0 Hz = DC Netzbetrieb $f(f_{Netz}) = 50$ Hz
Fahrzeug Fläche	5 - 12 m ²
PV-Leistung	0,8 - 1,9 kW
Type	Carrier Xarios (150 - 600)
Kühlaggregatleistg.	1 - 4 kW
Type	Carrier Zephyr
Kühlaggregatleistg.	1,8 kW
Type	Thermo King V-Serie (100 - 800)
Kühlaggregatleistg.	0,25-0,6 kW (1,6-8,3 kW)

- | | | |
|---|--------------------------------------|----------------|
| 1. LKW-VKM | 6. Stromnetz 400 V AC 50 Hz | a. Verdampfer |
| 2. Lichtmaschine
= Synchrongenerator | 7. Transformator | b. Kompressor |
| 3. Gleichrichter | 8. Gleichrichter | c. Kondensator |
| 4. Laderegler | 9. Betriebsmodi-Schalter | d. Drossel |
| 5. Starterakkumulator | 10. Gleichstrommotor Verdampfer | |
| | 11. Gleichstrommotor Kältekompressor | |
| | 12. Gleichstrommotor Kondensator | |

Abbildung 2.13.: Kühlsystem 5: ESB, technische Daten, Einsatzbereich und Legende [10] [11]

Dieses System verfügt über die beiden Betriebsarten mechanischer Straßen- und Netzbetrieb, wobei im Straßenbetrieb der Kältekompressor mechanisch von der VKM angetrieben wird. Jedoch ist für den Netzbetrieb ein zusätzlicher Kältekompressor samt elektrischem Antrieb installiert. Die beiden anderen Antriebe für Verdampfer- und Kondensatorgebläse werden von der LiMa bzw. dem Bordnetz des Fahrzeugs gespeist. In beiden Fällen arbeitet das System intern mit 12- bzw. 24-V-Gleichstrom, die externe Versorgung für den Netzbetrieb ist jedoch 400-V-Drehstrom.

Die Wahl des Einspeisepunktes ist hier nicht trivial. Das Kühlsystem wird im Netzbetrieb mit 400-V-Drehstrom betrieben und bietet großes Einsparpotential. Jedoch würde die Wahl des Einspeisepunktes am Stromnetz-Drehstromanschluss (6), die Installation eines zusätzlichen Drehstromgenerators an der LKW-VKM voraussetzen, da die von der PV maximal erzeugbare Energie in den meisten Fällen nicht ausreichen wird das Kühlaggregat zu versorgen. Eine direkte Einspeisung des PV-Stroms in das Bordnetz, zwischen (3) und (9), stellt eine einfachere Alternative zur ersten Option dar, mit allerdings geringerem Einsparpotential, da der Kühlkompressor als größter Verbraucher in diesem Fall

von der LKW-VKM angetrieben wird. Möchte man möglichst viel Kraftstoff einsparen ist Einspeisepunkt am Stromnetz-Drehstromanschluss (6) zu wählen und wird um die Installation eines zusätzlichen Drehstromgenerators nicht herum kommen.

2.2.2.6. Kühlsystem 6

Das wohl meist eingesetzte Kühlsystem 6 wird von Carrier Transicold unter den Produkt-namen Supra, Oasis und Maxima und von Ingersol Rand (Thermo King) unter T-Series, UT-Series und SLX-Series für die drei Fahrzeugklassen Mittel- und Schwer-LKW, sowie LKW mit Sattelaufleger vertrieben. Im Vergleich zu den anderen Systemen ist dieses direkt am Sattelaufleger angebracht. Die Nennleistung im Netzbetrieb der Supra und Oasis Modelle variiert zwischen 3,6 kW und 9 kW, der T-Series und UT-Series Modelle zwischen 4,5 kW und 7,5 kW und der SLX und Maxima Modelle zwischen 3,6 kW und 9 kW [10] [11]. Abbildung 2.14 zeigt den schematischen Aufbau.

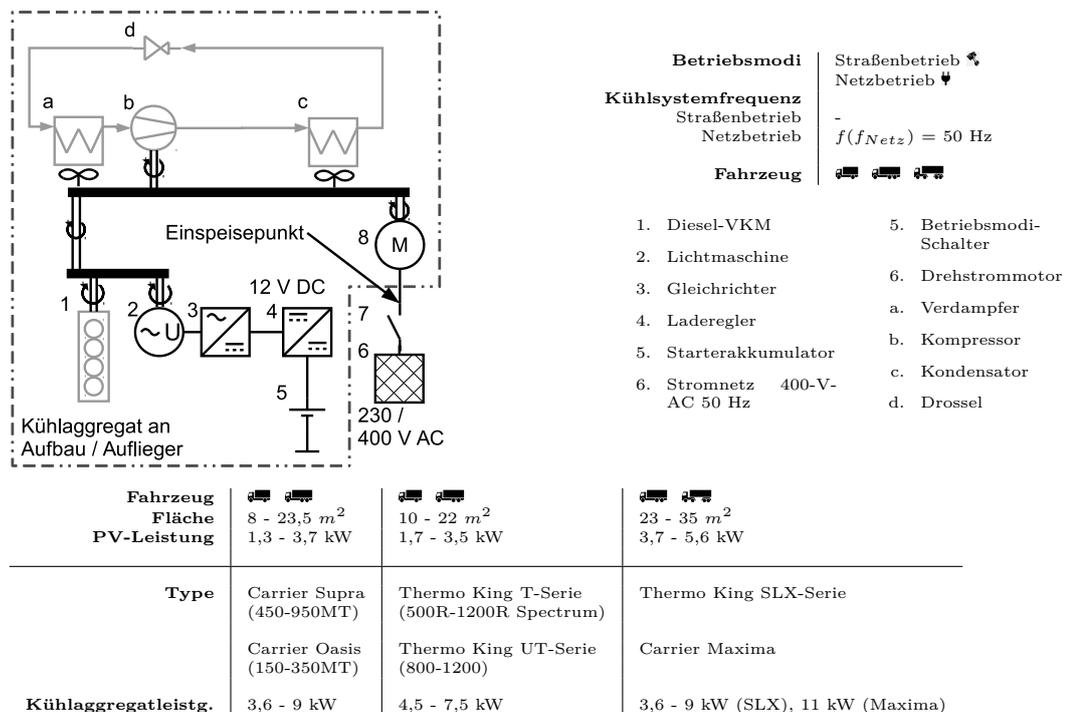


Abbildung 2.14.: Kühlsystem 6: ESB, technische Daten, Einsatzbereich und Legende [10] [11]

Kühlsystem 6 verfügt über die beiden Betriebsarten mechanischer Straßen- und Netzbetrieb, wobei im Straßenbetrieb der Kältekompressor mechanisch von einer integrierten Dieselerbrennungskraftmaschine (Diesel-VKM) angetrieben wird. Für den Netzbetrieb ist ein zusätzlicher Drehstromantrieb installiert, der den Kältekompressor und die Gebläse über Keilriemen antreibt. Im letzten Fall arbeitet das System mit 230-

bzw. 400-V-Drehstrom, ein- bzw. dreiphasig, bei den üblichen 50 Hz.

Das Kühlsystem wird im Netzbetrieb mit Wechselspannung betrieben und bietet großes Einsparpotential. Die Wahl des Einspeisepunktes am Stromnetz-Drehstromanschluss zwischen (7) und (8) würde die Installation eines zusätzlichen Drehstromgenerators an der LKW-VKM voraussetzen, da die von der PV maximal erzeugbare Energie in den meisten Fällen nicht ausreichen wird das Kühlaggregat zu versorgen.

2.2.2.7. Kühlsystem 7

Das relative alte Kühlsystem 7 wird von Carrier Transicold unter den Produktnamen Maxima R, X2, Vector 1550 und Vector 1950 für die beiden Fahrzeugklassen Transporter und Leicht-LKW vertrieben. Im Vergleich zu den anderen Systemen ist dieses direkt am Sattelaufleger angebracht. Carrier Transicold hat dieses System auf elektrischen Betrieb umgerüstet, siehe Kühlsystem 9, jedoch sind die Produktbezeichnung größtenteils ident geblieben. Deshalb wird in Tabelle 2.2 zwischen den teils gleichen Bezeichnungen mit „alt“ und „neu“ unterschieden [10]. Abbildung 2.15 zeigt den schematischen Aufbau.

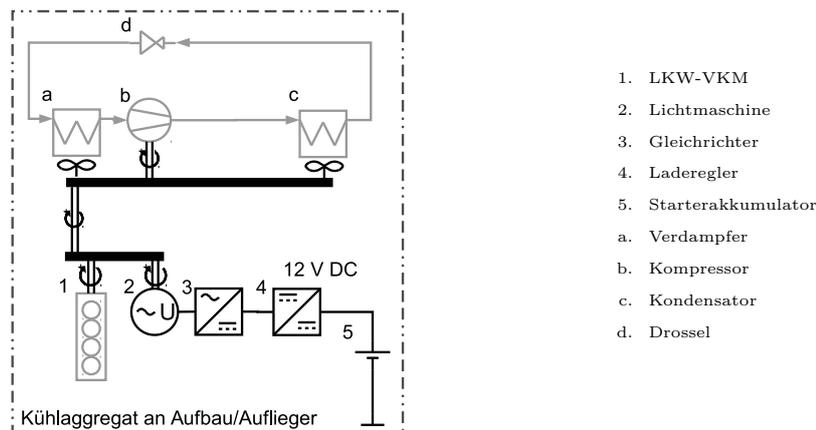


Abbildung 2.15.: Kühlsystem 7: ESB und Legende [10]

Es verfügt nur über einen mechanischen Straßenbetrieb, wobei im Straßenbetrieb alle Komponenten, Kältekompressor und Gebläse, mechanisch von einer integrierten Diesel-VKM angetrieben werden. Da dieses System rein mechanisch betrieben wird, bietet es kein Potential zur Energieeinsparung durch mobile PV-Technologie.

2.2.2.8. Kühlsystem 8

Das hydraulische Kühlsystem 8 wird von Carrier Transicold unter den Produktnamen Supra Z für die beiden Fahrzeugklassen Schwer-LKW und LKW mit Sattelaufleger

vertrieben. Das System wird vorwiegend für den Stadtbetrieb verwendet, da es durch seinen Aufbau im Vergleich zu den mechanischen Systemen relativ leise zu betreiben ist [10]. Abbildung 2.16 zeigt den schematischen Aufbau.

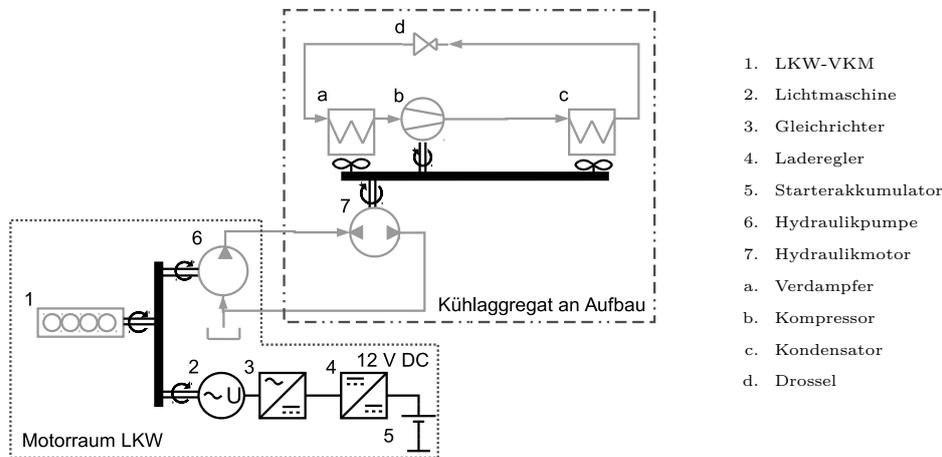
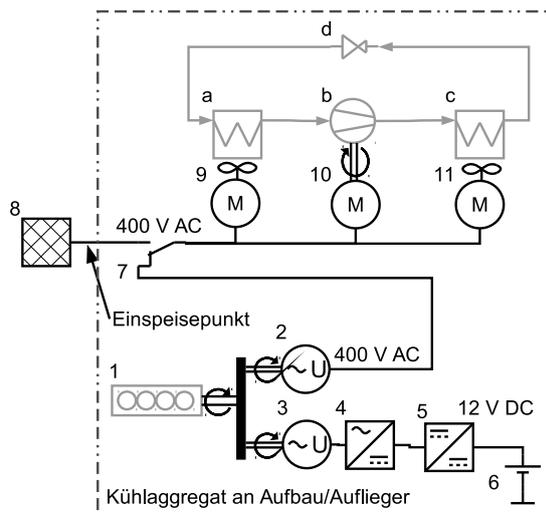


Abbildung 2.16.: Kühlsystem 8: ESB und Legende [10]

Dieses Kühlsystem verfügt nur über einen hydraulischen Straßenbetrieb, wobei im Straßenbetrieb alle Komponenten, Kältekompresseur und Gebläse, hydraulisch angetrieben werden. Die LKW-VKM treibt eine Hydraulikpumpe die mit den jeweiligen Hydraulikmotoren verbunden ist. Lediglich die Steuerung wird vom LKW-Bordnetz versorgt. Da dieses System rein hydraulisch betrieben wird, bietet es kein Potential zur Energieeinsparung durch mobile Photovoltaiktechnologie.

2.2.2.9. Kühlsystem 9

Kühlsystem 9 wird von Carrier Transicold unter den Produktnamen Vector 1550, Vector 1800, Vector 1850 und Vector 1950 und von Frigoblock unter HD-Serie, für die beiden Fahrzeugklassen Schwer-LKW und LKW mit Sattelaufzieger, vertrieben. Die Nennleistung im Netzbetrieb variiert bei den Modellen der HD-Serie zwischen 4,4 kW und 15,3 kW und bei den Vector Modellen zwischen 16 - 23 kW. Im Vergleich zu den anderen Systemen ist dieses direkt am Sattelaufzieger angebracht. Bei Carrier Transicold ist dieses Kühlsystem eine Weiterentwicklung des Kühlsystems 7, jedoch sind die Produktbezeichnung größtenteils ident geblieben. Deshalb wird in Abbildung 2.2 zwischen den teils gleichen Bezeichnungen mit „alt“ und „neu“ unterschieden [10] [12]. Abbildung 2.17 zeigt den schematischen Aufbau.



- | | | |
|-----------------------|------------------------------------|----------------|
| 1. Diesel-VKM | 7. Betriebsmodi-Schalter | a. Verdampfer |
| 2. Drehstromgenerator | 8. Stromnetz 400 V AC 50 Hz | b. Kompressor |
| 3. Lichtmaschine | 9. Drehstrommotor Verdampfer | c. Kondensator |
| 4. Gleichrichter | 10. Drehstrommotor Kältekompressor | d. Drossel |
| 5. Laderegler | 11. Drehstrommotor Kondensator | |
| 6. Starterakkumulator | | |

Betriebsmodi	Straßenbetrieb ⚡ Netzbetrieb ⚡
Kühlsystemfrequenz	Straßenbetrieb $f(n_{VKM}) = \text{konst (2 Drehzahlen)}$ Netzbetrieb $f(f_{Netz}) = 50 \text{ Hz}$
Generatortyp	Synchronmaschine
Fahrzeug	🚚
Fläche	35 m ²
PV-Leistung	5,6 kW
Type	Frigoblock HD-Serie (HD25)
Kühlaggregatleistg.	4,4 - 15,3 kW
Type	Carrier Vector (1550-1950)
Generatorleistg.	16 - 23 kW

Abbildung 2.17.: Kühlsystem 9: ESB, technische Daten, Einsatzbereich und Legende [10] [12]

Dieses Kühlsystem verfügt über die beiden möglichen Betriebsarten elektrischer Straßenbetrieb sowie Netzbetrieb. Die Antriebe des Kühlsystems für, den Verdichter oder Kältekompressor, das Verdampfergebläse, und das Kondensatorgebläse, werden dreiphasig mit 400-V-Drehstrom betrieben. Die benötigte Energie wird im elektrischen Straßenbetrieb von einem Synchrongenerator, der von einer integrierten Diesel-VKM angetrieben wird, bereitgestellt. Dafür wird ein Synchrongenerator mit Erregerspannungssteuerung verwendet. Im Netzbetrieb stellt das öffentliche Netz diese Energie zur Verfügung. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Speisefrequenz im elektrischen Straßenbetrieb variieren kann, jedoch im Netzbetrieb die üblichen 50 Hz besitzt.

Das Kühlsystem wird im Netzbetrieb mit Wechselspannung betrieben und bietet großes Einsparpotential. Die Wahl des Einspeisepunktes am Drehstromanschluss für den Netzbetrieb (8) würde die Installation eines zusätzlichen Drehstromgenerators an der LKW-VKM voraussetzen, da die von der PV maximal erzeugbare Energie in den meisten Fällen nicht ausreichen wird das Kühlaggregat zu versorgen. Eine direkte Einspeisung in das Insystem des Synchrongenerators (2), ist aus garantierechtlichen Gründen nicht zu empfehlen.

2.2.2.10. Kühlsystem 10

Kühlsystem 10 ist ein eutektisches Kältespeichersystem. Es wird von den Unternehmen Frigoblock und Carrier Transicold unter der Produktbezeichnung Vatna für die beiden Fahrzeugklassen Mittelschwerer-LKW und Schwer-LKW nur vereinzelt für die Tiefkühllogistik vertrieben [10] [12].

Da die Tiefkühlspeicher stationär aufgeladen werden müssen, ist der Einsatz von Photovoltaiktechnologie am LKW hier nicht zweckmäßig. Deshalb und auf Grund der geringen Verbreitung wird hier nicht weiter darauf eingegangen. Für die Funktion der Technologie, siehe auch Abschnitt 2.2.1.2.

2.2.2.11. Kühlsystem 11

Kühlsystem 11 beruht auf der CO₂ Technologie und wird von Ingersol Rand (Thermo King) als Cryotech, für die drei Fahrzeugklassen Mittelschwerer-LKW und Schwer-LKW, sowie LKW mit Sattelaufzieger, seit 2013 vertrieben [13]. Abbildung 2.18 zeigt den schematischen Aufbau.

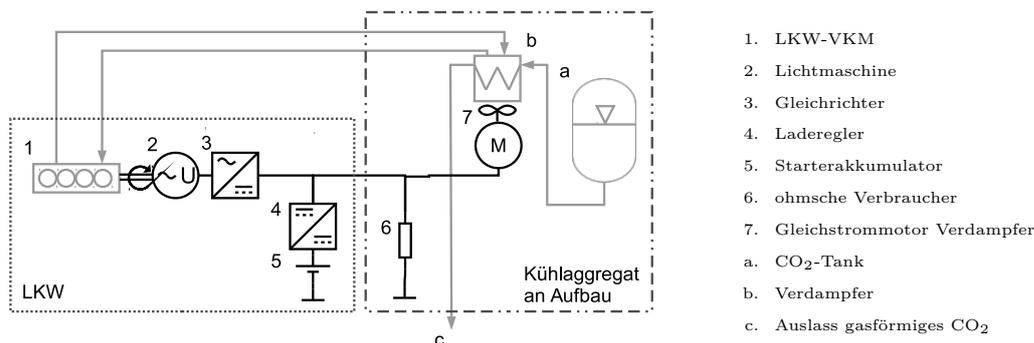


Abbildung 2.18.: Kühlsystem 11: ESB und Legende eines CO₂-Kühlsystem [13]

Dieses System verfügt nur die Betriebsart chemischer Straßenbetrieb, wobei flüssiges CO₂ aus einem Tank den Laderaum kühlt. Das CO₂ wird über einen Wärmetauscher geleitet und gelangt so nie mit der Ware im Laderaum in Berührung. Elektrische Energie wird nur für das Steuermodul verwendet. Die Temperaturregelung erfolgt unter zur Hilfenahme des warmen Kühlwasserrücklaufes der LKW-VKM oder einer integrierten Dieselheizung (Sattelaufzieger).

Da dieses System großteils chemisch betrieben wird, bietet es kein Potential zur Energieeinsparung durch die Aufrüstung mit Photovoltaiktechnologie.

2.2.3. Bewertung des technologischen Potentials

Insgesamt sind sechs von elf eingesetzten Kühlsystemen mit der Photovoltaiktechnologie kompatibel, wobei 3 davon nur eingeschränkt kompatibel sind. Tabelle 2.3 zeigt welches Kühlsystem mit der Photovoltaiktechnologie kompatibel ist, oder ob weitere Maßnahmen notwendig sind.

Tabelle 2.3.: Kompatibilität der Kühlsysteme zur Photovoltaiktechnologie

Kühlsystem	Kompatibilität	zusätzliche Maßnahmen
1	vollständig	keine
2	vollständig	keine
3	vollständig	keine
4	nicht	nicht elektrisch betrieben
5	eingeschränkt	Installation Drehstromgenerator
6	eingeschränkt	Installation Drehstromgenerator
7	nicht	nicht elektrisch betrieben
8	nicht	nicht elektrisch betrieben
9	eingeschränkt	Installation Drehstromgenerator
10	nicht	nicht elektrisch betrieben
11	nicht	nicht elektrisch betrieben

Die Nutzung elektrischer Energie als Antriebsenergie für die Kühlaggregate stellt einen wesentlichen Gesichtspunkt für die Auswahl der geeigneten Kühlsysteme dar, die Kühlsysteme 4, 7, 8, 10 und 11 werden nicht elektrisch betrieben und sind somit nicht kompatibel. Vollständig kompatibel mit der Photovoltaiktechnologie sind die Kühlsysteme 1 - 3, wobei keine weiteren spezielle Maßnahmen für die Kompatibilität notwendig sind. Damit die Kühlsysteme 5, 6 und 9 betriebssicher, d.h. die Kühlleistung zu gewährleisten, kompatibel sind bedingt es der Installation eines zusätzlichen Drehstromgenerators. Genauere Begründungen zur Kompatibilität findet man in den Unterabschnitten 2.2.2.1 bis 2.2.2.11 zuvor.

2.3. Energietechnisches Potential und monetäre Betrachtung der Kühltransporte

Die Ermittlung des energietechnischen Potentials ermöglicht einen ersten Eindruck über die Relevanz von Energieeinsparmaßnahmen in diesem Wirtschaftssektor zu erhalten. Zusätzlich zeigt die monetäre Bewertung den wirtschaftlichen Mehrwert auf.

Anhand von aufgezeichneten streckenspezifischen Kühltransportprofilen eines großen österreichischen Lebensmittelkonzerns wird der Energieverbrauch der Kühltransporte ermittelt. In diesen Profilen ist der Geschwindigkeitsverlauf des LKW und Temperaturverlauf des Kühlaggregates über die Dauer des Kühltransports aufgetragen [20].

Zur Ermittlung des Energieverbrauchs des Kühlaggregates ist es notwendig über dessen Betriebsverhalten Bescheid zu wissen. Der Großteil der derzeit eingesetzten Kühlaggregate verwendet Zweipunktregler zur Temperaturregelung. Das jeweilige Kühlaggregat wird nach Unterschreiten einer gewissen unteren Temperaturgrenze ausgeschaltet und bei Überschreiten einer gewissen oberen Temperaturgrenze wieder eingeschaltet. Vereinzelt verwenden Kühlaggregate zwei verschiedene Drehzahlen zur feineren Temperaturregelung. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass das Kühlaggregat entweder ganz ausgeschaltet ist, oder mit voller Nennleistung betrieben wird, aber keine feinere Temperaturregelung erfolgt. Gekühlt wird nur während der Fahrt. Am Stand läuft das Kühlaggregat in der Regel nicht. Die Berechnung des Energieverbrauchs für das Kühlaggregat erfolgt nach Gleichung (2.2).

$$E_{KA} = P_{Nenn,el} \cdot t_{Transport} \cdot \Delta_{Ein} \quad (2.2)$$

Die Einschaltdauer des Kühlaggregates t_{Kuehl} in Relation zur Transportdauer $t_{Transport}$ wird als Einschaltverhältnis Δ_{Ein} bezeichnet. Es stellt die zentrale Größe zur Bestimmung des Energieverbrauchs dar und wird aus den Transportprofilen ermittelt. Nachfolgend wird zwischen den Transportdistanzen

- Nah-,
- Regional- und
- Ferntransport

unterschieden. Der Nahtransport deckt mit nahezu allen sechs Fahrzeugklassen den Gütertransport im Stadt- oder Gemeindebereich ab. Für den regionalen Interstadt- oder

Intergemeindetransport werden meist effizientere Fahrzeuge, wie Leicht-LKW bis LKW mit Sattelaufleger verwendet. Im Ferntransport kommen für weite Strecken zwischen Städten oder sogar Ländern fast ausschließlich Schwer-LKW und LKW mit Sattelaufleger zur Anwendung. Abbildung 2.19 stellt ein typisches Nahtransportprofil eines Kühl-LKW dar.

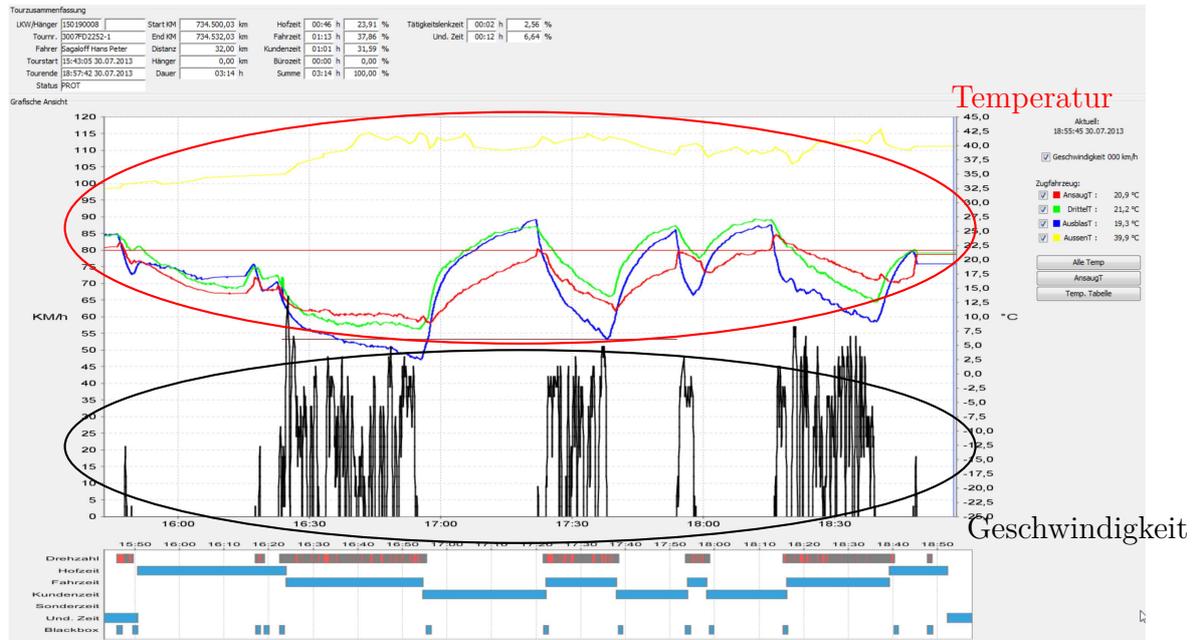


Abbildung 2.19.: Typisches Nahtransportprofil eines Kühl-LKW (Temperaturverlauf in Rot und Geschwindigkeitsverlauf in Schwarz über die Zeit aufgetragen) [20]

Das Einschaltverhältnis Δ_{Ein} wird mit Gleichung (2.3) beispielhaft für das Nahtransportprofil errechnet. Zu beachten ist, dass die Hofzeit t_{Hof} nicht zur Transportdauer $t_{Transport}$ gezählt wird und muss von der Gesamtzeit t_{Gesamt} abgezogen werden. Als Hofzeit wird die Verweildauer des LKW im Verladehof des Transportunternehmens bezeichnet.

$$\Delta_{Ein} = \frac{t_{Kuehl}}{t_{Transport}} = \frac{t_{Fahr}}{t_{Gesamt} - t_{Hof}} = \frac{73 \text{ min}}{194 \text{ min} - 46 \text{ min}} \approx 0,5 = \underline{\underline{50\%}} \quad (2.3)$$

Das Einschaltverhältnis für das Regionaltransportprofil wurde analog zu Gleichung (2.3) errechnet und weiter unten im Abschnitt 2.3.2 verwendet. Das Einschaltverhältnis für das Ferntransportprofil ist gleich dem des Regionaltransportprofil. Für das weitere Verständnis, sind die Diagramme der Transportprofile nicht weiter von Bedeutung, das Diagramm für das Regionaltransportprofil ist in den Abbildung A.1 im Anhang A zu finden. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit der Parameter, werden folgende Annahmen für die Transportprofile getätigt:

- LKW mit Sattelaufzieger (Abgasnorm EURO 5)
- Kühlaggregat mit Kühlsystem 1 (Nennleistung $P_{Gen,el} = 15,3$ kW)
- Durchschnittlicher Generatorwirkungsgrad $\eta_{Gen} = 50$ % (siehe Abschnitt 4.1.1)
- Dieseldichte bei 25°C $\rho_{Diesel} = 835$ g/l
- Kraftstoffpreis $k_{Diesel} = 1,38$ €/l [21]

Folgende streckenspezifische Parameter unterscheiden sich je nach Transportprofil:

- Synthetisches Fahrprofil VECTO 1.3.1.1 [22]
- LKW-spezifische Parameter
 - spezifischer Verbrauch c_{VKM} [g/kWh]
 - Basisverbrauch $V_{Diesel,Basis}$ [l]
 - Beladung m_{ges} [t]

LKW-spezifische Parameter entstammen einer Simulation mit einem synthetischem Fahrprofil passend zum jeweiligem Transportprofil. Die Simulation wurde vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Graz zur Verfügung gestellt [22]. Das synthetische Fahrprofil VECTO 1.3.1.1 für das Nahtransportprofil ist in Abbildung 2.20 dargestellt. Dabei ist der Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf über die Simulationsdauer aufgetragen. Die synthetischen Profile für die anderen Transportdistanzen sind im Anhang in den Abbildungen A.2 und A.3 zu sehen.

