

Energieeffizienz im digitalen Alltag und beim Coding

Mikromodul

Julia Padberg

mit Unterstützung von Nina Godenrath, Haron Nazari, Aaron Sielaff und Emirhan Yildiz

Computer Science for Future

Juli 2024

Gliederung

Stand der globalen Energietransformation

CO₂ und IT

Digitaler CO₂-Fußabdruck im Alltag

(CO₂-)effiziente Software

Experiment

Ausblick

Computer Science for Future

Stand: Net Zero Roadmap

iea (International Energy Agency)[1]

- ▶ saubere Energietechnologien
 - ▶ verändern die Aussichten für Emissionen
 - ▶ durch politische Maßnahmen, expandierende Märkte und sinkende Kosten
 - ▶ selbst unter den derzeitigen politischen Rahmenbedingungen

Stand: Net Zero Roadmap

iea (International Energy Agency)[1]

- ▶ saubere Energietechnologien
 - ▶ verändern die Aussichten für Emissionen
 - ▶ durch politische Maßnahmen, expandierende Märkte und sinkende Kosten
 - ▶ selbst unter den derzeitigen politischen Rahmenbedingungen
- ▶ Verringerung der Emissionen voraussichtlich um **7,5 Gt** in 2030
 - ▶ bezogen auf das Basisszenario vor Paris aus dem Jahr 2015
 - ▶ Szenario STEPS (Stated Policies Scenario)
 - ▶ 5 Gt Ausbau der Photovoltaik und der Windkraft und
 - ▶ fast 1 Gt durch Elektrofahrzeuge

Stand: Net Zero Roadmap

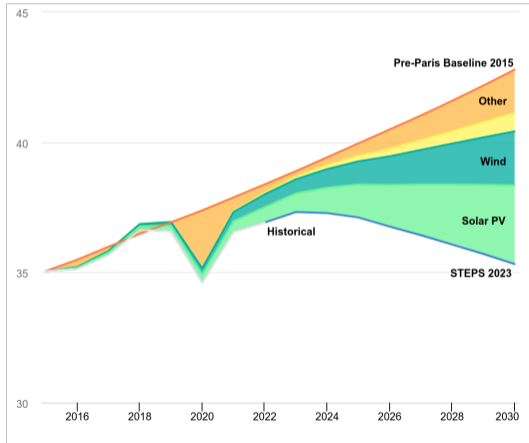
iea (International Energy Agency)[1]

- ▶ saubere Energietechnologien
 - ▶ verändern die Aussichten für Emissionen
 - ▶ durch politische Maßnahmen, expandierende Märkte und sinkende Kosten
 - ▶ selbst unter den derzeitigen politischen Rahmenbedingungen
- ▶ Verringerung der Emissionen voraussichtlich um **7,5 Gt** in 2030
 - ▶ bezogen auf das Basisszenario vor Paris aus dem Jahr 2015
 - ▶ Szenario STEPS (Stated Policies Scenario)
 - ▶ 5 Gt Ausbau der Photovoltaik und der Windkraft und
 - ▶ fast 1 Gt durch Elektrofahrzeuge
- ▶ die prognostizierte Erwärmung von 2,4 °C im Jahr 2100 **besorgniserregend** hoch
 - ▶ unter den derzeitigen politischen Rahmenbedingungen
 - ▶ **aber** um 1 °C niedriger liegt als vor dem Pariser Abkommen im Jahr 2015.

Stand: Net Zero Roadmap

Globale CO₂-Emissionen des Energiesektors

iea (International Energy Agency)[1]



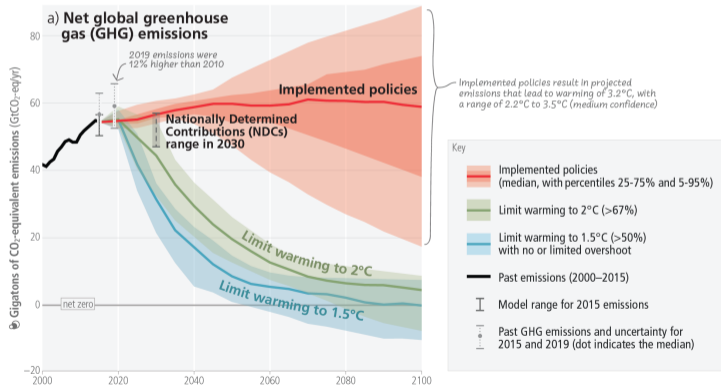
► Infos auf Folie 54

AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023

<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> [2]

Limiting warming to 1.5°C and 2°C involves rapid, deep and in most cases immediate greenhouse gas emission reductions

Net zero CO₂ and net zero GHG emissions can be achieved through strong reductions across all sectors



Gliederung

Stand der globalen Energietransformation

CO₂ und IT

Digitaler CO₂-Fußabdruck im Alltag

(CO₂-)effiziente Software

Experiment

Ausblick

Computer Science for Future

Auswirkungen digitaler Technologien

Digitale Technologien verursachen 2% der energiebezogenen Treibhausgasemissionen (THG)

