

CO₂-Emissionen im Vergleich: Persönliche und virtuelle Meetings

(Mark Arnold und Dr. Beate Kummer)¹

1. Einleitung

Aufgrund der aktuellen Coronapandemie wurde in den letzten Monaten ein Großteil der zwischenmenschlichen Kontakte auf ein Minimum reduziert. Dies spiegelt sich bei den meisten Menschen auch im beruflichen Alltag wider. Die Folge war eine „radikale“ Digitalisierung unseres (Berufs-)Alltags. Vor allem Videokonferenzen sind zu einer beliebten Kommunikationsform geworden. Sie ersetzen persönliche Besprechungen und damit zahlreiche Dienstfahrten mit dem PKW, dem Zug und dem Flugzeug. Durch diese und viele andere digitale Lösungen ist ein weltweiter Anstieg des sogenannten „Internettraffics“, dem Datenfluss zwischen Computernetzwerken, zu verzeichnen. In diesem Zusammenhang meldeten einige Länder einen Anstieg der Internetnutzung um mindestens 20 Prozent seit Ausbruch der Pandemie im März 2020 (Obringer et al. 2021). Dabei kommt die Frage auf, wie viel der Einzelne bei der Nutzung seines Rechners und des Internets an CO₂-Äquivalenten verursacht.

Im Folgenden wird daher beleuchtet, welche Treibhausgasemissionen die Nutzung eines Computers mit sich bringt und wie sich die Bilanz eines virtuellen Meetings, im Vergleich zu einem persönlichen Meeting, verhält. Dabei sollen mithilfe von Kennzahlen aus verschiedenen Studien und unter diversen Annahmen die beiden Szenarien vergleichbar gemacht werden.

2. Berechnungsgrundlagen

Für den Vergleich werden Daten aus verschiedenen Studien herangezogen, die als Grundlage für weitere Berechnungen dienen.

