

Energieeffizienz im digitalen Alltag und beim Coding Wissenschaftlicher Hintergrund

Julia Padberg und Martin Becke

Februar 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung zu CO₂-Emissionen	2
3	Auswirkungen digitaler Technologien	5
4	Analyse der IT-Infrastruktur in Deutschland	5
5	Private Internet- und digitale Mediennutzung	7
6	Ansätze in der Softwareentwicklung	9
7	CO₂-Effizienz und Ressourcenschonung	10
8	Messung von Energieverbrauch und Laufzeit	12
9	Experiment	13
10	Computer Science for Future	14
A	Experiment zu Laufzeit und Energieverbrauch	18

1 Einleitung

Softwareentwicklung ist inzwischen ein zentraler Bestandteil des technologischen Fortschritts. Jedoch wird zunehmend erkannt, dass die digitale Technologien signifikant zu globalen Treibhausgasemissionen beitragen. Allein im Jahr 2020 wurden laut IEA¹ 330 Megatonnen CO₂-Äquivalente[1] durch Rechenzentren,

¹Internationale Energie-agentur <https://www.iea.org/>

Datenübertragungsnetzwerke und vernetzte Geräte emittiert. Vor diesem Hintergrund wird das ambitionierte Ziel verfolgt, diese Emissionen bis 2030 zu halbieren, um den Weg zur Netto-Null-Emission bis 2050 zu ebnen.

Diese Ausarbeitung zeigt eine Umsetzung aus den abstrakten Fakten zur CO₂-Emissionsreduktion² von IT aus der Perspektive eines programmierenden Menschen auf. Diese Arbeit beleuchtet sowohl mögliche Maßnahmen im Alltag und deren Auswirkungen auf die Emissionsreduktion als auch die Entwicklung von CO₂-effizienten Anwendungen in der Softwareentwicklung und deren Beitrag zur Emissionsminderung.

2 Stand der Forschung zu CO₂-Emissionen

IEA

Laut der IEA wird der Klimawandel und seine Folgen ein unvermeidbares Thema für alle Disziplinen darstellen, einschließlich der Informatik. Die Studie *Net Zero Roadmap* [2] untersucht den aktuellen Stand der Netto-Null-Roadmap, wie sie von der IEA präsentiert wird. Insbesondere wird der Fokus auf saubere Energietechnologien gelegt, die die Aussichten für Emissionen durch politische Maßnahmen, expandierende Märkte und sinkende Kosten verändern. Trotz der aktuellen politischen Rahmenbedingungen wird erwartet, dass diese Technologien zu einer Verringerung der Emissionen um 7,5 Gigatonnen bis 2030 führen, basierend auf dem Basisszenario vor dem Pariser Abkommen von 2015

Die voranschreitende Entwicklung sauberer Energietechnologien spielt eine entscheidende Rolle bei der Eindämmung von Treibhausgasemissionen. Politische Maßnahmen, expandierende Märkte und sinkende Kosten tragen dazu bei, dass Technologien wie Photovoltaik und Windkraft verstärkt genutzt werden. Im Szenario STEPS (Stated Policies Scenario) wird erwartet, dass der Ausbau von Photovoltaik und Windkraft um 5 Gigatonnen sowie die Integration von Elektrofahrzeugen für eine Reduktion von fast 1 Gigatonne verantwortlich sind.

Die Prognose einer Verringerung der Emissionen um 7,5 Gigatonnen bis 2030 im Vergleich zum Basisszenario vor dem Pariser Abkommen von 2015 ist von erheblicher Bedeutung. Dies verdeutlicht nicht nur den Fortschritt in der Umsetzung sauberer Energietechnologien, sondern auch die Wirksamkeit politischer Maßnahmen. Die Netto-Null-Roadmap bietet somit einen klaren Weg zur Erreichung der Emissionsziele.

Trotz der vielversprechenden Entwicklungen bleibt die prognostizierte Erwärmung von 2,4 Grad Celsius im Jahr 2100 besorgniserregend hoch. Dies verdeutlicht die Dringlichkeit weiterer Anstrengungen und innovativer Maßnahmen, um die Klimaerwärmung einzudämmen. Es ist jedoch zu betonen, dass die aktuelle Prognose um 1 Grad Celsius niedriger liegt als vor dem Pariser Abkommen von 2015, was auf die positiven Auswirkungen der implementierten Maßnahmen hinweist.

²Im folgenden sprechen wir von CO₂ auch, wenn es sich um andere Treibhausgase oder CO₂-Äquivalente handelt.

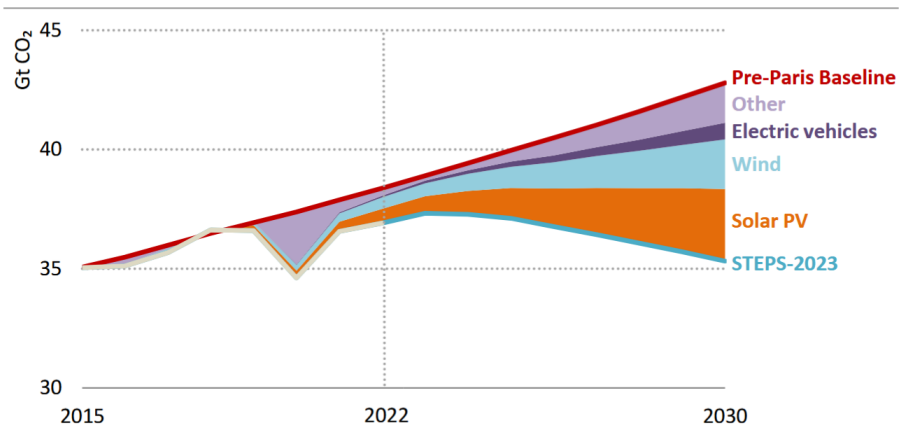


Abbildung 1: Prognose der IEA (aus [3] S.25)

Die Abb. 1 illustriert die zukünftige Entwicklungen; bis 2030 könnten, basierend auf dem Basisszenario des Pariser Abkommens von 2015 und unter der Annahme der Umsetzung politischer Maßnahmen, Emissionsverringerungen von etwa 7,5 Gigatonnen erreicht werden. Ein beachtlicher Teil dieser Reduktion, etwa fünf Gigatonnen, wird voraussichtlich durch den Ausbau von Photovoltaik und Windkraft erzielt. Zudem wird eine weitere Reduktion von einer Gigatonne durch den zunehmenden Einsatz von Elektrofahrzeugen erwartet.

Trotz dieser Fortschritte wird prognostiziert, dass, falls die derzeitigen Trends fortgesetzt werden, die globale Temperatur bis zum Jahr 2100 um 2,4 Grad Celsius ansteigen könnte. Diese Prognose, basierend auf Daten der Internationalen Energieagentur, ist zwar niedriger als die Interpolation von 2015, bleibt jedoch deutlich über dem gewünschten Ziel.

