

Der CO₂-Kompass: Konzeption und Entwicklung eines Tools zur emissionsarmen Stromnutzung

Lucas Hüer¹, Nico Stadie¹, Simon Hagen², Oliver Thomas², Hans-Jürgen Pfisterer¹

Abstract: Um Elektromobilität nachhaltiger zu gestalten, muss es die Möglichkeit geben, Elektrofahrzeuge zu jenen Zeitpunkten zu laden, an denen der Strom zu einem großen Teil aus erneuerbaren Quellen generiert wird. Hierfür wurde mit Hilfe der Scrum-Methode ein Software-System entwickelt, welches Endkunden die aktuelle Zusammensetzung des Strommix transparent anzeigen kann: Der CO₂-Kompass. In diesem Beitrag wird die Entwicklung des CO₂-Kompass vorgestellt. Zudem soll verdeutlicht werden, warum dieses Tool wichtig für eine nachhaltigere, emissionsarme Stromnutzung in der Elektromobilität sein kann. Dabei wird nicht nur auf die Notwendigkeit des Systems als Dienstleistung eingegangen, sondern es wird auch beschrieben wie das System aufgebaut ist und wie es in ein bestehendes Produkt (in diesem Fall eine Ladesäule) integriert werden kann.

Keywords: CO₂-Kompass, Elektromobilität, Nachhaltigkeit, CO₂-Emissionen, Ladesäule, Energieversorgung

1 Einleitung

Das noch junge 21. Jahrhundert wird bislang zu einem großen Teil von Erkenntnissen, Diskussionen und Entscheidungen rund um den Klimawandel geprägt [Br17]. Regierungen der verschiedensten Länder kommen regelmäßig zusammen und einigen sich auf diverse Abkommen, um Umwelt und Gesellschaft vor den negativen Folgen des Klimawandels zu schützen. Einer der größten Faktoren der in den bisherigen Klimagipfeln angesprochen wurde, ist der Ausstoß von Treibhausgasen [Pr15]. Um die Emission dieser Gase einzudämmen und damit auch den Treibhauseffekt zu bekämpfen, der primär zur globalen Erwärmung führt, setzt sich die Weltgemeinschaft immer ehrgeizigere Ziele. Für Deutschland hat die Bundesregierung beschlossen, die Treibhausgasemission im Zeitraum von 1990 bis 2020 um 40% zu reduzieren [SE13]. Für die darauffolgenden Jahrzehnte sind die Ziele noch ehrgeiziger gesteckt. Daher ist es notwendig innovative Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln, die Unternehmen und Verbraucher bei der Einsparung von CO₂-Emissionen unterstützen. Ein besonders hohes Potenzial zur Einsparung liegt im Mobilitäts-Sektor, was auch durch die Bundesregierung erkannt wurde. Daher plant die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) den heimischen Markt als einen Leitmarkt für Elektromobilität aufzustellen und bis 2020 einen Bestand von einer Million elektrischen Fahrzeugen zu erreichen [NA14]. Diese verursachen bei Fahrten

¹ Hochschule Osnabrück, Ingenieurwissenschaften und Informatik, Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück, l.hueer@hs-osnabrueck.de

² Universität Osnabrück, Informationsmanagement und Wirtschaftsinformatik, Katharinenstraße 3, 49074, simon.hagen@uni-osnabrueck.de

keinerlei CO₂-Ausstoß, was jedoch nicht davon ablenken darf, dass der Strom zum Laden der elektrischen Fahrzeuge oftmals nicht CO₂-frei generiert wird [Sc15]. Der derzeitige Strommix in Deutschland besteht sowohl aus konventionellen Energiequellen (z.B. Braunkohle, Erdöl oder Kernenergie) wie auch aus erneuerbaren Energiequellen (z.B. Windkraft, Wasserkraft oder Photovoltaik) und obwohl der Anteil an erneuerbaren Energien stetig steigt, betrug der Anteil der konventionellen Energien im Jahr 2018 noch 64,8%. [Sc19; basierend auf AGEB 2018] Da es laut Trommer et al. den meisten Leuten allerdings wichtig ist, Elektrofahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen aufzuladen [Tr13], müssen innovative Lösungen angeboten werden, die es dem Kunden gestatten, einen transparenten Überblick über den Strommix zu bekommen. Ziel dieses Beitrags ist es daher, mit Hilfe einer web-basierten Plattform, dem CO₂-Kompass, den Endkunden die entsprechende Transparenz zu ermöglichen und eine Einbindung in automatische Ladesysteme vorzubereiten. Da ein solches System bisher nicht existiert, wurde nach der Erhebung von Anforderungen in einem Scrum-Projekt das Artefakt entwickelt und im Folgenden detailliert vorgestellt. Um das Ziel des Beitrages zu erreichen, ist dieser wie folgt strukturiert: Nachdem die angewandten wissenschaftlichen Methoden in Kapitel 2 erläutert werden, wird dem Leser in Kapitel 3 das nötige Hintergrundwissen vermittelt indem existierende Literatur analysiert wird. Dadurch soll vor allem verdeutlicht werden, wieso die Erstellung des CO₂-Kompasses wichtig ist. Hierfür wurde relevante deutsche und englische Literatur herangezogen. Im Anschluss wird dem Leser in Kapitel 4 beschrieben, wie der CO₂-Kompass funktioniert und welche Muss- und Wunschkriterien bei der Erstellung des Systems berücksichtigt wurden. Im Anschluss an die Projektbeschreibung, wird in Kapitel 5 dargestellt, wie der CO₂-Kompass angewendet werden kann. Hier wird besonders auf eine mögliche Integration der Software in Ladesäulen eingegangen. Abschließend werden die Ergebnisse dieses Artikels zusammengefasst und diskutiert.