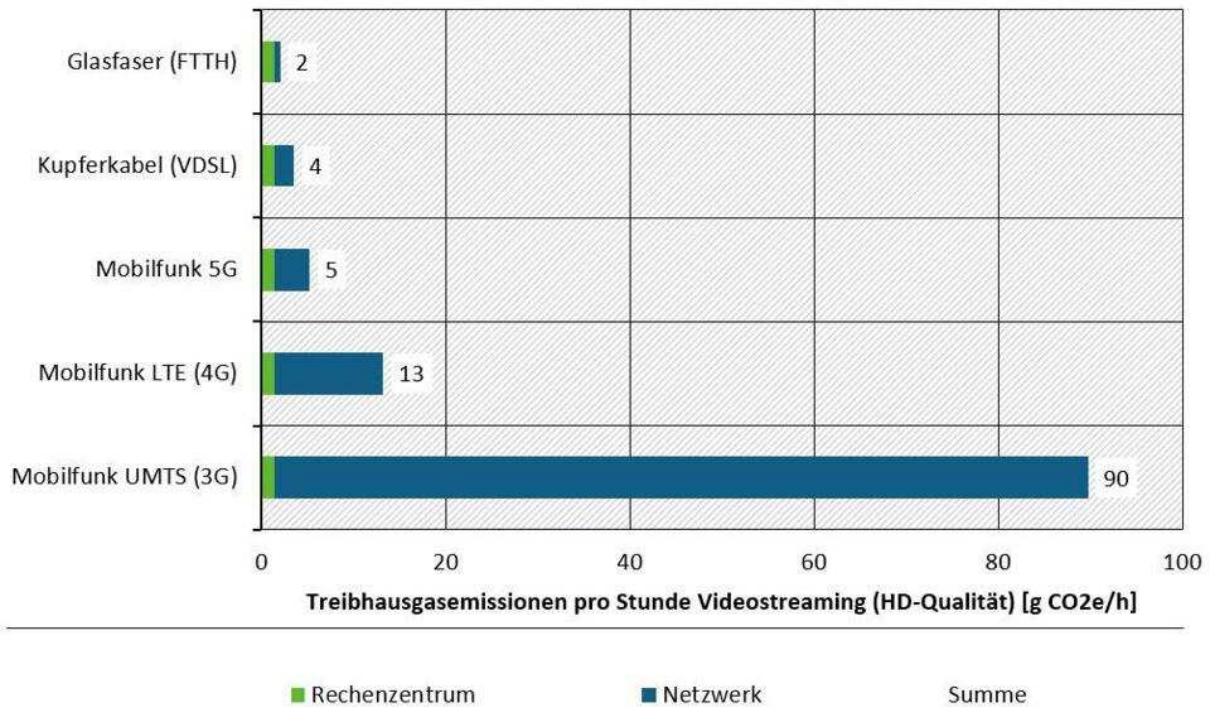
2.1. Grundlagen für Onlineszenario

Da bei Onlinekonferenzen häufig auf die Nutzung der Videofunktion zurückgegriffen wird, ist die Übertragung näherungsweise mit dem Streaming von Videos vergleichbar. Dadurch können die Zahlen aus **Abbildung 1** verwendet werden, in welcher ein Vergleich der Treibhausgasemissionen beim Streaming in Abhängigkeit des Übertragungsweges dargestellt ist. Dabei wird zwischen Übertragungen per Kupfer- und Glasfaserleitung sowie per Mobilfunk mit verschiedenen Mobilfunkstandards unterschieden. Der Vergleich zeigt deutlich, dass der Übertragungsweg, über den die Daten übermittelt werden, einen erheblichen Einfluss auf den CO₂-Ausstoß hat. Die Emissionen sind in die Kategorien „Netzwerk“ und „Rechenzentrum“ eingeteilt. Der grün-markierte Anteil entspricht den Emissionen des Rechenzentrums und ist mit 1,45 Gramm CO₂-Äquivalenten pro Stunde als konstant angegeben (Köhn et al. 2020, S. 4). Er ist nicht vom jeweiligen Übertragungsweg abhängig, sondern entsteht im Rechenzentrum selbst. Der restliche Teil geht zu Lasten des Netzwerks. In den folgenden Berechnungen wird daher bei der Übertragung eines Videos in HD-

¹ Kummer:Umweltkommunikation GmbH, Bonn/Rheinbreitbach, www.beate-kummer.de

Qualität (1280 × 720 Pixel) für den jeweiligen Übertragungsweg von den in **Abbildung 1** dargestellten Emissionen pro Stunde ausgegangen.

Treibhausgasemissionen Videostreaming Rechenzentrum und Übertragungsweg



Quelle: Umweltbundesamt

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen im Rechenzentrum und im Netzwerk pro Stunde Videostreaming (HD-Qualität)

Neben dem direkten CO₂-Ausstoß gibt es auch Daten zur Leistungsaufnahme für kabelgebundene Netzwerke und Mobilfunknetzwerke pro verwendetem Gigabyte (Köhn et al., 2020). Diese Werte werden auch den nachfolgenden Berechnungen in Kapitel 3.1 zugrunde gelegt. Zu beachten ist, dass in der Quelle Daten aus zwei Technikgenerationen verwendet werden, wobei für die im Folgenden durchgeführten Berechnungen lediglich die Werte der Technikgeneration aus dem Jahr 2020 verwendet werden. Um diese Werte auch mit den Angaben aus **Abbildung 1** vergleichen zu können, ist es notwendig, Kenntnis über die Menge an Datenvolumen zu haben, die in einer Stunde für ein Video in HD-Qualität verwendet wird. Laut dem Bericht des Umweltbundesamts sind für ein einstündiges Video in HD-Qualität 1,2 GB Datenvolumen notwendig (Köhn et al., 2020, Tabelle 1). Für die Hardware werden die durchschnittlichen Leistungskennzahlen für den Betrieb eines Laptops und eines Desktop-PCs zu Grunde gelegt. Dabei beträgt laut Prakash et al. (2016) die durchschnittliche, aktive Leistungsaufnahme eines Laptops 13,2 Watt, die eines Desktop-PCs 39,2 Watt. Zusätzlich dazu benötigt der Desktop-PC einen Monitor, der laut Prakash eine durchschnittliche Leistung von 53,7 Watt hat (Prakash et al., 2016, S. 75–77). Als Annahme wurde jedem Rechner noch ein zweiter Bildschirm zugeteilt.

