

The averaging bias – an underestimation of CO₂ emissions explanation, analysis and discussion

this presentation is available: www.ifkm.kit.edu

Thomas Koch

Karlsruhe, November 2021

Received: 28 May 2021 | Revised: 15 June 2021 | Accepted: 21 June 2021
DOI: 10.1002/zamm.202100205

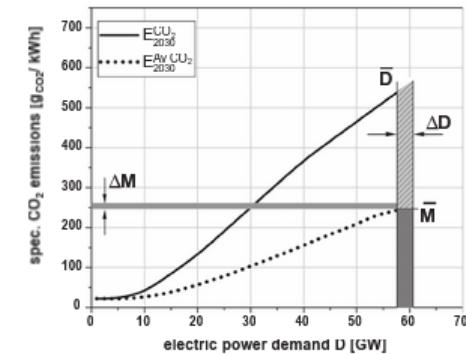
EDITOR'S CHOICE

ZAMM

The averaging bias - A standard miscalculation, which extensively underestimates real CO₂ emissions

Thomas Koch¹ | Thomas Böhlke²

FIGURE 6 Graphical illustration of Equations (50) and (51). Please note that the depicted areas represent $\bar{M}(\bar{D})\Delta D$ and $\bar{D}\Delta M(\bar{D}, \Delta D)$



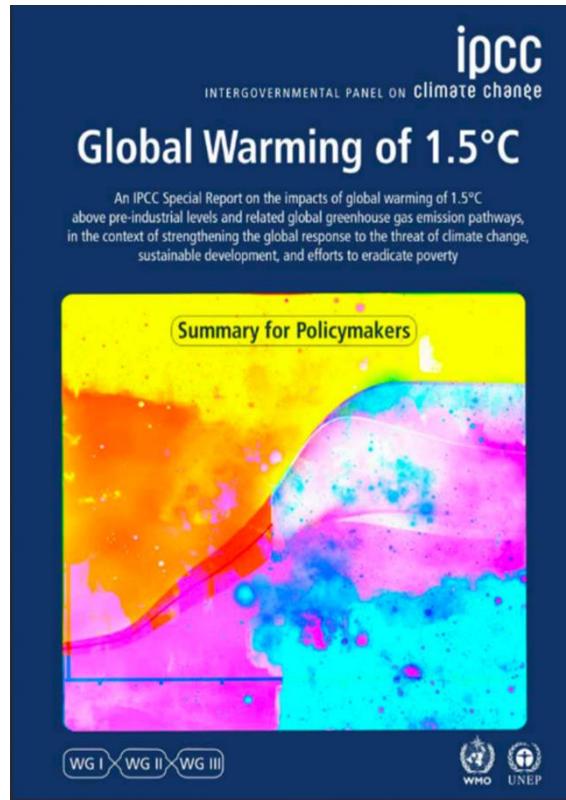
mit deutscher Übersetzung:

“Der Durchschnittsfehler, eine Unterschätzung der CO₂ Emissionen: Erklärung, Analyse und Diskussion

Overview

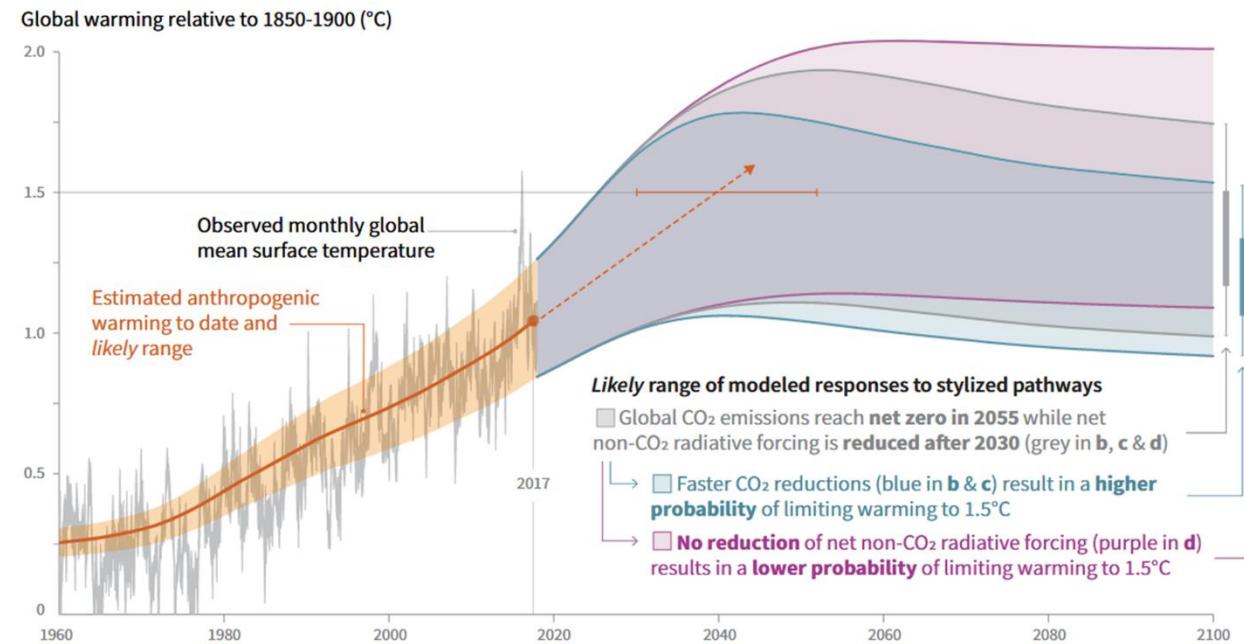
- 1** Introduction and motivation
- 2** Averaging bias
- 3** Criticism: discussion of open technical remarks (see page 8ff)
- 4** Summary

2018: IPCC report „Global warming of 1.5°C“



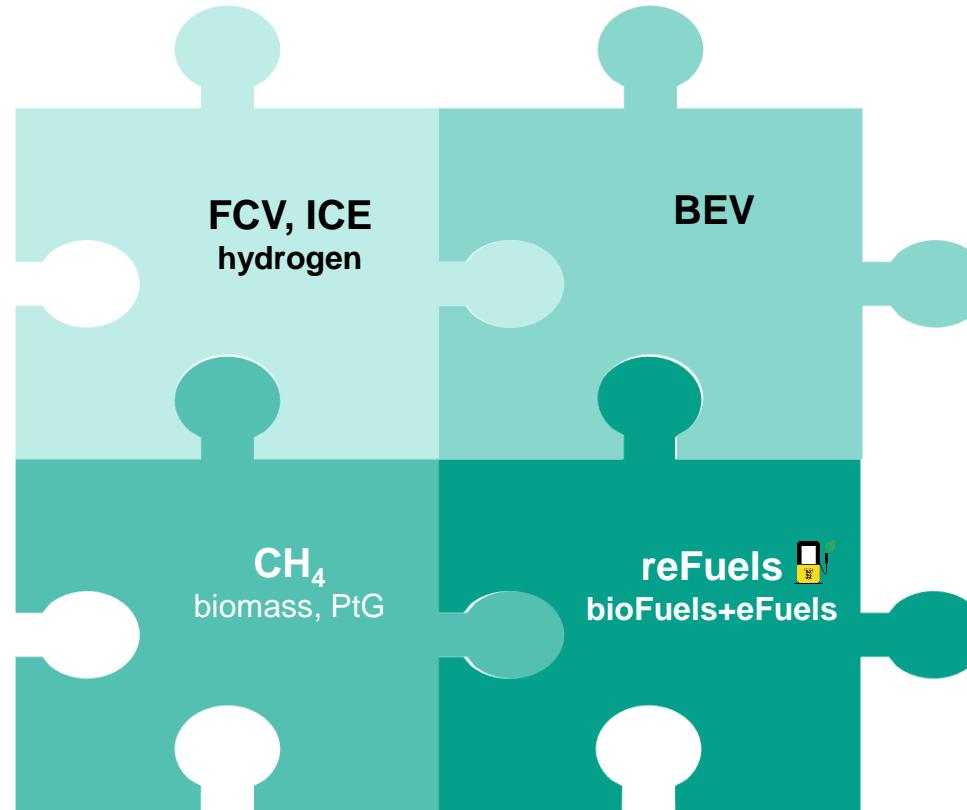
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf

- A.1 Human activities are estimated to have caused approximately 1.0°C of global warming⁵ above pre-industrial levels, with a *likely* range of 0.8°C to 1.2°C. Global warming is *likely* to reach 1.5°C between 2030 and 2052 if it continues to increase at the current rate. (*high confidence*) (Figure SPM.1) {1.2}



Im Jahr 2018 hat IPCC den Bericht „Global warming of 1,5°C“ vorgestellt. Eine der Kernbotschaften dieses Berichts war die Definition eines Rest-CO_{2e}-Restbudgets bis zur Erreichung der 1,5°C Erwärmung. Dieses Restbudget wird jeden Tag reduziert und betrug für die gesamte Menschheit von 420 Gt CO_{2e}. Eine effiziente Handlung zur Reduzierung der CO_{2e} Emissionen ist also entscheidend.

Mobility: Technology Options



Was bedeutet dies für Antriebe der Mobilität? Generell gibt es Technologieoptionen. Es geht hierbei nicht um eine Diskussion der Alternativen, sondern um die Entwicklung einer Strategie, welche eine ganzheitlich bestmögliche CO₂e Reduzierung gestattet! Hierzu müssen die CO₂e Emissionen bekannt sein. Batteriefahrzeuge (BEV) werden einen Flottenanteil beisteuern. Die Frage lautet nach dem CO₂e Fußabdruck von BEV Fahrzeugen, vor allem nach den wtt* Emissionen durch Aufladen.

wtt*: well to tank: beschreibt die Emissionen durch den Sektor elektr. Energie beim Batteriefahrzeug BEV

Motivation (representative examples)

Und wie viel CO₂ sparte das ein? Das kommt dann vor allem auf den Strommix an, mit dem man diese E-Autos lädt. Geht man davon aus, dass Elektroautos übers Jahr gesehen ungefähr den Durchschnittstrom laden, ist ihr indirekter Klimafußabdruck leicht zu errechnen: Man benötigt ihren Verbrauch (in kWh pro Kilometer), und die Menge an CO₂, die im Jahresmittel mit dem deutschen Kraftwerkspark pro kWh anfällt.

Im Kraftwerkspark gibt es Wind- und Photovoltaikanlagen sowie Wasserkraft, Atomkraft und Biogas, also CO₂-arme Erzeuger, ebenso wie Öl-, Gas- und Kohlekraftwerke. 2020 entstanden im Mittel laut vorläufigen Daten des Umweltbundesamts 366 Gramm pro Kilowattstunde deutschen Stroms, immerhin 400 Gramm oder 52 Prozent weniger als noch 1990. Bei einem durchschnittlichen Verbrauch der E-Autos auf 100 Kilometer von 18 kWh macht das rund 66 Gramm CO₂ je Kilometer oder 6,6 Kilogramm auf 100 Kilometer.

Source: typical calculation with simplified approach

$$\text{increase of CO}_{2e} [\text{g/h}] = M \cdot \Delta D$$

$$66[\text{g/km}] = 366 [\text{g/kWh}] \cdot 18 [\text{kWh/100km}]$$

Information: The unit [g/km] could be transferred into [g/h], if the electrical charging power, i.e. 18kW (example: 18kW for 1 hour -> 18kWh/h), is set:

$$6588[\text{g/h}] = 366 [\text{g/kWh}] \cdot 18 [\text{kW}] \text{ respectively } 6588 [\text{g/100km}] = 66[\text{g/km}]$$

Diese hier gezeigten vereinfachten Ansätze unterschätzen die realen CO_{2e} Mehremissionen deutlich.



$$\text{increase of CO}_{2e} [\text{g/h}] = M \cdot \Delta D$$

$$91[\text{g/km}] = 358 [\text{g/kWh}] \cdot 25,5 [\text{kWh/100km}]$$

Introduction – ZAMM publication 06/2021

Received: 26 May 2021 | Revised: 15 June 2021 | Accepted: 21 June 2021

DOI: 10.1002/zamm.202000205

EDITOR'S CHOICE

The averaging bias - A standard miscalculation, which extensively underestimates real CO₂ emissions

Thomas Koch¹ | Thomas Böhlke²

¹ Institute of Internal Combustion Engines Research (IFKM), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany

² Institute of Engineering Mechanics (ITM), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany

Correspondence:
Thomas Koch, Institute of Internal Combustion Engines Research (IFKM), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany.
Email: thomas.a.koch@kit.edu

Funding information:
DFG, Grant/Award Numbers:
Project 237267381 (TRR 150),
Project 426888090 (SFB 1441)

The substitution of energy based on fossil fuels in different sectors like household or traffic by electric energy saves CO₂ of this specific sector due to decreased fossil fuel consumption. An important quantity is the additional CO₂ emission $\Delta F(D, \Delta D)$ due to an increased electric power demand ΔD for the average electricity power demand D . Commonly, the formula $\Delta F(D, \Delta D) \approx M(\bar{D})\Delta D$ is used (called simplified formula), where $M(\bar{D})$ represents mean average CO₂ footprint. It is shown in the present manuscript, that the simplified formula may underestimate the CO₂ footprint significantly if the average CO₂ footprint depends on the average electricity power demand, which is the case for most of mixed partly renewable and partly non-renewable electric energy systems. Therefore, the real CO₂ emissions would outmatch those according to simplified easily by factor 2 in reality depending on the status of the electricity system. In order to establish a more precise calculation of the CO₂ footprint, the general formula $\Delta F(D, \Delta D) = \Delta M(D, \Delta D) + \Delta DM(\bar{D} + \Delta D)$ which is exact and contains the simplified formula as a special case, is derived in this article. The simplified formula requires an additional term that takes into account the change of the mean average CO₂ footprint ΔM depending on the electricity power demand.

KEY WORDS
CO₂ emissions, electricity, fossil-based energy, Leibniz's fundamental theorem of calculus, non-fossil-based energy

1 | GENERAL INTRODUCTION

The rapid reduction of global CO₂ emissions is the key recommendation of the Intergovernmental Panel of Climate Change IPCC [1]. Policymakers around the world are responding to enable this ambitious target [2, 3]. A total global remaining CO₂ budget of 420 Gt for humanity was analyzed by the IPCC to limit global warming to 1.5 °C. Detailed probabilities for the achievement of the warming limit have been determined but are unimportant for the focus of this publication.

A policy approach to manage and analyze the reduction of CO₂ emissions is to define different sectors such as electric power, transport, industry, and households. Each sector is typically regulated with a tighter limit on CO₂ emissions, that is, a 50% reduction. However, looking at each sector in isolation can lead to inaccurate estimates of CO₂ emissions because the sectors interact.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

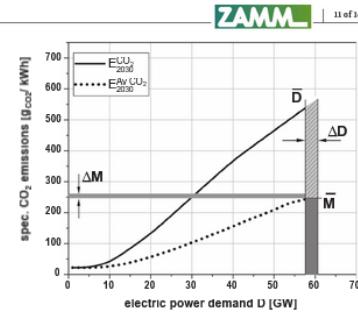
© 2021 The Authors. ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics published by Wiley-VCH GmbH.

Z Angew Math Mech. 2021;101:e202000205.

ZAMM

KOCH AND BOHLKE

FIGURE 6 Graphical illustration of Equations (50) and (51). Please note that the depicted areas represent $\Delta M(D, \Delta D)$ and $\Delta DM(\bar{D}, \Delta D)$.



4 | DISCUSSION AND CONCLUSION

For the calculation of CO₂ emissions of additional electric energy demand, insufficient simplified mathematical models are typically used, which might be motivated by the complexity of the electricity supply sources and the grid situation. An example for such a simplified formula to analyze the additional CO₂ emissions per time interval $\Delta F(D, \Delta D)$ caused by additional electric power ΔD (unit: Watt) is the direct utilization of the average CO₂ emission footprint $M(D)$ (unit gCO₂/kWh) for a given average electricity demand \bar{D} of the electricity sector by the equation

$$\Delta F(D, \Delta D) \approx M(D)\Delta D, \quad (49)$$

which corresponds to the simplified formula introduced in Section 4 (see equation (30)). As shown in Section 3, the following integral would be the exact formulation

$$\Delta F(D, \Delta D) = \int_D^{D+\Delta D} f(D) dD. \quad (50)$$

Here, $f(D)$ represents the specific CO₂ emissions as a function of electric power demand D .

The mathematical analysis showed that Equation (49) is only valid, when the CO₂ emissions are completely independent from the energy supply situation, that is, if the complete electric energy would be either supplied constantly only by one technology, that is, wind power, or would be supplied by a constant mix of several technologies, that is, a combination of wind power and photovoltaics power, which is both by far not the case.

The examples discussed in Section 3 show for the specific assumption of a discontinuous, piecewise constant function and a linear function that the simplified formula is generally invalid and leads to erroneous results. The simplified formula is only valid for a constant function. Indeed, there is a clear interaction between electric power demand D and CO₂ emissions of the electricity sector, as additional electric energy supply typically requires the support of additional fossil power plants also in the future. It is clear that Equation (49) cannot be generally utilized as it may significantly underestimate real CO₂ emissions.

By applying the fundamental theorem of differential and integral calculation of Leibniz of the 17th century, the general and exact formula can be written as follows (see Equations (36) and (38))

$$\Delta F(\bar{D}, \Delta D) = \Delta DM(\bar{D}, \Delta D) + \Delta DM(\bar{D} + \Delta D).$$

$$\Delta F \text{ increase of CO}_2e [\text{g/h}] = M \cdot \Delta D$$

Exact formula

By applying the fundamental theorem of differential and integral calculation of Leibniz of the 17th century, the general and exact formula can be written as follows (see Equations (36) and (38))

$$\Delta F(\bar{D}, \Delta D) = \Delta DM(\bar{D}, \Delta D) + \Delta DM(\bar{D} + \Delta D).$$

$$\Delta F \text{ increase of CO}_2e [\text{g/h}] = D \cdot \Delta M + M \cdot \Delta D$$

In Beratungspapieren für die Politik, vielen Zeitungsbeiträgen und in wissenschaftlichen Publikationen wird oftmals ein großer Fehler begangen, der „averaging bias“. Zusammen mit meinem Kollegen T. Böhlke haben wir diesen Fehler im Juni 2021 erläutert. Die Botschaft war nicht, dass elektrische Verbraucher keinen Sinn machen. Die Botschaft war, dass für eine optimale CO₂e Reduzierung die Strategie auf Basis einer korrekten physikalisch, mathematischen Analyse entwickelt werden muss.

Very positive feedback

Institutsleiter, ehem. Leiter des Zentrums für Energie, Technische Universität

„Ich unterstütze die Aussage der Veröffentlichung der Kollegen Koch und Böhlke* zur Problematik der Mittelwertbildung, um die Emissionsreduktion durch die Einführung von Elektrofahrzeugen vorhersagen zu können. Dabei geht es mir nicht um eine Ablehnung der Elektromobilität per se sondern darum, auf einer wissenschaftlich fundierten Basis das Einsparpotential unterschiedlicher Technologien möglichst exakt beurteilen zu können.“

Lehrstuhlleiter, ehem. Leiter center of energy, >35 Jahre Erfahrung im Bereich Energiewandlung, Technische Universität

“It is simply physics that dictate that what counts for the above consideration is the marginal power which is needed and can be made available for any additional electricity consumer (being it heat pumps, e-vehicles, directly electrified industrial processes and so on...)”