2 Methodik der Arbeit

Zur Entwicklung des CO₂-Kompass wurde der Scrum-Ansatz [SC97] gewählt und in diesem Kontext ein „Product Backlog“ erstellt, welches die funktionellen und nichtfunktionellen Systemanforderungen beinhaltet. Um diese Anforderungen aufzustellen, wurde ein Interview mit einem Experten aus dem Bereich der Energiewirtschaft und des Ladesäulenmanagements durchgeführt. Aus den daraus resultierenden Anforderungen wurden die Arbeitspakete für die Sprint-Phasen abgeleitet und dem Entwicklerteam fortlaufend zugewiesen. Während der Entwicklungsphase wurden die Arbeitspakete unter Aufsicht des Projektleiters bearbeitet und in „Daily Scrum´s“ beurteilt und nach Vervollständigung als erledigt markiert. Nach Abschluss jeder Sprintphase wurde das Werkzeug evaluiert und das nächste Arbeitspaket basierend auf den Ergebnissen begonnen. So entstand inkrementell das den Anforderungen entsprechende Tool des CO₂-Kompass. Die agile Softwareentwicklungsmethode Scrum wurde ausgewählt, um die Produktivität der Teamarbeit durch gemeinsame Zielsetzung, Definition von Teilaufgaben und Transpa-

renz des Projektfortschritts zu verbessern [GL10], was sich im vorliegenden Projekt als positiv herausgestellt hat.

3 CO₂-Emissionen in der Elektromobilität

Trotz ehrgeiziger Ziele der Bundesregierung, die nach dem Pariser Klimaabkommen „eine praktisch vollständige Reduktion der CO₂-Emissionen des Verkehrs“ [P118, S. 2] bis 2050 vorsieht, hat sich der verkehrsbezogene CO₂-Ausstoß in den letzten Jahren vervielfacht [Zi16]. Daher wird es immer wichtiger Lösungen zu finden, die den Güter- und Personenverkehr emissionsfrei gestalten können. Hierbei ist nicht nur die Vermeidung des Verkehrs eine Option, sondern auch der Wechsel zu alternativen Verkehrsmitteln und Antrieben. Während der Güterverkehr von Lastkraftwagen nicht so einfach auf Züge oder ähnliche Alternativen mit CO₂-Einsparpotenzial verlagert werden kann, gibt es für den Personenverkehr eine technische Alternative, die von vielen Experten als durchführbar und plausibel angesehen wird: Der Umstieg auf batterieelektrische Fahrzeuge [P118]. Laut dem Umweltbundesamt [siehe Ze19] trägt der Verkehr mit etwa 19 Prozent zum gesamten CO₂-Ausstoß in Deutschland bei, wobei die Emissionen in den Jahren seit 2010 trotz Innovationen in der Antriebstechnik stark gestiegen sind. Dieser zusätzliche CO₂-Ausstoß kann auf die größere Anzahl an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (Benzin und Diesel) zurückgeführt werden [Ze19]. Die Elektromobilität spiegelt einen Lösungsansatz wieder, der die ansteigenden Emissionen der Verbrenner-Autos verdrängen könnte; denn durch den elektrischen Antrieb verursachen Elektroautos keinen direkten Stickoxid- und CO₂-Ausstoß sowie weniger Feinstaub-Emission während der Fahrtzeiten. Es muss allerdings beachtet werden, dass die Produktion des Ladestroms für erhebliche indirekte CO₂-Emissionen sorgen kann; daher sollte eine Gesamtbetrachtung (Well-to-Wheel Ansatz) der Emissionen erfolgen [Ha11]. Im Gegensatz zum Tank-to-Wheel Ansatz, welcher nur jene Energie betrachtet, die von einem Fahrzeug aufgenommen und umgewandelt wird, kann mit dem Well-to-Wheel Ansatz die gesamte Wirkungskette betrachtet werden. Es wird also auch die Energiebereitstellung in die Betrachtung eingeschlossen [Th14; Or16]. In Deutschland wird die Energie über verschiedene erneuerbare und konventionelle Energiequellen hergestellt. Zu den Primärenergieträgern gehören neben Kernenergie, Erdgas, Steinkohle, Pumpspeicherwasser, Braunkohle und sonstige konventionelle Quellen auch folgende erneuerbare Energieträger: Photovoltaik, Geothermie, Windkraft, Laufwasser / Speicherwasser mit natürlichem Zufluss und Biomasse [Um17].