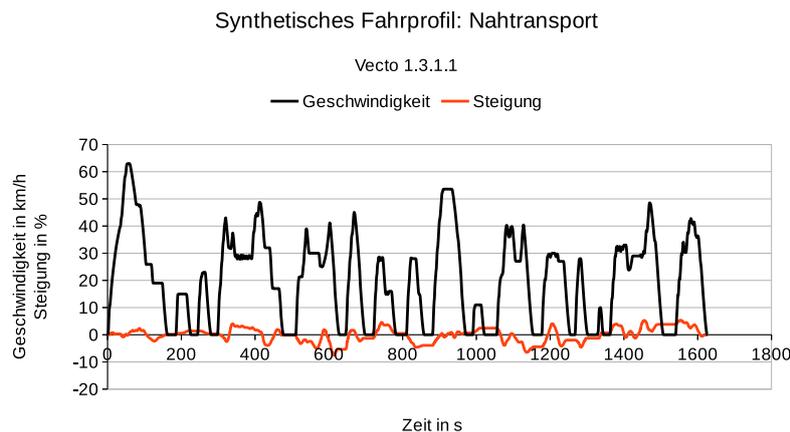


Abbildung 2.20.: Synthetische Fahrprofil VECTO 1.3.1.1 Nahtransport mit Geschwindigkeitsverlauf in Schwarz und Steigungsverlauf in Rot [22]

Der Kraftstoffverbrauch wird generell von der Leistung an der LKW-VKM-Welle bestimmt. Die Leistung an der LKW-VKM-Welle wird von folgenden Parametern beeinflusst [23]:

- Fahrbahnsteigung
- Luftwiderstand
- Rollwiderstand
- Beschleunigung
- Getriebeverluste
- Leistung der Nebenaggregate

Für diese Betrachtungen konzentriert man sich lediglich auf den zusätzlichen Kraftstoffverbrauch, hervorgerufen von Nebenaggregate, wie Klimaanlage, Lichtanlage, Kühlaggregat. Die von den elektrisch betriebenen Nebenaggregaten geforderte Leistung erzeugt bei einer bestimmten Drehzahl ein Lastmoment an der LiMa oder am zusätzlichen Synchrongenerator, wie er für große Kühlaggregate eingesetzt wird, und belastet dadurch die LKW-VKM. Mit Gleichung (2.4) kann der zusätzliche Kraftstoffverbrauch berechnet werden. Im angefügten Zahlenwertbeispiel wird der zusätzliche Kraftstoffverbrauch pro Stunde für das Nahtransportprofil ermittelt.

$$\begin{aligned}
 V_{Diesel,zus.} &= \frac{E_{Gen,el} \cdot c_{VKM}}{\eta_{Gen} \cdot \rho_{Diesel}} = \frac{P_{Gen,el} \cdot t_{Transport} \cdot \Delta_{Ein} \cdot c_{VKM}}{\eta_{Gen} \cdot \rho_{Diesel}} & (2.4) \\
 &= \frac{(15,3 \text{ kW}) \cdot 1 \text{ h} \cdot 0,5 \cdot 205 \text{ g/kWh}}{0,5 \cdot 835 \text{ g/l}} = \underline{\underline{3,8 \text{ l}} [\text{pro Stunde}]}
 \end{aligned}$$

Die anfallenden Kosten wurden auf Basis eines durchschnittlichen europäischen Dieselpreis von 1,38 €/l [21] errechnet, laut AvD (Automobilclub von Deutschland) Stand 14.2.2014. Bei der Kostenbewertung wurden Maut- und Abnutzung außer Acht gelassen. Darüber hinaus handelt es sich bei den Kraftstoffpreisen um Endverbraucherpreise. Gleichung (2.5) ermittelt beispielhaft für den Nahverkehr die zusätzlichen Kraftstoffkosten pro Stunde.

$$K_{Diesel,zus.} = V_{Diesel,zus.} \cdot k_{Diesel} = 3,8 \text{ l} \cdot 1,38 \text{ €/l} = \underline{\underline{5,2 \text{ €}}} [\text{pro Stunde}] \quad (2.5)$$

Das Verhältnis aus zusätzlichem Kraftstoffverbrauch $V_{Diesel,zus.}$ und durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch des LKW $V_{Diesel,Basis}$ kann als relativer Mehrverbrauch bezeichnet und als theoretisches Einsparpotential angesehen werden. Aus der Simulation vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Graz beträgt der

durchschnittliche Kraftstoffverbrauch für das synthetische Nahtransportprofil ca. 40 l/100 km, bei einer Fahrdauer von 3,44 h/100 km sind das 11,5 l/h [22]. Gleichung (2.6) zeigt die Berechnung des Mehrverbrauchs.

$$V_{Diesel,rel.} = \frac{V_{Diesel,zus.}}{V_{Diesel,Basis}} = \frac{3,8\text{ l/h}}{11,5\text{ l/h}} \hat{=} \underline{\underline{32,4\%}} \quad (2.6)$$

2.3.1. Nahtransport

Charakteristisch für den Nahtransport sind kurze Wege mit vielen Zwischenstops, was in einem hohen Einschaltverhältnis resultiert. Die Werte aus der energetische Betrachtung sind in Tabelle 2.4 dargestellt.

Tabelle 2.4.: Energieverbrauch & Kosten des Nahtransports [22]

Ausgangsszenario: Nahtransport		
LKW (Sattelzug)	EURO 5; $m_{ges} = 27\text{ t}$	
Kühlaggregatnennleistung $P_{Nenn,el}$	15,3 kW	
Einschaltverhältnis	50 %	
Ergebnisse:	Energieverbrauch	Kosten
Kraftstoffverbrauch LKW [21] [22]	11,5 l/h $\hat{=} 40\text{ l}/100\text{ km}$	16 €/h
Kraftstoffverbrauch Kühlaggregat	3,8 l/h $\hat{=} 7,7\text{ kWh}_{el}$	5,2 €/h
relativer Mehrverbrauch	32,4 %	

Aus der Simulation vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Graz ergibt sich ein durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch des LKW von 11,5 l/h ($\hat{=} 40\text{ l}/100\text{ km}$) [22]. Das Einschaltverhältnis für Nahtransporte wurde mit 50 % errechnet (Gleichung (2.3)). Der Energieverbrauch des Kühlaggregates beträgt 7,7 kWh_{el} (Gleichung (2.4)) und der Kraftstoffverbrauch 3,8 l/h (Gleichung (2.4)), dies steht den Kosten von 5,2 €/h (Gleichung (2.5)) gegenüber. Dadurch ergibt sich ein relativer Mehrverbrauch von 32,4 %.

2.3.2. Regionaltransport

Lange Wege mit wenigen Zwischenstops sind für den Regionaltransport charakteristisch. Somit wird hier ein ermitteltes Einschaltverhältnis von 33 % angenommen. Bei der Berechnung des Energieverbrauchs bzw. Kraftstoffverbrauchs geht man analog wie in Abschnitt 2.3.1 (Nahtransport) vor. Die Werte aus der energetische Betrachtung sind in Tabelle 2.5 dargestellt.

Tabelle 2.5.: Energieverbrauch & Kosten des Regionaltransports [22]

Ausgangsszenario: Regionaltransport			
LKW (Sattelzug)	EURO 5; $m_{ges} = 27 t$		
Kühlaggregatnennleistung $P_{Nenn,el}$	15,3 kW		
Einschaltverhältnis	33 %		
Ergebnisse:	Energieverbrauch		Kosten
Kraftstoffverbrauch LKW [21] [22]	19 l/h	$\hat{=} 33 \text{ l}/100 \text{ km}$	26 €/h
Kraftstoffverbrauch Kühlaggregat	2,5 l/h	$\hat{=} 7,7 \text{ kWh}_{el}$	3,3 €/h
relativer Mehrverbrauch	12,8 %		

Der relative Mehrverbrauch von 12,8 % liegt auf Grund des niedrigen Einschaltverhältnisses deutlich unter dem des Nahtransportprofils.

2.3.3. Ferntransport

Lange Wege und keine Zwischenstops sind für den Ferntransport charakteristisch. Auf Grund der fehlenden Daten von Ferntransportunternehmen wird hier angenommen, dass das Einschaltverhältnis gleich dem des Regionaltransports ist. In der Realität kann dieser Wert aber durchaus geringer sein. Der Ferntransport verfügt über ein etwas erhöhtes Gesamtgewicht von $m_{ges} = 33 t$. Die Berechnungen erfolgen analog Abschnitt 2.3.1 (Nahtransport). Die Werte aus der energetische Betrachtung sind in Tabelle 2.5 dargestellt.

Tabelle 2.6.: Energieverbrauch & Kosten des Ferntransports [22]

Ausgangsszenario: Ferntransport			
LKW (Sattelzug)	EURO 5; $m_{ges} = 33 t$		
Kühlaggregatnennleistung $P_{Nenn,el}$	15,3 kW		
Einschaltverhältnis	33 %		
Ergebnisse:	Energieverbrauch		Kosten
Kraftstoffverbrauch LKW [21] [22]	25 l/h	$\hat{=} 34,5 \text{ l}/100 \text{ km}$	34,5 €/h
Kraftstoffverbrauch Kühlaggregat	2,5 l/h	$\hat{=} 7,7 \text{ kWh}_{el}$	3,3 €/h
relativer Mehrverbrauch	9,7 %		

Mit 9,7 % stellt der relative Mehrverbrauch den niedrigsten Wert im Vergleich zu den beiden anderen Profilen dar.

2.4. Entwicklungsszenarien

In diesem Abschnitt werden Entwicklungen betrachtet, die direkte Auswirkungen für den Gütertransport haben. Es wird auf Entwicklungen in den drei Bereichen, Politik, Wirtschaft und Umwelt, im Zusammenhang mit dem Güterverkehr, eingegangen.

Zuerst werden im Bereich Politik (Abschnitt 2.4.1) die sich ändernden politischen Rahmenbedingungen analysiert. Im zweiten Teil, dem Bereich Wirtschaft (Abschnitt 2.4.2), betrachtet man die Kostenentwicklung im Transportsektor. Zuletzt geht man im Bereich Umwelt (Abschnitt 2.4.3) auf die ökologischen Einflüsse des Transportsektors ein. Zusätzlich werden in den Abschnitten Trendanalysen durchgeführt.

2.4.1. Politische Entwicklung

Die Europäische Kommission hat mit Marco Polo ein Programm gestartet, um den Straßengütertransport auf emissionsärmere und energieeffizientere Verkehrs- oder Transportmittel, wie Schiff oder Bahn, als den LKW zu verschieben [24]. Die gänzliche Verdrängung des Gütertransports auf andere Verkehrsmittel ist nicht durchführbar, denn der letzte Kilometer, ist nur mit dem LKW oder PKW transporttechnisch zu erschließen. Es wird deshalb ein Mix von mehreren Verkehrsmittel, wie Bahn, Schiff, LKW am Gütertransport beteiligt sein. Man spricht in diesem Zusammenhang vom intermodalem Transport. Dieser Mix von Transportmittel soll durchaus auf einigen Strecken im Vergleich zum LKW-Transport wettbewerbsfähig sein. Eine Studie bezweifelt jedoch die Umweltfreundlichkeit und Energieeffizienz des intermodalen Transports. Sie kommt zum Schluss, dass Intermodaler Verkehr nicht von Natur aus umweltfreundlicher, noch effizienter als Straßengütertransport ist [25].

2.4.2. Wirtschaftliche Entwicklung

Der Wettbewerb zwischen den Transportunternehmen ist groß, der Preisdruck ist enorm. Die Kosten für den Transport werden in der vorliegenden Studie in €/t verglichen [26]. Die niedrigsten Kosten pro transportierter Tonne können in Bulgarien und Lettland mit 5,10 € und 5,70 €, die höchsten in Dänemark und Schweden mit 18,88 € und 18,96 €, gefunden werden. Die extreme Variation kann durch die niedrigen Personalkosten in Osteuropa, welche einen Großteil der Transportkosten ausmachen, erklärt werden. In Osteuropa machen die Kraftstoffkosten rund ein Viertel der Kosten aus. Im Vergleich dazu sind es in den westeuropäischen Ländern nur um die 10 % (Stand 2006) [26].

Entscheidet sich ein Transportunternehmen sein Geschäft in einem gewissen Land zu betreiben, ist es, an die vorherrschenden Lohnstandards gebunden; die Fixkosten für Verwaltung sind ohnedies gering zu halten. Das bedeutet die einzige Möglichkeit zur Kostenreduktion ist die Effizienzsteigerung und Kraftstoffreduktion der Fahrzeugflotte. Abbildung 2.21 zeigt die Dieselpreisentwicklung der letzten Jahre (1996 - 2014) in Schwarz und eine Trendgerade für die nächsten 10 Jahre in Rot.

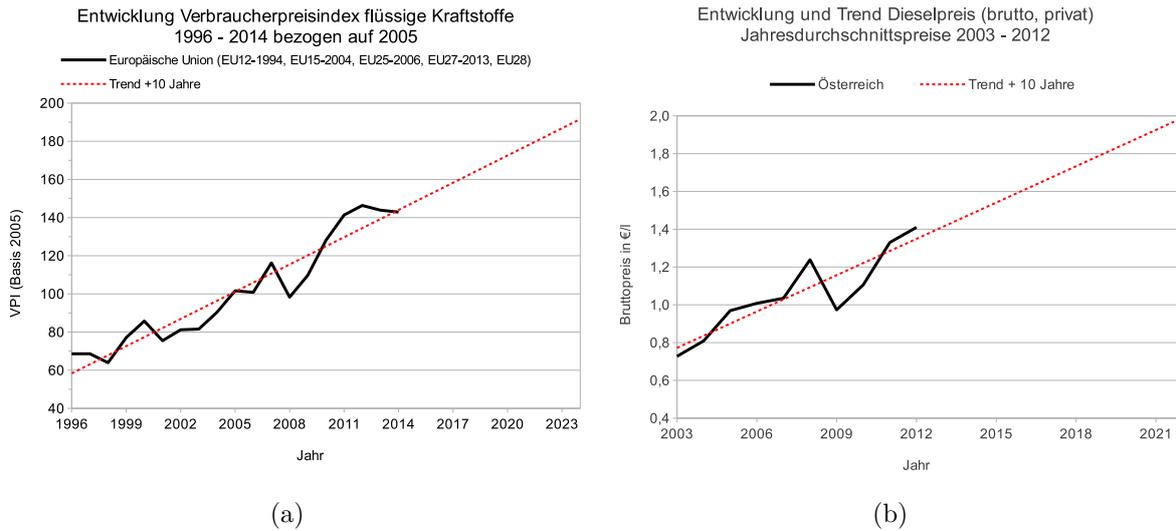


Abbildung 2.21.: Entwicklung und Trend für 10 Jahre (a) Verbraucherpreisindex (VPI) flüssiger Kraftstoffe in EU [7]; (b) Dieselpreis in Österreich [€/l] [27]

Diagramm (a) in Abbildung 2.21 zeigt die Entwicklung des Verbraucherpreisindex von flüssigen Kraftstoffen in Europa und Diagramm (b) jene der Dieselpreise in Österreich. Eine Trendanalyse für die nächsten 10 Jahre zeigt eine Verdopplung der Preise bezogen auf das Jahr 2005. In einem Interview zur Studie der deutschen Organisation Energy Watch Group im Jahr 2013 prognostizierte der Hauptautor Werner Zittel einen Anstieg der Kraftstoffpreise auf 2 €/l schon in den nächsten 5 Jahren [28].

2.4.3. Ökologische Entwicklung

Innerhalb der Europäische Union (EU) ist man seit Jahren darauf die Treibhausgasemissionen zu senken. Schon im Januar 2007 wurden einige Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Transportsektor von der Europäischen Kommission vorgeschlagen [2]. In der Strategie Europa 2020 hat man in den 20-20-20-Klimaschutzziele vereinbart die Treibhausgasemissionen bis 2020 um mindestens 20 % zu reduzieren [3]. Die daraus

abgeleiteten Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele greifen in alle Treibhausgas emittierende Wirtschaftssektoren ein.

In Abbildung 2.22 ist die Entwicklung der Treibhausgasemissionen über mehrere Jahre (1990 - 2011) nach Wirtschaftssektoren innerhalb der EU27-Länder dargestellt. Zudem werden jeweils in strich-punktierten Linien die erwarteten Trends bis zum Jahr 2020 projiziert.

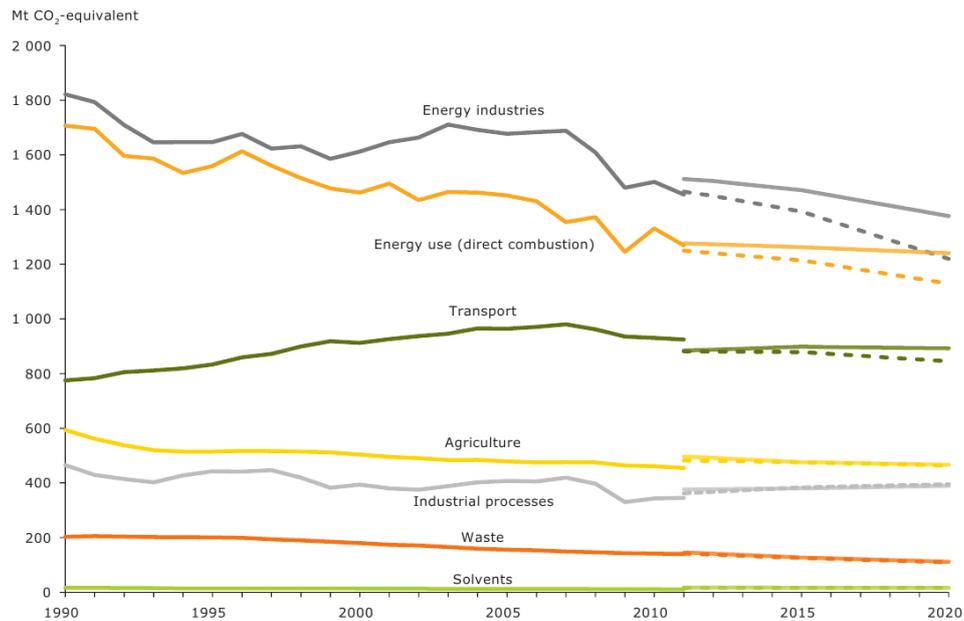


Abbildung 2.22.: Entwicklung und Trend bis 2020 Treibhausgasemissionen nach Sektoren in EU [Mt CO₂-äquivalent] [4]

Die Emissionen im Transportsektor machen gut ein viertel aller Treibhausgasemissionen innerhalb der EU aus, wobei jene im Straßentransport den größten Teil verursachen [4]. Trotz Anstrengungen seitens der Automobilindustrie die gesetzlich festgelegten kilometerbezogenen Emissionen zu reduzieren, werden nur marginale Rückgänge erwartet.

2.5. Alternative Möglichkeiten für Kühltransporte

Wie im Abschnitt 2.4 aufgezeigt, geht der Trend klar Richtung Vermeidung von Treibhausgasemissionen. Nicht immer wirken sich die gebotenen Möglichkeiten wettbewerbsfördernd für den Transportunternehmer aus. Welche Alternativen für Transportunternehmen, im Speziellen Kühltransporte, aktuell am Markt sind und in Zukunft sein werden, wird hier in den Abschnitten 2.5.1 und 2.5.2 kompakt zusammengefasst.

2.5.1. Neue Antriebe für Nutzfahrzeuge

Mit einigen Jahren Verzögerung wurde die Hybridantriebstechnik auch im Transportbereich eingeführt. Namhafte Hersteller, wie die Firma Bosch [29] und Siemens [30] haben verschiedene Antriebssysteme im Programm. Einer der ersten LKW-Hersteller die einen LKW mit Hybridantriebstechnik realisierten war IVECO. Verbrauchertests zufolge ist dieses Antriebslösung für die Transportunternehmer noch nicht rentabel [31].

Anstatt über teure Energiespeicher die elektrische Energie für den Antrieb bereitzustellen, denkt Siemens einen Schritt weiter. Mit ihrem ehrgeizig verfolgtem eHighway-Projekt wollen sie dieses Nadelöhr umgehen und Autobahnen mit Hochspannungsoberleitungen ausstatten. Ein Fern-LKW ist mit einem elektrischen Antrieb ausgerüstet. Im Nah- und Regionalverkehr wird die Energie von einem Generator der von einer effizient VKM betrieben wird geliefert, sobald der LKW auf den eHighway auffährt, verbindet er sich mit dem Oberleitungsnetz. Der elektrische Antrieb wird ab dann von der Oberleitung gespeist und die VKM kann abgeschaltet werden. Erste Alltags- und Sicherheitstests sind viel versprechend, bis zur Markteinführung wird es aber noch einige Zeit dauern [32].

2.5.2. Alternative Energieerzeuger für Kühlaggregate

Nicht nur für den Fahrzeugantrieb sind neue Innovationen entstanden, auch im Kühltransportbereich sind neue Entwicklungen aufgekommen und etablieren sich immer mehr. Das Unternehmen Frigoblock war eines der ersten überhaupt, die elektrisch betriebene Kühlaggregate bauen. Ihre lang erprobte und energie-sparsame Drehstromgenerator-Technologie ist bei vielen Transportunternehmen und Supermarktketten sehr beliebt. Der Drehstromgenerator ist mit der Fahrzeug-VKM gekoppelt und liefert die von dem Kühlaggregat benötigte Energie schon bei geringer Drehzahl der Fahrzeug-VKM, siehe auch Abschnitt 2.2.2.1. Die jüngste Weiterentwicklung dieser Technologie, welche nun

auch von anderen Kühlaggregat-Hersteller angeboten wird, integriert einen Frequenzrichter zur stufenlosen Leistungsregelung der Kühlaggregatantriebe und somit auch zur stufenlosen Temperaturregelung, bei gleichzeitiger Kraftstoffeinsparung, siehe auch Abschnitt 2.2.2.2. Beide haben bereits eine hohe Marktdurchdringung im Nah- und Regionaltransport und setzen sich immer mehr durch [12].

Der amerikanische Technologiekonzern Ingersol Rand hat mit seiner Marke Thermo King die CO₂-Kühltechnologie, siehe auch Abschnitt 2.2.2.11, in den europäischen Markt unter dem Namen Cryotech eingeführt. Dieses System kommt gänzlich ohne elektrischer Energie zur K lterzeugung aus, hat jedoch den Nachteil, dass der CO₂-Tank nur eine begrenzte Reichweite zulässt und wird deshalb nur im Nahtransport eingesetzt [13].

Mit dem steigendem Modulwirkungsgrad und sinkenden Produktionskosten zeigt sich die Photovoltaiktechnologie zunehmend im mobilen Sektor auf allen Ebenen. Neben einiger Versuche einzelne Automobile gänzlich mit der Kraft der Sonne zu antreiben, befassen sich andere Versuche damit die Photovoltaiktechnologie mit aktuellen KFZ-Technologien zu verbinden [33]. Studien beschreiben bereits den Einsatz der Photovoltaiktechnologie zur Treibstoffreduktion für LKW [34] [35]. Die vom Photovoltaiksystem umgewandelte elektrische Energie wird dazu verwendet, den Kraftstoffmehrerverbrauch von Nebenaggregate, wie Radio, Klimaanlage, usw. zu kompensieren oder zumindest zu mindern. Diese Energie müsste ansonsten von der LiMa aufgebracht werden müsste. Der niedrige Gleichzeitigkeitsfaktor dieser Nebenaggregate bietet aber nur geringes Potential zur Kraftstoffeinsparung für herkommliche LKW. Kühlaggregate für den mobilen K hltransport bieten, mit ihren relativ hohen Nennleistungen, großes Potential. Ein Konsortium, bestehend aus den deutschen Unternehmen Solarion, Krone und Carrier präsentiert 2010 bereits einen ersten Prototypen dazu [6]. Keines der gezeigten Systeme ist zum derzeitigen Stand am Markt erhältlich. Das  sterreichische PV-Technologie-Unternehmen Sunplugged GmbH bietet ebenfalls PV-Lösungen für LKW an, hat jedoch keine Referenzfotos oder Pressemitteilungen für einen Prototypen veröffentlicht, um auf eine gute Annahme der Technologie am Markt schließen zu können [36].

Wie Abschnitt 2.2.2 bereits zeigte, sind die am Markt befindlichen K hlssysteme teilweise bzw. eingeschränkt mit der Photovoltaiktechnologie kompatibel. Die technische Machbarkeit wird in Kapitel 3 untersucht und in Kapitel 4 die Wirtschaftlichkeit überprüft.

3. Technische und rechtliche Machbarkeit

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Überprüfung der technischen und rechtlichen Machbarkeit. Das Resultat sind Konzepte zur Verwendung von Photovoltaik- Energieerzeugungsanlagen zur Energieeinsparung im gekühlten Straßengütertransport (Kühl-LKW).

Abschnitt 3.1 dient zur Optimierung der Transportstreckenführung. Die verschiedenen Photovoltaikmodul-Technologien werden in Abschnitt 3.2 aufgezeigt und die geeignete ausgewählt. Die Konzepte werden in Abschnitt 3.3 dargestellt. Zuletzt werden in Abschnitt 3.4 die rechtlichen Realisierungsbedingungen überprüft und Lösungswege genannt.