Institutsleiter i.R., Technische Universität

„Die Verwendung des Mittelwertansatzes für zusätzliche elektrische Verbraucher ist schlichtweg falsch“.

Institutsleiter Fachbereich Energiewandlung, Technische Universität

„Wissenschaftliche Aussagen müssen auf Fakten basieren, anhand dieser kann die aktuelle Situation bewertet werden. Darauf aufbauend können die erreichbaren Änderungen in realistischen Zukunftsszenarien quantifiziert werden.“

Aktuell zeigen die Fakten, eine Bewertung des CO₂ Abdrucks von elektrischen Verbrauchern mit Hilfe des Strommix ist nicht korrekt und kann zu falschen Schlussfolgerungen führen.“

Institutsleiter, Fachbereich Energiewandlung, erfolgreiche DFG Initiative von Sonderforschungsbereich im Kontext Energiewandlung, Technische Universität

„Die ZAMM Publikation ist im Kern sehr wertvoll und arbeitet das Problem mathematisch heraus. Die Kernaussage, dass die CO₂-Bilanz eines weiteren elektrischen Verbrauchers nicht mit dem Mittelwert abgebildet wird, ist natürlich korrekt und sehr wichtig.“

Institutsleiter, Fachbereich Energiewandlung, >30 Jahre Erfahrung im Bereich Simulation der Energiesysteme, mehrere DFG Einwerbungen von Sonderforschungsbereichen im Kontext Energiewandlung im Bereich Kraftwerkstechnik, Strömung, Technische Universität

„Die Abbildung des CO₂-Fußabdruckes über den Mittelwert für elektrischen Verbrauch unterschätzt die real anfallenden CO₂ Emissionen teilweise deutlich, worauf ausdrücklich hingewiesen wird. Es ist unverständlich, dass ein so offensichtlicher Zusammenhang systematisch ignoriert wird.“

Ehemaliger Präsident einer Forschungsinstitution i.R., Fachbereich Energietechnik

„Es (Anmerkung: das ZAMM Paper) gefällt mir gut, weil es sauber alle Beiträge formuliert und diskutiert und mit realistischen Zahlen unterlegt. Ich werde es in Zukunft zitieren. Die geforderte systemische Sichtweise vertrete ich im Übrigen schon seit vielen Jahren.“

Institutsleiter, Fachbereich Energiewandlung, Technische Universität und Großforschung

„Die Mittelwertabbildung eines CO₂-Fußabdrucks über Jahre hinaus, wie im Artikel angedeutet, ist nur dann legitim, wenn die Annahme erfüllt wird, dass die Erzeugung CO₂-freien Stroms um ein Mehrfaches die des zusätzlich angeforderten Verbrauchs an Strom (für elektr. Wärmepumpen, Mobilitätsanwendungen, elektrifizierte Produktionsprozesse, etc) übersteigt. :“

Ich hoffe aus der Argumentation wurde klar, dass ein nichtlineares mehrdimensionales Problem nicht mit Hilfe einer linearen Interpolation auf Oberstufenniveau gelöst werden kann. Ich denke dies setzt auch die Wertigkeit der Schlussfolgerung in ein entsprechendes Licht.“

Institutsdirektor, digitale Transformation, Hochschule

„Die Betrachtung des CO₂-Fußabdruckes über den Mittelwertansatz ist nicht korrekt.“

Institutsleiter, ehem. Präsident einer Technischen Hochschule

„Zur Klärung bietet sich ein Gedankenexperiment an:
Frage: Wenn sie eine zusätzliche kWh elektrischer Energie benötigen, welches Kraftwerk wird diese Energiemenge ins Netz einspeisen?“

Antwort: Das wird das CO₂-intensivste Kraftwerk sein, weil alle anderen weniger CO₂-intensiven Kraftwerke bereits mit voller Kapazität ins Netz liefern. Andernfalls würde man ja unnötig viel CO₂ produzieren um die vorher geforderte Menge an elektrischer Energie zu liefern.“

Institutsleiter, Energiesysteme und Energietechnik, Technische Universität

„Die vereinfachte Modellierung der CO₂ Emissionen durch elektrische Verbraucher gemäß einem Mittelwert des Strommix unterschlägt die realen CO₂ Emissionen deutlich und ist typischerweise nicht zulässig. In Deutschland werden für das Jahr 2030 regelbare Kraftwerkskapazitäten in der Größenordnung von 60GW benötigt, um die aufkommende Versorgungslücke zu bedienen, was überwiegend nur durch fossile Kraftwerke möglich ist und deren Bedeutung auf die CO₂ Emissionen untermauert.“

Das positive und klare Feedback aus dem Kreis der Energiekollegen war überwältigend und sehr positiv. Oben sind ausgewählte Stellungnahmen abgebildet. Es gab auch Kritik. Die technisch, physikalischen Elemente der Kritik greife ich mit dieser Ausführung auf und erläutere für das interessierte Publikum nochmals den sehr wichtigen Sachverhalt. Mathematik und Physikenkenntnisse der 10.-ten Klasse sollten ausreichend sein, um dem Inhalt dieser Ausführung folgen zu können.

Overview

- 1 Introduction and motivation
- 2 Averaging bias
- 3 Criticism 1: „M·ΔD is standard“
- 4 Criticism 2: „additional consumer“
- 5 Criticism 3: „modern electric systems“
- 6 Criticism 4: „energy dedicated only to electric vehicles“
- 7 Criticism 5: „energy or power“
- 8 Summary

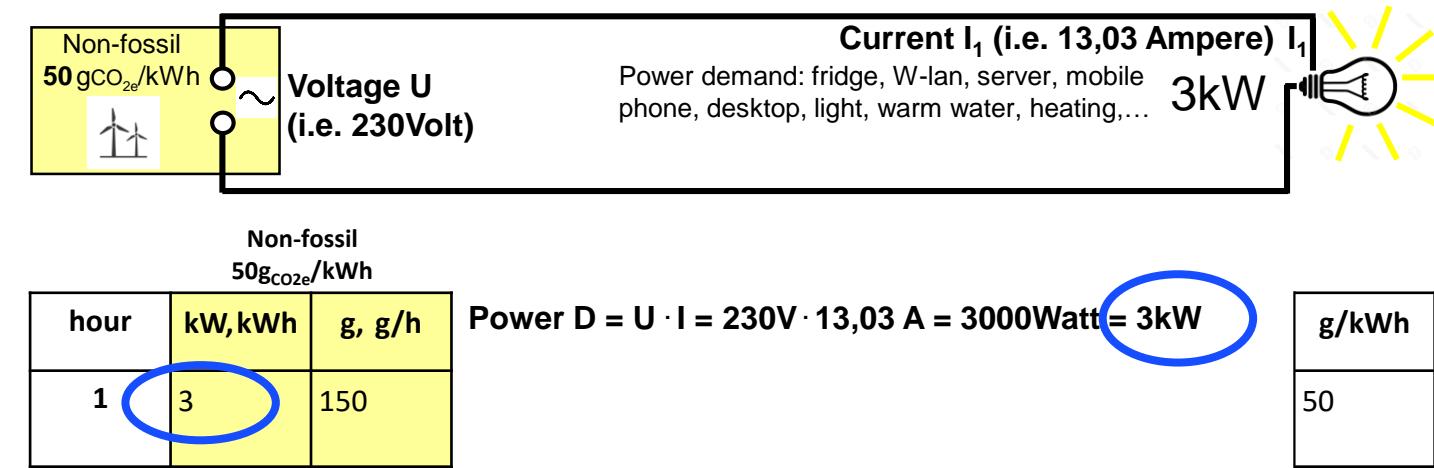
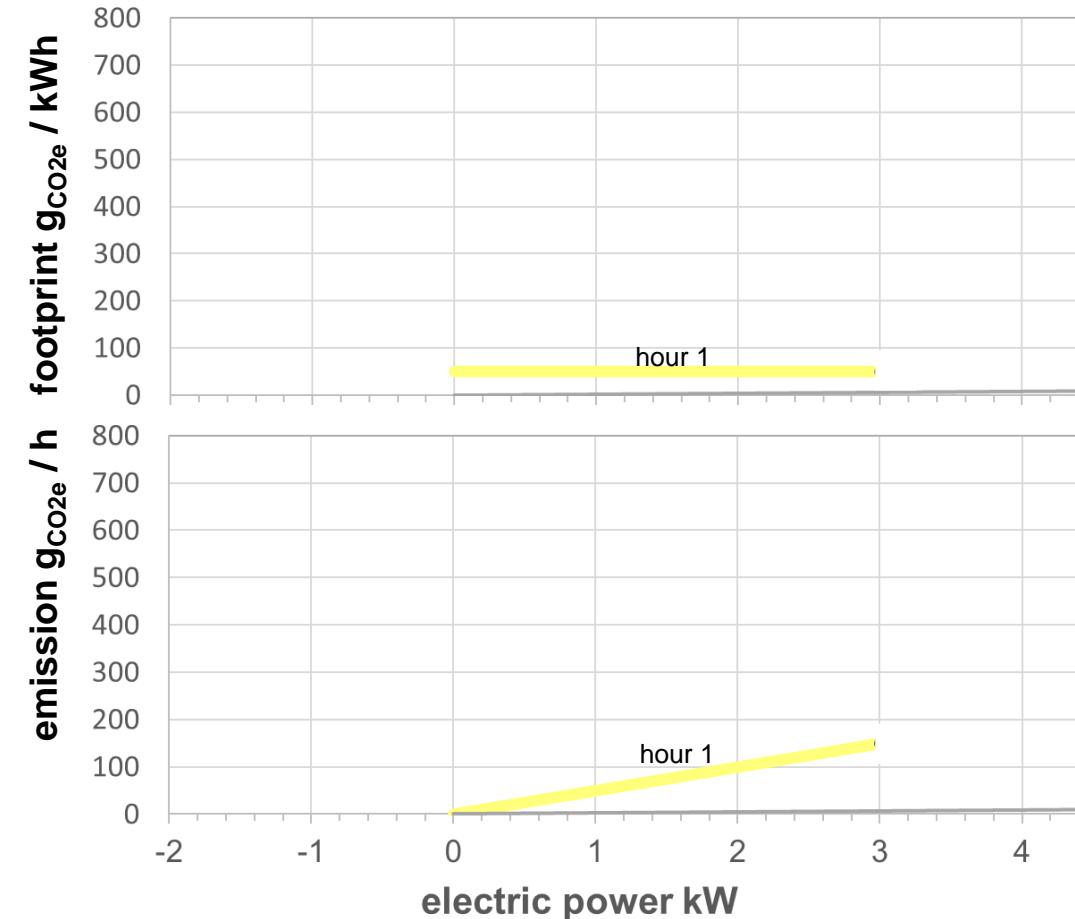
Criticism 1

Criticism: „The utilization of the equation $\Delta F \text{ increase of CO}_{2e} [\text{g/h}] = M \cdot \Delta D$ is standard!

Kritik 1: Eine wiederholte Kritik lautete, die Verwendung der Basisgleichung $M \cdot \Delta D$ sei Standard für die Berechnung der CO_{2e} Emissionen eines zusätzlichen elektrischen Leistungsbedarfs!

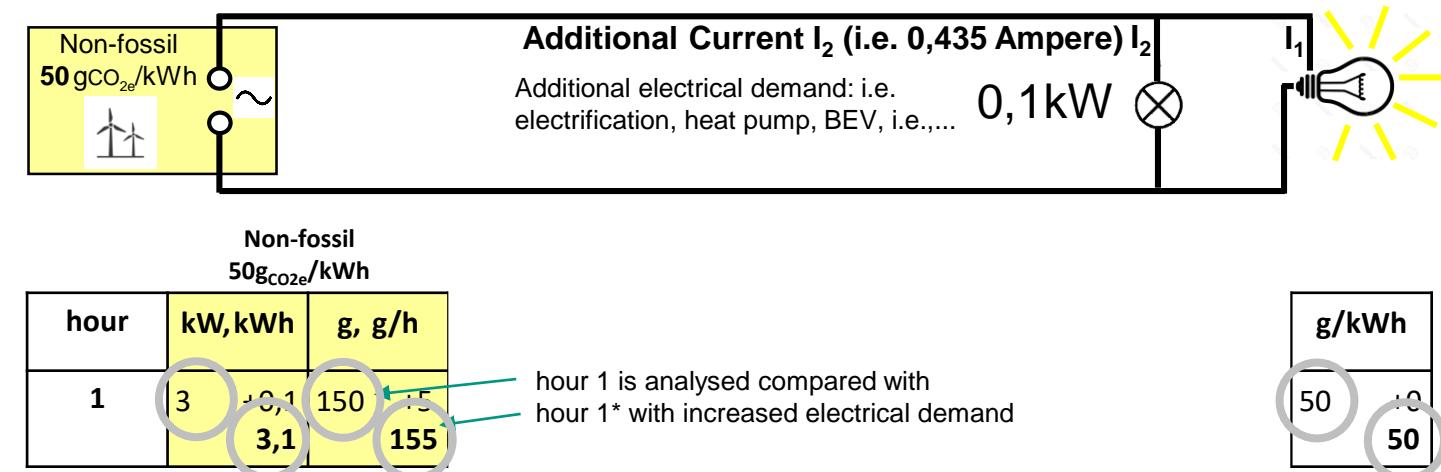
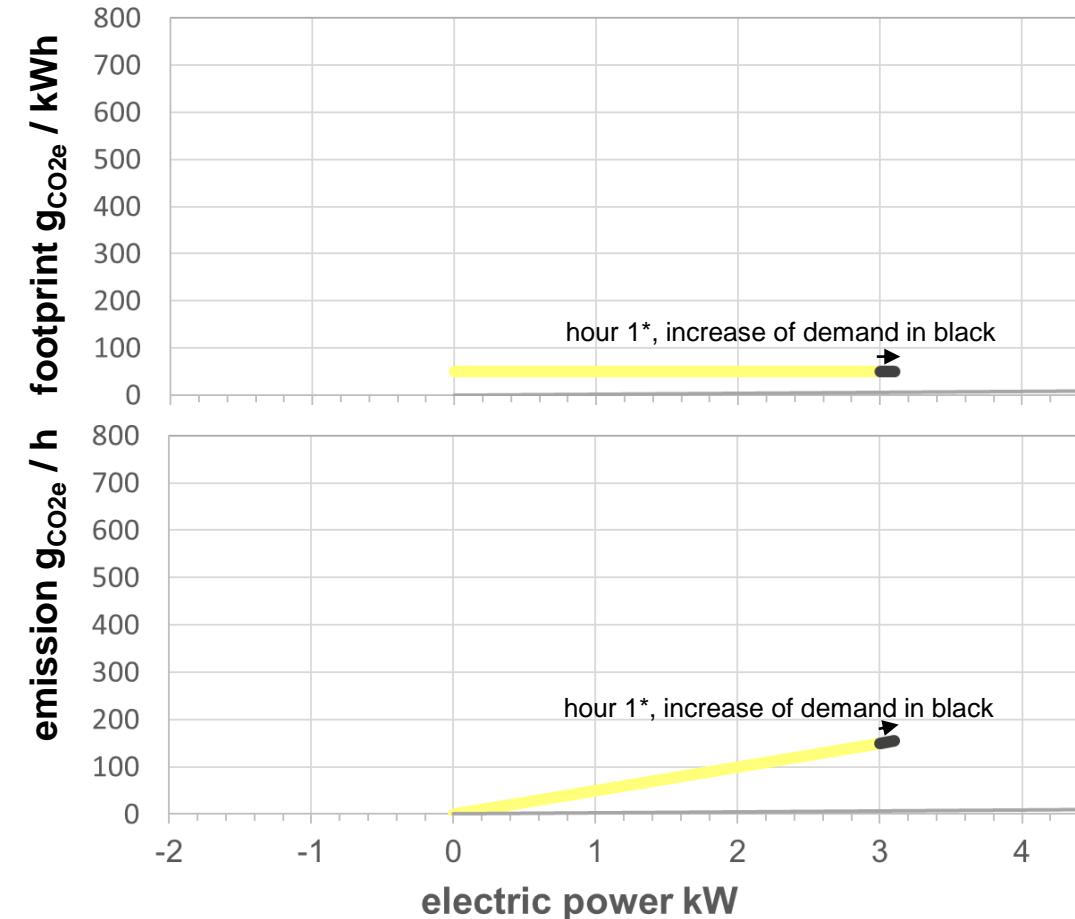
Zur Erläuterung dieser These bilden wir nachfolgend ein Energiesystem zum allgemeinen Verständnis ab.