Indem erneuerbare Energien die fossilen Energieträger im deutschen Strommix ersetzen, können Treibhausgase vermieden werden. Dies spiegelt sich im Jahr 2018 in der Vermeidung von 183,7 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente (Einheit zur vereinheitlichten Messung unterschiedlicher Treibhausgase) für Deutschland wieder, was einer Verdoppelung der Treibhausgas-Vermeidung gegenüber 2010 entspricht [Um19]. Es gibt also zunehmend Alternativen zur CO₂-Emission, die durch konventionelle Energiequellen ermöglicht wird. Zudem gibt es viele Einwohner in Deutschland, die ihre eigene CO₂-

Bilanz verbessern möchten. Dies spiegelt sich zum Beispiel in einer Befragung wieder, in der die Teilnehmer zu großen Teilen (über 80%) angaben, dass der Ladestrom für Elektromobilität aus erneuerbaren Quellen generiert werden soll [Tr13]. Da es also möglich ist Strom emissionsfrei herzustellen und viele Endkunden Strom aus nachhaltigen Energiequellen bevorzugen, wird eine transparente Darstellung des Strommixes immer wichtiger um dem umweltbewussten, mündigen Endkunden einen eigenen Entscheidungsspielraum zu geben.

4 Der CO₂-Kompass

Um die Vorteile regenerativer Energien stärker nutzen zu können, ist es hilfreich, die Stromnutzung von elektrischen Verbrauchern zeitlich an die Energiegewinnung anzupassen. Dadurch können elektrische Verbraucher zu jenen Zeitpunkten genutzt werden, an denen der regenerative Anteil der Stromgewinnung besonders hoch ist. Hierfür wurde die Software des CO₂-Kompass entwickelt, welche die Stromerzeugung und die einhergehende CO₂-Emissionen aufzeichnet und zudem in der Lage ist, Prognosen über zukünftige Zusammensetzungen des Strommixes zu geben. Diese Informationen lassen sich mit der Nutzung von energieintensiver Hardware wie zum Beispiel Wärmepumpen, Klimaanlage oder Produktionsmaschinen koppeln. In einem ersten Schritt sollen die Daten allerdings genutzt werden, um Ladevorgänge für Elektrofahrzeuge systematisch mit erneuerbarer Energie zu versorgen. Es kann somit entschieden werden, ob es zu einem bestimmten Zeitpunkt ökologisch sinnvoll ist, sein Elektrofahrzeug aufzuladen (siehe Kapitel 5.2). Um dies zu gewährleisten, werden die Produktionsdaten der einzelnen Energieversorger von der ENTSO-E-Datenbank³ (Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber) abgegriffen und zur weiteren Verarbeitung auf einem zentralen Server gespeichert. Diese Daten werden detailliert ausgewertet und ein Algorithmus sorgt für die Ermittlung der CO₂-Emissionen aller Produktionsarten (Solarkraft, Windkraft, Atomkraft etc.). Bevor in 4.2 beschrieben wird, wie der CO₂-Kompass aufgebaut ist, werden im folgenden Unterkapitel die Anforderungen an das System aufgelistet.

4.1 Anforderungen

Bevor der CO₂-Kompass entwickelt und umgesetzt werden konnte, wurde ein Anforderungsprofil im Zuge eines Experteninterviews mit einem Fachmann aus dem Bereich Energiewirtschaft und Ladesäulenmanagement aufgestellt, welches sechs Muss- und drei Wunschkriterien beinhaltet. Zu den Musskriterien gehören all die Aspekte, welche unabdingbar für den CO₂-Kompass sind:

- Kontinuierlicher Bezug der Daten über die aktuelle Stromproduktion aus der ENTSO-E Transparency Datenbank. Unter Daten ist in diesem Kontext die Information über die Menge des erzeugten Stromes in Abhängigkeit zu der Erzeu-

³ <https://www.entsoe.eu/data/>

gungsart, gruppiert nach den regionalen Netzbetreibern, sowie die Gesamtheit aller Netzbetreiber in Deutschland, zu verstehen.