3.1. Elektrotechnische Messung und Optimierung

Die Optimierung der Transportstreckenführung wird in Hinblick auf die maximale Ertragslage der Photovoltaikanlage ausgelegt. Die Datengewinnung wird ebenfalls zur Überprüfung des berechneten zusätzlichen Kraftstoffverbrauchs durchgeführt. Diese Messung ist nur unter realen Bedingungen und am besten gemeinsam mit dem Kunden, z.B. mit einem Transportunternehmen, durchzuführen. Im Rahmen dieser Masterarbeit ist eine Durchführung zum gegenwärtigen Zeitpunkt aus den genannten Gründen daher nicht sinnvoll. Es wird ein grundlegendes technisches Konzept und ein Messkonzept zur Bestimmung wichtiger Parameter zur Einbindung der Photovoltaiktechnologie erarbeitet. Zur Optimierung der Transportstreckenführung sind folgende Parameter zu messen und mit einem digitalen Datenaufzeichnungsgerät, kurz Datalogger, auszuwerten:

- Kühlaggregatleistung P_{KA}
- Globalstrahlung P_{Global} und Verschattung
- Zusätzlicher Kraftstoffverbrauch $V_{Diesel,zus.}$

- Geographische Lage und Ausrichtung
- Uhrzeit

Abbildung 3.1 zeigt eine Übersicht über das Messkonzept zur Messung der genannten Parameter.

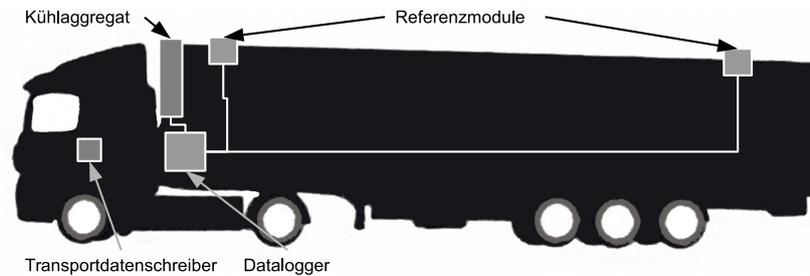


Abbildung 3.1.: Übersicht des Messkonzepts zur Transportroutenoptimierung

Die Messung sollte möglichst betriebsstörungsfrei durchgeführt werden, d.h. die Anbringung der Messgeräte darf den Transportvorgang nicht beeinträchtigen. Um auf die Verschattung der für die PV-Module zur Verfügung stehenden Fläche während des Transports zu ermitteln, sind die beiden Referenz-Photovoltaikmodule diagonal gegenüber, jeweils vorne und hinten an der Sattelanhänger-Dachfläche anzubringen. Der Datalogger ist zur Auswertung der Messdaten leicht zugänglich anzubringen. Abbildung 3.2 zeigt das dazugehörige Schaltschema des Messkonzepts.

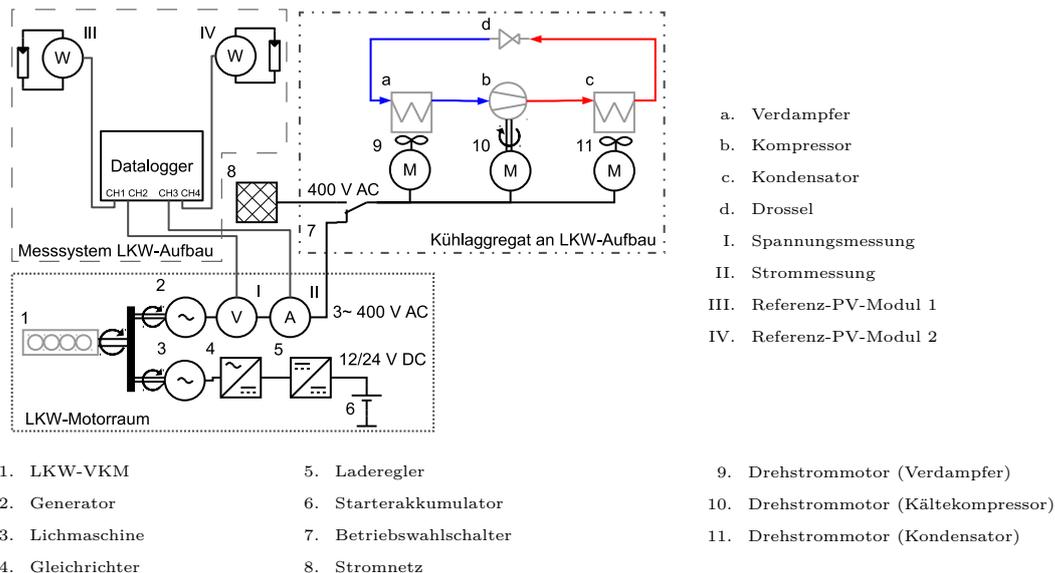


Abbildung 3.2.: Schema mit Legende des Messkonzepts zur Transportroutenoptimierung

Die Kühlaggregatleistung P_{KA} wird durch eine Strom-/Spannungsmessung gemessen. Da der Generator die Kühlaggregatleistung vorgibt, kann man den Strom $i_{Gen}(t)$ mittels Stromzange (III) und die Spannung $u_{Gen}(t)$ mittels Spannungsmessgerät (IV) messen und daraus den Wirkleistungsfaktor $\cos(\varphi)$, aus der zeitlichen Verschiebung des Stroms zur Spannung, ermitteln. Beide Messgeräte werden im Schaltschema nach dem Generator (2) und vor dem Betriebswahlschalter (7) installiert. Mit der Anbringung von zwei Referenz-Photovoltaikmodulen am LKW-Sattelanhänger wird mittels Leistungsmessgerät die theoretische Photovoltaikleistung P_{PV} , durch Hochrechnung auf die vorhandene Fläche, und die Verschattung während des Transports ermittelt. Zur Ermittlung des realen zusätzlichen Kraftstoffverbrauchs $V_{Diesel,zus.}$ muss eine Vergleichsmessung ohne eingeschaltetem Kühlaggregat auf derselben Transportstrecke durchgeführt werden. Zur Nachverfolgung der Routenführung überprüft man mittels GPS-System die geographische Lage und Ausrichtung des LKW. Während der Dauer des Transports ist die Uhrzeit ebenfalls mit zu protokollieren.

Für die Durchführung der Messung kann man wie folgt vorgehen:

- Auswahl der Messgeräte
- Festlegung der Route
- Testlauf
- Installation der Messgeräte
- Messung
 - Kühlaggregat „ein“
 - Kühlaggregat „aus“ (Vergleichsmessung)
- Auswertung

3.2. Auswahl der Photovoltaiktechnologie

Welche Modultechnologie für die Energieeinsparung von gekühlten Straßengütertransporten am geeignetsten ist, wird in diesem Abschnitt behandelt. In diesem Fall wird die Auswahl der passenden Modultechnologie von drei Faktoren bestimmt:

- Wirkungsgrad
- Gewicht
- Preis

Der Modulwirkungsgrad ist wegen der begrenzten Transport-KFZ-Dachfläche entscheidend, um möglichst viel Energie umwandeln zu können. Die Transport-KFZ-Dachfläche ist im besten Fall bei Sattelanhänger 35 m² groß, aber im schlechtesten Fall bei Kleintransportern lediglich 2 m². Der Kraftstoffverbrauch hängt von verschiedenen Parametern ab, wie in Abschnitt 2.3 zuvor behandelt. Die folgenden Parameter zur Bestimmung der Leistung an der LKW-VKM-Welle stehen im Zusammenhang mit dem Gesamtgewicht des LKW bzw. dessen Beladung [23]:

- Fahrbahnsteigung
- Rollwiderstand
- Beschleunigung

Bei der Auswahl ist deswegen auch auf das Modulgewicht zu achten. Ein zu hohes Modulgewicht wirkt sich negativ auf den Kraftstoffverbrauch aus, den es eigentlich zu reduzieren gilt. Eine generelle Übersicht über Modulgewicht der jeweiligen Modultechnologie gibt es insofern nicht, da die Verarbeitung der Module auf unterschiedliche Weise erfolgen kann; z.B. nicht immer muss das Trägermaterial Glas sein. Die Herstellungskosten können durch effizientere Herstellungsverfahren und steigende Nachfrage permanent gesenkt werden. Die Preise für Solarmodule werden jährlich nach unten korrigiert [37].

Solarzellen wandeln Strahlungsenergie in elektrische Energie um. Sie bestehen meist aus kristallinen oder amorphen Halbleitern und unterscheiden sich in anhand ihres Kristall- und Zellaufbaus. Zur häufigen Anwendung kommen kristalline Solarzellen, auch Dickschichtsolarmodule genannt, und Dünnschichtsolarmodule. Daneben gibt es noch neuere Technologien wie organische Solarzellen oder kristalline Solarzellen mit mehreren Bandabständen, diese sind zurzeit jedoch nur vereinzelt am Markt zu finden [38]. Abbildung 3.3 zeigt eine Übersicht über aktuelle Solarzellen-Technologien und deren Wirkungsgrade [39].

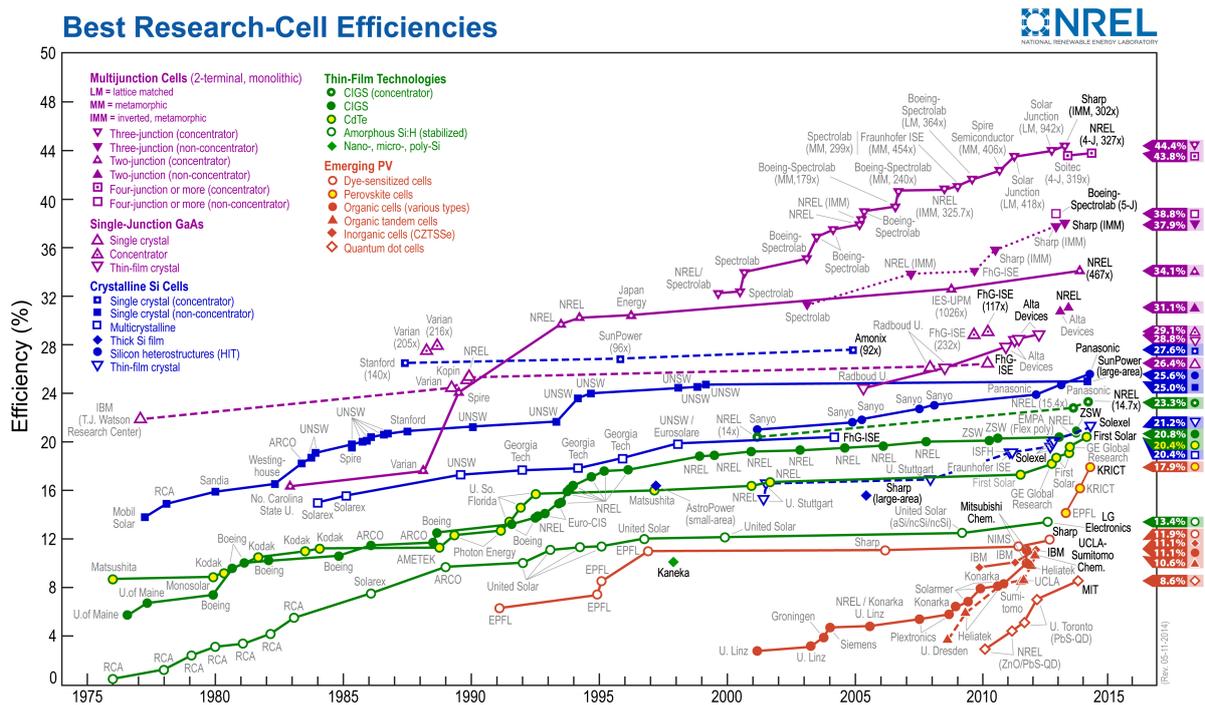


Abbildung 3.3.: Übersicht über aktuelle Solarzellen-Technologien und deren Wirkungsgrade [39]

Einige der in der obigen Abbildung angeführten Technologien, speziell jene mit Wirkungsgraden jenseits von ca. 25 %, sind nur im Labor getestet und noch nicht am Markt erhältlich. Kristalline Dünnschichtszellzellen mit Wirkungsgraden über 20 % sind jedoch bereits Realität und von Herstellern aus China und den USA zu beziehen. Mit ihrem geringen Gewicht und niedrigen spezifischen Preisen sind kristalline Dünnschichtmodule am besten geeignet. Für die weiteren Verlauf der Konzeptentwicklung werden kristalline Dünnschichtmodule verwendet [40] [41].

3.3. Technische Möglichkeiten und deren Umsetzungspotenzial

Die Potentialanalyse in Kapitel 2 zeigt die ökonomische und ökologische Relevanz der Photovoltaiktechnologie zur Energieeinsparung an Kühl-LKW auf, und bestätigt in Abschnitt 2.2.3 die technologische Kompatibilität der aktuell verfügbaren Kühltechnologien. Die in Abschnitt 2.2.2 gewonnenen Erkenntnissen zur Kompatibilität legen die Basis für die in diesem Abschnitt entwickelten technischen Konzepte. Elf Kühltechnologien für sechs Fahrzeugklassen werden analysiert, diese sind:

-  ... Lieferwagen
-  ... Transporter
-  ... LKW (Leicht, Mittel, Schwer)
-  ... Sattelzüge

Energietechnisch verfügt der verfolgte Ansatz über ein theoretisches Einsparungspotential von maximal 32,4 % (Nahtransport), siehe Abschnitt 2.3. Das maximale technische Einsparungspotential wird durch die in Abschnitt 3.2 ausgewählte kristalline Dünnschichtmodultechnologie, das Speichersystem und den Maximum Power Point-Tracker (MPP-Tracker) gewährleistet. Der Einsatz eines Speichersystems ist grundsätzlich angedacht, muss aber den wirtschaftlichen Mehrwert klar widerspiegeln, siehe dazu Kapitel 4.

Unterschieden wird zwischen Konzepten zur Nachrüstung bestehender Kühlaggregate mittels Photovoltaiktechnologie, nachfolgend Nachrüstungen genannt, und Konzepten für komplette Neuaufbauten von Kühlsystemen, hier Neuaufbauten genannt. Während Nachrüstungen in Abschnitt 3.3.1 für alle genannten Fahrzeugklassen entwickelt sind und in Kapitel 4 auch ökonomisch, sowie ökologisch bewertet werden, beziehen sich Neuaufbauten in Abschnitt 3.3.2 allgemein auf Lösungen für Kühltransporte, es wird hier lediglich ein Ausblick auf das theoretisch Machbare gegeben.

3.3.1. Nachrüstungen

Unter Nachrüstung versteht man die Zusatzinstallation von einem Photovoltaiksystem in ein bestehendes Kühlsystem an einem Kühltransporter. Die in Abschnitt 2.2.3 für vollständig und eingeschränkt kompatibel zur Photovoltaiktechnologie eingestuften Kühlsysteme werden hier berücksichtigt. Hierzu ist festzuhalten, dass sich für diese sechs Kühlsysteme vier Nachrüstungskonzepte ergeben, Konzept A bis D. Dabei wird unterschieden zwischen Konzepten für:

- Drehstrom betriebene Kühlsysteme (AC-Kühlsysteme)
- Gleichstrom betriebene Kühlsysteme (DC-Kühlsysteme)

Konzept A bis C ist für 400-V-Drehstrom (400-V-AC) betriebene Kühlsysteme und Konzept D für 12-V-Gleichstrom (12-V-DC) betriebene Kühlsysteme konzipiert. Tabelle 3.1 zeigt welches, mit der Photovoltaiktechnologie kompatible, Kühlsystem zu welchem Konzept passt.

Tabelle 3.1.: Kompatible Kühlsysteme und passende Konzepte

Kühlsystem	Kompatibilität	zusätzliche Maßnahmen	Versorgung	Konzept
1	vollständig	keine	400-V-AC	A, B und C
2	vollständig	keine	400-V-AC	A
3	vollständig	keine	12-V-DC	D
5	eingeschränkt	Installation Drehstromgenerator	400-V-AC oder 12-V-DC	A, B, C und D
6	eingeschränkt	Installation Drehstromgenerator	400-V-AC	A, B und C
9	eingeschränkt	Installation Drehstromgenerator	400-V-AC	A, B und C

Die Konzepte A bis D sind für die Gewährleistung der Betriebssicherheit des Kühlaggregates bei jedem Betriebsverhalten konzipiert. Bei den Kühlsystemen 5, 6 und 9 wird die Betriebssicherheit durch den Einsatz eines zusätzlichen Drehstromgenerators gewährleistet. Kühlsystem 5 benötigt für die Kompatibilität zu Konzept D keinen zusätzlichen Drehstromgenerator.

3.3.1.1. Problemstellung für AC-Kühlsysteme

Da die Photovoltaiktechnologie nicht die volle benötigte Leistung zum Antrieb der Kühlaggregate liefern kann, wird ein Drehstromgenerator zur Unterstützung benötigt. Der Drehstromgenerator ist entweder bereits an der VKM des Kühltransporters installiert, oder muss zusätzlich installiert werden. Ein Schaltungskonzept für die Einspeisung von

PV-Strom in das Inselsystem des Kühlaggregatantriebes könnte wie folgt aussehen, siehe Abbildung 3.4.

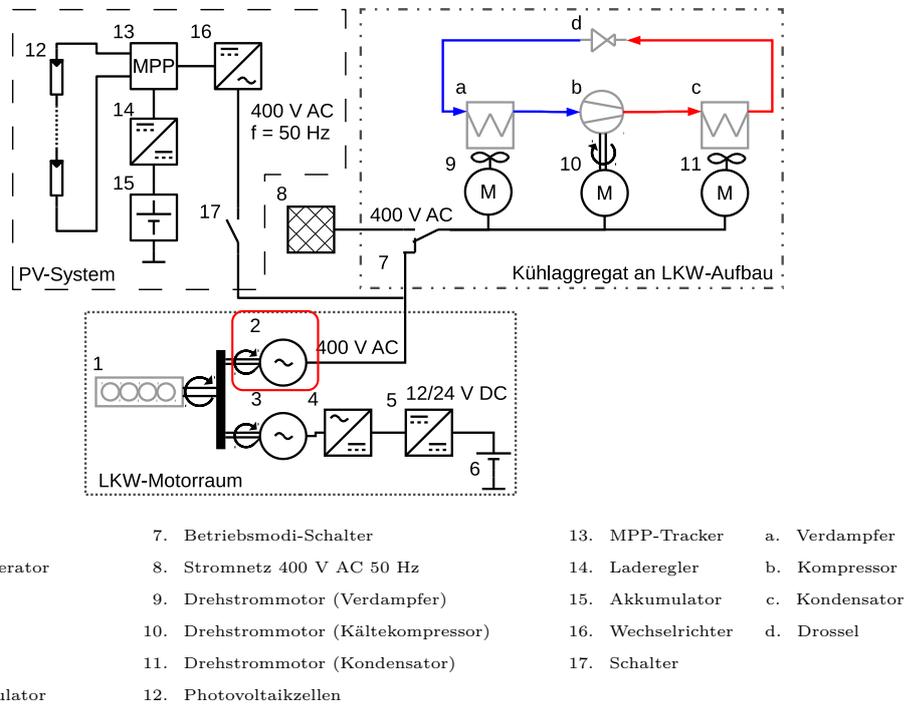


Abbildung 3.4.: Einspeisekonzept PV-Strom für AC-Kühlsystem

Der Drehstromgenerator (2) wird von der VKM des Kühltransporters (1) angetrieben. Die meisten VKM arbeiten in einem weiten Drehzahlbereich von $n_{VKM} = 600 - 2000$ U/min bei LKW, dies hat einen weiten variablen Speisefrequenzbereich des Inselsystems von $f_{Gen} = 27,7$ Hz bis $92,6$ Hz und unterschiedliche Ausgangsspannungen zur Folge [42]. Zur Berechnung der Speisefrequenz f_{Gen} welche vom Synchrongenerator (SM) erzeugt wird, wird Gleichung (3.1) verwendet. Die Übersetzung i errechnet sich aus den Nenndrehzahlen von VKM und Synchrongenerator [42], siehe Gleichung (3.2). Es wird angenommen, dass der Synchrongenerator ein Polpaar $p = 1$ besitzt.

$$f_{Gen} = \frac{n_{VKM} \cdot p}{i} \quad (3.1)$$

$$i = \frac{n_{VKM, Nenn}}{n_{SM, Nenn}} = \frac{1080 \text{ U/min}}{3000 \text{ U/min}} = 0,36 \quad (3.2)$$

Diese Problematik wurde bei der Auslegung der Kühlsysteme vom Hersteller berücksichtigt und stellt für die installierten Komponenten der Kühlsysteme kein Problem dar, erschwert aber die Einspeisung von PV-Strom. Der Drehstromgenerator ist zwar in den meisten Fällen als Synchrongenerator mit Erregerspannungssteuerung ausgeführt,

jedoch sind handelsübliche Wechselrichter (WR) lediglich für die Einspeisung in öffentliche Netze bei 50 Hz und 230-V- oder 400-V-Wechselstrom ausgelegt und haben nur einen beschränkten Ausgangs-Betriebsbereich von 45 Hz bis 55 Hz [43]. Die Konzepte A, B und C für die Kühlsysteme 1, 2, 5, 6 und 9 begegnen dieser Problematik auf unterschiedliche Weise.

3.3.1.2. Umsetzungsbedingungen

Die Bedingungen zur Umsetzung der Konzepte beinhalten die Randbedingungen und die technischen Einschränkungen, diese sind hier noch einmal zusammengefasst. Folgende Randbedingungen werden berücksichtigt:

- Einspeisung und Nutzung elektrischer Energie für Kühlaggregate
- Gewährleistung der Betriebssicherheit der Kühlaggregate
- Keine Garantieverletzung bestehender Installationen am LKW

Das Ziel, die Einspeisung von elektrischer Energie in Kühlaggregate muss möglich sein. Dazu selektierte man in Abschnitt 2.2.2 dafür kompatible Kühlsysteme. Die Nutzung des PV-Stroms darf nur unter Gewährleistung der Betriebssicherheit der Kühlaggregate erfolgen. Es dürfen dadurch keine Unterbrechungen der Kühlkette oder unzulässige Abweichungen von der Kühlsolltemperatur entstehen. Die Garantiebestimmungen bestehender Installationen, wie das Kühlaggregat selbst, müssen eingehalten und dürfen nicht verletzt werden, d.h. ein Öffnen der Gehäuseabdeckung und eine Veränderung des technischen Systems an sich ist nicht zulässig. Wie z.B. bei Kühlsystem 2 die Verwendung des integrierten FUs zur Einspeisung des PV-Stroms in den Gleichspannungszwischenkreis wäre zwar wünschenswert, stellt aber aus Gründen der Lizenz und Garantie in diesem Fall keine Option dar. Dem gegenüber stehen folgende technische Einschränkungen:

- Speisefrequenzbereich $f_{Gen} = 27,7 \text{ Hz bis } 92,6 \text{ Hz}$
- Limitiert PV-Leistung durch limitierende LKW-Dachfläche
- Zugänglichkeit des Einspeisepunktes

Die Konzepte müssen so gestaltet sein, dass sie trotz der Einschränkungen die maximale Energieeinsparung der Kühlaggregate zu erreichen.

3.3.1.3. Konzept A

Konzept A begegnet dem Umstand der variablen Speisefrequenz mit dem Einsatz eines Wechselrichters, der die Einspeisung von PV-Strom bei variabler Frequenz ermöglicht. Da Hersteller zurzeit lediglich Photovoltaikwechselrichter für die Einspeisung in elektrische Netze mit nahezu konstanter Frequenz anbieten, muss man hier auf Wechselrichter aus anderen Branchen ausweichen oder eine komplette Neuentwicklung anstreben. Abbildung 3.5 zeigt das Schaltschema und eine Kurzübersicht über Konzept A.

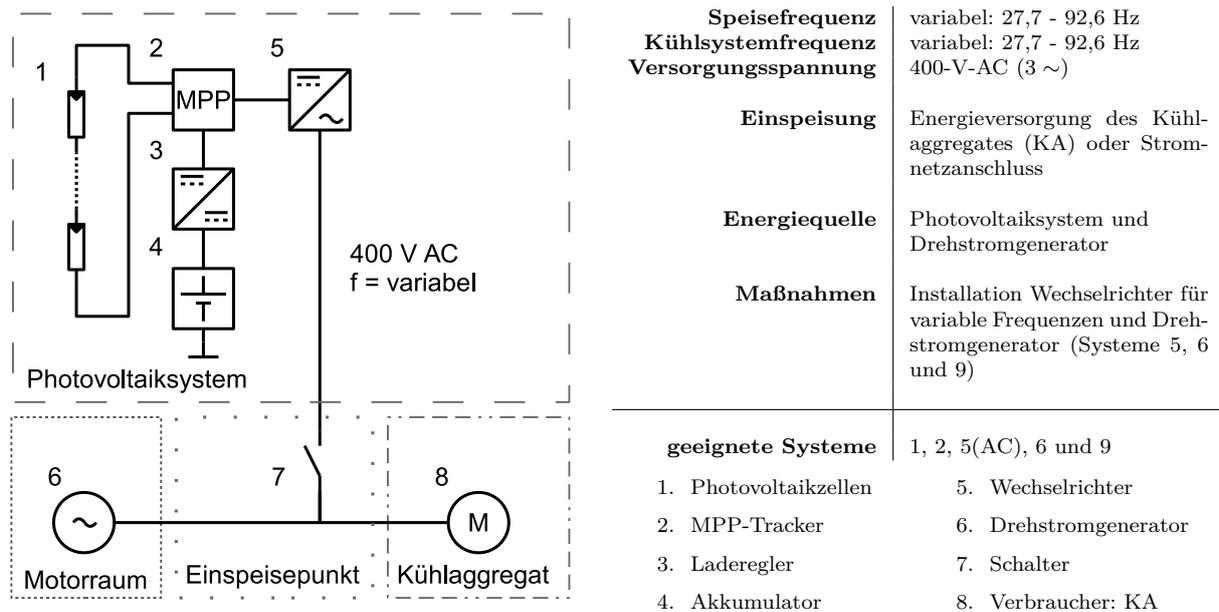


Abbildung 3.5.: Konzept A: Schema, technische Daten und Legende

Wie bei den hier ausgewählten Kühlsystemen erzeugt ein an der VKM-Welle sitzender Drehstromgenerator (6) die Versorgungsenergie zum Antrieb des Kühlaggregates (8). Das PV-System (1) bis (5) speist zwischen (6) und (8) in das Inselsystem bei variabler Frequenz ein, wenn der Schalter (7) geschlossen ist, und entlastet somit den Drehstromgenerator zum Antrieb des Kühlaggregates (8).

Zur Anwendung von Konzept A, muss bei Kühlsystem 5, 6 oder 9 ein zusätzlicher Drehstromgenerator installiert werden, da ansonsten das PV-System nicht unterstützt wird und die Betriebssicherheit des Kühlaggregates dadurch nicht gewährleistet ist. Dabei speist man den PV-Strom am Stromnetzanschluss des Kühlaggregates ein. Am Konzeptschema ändert sich aber nichts.

3.3.1.4. Konzept B

Durch einen Frequenzumrichter (FU) kann die variable Speisefrequenz des Drehstromgenerators bei nahezu 50 Hz konstant gehalten werden. Dies ermöglicht die Einspeisung PV-Strom mit einem handelsüblichen Wechselrichter. Konzept B ist scheinbar die in der Anschaffung aufwendigste, stellt aber in diesem Fall die einzige Möglichkeit dar, elektrische Energie mittels handelsüblichen Photovoltaiksystem in ein Inselsystem der Kühlaggreat-Versorgung einzuspeisen. Abbildung 3.6 zeigt das Schaltschema und eine Kurzübersicht über Konzept B.