Electricity: „Non-fossil `only`“



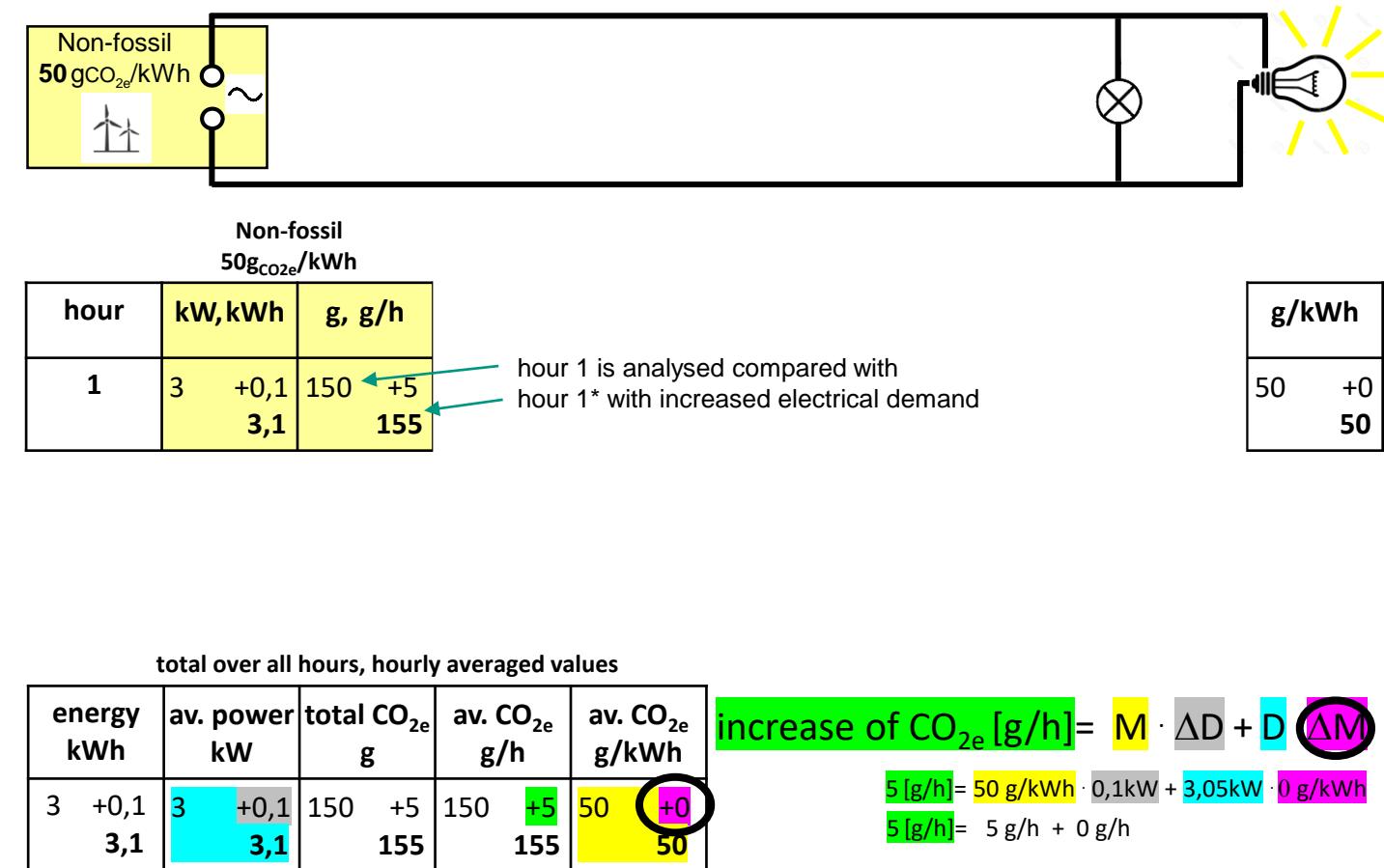
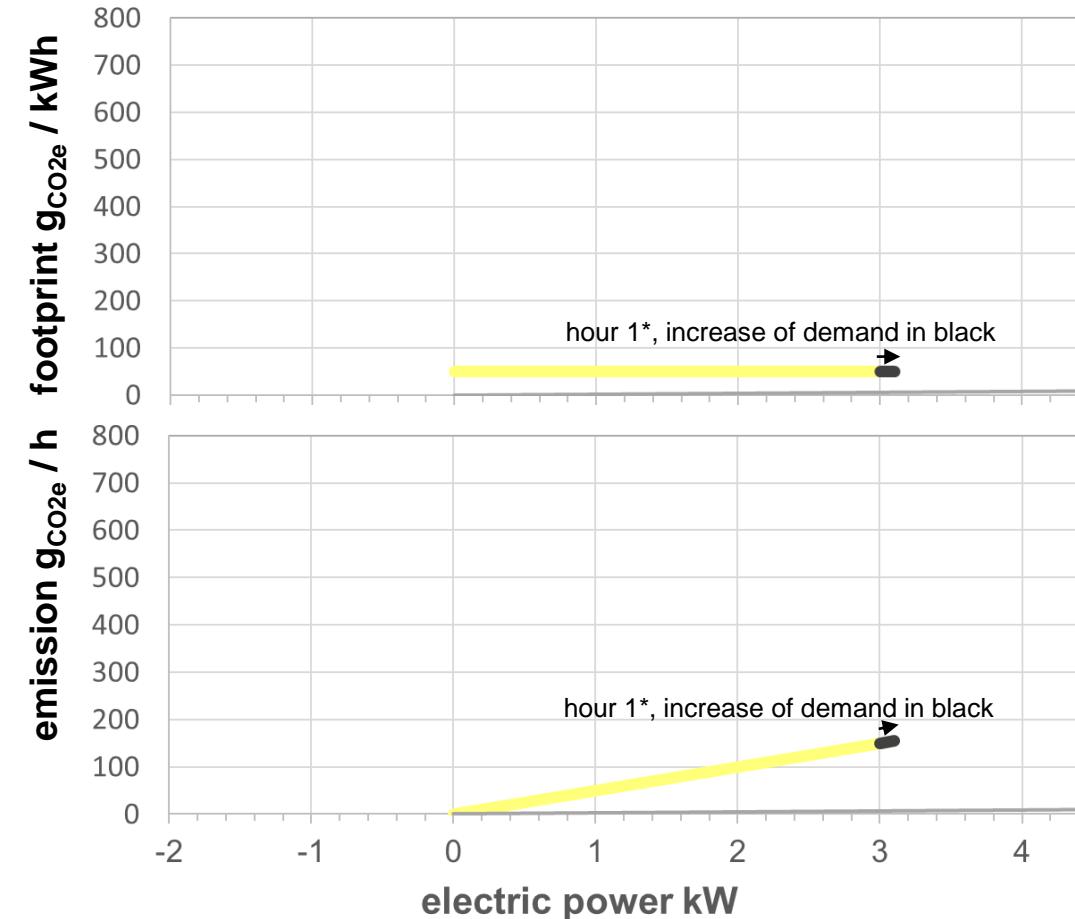
Ein elektrisches Vergleichssystem wird durch eine nicht-fossile Spannungsquelle mit geringem CO₂e Fußabdruck versorgt.
 Elektrische Verbraucher bedingen eine exemplarische elektrische Leistung von 3 kW (hour 1).

Electricity: „Non-fossil `only`“



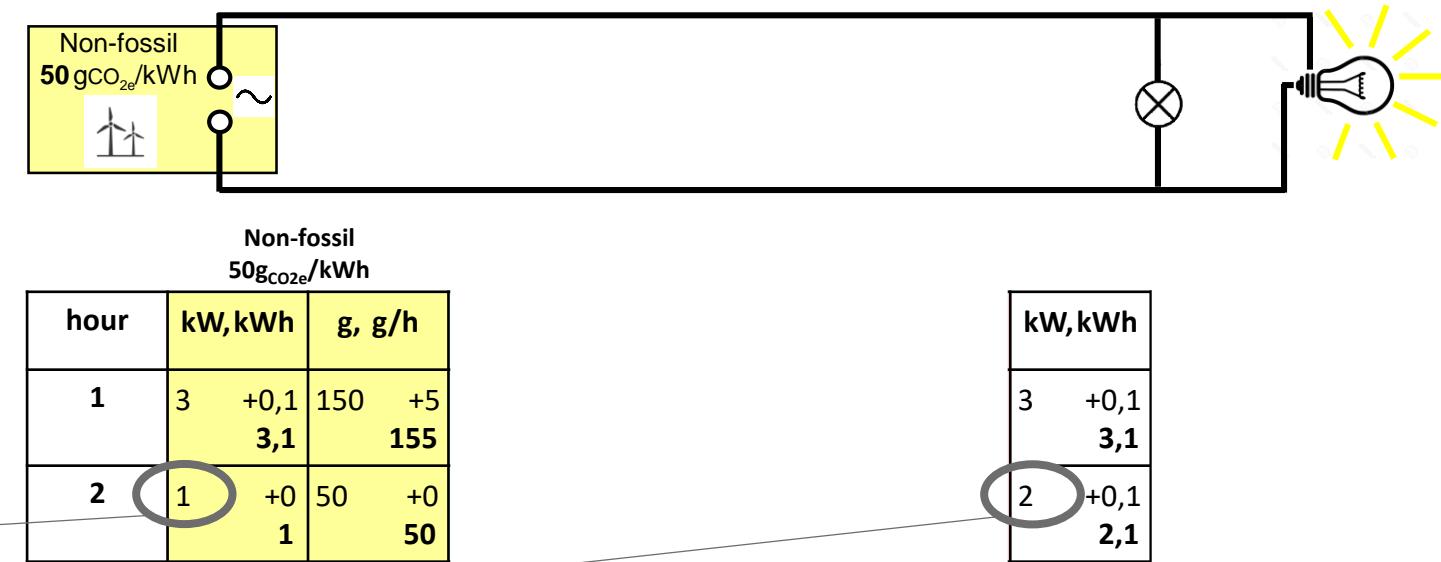
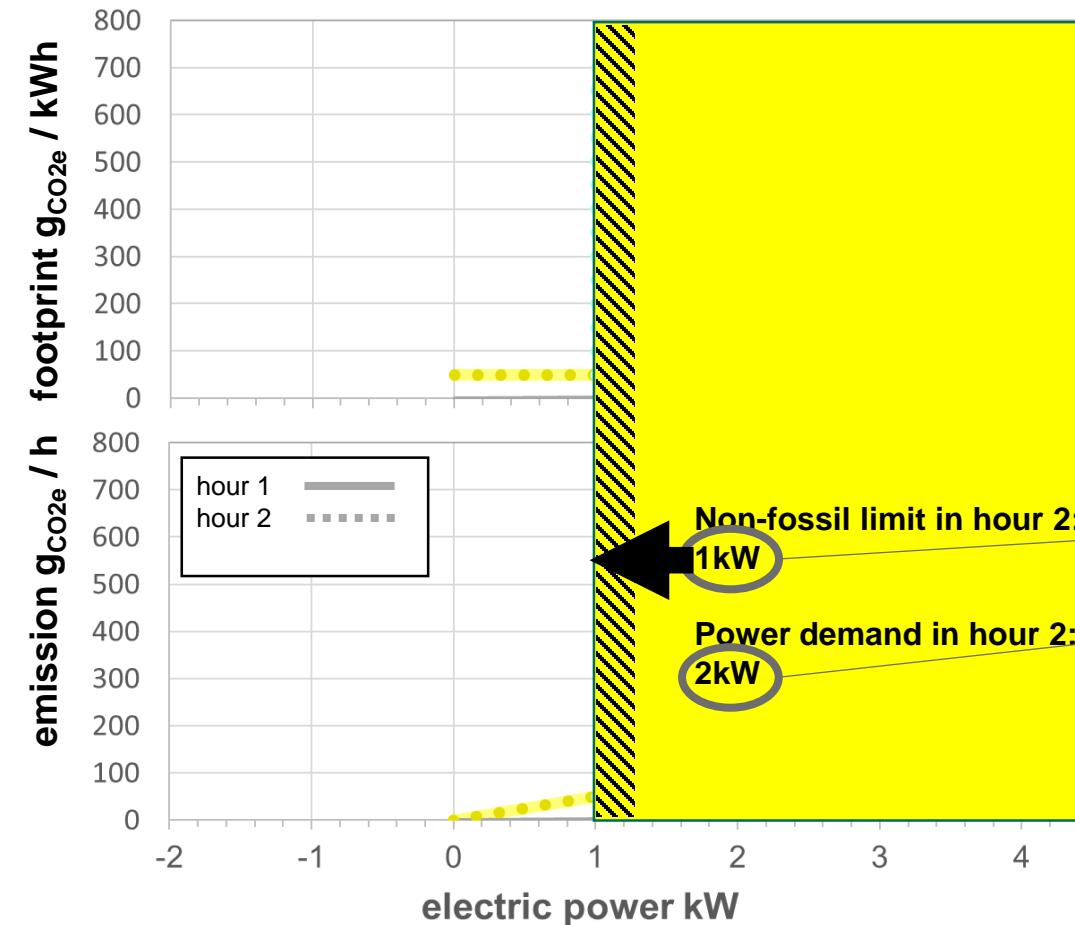
Die Frage lautet „Was ist die Konsequenz eines zusätzlichen elektrischen Verbrauchers?“ Dieser zusätzliche elektrische Verbraucher wird in diesem Fall durch einen weiteren elektrischen Widerstand R mit einem Leistungsbedarf von $0,1\text{ kW}$ abgebildet. Ein Vergleich der Erhöhung der elektrischen Last in Stunde 1* im Vergleich mit Basisfall Stunde 1 ist abgebildet. Der unveränderte Durchschnittswert des Fußabdruckes (av. $\text{CO}_{2\text{e}} = 50\text{ g/kWh}$) wird durch Division von 155 g/h durch $3,1\text{ kW}$ bestimmt.

Electricity: „Non-fossil `only`“



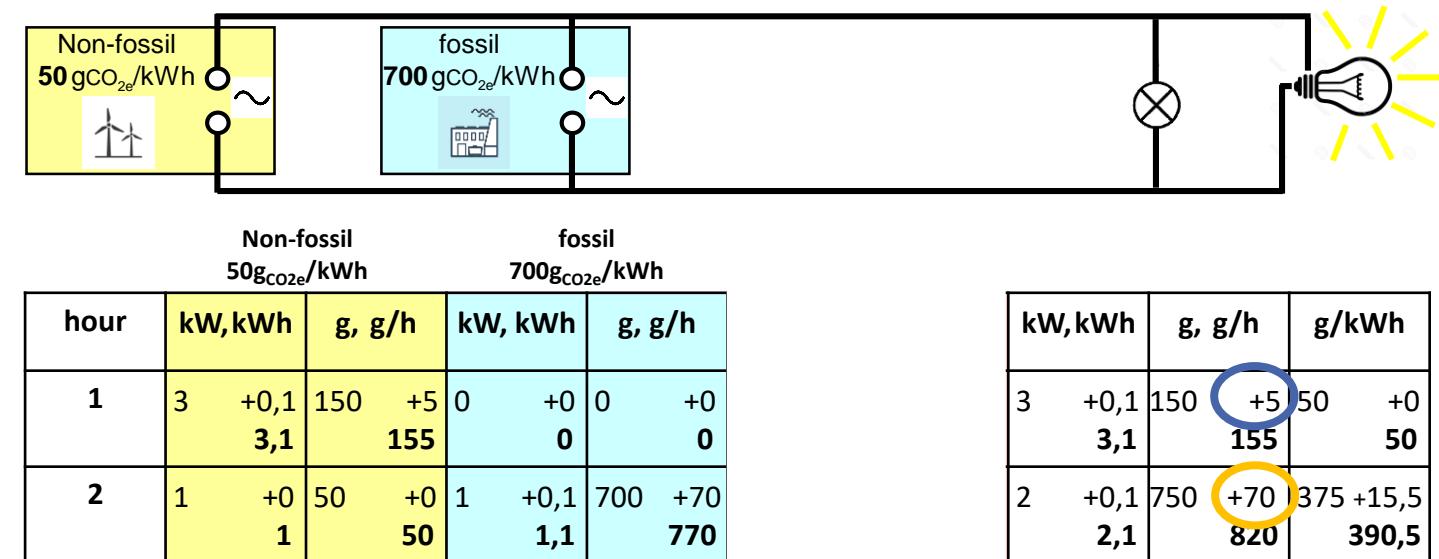
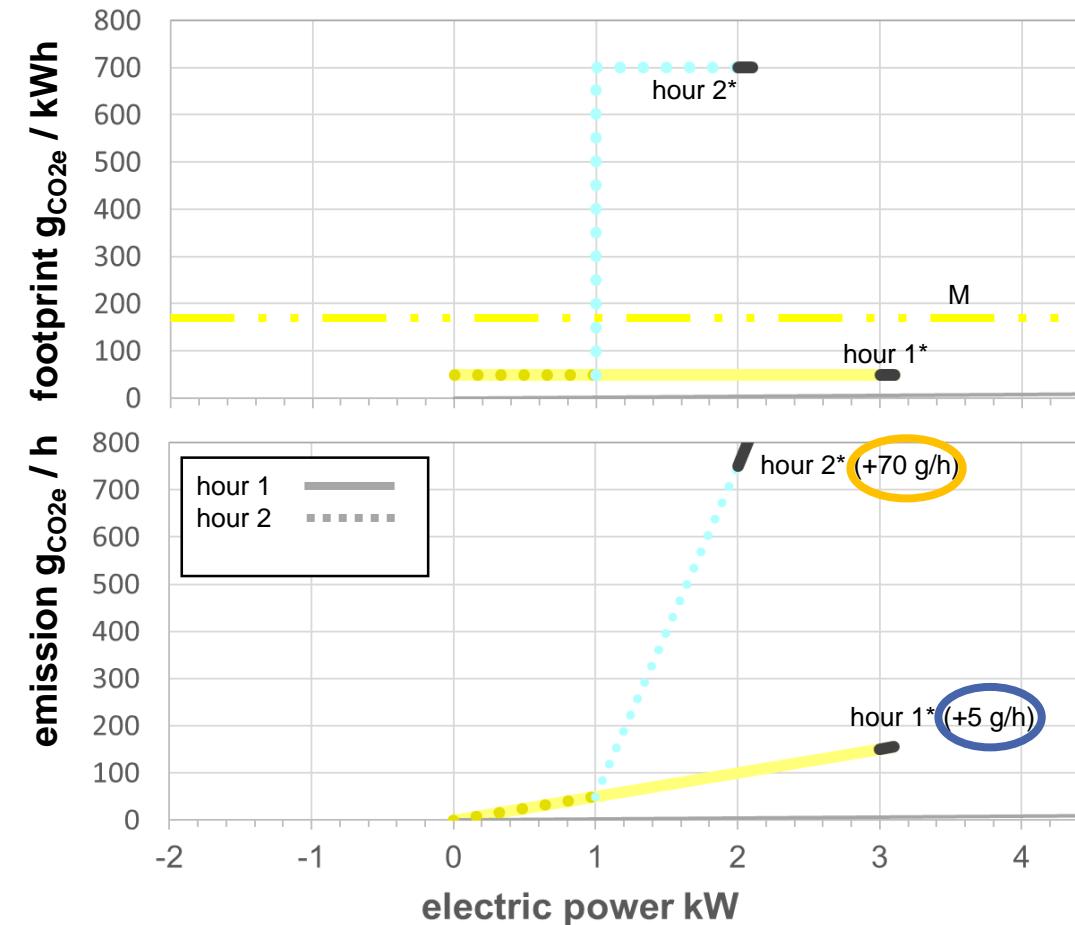
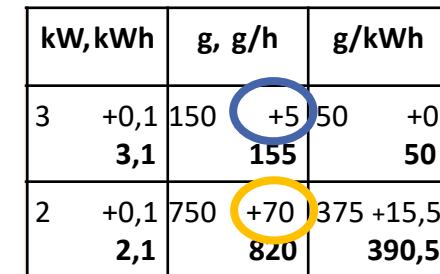
Durch die elektrische Leistungsbedarfserhöhung von 0,1 kW beträgt der Anstieg der CO₂e Emissionen 5 g/h. Die Energieversorgung übernimmt ausschließlich die non-fossile Quelle mit konstantem CO₂e Fußabdruck. Der Mittelwert des CO₂e Fußabdruckes bleibt konstant ($\Delta M=0$), da die elektrische Leistung durch die gleichbleibende Spannungsquelle sichergestellt wird.

Electricity: „non-fossil / fossil mix“



Im vorliegenden Fall wird nun exemplarisch in Stunde 2 mit einer Bedarfsnachfrage von 2 kW gerechnet, obwohl nur 1 kW (non-fossil) verfügbar sind. Dies bedeutet, dass eine weitere Leistungsquelle hinzugefügt werden muss. Diese weitere Leistungsquelle wird in diesem Beispiel in einem ersten Schritt eine fossile Leistungsquelle sein. Später werden wir weitere Optionen diskutieren.