In weiteren Studien werden die Emissionswerte für Kabelnetzwerke auf 0,06 Kilowatt (Aslan et al., 2017, S. 794) pro Gigabyte (kW/GB) und 0,3 kW/GB für 4G bzw. 2,9 kW/GB für 3G Netzwerke (Pihkola et al. 2018, S. 5) festgelegt. Zur Berechnung des CO₂-Ausstoßes wurden die Daten des

Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2018 herangezogen. Dieser beträgt 512 kg CO₂-Äquivalente pro Kilowattstunde (Umweltbundesamt 2021).

Für das Onlineszenario werden zwei Teilnehmer mit Notebooks angenommen, bei dem einer via Glasfaser und einer via 3G-Mobilfunknetz an dem Meeting teilnimmt. Zwei weitere Teilnehmer nutzen Desktop-PCs mit einer Very „High Speed Digital Subscriber Line“ (VDSL) und einer 4G-Verbindung. Das Meeting soll eine Dauer von insgesamt sieben Stunden haben.

2.2. Grundlagen für Offlineszenario (persönliches Treffen)

In dem Offlineszenario soll verglichen werden, welche Emissionen bei einem persönlichen Meeting von vier Personen entstehen. Dabei sollen unterschiedliche Verkehrsträger verwendet und verschiedene Strecken zurückgelegt werden. Als Ort des Meetings wird der Flughafen in Frankfurt am Main (FRA) festgelegt. Die Personen kommen aus Frankfurt a. M., Rüsselsheim, München und Berlin. Für Frankfurt und Rüsselsheim werden die Emissionen für eine Anreise per S-Bahn oder PKW zugrunde gelegt. Von München und Berlin werden die Werte für PKW, ICE oder das Flugzeug ermittelt. Die Emissionsdaten pro zurückgelegtem Personenkilometer werden anhand der Zahlen aus **Abbildung 2** ermittelt.

Verkehrsmittel	Treibhausgase ¹	Kohlenmonoxid	Flüchtige Kohlenwasserstoffe ⁴	Stickoxide	Partikel ⁵	Auslastung
Pkw	143	0,95	0,14	0,39	0,006	1,5 Pers./Pkw
Flugzeug, Inland	214 ²	0,30	0,10	0,98	0,011	70%
Eisenbahn, Fernverkehr	29 ³	0,02	0,00	0,03	0,001	56%
Linienbus, Fernverkehr	29	0,01	0,01	0,05	0,001	55%
sonstige Reisebusse⁶	32	0,04	0,01	0,12	0,002	64%
Eisenbahn, Nahverkehr	55	0,04	0,01	0,19	0,004	28%
Linienbus, Nahverkehr	80	0,06	0,03	0,29	0,005	19%
Straßen-, Stadt- und U-Bahn	55	0,03	0,00	0,05	0,002	19%

g/Pkm = Gramm pro Personenkilometer, inkl. der Emissionen aus der Bereitstellung und Umwandlung der Energieträger in Strom, Benzin, Diesel und Kerosin

Quelle: TREMOD 6.14

Umweltbundesamt, 11/2020

¹ CO₂, CH₄ und N₂O angegeben in CO₂-Äquivalenten

² inkl. Nicht-CO₂-Effekte

³ Die in der Tabelle ausgewiesenen Emissionsfaktoren für die Bahn basieren auf Angaben zum durchschnittlichen Strom-Mix in Deutschland. Emissionsfaktoren, die auf unternehmens- oder sektorbezogenen Strombezug basieren (siehe z. B. den „Umweltmobilcheck“ der Deutschen Bahn AG), weichen daher von den in der Tabelle dargestellten Werten ab.