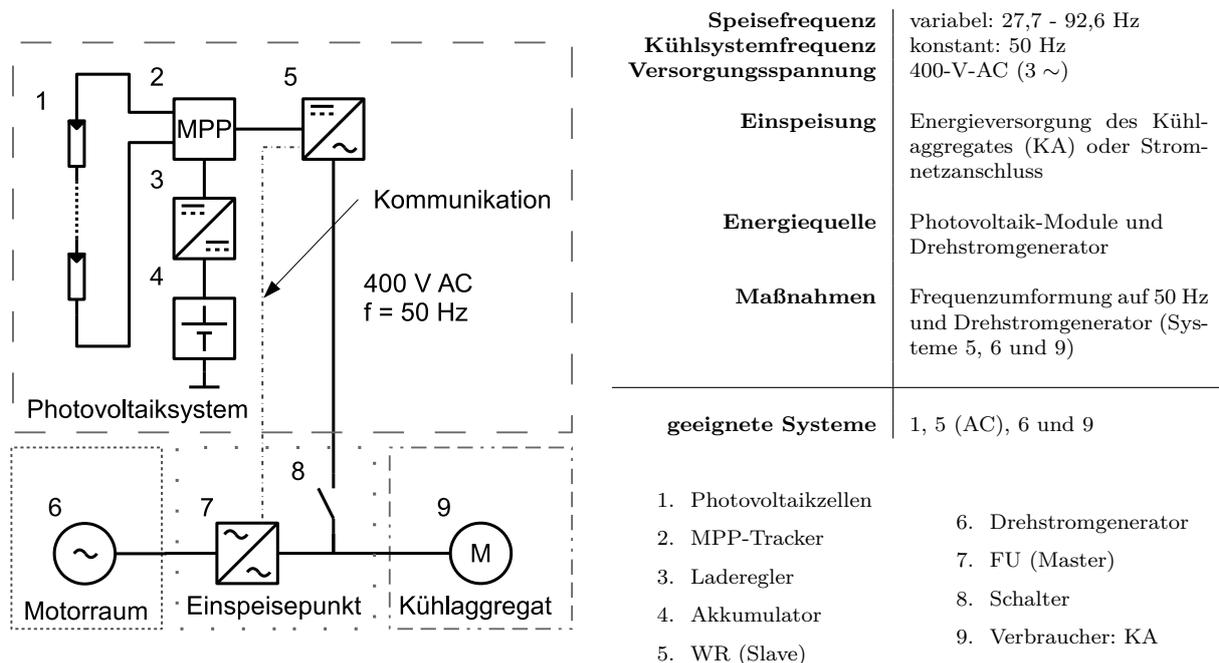


Abbildung 3.6.: Konzept B: Schema, technische Daten und Legende

Der in Abbildung 3.6 dargestellte, an der VKM-Welle sitzende, Drehstromgenerator (6) stellt die Versorgungsenergie zum Antrieb des Kühlaggreats (9) bereit. Ein Frequenzumrichter (7) hält seine Ausgangsfrequenz auf konstante 50 Hz. Das handelsübliche PV-System (1) bis (5) kann zwischen (7) und (9) in das Inselsystem bei konstanter Frequenz von 50 Hz einspeisen, wenn der Schalter (8) geschlossen ist, und entlastet somit den Drehstromgenerator zum Antrieb des Kühlaggreats (9). Der FU und der WR sind in dieser Konfiguration über eine Kommunikation miteinander verbunden, um eine Synchronisation durchführen zu können und die Leistung einzuspeisen. Der FU ist als Master konfiguriert, dieser gibt die Frequenz vor, und der WR (Slave) bekommt über den Kommunikationsbus das Synchronisationssignal zur Aufsynchronisierung.

Bei dem vorliegenden Konzept B, muss bei Kühlsystem 5, 6 oder 9 ein zusätzlicher Drehstromgenerator installiert werden, da ansonsten das PV-System nicht unterstützt wird und dadurch die Betriebssicherheit des Kühlaggregates nicht gewährleistet ist. Dabei speist man den PV-Strom am Stromnetzanschluss des Kühlaggregates ein. Am Konzeptschema ändert sich nichts.

3.3.1.5. Konzept C

Die direkte Einspeisung des PV-Stroms in den Gleichspannungszwischenkreis eines Frequenzumrichters erspart den Wechselrichter des Photovoltaiksystems. Durch den Frequenzumrichter, der seine Ausgangsfrequenz variieren kann, ist es möglich, die Kühlsysteme mit veränderlicher Drehzahl zu betreiben und dadurch eine feinere Temperatursteuerung zu erwirken, wodurch die dafür geeigneten Kühlsysteme eine Aufwertung in ihrer Funktion erfahren (vgl. Konzept E Abschnitt 3.3.2.1). Abbildung 3.7 zeigt das Schaltschema und eine Kurzübersicht über Konzept C.

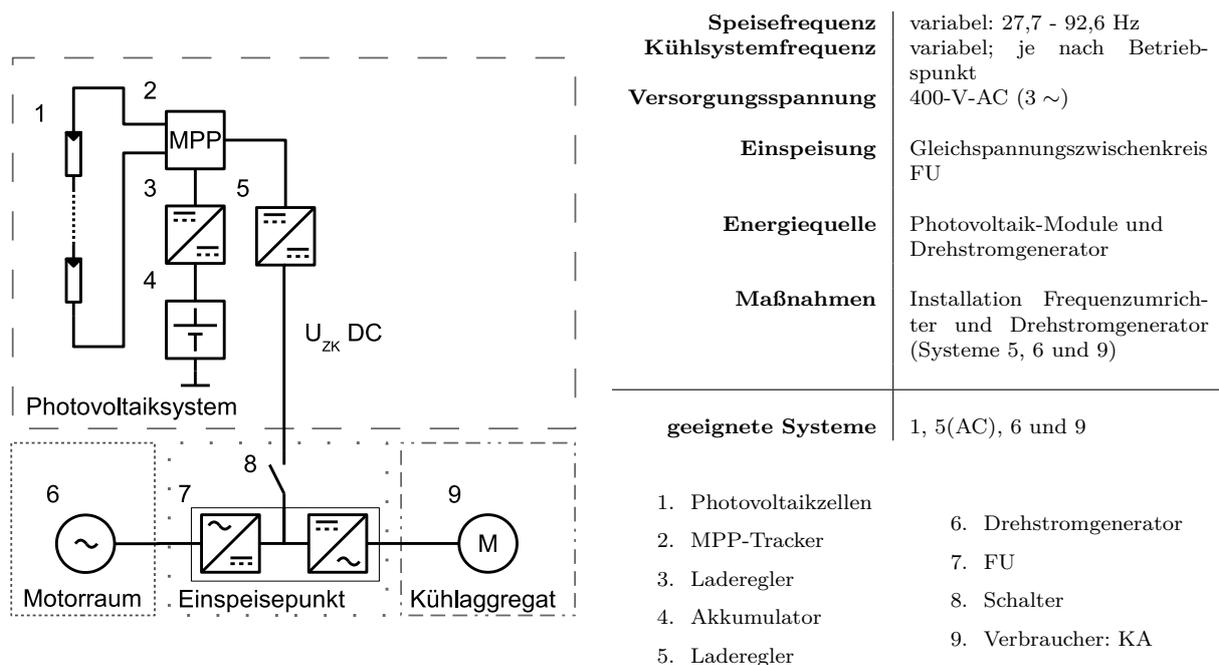


Abbildung 3.7.: Konzept C: Schema, technische Daten und Legende

Der in Abbildung 3.7 dargestellte, an der VKM-Welle sitzende, Drehstromgenerator (6) stellt die Versorgungsenergie zum Antrieb des Kühlaggregates (9) bereit. Ein Frequenzumrichter (7) ermöglicht die direkte Einspeisung von PV-Strom in seinen Gleichspannungszwischenkreis, wenn der Schalter (8) geschlossen ist, und entlastet somit den Drehstromgenerator zum Antrieb des Kühlaggregates (9). Die Ausgangsfrequenz des FU

kann je nach Betriebspunkt variieren.

Bei dem vorliegenden Konzept C, muss bei Kühlsystem 5, 6 oder 9 ein zusätzlicher Drehstromgenerator installiert werden, da ansonsten das PV-System nicht unterstützt wird und dadurch die Betriebssicherheit des Kühlaggregates nicht gewährleistet ist. Dabei speist man den PV-Strom am Stromnetzanschluss des Kühlaggregates ein. Am Konzeptschema ändert sich nichts.

3.3.1.6. Konzept D

Kühlsystem 3 und 5 werden von der Lichtmaschine des Kühltransporters mit Gleichstrom betrieben. Somit reduziert sich die Komplexität zur Einspeisung von PV-Strom und das Konzept kommt ohne teuren Wechselrichter aus. Die gewonnene elektrische Energie aus dem PV-System wird direkt in das KFZ-Energiebordnetz eingespeist. Ein DC-DC-Steller nach dem Maximum Power Point-Tracker sorgt für die Spannungsanpassung zur Einspeisung bei konstanter BordenergieNetzspannung von meist 12-V-DC. Wegen den knappen räumlichen Verhältnissen, die sich in Kühltransporter mit Kühlsystem 3 und 5 vorfinden, muss geprüft werden, ob ein Speichersystem installiert werden kann. Eine Speicherung des überschüssigen PV-Stroms in den Starterakkumulator des KFZ, ist nicht möglich, da dieser Batterietyp für die permanente Stromabgabe nicht ausgelegt ist. Abbildung 3.8 zeigt das Schaltschema und eine Kurzübersicht über Konzept D.

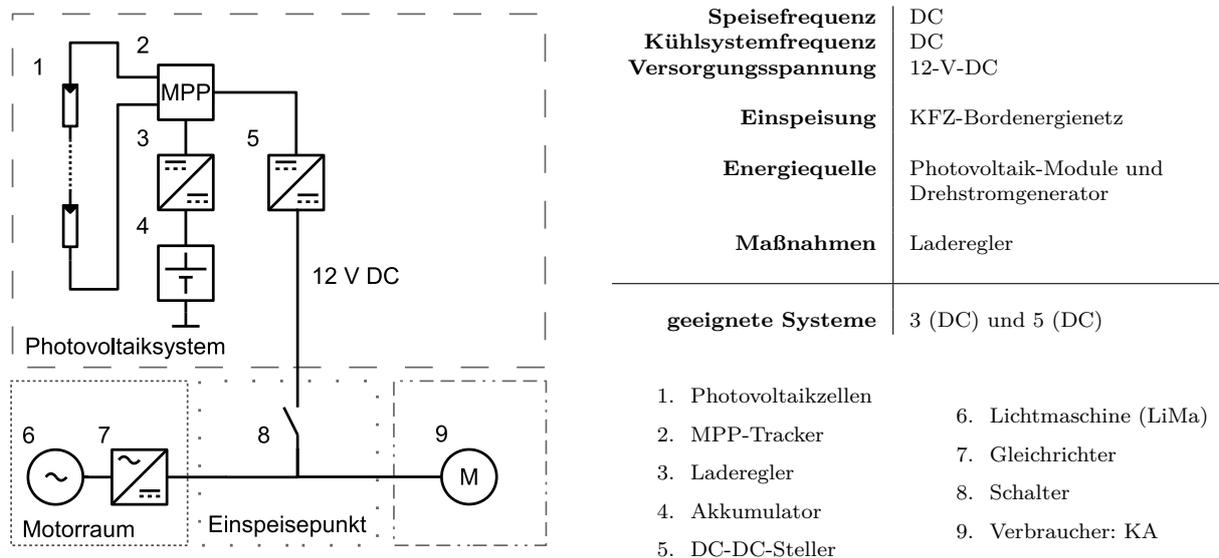


Abbildung 3.8.: Konzept D: Schema, technische Daten und Legende

Die LiMa (6) stellt über den Gleichrichter (7) die Versorgungsenergie zum Antrieb des Kühlaggregates (9) bereit. Ein DC-DC-Steller (5) ermöglicht die direkte Einspeisung von PV-Strom in das Bordenergienetz des Kühltransporters zwischen (7) und (9), wenn der Schalter (8) geschlossen ist, und entlastet somit die LiMa zum Antrieb des Kühlaggregates (9).

3.3.1.7. Bewertung

Eine Bewertung bzw. Entscheidung für ein bestimmtes Nachrüstungskonzept wird in der Praxis nach den technischen und ökonomischen Gesichtspunkten erfolgen. An dieser Stelle wird vorab der technische Aufwand bewertet. Die Entscheidung hängt vom Typ des vorliegenden Kühlsystems ab, welcher letztendlich den technischen Aufwand bestimmt.

Konzept A bietet als einziges für Kühlsystem 2 die Möglichkeit der Einspeisung von PV-Strom. Konzept B kommt gänzlich ohne Neuentwicklungen aus und kann unter Verwendung handelsüblicher Komponenten umgesetzt werden. Ebenso Konzept C, wobei dazu noch die Möglichkeit der Drehzahlregelung der Kühlaggregatantriebe hinzu kommt, sofern dies gewünscht ist. Konzept D stellt für DC-Kühlsysteme die einzige Option dar.

Lässt es das Betriebsverhalten der Kühlsysteme 5, 6 und 9 zu, kann auf den Einsatz eines zusätzlichen Drehstromgenerators verzichtet werden und bedingt nur handelsübliche Komponenten zur Umsetzung. Dazu muss das Speichersystem des Photovoltaiksystems auf die Lastfälle und Einsatzdauer des Kühlsystems individuell angepasst werden.

Die Möglichkeit der Drehzahlregelung der Kühlaggregatantriebe, wie sie bei Konzept C zur Verfügung steht, macht in Kombination mit Kühlsystem 5 keinen Sinn, da es in seiner Eingangsbeschaltung für den Stromnetzanschluss einen Transformator zur Spannungswandlung und einen Gleichrichter zur Umwandlung des Drehstroms in Gleichstrom integriert hat. Nur wenn der FU seine Ausgangsfrequenz auf 50 Hz konstant hält, ist ein Betrieb damit technisch sinnvoll. Vom Einsatz von Kühlsystem 5 in Kombination mit Konzept D ist wegen der zu erwarteten geringen Energieeinsparung abzuraten, siehe dazu Abschnitt 2.2.2.5.

3.3.2. Neuentwicklungen

Der Markt für Transportkühlsysteme ist heutzutage stark von der Kompressionskältetechnik dominiert, da diese Technologie sehr gut erforscht und für eine breites Anwendungsspektrum geeignet ist. Durch den harten Wettbewerb am Markt schaffen es nur wenige Hersteller sich wirklich im großen Stil zu etablieren. Eine Neuentwicklung in Kombination mit dieser Technologie wäre nur in Kooperation mit einem geeigneten Hersteller ökonomisch sinnvoll. Wie in Abschnitt 2.2 bereits aufgezeigt, wird permanent an neuen Technologien geforscht die schon heute das Potential haben die derzeit marktbeherrschende Kompressionskältetechnik in gewissen Marktsegmenten zu ersetzen. Die Photovoltaiktechnologie lässt sich mit drei Technologien zu drei Neuaufbaukonzepten kombinieren, diese sind:

- Konzept E: Stromrichtertechnik (siehe auch Abschnitt 3.3.1.5)
- Konzept F: Schukey-Technologie (siehe auch Abschnitt 2.2.1.4)
- Konzept G: Zeolith-Technologie (siehe auch Abschnitt 2.2.1.5)

3.3.2.1. Konzept E

Konzept E ist an Konzept C angelehnt. Das Schema dieses Konzepts ist mit jenem von Konzept C ident. Anstatt lediglich bestehende Kühlsysteme mit einem PV-System nachzurüsten, geht man hier einen Schritt weiter und entwickelt, in Kooperation mit einem Kühlaggregathersteller, ein Kühlaggregat mit integriertem FU und extern zugänglichem Gleichspannungszwischenkreis, zur Einspeisung von PV-Strom. Das System kann so gestaltet werden, dass bei Nichtverwendung des Kühlaggregates, überschüssige Energie vom Gleichspannungszwischenkreis in den PV-Speicher geleitet werden kann, d.h. die Aufladung der PV-Speicher erfolgt durch den Drehstromgenerator.

Die direkte Einspeisung des PV-Stroms in den Gleichspannungszwischenkreis eines Frequenzumrichters erspart den Wechselrichter des Photovoltaiksystems. Durch den Frequenzumrichter, der seine Ausgangsfrequenz variieren kann, ist es möglich, die Kühlsysteme mit veränderlicher Drehzahl zu betreiben und dadurch eine präzisere Temperatursteuerung zu erwirken, wodurch die dafür geeigneten Kühlsysteme eine Aufwertung in ihrer Funktion erfahren (vgl. Konzept C Abschnitt 3.3.1.5).

3.3.2.2. Konzept F

Konzept F basiert auf der Schukey-Technologie, welche den Kompressions- und Expansionsprozess des Kälteprozesses höchst effizient in einer Maschine, der Schukey-Maschine, integriert, siehe dazu Abschnitt 2.2.1.4. Läuft die Entwicklung nach Plan, könnte diese Technologie bereits 2016 am Markt erhältlich sein. Abbildung 3.9 zeigt das Schaltschema mit Legende.

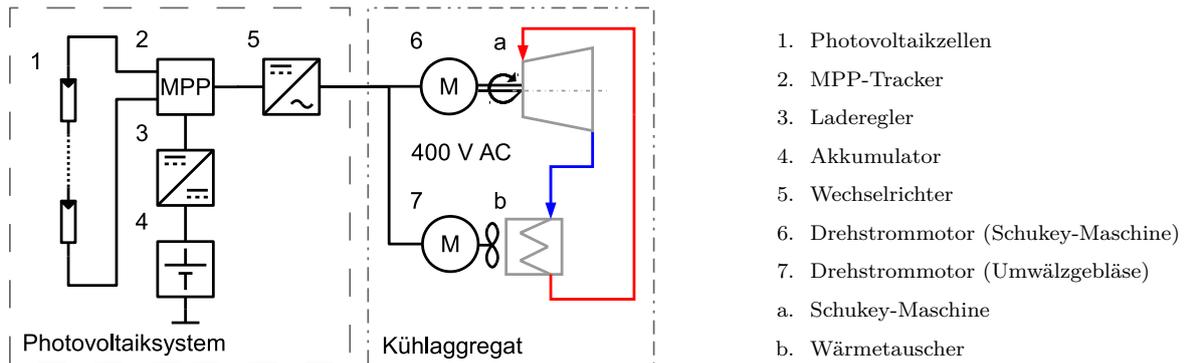


Abbildung 3.9.: Konzept F - Schukey-Technologie: Schema und Legende

Das Photovoltaiksystem (1) bis (5) stellt die benötigte elektrische Energie für die Antriebe (6) und (7) der Schukey-Maschine (a) und des Wärmetauschers (b) zur Verfügung. Der überschüssige PV-Strom wird dabei im PV-Speicher (3) und (4) gespeichert.

3.3.2.3. Konzept G

Dieses Konzept nutzt die Zeolith-Technologie in Verbindung mit der Photovoltaiktechnologie zur Kälteerzeugung. Das kristalline Mineral Zeolith hat die Eigenschaft, Wasserdampf anzusaugen (zu adsorbieren), in seine poröse Struktur einzubinden und dabei Wärme hoher Temperatur abzugeben. Diese Wärme wird dem zu kühlendem Medium entzogen, mehr zu den Sorptionsprozessen der Zeolith-Technologie findet man in Abschnitt 2.2.1.5. Abbildung 3.10 zeigt das Schaltschema mit Legende.

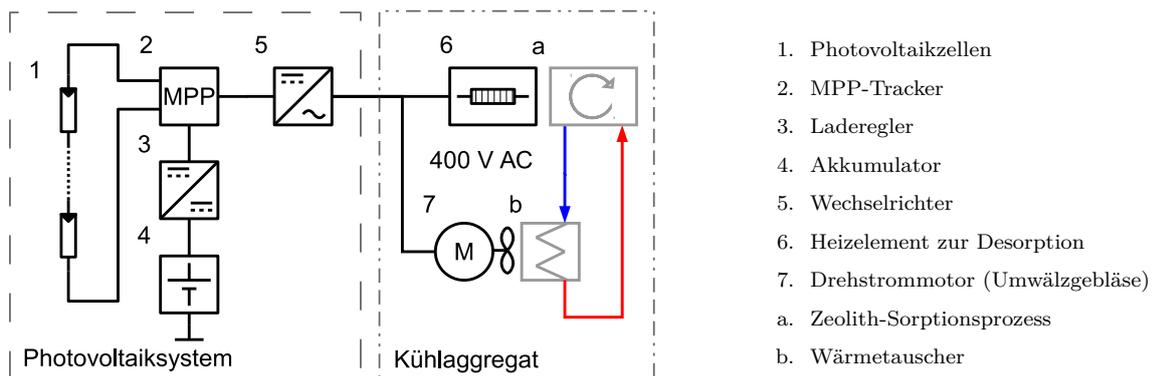


Abbildung 3.10.: Konzept G - Zeolith-Technologie: Schema und Legende

Das Photovoltaiksystem (1) bis (5) stellt die benötigte elektrische Energie zur Verfügung. Die im Adsorptionszyklus erzeugte Kälte, (a) stellt den gesamten Zeolith-Sorptionsprozess dar, wird mittels Wärmetauscher (b) und Umwälzgebläse (7) zum kühlendem Medium gebracht. Ist die Zeolithstruktur mit Wasser gesättigt, muss in einem nächsten Schritt (Desorption) Wärme zugeführt werden, dies geschieht durch ein elektrisches Heizelement (6). Für einen kontinuierlichen Kühlvorgang über längere Zeit, müssen mehrere Sorptionsprozesse phasenversetzt nebeneinander betrieben werden. Der überschüssige PV-Strom wird dabei im PV-Speicher (3) und (4) gespeichert.

3.3.2.4. Bewertung

Die Technologie für Konzept E ist am Markt erhältlich. Im Bezug auf die Kraftstoffeinsparung kann man Ergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung wie bei den Konzepten A bis C erwarten, da allen die Kompressionskältetechnik zur Kälteerzeugung zu Grunde liegt, siehe dazu Kapitel 4. Konzept F und G nutzen beide relativ neue Technologien zur Kälteerzeugung, welche beide noch nicht am Markt erhältlich sind. Eine Abschätzung zur Kraftstoffeinsparung im Vergleich zu herkömmlichen Kühlaggregaten ist demnach nicht möglich.

3.4. Realisierungsbedingungen

Dieser Abschnitt betrachtet die rechtliche Seite einer möglichen Realisierung eines Konzepts basierend auf den zuvor gezeigten, siehe Abschnitt 3.3. Realisierungen sollten immer den rechtlichen Bestimmungen genügen, innerhalb derer man sich bewegen kann. Zuerst werden die zutreffende rechtliche Grundlagen definiert und in einem nächsten Schritt Lösungswege zur Realisierung aufgezeigt.

3.4.1. Rechtliche Grundlagen

In diesem Fall kommen die EU Richtlinie 2007/46/EG [44] und Verordnung (EG) Nr. 661/2009 [45] zur Anwendung, wobei die EU Richtlinie 2007/46/EG den allgemeinen Rahmen für die Genehmigung von Fahrzeugen vorgibt und Verordnung (EG) Nr. 661/2009 speziell auf die einzuhaltenden Sicherheitsbestimmungen eingeht. Diese stellen die rechtliche Grundlage für den Anbau eines Photovoltaiksystems am KFZ dar. Alle weiteren genannten Rechtsakte, sowie insbesondere nationale Rechtsakte der einzelnen Mitgliedsländer der EU leiten sich daraus ab. Das Photovoltaiksystems stellt in diesem Zusammenhang eine sogenannte **selbstständige technische Einheit** für KFZ dar. Abbildung 3.11 zeigt die höchstzulässigen Abmessungen lt. Richtlinie 96/53/EWG für Fahrzeuge.

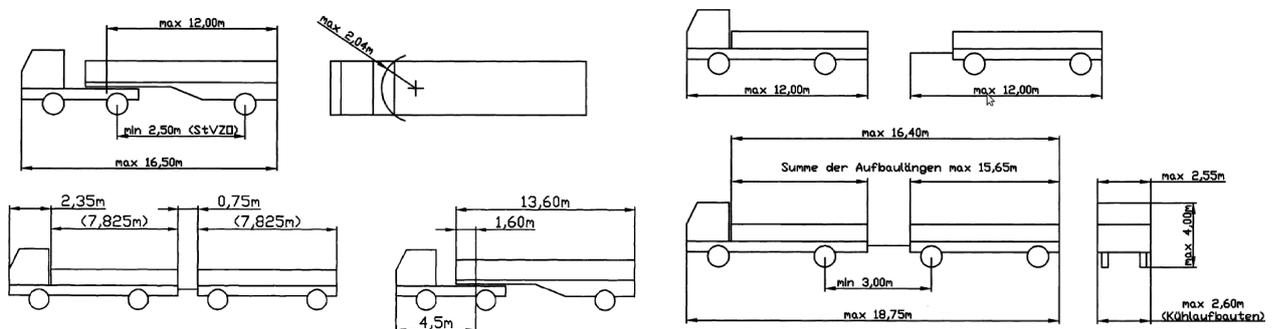


Abbildung 3.11.: Höchstzulässige Abmessungen für LKW lt. Richtlinie 96/53/EWG [46]

Die relevanten Teile der Rechtsakte sind in Tabelle 3.2 dargestellt und die **wichtigsten Passagen fett hervorgehoben**.

Tabelle 3.2.: Teile der Rechtsakte EU Richtlinie 2007/46/EG [44] und Verordnung (EG) Nr. 661/2009 [45]. Die wichtigsten Passagen sind fett hervorgehoben.

Richtlinie 2007/46/EG

Rahmenrichtlinie zur Schaffung eines Rahmens für die **Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge**

Artikel 1: Gegenstand

...harmonisierter Rahmen... ...für die Genehmigung aller in ihren Geltungsbereich fallenden Neufahrzeuge und der zur Verwendung in diesen Fahrzeugen bestimmten Systeme, Bauteile und **selbstständigen technischen Einheiten**; damit sollen ihre Zulassung, ihr Verkauf und ihre Inbetriebnahme in der Gemeinschaft erleichtert werden. Diese Richtlinie enthält außerdem die Vorschriften für den Verkauf und die **Inbetriebnahme von Teilen und Ausrüstungen** für Fahrzeuge, die nach dieser Richtlinie genehmigt wurden. Zur **Durchführung** dieser Richtlinie werden in Rechtsakten besondere technische Anforderungen für den Bau und den Betrieb von Fahrzeugen festgelegt; **Anhang IV** enthält eine vollständige Auflistung dieser Rechtsakte.

Artikel 2: Geltungsbereich

(1) Diese Richtlinie gilt für die **Typgenehmigung** von Fahrzeugen, die in einer oder mehreren Stufen zur Teilnahme am Straßenverkehr konstruiert und gebaut werden, sowie von Systemen, Bauteilen und **selbstständigen technischen Einheiten, die für derartige Fahrzeuge konstruiert und gebaut sind**. Diese Richtlinie gilt auch für Teile und Ausrüstungen für Fahrzeuge, die unter diese Richtlinie fallen.