- ▶ direkte Auswirkungen auf Energieverbrauch und Emissionen
 - ▶ rund 330 Mt CO_{2e} in 2020
 - ▶ durch Rechenzentren, Datenübertragungsnetze und vernetzten Geräte
 - ▶ 0,9% der energiebezogenen THG-Emissionen

Auswirkungen digitaler Technologien

Digitale Technologien verursachen 2% der energiebezogenen Treibhausgasemissionen (THG)

- ▶ direkte Auswirkungen auf Energieverbrauch und Emissionen
 - ▶ rund 330 Mt CO_{2e} in 2020
 - ▶ durch Rechenzentren, Datenübertragungsnetze und vernetzten Geräte
 - ▶ 0,9% der energiebezogenen THG-Emissionen
- ▶ geringe Steigerung der Emissionen seit 2010
 - ▶ trotz der schnell wachsenden Nachfrage
 - ▶ Verbesserungen der Energieeffizienz,
 - ▶ Kauf von erneuerbaren Energien durch IKT-Unternehmen
 - ▶ umfassendere Dekarbonisierung der Stromnetze

Auswirkungen digitaler Technologien

Digitale Technologien verursachen 2% der energiebezogenen Treibhausgasemissionen (THG)

- ▶ direkte Auswirkungen auf Energieverbrauch und Emissionen
 - ▶ rund 330 Mt CO_{2e} in 2020
 - ▶ durch Rechenzentren, Datenübertragungsnetze und vernetzten Geräte
 - ▶ 0,9% der energiebezogenen THG-Emissionen
- ▶ geringe Steigerung der Emissionen seit 2010
 - ▶ trotz der schnell wachsenden Nachfrage
 - ▶ Verbesserungen der Energieeffizienz,
 - ▶ Kauf von erneuerbaren Energien durch IKT-Unternehmen
 - ▶ umfassendere Dekarbonisierung der Stromnetze
- ▶ Aber Halbierung der Emissionen bis 2030 für Netto-Null-Emissionen bis 2050 (NZE) Szenario

<https://www.iea.org/energy-system/decarbonisation-enablers/digitalisation#tracking>

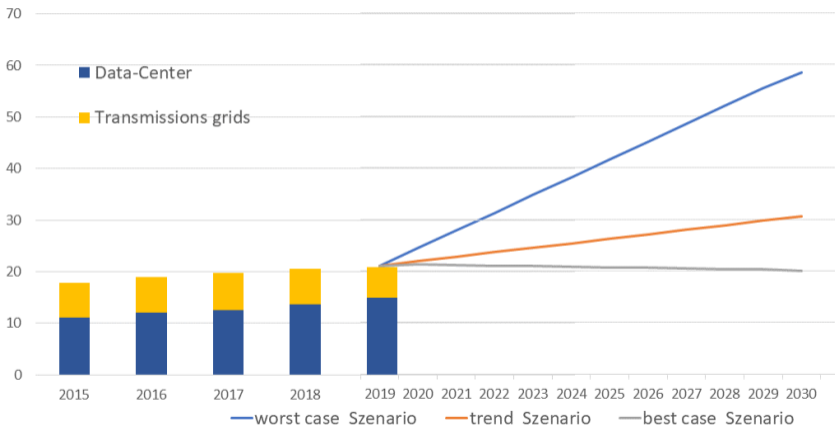
Auswirkungen digitaler Technologien

Digitale Technologien verursachen 2% der energiebezogenen Treibhausgasemissionen (THG)

- ▶ direkte Auswirkungen auf Energieverbrauch und Emissionen
 - ▶ rund 330 Mt CO_{2e} in 2020
 - ▶ durch Rechenzentren, Datenübertragungsnetze und vernetzten Geräte
 - ▶ 0,9% der energiebezogenen THG-Emissionen
- ▶ geringe Steigerung der Emissionen seit 2010
 - ▶ trotz der schnell wachsenden Nachfrage
 - ▶ Verbesserungen der Energieeffizienz,
 - ▶ Kauf von erneuerbaren Energien durch IKT-Unternehmen
 - ▶ umfassendere Dekarbonisierung der Stromnetze
- ▶ Aber **Halbierung der Emissionen bis 2030** für Netto-Null-Emissionen bis 2050 (NZE) Szenario

<https://www.iea.org/energy-system/decarbonisation-enablers/digitalisation#tracking>