⁴ ohne Methan

⁵ ohne Abrieb von Reifen, Straßenbelag, Bremsen, Oberleitungen

⁶ Gruppenfahrten, Tagesfahrten (z. B. Busrundreisen, Klassenfahrten, „Kaffeefahrten“)

Abbildung 2 Ausstoß an Treibhausgasen pro zurückgelegtem Personenkilometer für verschiedene Verkehrsmittel
<https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-0> (abgerufen am 28.04.2021)

Zunächst werden die Emissionen für die zurückgelegte Strecke berechnet. Dabei werden die Kilometer für den PKW mithilfe von www.openstreetmap.de/karte.html bestimmt. Die Streckenkilometer für die jeweiligen Zugverbindungen werden mithilfe der Internetseite www.trassenfinder.de ermittelt. Für die Flugemissionen wird als Berechnungsgrundlage die direkte Entfernung, also die Luftlinie angesetzt.

3. Berechnungen

3.1. Onlineszenario

Für das Onlineszenario liegen mehrere Berechnungsgrundlagen vor. Diese werden in drei Ansätze (A, B, C) aufgeteilt. Für jeden der drei Ansätze wird zunächst ein Gesamtwert der verursachten Emissionen berechnet und diese 3 Ansätze werden im Anschluss gegenübergestellt.

Zuerst wird in **Rechnung 1** die Leistung der Hardware in kW (Kilowatt) berechnet. Die Grundlage dafür bilden die Werte aus **Tabelle 1**.

Hardware	Leistung in kW	Anzahl
Laptop (W)	13,2	2
Desktop (W)	39,4	2
Bildschirm (W)	53,7	6

Tabelle 1: Leistung nach (Pihkola et al. 2018) und Anzahl der verwendeten Hardware

$$2 * 13,2 [W] + 2 * 39,4 [W] + 6 * 53,7 [W] = 427,4 [W] = 0,4274 [kW]$$

Rechnung 1: Leistung der Hardware in kW

3.1.1. Ansatz A

In Ansatz A wird nun die Leistung der Hardware (Ergebnis aus **Rechnung 1**) mit der Nutzungsdauer und dem durchschnittlichen Ausstoß pro kWh (Umweltbundesamt 2021) multipliziert und mit den Emissionen des jeweiligen Netzstandards aus **Abbildung 1** addiert.

$$0,4274 [kW] * 7 [h] * 512 [g CO_2eq/kWh] + (90 + 13 + 4 + 2) \left[\frac{g CO_2eq}{h} \right] * 7 [h] = 2294,80 [g CO_2eq] = 2,29 [kg CO_2eq]$$

Rechnung 2: Emissionen nach Ansatz A

3.1.2. Ansatz B

Für Ansatz B wird das Ergebnis aus **Rechnung 1** mit den Werten aus **Tabelle 2** verwendet und mit dem durchschnittlichen Wert von 1,2 GB/h für ein HD-Video (Köhn et al., 2020) sowie der Dauer des Meetings und den CO₂-Äquivalenten pro kWh (Köhn et al., 2020, Tabelle 1) multipliziert.