- Kontinuierlicher Download der Daten über die voraussichtliche zukünftige Stromproduktion für den nächsten Tag aus der ENTSO-E Transparency Datenbank.
- Persistente und konsistente Speicherung der erhaltenen und berechneten Daten in einer eigens verwalteten Datenbank.
- Laufende Berechnung der aktuellen CO₂-Emissionen (gemessen in gCO₂eq/kWh) auf Grundlage der abgerufenen Daten.
- Kontinuierliche Berechnung des CO₂-Ausstoßes bei der Stromproduktion für den Folgetag durch Verwendung der abgespeicherten Daten.
- Bereitstellung einer Software-Schnittstelle, die es Klienten ermöglicht, die bereitgestellten Daten des CO₂-Kompass für Entscheidungen zum Ladevorgang eines Elektroautos zu nutzen.

Die drei Wunschkriterien sind zwar - im Gegensatz zu den Musskriterien - nicht unabdingbar für das System, wurden aber im Zuge des Experteninterviews ausdrücklich gefordert. Die folgenden Kriterien entscheiden also nicht über den Betrieb des Systems, können allerdings die gewünschten Eigenschaften, welche aus dem Interview hervorgegangen sind, bereitstellen:

- Über eine Schnittstelle sollten dem Klienten die voraussichtlichen CO₂-Daten (ausgerechnet auf Basis der von ENTSO-E bereitgestellten Rohdaten) zur Verfügung gestellt werden.
- Der Zugriff auf die Schnittstelle sollte nach erfolgreicher Benutzerverifikation erfolgen können.
- In regelmäßigen Abständen soll eine Datensicherung der Datenbank angefertigt werden.

Der Anforderungskatalog, bestehend aus Muss- und Wunschkriterien, bildet die Grundlage für die Entwicklung der Software. Nach der Scrum-Methode wurden die Anforderungen nach für nach in das System gefügt, sodass eine funktionierende Architektur für den CO₂-Kompass aufgestellt wurde. Neben den beschriebenen Kriterien wurde auch ein weiteres Abgrenzungskriterium aufgestellt um dem Projekt einen realistischen Rahmen zu geben. Dieses Kriterium wird als Grundlage für zukünftige Forschungsfelder in Kapitel 6 erklärt.

4.2 Architektur

Durch einhalten und umsetzen der Kriterien wurde der CO₂-Kompass im Laufe eines mehrwöchigen Projektes entwickelt und folgt der in Abbildung 1 dargestellten System-Architektur. Der CO₂-Kompass ist in drei Teilsysteme unterteilt:

- (1) Der Crawler: Eine Schnittstelle zwischen ENTSO-E und eigener Datenbank
- (2) Der CO₂-Calculator: Schnittstelle zwischen Rohdaten und Vorhersagedaten
- (3) Die REST Schnittstelle: Erlaubt öffentlichen Zugang zu den Daten

Diese Teilsysteme werden im Folgenden erläutert, um die Funktionen des CO₂-Kompass und das Zusammenspiel zwischen ENTSO-E, Datenbank und Webseite (bzw. Ladesäule) darzustellen.