Artikel 3: Begriffsbestimmungen

„**selbstständige technische Einheit**“ eine den Anforderungen eines Rechtsakts unterliegende Einrichtung, die Bestandteil eines Fahrzeugs sein soll und für die gesondert, jedoch nur in Bezug auf einen oder mehrere bestimmte Fahrzeugtypen eine Typgenehmigung erteilt werden kann, sofern der Rechtsakt dies ausdrücklich vorsieht;

ANHANG II: Begriffsbestimmungen für Fahrzeugklassen und Fahrzeugtypen

Klasse N: Für die Güterbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit mindestens vier Rädern.

Klasse N1: Für die Güterbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse $\leq 3,5$ t.

Klasse N2: Für die Güterbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit zulässiger Gesamtmasse $> 3,5$ t - 12 t.

Klasse N3: Für die Güterbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit zulässiger Gesamtmasse > 12 t.

Klasse O: Anhänger (einschließlich Sattelanhänger).

Klasse O1: Anhänger mit zulässiger Gesamtmasse $\leq 0,75$ t.

Klasse O2: Anhänger mit zulässiger Gesamtmasse $> 0,75$ t - 3,5 t.

Klasse O3: Anhänger mit zulässiger Gesamtmasse $> 3,5$ t - 10 t.

Klasse O4: Anhänger mit zulässiger Gesamtmasse > 10 t.

Verordnung (EG) Nr. 661/2009

über die **Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen, Kraftfahrzeuganhängern und von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer allgemeinen Sicherheit**

KAPITEL I: GEGENSTAND, GELTUNGSBEREICH UND BEGRIFFSBESTIMMUNGEN

Artikel 1: Gegenstand

Diese Verordnung legt Anforderungen fest

1. für die **Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen, Kraftfahrzeuganhängern und von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Sicherheit**,

Artikel 2: Geltungsbereich

Diese Verordnung gilt nach Maßgabe ihrer Artikel 5 bis 12 für **Fahrzeuge der Klassen M, N und O im Sinne von Anhang II Teil A der Richtlinie 2007/46/EG** und Systeme, Bauteile und **selbstständige technische Einheiten für diese Fahrzeuge**.

Artikel 5: **Allgemeine Vorschriften und Prüfungen**

(1) Die Hersteller stellen sicher, dass Fahrzeuge so konstruiert, gefertigt und zusammengesetzt sind, dass die Gefahr von Verletzungen der Fahrzeuginsassen und anderer Verkehrsteilnehmer möglichst gering ist.

(2) Die Hersteller stellen sicher, dass Fahrzeuge, Systeme, Bauteile und selbstständige technische Einheiten **den einschlägigen Vorschriften dieser Verordnung und ihrer Durchführungsmaßnahmen entsprechen**, einschließlich der Vorschriften über

- ... f) **die Fahrzeugaußenseite und Zubehörteile,**
- ... g) **die elektromagnetische Verträglichkeit,**

- ... l) **Massen und Abmessungen,**
- ... m) **elektrische Sicherheit,**
- ...

Hierzu ist festzuhalten, dass die Rechtsakte EU Richtlinie 2007/46/EG [44] und Verordnung (EG) Nr. 661/2009 [45] für die Genehmigung des Aufbaus eines PV-Systems, als selbstständige technische Einheit, auf einen Kühltransporter, bindend sind, siehe Tabelle 3.2. Als selbstständige technische Einheit versteht man eine Einrichtung, die Bestandteil eines Fahrzeugs sein sollte und für die gesondert, eine Typengenehmigung erteilt werden kann.

Mit Fahrzeug ist Fahrzeugklasse N für Fahrzeuge zur Güterbeförderung und Klasse O für Anhänger, einschließlich Sattelanhänger, gemeint. Die maximale Höhe für Fahrzeuge zur Güterbeförderung beträgt 4 m, welche durch den Aufbau von PV-Module am Dach eines Fahrzeuges nicht überschritten werden darf. Das Fahrzeug muss so zusammengesetzt sein, dass die Gefahr von Verletzungen für Insassen und anderer Verkehrsteilnehmer

möglichst gering ist, Stichwort Sicherheitsglas für PV-Module. Auf die einzuhaltenden Vorschriften und Sicherheitsbestimmungen wird in Abschnitt 3.4.2 eingegangen.

3.4.2. Typengenehmigung

Der Aufbau/Anbau eines Photovoltaiksystems zur Treibstoffreduktion an ein Kühltransportkraftfahrzeug ist mit einer Installation einer selbstständigen technischen Einheit im rechtlichen Sinne gleichzusetzen. Laut EU Richtlinie 2007/46/EG [44] bedingt dieser Aufbau zur rechtmäßigen Zulassung zum Straßenverkehr einer EG-Typengenehmigung, auch als Betriebserlaubnis bekannt. Da sich der Aufbau für jeden Fahrzeugtyp, wie Lieferwagen, Transporter, LKW, oder Anhänger, unterscheidet, ist für jeden Fahrzeugtyp ein gesondertes Gutachten zu erstellen. Laut EU Richtlinie 2007/46/EG Anhang IV [44] und Verordnung (EG) Nr. 661/2009 Artikel 5 [45], sind folgende Vorschriften einzuhalten:

- Fahrzeugaußenseite und Zubehörteile: z.B.: keine scharfen Kanten bis Fahrzeughöhe 1,9 m
- elektromagnetische Verträglichkeit (EMV): Richtlinie 2014/30/EU [47]
- Massen und Abmessungen: EU Richtlinie 2007/46/EG Anhang II [44] und Richtlinie 96/53/EWG [46]
- elektrische Sicherheit: EN 60204 [48] und EN 60947 [49]
- Sicherheitsglas: 92/22/EWG [50]

Laut Verordnung (EG) Nr. 661/2009 [45] und dem TÜV Österreich sind keine Aufprallversuche (Chrashtests) erforderlich.

3.4.3. Deklaration als Ladung

Obwohl für eine Typengenehmigung in diesem Fall keine Aufprallversuche erforderlich sind, ist ein Typengenehmigungsverfahren sehr zeit- und kostenintensiv. Die Abteilung für Typengenehmigung des TÜV Österreich empfiehlt deshalb, dem Verfahren nach Möglichkeit auszuweichen. Für ein Gesamtgutachten bietet es sich an, den Aufbau als Ladung zu deklarieren, wenn die Montage kraft- oder formschlüssig erfolgt und mit einfachem Werkzeug wieder gelöst werden kann z.B. Schraubverbindung, oder Schnellverschluss. Die oben genannten Vorschriften müssen trotzdem eingehalten werden. Hinzu kommen

noch Vorschriften der Ladungssicherung betreffend, lt. VDI-Richtlinien 2700 ff. [51].

Das Photovoltaiksystem wird an der Außenseite des LKW angebracht, die Photovoltaikmodule am Dach und der Wechselrichter, sowie ein etwaiges Speichersystem, an der Stirnseite des LKW-Kasten/Aufbaus. Eine ausreichende Ladungssicherung ist verantwortlich dafür, die im normalen Fahrbetrieb (Vollbremsung, plötzliche Ausweichmanöver, usw.) auftretenden Kräfte zu kompensieren. Die VDI-Richtlinien 2700 ff. [51] und die Europäischen Normen zur Ladungssicherung geben die folgenden Werte, welche im normalen Fahrbetrieb auftreten können, vor. Im Allgemeinen reicht es, die auftretenden Kräfte durch form- und reibschlüssige Verbindungen zu kompensieren. Will man aber in diesem Fall sicher gehen, um ein positives Gutachten einer nationalen Prüfstelle (z.B.: TÜV Österreich) zu erlangen, ist es ratsam einen Sicherheitsfaktor $\nu = 2$ zu wählen. Abbildung 3.12 (a) zeigt die auftretenden Kräfte während der Fahrt und (b) die empfohlenen Sicherungskräfte, in Abhängigkeit von der Gewichtskraft F_G der Ladung.

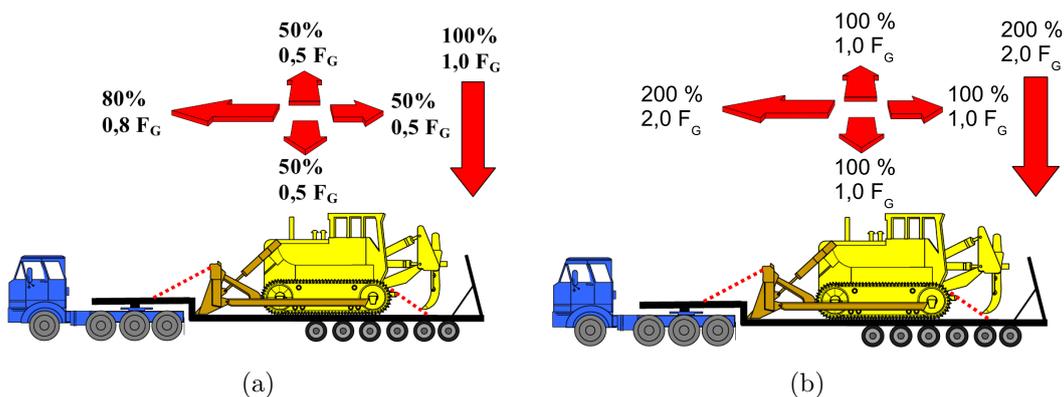


Abbildung 3.12.: (a) Auftretende Kräfte (Fahrbetrieb) und (b) empfohlene Sicherungskräfte in Abhängigkeit von der Gewichtskraft F_G der Ladung [51]

In der Abbildung (b) sieht man die empfohlenen Ladungssicherungskräfte für eine selbstständige technische Einheit die als Ladung deklariert werden kann. Längs der Fahrtrichtung und senkrecht zur Fahrbahn wirken die größten Fliehkräfte während der Fahrt. In diese Belastungsrichtungen wird die Sicherung der Ladung mit der zweifachen Gewichtskraft F_G empfohlen. Die geringste Belastung tritt quer zur Fahrtrichtung auf, hier genügt die Ladungssicherung mit der einfachen Gewichtskraft.

4. Ökonomische und ökologische Bewertung

Die ökonomische und ökologische Bewertung der Energieeinsparung im gekühlten Straßengütertransport durch Photovoltaik-Energieerzeugungsanlagen wird anhand von zwei Konzepten durchgeführt. Diese sind:

- Konzept B für drehstrom-gespeiste Kühlsysteme (AC-Kühlsysteme)
- Konzept D für gleichstrom-gespeiste Kühlsysteme (DC-Kühlsysteme)

Im Folgenden wird Konzept B Konzept AC, und Konzept D wird Konzept DC genannt. Die Bewertungen orientieren sich an „Best-Case“-Szenarien, d.h. die Ergebnisse stellen den besten Fall im Zusammenwirken von PV-Energieertrag und Transportzeitpunkt dar. Der größte PV-Energieertrag ist nur in Spanien zu erwarten, da es die größte mittlere jährliche solare horizontale Einstrahlung aufweist, 1.763 kWh/m² [52]. Ergebnisse für andere Länder würden schlechter ausfallen. Es wird außerdem angenommen, dass die Transporte nur bei Tag stattfinden.

Die Konzepte werden ohne PV-Speichersystem bewertet, da eine Vorfeldanalyse mit PV-Speichersystemen eine deutlich schlechtere Rendite und höhere Amortisationsdauer ergab. Konzept D wird auch deswegen ohne PV-Speichersystem bewertet, da die Fahrzeugklassen, für welche Konzept D zur Anwendung kommt, meist nur beschränkte Platzverhältnisse für einen Zubau bieten.

Zunächst wird in Abschnitt 4.1 auf die theoretischen Grundlagen zur Bewertung eingegangen, bevor die Konzepte in Abschnitt 4.2 ökonomisch und in Abschnitt 4.3 ökologisch bewertet werden.

Die Berechnung dazu wird in Excel ausgeführt. Dieses Dokument liegt der Arbeit im Anhang bei, siehe A.

4.1. Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die theoretische Grundlagen zum Verständnis des Energieflusses, zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs, zur Durchführung der Investitionskostenrechnung und zur Berechnung der Emissionen, erklärt.

4.1.1. Energiefluss

Beide in der Einleitung beschriebenen Einspeisekonzepte verfügen über die gleiche Grundstruktur. Ein Drehstromgenerator wird von der LKW-VKM angetrieben und stellt die für den Antrieb des Kühlaggregates benötigte Energie bereit, das PV-System speist in das Energiesystem des Kühlaggregates ein, entlastet somit den Generator und reduziert so den Kraftstoffverbrauch der LKW-VKM. Abbildung 4.1 zeigt das Energieflussbild der Konzepte.

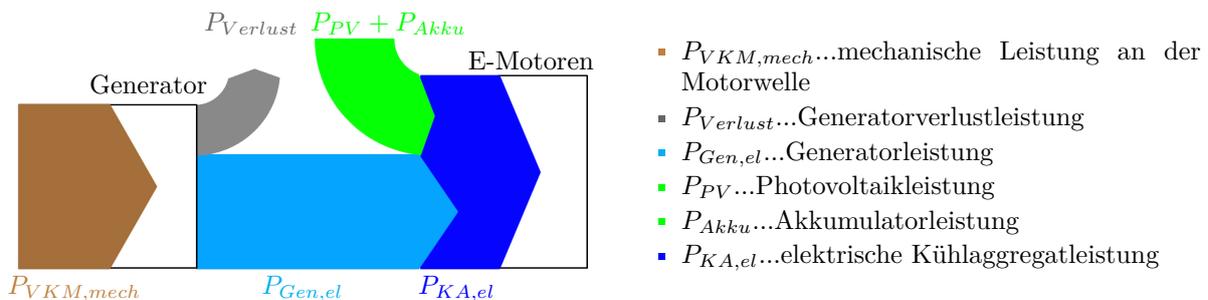


Abbildung 4.1.: Energieflußbild mit Legende für die Einspeisung von PV-Strom in das Energiesystem des Kühlaggregates zur Entlastung der LKW-VKM

In diesem Energieflussbild ist die Energieeinsparung durch das PV-System schon berücksichtigt. Die LKW-VKM gibt über die Motorwelle die mechanische Leistung $P_{VKM,mech}$ an den Drehstromgenerator ab. Die mechanische Leistung wird im Generator in elektrische Leistung umgewandelt.

Für Konzept B kommen Synchrongeneratoren und für Konzept D eine Lichtmaschine, die üblicherweise als Klauenpolgenerator ausgeführt ist, zum Einsatz. Der Klauenpolgenerator ist im Prinzip ein Synchrongenerator, jedoch mit erheblich schlechterem Wirkungsgrad von maximal $\eta_{Gen} = 60\%$, auf Grund der hohen Eisenverluste [53]. Auch der Synchrongenerator weist nur im Nennpunkt einen Wirkungsgrad von $\eta_{Gen,Nenn} = 90\%$ auf. In den anderen Betriebsbereichen ist dieser deutlich schlechter. Die Generatoren werden durch die häufige Drehzahländerung der VKM so gut wie nie in ihrem Nennbetriebspunkt betrieben [42]. Die Generatorverluste $P_{Verlust}$ steigen proportional mit der

Generatorzahl n_{Gen} und dem Quadrat des Generatorstromes I_{Gen} .

An den Klemmen des Generators steht die Ausgangsleistung $P_{Gen,el}$ zur Verfügung, um die elektrischen Antriebe des Kühlaggregates anzutreiben. Das PV-System speist mit der Modulleistung P_{PV} und Leistung des Speichersystems P_{Akk} in das Energiesystem des Kühlaggregates ein, entlastet somit den Generator und reduziert so den Kraftstoffverbrauch der LKW-VKM.

4.1.2. Kraftstoffverbrauch

Eine Nachrüstung eines bestehenden Kühlsystems belastet die LKW-VKM durch das Mehrgewicht des PV-System und erhöht den Kraftstoffverbrauch. Deswegen muss dies bei der Berechnung des Kraftstoffverbrauchs berücksichtigt werden. Der Kraftstoffverbrauch $V_{Diesel,zus.}$ setzt sich aus dem Verbrauch durch das Generatorlastmoment $V_{Generator}$ und dem Mehrgewicht durch das PV-System $V_{Gewicht}$ zusammen. Siehe dazu Gleichung (4.1).

$$V_{Diesel,zus.} = V_{Generator} + V_{Gewicht} \quad (4.1)$$

Das Mehrgewicht durch das PV-System beträgt maximal 1000 kg. In der Simulation vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Graz wurde der Mehrverbrauch $v_{Gewicht}$ in l/t pro 100 km durch das zusätzliche Gewicht ebenfalls für jedes Transportprofil ermittelt [22]. Für die Berücksichtigung des Mehrverbrauchs bei verschiedenen Gewichten wird ein linearer Zusammenhang angenommen, was bei diesen geringen Massen durchaus legitim ist [54]. Es wird ein spezifischer gewichtsbezogener Kraftstoffverbrauch $v_{Gewicht}$ in l/t pro h definiert, der mit Hilfe der Fahrdauer t_{Fahr} pro 100 km durch Gleichung (4.2) berechnet wird.

$$v_{Gewicht} [\text{in l/t pro h}] = \frac{v_{Gewicht} [\text{in l/t pro 100 km}]}{t_{Fahr} [\text{in h pro 100 km}]} \quad (4.2)$$

Tabelle 4.1 zeigt den Zusammenhang von Transportprofil und spezifischem gewichtsbezogenen Kraftstoffverbrauch $v_{Gewicht}$.

Tabelle 4.1.: Zusammenhang von Transportprofil und spezifischem gewichtsbezogenem Kraftstoffverbrauch $v_{Gewicht}$ [22]

Transportprofilart	$v_{Gewicht}$ in l/t pro 100 km	t_{Fahrt} h pro 100 km	$v_{Gewicht}$ in l/t pro h
Nahtransport	1,23	3,43	0,36
Regionaltransport	0,78	1,74	0,45
Ferntransport	0,63	1,38	0,46

Der Kraftstoffverbrauch durch ein beliebiges Mehrgewicht m_{PV} lässt sich mittels Gleichung (4.3) berechnen.

$$V_{Gewicht} = v_{Gewicht} \cdot m_{PV} \quad (4.3)$$

Die Gleichung (4.4) zur Berechnung des Verbrauchs durch das Generatorlastmoment $V_{Generator}$ lautet wie folgt:

$$\begin{aligned} V_{Generator} &= \frac{E_{Gen,el} \cdot c_{VKM}}{\eta_{Gen} \cdot \rho_{Diesel}} = \frac{P_{Gen,el} \cdot t_{Transport} \cdot \Delta_{Ein} \cdot c_{VKM}}{\eta_{Gen} \cdot \rho_{Diesel}} \\ &= \frac{(P_{Nenn,el} - P_{PV,el}) \cdot t_{Einschalt} \cdot \Delta_{Ein} \cdot c_{VKM}}{\eta_{Gen} \cdot \rho_{Diesel}} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Folgende Variablen werden zur Berechnung des zusätzlichen Kraftstoffverbrauches benötigt:

- $V_{Diesel,zus}$...zusätzlicher Kraftstoffverbrauch [l]
- $P_{Nenn,el}$...elektrische Kühlaggregateleistung [kW]
- P_{PV} ...Photovoltaikleistung [kW]
- $t_{Einschalt}$...Einschaltdauer [h]
- c_{VKM} ...spezifischer Verbrauch der Verbrennungskraftmaschine [g/kWh]
- η_{Gen} ...durchschnittlicher Generatorwirkungsgrad [%]
- ρ_{Diesel} ...Dichte des Dieseldieselkraftstoffs [g/l]
- P_{Gen} ...Generatorleistung [kW]
- $P_{VKM,mech}$...mechanische Leistung an der Motorwelle [kW]
- $v_{Gewicht}$...spezifischer gewichtsbezogener Mehrverbrauch [l/t]
- m_{PV} ...Gewicht des PV-Systems [t]

Das folgende Zahlenwertbeispiel verdeutlicht den Zusammenhang in Gleichung (4.1). Der errechnete zusätzliche Kraftstoffverbrauch in Liter bezieht sich auf eine Stunde. Es werden die selben Annahmen getroffen, wie in Abschnitt 2.3. Das PV-System hat eine Einspeiseleistung von $P_{PV} = 5 \text{ kW}$ und ein Gewicht von $m_{PV} = 0,8 \text{ t}$.

$$\begin{aligned} V_{Diesel,zus} &= \frac{(P_{Nenn,el} - P_{PV,el}) \cdot t_{Einschalt} \cdot \Delta_{Ein} \cdot c_{VKM}}{\eta_{Gen} \cdot \rho_{Diesel}} + m_{PV} \cdot v_{Gewicht} \\ &= \frac{(15,3 - 5 \text{ kW}) \cdot 1 \text{ h} \cdot 0,5 \cdot 205 \text{ g/kWh}}{0,5 \cdot 835 \text{ g/l}} + 0,8 \text{ t} \cdot 0,35 \text{ l/t} = \underline{\underline{2,5 \text{ l}} [\text{pro Stunde}]} \end{aligned}$$

Vergleicht man diese Ergebnis für den Kraftstoffverbrauch im Nahtransport mit PV-Strom-Einspeisung $V_{mitPV} = V_{Diesel,zus}$ mit jenem aus Abschnitt 2.3 ohne PV-Strom-Einspeisung V_{ohnePV} , so ergibt sich eine Einsparung $V_{Einsparung}$ des zusätzlichen Kraftstoffverbrauchs von:

$$V_{Einsparung} = V_{ohnePV} - V_{mitPV} = 3,8 \text{ l} - 2,5 \text{ l} = \underline{\underline{1,3 \text{ l}}} [\text{pro Stunde}] \quad (4.5)$$

Das entspricht einer relativen Einsparung von 33 % für den zusätzlichen Kraftstoffverbrauch (Kühlaggregatverbrauch).

Im Vergleich zum LKW-Kraftstoffverbrauch von 11,5 l/h, siehe Abschnitt 2.3, ergibt das eine Einsparung von 11,3 % (Kühlaggregatverbrauch mit PV zu LKW-Kraftstoffverbrauch). Die in diesem Fall maximale theoretische Einsparung wurde mit 32,4 % ermittelt.

4.1.3. Investitionskostenrechnung

Die Bewertung von technischen Anlagen erfolgt, wie in der Energiebranche üblich, durch den Kapitalwert C [in €], der dynamischen Amortisationsdauer T_A [in Jahre] und der Rentabilität R der Anschaffung, über eine lange Nutzungsdauer n von z.B. 20 Jahren [55]. In der Berechnung des Kapitalwertes werden folgende Parameter berücksichtigt, man unterscheidet zwischen Investitionskosten und Parametern zur Berücksichtigung der laufenden Kosten, sowie der wirtschaftlichen Entwicklungen:

- Investitionskosten
- Parameter zur Berücksichtigung der laufenden Kosten:
 - Gerätetausch (nur in bestimmten Jahren)
 - Wartung & Überprüfung
 - Ertragsminderung des PV-Systems x_{PV}

- Parameter zur Berücksichtigung der wirtschaftlichen Entwicklungen:
 - Nominalzinssatz i_{Nom}
 - Inflationsrate i_{Inf}
 - Kraftstoffpreissteigerung y_{Diesel}

Kapitalwert:

Der Kapitalwert C [in €] ist die Summe der jährlichen Barwerte BW_t und dem Restwert der Anschaffung, minus den Investitionskosten I_0 . Der Restwert der Anschaffung wird Null gesetzt. Anhand von Gleichung (4.6) kann der Kapitalwert C für eine Investition berechnet werden [56].

$$C = -I_0 + \sum_{t=0}^n BW_t = -I_0 + \sum_{t=0}^n (E_t - A_t) \frac{1}{(1 + i_{Real})^t} \quad (4.6)$$

Der Realzins ist mit dem Nominalzins durch die Fisher-Parität verbunden [57]. Daraus lässt sich der Realzinssatz i_{Real} berechnen, siehe Gleichung (4.7).

$$i_{Real} = \frac{1 + i_{Nom}}{1 + i_{Inf}} - 1 \quad (4.7)$$

Die Barwerte sind die jährlich zu erwartenden Ertragsüberschüsse $(E_t - A_t)$ auf den Investitionszeitpunkt bezogen, wobei die Erlöse E_t und die Ausgaben A_t im jeweiligen Jahr t darstellen. Die Investitionskosten bestehen aus der Summe einmaliger Kosten. Diese einmaligen Kosten werden anhand des Beispiels Konzept AC aufgelistet:

- PV-Module
- PV-Speicher
- Wechselrichter
- Frequenzumrichter
- Laderegler
- Montagematerial
- Montagekosten

Für Konzept D kann der PV-Speicher, der Laderegler, der Wechselrichter & der Frequenzumrichter entfallen. Es wird hierbei ein DC-DC-Steller benötigt.

Erlöse:

Die jährlichen Erlöse E_t [in €] werden hier direkt aus den jährlichen Energieerträgen durch das PV-System $E_{PV,t}$ [in kWh] errechnet. Der Energieertrag des PV-Systems $E_{PV,max}$ unterliegt einer jährlicher Ertragsminderung x_{PV} . Gleichung (4.8) zeigt die Berechnung der Energieerträge $E_{PV,t}$ [in kWh].

$$\begin{aligned}
 E_{PV,t} &= E_{PV,max} \cdot (1 - x_{PV})^t & (4.8) \\
 &= (E_{verwendet} + E_{Speicher}) \cdot (1 - x_{PV})^t \\
 &= (Hh \cdot A_{Modul} \cdot \#_{Modul} \cdot \eta_{Gesamt} \cdot \Delta_{Ein} + E_{Speicher}) \cdot (1 - x_{PV})^t
 \end{aligned}$$

Folgende Variablen werden zur Berechnung des jährlichen PV-Energieertrages benötigt:

- $E_{PV,t}$...jährlicher PV-Energieertrag mit Ertragsminderung [kWh]
- $E_{PV,max}$... maximaler jährlicher PV-Energieertrag ohne Ertragsminderung [kWh]
- x_{PV} ...Ertragsminderung [%]
- t ...0,1,2,3 ... n Zahlungsperioden [Jahr]
- n ...Nutzungsdauer (hier 20 Jahre) [Jahre]
- $E_{verwendet}$...sofort verwendete Energie [kWh]
- $E_{Speicher}$...gespeicherte Energie [kWh]
- Hh ...mittlere jährliche solare horizontale Einstrahlung [kWh/m²]
- A_{Modul} ...PV-Modulfläche [m²/Modul]
- $\#_{Modul}$...Anzahl der installierten Module [%]
- η_{Gesamt} ...Gesamtsystemwirkungsgrad [%]
- Δ_{Ein} ...Einschaltverhältnis [%]

Zur Berechnung der jährlichen Erlöse E_t [in €], mit t ist 0,1,2,3 ... 20 Zahlungsperioden [Jahr], subtrahiert man von der jährlichen Kraftstoffeinsparung durch die Generatorentlastung $V_{Generator}$ den Mehrverbrauch durch das Mehrgewicht des PV-Systems $V_{Gewicht}$ und multipliziert die Einsparung mit dem Kraftstoffpreis k_{Diesel} . Der Kraftstoffpreis unterliegt einer jährlichen Preissteigerung y_{Diesel} , siehe dazu Gleichung (4.9).

$$\begin{aligned}
 E_t &= (V_{Generator} - V_{Gewicht}) \cdot k_{Diesel} \cdot (1 + y_{Diesel})^t & (4.9) \\
 &= \left(\frac{E_{PV,t} \cdot c_{VKM}}{\eta_{Gen} \cdot \rho_{Diesel}} - m_{PV} \cdot v_{Gewicht} \right) \cdot k_{Diesel} \cdot (1 + y_{Diesel})^t
 \end{aligned}$$

Ausgaben:

Abgesehen von den Investitionskosten, die nicht zu den laufenden Kosten gezählt werden, sind die jährlichen Ausgaben A_t meist nur die geringen jährlichen Kosten durch Versicherung, Wartung und Überprüfung. Alterungsbedingt werden die Stromrichter, d.h. der Wechselrichter und Frequenzumrichter im 10. Jahr und der PV-Speicher im 7. und 14. Jahr getauscht, was zusätzliche Kosten verursacht. Im Fall des Frequenzumrichters ist ein Austausch notwendig, um einen Ausfall dessen vorzubeugen. Der Austausch der PV-Speicher (Blei-Gel Akkumulatoren) ist notwendig da die Speicherkapazität nicht mehr gegeben ist. Der Zeitpunkt des Austausches ergibt sich aus dem Diagramm zur Zyklensfestigkeit des Blei-Gel-Akkumulators bei einer regelmäßigen täglichen Entladung auf 50 % der Gesamtkapazität (DOD 50%), siehe dazu Abbildung 4.2.