Energieverbrauch IT in Deutschland [3] S.2



▶ Infos auf Folie 54

Gliederung

Stand der globalen Energietransformation

CO₂ und IT

Digitaler CO₂-Fußabdruck im Alltag

(CO₂-)effiziente Software

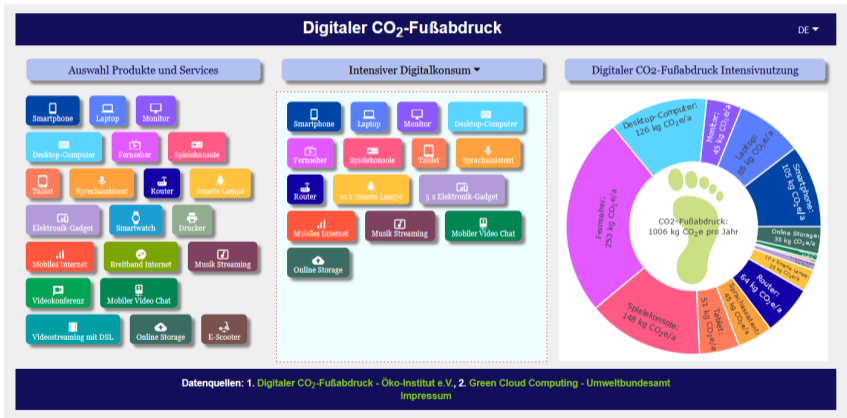
Experiment

Ausblick

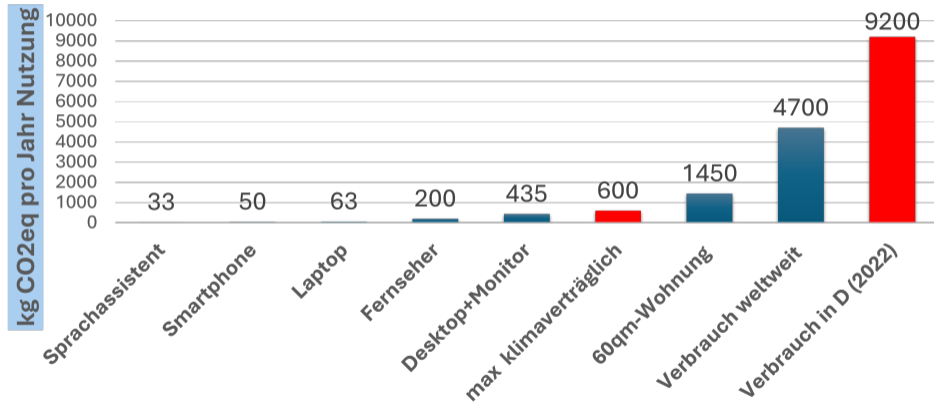
Computer Science for Future

Wie sieht mein digitaler CO₂-Fußabdruck aus?

Jeder für sich selbst hier: <https://www.digitalcarbonfootprint.eu/>



CO_{2e}-Emissionen für Herstellung digitaler Endgeräte



► Infos auf Folie 54

CO_{2e}-Emission für digitale Aktionen



► Infos auf Folie 54

Gliederung

Stand der globalen Energietransformation

CO₂ und IT

Digitaler CO₂-Fußabdruck im Alltag

(CO₂-)effiziente Software

Experiment

Ausblick

Computer Science for Future

Was ist kohlendioxid- (CO₂-) effiziente Software

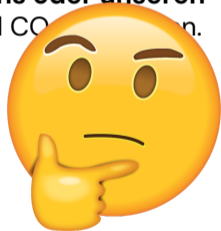
oder grüne, nachhaltige, ressourcen-effiziente....SW

Im Softwarebereich besteht unsere Rolle bei der Lösung des Klimaproblems wenigstens in der Entwicklung kohlendioxid-effizienter Anwendungen. Kohlendioxid-Effizienz bedeutet, Anwendungen zu entwickeln, die uns oder unseren Nutzern den gleichen Mehrwert bieten, aber weniger Kohlendioxid CO₂ ausstoßen.

Was ist kohlendioxid- (CO₂-) effiziente Software

oder grüne, nachhaltige, ressourcen-effiziente....SW

Im Softwarebereich besteht unsere Rolle bei der Lösung des Klimaproblems **wenigstens** in der Entwicklung kohlendioxid-effizienter Anwendungen. Kohlendioxid-Effizienz bedeutet, Anwendungen zu entwickeln, **die uns oder unseren Nutzern den gleichen Mehrwert bieten**, aber weniger Kohlendioxid CO₂ emittieren.



Digitale Suffizienz ([4])

Grundlage dafür, wie IKT zum grundlegenden ökologischen Wandels beitragen kann

- ▶ **Hardware-suffizienz:**
weniger Geräte produzieren
ihr absoluter Energiebedarf so gering wie möglich

Digitale Suffizienz ([4])

Grundlage dafür, wie IKT zum grundlegenden ökologischen Wandels beitragen kann

- ▶ **Hardwareeffizienz:**
weniger Geräte produzieren
ihr absoluter Energiebedarf so gering wie möglich
- ▶ **Softwareeffizienz:**
Datenverkehr und die Hardwareauslastung während der Anwendung so gering wie möglich

Digitale Suffizienz ([4])

Grundlage dafür, wie IKT zum grundlegenden ökologischen Wandels beitragen kann

- ▶ **Hardwareeffizienz:**
weniger Geräte produzieren
ihr absoluter Energiebedarf so gering wie möglich
- ▶ **Softwareeffizienz:**
Datenverkehr und die Hardwareauslastung während der Anwendung so gering wie möglich
- ▶ **Nutzereffizienz:**
digitale Geräte sparsam einsetzen
IKT in einem nachhaltigen Lebensstil nutzen

Digitale Suffizienz ([4])