Netzstandard	Verbrauch (W/GB)
3G	68
4G	9
Kupferkabel	1,4
Glasfaser	0,3

Tabelle 2: Leistung nach verwendetem Netzanschluss (Köhn et al. 2020)

$$\left(427,4 [W] + \left((68 + 9 + 1,4 + 0,3) \left[\frac{W}{GB} \right] * 1,2 \left[\frac{GB}{h} \right] * 1 [h] \right) \right) * 7 [h] : 1000 \left[\frac{W}{kW} \right] * 512 [g CO_2eq/kWh] = 1870,28 [g CO_2eq] = 1,87 [kg CO_2eq]$$

Rechnung 3: Emissionen nach Ansatz B

3.1.3. Ansatz C

Die Berechnung von Ansatz C ist gleich der von Ansatz B, allerdings werden andere Werte für die Berechnung des Netzanschlusses verwendet. Die neuen Werte auf Basis der Studien von Aslan et al. und Pihkola et al. sind **Tabelle 3** zu entnehmen.

Netzstandard	Verbrauch kW/ GB
3G	2,9
4G	0,3
General cable	0,06

Tabelle 3: Leistungsdaten nach alternativen Studien (Pihkola et al. 2018; Prakash et al. 2016)

$$\left(427,4[W] : 1000 \left[\frac{W}{kW} \right] + (2,9 + 0,3 + 2 + 0,06) \left[\frac{kW}{GB} \right] * 1,2 \frac{GB}{h} * 1 [h] \right) * 7 [h] \\ * 512 [g CO_2eq/kWh] = 15810,46 [g CO_2 eq] = 15,81 [kg CO_2 eq]$$

Rechnung 4: Emissionen nach Ansatz C

3.1.4. Fazit

Die Werte aus Ansatz A sowie Ansatz B ähneln sich, weil sie ähnliche Datengrundlagen haben. Bei Ansatz B sollte der Wert für den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß pro kWh in Deutschland zusammen mit der Berechnung über die benötigte Leistung pro GB nochmal eine andere Perspektive ergeben. Ansatz B dient daher zum einen der Verifizierung von Ansatz A, zum anderen soll er einen Vergleichswert aufgrund der ähnlichen Berechnung für Ansatz C darstellen. Bei Betrachtung der Ergebnisse aus Ansatz C ergeben sich Emissionen für das Onlineszenario, die beinahe um den Faktor neun bis zehn höher sind als die Emissionen aus den Ansätzen A und B. Besonders die Emissionen in den mobilen Netzen sind hier deutlich höher. Eine Ursache dafür könnte sein, dass die Werte für 4G aus der Studie von Pihkola et al. aus dem Jahr 2017 stammen und die Werte für den 3G Netzstandard aus 2010. Die Werte für kabelgebundene Netzwerke werden allgemein mit dem Faktor 0,06 angegeben und sind ein Schätzwert aus dem Jahr 2016 (Aslan et al. 2017). Da der Energiebedarf in der Informations- und Kommunikationstechnik stark mit der verfügbaren Rechenleistung zusammenhängt, lässt sich die Steigerung der Effizienz mit dem Gesetz von Koomey erklären. Dieses besagt, dass sich die Anzahl der Rechnerleistung pro kWh alle 1,57 Jahre verdoppelt (Koomey et al. , 2011). Unter dieser Betrachtung lässt sich der höhere Verbrauch der einzelnen Netzstandards in Ansatz C, dessen Verbrauchswerte älter sind als die Werte aus Ansatz A und B, besser nachvollziehen bzw. erklären.

3.2. Offlineszenario

Die Grundlagen der Berechnung wurden bereits in Kapitel 2.2 erläutert. Mithilfe der verwendeten Tools konnten die entsprechenden Werte in **Tabelle 4** ermittelt werden.

Startpunkt	Verkehrsmittel	Strecke (in km)		
		Flug (direkte Luftlinie)	Bahn (Quelle: Trassenfinder Streckenkilometer)	PKW (Quelle: openstreetmap)
Frankfurt	S-Bahn/Auto	nA	11,3	11,4
München	Flug/ICE/Auto	299,2	414,1	396
Rüsselsheim	S-Bahn/Auto	nA	16	15
Berlin	Flug/ICE/Auto	436,7	549,8	550

Tabelle 4: Ermittelte Kilometer für das jeweilige Verkehrsmittel, nA: keine Flüge verfügbar

Durch Multiplikation mit den dazugehörigen Emissionswerten aus **Abbildung 2** konnten die in **Tabelle 5** dargestellten Werten ermittelt werden.