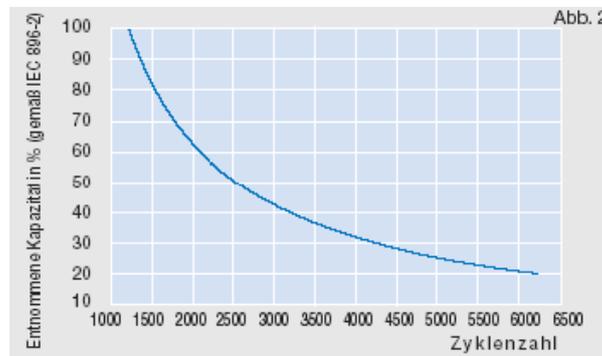


Abbildung 4.2.: Zyklensfestigkeit des Blei-Gel-Akkumulators (Sonnenschein dryfit solar Block) [58]

Eine regelmäßige tägliche Entladung auf 50 % der Gesamtkapazität (DOD 50%) im Jahr, entspricht nach 7 Jahren einer Zykluszahl von 2500 Zyklen.

Rentabilität:

Die Rentabilität R einer Investition ist ein Maß für die Verzinsung, somit ein Maß für die Wirtschaftlichkeit einer Investition über eine gewisse Nutzungsdauer n . Die Rentabilität ist wie folgt definiert, siehe Gleichung (4.10) [55] [56].

$$R = \frac{C}{I_0} \quad (4.10)$$

Amortisationsdauer:

Die Amortisationsdauer sagt nichts über die Wirtschaftlichkeit einer Investition aus, sondern gibt dem Unternehmer Aufschluss bzgl. der Liquidität seiner Investition, d.h. ab wann die Investition Gewinn erzeugt. Eine Investition hat sich Amortisiert, sobald die

Summe der Erlöse die Investitionskosten übersteigen, das nennt man auch Break-Even-Point, siehe Gleichung (4.11) [55] [56].

$$T_A \text{ aus der Gleichung: } \sum_{t=0}^{T_A} (E_t - A_t) \frac{1}{(1 + i_{Real})^t} = I_0 \quad (4.11)$$

4.1.4. Emissionen

Für die Berechnung der Emissionen bzw. der Emissionseinsparungen stützt man sich auf das Handbuch der Europäischen Umweltagentur (EEA) [59]. Berechnet werden Treibhausgasemissionen [in kg] von Kohlendioxid CO_2 , Methan CH_4 und das für die Ozonschicht schädliche Gas NO_x , sowie gesundheitsschädliche Feinstaubemissionen PM, diese sind von der jährlichen Kraftstoffeinsparung $V_{Einsparung} = V_{Generator} - V_{Gewicht}$ in l und Schadstofffaktoren [59], abhängig. In Tabelle 4.2 sind die Schadstofffaktoren, zur Berechnung der Emissionen in kg, dargestellt.

Tabelle 4.2.: Faktoren zur Berechnung der Emissionen in kg [59]

Schadstoff	Schadstofffaktor	Zahlenwert
CO_2	k_{CO_2}	3,14
Methan	k_{Methan}	33,37/1000
Feinstaub	$k_{Feinstaub}$	0,94/1000
NO_x	k_{NO_x}	1,92/1000

Die Berechnung der Emissionen in kg erfolgt nach den Gleichungen (4.12) bis (4.15) [59].

$$CO_2\text{-Einsparung} = V_{Einsparung} \cdot \rho_{Diesel} \cdot k_{CO_2} \quad (4.12)$$

$$\text{Methan-Einsparung} = V_{Einsparung} \cdot \rho_{Diesel} \cdot k_{Methan} \quad (4.13)$$

$$\text{Feinstaub-Einsparung (PM}_{2,5}\text{)} = V_{Einsparung} \cdot \rho_{Diesel} \cdot k_{Feinstaub} \quad (4.14)$$

$$NO_x\text{-Einsparung} = V_{Einsparung} \cdot \rho_{Diesel} \cdot k_{NO_x} \quad (4.15)$$

4.2. Ökonomische Bewertung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Konzepte AC und DC, wie zu Beginn dieses Kapitels 4 schon angeführt, dargestellt und erklärt. Die theoretischen Grundlagen dazu findet man in Abschnitt 4.1, siehe Investitionskostenrechnung. Die Bewertung wird für jedes Konzept anhand folgender Kennwerte durchgeführt:

- Kapitalwert C in €
- Amortisationsdauer T_A in Jahre
- Rentabilität R

4.2.1. Bewertung Konzept AC

Für Konzept AC werden folgende Annahmen getroffen, siehe dazu Abbildung 4.3 und Tabelle 4.3:

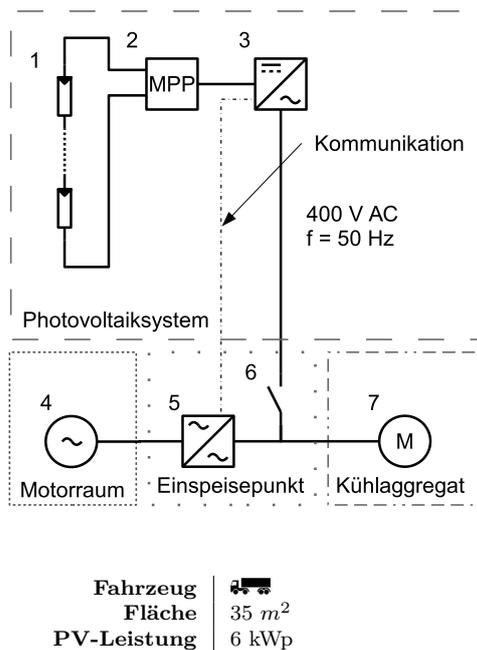


Abbildung 4.3.: Grundannahmen Konzept AC

Tabelle 4.3.: Annahmen Konzept AC

Land	Spanien
Transport	Fernverkehr
Anlagenleistung	6 kWp
Investitionskosten	
Photovoltaikmodule	6.600 €
Akkumulatoren	-
Wechselrichter	4.600 €
Laderegler	-
Frequenzumrichter	1.200 €
Montage	2.600 €
Gesamt	15.000 €
Laufende Kosten	0,25 %
Austausch	
Wechselrichter	10. Jahr
Frequenzumrichter	10. Jahr
Akku	-
Realzinssatz	2,5 %
Nutzungsdauer	20 Jahre
Kraftstoffpreis	1,38 €
Ertragsminderung	0,10 %

Die Bewertung für den Ferntransport wird in Spanien durchgeführt. Das betreffende Fahrzeug, ein LKW mit Sattelanhänger, hat eine Dachfläche von 35 m². Darauf sind

kristalline Dünnschicht Module (Shenzhen Shine Solar Co. Ltd) angebracht, welche unter Standardtestbedingungen (STC) , eine Leistung von 6 kWp erreichen [40]. Der dreiphasige Wechselrichter (SMA: Tripower 7000 TL-20) und der Frequenzumrichter (ABB: 18,5KW ACS310-03E-41A8-4) speisen nach erfolgter Synchronisation in das Energienetz des Kühlaggregates (Frigoblock: HK25 SL) ein. Die Investitionskosten betragen gerundet 15.000 €. Für die laufenden Kosten werden für Versicherung, Wartung und Überprüfung 0,25 % der Investitionskosten angenommen. Die beiden Stromrichter müssen altersbedingt im 10. Jahr ausgetauscht werden. Der Realzinssatz beträgt 2,5 % p.a., die Nutzungsdauer 20 Jahre, Kraftstoffpreis 1,38 €/l (Stand 14.2.2014) [21] und die jährliche Ertragsminderung der PV-Module 0,10 % bezogen auf die Anfangsleistung.

Abbildung 4.4 zeigt die jährlichen Barwerte, auch als Einnahmen zu sehen, und den Kapitalwert der Anschaffung nach 20 Jahren Nutzungsdauer.

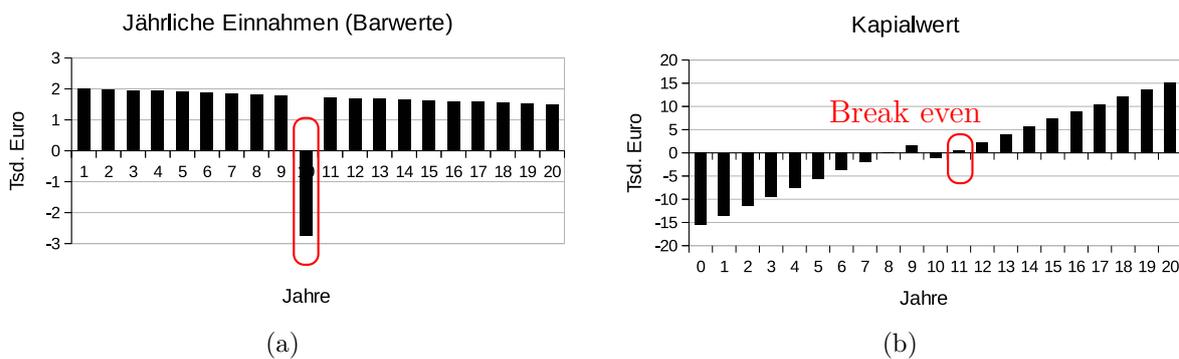


Abbildung 4.4.: Konzept AC (a) Barwerte & (b) Kapitalwert

In Abbildung (a) erkennt man den Austausch der Stromrichter, der zu einem negativen Barwert im Jahr 10. führt, gekennzeichnet durch die rote Umrandung. Nach 11 Jahren amortisiert sich die Anschaffung, sie ist „Break even“, zu sehen in Abbildung (b) und durch eine rote Umrandung gekennzeichnet. Tabelle 4.4 zeigt die Kennzahlen in der Übersicht.

Tabelle 4.4.: Ergebnisse für Konzept AC

Kapitalwert (20 Jahre)	15.700 €
Amortisationsdauer	11 Jahre
Rentabilität	1,05

Der Kapitalwert beträgt nach 20 Jahren Nutzungsdauer 15.700 €, also nur geringfügig mehr als man zu Investitionsbeginn investieren würde. Somit ergibt sich eine Rentabilität von 1,05.

bilität von 1,05, was relativ niedrig ist. Die Amortisationsdauer hingegen ist im Fall Spanien, im Vergleich mit der gesetzlichen Abschreibung (Afa) durchaus noch vertretbar. Die Nutzungsdauer für LKW ist per Gesetz in Österreich im Allgemeinen nicht festgelegt. Hierbei ist es gesetzlich zulässig Afa-Tabellen aus Deutschland zu verwenden. In Deutschland beträgt die gesetzlich festgelegte maximale Nutzungsdauer für Lastkraftwagen (Lkw), Sattelschlepper, Kipper 9 Jahre und für PKW 6 Jahre [60]. In Spanien beträgt die Afa für Kühlfahrzeuge 5,5 - max. 12 Jahre [61].

4.2.2. Bewertung Konzept DC

Für Konzept DC werden folgende Annahmen getroffen, siehe dazu Abbildung 4.5 und Tabelle 4.5:

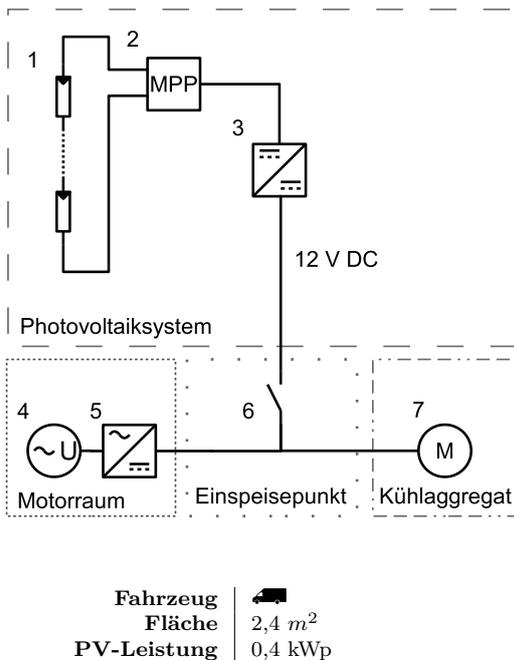


Tabelle 4.5.: Annahmen Konzept DC

Land	Spanien
Transport	Nahverkehr
Anlagenleistung	0,4 kWp
Investitionskosten	
Photovoltaikmodule	450 €
Akkumulatoren	-
Wechselrichter	-
Laderegler	-
Frequenzumrichter	-
DC-DC-Steller + MPP-Tracker	120 €
Montage	680 €
Gesamt	1.250 €
Laufende Kosten	0,25 %
Austausch	-
Realzinssatz	2,5 %
Nutzungsdauer	20 Jahre
Kraftstoffpreis	1,38 €
Ertragsminderung	0,10 %

Abbildung 4.5.: Grundannahmen Konzept DC

Die Bewertung wird für den Ferntransport in Spanien durchgeführt. Das betreffende Fahrzeug, ein LKW mit Sattelanhänger, hat eine Dachfläche von 35 m². Darauf sind kristalline Dünnschicht Module (Shenzhen Shine Solar Co. Ltd) angebracht, welche unter Standardtestbedingungen (STC), eine Leistung von 0,4 kWp erreichen [40]. Der DC-DC-Steller & MPP-Tracker (Westech Solar OHG: MPPT20-Westtech) speist in das Energienetz des Kühlaggregates (Carrier: Neos) ein. Die Investitionskosten betragen gerundet

1.250 €. Für die laufenden Kosten werden für Versicherung, Wartung und Überprüfung 0,25 % der Investitionskosten angenommen. Der Realzinssatz beträgt 2,5 % p.a., die Nutzungsdauer 20 Jahre, Kraftstoffpreis 1,38 €/l (Stand 14.2.2014) [21] und die jährliche Ertragsminderung der PV-Module 0,10 % bezogen auf die Anfangsleistung.

Abbildung 4.6 zeigt die jährlichen Barwerte, auch als Einnahmen zu sehen, und den Kapitalwert der Anschaffung nach 20 Jahren Nutzungsdauer.

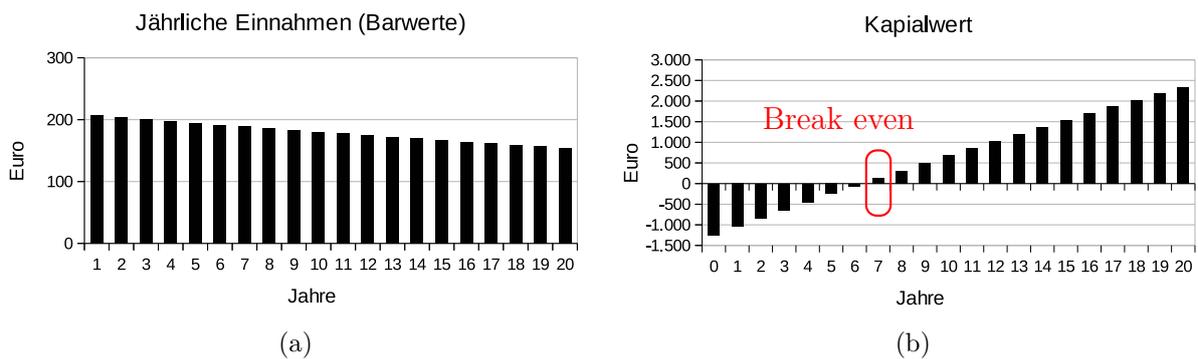


Abbildung 4.6.: Konzept DC (a) Barwerte & (b) Kapitalwert

In Abbildung (a) erkennt man die jährlichen positiven Barwerte. Nach 7 Jahren amortisiert sich die Anschaffung, sie ist „Break even“, zu sehen in Abbildung (b) und durch eine rote Umrandung gekennzeichnet. Tabelle 4.6 zeigt die Kennzahlen in der Übersicht.

Tabelle 4.6.: Ergebnisse für Konzept DC

Kapitalwert (20 Jahre)	2.300 €
Amortisationsdauer	7 Jahre
Rentabilität	1,9

Der Kapitalwert beträgt nach 20 Jahren Nutzungsdauer 2.300 €, schon deutlich mehr als man zu Investitionsbeginn investieren würde. Somit ergibt sich eine Rentabilität von 1,9, was einem guten Wert entspricht. Die Amortisationsdauer ist im Vergleich mit der gesetzlichen Abschreibung (Afa) ebenfalls in Ordnung. Die Nutzungsdauer für LKW ist per Gesetz in Österreich im Allgemeinen nicht festgelegt. Hierbei ist es gesetzlich zulässig Afa-Tabellen aus Deutschland zu verwenden. In Deutschland beträgt die gesetzlich festgelegte maximale Nutzungsdauer für Lastkraftwagen (Lkw), Sattelschlepper, Kipper 9 Jahre und für PKW 6 Jahre [60]. In Spanien beträgt die Afa für Kühlfahrzeuge 5,5 - max. 12 Jahre [61].

4.3. Ökologische Bewertung

Durch die Einspeisung von PV-Strom in das Energiesystem der Kühlaggregate werden Treibhausgasemissionen von Kohlendioxid CO_2 , Methan CH_4 und das für die Ozon-schicht schädliche Gas NO_x , sowie gesundheitsschädliche Feinstaubemissionen PM vermieden. In Tabelle 4.7 werden die Emissionseinsparungen pro Jahr und nach 20 Jahren Nutzungsdauer dargestellt.

Tabelle 4.7.: Eingesparte Emissionen der unterschiedlichen Konzepte AC und DC für eine Nutzungsdauer von 20 Jahren [59]

Emissionen	Konzepte		Einheit
	AC	DC	
CO ₂ -Einsparung:	4	0,4	t/a
CO ₂ -Einsparung nach 20 Jahren:	80	8	t
Methan-Einsparung:	2,5	0,25	kg/a
Methan-Einsparung nach 20 Jahren:	50	5	kg
Feinstaub-Einsparung (PM _{2,5}):	1,2	0,12	kg/a
Feinstaub-Einsparung nach 20 Jahren:	24	2,4	kg
NO _x -Einsparung:	43	4,3	kg/a
NO _x -Einsparung nach 20 Jahren:	850	85	kg

Die Emissionseinsparungen durch das Konzept AC sind schon in einer nicht zu vernachlässigenden Größe. Im Vergleich dazu, im emittiert ein durchschnittlicher Mittelklasse-Pkw mit Dieselmotor im gesamten Lebenszyklus pro Personenkilometer, das Äquivalent zu Tonnenkilometer, 145,7 Gramm CO_2 . Bei einer angenommenen Fahrleistung von 15.000 km im Jahr, ergibt das eine jährliche Emission von ca. 2.200 kg CO_2 [62].

5. Schluss

Die zu Beginn dieser Arbeit (Kapitel 1.2) gestellten Forschungsfragen werden hier diskutiert und zusammengefasst.

- **Sind Photovoltaik-Energieerzeugungsanlagen zur Energieeinsparung im gekühlten Straßengütertransport markttechnisch relevant?**

Der hohe LKW-Anteil im Güter- und Nahrungsmitteltransportsektor innerhalb der EU von 75 %, in Spanien und Griechenland über 90 %, zeigt die Abhängigkeit von dem Transportmittel und ist für sich ein Indiz für ein großes Marktpotential. Am Beispiel Spanien sind das ca. eine Million Kühl-LKW. Durch den hohen Wettbewerb im Transportsektor ist der Preisdruck enorm, wobei Transportunternehmen lediglich beim Kraftstoffverbrauch Einsparungen machen können. Zudem wird eine Kraftstoffpreissteigerung auf 2 €/l in den nächsten 5 bis 10 Jahren erwartet. Somit ist es möglich durch den Einsatz von Photovoltaiktechnologie den Kraftstoffverbrauch von Kühl-LKW zu reduzieren. Die Photovoltaiktechnologie bietet hohe Kompatibilität zu den meisten der aktuell eingesetzten Kühltechnologien und enormes Potential für Neuentwicklungen in Verbindung mit neuen Technologien (Schukey- und Zeolith-Technologie).

- **Wie sind Photovoltaik-Energieerzeugungsanlagen im gekühlten Straßengütertransport technisch/rechtlich umsetzbar?**

Durch die **hohe Kompatibilität** zu den meisten der aktuell eingesetzten Kühltechnologien (**6 von 11 Kühlsysteme sind kompatibel**), ergeben sich mehrere Konzepte für die technische Umsetzung. Man unterscheidet zwischen Konzepten zur Nachrüstung bestehender Kühlaggregate durch die Photovoltaiktechnologie (**Nachrüstungen**) und Konzepten für komplette Neuaufbauten von Kühlsystemen in Verbindung mit neuen Technologien (**Neuaufbauten**).

Hierzu ist vorweg festzuhalten, dass die **Photovoltaiktechnologie mit dem derzeitigen Stand der Technik nur unterstützend wirken** kann und **nicht ohne Hilfsquelle**, meist ein Synchrongenerator, auskommen kann. Die Betriebssicherheit der

Kühlaggregate muss gesetzlich gewährleistet sein (Kühlkette). Der Synchrongenerator wird von der Verbrennungskraftmaschine (VKM) des Kühltransporters angetrieben. Die meisten VKM arbeiten in einem weiten **Drehzahlbereich von $n_{VKM} = 600 - 2000$ U/min bei LKW**, dies hat einen weiten **variablen Speisefrequenzbereich des Inselsystems von $f_{Gen} = 27,7$ Hz bis $92,6$ Hz und unterschiedliche Ausgangsspannungen** zur Folge. Für handelsübliche Wechselrichter stellt dies ein Problem dar.

Für Nachrüstungen von bestehenden Kühlaggregaten, die sich in Konzepte für drehstrom-gespeiste Kühlsysteme (AC-Kühlsysteme) und gleichstrom-gespeiste Kühlsysteme (DC-Kühlsysteme) einteilen lassen, wurden vier Konzepte entwickelt. Für **AC-Kühlsysteme** hat man drei **Konzeptvarianten (Konzept A, B & C)** zur Auswahl, für **DC-Kühlsysteme** eine (**Konzept D**). Bei der Umsetzung einer Lösung für AC-Kühlsysteme steht man vor dem zuvor beschriebenen Problem. Als technisch vielseitigste Lösung drängt sich Konzept C (PV-Stromeinspeisung in den Gleichspannungszwischenkreis eines Frequenzumrichters) in den in den Vordergrund. Damit ließe sich sogar eine Rückspeisung der überschüssigen Energie aus dem Gleichspannungszwischenkreis ermöglichen. Es lässt sogar die Möglichkeit einer Neuentwicklung eines Kühlsystems mit extern zugänglichen Anschlüssen zum Gleichspannungszwischenkreis offen. Konzept B hat den Vorteil, dass es großteils mit handelsüblichen Komponenten aus der Photovoltaikbranche umgesetzt werden kann. Im Gegensatz dazu ist Konzept A mit allen sechs Kühlsystemen kompatibel.

Möchte man eine **Neuentwicklung** anstreben, bietet die **Schukey-Technologie** durch ihre simple, aber effektive Technik das **größte Potential, zur Energieeinsparung bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit**.

Zur rechtlichen Umsetzung, kommen in diesem Fall die **EU Richtlinie 2007/46/EG** und **Verordnung (EG) Nr. 661/2009** zur Anwendung, wobei die EU Richtlinie 2007/46/EG den allgemeinen Rahmen für die Genehmigung von Fahrzeugen vorgibt und Verordnung (EG) Nr. 661/2009 speziell auf die einzuhaltenden Sicherheitsbestimmungen eingeht. Diese stellen die rechtliche Grundlage für den Anbau eines Photovoltaiksystems an einem KFZ dar.

Für die rechtliche Genehmigung der **selbstständig technischen Einheit**, trifft bei Photovoltaiksystemen zu, gibt es zwei Möglichkeiten. Zum Einen durch eine sogenannte **EG-Typengenehmigung** für einen bestimmten Fahrzeugtyp. Man hat jedoch den

Nachteil, dass man für jeden Fahrzeugtyp eine gesonderte Genehmigung benötigt. Zum Anderen gibt es die Möglichkeit der **Deklaration des Photovoltaiksystems als Ladung am Transportfahrzeug**. Dazu benötigt man lediglich ein Gesamtgutachten einer amtlichen Prüfstelle.

Laut Verordnung (EG) Nr. 661/2009 und dem TÜV Österreich sind **keine Aufprallversuche (Chrashtests) erforderlich**.

- **Sind Photovoltaik-Energieerzeugungsanlagen im gekühlten Straßengütertransport wirtschaftlich und ökologisch relevant?**

Eingangs sei darauf hingewiesen, dass die **Betrachtungen „Best-Case“-Szenarien** darstellen, das bedeutet, dass die Ergebnisse den besten Fall im Zusammenwirken von Photovoltaik-Energieertrag und Transportzeitpunkt darstellen. Der **größte Photovoltaik-Energieertrag ist in Spanien zu erwarten**, da es die größte mittlere jährliche solare horizontale Einstrahlung aufweist. Ergebnisse für andere Länder würden geringer ausfallen. Es wird außerdem angenommen, dass die Transporte nur bei Tag stattfinden.

Die Überprüfung der Wirtschaftlichkeit wird an den beiden Konzepten B, stellvertretend für AC-Kühlsysteme, und D, für DC-Kühlsysteme durchgeführt. **Konzept B** wird für den Ferntransport bewertet: Es **amortisiert sich nach 11 Jahren** und weist eine relativ niedrige **Rentabilität von 1,05** auf. **Konzept D** wird für den Nahtransport bewertet: Es hat bereits **nach 7 Jahren den „Break even Point“** erreicht und weist eine relativ hohe **Rentabilität von 1,9** auf. Obwohl Konzept D, verglichen mit Konzept B, nur einen geringen Photovoltaik-Ertrag liefert, können die guten Kennzahlen durch die höhere Einschaltdauer des Kühlaggregates erklärt werden. **Beide Konzepte sind ohne Energiespeicher ausgestattet**, da sich bei der Bewertung herausgestellt hat, dass der Einsatz von Blei-Gel-Akkumulatoren wegen ihrer geringen Zyklfestigkeit zu einem schlechteren Ergebnis führen würde. Vergleicht man die Amortisationsdauer mit den in einigen Ländern gesetzlichen Nutzungsdauern (Afa), so ist Konzept D durchaus wirtschaftlich interessant. In Spanien beträgt die Nutzungsdauer für Kühlfahrzeuge 5,5 bis maximal 12 Jahre.

Durch die Einspeisung von Photovoltaik-Strom in das Energiesystem der Kühlaggregate werden klimaschädliche Treibhausgase (CO_2 , CH_4), die Ozonschicht schädigende Gase (NO_x), sowie gesundheitsschädliche Feinstaubemissionen (PM) vermieden. Durch den hohen Anteil an LKW im gekühlten Straßengütertransport ist dies durchaus relevant.