Grundlage dafür, wie IKT zum grundlegenden ökologischen Wandels beitragen kann

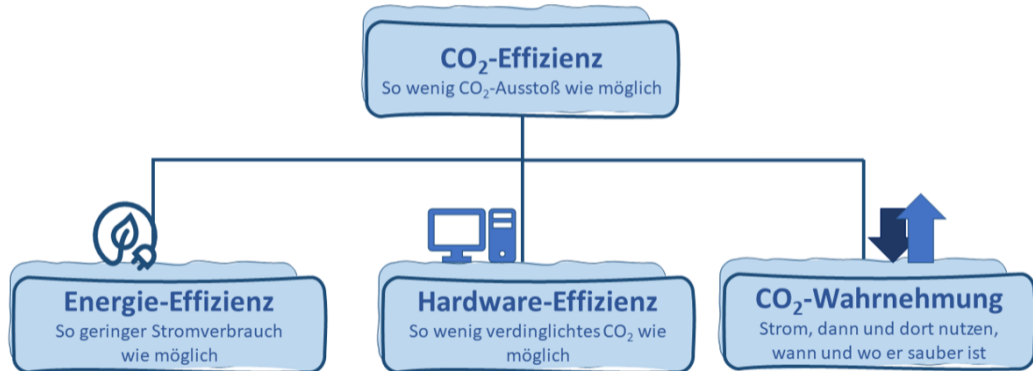
- ▶ **Hardwareeffizienz:**
weniger Geräte produzieren
ihr absoluter Energiebedarf so gering wie möglich
- ▶ **Softwareeffizienz:**
Datenverkehr und die Hardwareauslastung während der Anwendung so gering wie möglich
- ▶ **Nutzereffizienz:**
digitale Geräte sparsam einsetzen
IKT in einem nachhaltigen Lebensstil nutzen
- ▶ **Ökonomische Suffizienz:**
Digitalisierung für Übergang zu einer Wirtschaft mit Wirtschaftswachstum nicht mehr als primäres Ziel, ausreichende Produktion und ausreichenden Verbrauch innerhalb der planetarischen Grenzen

CO₂-effiziente Software

- ▶ ressourcenschonende und
- ▶ *energie-effiziente Softwareprodukte*
- ▶ auf älterer Hardware laufend und
- ▶ auf älterer Hardware zu aktualisieren
- ▶ mit einem hohen Maß an Transparenz und Autonomie

CO₂-effiziente Software

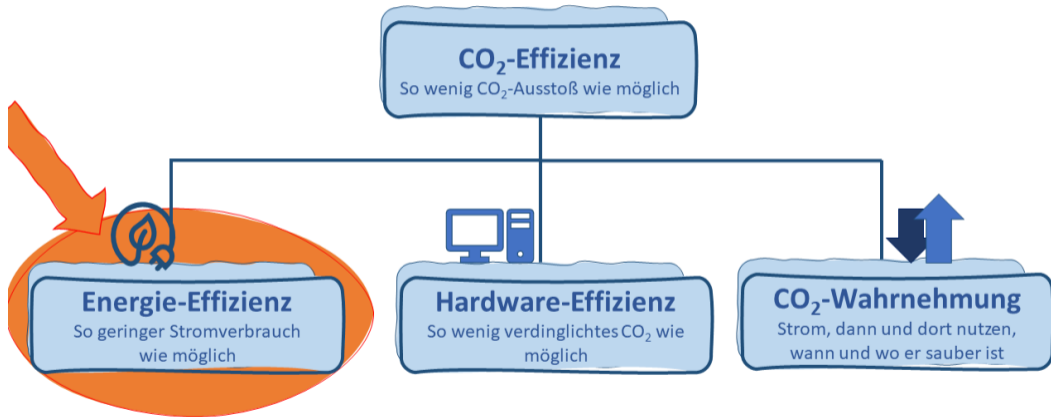
[https://learn.greensoftware.foundation/measurement\[5\]](https://learn.greensoftware.foundation/measurement[5])



► Infos auf Folie 54

CO₂-effiziente Software

[https://learn.greensoftware.foundation/measurement\[5\]](https://learn.greensoftware.foundation/measurement[5])



► Infos auf Folie 54

CO₂-effiziente Software

<https://learn.greensoftware.foundation/>

- ▶ CO₂-Effizienz: so wenig CO₂ wie möglich
 - ▶ Energieeffizienz: möglichst wenig Strom
 - ▶ Hardware-Effizienz: mit möglichst wenig (neuer) Hardware
 - ▶ CO₂-Wahrnehmung: Strom mit der geringsten CO₂-Emission

CO₂-effiziente Software

<https://learn.greensoftware.foundation/>

- ▶ CO₂-Effizienz: so wenig CO₂ wie möglich
 - ▶ **Energieeffizienz: möglichst wenig Strom**
 - ▶ Hardware-Effizienz: mit möglichst wenig (neuer) Hardware
 - ▶ CO₂-Wahrnehmung: Strom mit der geringsten CO₂-Emission
- ▶ Energieproportionalität: Maximierung der Energieeffizienz der Hardware
- ▶ Networking: Reduktion der Datenmenge und der Entfernung im Netzwerk
- ▶ Demand Shaping: CO₂-bewusste Anwendungen bevorzugen
- ▶ **Messungen: Was man nicht messen kann, kann man auch nicht verbessern.**
- ▶ Verpflichtung zum Klimaschutz: Verstehen und umsetzen von Maßnahmen zur CO₂-Reduktion

Gliederung

Stand der globalen Energietransformation

CO₂ und IT

Digitaler CO₂-Fußabdruck im Alltag

(CO₂-)effiziente Software

Experiment

Ausblick

Computer Science for Future

Messung

<https://learn.greensoftware.foundation/measurement>

Idee

What you can't measure, you can't improve.