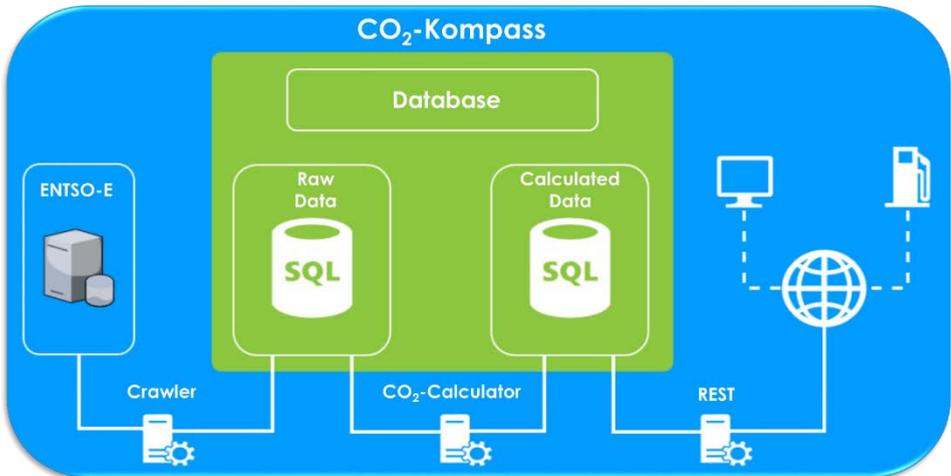


Abb. 1 - Architektur des CO₂-Kompass

Die benötigten Daten zur Stromproduktion in Deutschland werden durch ENTSO-E über eine Rest-API zur freien Verfügung bereitgestellt. Dies geschieht über einen angeforderten Sicherheitstoken. (1) Im Rahmen des Projektes werden diese Rohdaten von einem selbstentwickelten Crawler in fünfminütigen Abständen abgegriffen und auf Aktualisierungen geprüft. Fand eine Aktualisierung statt, so werden die Rohdaten strukturiert über ein Open-Source-Datenbankmanagementsystem in einer Datenbank abgelegt. Abgespeichert werden dabei die Stromproduktions-Daten für jeden Netzbetreiber in Deutschland und für Deutschland im Gesamten. Die Menge der derzeit 18 verschiedenen Produktionsarten des produzierten Stromes wird in Megawatt (MW) angegeben. (2) Weiterhin erfolgt alle fünf Minuten eine Berechnung der spezifischen CO₂-Werte für die vom Crawler hinzugefügten Produktionszahlen. Diese vom CO₂-Calculator berechneten Werte werden ebenfalls in der Datenbank abgespeichert und können so dem Netzbetreiber und der Produktionsart zugeordnet werden. Für die Berechnung der CO₂-Werte werden für jeden Netzbetreiber die Produkte von Produktionsmenge und spezifischer Emission pro Stromart (siehe [Sc14] für spezifische Emission) aufsummiert und zum Schluss durch die Summe an produziertem Strom geteilt. Diese Berechnung findet für alle fünf Anbieter in fünfminütigen Intervallen statt und liefert Werte im 15 Minuten Takt. Des

Weiteren erstellt der CO₂-Calculator jeden Tag um 0 Uhr eine CO₂-Vorhersage pro Produktionsart für den nächsten Tag. Dies geschieht für jeden Übertragungsnetzanbieter in Deutschland und die Vorhersage-Daten werden in der Datenbank abgelegt. Für die Vorhersage muss zunächst geprüft werden, ob die vom Netzbetreiber prognostizierten Produktionswerte für Wind und Solar vorliegen. Ist dies der Fall, wird weiterhin erst einmal geschaut, ob die Berechnung für den Betreiber bereits durchgeführt wurde. Ist dies nicht der Fall, startet die Berechnung. Folgende Formel wird genutzt, um den spezifischen Forecast nach Übertragungsenergieversorgern zu berechnen:

$$\frac{\sum_{k=0}^{\text{Anzahl Produktionstypen}} \frac{\text{Produktionsmenge}[k] \text{ von 3 Tagen}}{3} * \text{Faktor} * \text{Spezifischer Emissionsausstoß}}{\sum_{k=0}^{\text{Anzahl Produktionstypen}} \frac{\text{Produktionsmenge}[k] \text{ von 3 Tagen}}{3} * \text{Faktor} * \text{Produzierte Menge in MW}}$$

Dabei wird zunächst die Medianproduktion von allen Produktionsarten der letzten drei Tage berechnet, deren Produktion relativ konstant ist (z.B. Atomkraft, Öl). Diese Medianwerte werden mit ihren spezifischen CO₂-Ausstößen [siehe Sc14 für spezifische Emission] multipliziert und anschließend mit den Wind- und Solarvorhersagewerten, welche ebenfalls mit ihren spezifischen Emissionen multipliziert werden, aufaddiert. Dies geschieht immer jeweils für die gleichen Uhrzeiten. Danach werden die Strommengen der bereits berechneten Produktionsarten von dem vorhergesagten Gesamtstrom abgezogen. Man kann diesen hier auch als Reststrom bezeichnen. Dies sorgt für ein relativ stabiles Verhältnis aus vorhergesagten und bereits errechneten Werten. Der so übergebliebene Wert kann nun auf die übrigen Produktionsarten verteilt werden. Dafür werden für jede Produktionsart die Anteile an der Gesamtproduktion der letzten 2 – 4 Tage errechnet, so dass man einen Faktor erhält, der anschließend mit dem Reststrom multipliziert wird. Dies ergibt die Menge der voraussichtlichen Produktion für alle anderen Produktionsarten außer Wind und Solar. Die so errechneten Werte, werden durch den CO₂-Calculator berechnet und in die Datenbank eingetragen. (3) Um einen öffentlichen Zugang zu den Werten zu schaffen, wird eine REST Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Diese erlaubt durch gezielte http-Anfragen einen Zugang zu den abgelegten Daten. Diese Schnittstelle kann weltweit von allen Clients abgegriffen werden.

5 Anwendung des CO₂-Kompass

Die Einsatzmöglichkeiten für die Verwendung der Schnittstelle sind Vielfältig. So können beispielsweise Smarte Ladesäulen den aktuellen Strommix kontinuierlich erfragen und ihren Ladevorgang den Umweltverhältnissen anpassen. Ladesäulen können so immer auf „grünen“, CO₂-armen Strom setzen. Auch ist es dank der Vorhersage denkbar, die Ladesäulen so zu schalten, dass sie einen Ladevorgang erst dann starten, wenn ein

besserer Strommix vorliegt. Zudem kann die Schnittstelle zur Visualisierung von Daten genutzt werden.