IPCC

Das IPCC³ wurde im Jahr 1988 von der Weltmeteorologieorganisation (WMO) der Vereinten Nationen (UN) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet. Das IPCC hat die Aufgabe, wissenschaftliche Informationen über den Klimawandel zu bewerten und diese Bewertungen den politischen Entscheidungsträgern weltweit zur Verfügung zu stellen. Eines der Hauptziele des IPCC ist die Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Wissens. Das IPCC sammelt und bewertet die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Klimawandel. Dies umfasst Informationen über den aktuellen Stand des Klimas, die Ursachen des Klimawandels, die Auswirkungen auf die Umwelt, die Gesellschaft und die Wirtschaft sowie mögliche Anpassungs- und Minde-

³Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen) <https://www.ipcc.ch/>

rungsstrategien.

Die IEA fokussiert sich auf eine positivere Darstellung der Entwicklung, während das IPCC eine dringlichere Sichtweise einnimmt, was die Notwendigkeit für sofortige Handlungen unterstreicht. Diese Diskrepanz in der Darstellung hebt die Komplexität und die Herausforderungen bei der Interpretation von Klimadaten hervor. Des Weiteren zeigt eine Analyse des IPCC noch drastischere Szenarien. Die aktuellen Trends deuten darauf hin, dass selbst bei umfassenden Maßnahmen zur Emissionsreduktion eine Erwärmung von 1,5 bis 2 Grad unvermeidlich erscheint. Die Notwendigkeit, das Ziel von Net Zero – keine Emission von Treibhausgasen – zu erreichen, wird somit umso dringlicher.

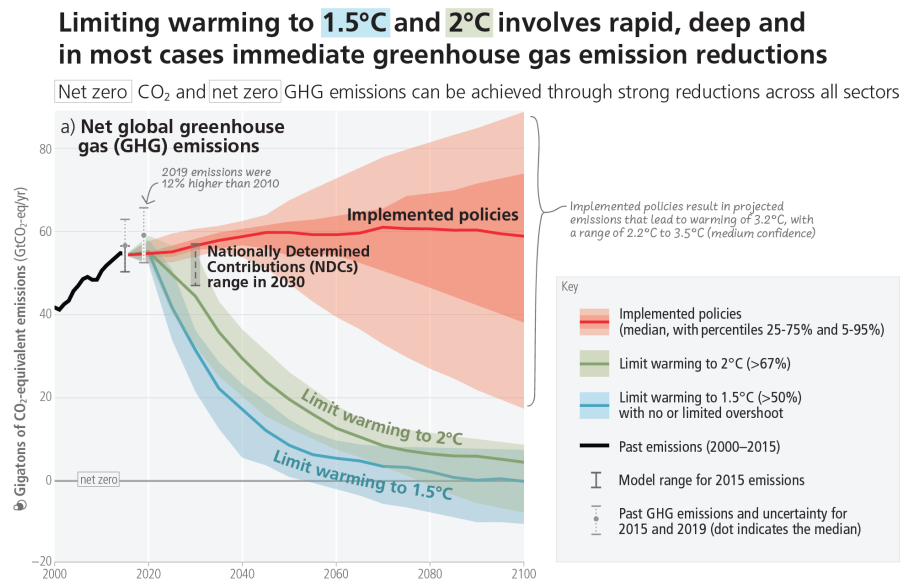


Abbildung 2: Prognose IPCC (aus [4]) S.22

Abb. 2 zeigt die Entwicklung der globalen CO₂-Emissionen in den modellierten Szenarien. Die roten Bereiche zeigen die Emissionspfade unter der Annahme, dass die Politik bis Ende 2020 umgesetzt wird. Die Bereiche der modellierten Szenarien, die die Erwärmung auf 1,5°C (>50%) begrenzen, ohne oder mit begrenzter Überschreitung, sind hellblau dargestellt, und Szenarien, die die Erwärmung auf 2°C (>67%) begrenzen, sind grün dargestellt. Globale Emissionspfade, die die Erwärmung auf 1,5°C (>50%) begrenzen würden, ohne oder mit begrenzter Überschreitung, und die außerdem in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts netto null Treibhausgase erreichen würden, tun dies zwischen 2070 und 2075. Die Treibhausgasemissionen der Vergangenheit für 2010-2015, die für die Projektion der globalen Erwärmungsergebnisse der modellierten Szenarien verwendet wurden, sind durch eine schwarze Linie dargestellt.

Hier wird eine Diskrepanz zwischen den Darstellungen der IEA und des IPCC über die Auswirkungen und Maßnahmen bezüglich des Klimawandels

deutlich. Die Einschätzungen beider Studien weichen nicht jedoch signifikant von einander ab, die Unterschiede liegen mehr in der Darstellung als im Inhalt, führen aber zu einer anderen Wahrnehmung.

3 Auswirkungen digitaler Technologien

Laut der IEA haben digitale Technologien einen signifikanten Einfluss auf die energiebezogenen Treibhausgasemissionen (THG) und trugen im Jahr 2020 mit 2% zu diesen Emissionen bei. Diese Auswirkungen resultieren direkt aus dem Betrieb von Rechenzentren, Datenübertragungsnetzen und vernetzten Geräten, was zu einem Ausstoß von etwa 330 Megatonnen CO₂-Äquivalenten führte, was wiederum 0,9% der gesamten energiebezogenen THG-Emissionen entspricht. Trotz des rasanten Wachstums der Nachfrage nach digitalen Dienstleistungen seit 2010 verzeichneten die Emissionen nur eine geringe Steigerung. Dies ist auf verbesserte Energieeffizienz in digitalen Technologien, verstärkten Kauf von erneuerbaren Energien durch Unternehmen im Bereich Informations- und Kommunikationstechnologie (IT) sowie umfassendere Bemühungen zur Dekarbonisierung der Stromnetze zurückzuführen. Im Szenario der Netto-Null-Emissionen bis 2050 (NZE) ist eine Halbierung der Emissionen bis 2030 erforderlich. Dies stellt eine bedeutende Herausforderung dar und erfordert möglicherweise weiterführende Maßnahmen zur Verringerung des ökologischen Fußabdrucks digitaler Technologien [5].

Die Herausforderungen, die sich aus der IT-Infrastruktur und Vernetzung für den Klimawandel ergeben, sind bedeutend. Im Jahr 2020 wurden von Rechenzentren, Datenübertragungsnetzen und vernetzten Geräten insgesamt 330 Megatonnen CO₂ emittiert. Diese Zahl verdeutlicht die Notwendigkeit, dass sowohl praktizierende als auch angehende Informatiker sich mit den klimatischen Auswirkungen der IT-Infrastruktur auseinandersetzen sollten.