Ausblick:

Die Wirtschaftlichkeit der Umsetzung könnte bei den gegebenen Rahmenbedingungen durch kostengünstige und zyklenfestere Energiespeicher erhöht werden. Die nächsten Schritte wären, die berechnete Energieeinsparung durch Vergleichsmessungen zu verifizieren, und die Energieeinsparung durch Neuentwicklungen abzuschätzen.

Literaturverzeichnis

- [1] IPCC ; STOCKER, T.F., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S.K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX AND P.M. MIDGLEY: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, 2013 (5). – Forschungsbericht. – 1535 S.
- [2] EUROPEAN COMMISSION: Communication from the commission to the council, the european parliament, the european economic and social committee and the committee of regions - Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius The way ahead for 2020 and beyond / EUROPEAN COMMISSION. Brussels, Januar 2007. – Forschungsbericht
- [3] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Strategie Europa 2020. Version: März 2010. http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/index_de.htm, Abruf: 2014-04-14. Brüssel, März 2010. – Forschungsbericht
- [4] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY: Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2012 - Tracking progress towards Kyoto and 2020 targets. Copenhagen, 2012. – Forschungsbericht
- [5] SOLARFEEDS: *T. Boone Pickens Wants Natural Gas in All Long-Haul Trucks.* <http://www.solarfeeds.com/t-boone-pickens-wants-natural-gas-in-all-long-haul-trucks/>, Abruf: 2014-06-04
- [6] SOLARIONAG: *IAA 2010 - Photovoltaik für Kühlfahrzeuge.* <http://www.solarion.net/presse/archiv/willkommen-im-pressearchiv/r-archiv-a-174.html>. Version: 2010, Abruf: 2013-05-16
- [7] EUROPEAN COMMISSION: *Eurostat Database Transport.* <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/transport/data/database>. Version: 2014, Abruf: 2013-05-13

- [8] INLAND TRANSPORT COMMITTEE: Classification system for transport statistics (NST 2007) / ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. Version: Mai 2008. <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2008/wp6/ECE-TRANS-WP6-155a1e.pdf>, Abruf: 2014-04-10. 2008 (59). – Forschungsbericht. – 3 S.
- [9] A.KIRKWOOD.SPENCE: *Karte von Südeuropa*. http://de.wikipedia.org/wiki/S%C3%BCdliches_Europa. Version: 2012, Abruf: 2013-05-14
- [10] CARRIER TRANSICOLD EUROPE: *Internetpräsenz des Unternehmens Carrier Transicold Europe*. <http://www.carriertransicold.eu/de/index.php?cid=12>, Abruf: 2014-06-05
- [11] THERMO KING: *Internetpräsenz des Unternehmens Thermo King*. <http://europe.thermoking.com/de/>, Abruf: 2014-06-05
- [12] FRIGOBLOCK: *Internetpräsenz des Unternehmens FRIGOBLOCK - die leistungsstärksten Fahrzeugkältemaschinen*. <http://www.frigoblock.com/>, Abruf: 2013-06-03
- [13] THERMO KING: *Thermo King - CryoTech*. <http://europe.thermoking.com/cryotech/de/>, Abruf: 2014-06-05
- [14] ZEO-TECH ZEOLITH TECHNOLOGIE GMBH: *Internetpräsenz des Unternehmens Zeo-tech*. <http://www.zeo-tech.de>, Abruf: 2013-06-12
- [15] THERMODYNA GMBH: *Internetpräsenz des Unternehmens Thermodyna*. <http://www.thermodyna.de/>, Abruf: 2013-10-06
- [16] GROTE, Karl-Friedrich ; FELDHOUSEN, Jörg: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. XLVI, 1938. 2012 (23. Aufl.). – ISBN 978-3-642-17306-6
- [17] BERGHOLTER, Volker: *Markteintritt der Schukey-Technologie - Business Plan Executive Summary 2013-2019 / Thermodyna Maschinen und Anlagen GmbH*. Hamburg, 2012. – Studie
- [18] BERGHOLTER, Volker: *Fahrzeugklimatisierung mit Schukey-Technologie - Luft statt Chemie / Thermodyna Maschinen und Anlagen GmbH*. Version: 2010. <http://thermodyna.com/download.html?file=files/site/content/download/Mobile-Kaelte-und-Fahrzeugklimatisierung-mit-Schukey-Technologie.pdf>. Hamburg, 2010. – Forschungsbericht

- [19] ZEO-TECH ZEOLITH TECHNOLOGIE GMBH: *Zyklus Adsorption/Desorption*. <http://www.zeo-tech.de/index.php/technologie-2/zyklus-adsorption-desorption>, Abruf: 2014-06-05
- [20] LEBENSMITTEL AG - STEIERMARK: *Transportprofile für Nah- und Regionaltransport*. 2013
- [21] AUTOMOBILCLUB VON DEUTSCHLAND E. V.: *AvD.de - Preise für Dieselmotorkraftstoff*. <https://www.avd.de/wissen/infothek/rund-um-den-kraftstoff/benzinpreise-in-europa/preise-fuer-dieselmotorkraftstoff/>, Abruf: 2014-06-07
- [22] REXEIS, Martin: *Verbrauchsabschätzung - Simulation des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Graz*. 2013. – Forschungsbericht
- [23] STURM, P. J. ; REXEIS, Martin: *Energy and fuel consumption from heavy duty vehicles: COST 346 - final report including final report of Working Group A*. Brussels, 2005. – Forschungsbericht
- [24] EUROPÄISCHE KOMMISSION ; EASME - EXECUTIVE AGENCY FOR SMALL AND MEDIUM-SIZED ENTERPRISES: *Kurswechsel - Marco Polo auf neuen Wegen*. Version: 2009. <http://bookshop.europa.eu/de/kurswechsel-pbEA7809868/>. 2009. – Forschungsbericht
- [25] IRU: *Comparative Analysis of Energy Consumption and CO Emissions of Road Transport and Combined Transport Road/Rail / International Road Transport Union (IRU)*. Version: 2002. http://www.iru.org/cms-filesystem-action?file=PPP/en_Comparative-study-CO2.pdf, Abruf: 2013-07-18. 2002 (IRU I-0021-1(e)). – Forschungsbericht
- [26] MEYER-RÜHLE, Olaf: *Statistical coverage and economic analysis of the logistics sector in the EU (SEALS) / ProgTrans for European Commission*. – Forschungsbericht. – Dezember 2008 S.
- [27] STATISTIK AUSTRIA: *Energiepreise*. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/preise/energiepreise/index.html, Abruf: 2014-06-07
- [28] WELT: *Zeitungsartikel Die Welt - Studie sieht Spritpreis bald über zwei Euro*. In: *Welt Online* (2013), März. <http://www.welt.de/wirtschaft/energie/article114745497/Studie-sieht-Spritpreis-bald-ueber-zwei-Euro.html>, Abruf: 2013-07-18

- [29] ROBERT BOSCH GMBH: *Systeme für Hybridfahrzeuge von Bosch*. http://www.bosch-kraftfahrzeugtechnik.de/de/de/powertrain/powertrain_systems_for_commercial_vehicles_1/systems_for_hybrid_vehicles_20/systems_for_hybrid_vehicles_21.html, Abruf: 2013-06-18
- [30] SIEMENSAG: *Traction Module - Hybridantriebe - Siemens*. <http://www.automation.siemens.com/mcms/large-drives/de/hybridantriebe/traction-module/Seiten/traction-module.aspx>, Abruf: 2013-06-19
- [31] EUROTRANSPORTMEDIA VERLAGS- UND VERANSTALTUNGS-GMBH: *Iveco Eurocargo Hybrid 75E16: Kostenkiller für die Stadt*. <http://www.eurotransport.de/test/iveco-eurocargo-hybrid-75E16-kostenkiller-fuer-die-stadt-649411.html>, Abruf: 2013-06-19
- [32] SIEMENSAG: *Elektrifizierter Fernverkehr eHighway - Mobility - Siemens*. <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/de/fernverkehr/strassenverkehr/elektrifizierter-fernverkehr-ehighway/seiten/elektrifizierter-schwerlastverkehr-ehighway.aspx>, Abruf: 2013-06-19
- [33] SOLAR ELECTRICAL VEHICLES: *Internetpräsenz von Solar Electrical Vehicles*. <http://www.solarelectricalvehicles.com/>. Version: 2014, Abruf: 2014-06-16
- [34] FDESIGN BERLIN: *Photovoltaik für LKW*. <https://www.yumpu.com/de/document/view/132157/photovoltaik-fur-lkw>, Abruf: 2014-06-07
- [35] FDESIGN BERLIN: *fdesign berlin - Truck Solar*. <http://fdesignberlin.de/projects/trucksolar/>, Abruf: 2014-05-19
- [36] SUNPLUGGED GMBH: *Internetpräsenz von Sunplugged GmbH: Sunplugged Photovoltaics | Flexible Photovoltaics for Buildings, devices and vehicles*. <http://sunplugged.at/>. Version: 2014, Abruf: 2014-06-12
- [37] PVXCHANGE GMBH: *Internetpräsenz von pvXchange GmbH - Preisindex von Solarmodule in Wp/Euro*. <http://www.pvxchange.com/priceindex/Default.aspx?langTag=de-DE>. Version: 2014, Abruf: 2014-06-09
- [38] WESSELAK, Viktor ; VOSWINCKEL, Sebastian: *Photovoltaik - Wie Sonne zu Strom wird*. Nordhausen, Deutschland, 2012 <http://www.springer.com/engineering/energy+technology/book/978-3-642-24296-0>. – ISBN 978–3–642–24297–7

- [39] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY: *Internetpräsenz von NREL: National Center for Photovoltaics*. <http://www.nrel.gov/ncpv/>, Abruf: 2014-06-09
- [40] SHENZHEN SHINE SOLAR CO.,LTD: *Internetpräsenz von Shenzhen Shine Solar Co.,Ltd*. http://www.shinesolartech.com/?m=offer&s=offer_detail&fid=100604&id=240, Abruf: 2014-06-09
- [41] ALTADEVICES, INC: *Internetpräsenz von Alta Devices - Delivering portable solar power that can be embedded into other materials*. <http://www.altadevices.com/technology-overview.php>, Abruf: 2014-06-09
- [42] FRIGOBLOCK GROSSKOPF GMBH: *Technische Daten: Betriebsbereich Drehstromgeneratorsysteme*. <http://www.frigoblock.com/produkte/generatorsysteme/drehstromgeneratorsysteme.html>, Abruf: 2014-06-10
- [43] SMA SOLAR TECHNOLOGY AG: *Technische Daten: Betriebsbereich SUNNY TRI-POWER 5000TL - 12000TL*. <http://www.sma.de/produkte/solarwechselrichter/sunny-tripower-5000tl-12000tl.html#Technische-Daten-79869>, Abruf: 2014-06-10
- [44] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Richtlinie 2007/46/EG: EG-Typgenehmigung für Kraftfahrzeuge*. http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/motor_vehicles/motor_vehicles_technical_harmonisation/n26100_de.htm. Version: 2007, Abruf: 2013-12-12
- [45] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Verordnung (EG) Nr. 661/2009 : Allgemeine Sicherheit von Kraftfahrzeugen*. http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/motor_vehicles/motor_vehicles_technical_harmonisation/mi0053_de.htm. Version: 2009, Abruf: 2013-12-12
- [46] HOEPKE, Erich ; BREUER, Stefan ; APPEL, Wolfgang ; BRÄHLER, Hermann ; DAHLHAUS, Ulrich ; ESCH, Thomas ; KOPP, Stephan ; RHEIN, Bernd: *Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten*. 7., überarb. Aufl. 2012. Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 3834817953
- [47] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie 2014/30/EU: Elektromagnetische Verträglichkeit von Elektro- und Elektronikprodukten – EMV*. http://www.ce-richtlinien.eu/richtlinien/EMV/Richtlinie/RL_2014_30_EU_EMV.pdf. Version: Februar 2014, Abruf: 2014-10-05
- [48] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG (CEN): *EN 60204: Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen*. 2007

- [49] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG (CEN): *EN 60947-5: Niederspannungsschaltgeräte*. 2004
- [50] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Richtlinie 2001/92/EG (Anpassung der Richtlinie 92/22/EWG): Sicherheitsscheiben und Werkstoffe für Windschutzscheiben in Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern und der Richtlinie 70/156/EWG des Rates über die Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger an den technischen Fortschritt. Version: 2001. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001L0092&qid=1402487355181&from=DE>. 2001. – Forschungsbericht
- [51] LAMPEN, Alfred: Grundsätze der Ladungssicherung lt. VDI-Richtlinien 2007 / PHK Lampen. Version: 2013. https://www.wko.at/Content.Node/branchen/oe/TransportVerkehr/Ladungssicherung_Grundsatz.pdf, Abruf: 2013-09-16. Niedersachsen, Deutschland, 2013. – Forschungsbericht
- [52] EUROPÄISCHE UNION: *PV potential estimation utility*. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>. Version: August 2013, Abruf: 2013-08-27
- [53] LUNANOVA, Marco: *Optimierung von Nebenaggregaten: Massnahmen zur Senkung der CO₂-Emission von Kraftfahrzeugen*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009. – ISBN 978-3-8348-9603-2
- [54] DR. COYLE, Michael: *Effects of Payload on the Fuel Consumption of Trucks* / Department of Transport DfT. 2007. – Forschungsbericht
- [55] HEUCK, Klaus ; DETTMANN, Klaus-Dieter ; SCHULZ, Detlef: *Elektrische Energieversorgung - Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Deutschland*, 2010 (9). <http://www.springer.com/springer+vieweg/elektrotechnik/elektronik+%26+mechatronik/book/978-3-8348-1699-3>. – ISBN 978-3-8348-2174-4
- [56] BAUER, Ulrich: *Institut für Betriebswirtschaftslehre und Betriebssoziologie der TU Graz - Betriebswirtschaftslehre*. Graz, Österreich, 2010
- [57] FISHER, Irving: *The theory of interest*. New York, 1930
- [58] ELEKTRO.TEC GMBH: *Typenübersicht der Sonnenschein dryfit solar Batterien - Eine Marke von EXIDE Technologies*. <http://www.elektrotec-berlin.de/produkte/dryfitsolar/html/solar.htm>. Version: 2014, Abruf: 2014-06-16

- [59] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY: *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009*. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>. Version: 2009, Abruf: 2013-05-20
- [60] BUNDESMINISTERIUM FÜR FINANZEN, DEUTSCHLAND: *Aktuelle AfA-Tabelle Deutschland*. <http://www.steuer-schutzbrieft.de/steuertipp-rubriken/steuer-tipps/artikel/aktuelle-afa-tabelle.html>. Version: 2014, Abruf: 2014-06-12
- [61] BUNDESMINISTERIUM FÜR FINANZEN, SPANIEN: *Tabla de coeficientes de amortizacion - España*. <http://www.kontables.com/media/tabla.htm#ElementosComunes>. Version: 2014, Abruf: 2014-06-12
- [62] VCÖ - MOBILITÄT MIT ZUKUNFT: *Zahlen und Fakten - Mobilität mit Zukunft*. <http://www.vcoe.at/de/publikationen/vcoe-magazin/magazindetails/artikel/items/zahlen-und-fakten?print=true>, Abruf: 2014-06-12

A. Anhang

A.1. Transportprofile

Abbildung A.1 stellt ein typisches Regionaltransportprofil eines Kühl-LKW dar.

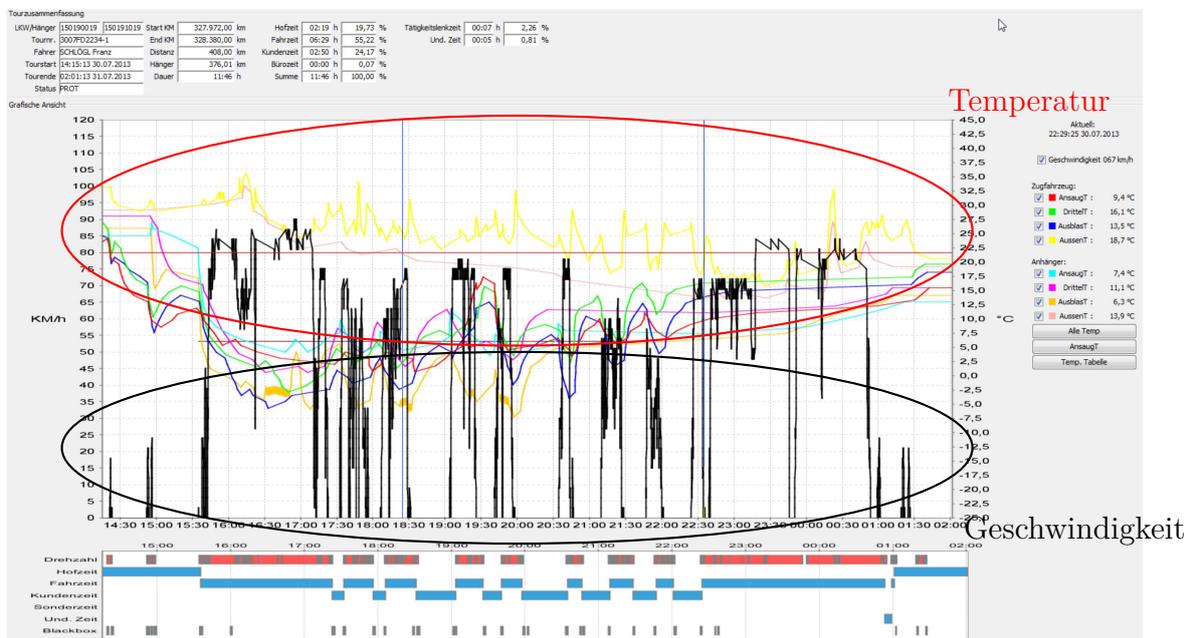


Abbildung A.1.: Typisches Transportprofil eines Regionaltransports (Temperaturverlauf in Rot und Geschwindigkeitsverlauf in Schwarz über die Zeit aufgetragen) [20]

Synthetische Fahrprofile VECTO 1.3.1.1 für das Regional- und Ferntransportprofil sind in den Abbildungen A.2 und A.3 dargestellt. Dabei ist der Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf über die Simulationsdauer aufgetragen.

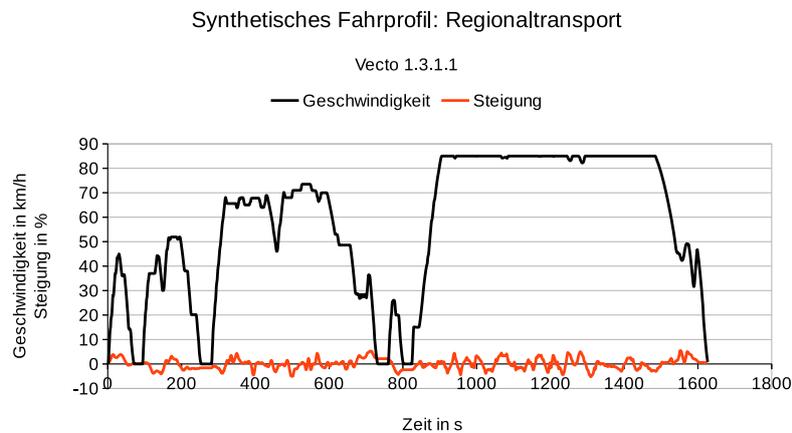


Abbildung A.2.: Synthetische Fahrprofil VECTO 1.3.1.1 Regionaltransport mit Geschwindigkeitsverlauf in Schwarz und Steigungsverlauf in Rot [22]

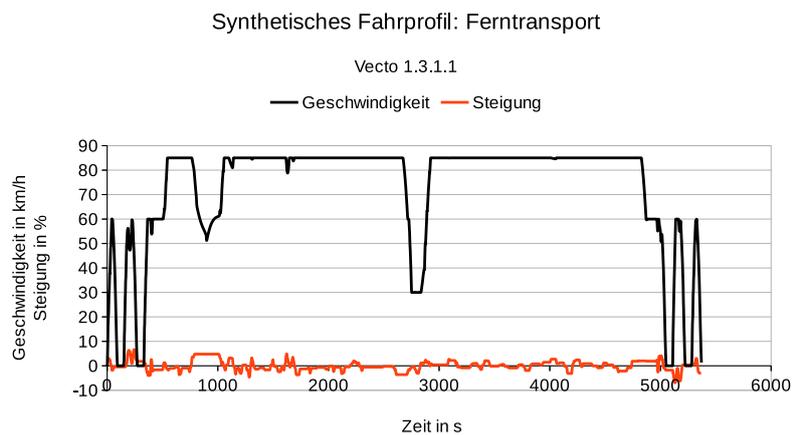


Abbildung A.3.: Synthetische Fahrprofil VECTO 1.3.1.1 Ferntransport mit Geschwindigkeitsverlauf in Schwarz und Steigungsverlauf in Rot [22]

A.2. Ökonomische und ökologische Bewertung

Excel-Berechnung zur ökonomische und ökologische Bewertung der Energieeinsparung im gekühlten Straßengütertransport durch Photovoltaik-Energieerzeugungsanlagen. Anhand den zwei Konzepten:

- Konzept B für drehstrom-betriebene Kühlsysteme (AC-Kühlsysteme)
- Konzept D für gleichstrom-betriebene Kühlsysteme (DC-Kühlsysteme)

ökonomische und ökologische Auswirkungen		Konzept B - Eingabe	
Legende: 0 ...Eingabefeld		Betrag [Einheit]	
0,00 ...Ergebnisfeld		Anmerkungen	
Allgemeine Rahmenbedingungen			
Transport:	Transportart:	Ferntransport	
	Transportzeit:	Tag	
Fahrtstrecke:	Fahrthäufigkeit:	365 [d/a]	
	Fahrdauer:	12 [h/d]	
	Gesamtfahrdauer:	4.380 [h/a]	
	Land:	Spanien	
	Stadt:	Madrid	
	mittlere horizontale Einstrahlung (Hh):	1.763 [kWh/m²a]	PV Geographical Information System
Technische Rahmenbedingungen			
Photovoltaikanlage (Erzeuger):	Anlagenleistung:	6,08 [kWp]	[# Module * Nennleistung]
	Gesamtfläche:	35 [m²]	Maximalfläche LKW-Sattelaufleger
	Gesamtwirkungsgrad:	19,5% [%]	[Modulwirkungsgrad * Wechselrichterw.grad]
	Anzahl der Module:	45 [-]	[Gesamtfläche / Modulfläche]
	Gesamtgewicht:	90 [kg]	
	Modulfläche:	0,775 [m²/Modul]	Shinesolartech: Monokr. Dünnschicht
	Nennleistung:	0,135 [kWp/Modul]	
	Modulwirkungsgrad (STC):	20,00% [%]	
	Gewicht:	2 [kg]	
Speicheranlage:			Blei-Gel; Sonnenschein dryfit solar Block 12V 185Ah
	Nennkapazität:	2,2 [kWh/Akkumulator]	
	Anzahl der Akkumulatorbänke:	0 [-]	
	Gesamtkapazität:	0 [kWh]	Cmin f. Speicherung ¼ max. Tagesertrag @ DOD 50%
	Gewicht:	62,5 [kg/Akkumulator]	
	Gesamtgewicht:	0 [kg]	
	Jährliche Zyklenzahl:	365 [-]	[Fahrthäufigkeit]
Seite 1			

ökonomische und ökologische Auswirkungen		Konzept B - Eingabe	
Stromrichter:	europ. Wechselrichterwirkungsgrad (STC):	97,50% [%]	SMA: Tripower 7000 TL-20
	Wechselrichtergewicht:	40 [kg]	SMA: Tripower 7000 TL-20
	Frequenzumrichterergewicht:	40 [kg]	ABB: 18,5KW ACS310-03E-41A8-4
	Laderegler:	5,5 [kg]	Studer: VT80 (Preis: lt. Anfrage)
	Gesamtgewicht:	85,5 [kg]	
Drehstromgenerator:	durchschnittlicher Wirkungsgrad:	50,00% [%]	
LKW-Verbrennungskraftmaschine:	spez. Verbrauch:	200 [g/kWh]	Simulation des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen der TU Graz
	Durchschnittsgeschwindigkeit:	72,5 [km/h]	
	Fahrdauer pro 100km:	1,38 [h]	
	Mehrverbrauch bei + 1000kg:	0,628 [l/100km]	
	mittlere Kraftstoffdichte:	0,835 [l/kg]	Diesekraftstoff
Kühlaggregat:	Leistung:	15,3 [kW]	Frigoblock: FK 25 SL, HK 25 SL
	Einschaltverhältnis:	33% [%]	lt. Transportprofil
Gesamtgewicht:		175,5 [kg]	
Seite 2			

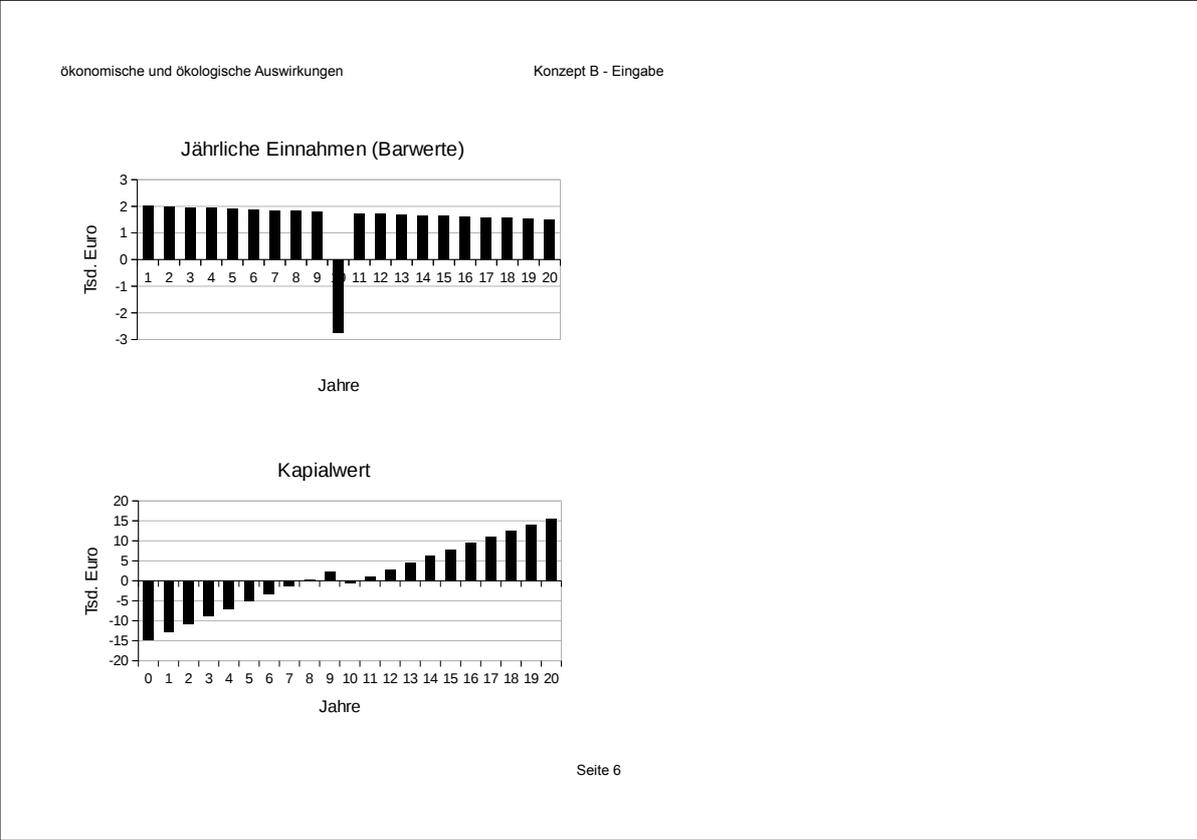
ökonomische und ökologische Auswirkungen		Konzept B - Eingabe	
Wirtschaftliche Rahmenbedingungen			
Investitionskosten:			
PV-Modul spez. Kosten pro kWp:	1.100 [€/kWp]	Shinesolartech: Monokr. Dünnschicht (Preis: Alibaba)	
PV-Module:	6.683 [€]		
PV-Wechselrichter:	4.560 [€]	SMA: Tripower 7000 TL-20 (Preis lin. skaliert v. SI 8.0H)	
Frequenzumrichter:	1.200 [€]	ABB: 18,5KW ACS310-03E-41A8-4 (Preis: Alibaba.com)	
Laderegler:	0 [€]	Studer: VT80 (Preis: lt. Anfrage)	
Akkumulator-Bänke spez. Kosten pro kWp:	337 [€/kWh]	Blei-Gel (Preis: lt. Anfrage)	
Akkumulator-Bänke:	0 [€]		
Montagematerial:	1.244 [€]	10 % der Anschaffungskosten	
Montagekosten:	1.280 [€]	16 Personenstunden à € 80,-	
zusätzlicher Drehstromgenerator:	0 [€]		
Investitionskosten:	14.967 [€]		
Laufende Kosten:			
Wechselrichteraustausch:	4.560 [€/Austausch]	Austausch im 10. Jahr	
Frequenzumformeraustausch:	1.200 [€/Austausch]	Austausch im 10. Jahr	
Speicheraustausch:	0 [€/Austausch]	Austausch im 7. und 14. Jahr	
Wartung & Überprüfung:	0,25% [%]	% der Investitionskosten	
Versicherung:	0,25% [%]	% der Investitionskosten	
Ertragsminderung:	0,10% [%]	PV Ertragsminderung pro Jahr	
Entwicklung:			
Inflationsrate:	0,50% [%]		
Aktueller Kraftstoffpreis (Diesel):	1,38 [€/l]	Europ. Durchschnitt lt. AvD.de (31.3.2014)	
Kraftstoffpreissteigerung:	1,00% [%]		
Nominalzinssatz:	3,00% [%]		
Realzinssatz:	2,49% [%]		
Nutzungsdauer:	20 [a]		