Startpunkt	Verkehrsmittel	CO ₂ Emission (in kg CO ₂ eq)		
		Flug	Bahn	PKW
Frankfurt	S-Bahn/Auto	nA	0,62	1,63
München	Flug/ICE/Auto	64,03	12,01	56,63
Rüsselsheim	S-Bahn/Auto	nA	0,88	2,15
Berlin	Flug/ICE/Auto	93,45	15,94	78,65

Tabelle 5: Emissionen für das jeweilige Verkehrsmittel, nA: keine Flüge verfügbar

Vergleicht man nun diese Werte miteinander, kann man den Verkehrsträgermix mit dem niedrigsten CO₂-Ausstoß bestimmen und daraufhin mit den Onlineszenarien vergleichen. Die Darstellung der gemäß CO₂-Ausstoß günstigsten Verkehrsstrecke erfolgt in **Tabelle 6** (grün unterlegt).

Ursprungsort	alle Werte in kg CO ₂ eq		
	Flug	Bahn	PKW
Frankfurt	nA	1,24	3,26
München	128,06	24,02	113,26
Rüsselsheim	nA	1,76	4,29
Berlin	186,91	31,88	157,30
Gesamtemissionen für die Anreise mit der Bahn (günstigstes Szenario)	58,91		

Tabelle 6: kumulierte Emissionen nach CO₂-neutralstem Transportmix je Strecke (nA: keine Flüge verfügbar)

4. Vergleich

Nach Berechnung der Emissionswerte werden nun die Ergebnisse miteinander verglichen. In **Tabelle 7** sind die Werte der beiden Szenarien gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass durch die Anreise der Personen für ein persönliches Meetings wesentlich höhere Treibhausgasemissionen verursacht werden. Anders ausgedrückt, ein Online-Meeting kann mehr 96 Prozent an CO₂-Äquivalenten einsparen im Vergleich zu einem persönlichen Treffen.

	Emissionen Onlineszenario			Emissionen Offlineszenario
	Ansatz A	Ansatz B	Ansatz C	
Gesamt [kg CO ₂ eq/h]	2,29	1,87	15,81	58,90
CO ₂ -Einsparungen im Vergleich zu Offlineszenario	-96,10%	-96,82%	-73,16%	

Tabelle 7: Vergleich beider Szenarien

Schon die Emissionen, die durch die Anreise der vier Teilnehmer verursacht werden, wenn Sie nur aus Frankfurt mit der S-Bahn anreisen würden, wären im Vergleich zu einem Onlinemeeting nach Ansatz A oder B deutlich höher. Lediglich in Ansatz C, dessen Grundlage älterer Verbrauchswerte sind, würde ein Onlinemeeting mehr Emissionen verursachen als die Anreise aller Beteiligten mit der Bahn direkt aus Frankfurt.

Unabhängig davon ist zu bedenken, dass im Offlineszenario die Emissionen von Endgeräten, also Laptops, Beamer, etc. als weitere Emissionsquelle dazukommen. Auch auf die Nutzung des Internets würde gegebenenfalls bei einem persönlichen Meeting zurückgegriffen werden. In beiden Szenarien wurde auch die Nutzung von Geschäfts- oder Büroräumen nicht weiter ermittelt. Sollten die Meeting-Teilnehmer für die Präsenzveranstaltung wegen der größeren Entfernung zum Tagungsort zusätzlich ein Hotel in Anspruch nehmen, steigt der Ausstoß von CO₂-Äquivalenten für das Offlineszenario weiter an.