Trotz einer exponentiellen Steigerung in der Nutzung von Internetdiensten, der Zunahme an Datenzentren und der Verbreitung des Internets der Dinge (IoT), wurde nur eine relativ geringe Zunahme der Emissionen beobachtet. Diese Beobachtung steht im Gegensatz zu früheren Annahmen, wie sie beispielsweise im Shift Report von 2017 getroffen wurden, der von wesentlich höheren Emissionssteigerungen ausging. Nichtsdestotrotz bleibt die Herausforderung bestehen, die Emissionen im Sinne des Netto-Null-Ziels bis 2030 zu halbieren.

hier fehlen noch Quellen [?]

4 Analyse der IT-Infrastruktur in Deutschland

Die Halbierung der Emissionen stellt eine enorme Aufgabe dar. Wir wollen nun die Situation in Deutschland, betrachten, um konkrete Maßnahmen und Strate-

gien zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Bereich der IT-Infrastruktur und Vernetzung zu diskutieren. Abb. 3 (Abb. nach [6] S. 2) prognostiziert den Energieverbrauch der IT-Infrastruktur in Deutschland bis 2030.

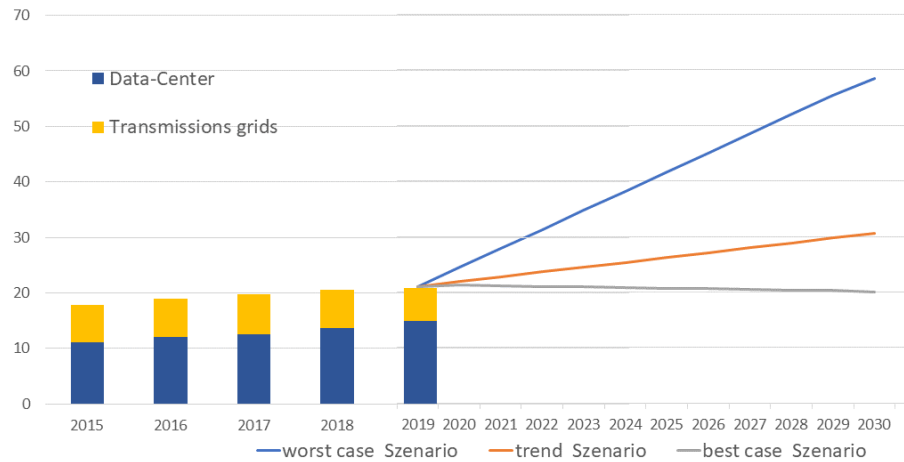


Abbildung 3: Szenarien zum Energiebedarf der IT-Infrastruktur bis 2030

In [7] wird für den Zeitraum zwischen 2015 und 2019 in Deutschland ein Anstieg des jährlichen Energiebedarfs der IT-Infrastrukturen um knapp 4 TWh festgestellt. Eine eingehende Analyse der IT-Infrastruktur in Deutschland offenbart in Abb. 3 verschiedene Szenarien hinsichtlich des Energieverbrauchs. Die mögliche zukünftige Entwicklung wurde durch die Modellierung von drei Szenarien veranschaulicht (siehe Abb. 3). Im Trendszenario wird erwartet, dass der Energiebedarf von derzeit 21,7 TWh/a bis zum Jahr 2030 auf 30,6 TWh/a steigt. Dies würde einen Anstieg um 70% gegenüber 2015 bedeuten (bzw. 80% im Vergleich zu 2010). Im Worst-Case-Szenario könnte der Energiebedarf bis 2030 sogar auf 58,5 TWh/a ansteigen. Das würde eine Verdreifung des Energiebedarfs der IT-Infrastrukturen in Deutschland im Vergleich zu 2015 bedeuten (bzw. eine Verachtfachung im Vergleich zu 2010). Bei optimaler Ausschöpfung der Effizienzpotenziale im Best-Case-Szenario könnte hingegen eine Stabilisierung und langfristige leichte Absenkung des Energiebedarfs erreicht werden. In diesem Fall würde bis 2030 das Niveau des Energiebedarfs von 2010 wieder erreicht. Nichtsdestotrotz ist der Wissensstand zum Energiebedarf der IT-Infrastrukturen unvollständig und teilweise widersprüchlich [7].

Im folgenden wollen wir unseren Blickwinkel weiter einschränken, nämlich darauf was wir als Nutzer einerseits oder als Studierende der Informatik andererseits ändern können.

5 Private Internet- und digitale Mediennutzung

In Deutschland werden pro Person jährlich rund zwölf Tonnen CO₂ durch Energieverbrauch, Verkehr und Konsum emittiert werden [8]. Abb. 4 (siehe auch [9]) illustriert, dass unser digitaler Lebensstil ist für etwa 0,9 Tonnen verantwortlich ist. Nach Angaben des Öko-Instituts ist der Fernseher mit über 350 kg CO₂ pro Jahr der größte Verursacher [8]. Auch die Nutzung von Rechenzentren spielt eine große Rolle: Jeder Internetnutzer verursacht rund 213 kg CO₂-Emissionen pro Jahr. Bei der Produktion entstehen Emissionen vor allem durch Prozesschemikalien und den Energieverbrauch. Die Gesamtemissionen eines großen Flachbildfernsehers werden auf 1.000 kg CO₂ geschätzt, die eines Laptops auf 250 kg. Die nutzungsbedingten Treibhausgasemissionen entstehen vor allem durch den Stromverbrauch der Geräte, der vom Nutzerverhalten abhängt [8].

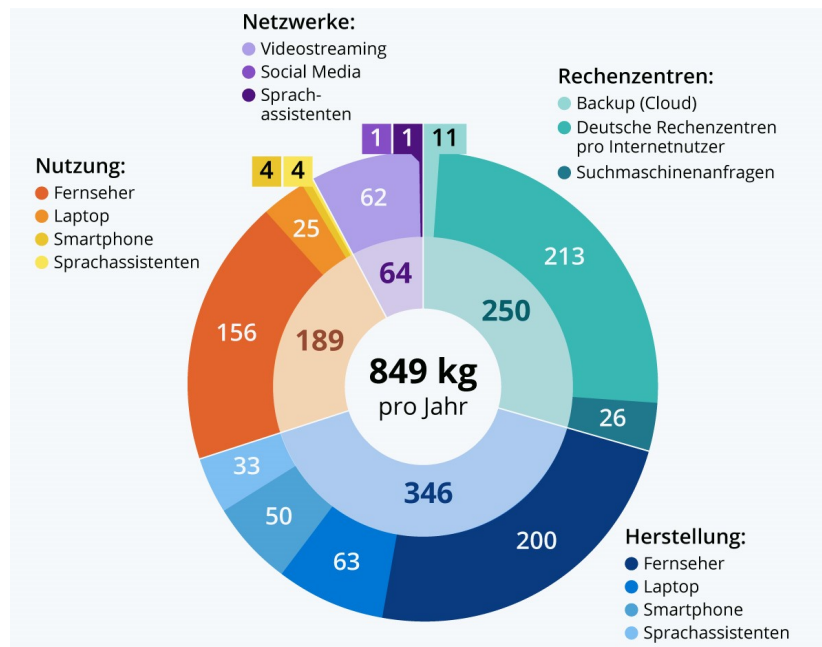


Abbildung 4: Der CO₂-Fußabdruck unseres digitalen Lebens

Diese Beobachtungen werfen die Frage auf, welche Maßnahmen wir ergreifen können. In den letzten Jahren lässt sich die Verlagerung des Energiebedarfs der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung von den Endgeräten hin zur IT-Infrastruktur beobachten [7].