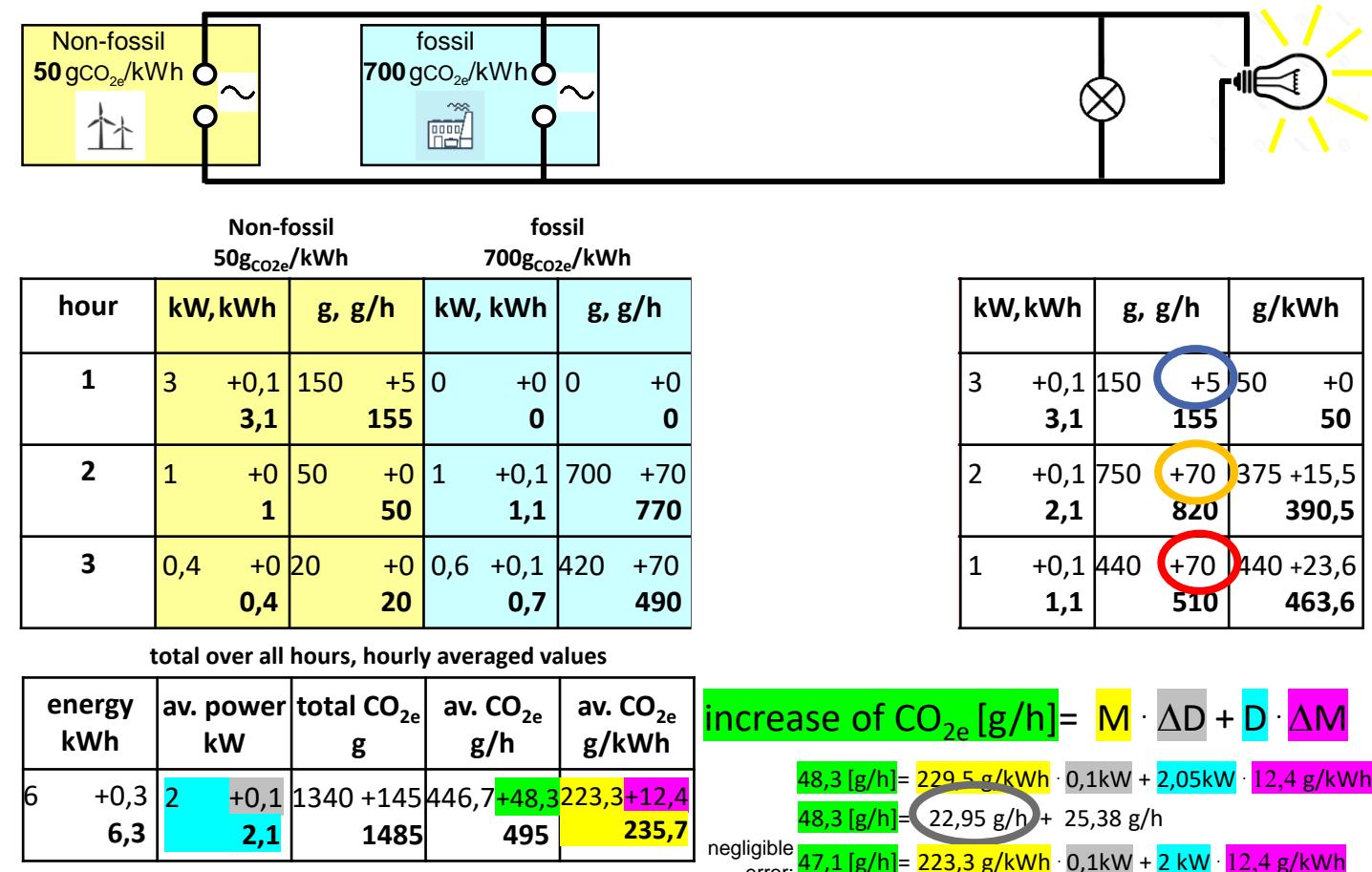
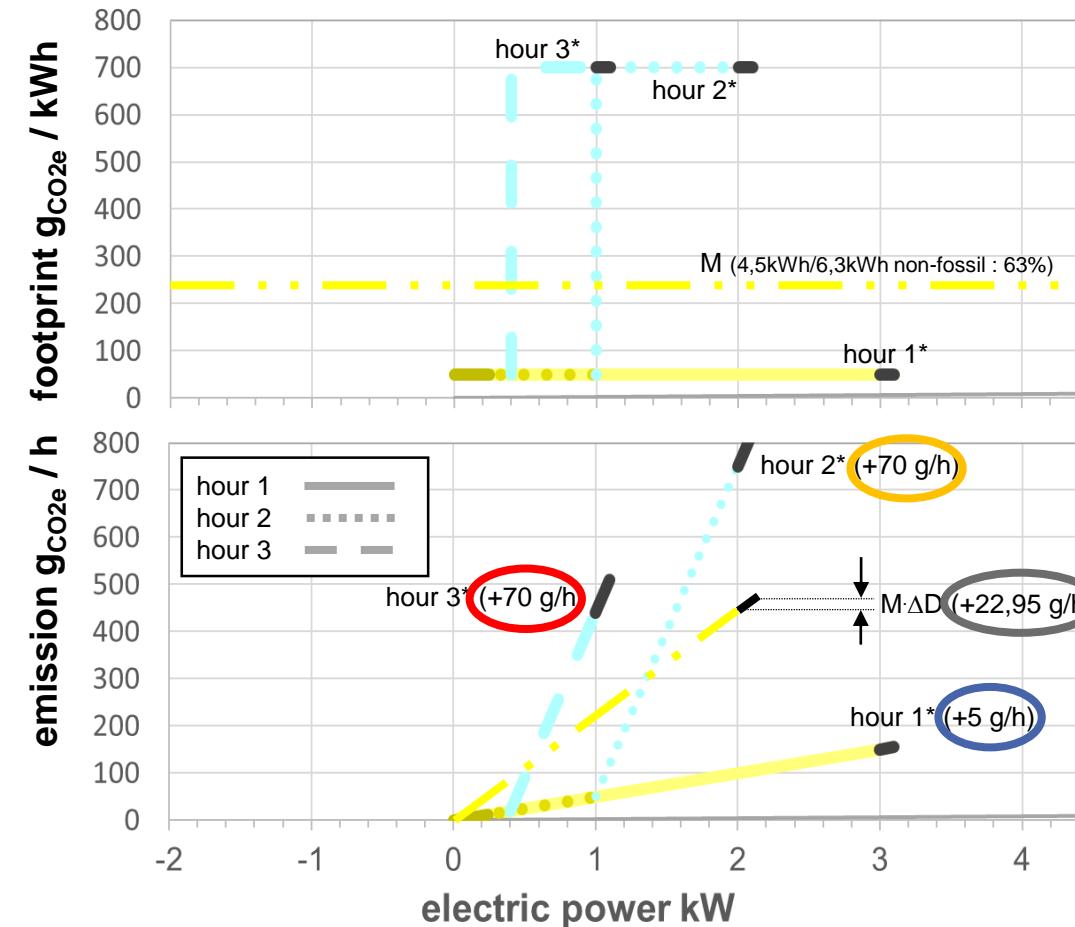
Electricity: „non-fossil / fossil mix“

kW, kWh	g, g/h	g/kWh
3 +0,1 3,1	150 +5 155	50 +0 50
2 +0,1 2,1	750 +70 820	375 +15,5 390,5

Lange werden in Deutschland und in vielen elektrischen Energiesystemen fossile Kraftwerke (überwiegend Gas) fluktuierend benötigt werden. Die Gesamtanalyse über 2 Stunden Betrieb ist in der untenstehenden Tabelle dargestellt. Die Konsequenz auf die CO₂e Emission ist rechts unten abgebildet. Der Summand $M \cdot \Delta D$ bildet nicht einmal die Hälfte der CO₂e Mehremissionen ab!

Electricity: „non-fossil / fossil mix“ [1]



Ein reales Energiesystem mit fluktuerender Nachfrage und unterschiedlicher elektrischer Leistungsbereitstellung wird durch eine zweite fossile Leistungsquelle abgebildet. Lange werden in Deutschland auch fossile Kraftwerke (überwiegend Gas) im Betrieb sein. Die Summe über 3 Stunden Betrieb ist in der untenstehenden Tabelle dargestellt. Die Konsequenz auf die CO_{2e} Emission ist rechts unten abgebildet. Der Summand $M \cdot \Delta D$ bildet nicht einmal die Hälfte der CO_{2e} Mehremissionen ab!

Criticism 1: Response

Criticism: „The utilization of the equation $\Delta F \text{ increase of CO}_{2e} [\text{g/h}] = M \cdot \Delta D$ is standard!“

Response:

„The simplified equation $\Delta F \text{ increase of CO}_{2e} [\text{g/h}] = M \cdot \Delta D$ has never been a standard or even a **scientific standard**. It violates basic rules of physics and mathematics.

Antwort auf Kritik 1: Zu keinem Zeitpunkt war die vereinfachte Formulierung $M \cdot \Delta D$ als Ergebnis für den Anstieg der CO_{2e} Emissionen Standard! Fachgesellschaften, die die physikalischen Grundlagen der Leistungsbilanzierung, Energiebilanzierung sowie mathematische Grundregeln beachten, haben diesen Ansatz nie gewählt.

Overview

- 1** Introduction and motivation
- 2** Averaging bias
- 3** Criticism 1: Correct analysis
- 4** Criticism 2: „additional consumer“
- 5** Criticism 3: „modern electric systems“
- 6** Criticism 4: „energy dedicated only to electric vehicles“
- 7** Criticism 5: „energy or power“
- 8** Summary

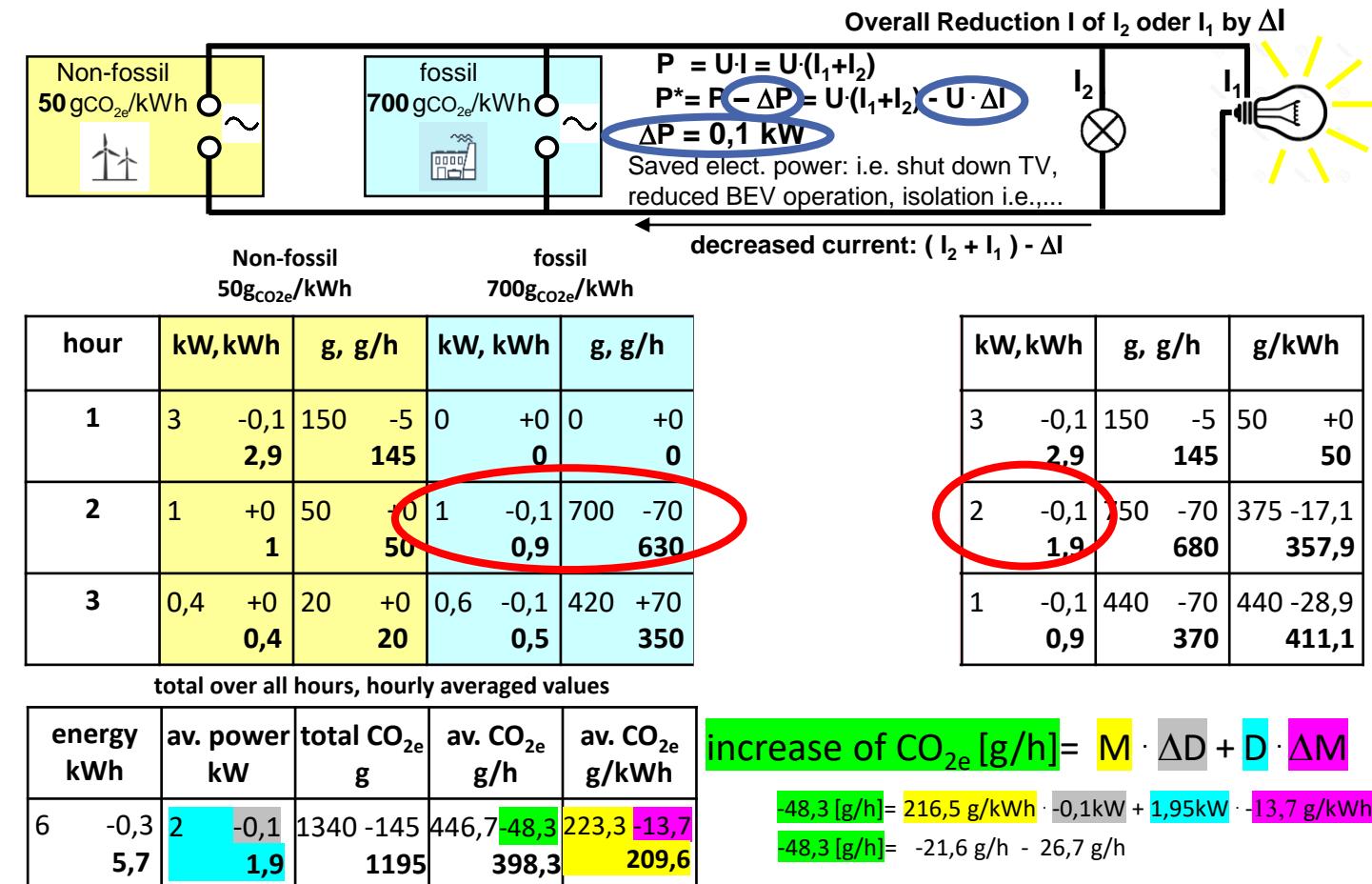
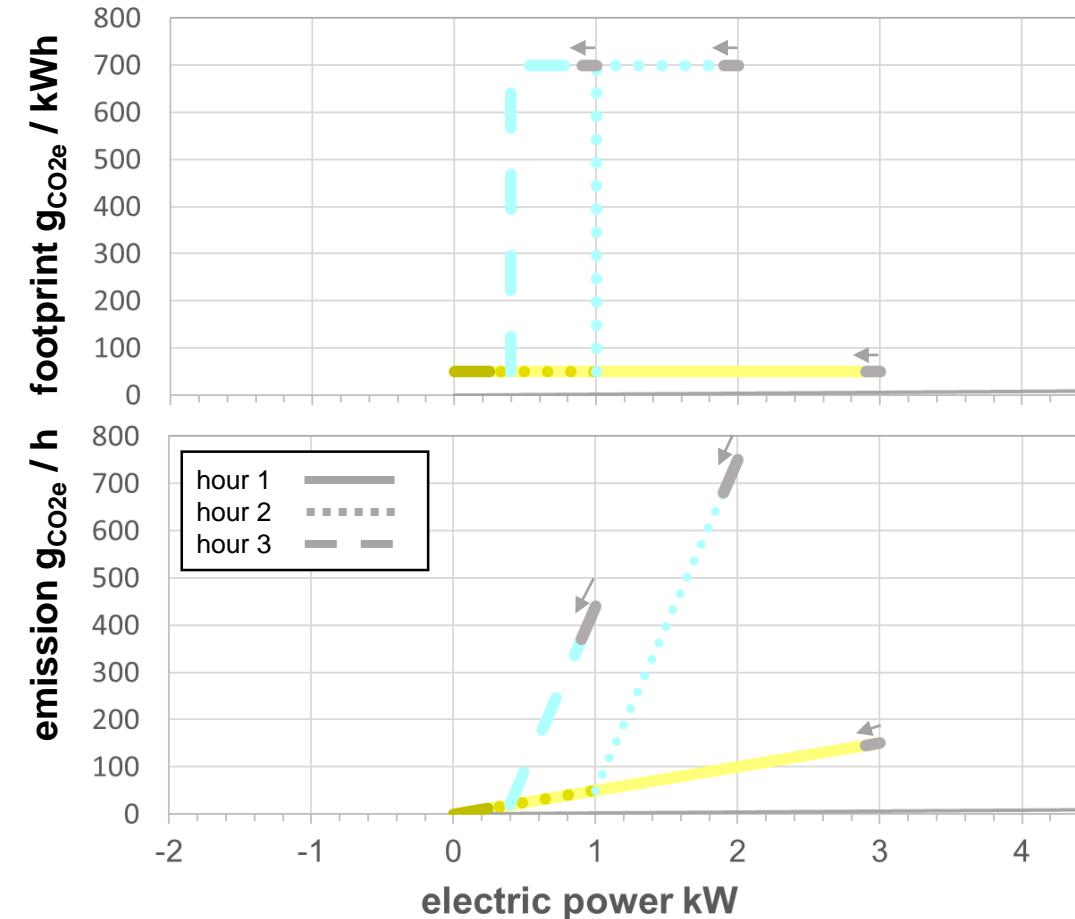
Criticism 2

Criticism: „In a complex electric system, it is hard to define, which consumer is „the first“ in the system and which one is an „additionally added“ consumer, which requires additional electric power!

Therefor the simplified approach $\Delta F \text{ increase of CO}_2e \text{ [g/h]} = M \cdot \Delta D$ remains valid.