5.1 Webseite

Im Zuge der Softwareentwicklung ist eine Webseite entstanden, über welche sich die Daten des CO₂-Kompass verwerten und darstellen lassen⁴. Am Anfang der Webseite stellt ein sich stetig aktualisierendes Liniendiagramm inklusive gleitendem Mittelwert die Emission der deutschlandweiten Energieerzeugung für die letzten 12 Monate dar (siehe Abbildung 2). Durch eine Verschiebung des Cursors, der sich unterhalb des Liniendiagrammes befindet, kann der Zeitraum der betrachtet werden soll eingestellt werden. Dies ermöglicht es, eine genauere Auskunft über die Emissionen der letzten drei Tage zu bekommen. Fährt man den Mauszeiger nun über das Diagramm, wird die Emission für einen bestimmten Zeitpunkt (im 15-Minuten-Rhythmus) angezeigt.

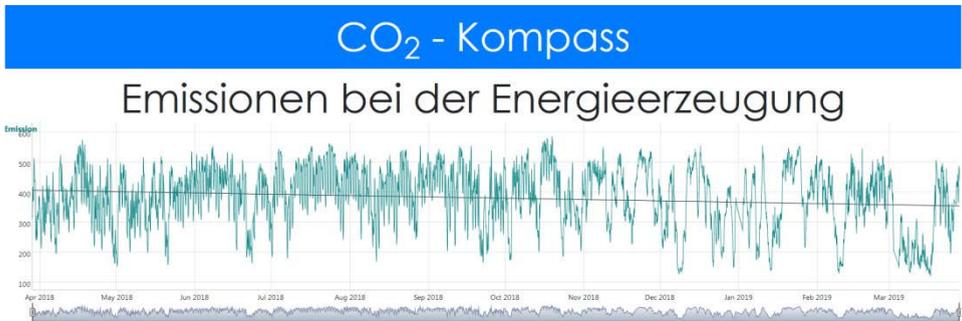


Abb. 2 - Emissionen bei der Energieerzeugung (Screenshot der Webseite, 12-Monats-Ansicht)

Der Webseite können neben den Emissionswerten auch Informationen über die aktuelle Stromproduktion pro Stromart in Megawatt und über den aktuellen prozentualen Anteil der regenerativen Energiequellen entnommen werden (siehe Abbildung 3). Diese Werte können je nach Einstellung für Deutschland im Gesamten oder für einen der vier Netzanbieter Transnet BW, TenneT GER, Amprion oder 50 Hertz angezeigt werden.

⁴ www.co2compass.ml

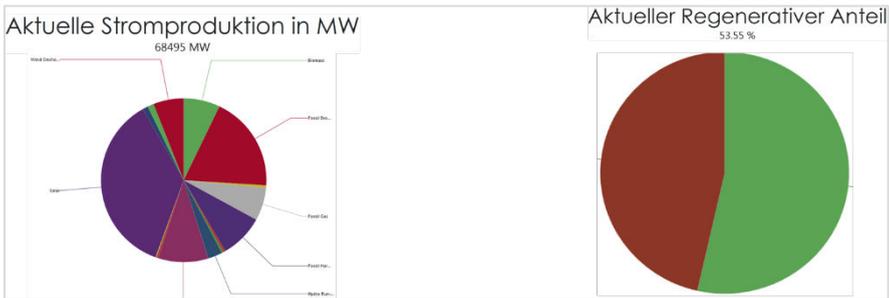


Abb. 3 - Aktuelle Werte der Stromproduktion (Screenshots der Webseite)