Die Übertragung von Daten in Mobilfunknetzen belastet die Umwelt stärker als in kabelgebundenen Breitbandnetzen. Das liegt am größeren CO₂-Fußabdruck. Fehlanreize sind zum Beispiel Flatrates oder großzügige Datenpakete für Musik- und Videostreaming. Solche Tarife könnten dazu führen, dass Nutzer Videotelefonate über Messenger-Dienste anstelle von Sprachtelefonaten bevorzugen.

Videotelefonate verbrauchen etwa fünfmal mehr mobiles Datenvolumen (300 MByte pro Stunde im Vergleich zu 60 MByte pro Stunde) und haben somit einen höheren CO₂-Fußabdruck, besonders wenn sie über UMTS-Netze erfolgen. Weitere Fehlanreize entstehen durch Mobilfunkverträge, die neue Smartphones zu günstigen Preisen anbieten. Die Kosten für die Telefone sind für die Nutzer in den höheren Grundgebühren versteckt. Dies führt dazu, dass Nutzer alle 1 bis 2 Jahre ein neues Smartphone erhalten, was wiederum zu Umweltbelastungen durch Rohstoffverbrauch, Treibhausgasemissionen und Elektronikschrott führt. Stattdessen sollten Mobilfunkverträge die Nutzer mit niedrigen Grundgebühren und nicht subventionierter Hardware dazu ermutigen, ihre Smartphones möglichst lange zu nutzen und so Energie und Ressourcen zu sparen [8].

In [10] werden folgende Hinweise zum Reduzieren des digitalen CO₂-Fußabdrucks gegeben, die nicht den Verzicht in den Vordergrund stellen. Die wichtigsten sind:

- Längere Nutzung vorhandener Geräte:
61% des durchschnittlichen digitalen CO₂-Fußabdrucks entsteht während der Herstellung, also beim Abbau der Rohstoffe und deren Verarbeitung. Second-Hand-Kauf und Reparaturen sind unterschätzte Möglichkeiten.
- Geräte, wenn möglich ganz ausschalten:
33% entstehen durch die Nutzung digitaler Geräte zu Hause, wobei die Geräte einen guten Teil der Zeit nicht genutzt werden, aber dennoch Energie verbrauchen. Router, Spielekonsole, Bildschirme haben im Stand-By einen erstaunlich hohen Verbrauch.
- Datenfluss reduzieren:
6% unserer digitalen CO₂-Bilanz resultieren aus dem Datenverkehr bei der Nutzung des Internets. Beispielsweise sind Full HD- und Ultra HD-Videos für 95% des Datenverkehrs von Video-on-Demand verantwortlich. Eine derart hohe Auflösung ist meistens überflüssig, weil die Bildqualität nur bei einem sehr großen Bildschirmen dadurch verbessert wird.

Während persönliche Initiativen wie das Ausschalten von Endgeräten über Nacht wichtig und sinnvoll sind, wird deutlich, dass diese allein nicht ausreichen, um den Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen. Neben individuellen Maßnahmen sind auch politische und wirtschaftliche Veränderungen entscheidend, um einen signifikanten Einfluss auf die Reduktion von CO₂-Emissionen zu erzielen.

Also müssen politische und wirtschaftliche Hebel in Betracht gezogen werden, um effektive und nachhaltige Lösungen für die Herausforderungen im Bereich der IT-Infrastruktur zu entwickeln. Energieeinsparungen im privaten Bereich müssen obwohl sie einen wichtigen Beitrag leisten, in einem größeren Kontext betrachtet und durch umfassendere Strategien ergänzt werden.

6 Ansätze in der Softwareentwicklung

In der Auseinandersetzung mit der Rolle der Informatik im Kontext des Klimawandels wird deutlich, dass etwa ab dem dritten Semester des Informatikstudiums eine zunehmende Fokussierung auf die zukünftigen Herausforderungen und die Verantwortung gegenüber nachfolgenden Generationen erforderlich ist. Die Frage, wie Informatiker*innen über den Tellerrand hinaus blicken können, ist besonders relevant im Zusammenhang mit den globalen Herausforderungen des Klimawandels.

Die Entwicklung von Software mit möglichst geringer CO₂-Emission im gesamten Lebenszyklus des gesamten Produktes ist ein zunehmend relevantes Thema in der Informatik. Seit den Anfängen der Bewegung für grüne I(K)T ab 2000, beispielsweise [11, 12], die sich zunächst auf Energieeinsparungen konzentrierte, hat sich das Feld weiterentwickelt. Ursprünglich durch wirtschaftliche Anreize motiviert, liegt der Fokus nun auch auf der Entwicklung von Software, die über das reine Energiesparen hinausgeht und gleichzeitig ökologischen Mehrwert bietet. Laut [13] begann „Green Computing“ in den 90er Jahren, als die Umweltschutzbehörde der USA das Energy Star-Programm ins Leben rief. Energy Star ist ein Label-Programm, das Computern und anderen elektronischen Geräten verliehen wird. Es wird grundsätzlich verwendet, um den Energieverbrauch zu minimieren und die Effizienz des Produkts bzw. Geräts zu maximieren. Nach [14] sind grüne IT und Green Computing eng miteinander verbundene Konzepte, deren gemeinsames Ziel die Förderung der ökologischen Nachhaltigkeit ist. Grüne IT bezieht sich auf die Nutzung von IT zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit, während sich Green Computing auf das Design, die Entwicklung, die Nutzung und die Entsorgung von Computersystemen in einer umweltverträglichen Weise konzentriert.

Wir wollen uns jetzt mit den Ansätzen zu CO₂-effiziente Softwareentwicklung befassen. Es existieren zahlreiche Ansätze unter verschiedenen Bezeichnungen (Grüne IT, Green Computation, grüne, nachhaltige, ressourcen-effiziente SW etc.), um CO₂-Effizienz in der Softwareentwicklung zu erreichen. Dabei wird aber in den meisten Fällen nur als Ziel genannt, Software zu entwickeln, die sowohl für Nutzer einen Mehrwert bietet als auch den CO₂-Ausstoß minimiert.