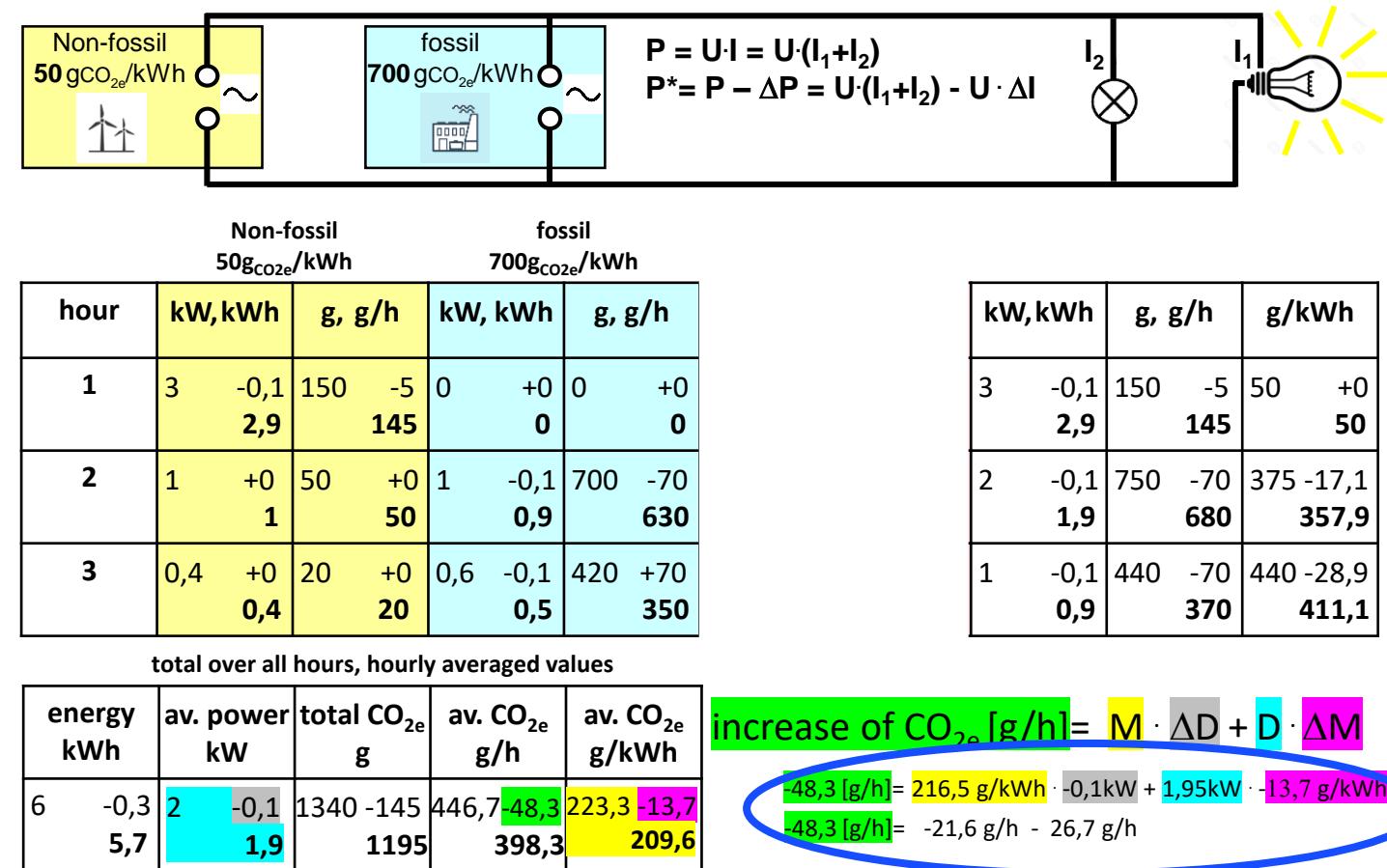
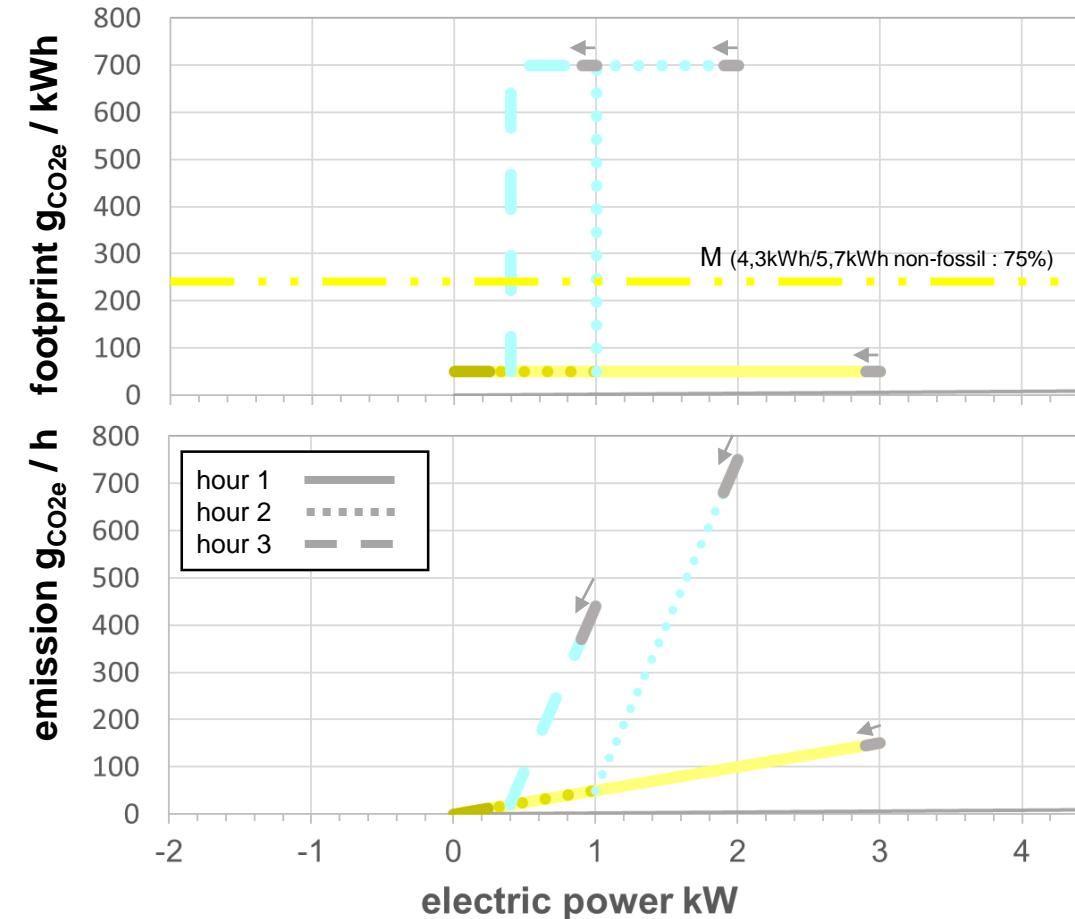
Kritik 2: Eine kritische Aussage lautete, in einem komplexen elektrischen System sei es nicht möglich, zu entscheiden, welcher Verbraucher zuerst im System war und welcher zusätzliche elektrische Verbraucher „neu“ im System hinzukommt, der zusätzlichen Strom benötigt.
Daher sei die Verwendung der vereinfachte Formulierung $M \cdot \Delta D$ valide.

Electricity: „non-fossil / fossil mix“ [2]



Am besten stellt man sich hierfür die Frage, was passiert, wenn der elektrische Leistungsbedarf durch Einsparungen (z.B. um 0,1 kW) reduziert wird! Vollkommen unabhängig, ob dies bei Verbraucher 1 (I₁) oder Verbraucher 2 (I₂) erfolgt, wird in diesem Fall (z.B. Stunde/hour 2 mit der Regel: 2 kW - 0,1 kW = 1,9 kW und nicht: 2 kW - 0,1 kW = 0,1 bis 2,0 kW) klar, dass jeder elektr. Nutzer die Diagramme auf der oberen/rechten Seite verlässt oder bei Zuschaltung rechts hinzukommt!

Electricity: „non-fossil / fossil mix“ [2]



In anderen Worten kann man auch sagen, dass der non-fossile elektrische Leistungsbeitrag (z.B. Windkraft) unabhängig und konstant bleibt, auch wenn man die elektrischen Verbraucher reduziert. „Der Wind hört nicht auf zu blasen, wenn man das Licht ausschaltet!“ Da dieser non-fossile Leistungsbeitrag konstant bleibt, muss bei einer Leistungsreduzierung ΔP die fossile Leistungsbereitstellung reduziert werden.

Criticism 2: Response

Criticism: „In a complex electric system, it is hard to define, which consumer is „the first“ in the system and which one is an „additionally added“ consumer, which requires additional electric power!

Therefor the simplified approach $\Delta F \text{ increase of CO}_2e [\text{g/h}] = M \cdot \Delta D$ remains valid.

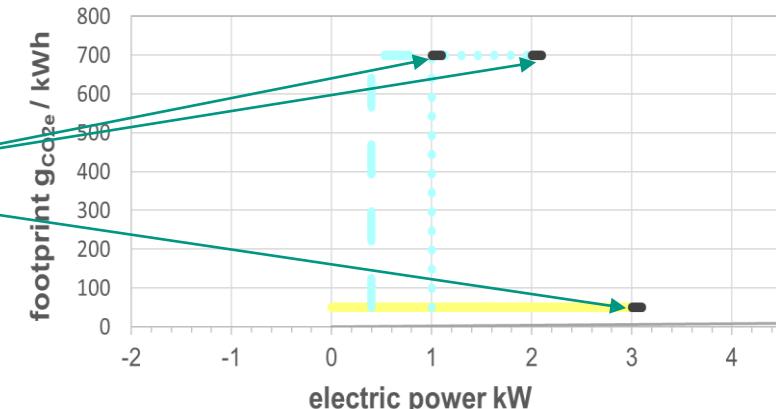
Response:

„Each electrical consumer enters and leaves the electrical system on the upper right hand side of the graph!“

Therefore every consumer, the „first“ and the „last“ one, always act as an „additional“ consumer, according to basic physics and algebra (page 19-20).

Therefore in a mixed non-fossil/fossil system the formulation

of $\Delta F \text{ increase of CO}_2e [\text{g/h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$ is mandatory!



Antwort auf Kritik 2: Jeder Verbraucher (Konstantlast oder neu hinzugeschaltet) wirkt auf das System, als ob er der letzte frisch hinzugeschaltete Verbraucher wäre! In einem gemischten non-fossilen/fossilen E-System bedeutet dies, dass mit zusätzlichen elektr. Verbrauchern vor allem die fossile Strombereitstellung hinzugefügt oder abgeschaltet wird. Dies gilt explizit auch für die Existenz und Möglichkeit der zusätzlichen Stromspeicherung (Batterie), die nachfolgend diskutiert wird.

Overview

- 1** Introduction and motivation
- 2** Averaging bias
- 3** Criticism 1: Correct analysis
- 4** Criticism 2: „additional consumer“
- 5** Criticism 3: „modern electric systems“
- 6** Criticism 4: „energy dedicated only to electric vehicles“
- 7** Criticism 5: „energy or power“
- 8** Summary

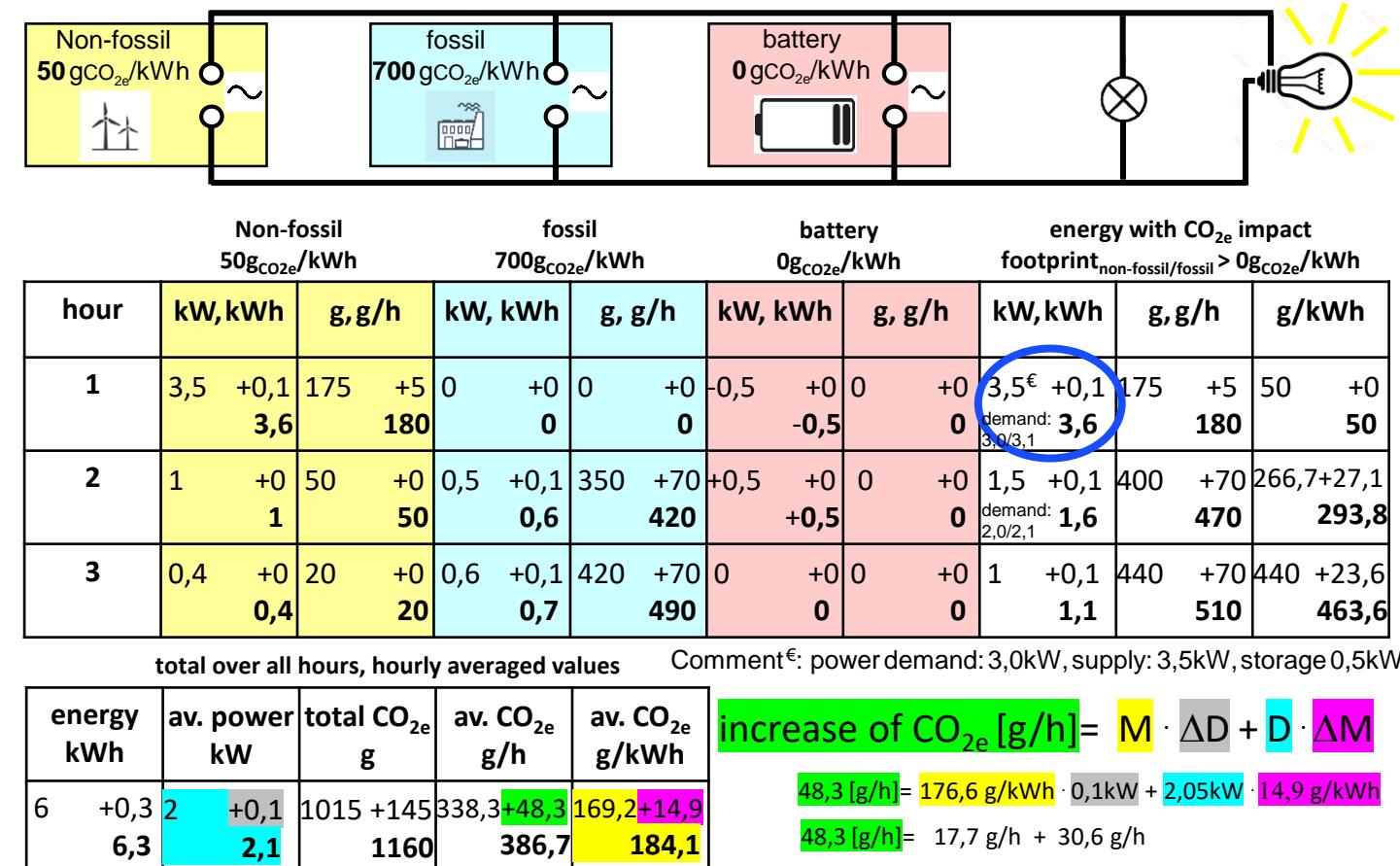
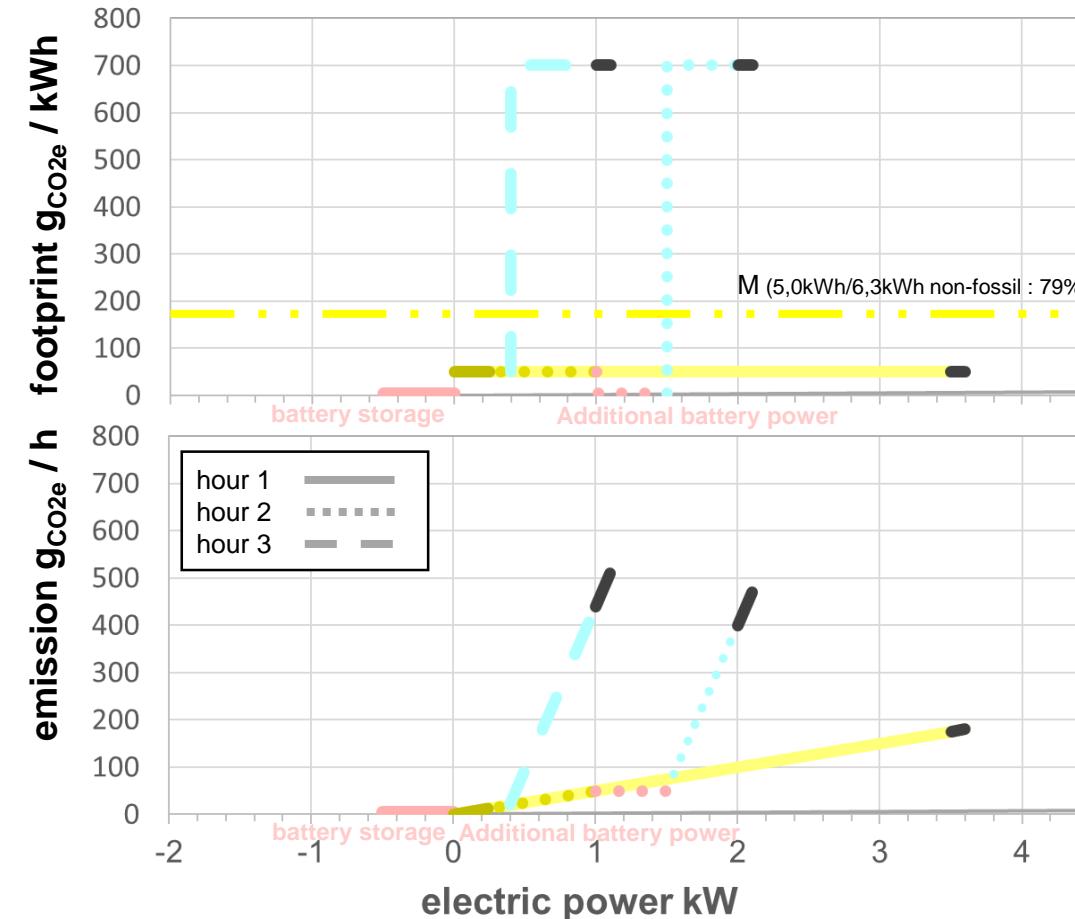
Criticism 3

Criticism: „Modern electric system behave in a completely different way!

Therefor the formulation $\text{increase of CO}_2e \text{ [g/h]} = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$ is not valid in a modern electrical system.“

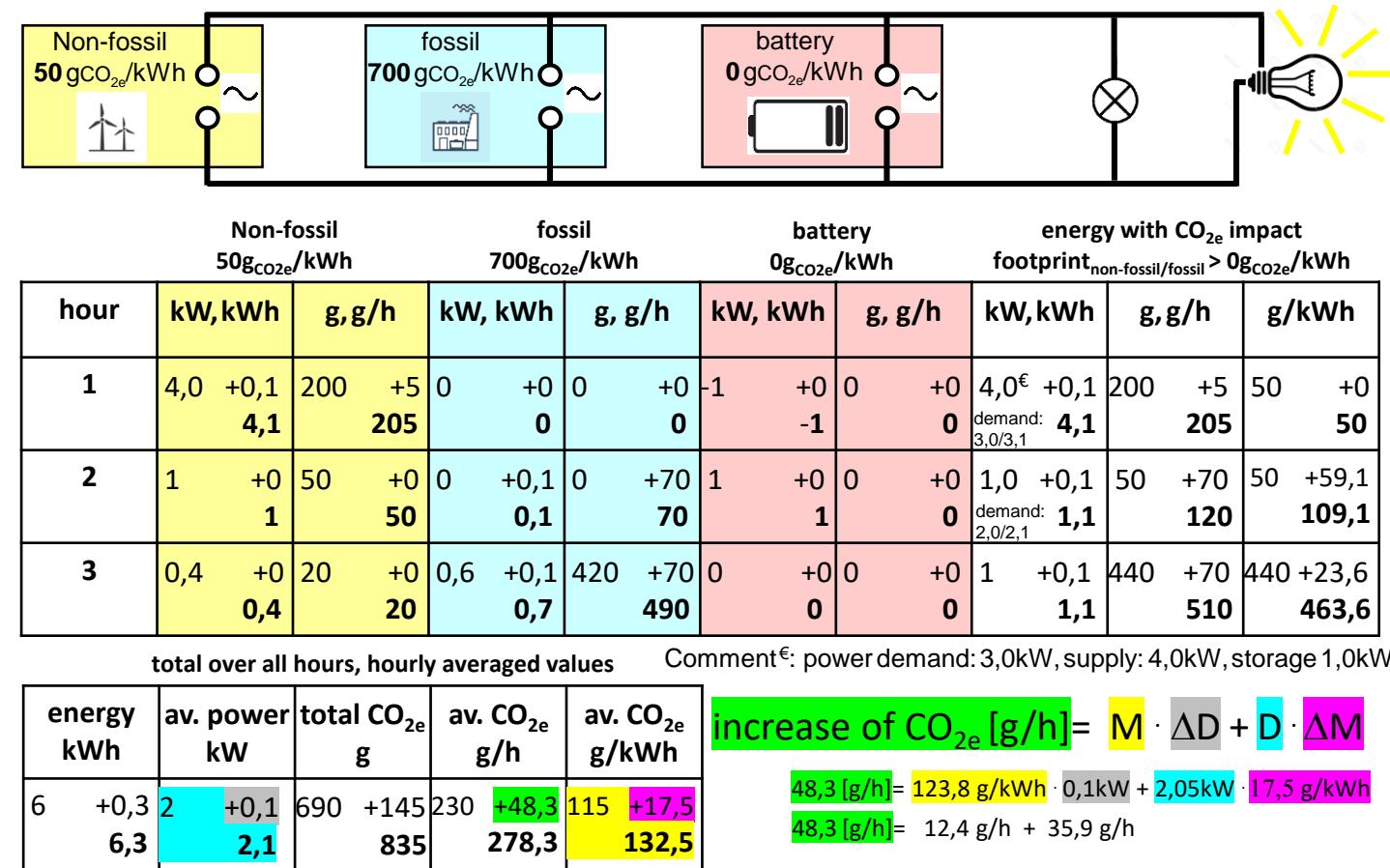
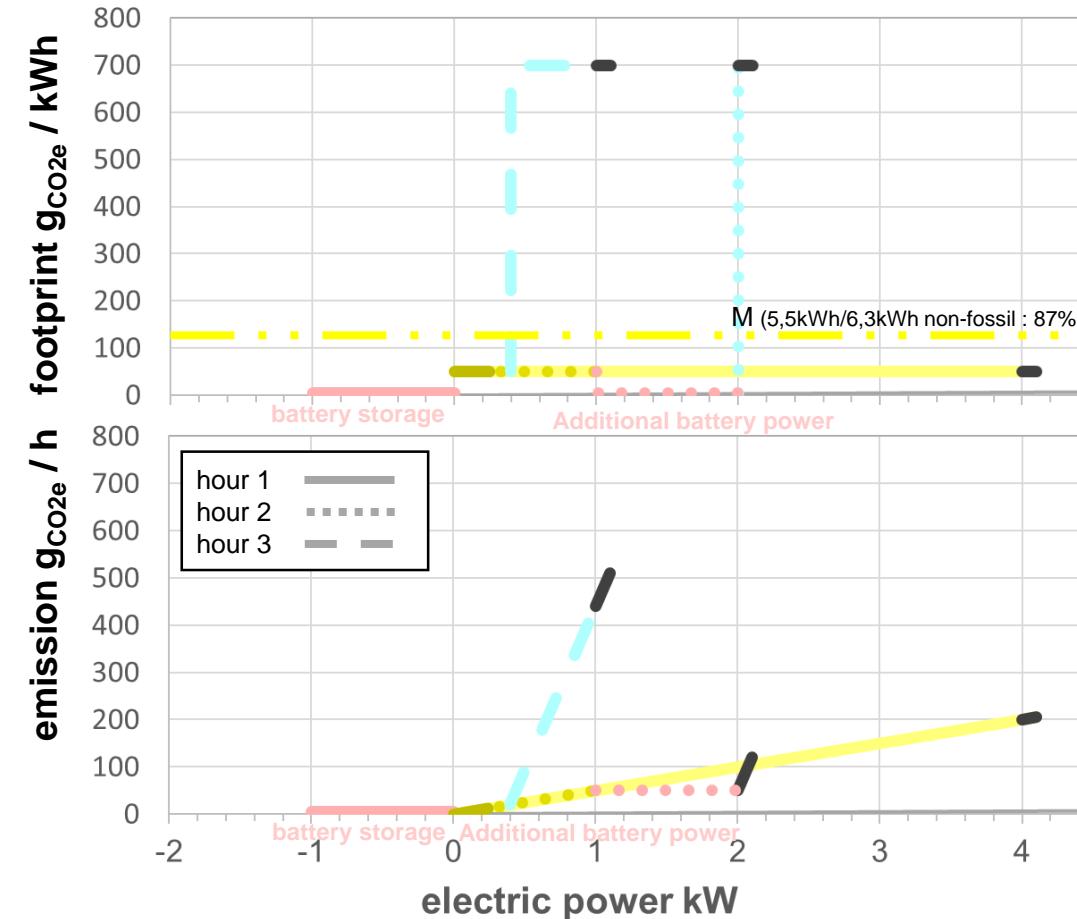
Kritik 3: Die dritte kritische Aussage lautete, dass moderne Energiesysteme anders funktionieren. Daher wäre die Formulierung $M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$ nicht korrekt.