5.2 Integration in Smarte Ladesäulen

Neben der Webseite, über die eine nutzerfreundliche Visualisierung der Daten und Berechnungen möglich ist, bietet der vorgestellte Prototyp weitere Potenziale für einen nutzenstiftenden Einsatz in praktischen Anwendungsfällen. Durch die Bereitstellung der aggregierten Daten und der entsprechenden Analyseergebnisse über eine REST-Schnittstelle können beliebige andere Dienste Zugriff erhalten und darauf aufbauend ihr Leistungsangebot verbessern, beispielsweise um Kunden einen umweltfreundlicheren Konsum von Elektrizität zu ermöglichen. Intelligente Lademanagementsysteme können so sicherstellen, dass Fahrzeugbatterien von Elektroautos zu Zeitpunkten geladen werden, an denen der Strommix möglichst klimaneutral oder kostengünstig [En18; Ke16; Ya15] ist. Durch die Vorhersagefunktionalität ist zusätzlich noch eine Abschätzung möglich, wann das Fahrzeug vollgeladen ist. So kann mit Hilfe einer App eingestellt werden, wie lange ein Fahrzeug geparkt wird und nach welchen Kriterien die Ladung (Emissionen, Kosten, Ladedauer, etc.) optimiert werden soll. Dies ermöglicht neben den zuvor genannten Potenzialen beispielsweise auch die Vermeidung von Lastverschiebungen für die Stromzufuhr [Pa12; Fl13]. Durch den Einsatz bidirektionaler Ladesäulen kann dieser Effekt darüber hinaus noch verstärkt werden. Sie ermöglichen eine Entladung der Autobatterie und damit eine Rückspeisung der Energie in das eigene Netz [Pe11], wodurch die Fahrzeuge als mobile Stromspeicher genutzt werden können. Im Sinne einer klimaneutralen Ausrichtung kann somit CO₂-armer Strom gespeichert und zu Zeitpunkten mit höherem CO₂-relevantem Primärenergieträger-Anteil genutzt werden. Damit trägt der Prototyp in mehrfacher Hinsicht positiv zu zukünftigen Entwicklungen bei der Digitalisierung des Energiesystems bei: So können zum einen Geschäftsmodelle näher an den Erwartungen und Bedürfnissen der Kunden ausgerichtet werden, zum anderen kann die ökologische Nachhaltigkeit weiter verbessert werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der CO₂-Kompass wurde vor dem Hintergrund entwickelt, Emissionen im Zuge der Stromproduktion transparenter darzustellen, so dass Endkunden eine nachhaltigere Energiezufuhr für ihre Produkte wählen können. Dabei bietet sich nicht nur die hier beschriebene Ladesäule als Anwendungsbeispiel an. Vielmehr kann Software über die REST-Schnittstelle mit jeder beliebigen Hardware verknüpft werden. Für zukünftige Ausarbeitungen würden sich hier zum Beispiel Maschinen die ein gewisses zeitliches Verschiebungspotenzial haben (z.B. Wärmepumpen, Kühllager etc.) anbieten. In Bezug auf die Verknüpfung mit Ladesäulen, stellt die Software inklusive Schnittstelle ein großes Entwicklungspotential dar. Durch die Entwicklung einer angepassten Benutzeroberfläche wäre es zum Beispiel möglich, eine Steuerung des Ladevorgangs über die vorhergesagten Emissionswerte zu realisieren. Um diese Entwicklungspotentiale voll auszuschöpfen, ist es wichtig für zukünftige Forschungsarbeiten eine Ladesäule als Prototyp mit der hergestellten Software auszustatten um Funktionalitäten zu testen und zu verbessern. Eine solche Integration von Dienstleistung und Produkt wurde in vielen wissenschaftlichen Ausarbeitungen als Product-Service System definiert und kann für einen erweiterten Fokus auf nachhaltige Lösungen sorgen [MO02; Hü18]. Daher bietet es sich für die zukünftige Forschung an, den CO₂-Kompass in ein Product-Service System einzubetten und mögliche Geschäftsmodelle für ein solches System zu erstellen.

Zudem sollten Limitationen dieser Arbeit bei zukünftigen Forschungsprojekten bedacht werden. Unter anderem wurde im Zuge des Scrum-Ansatzes ein Abgrenzungskriterium aufgestellt, welches als limitierender Aspekt dieser Arbeit aufgefasst werden kann. Um der Entwicklung des Tools einen ersten Rahmen zu geben wurde folgendes Abgrenzungskriterium aufgestellt: ‚Die Anpassung der Benutzeroberfläche der Ladesäulen, sowie das Steuern der Ladefunktion sind kein Bestandteil der Toolentwicklung‘. Zukünftige Ausarbeitungen sollten das Ziel haben, den CO₂-Kompass in Ladesäulen zu integrieren. So können neue Erkenntnisse über das Tool erlangt werden und eine stetige Optimierung kann erfolgen.

7 Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „SmartHybrid – Electrical Engineering“ (ID: ZW 6-85003732) das durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und das Land Niedersachsen (Investitions- und Förderbank Niedersachsen – NBank) finanziert wird. Wir bedanken uns bei den Förderern für die Unterstützung. Zudem gilt unser Dank Marvin Büchel, Lukas Mönck, Alexander Sprengel, Roman Schnell und Leon Frankenberg für deren Arbeit an der Entwicklung des CO₂-Kompass.