Messung

<https://learn.greensoftware.foundation/measurement>

Idee

What you can't measure, you can't improve.

Es gibt im groben drei Parameter, die – unabhängig von der Infrastruktur – die die CO₂-Emissionen beeinflussen:

- ▶ Wie viel wird Energie verbraucht?
 - ▶ Messungen durch spezifische Werkzeuge,
 - ▶ wie JoularJX, turbostat etc
- ▶ Wie ist der Energie-Mix (erneuerbar, fossil)
 - ▶ der aktuelle oder auch der durchschnittliche
- ▶ Wie viel Hardware wird benötigt?

Messung

<https://learn.greensoftware.foundation/measurement>

Idee

What you can't measure, you can't improve.

Es gibt im groben drei Parameter, die – unabhängig von der Infrastruktur – die die CO₂-Emissionen beeinflussen:

- ▶ **Wie viel wird Energie verbraucht?**
 - ▶ Messungen durch spezifische Werkzeuge,
 - ▶ wie JoularJX, turbostat etc
- ▶ Wie ist der Energie-Mix (erneuerbar, fossil)
 - ▶ der aktuelle oder auch der durchschnittliche
- ▶ Wie viel Hardware wird benötigt?

Laufzeit- und Energieeffizienz

Zusammenhang und Unterschiede

- ▶ Laufzeiteffizienz: Geschwindigkeit und Leistung von Computersystemen
 Komplexität von Algorithmen
 Qualität der Implementierung
- ▶ Energieeffizienz: Verbrauchte Energie eines Systems [6]
- ▶ Keine direkte Proportionalität??
 Verbesserte Laufzeiteffizienz bedeutet nicht unbedingt verbesserte Energieeffizienz und umgekehrt?
 - Ja Direkter Zusammenhang zwischen Energieeffizienz und Performance [7]–[9]
 dann reicht vermutlich die Laufzeitmessung
 - Nein Kein direkter Zusammenhang zwischen Energieeffizienz und Performance [10], [11]
 dann sind neuartige Messungen nötig

Laufzeit- und Energieeffizienz

Zusammenhang und Unterschiede

- ▶ Laufzeiteffizienz: Geschwindigkeit und Leistung von Computersystemen
Komplexität von Algorithmen
Qualität der Implementierung

- ▶ Energieeffizienz: Verbrauchte Energie eines Systems [6]

- ▶ **Keine direkte Proportionalität??**

Verbesserte Laufzeiteffizienz bedeutet nicht unbedingt verbesserte Energieeffizienz und umgekehrt?

Ja Direkter Zusammenhang zwischen Energieeffizienz und Performance [7]–[9]
dann reicht vermutlich die Laufzeitmessung

Nein Kein direkter Zusammenhang zwischen Energieeffizienz und Performance [10], [11]
dann sind neuartige Messungen nötig

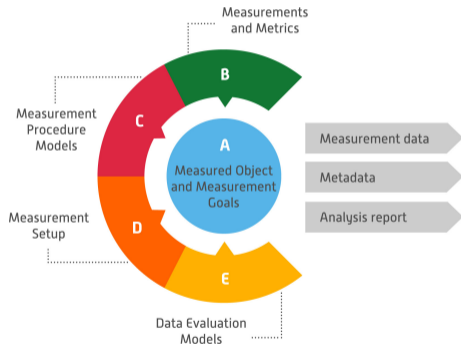
Ressourcen- und energieeffizienten Software [12]

- ▶ junges Forschungsfeld
- ▶ Unsicherheiten und Unklarheiten behindern eigene Messungen
- ▶ die durch Software verursachten Umweltauswirkungen werden in der Praxis nur selten berücksichtigt
- ▶ unterschiedliche Methoden, Werkzeuge, Leitfäden usw. entwickelt
- ▶ aber kein umfassender Forschungsrahmen
- ▶ keine standardisierten Umsetzung von Messungen in der Industrie
- ▶ Vorschläge, zB GSMR in [12]

Ressourcen- und energieeffizienten Software [13]

Green Software Measurement Model (GSMR)

- ▶ generisches Referenzmodell für ein breites Spektrum von Software
- ▶ das ein Messrahmen, der Methoden, Werkzeuge usw. integriert
- ▶ für die Kategorisierung, Anpassung und Entwicklung von Methoden für spezifische Messeinstellungen
- ▶ integriert die Ergebnisse von 12 Gruppen von Forschern und Praktikern.