Electrical energy storage included [3]



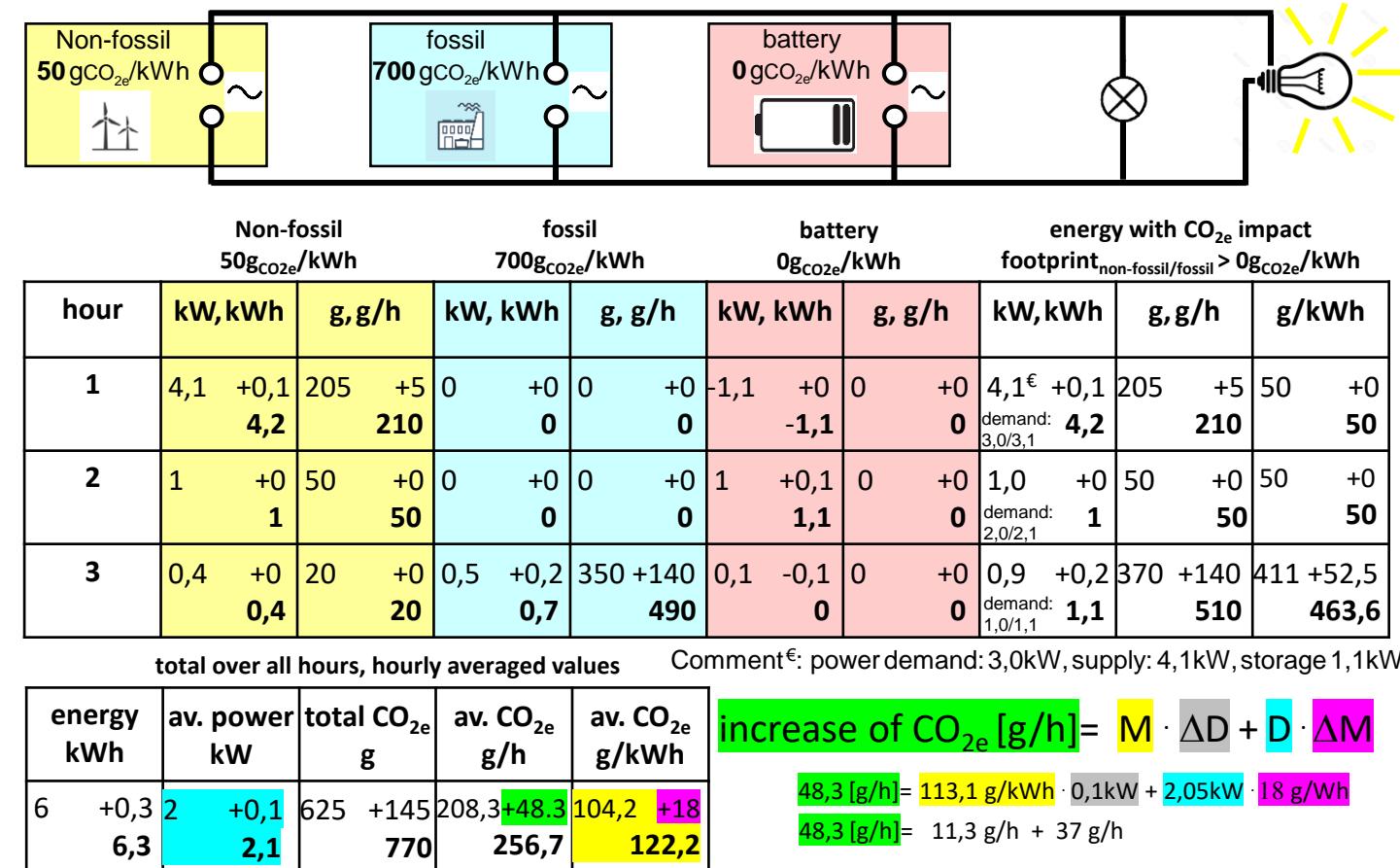
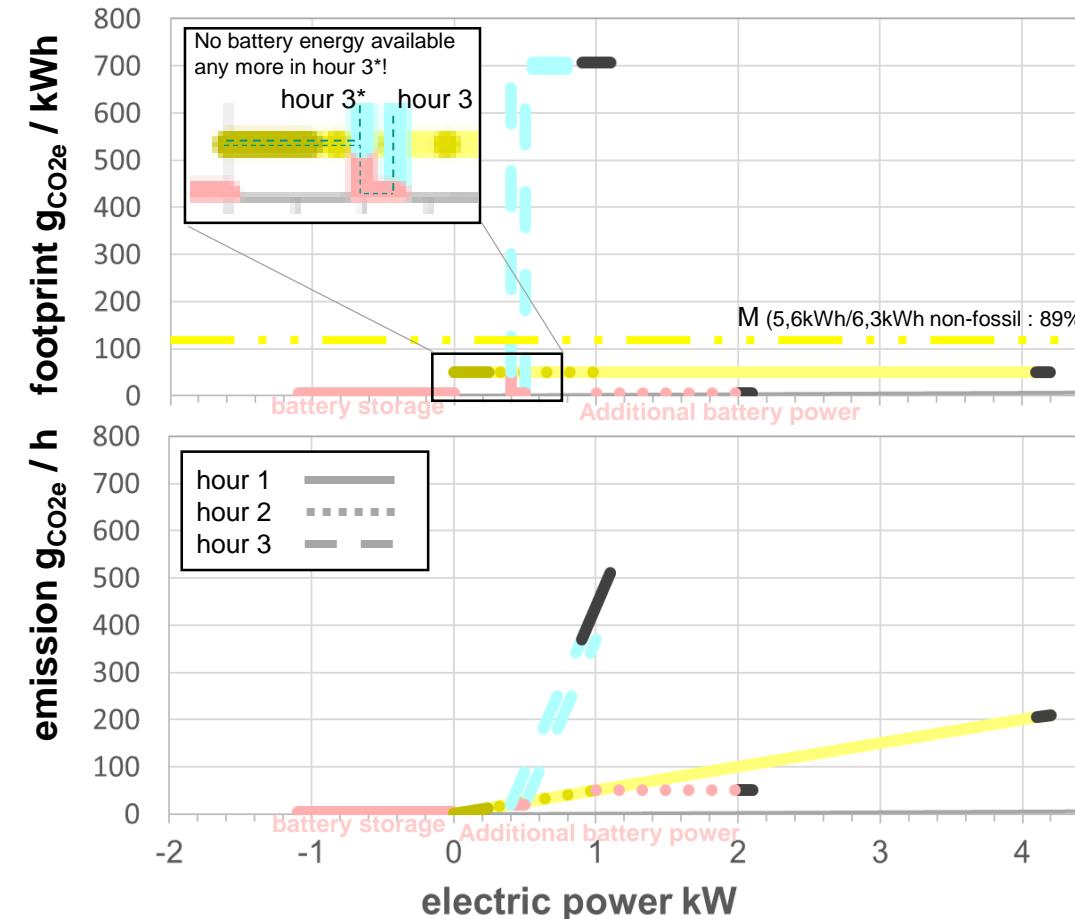
Ein zusätzlicher Energiespeicher hilft, in den Phasen des Überangebots diese elektrische Energie einzuspeichern. In Stunde/hour 1 werden 0,5 kW bzw. 0,5 kWh eingespeichert. Bei einem Leistungsbedarf von 3 kW werden 3,5 kW non-fossil bereitgestellt. Dies verbessert den Mix unter 200 $\text{gCO}_{2e}/\text{kWh}$, weil in Stunde/hour 2 weniger fossile Energie benötigt wird (Bedarf 2kW, non-fossil: 1 kWh, Batterie 0,5 kWh, fossil: 0,5 kWh).

Electrical energy storage included [4]



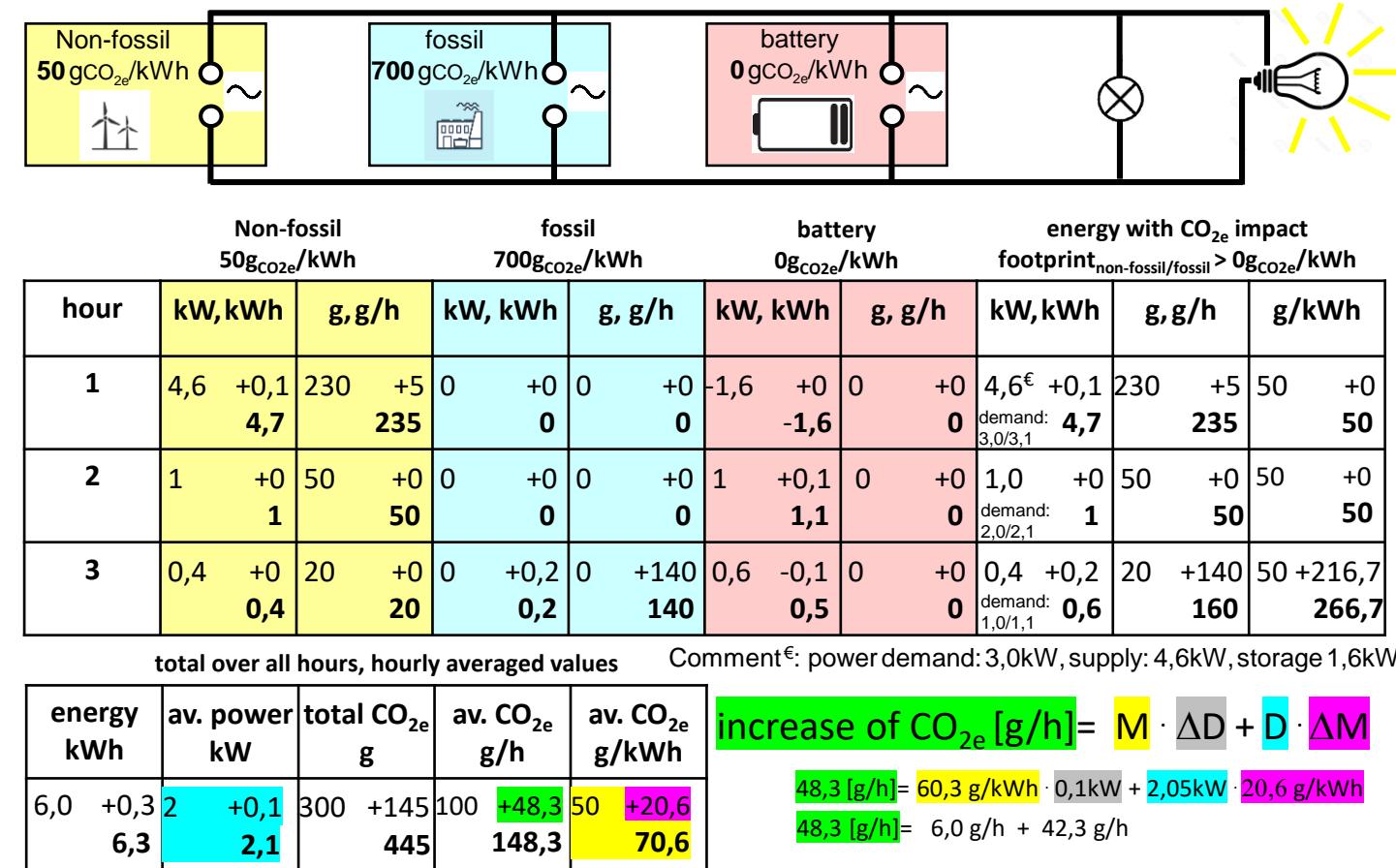
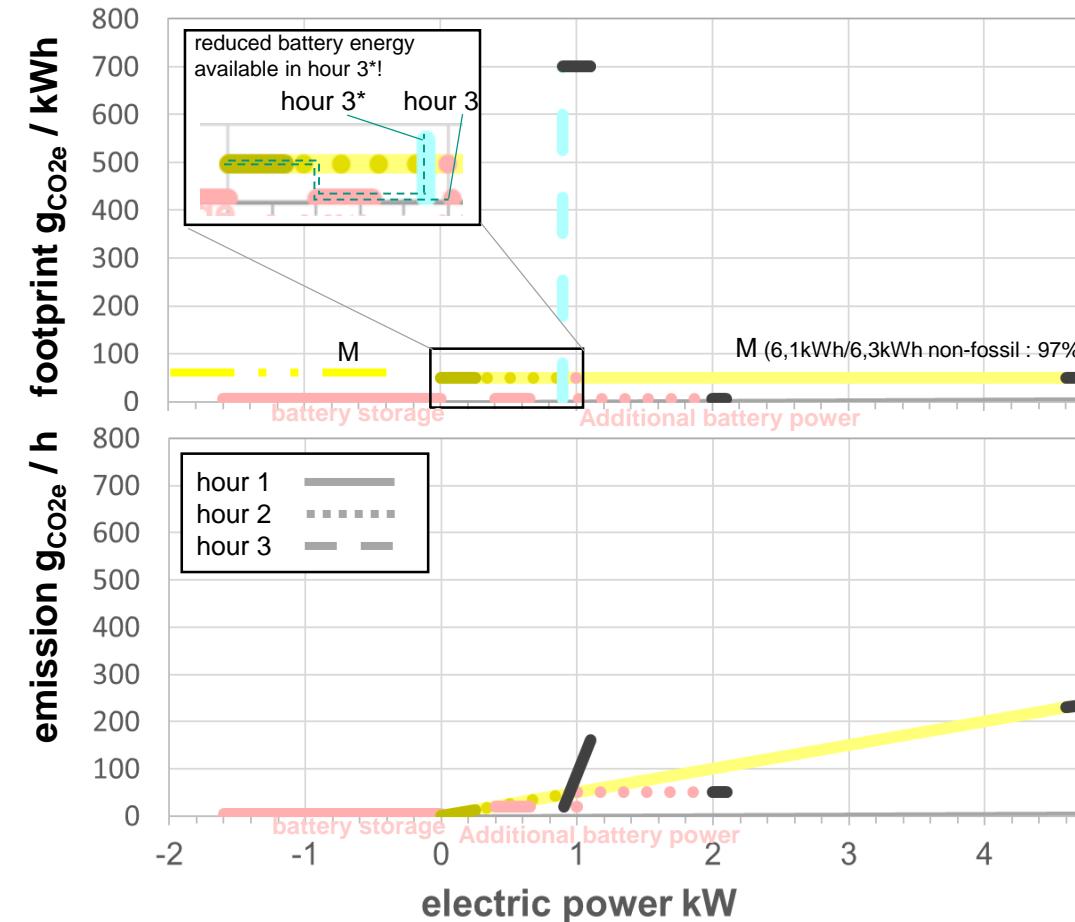
Eine deutliche Verbesserung des mittleren Fußabdruckes (Fall [3]: 184,1 [g_{CO_{2e}}/kWh] bei Einspeicherung von 0,5 kWh in Stunde/hour 1) zu Fall [4] mit 132,5 [g_{CO_{2e}}/kWh] im Falle einer Einspeicherung von 1 kWh wurde erzielt. Der Summand $M \cdot \Delta D$ unterschätzt die Mehremissionen auch in diesem Fall deutlich.