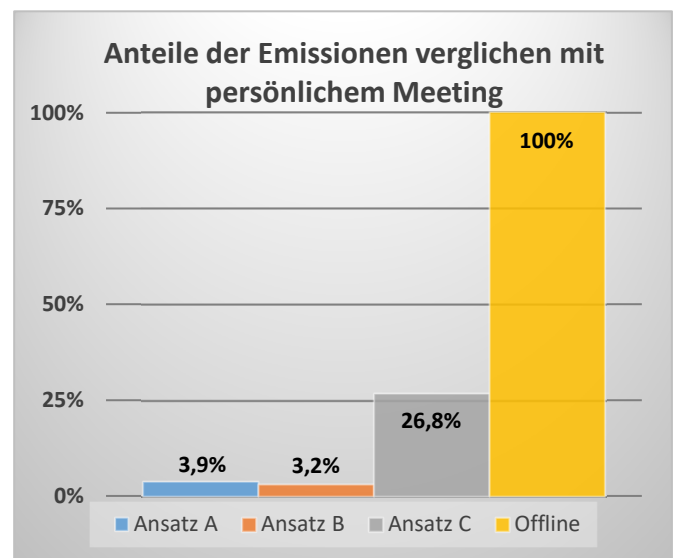
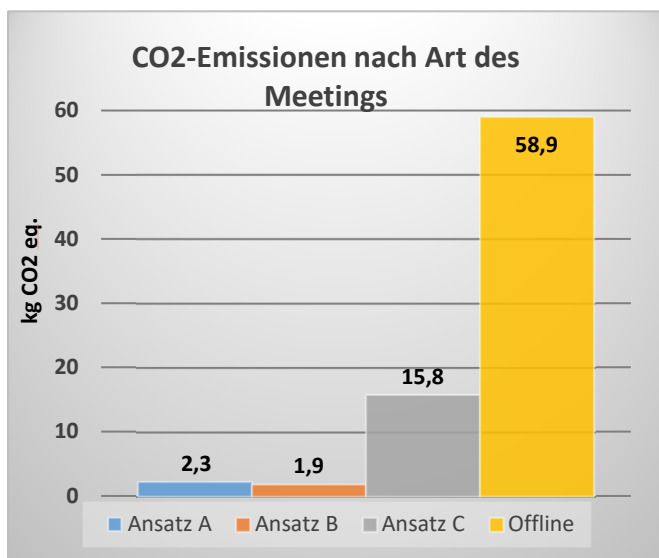


Abbildung 3 und 4:

Ansatz A: Ausstoß von CO₂-Emissionen (CO₂eq./h) nach Übertragungsart (Quelle: Umweltbundesamt, 2021)

Ansatz B: Leistungsaufnahme nach Übertragungsweg (W/h) multipliziert mit Emissionen nach deutschem Strommix (Quelle: Umweltbundesamt, 2021)

Ansatz C: Leistungsaufnahme nach Übertragungsweg (W/h) multipliziert mit Emissionen nach deutschem Strommix (Quelle: Aslan et al.; Pihkola et al.)

5. Diskussion der Ergebnisse

Die Recherche für diesen Artikel hat gezeigt, dass vor allem das Streaming von hochauflösenden Videos große Mengen an Daten benötigt. Besonders hoch sind dabei die CO₂-Emissionen, wenn auf mobile Netze als Übertragungsweg zurückgegriffen wird. Es ist also weniger das Meeting an sich, das hohe CO₂-Emissionen hervorruft, sondern viel mehr die Anzahl und Auflösung der Videos sowie der verwendete Netzanschluss der Teilnehmer. Virtuelle Meetings haben den Vorteil, dass durch sie die Reisezeiten entfallen und somit mehr Zeit für konzentrierte und fokussierte Arbeit bleibt. Zwar sinkt der nötige Energieaufwand durch die Modernisierung der Netze und auch der Anteil der realen Meetings kann vermeintlich durch Onlinelösungen reduziert werden, in der Realität zeichnet sich jedoch ein anderes Bild ab.