Die Diskussion um CO₂-effiziente Software wirft allerdings auch kritische Fragen auf, insbesondere in Bezug auf den kommerziellen Sektor. Während der Fokus auf der Reduzierung von CO₂-Emissionen liegt, wird die Sinnhaftigkeit der umfassenden digitalen Anwendungen oft nicht hinterfragt. Dies führt zu einer Diskrepanz zwischen dem Streben nach CO₂-Effizienz und der umfassenden Bewertung der Notwendigkeit und des Nutzens digitaler Produkte. Solche Ansätze stehen können auch zum Greenwashing beitragen, einer Praxis, bei der Unternehmen umweltfreundliche Maßnahmen behaupten, die möglicherweise nicht der Realität entsprechen. Es ist daher wichtig, kritisch zu hinterfragen und sorgfältig zu prüfen, inwieweit solche Maßnahmen tatsächlich zur CO₂-Effizienz und Ressourcenschonung beitragen.

Die meisten Geschäftsmodelle hinter der Massendigitalisierung erfordern eine

eine ständige Zunahme des Inhalts- und Datenverbrauchs sowie der Infrastruktur, um langfristig rentabel zu bleiben [15].

Weitergehende Ansätze, die die Frage nach der grundsätzlichen Sinnhaftigkeit der Produkte stellen, sind beispielsweise das Konzept der "Digitalen Nüchternheit" (Digital Sobriety) [16, 15], welches die Notwendigkeit hinterfragt, ob alle vorhandenen digitalen Anwendungen tatsächlich benötigt werden.

Auch das Konzept der digitalen Suffizienz ([17]) bildet eine Grundlage, um zu verstehen, wie die IT Teil des grundlegenden ökologischen Wandels werden können und besteht aus vier Dimensionen

- **Hardware-suffizienz:** die darauf abzielt, dass weniger Geräte produziert werden müssen und ihr absoluter Energiebedarf so gering wie möglich gehalten wird, um die gewünschten Aufgaben zu erfüllen.
- **Software-suffizienz,** die darauf abzielt, dass der Datenverkehr und die Hardwareauslastung während der Anwendung so gering wie möglich gehalten werden;
- **Nutzer-suffizienz,** die darauf abzielt, dass die Nutzer digitale Geräte sparsam einsetzen und die IT in einer Weise nutzen, die einen nachhaltigen Lebensstil fördert; und
- **Ökonomische Suffizienz,** die darauf abzielt, dass die Digitalisierung den Übergang zu einer Wirtschaft unterstützt, die nicht durch Wirtschaftswachstum als primäres Ziel, sondern durch ausreichende Produktion und ausreichenden Verbrauch innerhalb der planetarischen Grenzen gekennzeichnet ist.

7 CO₂-Effizienz und Ressourcenschonung

Ansätze zur CO₂-Effizienz und der Ressourcenschonung in der Softwareentwicklung umfassen Überlegungen zur Notwendigkeit und Effizienz von Software sowie deren Auswirkungen auf den Hardwarebedarf und die Umwelt. Der Fokus liegt auf der Entwicklung von Software, die nicht nur energieeffizient ist, sondern auch die Notwendigkeit von häufigen Hardware-Aktualisierungen reduziert.

Eine ressourcenschonende Software wird charakterisiert durch ihre Fähigkeit, auf bestehender Hardware zu laufen und dadurch den Bedarf an neuen Geräten zu verringern. Diese Abwärtskompatibilität und längere Nutzungsdauer führen zu einer höheren Energieeffizienz und geringeren Umweltbelastung. Es wird auch festgestellt, dass Open-Source-Software im Allgemeinen energieeffizienter ist als proprietäre Software.

Verschiedene Initiativen wie die Green Software Foundation⁴, an der Unternehmen wie Microsoft teilnehmen, und SAPs CleanIT⁵, sind Beispiele für Bemühungen in dieser Richtung.

⁴siehe <https://greensoftware.foundation/>

⁵siehe <https://open.sap.com/courses/cleanit2021-hpi>

Die Reduktion von CO₂-Emissionen und Stromverbrauch in der Informati-
onstechnologie umfasst verschiedene Ansätze, die sowohl die Hardware-Herstellung
als auch den Betrieb berücksichtigen. Ein wesentlicher Aspekt ist das verding-
lichte CO₂, welches bereits bei der Herstellung von Hardware entsteht. Die Mi-
nimierung der Hardwareproduktion und die Verlängerung ihrer Lebensdauer
tragen signifikant zur CO₂-Einsparung bei.

Darüber hinaus spielt die Nutzung von erneuerbaren Energien eine entschei-
dende Rolle. Indem Aufgaben und Datenverarbeitung in Datacentern mit er-
neuerbaren Energien verlagert werden, kann der CO₂-Ausstoß reduziert werden.
Google plant, seine Rechenzentren bis 2030 ausschließlich mit kohlenstofffrei-
er Energie bis 2030 zu betreiben[18]. Je nach Energiequellen und Nachfrage
schwankt die Kohlenstoffintensität des öffentlichen Stromnetzes im Laufe der
Zeit. Die Ausnutzung dieser Schwankungen ist ein wichtiger Faktor für die Ver-
ringerung der von Rechenzentren verursachten Emissionen. Dabei gibt es einer-
seits die CO₂-bewusste Verlagerung von Arbeitslasten über geografisch verteilte
Rechenzentren hinweg [19], und andererseits die Verlagerung von Rechenlasten
auf Zeiten, in denen die Energieversorgung voraussichtlich weniger kohlenst-
offintensiv ist, z.B in [20]. Dies erfordert jedoch eine kritische Betrachtung des
Datenverkehrs, da auch dieser Ressourcen verbraucht. Die Energieproportiona-
lität [21, 22] ist hier ein wichtiges Konzept, welches besagt, dass Server und
Netzwerkinfrastrukturen effizient genutzt werden sollten, um unnötigen CO₂-
Verbrauch zu vermeiden. Energieproportionalität bezieht sich auf das Verhältnis
von Energieverbrauch zu Rechenlast, wobei die Energieeffizienz mit zunehmen-
der Last steigt. Das bedeutet, dass ein Server, selbst wenn er keine Berechnungen
durchführt, immer noch einen signifikanten Prozentsatz der Energie verbraucht,
die er unter Höchstlast benötigen würde.