Electrical energy storage included [5]



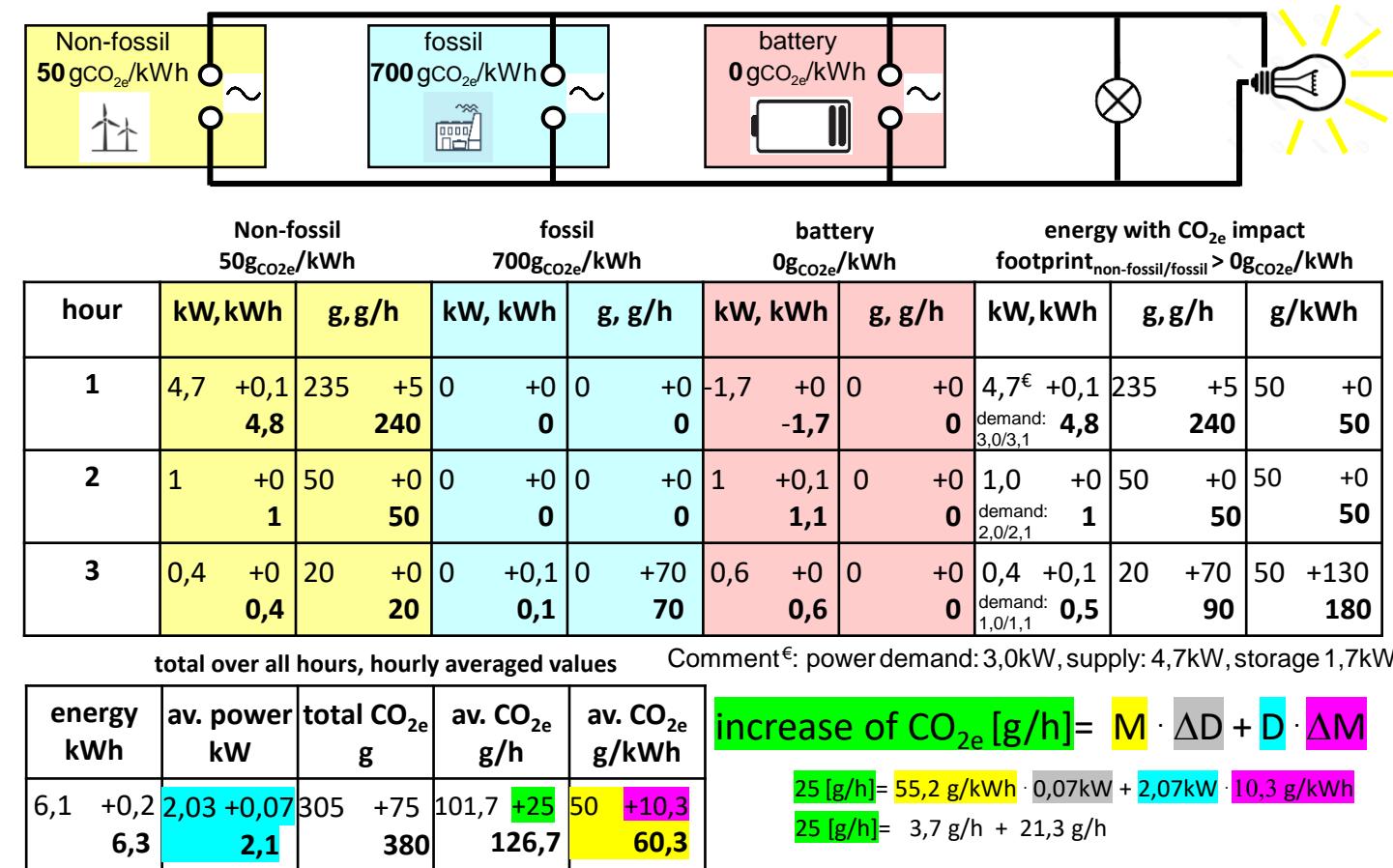
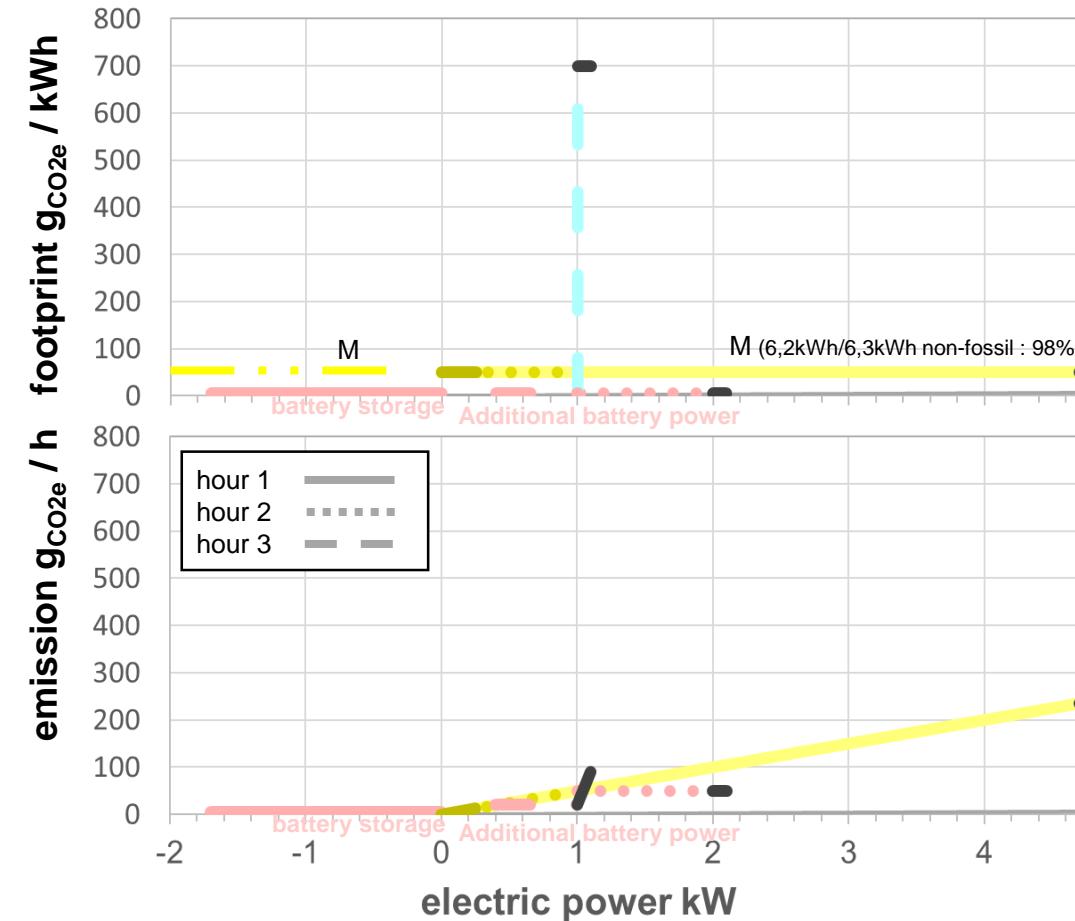
Eine weitere Verbesserung der elektrischen Einspeicherung in hour / Stunde 1 von 1,1kWh erlaubt, dass auch eine Leistungserhöhung in Stunde 2 keine fossile Energie benötigt, da in hour / Stunde 2 zusammen mit der Batterie eine ausreichende nicht-fossile Energie vorhanden ist, um sogar die Leistungserhöhung um 0,1kW zu ermöglichen.

Electrical energy storage included [6]



Eine weitere Verbesserung der elektrischen Einspeicherung in hour / Stunde 1 auf 1,6 kWh erlaubt, dass zunächst auch vor Leistungserhöhung in Stunde 3 keine fossile Energie benötigt wird. Die Leistungserhöhung bedingt, dass nach Stunde 2* 1,1 kWh benötigt wurden und zu Stunde 3* nur noch 0,5 kWh der insgesamt 1,6 kWh eingespeicherten Energie verfügbar sind.

Electrical energy storage included [7]



Eine weitere Verbesserung der elektrischen Einspeicherung in hour / Stunde 1 auf 1,7 kWh erlaubt, dass eine Leistungserhöhung in Stunde 3 zu einer niedrigeren fossilen Leistungserhöhung von nur 0,1 kW bedingt. Es ist vor der Leistungsbedarfserhöhung mit 6,1kWh mehr Energie vorhanden, als mit 6,0 kWh benötigt.

Der Summand $M \cdot \Delta D$ unterschätzt die Mehremissionen weiterhin deutlich.

Analysis of ZAMM publication

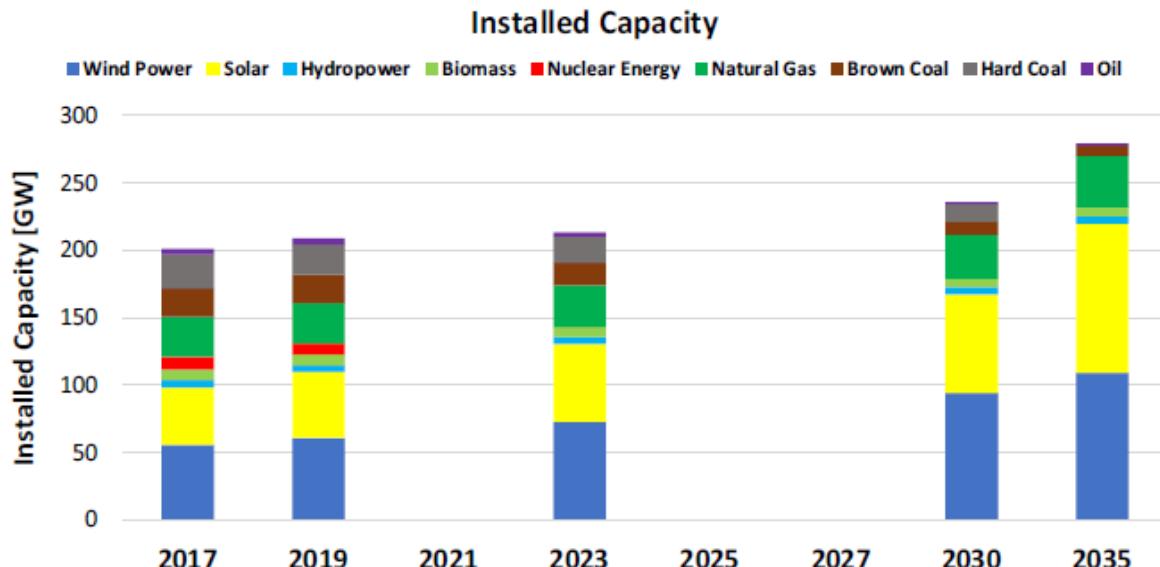


Fig. 2 Installed capacity $P_k^{installed\ power, i}$ of power plants and electricity sources (i.e. $i=4$ denotes biomass-based power) for the year k

Source: C. Böhmeke, T. Koch, The remaining CO₂ budget: a comparison of the CO₂ emissions of diesel and BEV drivetrain technology, Springer, July 2021, Automotive and Engine Technology, DOI:10.1007/s41104-021-00081-6

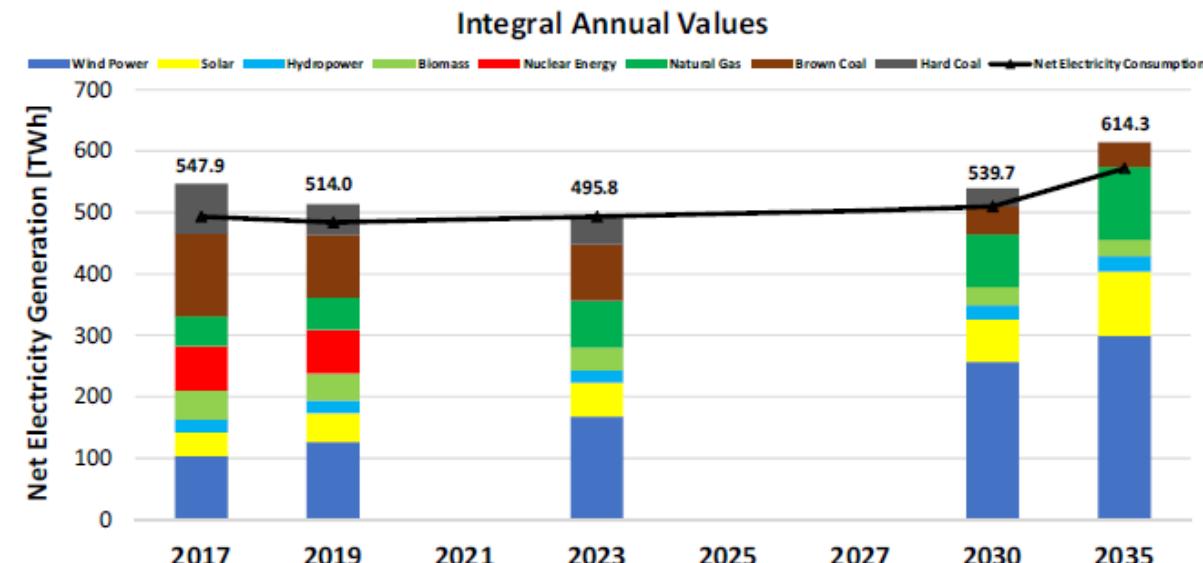


Fig. 3 Evolution of net electricity generation/net electricity consumption W_k

Die Analyse der ZAMM Publikation basiert auf Böhmeke und Koch (AAET publication) und berücksichtigt einen intensiven Ausbau von Wind und Photovoltaik, sowie die Wetterbedingungen des Jahres 2017 im Jahr 2030/2035. Das Ergebnis der Analyse hängt immer von den Randbedingungen ab. Eine weitere Verbesserung wird sehr begrüßt (niedriger als die analysierten $M_{2030} = 244 \text{ g}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kWh}$, M_{2030} dient zum Vergleich mit anderen Studien). Der Mittelwertsfehler bleibt aber bestehen.

ZAMM publication: Battery Storage

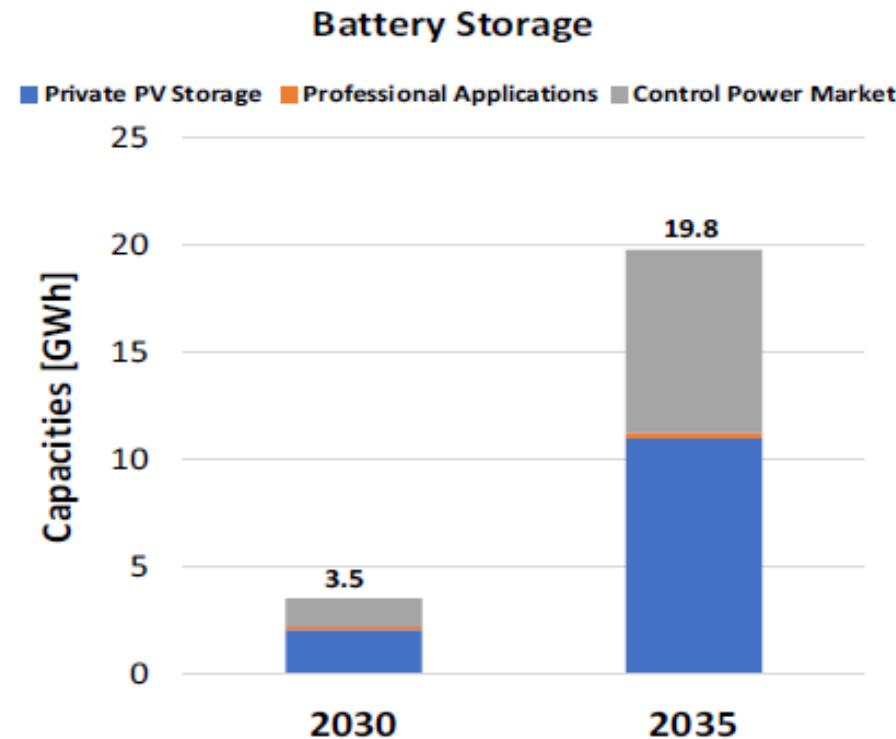


Fig. 6 Evolution of electricity performance: energy balance, evolution of battery storage capacities

Source: C. Böhmeke, T. Koch, The remaining CO₂ budget: a comparison of the CO₂ emissions of diesel and BEV drivetrain technology, Springer, July 2021, Automotive and Engine Technology, DOI:10.1007/s41104-021-00081-6

Die Ausbauzahlen von Wind und Photovoltaik wurden dem offiziellen Szenariorahmen der Bundesnetzagentur (2020) entnommen. Natürlich wurde ebenfalls der Ausbau von Batteriespeichersystemen abgebildet und berücksichtigt.

Criticism 3: Response

Criticism: „Modern electric system behave in a completely different way!

The formulation $\text{increase of CO}_2e \text{ [g/h]} = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$ is therefor not valid in a modern electrical system.“

Source: Koch, Böhlke, DOI: 10.1007/s00707-020-02897-z Koch, T., Böhlke, T.: The averaging bias - A standard miscalculation, which extensively underestimates real CO₂ emissions

Response:

„Also in modern electrical systems the simplified equation $\Delta F \text{ increase of CO}_2e \text{ [g/h]} = M \cdot \Delta D$ is wrong and underestimates the real CO_{2e} emissions. The correct formulation $\text{increase of CO}_2e \text{ [g/h]} = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$ precisely analyses the correct CO_{2e} emissions, also in a modern electrical energy system with fossil / non-fossil contribution including battery storage possibilities.

$$\Delta F(D, \Delta D) \approx M(D)\Delta D, \quad (49)$$

which corresponds to the simplified formula introduced in Section 4 (see equation (39)). As shown in Section 3, the following integral would be the exact formulation

$$\Delta F(D, \Delta D) = \int_D^{D+\Delta D} f(D) dD. \quad (50)$$

Here, $f(D)$ represents the specific CO₂ emissions as a function of electric power demand D .

The mathematical analysis showed that Equation (49) is only valid, when the CO₂ emissions are completely independent from the energy supply situation, that is, if the complete electric energy would be either supplied constantly only by one technology, that is, wind power, or would be supplied by a constant mix of several technologies, that is, a combination of wind power and photovoltaics power, which is both by far not the case.

Comment: Equation (50) is equivalent to:

$$\text{increase of CO}_2e \text{ [g/h]} = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M.$$

Equation (49) is equivalent to

$$\Delta F \text{ increase of CO}_2e \text{ [g/h]} = M \cdot \Delta D \text{ and only valid:}$$

The mathematical analysis showed that Equation (49) is only valid, when the CO₂ emissions are completely independent from the energy supply situation, that is, if the complete electric energy would be either supplied constantly only by one technology, that is, wind power, or would be supplied by a constant mix of several technologies, that is, a combination of wind power and photovoltaics power, which is both by far not the case.

Antwort auf Kritik 3: Die Formulierung $M \cdot \Delta D$ ist auch in gemischt nicht-fossil/fossilen Energiesystemen mit zusätzlichen elektrischen Energiespeichern falsch. Solange die Systeme gemischt nicht-fossil/fossil arbeiten, ist nur die Formulierung $M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$ korrekt. Oft wird das Synonym „modernes elektrisches System“ in dem Sinn verwendet, dass nur „nicht-fossile“ elektr. Energie verwendet werden darf und über Wochen im Jahr und viele Stunden am Tag auch im Jahr 2035 ein Ladeverbot vorliegt!