▶ Infos auf Folie 54

Experiment: Energieeffizienz

- ▶ Mögliche Aufgaben
 - Feststellung der Energieeffizienz
 - Vergleich Laufzeit vs. Energieeffizienz
 - ▶ z.B. TSP mit Minimaler-Spannbaum-Heuristik
 - ▶ z.B. Eulerkreise
- ▶ erster Schritt zur ressourceneffizienten Softwareentwicklung
- ▶ JUNIT-Tests für die Messung
 - ▶ des Energieverbrauchs
 - ▶ der Laufzeit
- ▶ Erstellung einer Tabelle (csv-Datei) mit
 - ▶ Spalten unterschiedlich großen Datensätzen
 - ▶ Hardware, IDE, Java-Version
 - ▶ Korrelationstest (zB in Excel)

Experiment: Energieeffizienz

- ▶ Mögliche Aufgaben
 - Feststellung der Energieeffizienz
 - Vergleich Laufzeit vs. Energieeffizienz
 - ▶ z.B. TSP mit Minimaler-Spannbaum-Heuristik
 - ▶ z.B. **Eulerkreise**
- ▶ erster Schritt zur ressourceneffizienten Softwareentwicklung
- ▶ JUNIT-Tests für die Messung
 - ▶ des Energieverbrauchs
 - ▶ der Laufzeit
- ▶ Erstellung einer Tabelle (csv-Datei) mit
 - ▶ Spalten unterschiedlich großen Datensätzen
 - ▶ Hardware, IDE, Java-Version
 - ▶ Korrelationstest (zB in Excel)

Energiemessung von Software als Experiment

Vorteile der Software-Tools

- ▶ niedriger Kosten
- ▶ geringerer Aufwand
- ▶ detailliertere Informationen auf Prozessebene
- ▶ mehr Flexibilität und leichter skalierbar

Mögliche Tools:

- ▶ JoularJX, PowerJoular
- ▶ Softwarefootprint.py
- ▶ turbostat
- ▶ Hardware-Monitore
- ▶ Intel Power Gadget nicht mehr unterstützt

JoularJX

Energiemessung von und durch Software



Joular

- ▶ JoularJX ist ein Software-Energieüberwachungstool
- ▶ Hilfe für Softwareentwickler, um den Stromverbrauch ihrer Programme zu verstehen und zu analysieren

PowerJoular

Energiemessung von und durch Software

Power:Joular ⚡

- ▶ Überwachung des Stromverbrauchs des Computers mithilfe RAPL-Schnittstelle.
- ▶ für Linux (x86 und Raspberry Pis)
- ▶ Hardwareunterstützung zur Erfassung des Stromverbrauch

in GitHub: <https://github.com/joular/powerjoular>

Mehr Infos : <https://joular.github.io/powerjoular/>

[14]

Softwarefootprint.py

Energiemessung von und durch Software

Skript, das

- ▶ die Prozessstatistiken nach dem Vorkommen bestimmten Befehle durchsucht,
- ▶ deren CPU-Laufzeiten addiert,
- ▶ und daraus Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen der Software berechnet
- ▶ für den lokalen Computer.

in GitHub <https://github.com/oekoj/softwarefootprint>

turbostat

Energiemessung von und durch Software

turbostat <https://www.linux.org/docs/man8/turbostat.html>

- ▶ erzeugt Berichte über Prozessorfrequenz und Leerlaufstatistiken
- ▶ gibt Auskunft über X86-Prozessoren:
 - ▶ die Prozessortopologie,
 - ▶ die Frequenz,
 - ▶ die Idle-Power-State-Statistik,
 - ▶ die Temperatur und den Stromverbrauch

Hardware-Monitore

Energiemessung von und durch Software

- ▶ **HWMonitor** <https://www.cpuid.com/software/hwmonitor.html>
 - ▶ für Windows auf x86
 - ▶ ermöglicht die Messung des Gesamtstromverbrauchs eines Computers
 - ▶ ein Hardware-Überwachungsprogramm, für Spannungen, Temperaturen, Leistungen, Ströme, Lüftergeschwindigkeiten, Auslastungen, Taktfrequenzen
 - ▶ keine spezifischen Funktionen zur Überwachung einzelner Prozesse oder Programme.
- ▶ **Open Hardware Monitor** <https://openhardwaremonitor.org/>
 - ▶ funktioniert auf Windows und auf Linux mit Einschränkungen
da es dort teilweise weniger Sensorinformationen bereitstellt
 - ▶ ähnlich dem HWMonitor
 - ▶ ermöglicht primär die Messung des Gesamtstromverbrauchs eines Computers
 - ▶ keine spezifischen Funktionen zur Überwachung einzelner Prozesse oder Programme

Gliederung

Stand der globalen Energietransformation

CO₂ und IT

Digitaler CO₂-Fußabdruck im Alltag

(CO₂-)effiziente Software

Experiment

Ausblick

Computer Science for Future

Fazit

- ▶ Energieverbrauch durch IT ist erheblich
- ▶ (CO₂-) effiziente Software nötig
- ▶ Neues Forschungsgebiet: Messungen der Energieeffizienz von Software
- ▶ Eigene Messungen als Experiment möglich