Beispielsweise kann ein Server, der von 10% auf 40% seiner Berechnungs-
kapazität skaliert, den Energieverbrauch nur um den Faktor 1,7 erhöhen. Dies
unterstreicht die Effizienz des Cloud-Computings, insbesondere wenn Daten-
zentren auf erneuerbare Energiequellen setzen. Große Anbieter wie Microsoft,
Google und AWS bewerben ihre Bemühungen um grüne IT, obwohl ein gewisser
Grad an Greenwashing vorhanden sein mag. Ein weiterer relevanter Aspekt ist
die Power Usage Efficiency (PUE) für Datazentren. PUE misst, wie viel des
verbrauchten Stroms tatsächlich für Berechnungen verwendet wird und wie viel
als Overhead anfällt. Die Optimierung der PUE ist nicht nur aus ökologischen,
sondern auch aus kommerziellen Gründen wichtig, da geringerer Stromverbrauch
zu niedrigeren Betriebskosten führt.

hier fehlen noch Quellen [?]

8 Messung von Energieverbrauch und Laufzeit

Es gibt im groben drei Parameter, die, unabhängig von der Infrastruktur, die die CO₂-Emissionen beeinflussen: der aktuelle oder auch der durchschnittliche Energieverbrauch, der Energie-Mix aus erneuerbaren und fossilen Energiequellen und die Menge und Art der Hardware.

Im folgenden untersuchen wir die Messung des Energieverbrauchs. Die These lautet:

Was nicht gemessen werden kann, kann auch nicht verbessert werden.

Daher ist es entscheidend, den tatsächlichen Stromverbrauch zu erfassen, um ihn effektiv reduzieren zu können. Diese Ansätze sind sowohl im Kontext der CO₂-effizienten Softwareentwicklung als auch im Netzwerkmanagement relevant.

Die Frage des Energieverbrauchs bei der Softwareentwicklung ist komplex, da der Energiemix und die verwendete Hardware oft nicht direkt vom Entwickler steuerbar sind. Dennoch ist es möglich, den Energieverbrauch der Software durch spezifische Implementierungen zu beeinflussen. Verschiedene Tools können eingesetzt werden, um den Energieverbrauch zu messen, und diese Messungen können wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung energieeffizienter Software liefern.

Es gibt verschiedene Tools zur Messung von Energieverbrauch von Software, dazu ist auch das Mikromodul „CO₂-Tools“ geplant.

hier fehlen noch Quellen[?]

Die Messung des Energieverbrauchs stellt eine Herausforderung dar, die verschiedene Ansätze erfordert. Die direkte Messung des Stromverbrauchs an der Steckdose ist eine Möglichkeit, jedoch kann sie nicht immer die genaue Menge des Verbrauchs bestimmen, insbesondere bei batteriebetriebenen Geräten. Hardware-basierte Tests können kostspielig und aufwändig sein, daher bieten Software-Tools eine alternative Möglichkeit zur Überwachung des Energieverbrauchs. Verschiedene Überwachungstools, wie JoularX und PowerJoular⁶ [23], bieten Schnittstellen zur Messung des Energieverbrauchs. Andere Tools, wie der Software-Footprint⁷ nutzen Prozessstatistiken, und Intels PowerGadget⁸ bietet Funktionen zur Integration in Code-Abschnitte. Diese Tools müssen auf die spezifischen Bedürfnisse und die verfügbare Hardware der Nutzer abgestimmt werden. Die Komplexität der Messung wird durch Faktoren wie die Auslastung von Hintergrundprogrammen erhöht, die nicht direkt zur laufenden Applikation gehören, aber dennoch den Energieverbrauch beeinflussen können. Dies unterstreicht die Wichtigkeit, den Gesamtbetrieb auf der Hardware zu berücksichtigen und bei Bedarf zu reduzieren, um genaue Messungen zu ermöglichen.

⁶siehe <https://www.nouredine.org/research/joular/joularjx>

⁷siehe <https://github.com/oekoftware/softwarefootprint>

⁸siehe <https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/articles/tool/power-gadget.html>

Energieeffizienz bezieht sich auf die verbrauchte Energie eines Systems [24] und definiert sie durch die minimale Menge an Energie, die das System benötigt um eine Aufgabe auszuführen. Laufzeiteffizienz bezieht sich auf die Geschwindigkeit und Leistung von Computersystemen, die Komplexität von Algorithmen und die Qualität der Implementierung. In der historischen Betrachtung der Informatik war die Laufzeiteffizienz von Algorithmen aufgrund begrenzter CPU-Kapazitäten und Speicherplatz ein zentrales Anliegen. Diese Priorität führte zur Entwicklung von Algorithmen, die primär auf minimale Laufzeit ausgerichtet waren. Die Frage ist nun, ob es einen Zusammenhang zwischen Energieeffizienz und Laufzeiteffizienz gibt.

Die Untersuchung der Korrelation zwischen Energieverbrauch und Laufzeit ist Gegenstand aktueller Forschung. Manche Arbeiten [25, 26, 27] deuten darauf hin, dass in vielen Fällen eine starke Korrelation besteht, was impliziert, dass energieeffiziente Software oft auch laufzeiteffizient ist. Falls es einen direkten Zusammenhang zwischen Energieeffizienz und Performance gibt könnte eine Laufzeitmessung ausreichend sein und legt nahe, dass die Fokussierung auf Laufzeiteffizienz in der Informatik indirekt auch zur Energieeffizienz beiträgt.

Andre Arbeiten [28, 29], weisen keine direkte Proportionalität zwischen verbesserter Laufzeit und verringertem Energieverbrauch. Eine Verbesserung in der Laufzeiteffizienz bedeutet nicht zwangsläufig eine Verbesserung in der Energieeffizienz und umgekehrt. Falls kein direkter Zusammenhang besteht sind unabhängige Messungen des Energieverbrauchs erforderlich.

9 Experiment

Verschiedene Ansätze zur Messung des Energieverbrauchs sollen von den Teilnehmenden zusammengetragen werden. Diese Methoden haben jeweils ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Man kann aus diesen verschiedenen Ansätzen zu wählen, da eine standardisierte Methode unter den aktuellen Bedingungen schwierig zu etablieren ist. Dieses Experiment erfordert die Entdeckung und Erprobung neuer Tools und Methoden, um die Energieeffizienz effektiv zu messen. Die Teilnehmenden sollen ermutigt werden, eigene Recherchen durchzuführen und möglicherweise bessere Lösungen zu finden.

Das Ziel des Experiments (siehe auch AnhangA) ist es, die Energieverbrauch messbarer zu machen und einen Vergleich zwischen Laufzeit und Energieverbrauch zu ermöglichen, ohne dass der Aufwand zu groß wird. Die Ergebnisse sollen in Form von Tabellen oder CSV-Dateien festgehalten werden, um eine statistische Analyse, den zu ermöglichen.