Overview

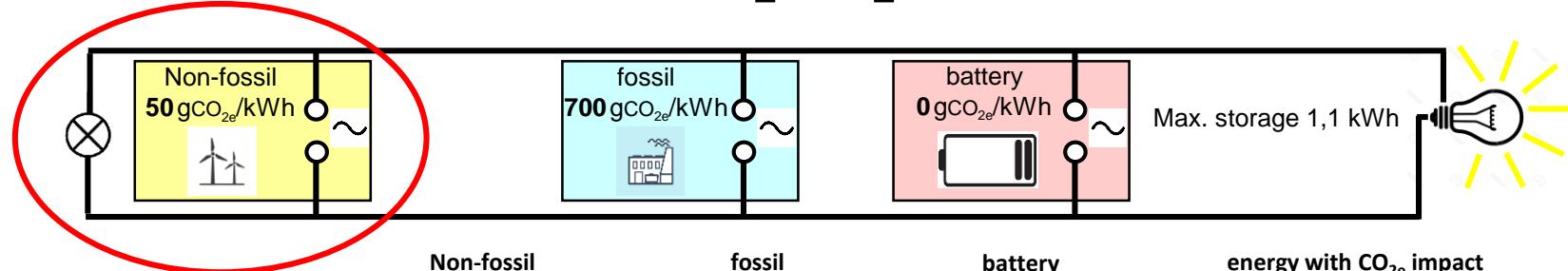
- 1 Introduction and motivation
- 2 Averaging bias
- 3 Criticism 1: Correct analysis
- 4 Criticism 2: „additional consumer“
- 5 Criticism 3: „modern electric systems“
- 6 Criticism 4: „energy dedicated only to electric vehicles“
- 7 Criticism 5: „ energy or power“
- 8 Summary

Criticism 4

Criticism: „The analysis is wrong, if energy is dedicated only to electric vehicles.“

Kritik 4: Es ergibt sich ein anderes Ergebnis, wenn elektrische Verbraucher direkt durch non-fossile Energie versorgt werden.

energy dedicated to electrical vehicles [5b]



Quelle: <https://ecomento.de/2021/04/23/enbw-elektroauto-schnellladepark-kamener-kreuz-52-ladepunkte/>

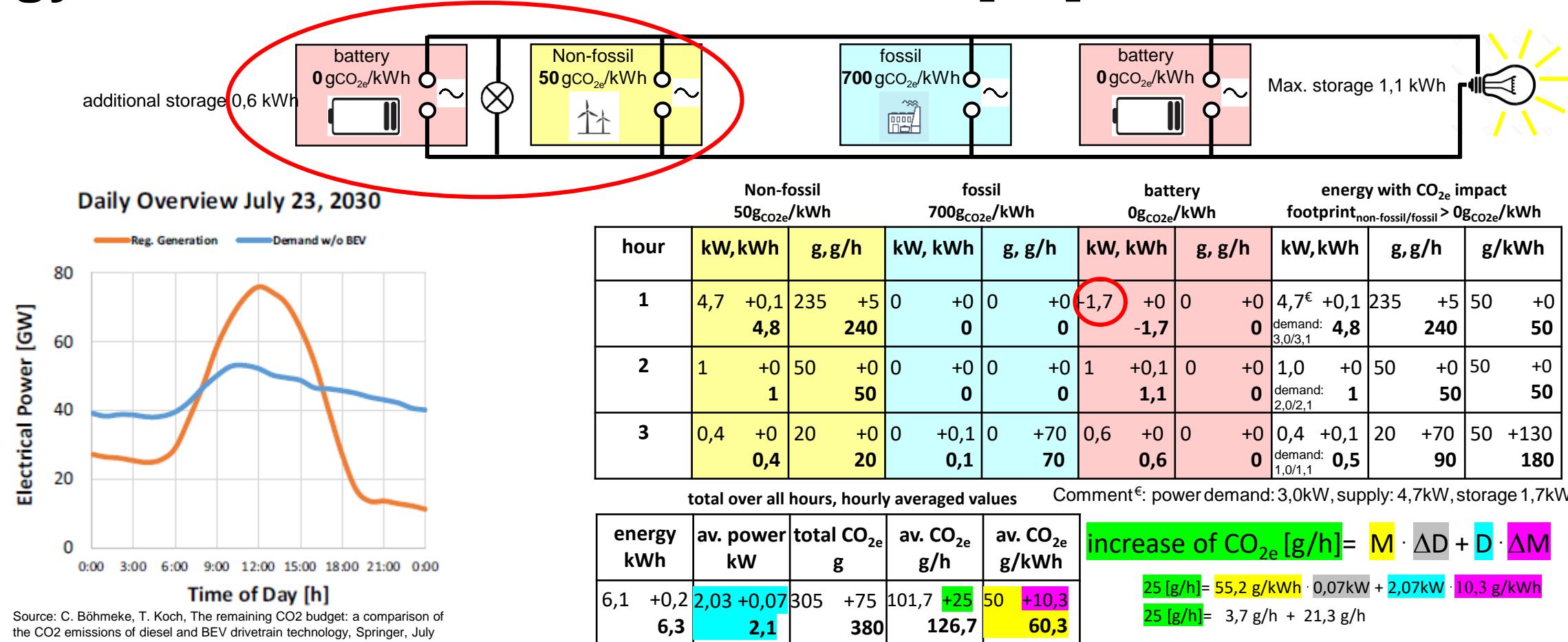
hour	Non-fossil 50 gCO _{2e} /kWh		fossil 700 gCO _{2e} /kWh		battery 0 gCO _{2e} /kWh		energy with CO _{2e} impact footprint _{non-fossil/fossil} > 0 gCO _{2e} /kWh			
	kW, kWh	g, g/h	kW, kWh	g, g/h	kW, kWh	g, g/h	kW, kWh	g, g/h	g/kWh	
1	4,1 4,2	+0,1 210	205 0	+5 0	0 0	+0 0	-1,1 -1,1	+0 0	4,1€ demand: 3,0/3,1	
2	1 1	+0 50	50 0	+0 0	0 0	+0 0	1 1,1	+0,1 0	1,0 demand: 2,0/2,1	
3	0,4 0,4	+0 20	20 0,5	+0 +0,2	350 350	+140 0,7	0,1 490	-0,1 0	0,9 demand: 1,0/1,1	
total over all hours, hourly averaged values										
	energy kWh	av. power kW	total CO _{2e} g	av. CO _{2e} g/h	av. CO _{2e} g/kWh	Comment: power demand: 3,0kW, supply: 4,1kW, storage 1,1kW				
6	+0,3 6,3	+0,1 2,1	625 770	+145 256,7	208,3 104,2	+48,3 +18	104,2 122,2	+18 122,2	increase of CO _{2e} [g/h] = M · ΔD + D · ΔM	

$$48,3 \text{ [g/h]} = 113,1 \text{ g/kWh} \cdot 0,1 \text{ kW} + 2,05 \text{ kW} \cdot 18 \text{ g/kWh}$$

$$48,3 \text{ [g/h]} = 11,3 \text{ g/h} + 37 \text{ g/h}$$

Es ist immer das gesamte System zu analysieren, auch wenn bilanziell ein Verbraucher vermeintlich besonders "CO_{2e}-reduziert" betrieben wird. Es gilt auch hier, dass der Summand **M·ΔD** nicht die Mehremissionen abbildet!

energy dedicated to electrical vehicles [7b]



In der Zeit der Überschussenergie ist er hilfreich, diese zusätzlich einspeichern zu können (Fall 7b, Beispiel: Überschuss um die Mittagszeit am 23.07.2030). In diesem Fall kann die CO_{2e} Emission des Gesamtsystems abgesenkt werden. Trotzdem bildet auch hier der Summand M · ΔΔ nicht die Mehremissionen korrekt ab!

Criticism 4: Response

Criticism: The analysis is wrong, if energy is dedicated only to electric vehicles.“

Response:

„As long as a mixed fossil / no fossil electric system exists, the simplified equation
 $\Delta F \text{ increase of CO}_{2e} [\text{g/h}] = M \cdot \Delta D$ remains wrong.

Please note: electric losses due to resistance (Ohm) influence the optimal strategy of CO_{2e} emissions, as the decision might have an impact: „local storage or transfer?“

If no electric transfer line is available, a storage is beneficial.

Of course, the simplified equation still underestimates real CO_{2e} emissions.

Antwort auf Kritik 4: Die vereinfachte Formulierung $M \cdot \Delta D$ unterschätzt weiterhin die realen CO₂ Mehremissionen deutlich, solange ein fluktuierendes und gemischt fossiles / nicht-fossiles Gesamtsystem vorliegt. Ohm'sche Netzverluste oder das Fehlen der möglichen Weiterleitung der elektrischen Energie können einen Einfluss haben. Die Ohm'schen Leitungsverluste sind typischerweise immer geringer als Einspeicherverluste.

Overview

- 1** Introduction and motivation
- 2** Averaging bias
- 3** Criticism 1: Correct analysis
- 4** Criticism 2: „additional consumer“
- 5** Criticism 3: „modern electric systems“
- 6** Criticism 4: „energy dedicated only to electric vehicles“
- 7** Criticism 5: „energy or power“
- 8** Summary

Criticism 5

Criticism: „There is an impact whether power or energy is used as the main unit of the analysis.“

Kritik 5: Es ist relevant, ob die elektrische Leistung oder die verrichtete Arbeit beziehungsweise benötigte Energie berücksichtigt wird. In den Analysen wurde ausschließlich die elektrische Leistung berücksichtigt.

power or energy, based on example [7]

Power (D, kW)

$$\text{increase of CO}_2e [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$25 \text{ g/h} = 55,2 \text{ g/kWh} \cdot 0,07 \text{ kW} + 2,07 \text{ kW} \cdot 10,3 \text{ g/kWh}$$

$$25 \text{ g/h} = 3,7 \text{ g/kWh} + 21,3 \text{ g/kWh}$$

Energy (D · Δt, kWh), time: Δt

$$\text{increase of CO}_2e [\text{g}] = M \cdot \Delta D \cdot \Delta t + D \cdot \Delta M \cdot \Delta t$$

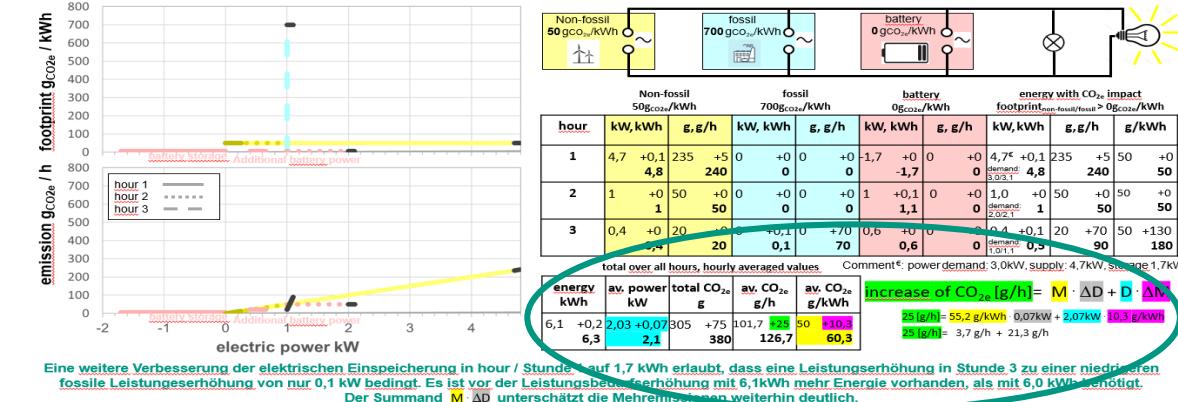
$$75 \text{ g} = 55,2 \text{ g/kWh} \cdot 0,07 \text{ kW} \cdot 3\text{h} + 2,07 \text{ kW} \cdot 3\text{h} \cdot 10,3 \text{ g/kWh}$$

$$75 \text{ g} = 55,2 \text{ g/kWh} \cdot 0,21 \text{ kWh} + 6,2 \text{ kWh} \cdot 10,3 \text{ g/kWh}$$

$$75 \text{ g} = 11 \text{ g} + 64 \text{ g}$$

Am exemplarischen Beispiel [7] wird aufgezeigt, dass die mathematische Herleitung sowohl für Energie als auch für Leistung korrekt ist. Dies ist durch die unmittelbare Kopplung der beiden Größen unabdingbar.

Electrical energy storage included [7]



total over all hours, hourly averaged values

energy kWh	av. power kW	total CO ₂ e g	av. CO ₂ e g/h	av. CO ₂ e g/kWh
6,1 6,3	+0,2 +0,07	305 380	+75 +25	50 50 +10,3 60,3
	2,03 2,1			

$$\text{increase of CO}_2e [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$25 \text{ [g/h]} = 55,2 \text{ g/kWh} \cdot 0,07 \text{ kW} + 2,07 \text{ kW} \cdot 10,3 \text{ g/kWh}$$

$$25 \text{ [g/h]} = 3,7 \text{ g/h} + 21,3 \text{ g/h}$$

Criticism 5: Response

Criticism: Criticism: „There is an impact whether power or energy is used as the main unit of the analysis.“

Response:

„In both cases, either if power (D) or energy ($D \cdot \Delta t$) is applied, the simplified formulation significantly underestimates real CO_2 emissions.

Antwort auf Kritik 5: Es ist nicht entscheidend, ob Energie oder Leistung in die Berechnung eingeht. Die vereinfachte Formulierung, basierend alleine auf $M \cdot \Delta D$ (beziehungsweise $M \cdot \Delta D \cdot \Delta t$) unterschätzt die realen CO_2 Mehremissionen in beiden Fällen deutlich.

Overview

- 1** Introduction and motivation
- 2** Averaging bias
- 3** Criticism 1: Correct analysis
- 4** Criticism 2: „additional consumer“
- 5** Criticism 3: „modern electric systems“
- 6** Criticism 4: „energy dedicated only to electric vehicles“
- 7** Criticism 5: „energy or power“
- 8** Summary

Summary

,non-fossil / fossil mix“ [1], increase of D + 0,1kW

,non-fossil / fossil mix“ [2], decrease of D - 0,1kW

Electrical energy storage included [3], storage 0,5kW

Electrical energy storage included [4], storage 1kW

Electrical energy storage included [5], storage 1,1kW

Electrical energy storage included [6], storage 1,6kW

Electrical energy storage included [7], storage 1,7kW

$$\text{increase of CO}_{2e} [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$48,3 \text{ g/h} = 229,5 \text{ g/kWh} \cdot 0,1 \text{kW} + 2,05 \text{ kW} \cdot 12,4 \text{ g/kWh}$$

$$48,3 \text{ g/h} = 22,95 \text{ g/h} + 25,38 \text{ g/h}$$

$$22,95 / 48,3 = 48\%$$

$$\text{increase of CO}_{2e} [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$-48,3 \text{ g/h} = 216,5 \text{ g/kWh} \cdot -0,1 \text{kW} + 1,95 \text{ kW} \cdot -13,7 \text{ g/kWh}$$

$$-48,3 \text{ g/h} = -21,6 \text{ g/h} - 26,7 \text{ g/h}$$

$$-21,6 / -48,3 = 45\%$$

$$\text{increase of CO}_{2e} [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$48,3 \text{ g/h} = 176,6 \text{ g/kWh} \cdot 0,1 \text{kW} + 2,05 \text{ kW} \cdot 14,9 \text{ g/kWh}$$

$$48,3 \text{ g/h} = 17,7 \text{ g/h} + 30,6 \text{ g/h}$$

$$17,7 / 48,3 = 37\%$$

$$\text{increase of CO}_{2e} [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$48,3 \text{ g/h} = 123,8 \text{ g/kWh} \cdot 0,1 \text{kW} + 2,05 \text{ kW} \cdot 17,5 \text{ g/kWh}$$

$$48,3 \text{ g/h} = 12,4 \text{ g/h} + 35,9 \text{ g/h}$$

$$12,4 / 48,3 = 26\%$$

$$\text{increase of CO}_{2e} [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$48,3 \text{ g/h} = 113,1 \text{ g/kWh} \cdot 0,1 \text{kW} + 2,05 \text{ kW} \cdot 18 \text{ g/kWh}$$

$$48,3 \text{ g/h} = 11,3 \text{ g/h} + 37 \text{ g/h}$$

$$11,3 / 48,3 = 23\%$$

$$\text{increase of CO}_{2e} [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$48,3 \text{ g/h} = 60,3 \text{ g/kWh} \cdot 0,1 \text{kW} + 2,05 \text{ kW} \cdot 20,6 \text{ g/kWh}$$

$$48,3 \text{ g/h} = 6,0 \text{ g/h} + 42,3 \text{ g/h}$$

$$6,0 / 48,3 = 12\%$$

$$\text{increase of CO}_{2e} [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$25 \text{ g/h} = 55,2 \text{ g/kWh} \cdot 0,07 \text{kW} + 2,07 \text{ kW} \cdot 10,3 \text{ g/kWh}$$

$$25 \text{ g/h} = 3,7 \text{ g/h} + 21,3 \text{ g/h}$$

$$3,7 / 25 = 14,8\%$$

Summary

,non-fossil / fossil mix“ [1], increase of D + 0,1kW

,non-fossil / fossil mix“ [2], decrease of D - 0,1kW

Electrical energy storage included [3], storage 0,5kW

Electrical energy storage included [4], storage 1kW

Electrical energy storage included [5], storage 1,1kW

Electrical energy storage included [6], storage 1,6kW

$$\text{increase of CO}_2e [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$48,3 \text{ g/h} = 229,5 \text{ g/kWh} \cdot 0,1 \text{kW} + 2,05 \text{ kW} \cdot 12,4 \text{ g/kWh}$$

$$48,3 \text{ g/h} = 22,95 \text{ g/h} + 25,38 \text{ g/h}$$

$$22,95 / 48,3 = 48\%$$

$$\text{increase of CO}_2e [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$-48,3 \text{ g/h} = 216,5 \text{ g/kWh} \cdot -0,1 \text{kW} + 1,95 \text{ kW} \cdot -13,7 \text{ g/kWh}$$

$$-48,3 \text{ g/h} = -21,6 \text{ g/h} - 26,7 \text{ g/h}$$

$$-21,6 / -48,3 = 45\%$$

$$\text{increase of CO}_2e [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$48,3 \text{ g/h} = 176,6 \text{ g/kWh} \cdot 0,1 \text{kW} + 2,05 \text{ kW} \cdot 14,9 \text{ g/kWh}$$

$$48,3 \text{ g/h} = 17,7 \text{ g/h} + 30,6 \text{ g/h}$$

$$17,7 / 48,3 = 37\%$$

$$\text{increase of CO}_2e [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$48,3 \text{ g/h} = 123,8 \text{ g/kWh} \cdot 0,1 \text{kW} + 2,05 \text{ kW} \cdot 17,5 \text{ g/kWh}$$

$$48,3 \text{ g/h} = 12,4 \text{ g/h} + 35,9 \text{ g/h}$$

$$12,4 / 48,3 = 26\%$$

$$\text{increase of CO}_2e [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$48,3 \text{ g/h} = 113,1 \text{ g/kWh} \cdot 0,1 \text{kW} + 2,05 \text{ kW} \cdot 18 \text{ g/kWh}$$

$$48,3 \text{ g/h} = 11,3 \text{ g/h} + 37 \text{ g/h}$$

$$11,3 / 48,3 = 23\%$$

$$\text{increase of CO}_2e [\text{g}/\text{h}] = M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$$

$$48,3 \text{ g/h} = 60,3 \text{ g/kWh} \cdot 0,1 \text{kW} + 2,05 \text{ kW} \cdot 20,6 \text{ g/kWh}$$

$$48,3 \text{ g/h} = 6,0 \text{ g/h} + 42,3 \text{ g/h}$$

$$6,0 / 48,3 = 12\%$$

In einem gemischt fossilen / nicht-fossilen Energiesystem, auch mit elektrischen Batteriespeichern, unterschätzt die Formulierung $M \cdot \Delta D$ die wahren CO₂e Emissionen deutlich und ist unbrauchbar. Daher ist die komplexere Formulierung $M \cdot \Delta D + D \cdot \Delta M$ unabdingbar! Typischerweise ist der Faktor 2,1 für das deutsche Stromnetz im Mittel eine gute Näherung für die realen CO₂e Emissionen und je niedriger der Mittelwert M wird, umso größer wird der relative Fehler (jeweils bei Nutzung: $M \cdot \Delta D$).

Thank you very much for your attention.