Ausblick: Energieproportionalität [15]

- ▶ Verhältnis von Leistungsverbrauch zur nützlichen Arbeit
- ▶ Energieproportionalität als Brücke zwischen Zeit- und Energieeffizienz
- ▶ Einsatz Energieproportionalität
 - ▶ Verbesserte Energieeffizienz
 - ▶ Reduzierte Kosten
 - ▶ nicht für als Maßeinheit für Implementierungen sondern nur für gesamte Systeme sinnvoll

Ausblick: Energieproportionalität [15]

- ▶ Verhältnis von Leistungsverbrauch zur nützlichen Arbeit
- ▶ Energieproportionalität als Brücke zwischen Zeit- und Energieeffizienz
- ▶ Einsatz Energieproportionalität
 - ▶ Verbesserte Energieeffizienz
 - ▶ Reduzierte Kosten
 - ▶ **nicht für als Maßeinheit für Implementierungen**
sondern nur für gesamte Systeme sinnvoll

 **HAW
HAMBURG**

COMPUTER SCIENCE FOR FUTURE

CS4F Computer Science for Future

Initiativen des Klimaschutzes und der Nachhaltigkeit

(aus Sicht der Informatik)

- ▶ in das Curriculum,
- ▶ mit unseren Kontakten aus Industrie und Gesellschaft,
- ▶ in die Forschung und
- ▶ die Organisation zu integrieren.

Getragen von denen, die das wollen
Student*innen, Mitarbeiter*innen und Professor*innen

Veränderungsprozess in unterschiedlicher Granularität **CS4F** für

- ▶ Repräsentation, Information und Koordinierung
- ▶ Maßnahmen umsetzen und unterstützen
- ▶ Verstetigung und Förderung vorantreiben

Mehr Infos??!!

Bits und Bäume
Artikel



CS4F-Podcast

CS4F Homepage



Literatur I

- [1] **iea**, “Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach – Analysis,” (2023), Adresse: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach> (besucht am 08.12.2023).
- [2] **AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 – IPCC**, Adresse: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> (besucht am 12.07.2024).
- [3] **R. Grünwald und C. Caviezel**, *Energy consumption of ICT infrastructure*, de, ISSN: 2364-2645, 2022. DOI: 10.5445/IR/1000152733. Adresse: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000152733> (besucht am 08.12.2023).
- [4] **T. Santarius, J. C. T. Bieser, V. Frick u. a.**, “Digital sufficiency: conceptual considerations for ICTs on a finite planet,” *en, Annals of Telecommunications*, Jg. 78, Nr. 5, S. 277–295, Juni 2023, ISSN: 1958-9395. DOI: 10.1007/s12243-022-00914-x. Adresse: <https://doi.org/10.1007/s12243-022-00914-x> (besucht am 25.08.2023).

Literatur II

- [5] *Green Software Practitioner*, en. Adresse:
<https://learn.greensoftware.foundation/> (besucht am 12. 07. 2024).
- [6] D. J. Brown und C. Reams, "Toward energy-efficient computing," en, *Commun. ACM*, Jg. 53, Nr. 3, S. 50–58, März 2010, ISSN: 0001-0782, 1557-7317. DOI: 10.1145/1666420.1666438. Adresse:
<https://dl.acm.org/doi/10.1145/1666420.1666438> (besucht am 15. 08. 2023).
- [7] R. Pereira, M. Couto, F. Ribeiro u. a., "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*, Ser. SLE 2017, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Okt. 2017, S. 256–267, ISBN: 978-1-4503-5525-4. DOI: 10.1145/3136014.3136031. Adresse:
<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3136014.3136031> (besucht am 13. 11. 2023).

Literatur III

- [8] T. Yuki und S. Rajopadhye, "Folklore Confirmed: Compiling for Speed \$\$=\$\$ Compiling for Energy," en, in *Languages and Compilers for Parallel Computing*, C. Caşcaval und P. Montesinos, Hrsg., Bd. 8664, Series Title: Lecture Notes in Computer Science, Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 169–184, ISBN: 978-3-319-09966-8 978-3-319-09967-5. DOI: 10.1007/978-3-319-09967-5_10. Adresse: https://link.springer.com/10.1007/978-3-319-09967-5_10 (besucht am 13.11.2023).
- [9] G. Pinto und F. Castor, "Energy efficiency: a new concern for application software developers," en, *Communications of the ACM*, Jg. 60, Nr. 12, S. 68–75, Nov. 2017, ISSN: 0001-0782, 1557-7317. DOI: 10.1145/3154384. Adresse: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3154384> (besucht am 09.10.2023).