6. Fazit

Anhand der durchgeführten Rechnungen wurde deutlich, dass durch die Nutzung von Videokonferenzen die Emissionen von CO₂-Äquivalenten im Vergleich zu persönlichen Meetings in verschiedenen Szenarien um teilweise mehr als 96 % gesenkt werden können. Durch digitale Meetings können also nicht nur große Mengen an CO₂, sondern auch hohe Kosten für Geschäftsreisen eingespart werden. Besonders im Hinblick auf die steigenden Preise für CO₂-Emissionen kann dies in Zukunft einen entscheidenden Faktor für Unternehmen darstellen, wenn es darum geht, mehr digitale Meetings anzubieten. Nichtsdestotrotz muss auch beachtet werden, dass

durch die stärkere Implementierung von digitalen Lösungen und immer höherem Vernetzungsgrad die Menge an Daten und der damit verbundene Ausstoß an CO₂-Äquivalenten zunimmt. In einer Welt, in der die Globalisierung immer weiter vorangetrieben wird, ist es wichtig zu entscheiden, ob und wann ein physisches Meeting nötig ist, beziehungsweise, ob eine virtuelle Lösung für den jeweiligen Zweck nicht ausreichend sein kann. Besonders Treffen mit Teilnehmern, die aus großen Entfernungen zusammenkommen, lassen sich sehr einfach und kosteneffizient digitale Alternativen finden. Die Homeoffice-Nutzung und virtuelle Meetings können deshalb auch ein Stück zur Klimawende beitragen. Wird der Strom für den Betrieb der Netze, Rechenzentren und Endgeräte aus erneuerbaren Energien erzeugt, lässt sich die Emissionsbilanz deutlich verbessern. Es ist daher für Unternehmen ein wirtschaftlicher und ökologischer Vorteil, Meetings und Konferenzen online abzuhalten.

Literaturverzeichnis

Aslan, Joshua; Mayers, Kieren; Koomey, Jonathan G.; France, Chris (2017): Electricity Intensity of Internet Data Transmission - Untangling the Estimates. In: *Journal of Industrial Ecology* (Volume 22, Number 4).

Etzel, Andres Gavira (2019): Europäische Investitionsbank. Online verfügbar unter <https://www.eib.org/de/essays/digital-climate-impact>, zuletzt aktualisiert am 13.12.2019, zuletzt geprüft am 06.05.2021.

Köhn, Marina; Gröger, Jens; Stobbe, Lutz (2020): Energie- und Ressourceneffizienz digitaler Infrastrukturen. Ergebnisse des Forschungsprojektes „Green Cloud-Computing“. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energie-ressourceneffizienz-digitaler>.

Koomey, Jonathan; Berard, Stephen; Sanchez, Marla; Wong, Henry (2011): Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing. In: *IEEE Annals Hist. Comput.* (3), S. 46–54. DOI: 10.1109/MAHC.2010.28.

Obringer, Renee; Rachunok, Benjamin; Maia-Silva, Debora; Arbabzadeh, Maryam; Nateghi, Roshanak; Madani, Kaveh (2021): The overlooked environmental footprint of increasing Internet use. In: *Resources, Conservation and Recycling* (Volume 167). DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105389.

Pihkola, Hanna; Hongisto, Mikko; Apilo, Olli; Lasanen, Mika (2018): Evaluating the Energy Consumption of Mobile Data Transfer. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. Espoo, Finland.

Prakash, Siddharth; Antony, Florian; Köhler, Andreas; Liu, Liu (2016): Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC). Hg. v. Umweltbundesamt. Öko-Institut e.V., zuletzt aktualisiert am 01.2016.

Umweltbundesamt (2021): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2019 und erste Schätzungen 2020 im Vergleich zu den CO₂-Emissionen der Stromerzeugung. eigene Berechnungen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/bilder/strommix-2020.png>, zuletzt geprüft am 28.06.21.