Literaturverzeichnis

- [Br17] Brasseur, G. P., Jacob, D., & Schuck-Zöller, S. (2017). Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer.
- [En18] Ensslen, A., Ringler, P., Dörr, L., Jochem, P., Zimmermann, F., & Fichtner, W. (2018). Incentivizing smart charging: Modeling charging tariffs for electric vehicles in German and French electricity markets. *Energy research & social science*, 42, 112-126.
- [Fl13] Flath, C. M., Ilg, J. P., Gottwalt, S., Schmeck, H., & Weinhardt, C. (2013). Improving electric vehicle charging coordination through area pricing. *Transportation Science*, 48(4), 619-634.
- [GL10] Gloger, B. (2010). Scrum. *Informatik-Spektrum*, 33(2), 195-200.
- [Ha11] Hacker, F., Harthan, R., Kasten, P., Loreck, C., & Zimmer, W. (2011). Marktpotenziale und CO2-Bilanz von Elektromobilität.
- [Hü18] Hüer, L., Hagen, S., Thomas, O., & Pfisterer, H. J. (2018). Impacts of product-service systems on sustainability—a structured literature review. *Procedia CIRP*, 73, 228-234.
- [Ke16] Kempker, P., Dijk, N. V., Scheinhardt, W., Berg, H. V. D., & Hurink, J. (2016, January). Optimization of charging strategies for electric vehicles in PowerMatcher-driven smart energy grids. In *Proceedings of the 9th EAI International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools* (pp. 242-249). ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- [MO02] Mont, O. K. (2002). Clarifying the concept of product–service system. *Journal of cleaner production*, 10(3), 237-245.
- [NA14] Nationale Plattform Elektromobilität (2014) Fortschrittsbericht 2014 –Bilanz der Marktvorbereitung. http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_Fortschrittsbericht_2014_Barrierefrei.pdf
- [Or16] Orsi, F., Muratori, M., Rocco, M., Colombo, E., & Rizzoni, G. (2016). A multi-dimensional well-to-wheels analysis of passenger vehicles in different regions: Primary energy consumption, CO2 emissions, and economic cost. *Applied Energy*, 169, 197-209.
- [Pa12] Paetz, A. G., Jochem, P., & Fichtner, W. (2012). Demand Side Management mit Elektrofahrzeugen–Ausgestaltungsmöglichkeiten und Kundenakzeptanz. In *Symposium Energieinnovation* (Vol. 15, No. 17.02, p. 2012).
- [Pe11] Pehnt, M., Helms, H., Lambrecht, U., Dallinger, D., Wietschel, M., Heinrichs, H., ... & Behrens, P. (2011). Elektroautos in einer von erneuerbaren Energien geprägten Energiewirtschaft. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 35(3), 221-234.
- [Pl18] Plötz, P., Gnann, T., Wietschel, M., Kluschke, P., Doll, C., Hacker, F., ... & Lambrecht, U. (2018). Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr–Handlungsempfehlungen für Deutschland.

- [Pr15] Prys-Hansen, M., Lellmann, M., & Röseler, M. (2015). Die Bedeutung der Klimafinanzierung für den Pariser Klimagipfel 2015
- [Sc19] Schiffer, H. W. (2019). Zur energiewirtschaftlichen Notwendigkeit der Braunkohle für die Energieversorgung in Deutschland. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 1-14.
- [Sc15] Schill, W. P., Gerbault, C., & Kasten, P. (2015). Elektromobilität in Deutschland: CO2-Bilanz hängt vom Ladestrom ab. *DIW-Wochenbericht*, 82(10), 207-215.
- [Sc14] Schlömer, S., Bruckner, T., Fulton, L., Hertwich, E., McKinnon, A., Perczyk, D., ... & Wisser, R. (2014). Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. *Climate change*, 1329-1356.
- [SE13] Schlomann, B., & Eichhammer, W. (2013). Energieverbrauch und CO2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien: Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. T. Fleiter (Ed.). Fraunhofer-Verlag.
- [SC97] Schwaber, K. (1997). Scrum development process. In *Business object design and implementation* (pp. 117-134). Springer, London.
- [Th14] Thiel, C., Schmidt, J., Van Zyl, A., & Schmid, E. (2014). Cost and well-to-wheel implications of the vehicle fleet CO2 emission regulation in the European Union. *Transportation Research Part A: policy and practice*, 63, 25-42.
- [Tr13] Trommer, S., Schulz, A., Hardinghaus, M., Gruber, J., Kihm, A., & Drogosch, K. (2013). Verbundprojekt Flottenversuch Elektromobilität–Teilprojekt Nutzungspotenzial. *Schlussbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)*. Berlin: Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e. V.(DLR).
- [Um17] Umwelt Bundesamt, UBA (2017). Nettostromerzeugung in Deutschland 2016 nach Primärenergieträgern (entnommen aus: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/bilder/dateien/strommix-karte-2016.pdf>)
- [Um19] Umwelt Bundesamt, UBA (2019). Erneuerbare Energien - Vermiedene Treibhausgase, 15.03.2019 (entnommen aus: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/erneuerbare-energien-vermiedene-treibhausgase>)
- [Ya15] Yang, H., Yang, S., Xu, Y., Cao, E., Lai, M., & Dong, Z. (2015). Electric vehicle route optimization considering time-of-use electricity price by learnable partheno-genetic algorithm. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2), 657-666.
- [Ze19] Zellner, R. (2019). Zu viel CO2 aus dem Verkehr: Ist Elektromobilität die Lösung?. *Nachrichten aus der Chemie*, 67(3), 26-31.
- [Zi16] Zimmer, W., Blanck, R., Bergmann, T., Mottschall, M., Waldenfels, R.; Förster, H. et al. (2016): Endbericht Renewability III. Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Studie im Auftrag des BMUB 2016. Öko-Institut; DLR; ifeu Institut für Energie-und Umweltforschung Heidelberg (IFEU); Infrac