Literatur IV

- [10] A. E. Trefethen und J. Thiyagalingam, "Energy-aware software: Challenges, opportunities and strategies," *Journal of Computational Science, Scalable Algorithms for Large-Scale Systems Workshop (Scala2011), Supercomputing 2011*, Jg. 4, Nr. 6, S. 444–449, 2013, ISSN: 1877-7503. DOI: 10.1016/j.jocs.2013.01.005. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877750313000173> (besucht am 13.11.2023).
- [11] L. G. Lima, F. Soares-Neto, P. Lieuthier, F. Castor, G. Melfe und J. P. 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)*, Bd. 1, März 2016, S. 517–528. DOI: 10.1109/SANER.2016.85. Adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7476671> (besucht am 10.12.2023).

Literatur V

- [12] A. Guldner, R. Bender, C. Calero u. a., "Development and evaluation of a reference measurement model for assessing the resource and energy efficiency of software products and components—Green Software Measurement Model (GSMM)," *Future Generation Computer Systems*, Jg. 155, S. 402–418, Juni 2024, ISSN: 0167-739X. DOI: 10.1016/j.future.2024.01.033. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X24000384> (besucht am 13.07.2024).
- [13] H. Trier, *Neuer Artikel beschreibt Green Software Mess-Referenzmodell*, Feb. 2024. Adresse: <https://www.umwelt-campus.de/forschung/projekte/green-software-engineering/news-detailansicht/neuer-artikel-beschreibt-green-software-mess-referenzmodell> (besucht am 13.07.2024).
- [14] A. Nouredine, "PowerJoular and JoularJX: Multi-Platform Software Power Monitoring Tools," in *18th International Conference on Intelligent Environments (IE2022)*, Biarritz, France, Juni 2022.

Literatur VI

- [15] D. Wong, J. Chen und M. Annavaram, "A Retrospective Look Back on the Road Towards Energy Proportionality," in *2015 IEEE International Symposium on Workload Characterization*, Okt. 2015, S. 110–111. DOI: 10.1109/IISWC.2015.18. Adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7314153> (besucht am 10.12.2023).

Bildnachweise

Abb auf Folie	Autor	Lizenz	URL/Daten
▶ Folie 6	IEA	CC BY 4.0	hier
▶ Folie 7	IPCC-DDC	CC BY 4.0 Deed Attribution 4.0 International	hier
▶ Folie 13	nach [3], S.2	CC BY 4.0	–
▶ Folie 15	erzeugt mit Webseite	CC BY 4.0	hier
▶ Folie 16	Autorin	CC BY 4.0	▶ Folie 56
▶ Folie 17	Autorin	CC BY 4.0	▶ Folie 56
▶ Folie 19	Lydia Simmons	CC BY-NC 4.0	hier
▶ Folie 26	Autorin nach [5]	CC BY 4.0	hier
▶ Folie 37	A. Guldner, et al.	CC BY 4.0	[12]

Bildnachweise

Abb auf Folie	Autor	Lizenz	URL/Daten
▶ Folie 6	IEA	CC BY 4.0	hier
▶ Folie 7	IPCC-DDC	CC BY 4.0 Deed Attribution 4.0 International	hier
▶ Folie 13	nach [3], S.2	CC BY 4.0	–
▶ Folie 15	erzeugt mit Webseite	CC BY 4.0	hier
▶ Folie 16	Autorin	CC BY 4.0	▶ Folie 56
▶ Folie 17	Autorin	CC BY 4.0	▶ Folie 56
▶ Folie 19	Lydia Simmons	CC BY-NC 4.0	hier
▶ Folie 26	Autorin nach [5]	CC BY 4.0	hier
▶ Folie 37	A. Guldner, et al.	CC BY 4.0	[12]

Daten

Daten zu Abbildung

► Folie 16

Herstellung	kg CO ₂ eq pro Jahr	Quellen
Sprachassistent	33	https://www.oeko.de/blog/der-co2-fussabdruck-unseres-digitalen-lebensstils/
Smartphone	50	
Laptop	63	
Fernseher	200	
Desktop+Monitor	435	
max Verbrauch (klimaverträglich)	600	https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#hauptverursacher
60qm-Wohnung pro Jahr	1450	https://www.nachhaltiges-zuhause.de/co2-aussto%C3%9F-geb%C3%A4ude
Verbrauch weltweit	4700	Veröffentlicht von Statista Research Department, 07.02.2024 https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1273207/umfrage/pro-kopf-co2-
Verbrauch in D (2022)	9200	https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer

Daten zu Abbildung

► Folie 17

Aktion	g CO ₂ e	Intervall (falls angegeben)	Quellen
Eine Visa Transaktion	0,45		https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption
Eine Google-Anfrage	5	0.1 - 10	https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption
Eine Stunde Video-Streaming	135	100-175	https://www.oeko.de/blog/der-co2-fussabdruck-unseres-digitalen-lebensstils/
Eine Bitcoin Transaktion	479.760	369490- 479760	https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2020/06/Videostreaming-2020.pdf
Vergleich 100km im Auto	17.000	14 bis 20 kg CO ₂ pro 100km	https://www.worms.de/neu-de/zukunft-gestalten/klima-und-umwelt/Klimaschutz/CO2-Berechnung-fuer-KFZ.php
Vergleich Flug M-HH	78.200	66kg bis 198 kg pro 1000km	https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Pages/default.aspx