Seite 3

ökonomische und ökologische Auswirkungen		Konzept B - Eingabe	
Zusammenfassung			
Energie:			
spez. Energieertrag:	645 [kWh/kWp/a]		
Energieertrag:	0,6 [kWh/100km]		
Tagesenergieertrag:	10,7 [kWh/d]		
max. Tagesenergieertrag:	32,8 [kWh/d]		
max. Energieertrag im 1. Jahr:	11.988 [kWh]	[Hh * Modulfläche * Eta_gesamt]	
max. speicherbare Energie:	0 [kWh/a]		
gespeicherte Energie:	0 [kWh/a]	[max. Speicherkapazität oder Energiedifferenz]	
nicht verwendete Energie:	8.032 [kWh/a]		
verwendete Energie:	3.956 [kWh/a]	[Hh * Modulfläche * Eta_gesamt * Einschaltverh]	
nutzbarer Energieertrag im 1. Jahr:	3.956 [kWh]	[Gespeicherte Energie + Energieertrag]	
durchschnittlicher Jahresenergieertrag (E_PV):	3.919 [kWh/a]		
Energieertrag nach 20 Jahren:	78.373 [kWh]		
Energiebedarf:	7,0 [kWh/100km]		
Tagesenergiebedarf:	60,6 [kWh/d]		
Jahresenergiebedarf (E_Jahr):	22.115 [kWh/a]	[Aggregatleistg* Einschaltverh* Einschaltdauer]	
Energiebedarf nach 20 Jahren:	442.292 [kWh]		
Kraftstoff:			
Kraftstoffverbrauch (ohne PV):	3,34 [l/100km]		
Kraftstoffverbrauch (ohne PV):	29,0 [l/d]		
Jahreskraftstoffverbrauch (ohne PV):	10.594 [l/a]	[E_Jahr* spez.Verbrauch / Eta_Gen* Kraftstoffdichte]	
Kraftstoffverbrauch nach 20 Jahren (ohne PV):	211.877 [l]		
Kraftstoffverbrauch (mit PV):	3,15 [l/100km]		
Kraftstoffverbrauch (mit PV):	24,8 [l/d]		
Jahreskraftstoffverbrauch (mit PV):	9.067 [l/a]	[(E_Jahr - E_PV)* spez.Verbrauch / Eta_Gen* Kraftstoffdichte]	
Kraftstoffverbrauch nach 20 Jahren (mit PV):	181.332 [l]	+ Massebedingter Mehrverbrauch	
Einsparung:			
Kraftstoffeinsparung:	0,19 [l/100km]		
Kraftstoffeinsparung:	4,2 [l/d]		
Kraftstoffeinsparung:	1.527 [l/a]		
rel. Kraftstoffeinsparung:	14% [%/a]	[E_PV* spez.Verbrauch / Eta_Gen* Kraftstoffdichte] - Massebedingter Mehrverbrauch	
spez. Kraftstoffeinsparung:	251 [l/kWp/a]		

Seite 4

ökonomische und ökologische Auswirkungen		Konzept B - Eingabe	
		Kraftstoffeinsparung nach 20 Jahren:	30.544 [l]
<hr/>			
Kosten:	Investitionskosten:	14.967 [€]	siehe Berechnung [Mehreinnahmen Kapitalwert / Investitionskosten]
	Mehreinnahmen nach 20 Jahren (Kapitalwert):	15.663 [€]	
	Amortisationsdauer:	11 [Jahre]	
	Rentabilität:	1,05 [-]	
<hr/>			
CO ₂	CO ₂ -Einsparung:	4.004 [kg/a]	EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009
	CO ₂ -Einsparung nach 20 Jahren:	80.084 [kg]	
NMVOC (CH ₄)	NMVOC-Einsparung:	2,45 [kg/a]	
	NMVOC-Einsparung nach 20 Jahren:	49 [kg]	
PM _{2,5}	PM _{2,5} -Einsparung:	1,20 [kg/a]	
	PM _{2,5} -Einsparung nach 20 Jahren:	24 [kg]	
NO _x	NO _x -Einsparung:	43 [kg/a]	
	NO _x -Einsparung nach 20 Jahren:	851 [kg]	
SO _{2e}	SO _{2e} -Einsparung:	10 [g/a]	
	SO _{2e} -Einsparung nach 20 Jahren:	204 [g]	



ökonomische und ökologische Auswirkungen Konzept B - Berechnung

Investitionskostenrechnung

Jahre	PV-Energieertrag	Kraftstoffpreis	Kraftstoff-Einsparung	Erlöse	Ausgaben	Cash Flow	BWF	Barwert	Kapitalwert	Amortisationsdauer
-	[kWh]	[€/l]	[l]	[€]	[€]	[€]	-	[Tsd. €]	[Tsd. €]	[Jahre]
0		1,38			14.967	-14.967	1,00	-15,0	-15,0	1
1	3.956	1,39	1.545	2.154	75	2.079	0,98	2,0	-12,9	2
2	3.952	1,41	1.543	2.172	75	2.098	0,95	2,0	-10,9	3
3	3.948	1,42	1.541	2.191	75	2.117	0,93	2,0	-9,0	4
4	3.944	1,44	1.539	2.211	75	2.136	0,91	1,9	-7,0	5
5	3.940	1,45	1.538	2.230	75	2.155	0,88	1,9	-5,1	6
6	3.936	1,46	1.536	2.250	75	2.175	0,86	1,9	-3,3	7
7	3.932	1,48	1.534	2.269	75	2.194	0,84	1,8	-1,4	8
8	3.928	1,49	1.532	2.289	75	2.214	0,82	1,8	0,4	break even
9	3.924	1,51	1.530	2.309	75	2.234	0,80	1,8	2,2	break even
10	3.921	1,52	1.528	2.329	5.835	-3.505	0,78	-2,7	-0,5	11
11	3.917	1,54	1.526	2.350	75	2.275	0,76	1,7	1,2	break even
12	3.913	1,56	1.524	2.370	75	2.296	0,74	1,7	2,9	break even
13	3.909	1,57	1.522	2.391	75	2.316	0,73	1,7	4,6	break even
14	3.905	1,59	1.521	2.412	75	2.337	0,71	1,7	6,2	break even
15	3.901	1,60	1.519	2.433	75	2.358	0,69	1,6	7,9	break even
16	3.897	1,62	1.517	2.455	75	2.380	0,67	1,6	9,5	break even
17	3.893	1,63	1.515	2.476	75	2.401	0,66	1,6	11,1	break even
18	3.889	1,65	1.513	2.498	75	2.423	0,64	1,6	12,6	break even
19	3.885	1,67	1.511	2.520	75	2.445	0,63	1,5	14,2	break even
20	3.882	1,68	1.509	2.542	75	2.467	0,61	1,5	15,7	break even
	78.373		30.544	46.851	22.223	24.628		15,7	1,05	11

Rentabilität:

Seite 7

ökonomische und ökologische Auswirkungen Konzept B - Berechnung

Eingesparte Emissionen

Jahre	CO2 Einsparung	PM2,5 Einsparung	Nox Einsparung	SO2e Einsparung	NMVOC Einsparung
-	[kg]	[kg]	[kg]	[g]	[kg]
0					
1	4.051	1,2	43,1	10,3	2,5
2	4.046	1,2	43,0	10,3	2,5
3	4.041	1,2	42,9	10,3	2,5
4	4.036	1,2	42,9	10,3	2,5
5	4.031	1,2	42,8	10,3	2,5
6	4.026	1,2	42,8	10,3	2,5
7	4.021	1,2	42,7	10,2	2,5
8	4.016	1,2	42,7	10,2	2,5
9	4.012	1,2	42,6	10,2	2,5
10	4.007	1,2	42,6	10,2	2,4
11	4.002	1,2	42,5	10,2	2,4
12	3.997	1,2	42,5	10,2	2,4
13	3.992	1,2	42,4	10,2	2,4
14	3.987	1,2	42,4	10,2	2,4
15	3.982	1,2	42,3	10,1	2,4
16	3.977	1,2	42,3	10,1	2,4
17	3.972	1,2	42,2	10,1	2,4
18	3.967	1,2	42,2	10,1	2,4
19	3.962	1,2	42,1	10,1	2,4
20	3.958	1,2	42,1	10,1	2,4
	80.084	24	851	204	49

horizontale Einstrahlung: Madrid, Spanien

Monat	Hh	[Wh/m²/day]	[Wh/m²/a]	[kWh/m²/a]
-				
Jan		2.070	64.170	64
Feb		3.150	88.200	88
Mar		4.480	138.880	139
Apr		5.680	170.400	170
May		6.580	203.980	204
Jun		7.710	231.300	231
Jul		7.980	247.380	247
Aug		6.970	216.070	216
Sep		5.370	161.100	161
Oct		3.580	110.980	111
Nov		2.370	71.100	71
Dec		1.910	59.210	59
		3.260	1.762.770	1.763

Quelle: Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>

Quelle: EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, updated May 2012
<http://eea.europa.eu/emep-eea-guidebook>

Seite 8

ökonomische und ökologische Auswirkungen		Konzept D - Eingabe	
Legende: 0 ...Eingabefeld 0,00 ...Ergebnisfeld		Betrag [Einheit]	Anmerkung
Allgemeine Rahmenbedingungen			
Transport:	Transportart:	Stadttransport	
	Transportzeit:	Tag	
Fahrtstrecke:	Fahrthäufigkeit:	312 [d/a]	6 Tage / Woche
	Fahrtdauer:	8 [h/d]	
	Gesamtfahrtdauer:	2.496 [h/a]	
	Land:	Spanien	
	Stadt:	Madrid	
	mittlere horizontale Einstrahlung (Hh):	1.763 [kWh/m²a]	PV Geographical Information System
Technische Rahmenbedingungen			
Photovoltaikanlage (Erzeuger):	Anlagenleistung:	0,41 [kWp]	[# Module * Nennleistung]
	Gesamtfläche:	2,4 [m²]	Maximalfläche Transporter
	Gesamtwirkungsgrad:	20,0% [%]	[Modulwirkungsgrad * Wechselrichterw.grad]
	Anzahl der Module:	3 [-]	[Gesamtfläche / Modulfäche]
	Gesamtgewicht:	6 [kg]	
	Modulfäche:	0,775 [m²/Modul]	Shinesolartech: Monokr. Dünnschicht
	Nennleistung:	0,135 [kWp/Modul]	
	Modulwirkungsgrad (STC):	20,00% [%]	
	Gewicht:	2 [kg]	
Speicheranlage:	Nennkapazität:	0,72 [kWh/Akkumulator]	Blei-Gel: Hoespecke Solar.bloc 12V 58Ah
	Anzahl der Akkumulatorbänke:	0 [-]	
	Gesamtkapazität:	0 [kWh]	Cmin f. Speicherung ½ max. Tagesertrag @ DOD 50%
	Gewicht:	19 [kg/Akkumulator]	
	Gesamtgewicht:	0 [kg]	
	Jährliche Zyklenzahl:	312 [-]	[Fahrhäufigkeit]
Seite 9			

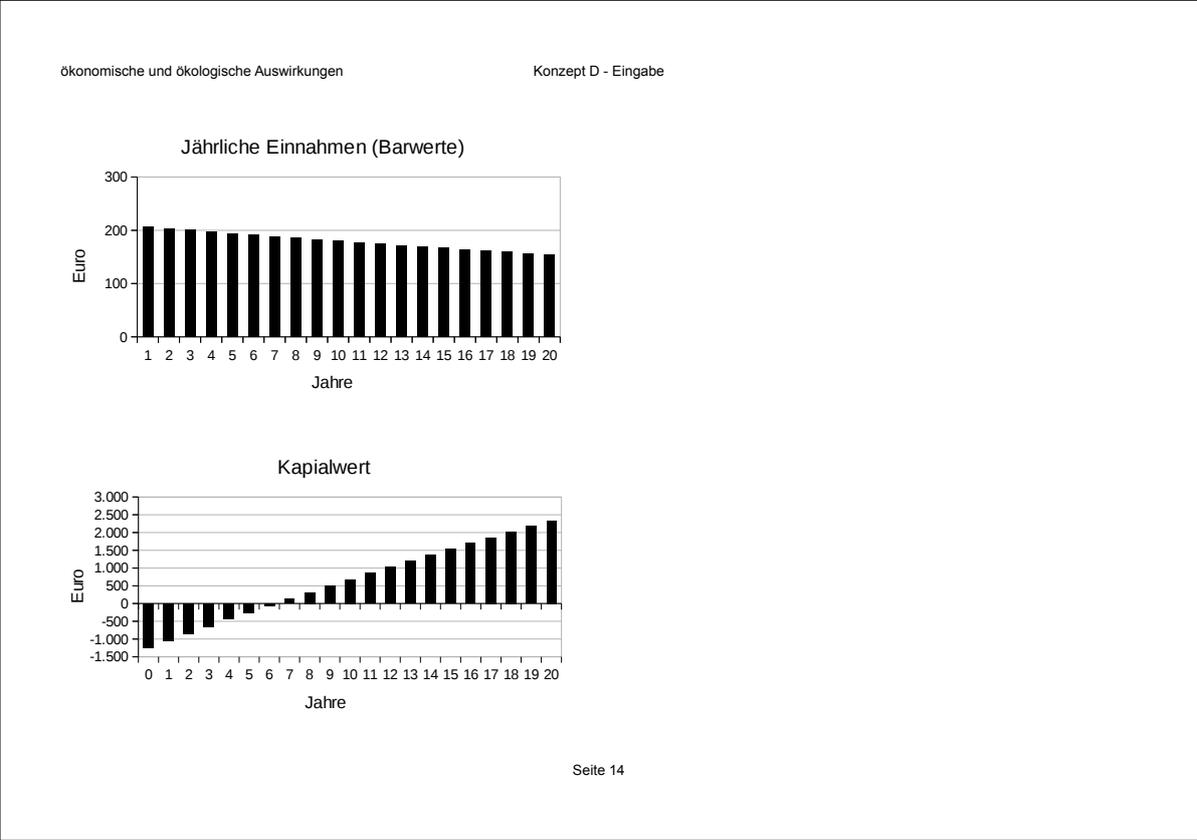
ökonomische und ökologische Auswirkungen		Konzept D - Eingabe	
Stromrichter:	europ.-Wechselrichterwirkungsgrad (STC):	400,00% [%]	
	Wechselrichtergewicht:	0 [kg]	
	Frequenzumrichtergewicht:	0 [kg]	
	DC-DC-Steller + MPP-Tracker:	1 [kg]	Westech Solar OHG: MPPT20-Westtech (Preis It. Solarzellen-shop.de)
	Gesamtgewicht:	1 [kg]	
Drehstromgenerator:	durchschnittlicher Wirkungsgrad:	50,00% [%]	
LKW-Verbrennungskraftmaschine:	spez. Verbrauch:	166 [g/kWh]	Quelle: Lunaova, M. - Optimierung von Nebenaggregaten
	Durchschnittsgeschwindigkeit:	29,1 [km/h]	Simulation des Instituts
	Fahrtdauer pro 100km:	3,44 [h]	für Verbrennungskraftmaschinen der TU Graz
	Mehrverbrauch bei + 1000kg:	1,23 [l/100km]	
	mittlere Kraftstoffdichte:	0,835 [l/kg]	Dieseldieselkraftstoff
Kühlaggregat:	Leistung:	1,5 [kW]	Carrier: Neos
	Einschaltverhältnis:	50% [%]	It. Transportprofil
Gesamtgewicht:		7 [kg]	
Seite 10			

ökonomische und ökologische Auswirkungen		Konzept D - Eingabe	
Wirtschaftliche Rahmenbedingungen			
Investitionskosten:			
PV-Modul spez. Kosten pro kWp:	1.100 [€/kWp]	Shinesolarartech: Monokr. Dünnschicht (Preis: Alibaba)	
PV-Module:	446 [€]		
PV-Wechselrichter:	0 [€]	SMA: Tripower 7000 TL-20 (Preis in: skaliert v. St 8.0H)	
Frequenzumrichter:	0 [€]	ABB: 18.5KW ACS310-03E-41A8-4 (Preis: Alibaba.com)	
DC-DC-Steller + MPP-Tracker:	115 [€]	Westech Solar OHG: MPPT20-Westtech (Preis lt. Solarzellen-st	
Akkumulator-Bänke spez. Kosten pro kWp:	337 [€/kWh]	Blei-Gel (Preis: lt. Anfrage)	
Akkumulator-Bänke:	0 [€]		
Montagematerial:	56 [€]	10 % der Anschaffungskosten	
Montagekosten:	640 [€]	8 Personenstunden á € 80,-	
zusätzlicher Drehstromgenerator:	0 [€]		
Investitionskosten:	1.257 [€]		
Laufende Kosten:			
Wechselrichteraustausch:	0 [€/Austausch]	Austausch im 10. Jahr	
Frequenzumformeraustausch:	0 [€/Austausch]	Austausch im 10. Jahr	
Speicheraustausch:	0 [€/Austausch]	Austausch im 7. und 14. Jahr	
Wartung & Überprüfung:	0,25% [%]	% der Investitionskosten	
Versicherung:	0,25% [%]	% der Investitionskosten	
Ertragsminderung:	0,10% [%]	PV Ertragsminderung pro Jahr	
Entwicklung:			
Inflationsrate:	0,50% [%]		
Aktueller Kraftstoffpreis (Diesel):	1,38 [€/l]	Europ. Durchschnitt lt. AvD.de (31.3.2014)	
Kraftstoffpreissteigerung:	1,00% [%]		
Nominalzinssatz:	3,00% [%]		
Realzinssatz:	2,49% [%]		
Nutzungsdauer:	20 [a]		

ökonomische und ökologische Auswirkungen		Konzept D - Eingabe	
Zusammenfassung			
Energie:			
spez. Energieertrag:	1.002 [kWh/kWp/a]		
Energieertrag:	0,2 [kWh/100km]		
Tagesenergieertrag:	1,1 [kWh/d]		
max. Energieertrag im 1. Jahr:	820 [kWh]	[Hh * Modulfläche * Eta_gesamt]	
max. speicherbare Energie:	0 [kWh/a]		
gespeicherte Energie:	0 [kWh/a]	[max. Speicherkapazität oder Energiedifferenz]	
nicht verwendete Energie:	410 [kWh/a]		
verwendete Energie:	410 [kWh]	[Hh * Modulfläche * Eta_gesamt * Einschaltverh]	
nutzbarer Energieertrag im 1. Jahr:	410 [kWh]	[Gespeicherte Energie + Energieertrag]	
durchschnittlicher Jahresenergieertrag (E_PV):	406 [kWh/a]		
Energieertrag nach 20 Jahren:	8.119 [kWh]		
Energiebedarf:	2,6 [kWh/100km]		
Tagesenergiebedarf:	6,0 [kWh/d]		
Jahresenergiebedarf (E_Jahr):	1.872 [kWh/a]	[Aggregatleist* Einschaltverh* Einschaltdauer]	
Energiebedarf nach 20 Jahren:	37.440 [kWh]		
Kraftstoff:			
Kraftstoffverbrauch (ohne PV):	1,02 [l/100km]		
Kraftstoffverbrauch (ohne PV):	2,4 [l/d]		
Jahreskraftstoffverbrauch (ohne PV):	744 [l/a]	[E_Jahr* spez.Verbrauch / Eta_Gen* Kraftstoffdichte]	
Kraftstoffverbrauch nach 20 Jahren (ohne PV):	14.886 [l]		
Kraftstoffverbrauch (mit PV):	0,97 [l/100km]		
Kraftstoffverbrauch (mit PV):	2,0 [l/d]		
Jahreskraftstoffverbrauch (mit PV):	589 [l/a]	[(E_Jahr - E_PV)* spez.Verbrauch / Eta_Gen* Kraftstoffdichte]	
Kraftstoffverbrauch nach 20 Jahren (mit PV):	11.783 [l]	+ Massebedingter Mehrverbrauch	
Einsparung:			
Kraftstoffeinsparung:	0,05 [l/100km]		
Kraftstoffeinsparung:	0,4 [l/d]		
Kraftstoffeinsparung:	155 [l/a]		
rel. Kraftstoffeinsparung:	21% [%/a]	[E_PV* spez.Verbrauch / Eta_Gen* Kraftstoffdichte] - Massebedingter Mehrverbrauch	
spez. Kraftstoffeinsparung:	383 [l/kWp/a]		
Kraftstoffeinsparung nach 20 Jahren:	3.103 [l]		

ökonomische und ökologische Auswirkungen		Konzept D - Eingabe	
Kosten:	Investitionskosten:	1.257 [€]	siehe Berechnung [Mehreinnahmen Kapitalwert / Investitionskosten]
	Mehreinnahmen nach 20 Jahren (Kapitalwert):	2.333 [€]	
	Amortisationsdauer:	7 [Jahre]	
	Rentabilität:	1,86 [-]	
<hr/>			
CO ₂	CO ₂ -Einsparung:	407 [kg/a]	EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009
	CO ₂ -Einsparung nach 20 Jahren:	8.136 [kg]	
NMVOC (CH _x)	NMVOC-Einsparung:	0,25 [kg/a]	
	NMVOC-Einsparung nach 20 Jahren:	5 [kg]	
PM _{2,5}	PM _{2,5} -Einsparung:	0,12 [kg/a]	
	PM _{2,5} -Einsparung nach 20 Jahren:	2,4 [kg]	
NO _x	NO _x -Einsparung:	4,3 [kg/a]	
	NO _x -Einsparung nach 20 Jahren:	86 [kg]	
SO _{2,e}	SO _{2,e} -Einsparung:	1,0 [g/a]	
	SO _{2,e} -Einsparung nach 20 Jahren:	21 [g]	

Seite 13



Seite 14

ökonomische und ökologische Auswirkungen Konzept D - Berechnung

Investitionskostenrechnung

Jahre	PV-Energieertrag	Kraftstoffpreis	Kraftstoff-Einsparung	Erlöse	Ausgaben	Cash Flow	BWF	Barwert	Kapitalwert	Amortisationsdauer
-	[kWh]	[€/l]	[l]	[€]	[€]	[€]	-	[€]	[€]	[Jahre]
0		1,38			1.257	-1.257	1,00	-1.257	-1.257	1
1	410	1,39	157	218	6	212	0,98	207	-1.050	2
2	409	1,41	157	220	6	214	0,95	204	-846	3
3	409	1,42	156	222	6	216	0,93	201	-645	4
4	409	1,44	156	224	6	218	0,91	198	-447	5
5	408	1,45	156	226	6	220	0,88	195	-253	6
6	408	1,46	156	228	6	222	0,86	192	-61	7
7	407	1,48	156	230	6	224	0,84	189	128	break even
8	407	1,49	156	232	6	226	0,82	186	313	break even
9	407	1,51	155	235	6	228	0,80	183	496	break even
10	406	1,52	155	237	6	230	0,78	180	677	break even
11	406	1,54	155	239	6	232	0,76	177	854	break even
12	405	1,56	155	241	6	235	0,74	175	1.029	break even
13	405	1,57	155	243	6	237	0,73	172	1.201	break even
14	405	1,59	155	245	6	239	0,71	169	1.370	break even
15	404	1,60	154	247	6	241	0,69	167	1.537	break even
16	404	1,62	154	250	6	243	0,67	164	1.701	break even
17	403	1,63	154	252	6	246	0,66	162	1.863	break even
18	403	1,65	154	254	6	248	0,64	159	2.022	break even
19	403	1,67	154	256	6	250	0,63	157	2.179	break even
20	402	1,68	154	259	6	252	0,61	154	2.333	break even
								Rentabilität:	1,86	

Seite 15

ökonomische und ökologische Auswirkungen Konzept D - Berechnung

Eingesparte Emissionen

Jahre	CO2 Einsparung	PM2,5 Einsparung	Nox Einsparung	SO2e Einsparung	NMVOC Einsparung
-	[kg]	[kg]	[kg]	[g]	[kg]
0					
1	411	0,1	4,4	1,0	0,3
2	410	0,1	4,4	1,0	0,3
3	410	0,1	4,4	1,0	0,3
4	410	0,1	4,4	1,0	0,3
5	409	0,1	4,3	1,0	0,3
6	409	0,1	4,3	1,0	0,2
7	408	0,1	4,3	1,0	0,2
8	408	0,1	4,3	1,0	0,2
9	407	0,1	4,3	1,0	0,2
10	407	0,1	4,3	1,0	0,2
11	407	0,1	4,3	1,0	0,2
12	406	0,1	4,3	1,0	0,2
13	406	0,1	4,3	1,0	0,2
14	405	0,1	4,3	1,0	0,2
15	405	0,1	4,3	1,0	0,2
16	404	0,1	4,3	1,0	0,2
17	404	0,1	4,3	1,0	0,2
18	404	0,1	4,3	1,0	0,2
19	403	0,1	4,3	1,0	0,2
20	403	0,1	4,3	1,0	0,2
					5

horizontale Einstrahlung: Madrid, Spanien

Monat	Hh	[Wh/m ² /day]	[Wh/m ² /a]	[kWh/m ² /a]
Jan		2.070	64.170	64
Feb		3.150	88.200	88
Mar		4.480	138.880	139
Apr		5.680	170.400	170
May		6.580	203.980	204
Jun		7.710	231.300	231
Jul		7.980	247.380	247
Aug		6.970	216.070	216
Sep		5.370	161.100	161
Oct		3.580	110.980	111
Nov		2.370	71.100	71
Dec		1.910	59.210	59
		3.260	1.762.770	1.763

Quelle: Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>

Quelle: EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, updated May 2012
<http://eea.europa.eu/emep-eea-guidebook>

Seite 16