Um die Energieeffizienz zu ermitteln und den Vergleich zwischen Laufzeit und Energieverbrauch durchzuführen, können verschiedene Aufgaben in Betracht gezogen werden, beispielsweise kann die Messung des Energieverbrauchs erfolgen anhand von Aufgaben mit dem Kruskal-Algorithmus zur Berechnung des minimalen Spannbaums oder dem Hierholzer-Algorithmus zur Berechnung eines Eulerkreises A. Dieser Schritt markiert den Anfang der Bemühungen um CO₂-effiziente Softwareentwicklung. Die Evaluierung erfolgt durch JUNIT-

Tests, in denen auch den Energieverbrauch und die Laufzeit gemessen wird. Um die Ergebnisse systematisch zu erfassen, wird eine Tabelle in Form einer CSV-Datei erstellt. Diese Tabelle umfasst Spalten für unterschiedlich große Datensätze, die verwendete Hardware, die Entwicklungsumgebung (IDE) und die Version von Java. In Excel kann dann die Korrelation zwischen zwei Datensätzen basierend auf dem Pearson-Korrelationskoeffizienten, der die lineare Beziehung zwischen zwei Datenreihen misst.

10 Computer Science for Future

Die Initiative „Computer Science for Future“ setzt sich für Initiativen im Bereich Klimaschutz und Nachhaltigkeit aus der Perspektive der Informatik ein. Dabei streben wir an, diese Initiativen in verschiedene Bereiche zu integrieren:

- Integration in das Curriculum, um Studierende mit relevanten Kenntnissen auszustatten.
- Zusammenarbeit mit Industrie- und Gesellschaftspartnern, um praxisnahe Lösungen zu entwickeln.
- Integration in die Forschung, um innovative Ansätze für nachhaltige Technologien zu erforschen.
- Implementierung in die organisatorischen Abläufe, um einen ganzheitlichen Ansatz zu gewährleisten.

Getragen wird diese Initiative von engagierten Personen, darunter Studierende, Mitarbeiterinnen und Professorinnen, die den Wandel hin zu nachhaltigen Praktiken in der Informatik vorantreiben möchten.

Literatur

- [1] Digitalisation - Energy System. <https://www.iea.org/energy-system/decarbonisation-enablers/digitalisation>.
- [2] iea. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach – Analysis. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>, 2023.
- [3] Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach - 2023 Update.
- [4] Katherine Calvin, Dipak Dasgupta, and etal. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

- Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>, July 2023. Edition: First.
- [5] Digitalisation - Energy System. <https://www.iea.org/energy-system/decarbonisation-enablers/digitalisation>.
- [6] Reinhard Grünwald and Claudio Caviezel. Energy consumption of ICT infrastructure, 2022. ISSN: 2364-2645.
- [7] Reinhard Grünwald and Claudio Caviezel. Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur. Endbericht zum TA-Projekt. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000151164>, 2022. ISSN: 2364-2602.
- [8] Marina Köhn, Jens Gröger, and Lutz Stobbe. *Energie- und Ressourceneffizienz digitaler Infrastrukturen: Ergebnisse des Forschungsprojektes „Green Cloud-Computing“*. Umweltbundesamt, September 2020.
- [9] Infografik: Der CO₂-Fußabdruck unseres digitalen Lebens. <https://de.statista.com/infografik/27216/co2-emissionen-durch-informationstechnik-in-deutschland-pro-kopf>, April 2022.
- [10] Digitale Leichtigkeit. <https://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/digitale-leichtigkeit/>.
- [11] San Murugesan. Harnessing Green IT: Principles and Practices. *IT Professional*, 10(1):24–33, January 2008. Conference Name: IT Professional.
- [12] Mueen Uddin and Azizah Abdul Rahman. Energy efficiency and low carbon enabler green IT framework for data centers considering green metrics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6):4078–4094, August 2012.
- [13] Mavinder Singh and Anup Singh Sidhu. GREEN COMPUTING. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 7(6), 2016. Number: 6.
- [14] Showmick Guha Paul, Arpa Saha, Mohammad Shamsul Arefin, Touhid Bhuiyan, Al Amin Biswas, Ahmed Wasif Reza, Naif M. Alotaibi, Salem A. Alyami, and Mohammad Ali Moni. A Comprehensive Review of Green Computing: Past, Present, and Future Research. *IEEE Access*, 11:87445–87494, 2023. Conference Name: IEEE Access.
- [15] Pauline Brouillard. Deploying Digital Sobriety, July 2021.
- [16] Françoise Berthoud, Philippe Bihouix, Pierre Fabre, and et.al. "Lean ICT: Towards Digital Sobriety: Our new report. <https://theshiftproject.org/en/article/lean-ict-our-new-report/0>, March 2019.

- [17] Tilman Santarius, Jan C. T. Bieser, Vivian Frick, Mattias Höjer, Maike Gossen, Lorenz M. Hilty, Eva Kern, Johanna Pohl, Friederike Rohde, and Steffen Lange. Digital sufficiency: conceptual considerations for ICTs on a finite planet. *Annals of Telecommunications*, 78(5):277–295, June 2023.
- [18] Our third decade of climate action: Realizing a carbon-free future. <https://www.gstatic.com/gumdrop/sustainability/247-carbon-free-energy.pdf>, September 2020.
- [19] Chien-Sheng Yang, Chien-Chun Huang-Fu, and I-Kang Fu. Carbon-Neutralized Task Scheduling for Green Computing Networks. In *GLOBE-COM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference*, pages 4824–4829, December 2022. ISSN: 2576-6813.
- [20] Philipp Wiesner, Ilja Behnke, Dominik Scheinert, Kordian Gontarska, and Lauritz Thamsen. Let’s wait awhile: how temporal workload shifting can reduce carbon emissions in the cloud. In *Proceedings of the 22nd International Middleware Conference*, Middleware ’21, pages 260–272, New York, NY, USA, December 2021. Association for Computing Machinery.
- [21] Dennis Abts, Michael R. Marty, Philip M. Wells, Peter Klausler, and Hong Liu. Energy proportional datacenter networks. In *Proceedings of the 37th annual international symposium on Computer architecture*, ISCA ’10, pages 338–347, New York, NY, USA, June 2010. Association for Computing Machinery.
- [22] Kuangyu Zheng, Xiaorui Wang, and Jia Liu. Distributed Traffic Flow Consolidation for Power Efficiency of Large-Scale Data Center Network. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 10(2):996–1007, April 2022.
- [23] Adel Nouredine. Powerjoular and joularjx: Multi-platform software power monitoring tools. In *18th International Conference on Intelligent Environments (IE2022)*, Biarritz, France, Jun 2022.
- [24] David J. Brown and Charles Reams. Toward energy-efficient computing. *Commun. ACM*, 53(3):50–58, March 2010.
- [25] Rui Pereira, Marco Couto, Francisco Ribeiro, Rui Rua, Jácome Cunha, João Paulo Fernandes, and João Saraiva. Energy efficiency across programming languages: how do energy, time, and memory relate? In *Proceedings of the 10th ACM SIGPLAN International Conference on Software Language Engineering*, SLE 2017, pages 256–267, New York, NY, USA, October 2017. Association for Computing Machinery.
- [26] Tomofumi Yuki and Sanjay Rajopadhye. Folklore Confirmed: Compiling for Speed \$\$\$ Compiling for Energy. In Călin Caşcaval and Pablo Montesinos, editors, *Languages and Compilers for Parallel Computing*, volume 8664, pages 169–184. Springer International Publishing, Cham, 2014. Series Title: Lecture Notes in Computer Science.

- [27] Gustavo Pinto and Fernando Castor. Energy efficiency: a new concern for application software developers. *Communications of the ACM*, 60(12):68–75, November 2017.
- [28] Anne E. Trefethen and Jeyarajan Thiyagalingam. Energy-aware software: Challenges, opportunities and strategies. *Journal of Computational Science*, 4(6):444–449, November 2013.
- [29] Luís Gabriel Lima, Francisco Soares-Neto, Paulo Lieuthier, Fernando Castor, Gilberto Melfe, and João Paulo Fernandes. Haskell in Green Land: Analyzing the Energy Behavior of a Purely Functional Language. In *2016 IEEE 23rd International Conference on Software Analysis, Evolution, and Reengineering (SANER)*, volume 1, pages 517–528, March 2016.

A Experiment zu Laufzeit und Energieverbrauch

Die folgenden Aufgaben umfassen die Implementierung von Algorithmen aus dem Bereich der Graphentheorie und Nutzung der Library `GraphStream`⁹.

Eulerkreise

Der Algorithmus von Hierholzer (z.B in Wikipedia) liefert für einen ungerichteten, Eulerschen Graphen einen Eulerkreis.

Die Aufgabe umfasst folgende Teile:

1. Bitte implementieren und testen Sie die den Hierholzer-Algorithmus zur Eulerkreissuche:
 - (a) Entwerfen Sie bitte Junit-Tests erst für kleine, gespeicherte Graphen (sowohl Eulersche Graphen als auch andere). Prüfen Sie, ob die gegebene Kantenfolge ein Eulerkreis ist.
 - (b) Erzeugen Sie dann randomisierte, ungerichtete Eulergraphen zum Testen und Messen.

Der folgende Algorithmus erzeugt einen zusammenhängenden Multi-Graphen $G = (V, E)$, der eulersch ist und n Knoten und m Kanten hat. Dabei sind unzusammenhängende Knoten, Schlingen und Multikanten erlaubt.

```
createEul_MultiGraph(n:int, m:int)                %% n ≥ 1
ungerichteten Multigraphen  $G = (V, E)$  initialisieren mit:
 $V = \{v_1, \dots, v_n\}$                                 %% n Knoten
 $E = \{\}$                                                 %% Kanten
select_randomly cur ∈ V

%% einen Knoten  $next$  zufällig wählen und Kante zwischen
%% aktuellem  $cur$  und nächstem  $next$  Knoten einfügen
for  $2 \leq i \leq m$  {
    select_randomly next ∈ V
     $E := E \cup edge(cur, next)$ 
    cur := next
}
 $E := E \cup edge(cur, start)$ 
return G
```

⁹siehe <https://graphstream-project.org/>

2. Laufzeit- und Energieverbrauchsmessung

Für die Messung erzeugen Sie bitte 3 Graphen
mit 100 Knoten & 3.000 Kanten,
mit 1.000 Knoten & 400.000 Kanten und
mit 10.000 Knoten & 2.000.000 Kanten.

Dann lassen Sie Ihre Algorithmen mehrfach darauf laufen.

Für jeden der drei Graphen erstellen Sie bitte eine Tabelle, z.B. CSV-Datei, in der die Kantenanzahl, Ihre Hardware und Ihr Messwerkzeug geschrieben werden, in etwa so:

Hardware, IDE, Java-Version, Tool für die Messung, Knotenanzahl, Kantenanzahl	
Laufzeit	Energie
...	...

Danach werden 13 Durchläufe, von denen nur die letzten 10 ausgewertet werden, gestartet und dann für jeden Durchlauf (ab dem 4.) die Zeit in Millisekunden und der Energieverbrauch in Joule (oder was auch immer das Messwerkzeug raus gibt) in die CSV-Datei geschrieben.

3. Statistische Analyse in Excel

Wählen Sie die Zelle aus, in der Sie den Korrelationskoeffizienten berechnen möchten. Verwenden Sie die Formel `=KORREL(A:4:A14, B4:B13)`, wobei die Spalten durch die Felder eingegeben werden. Nach Eingabe der Formel drücken Sie Enter. Die Zelle wird nun den Korrelationskoeffizienten anzeigen. Die Werte des Pearson-Korrelationskoeffizienten liegen zwischen -1 und 1. Ein Wert von 1 zeigt eine perfekte positive lineare Beziehung an, -1 eine perfekte negative lineare Beziehung, und 0 bedeutet keine lineare Beziehung.

Spannbaum

Es soll der Kruskal-Algorithmus aus GraphStream genutzt werden, so dass der minimale Spannbaum und dessen Kantengewichtssumme berechnet werden.

Die Aufgabe umfasst folgende Teile:

1. Benutzen Sie den Kruskal-Algorithmus aus Graphstream,
2. und für die Generierung beliebiger, gewichteter Graphen:

```
createWeightedMultiGraph(n:int, m:int, min:int, max:int)
%% 1 ≤ n ≤ m und min,max Intervall für die Kantengewichte
ungerichteten, zusammenhängenden Multigraphen G = (V, E)
initialisieren mit:
U = {v1, ..., vn}           %% n ungenutzte Knoten
V = {}                       %% n Knoten
E = {}                       %% Kanten

select_randomly cur ∈ U
U := U \ {cur}
V := V ∪ {cur}               %% cur von U nach V schieben

%% je einen Knoten nxt ∈ V, cur ∈ U zufällig wählen,
%% Kante dazwischen, cur von U nach V schieben
%% ergibt einen Spannbaum
for 1 ≤ i ≤ n - 1{
    select_randomly nxt ∈ V
    select_randomly cur ∈ U
    U := U \ {cur}
    V := V ∪ {cur}
    select_randomly min ≤ weight ≤ max
    E := E ∪ edge(cur, nxt, weight)
    cur := nxt
}

%% restliche Kanten einfügen
for n < i ≤ m{
    select_randomly cur ∈ V
    select_randomly nxt ∈ V
    select_randomly min ≤ weight ≤ max
    E := E ∪ edge(cur, nxt, weight)
}
return G
```

3. Laufzeit- und Energieverbrauchsmessung
wie oben
4. Statistische Analyse in Excel
wie oben