

IEA 4E PECTA

Leistungselektronik zur Steuerung und Umwandlung elektrischer Energie Annex

Arbeitsperiode März 2021 - Februar 2024

Univ.-Prof. DI Dr. Markus Makoschitz
DI (FH) Katharina Machtinger, DI (FH) Manuel Passler
AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Bericht aus Energie- und Umweltforschung

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber: **Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**, Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist.

Nutzungsbestimmungen: nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage www.nachhaltigwirtschaften.at gewährleistet wird.

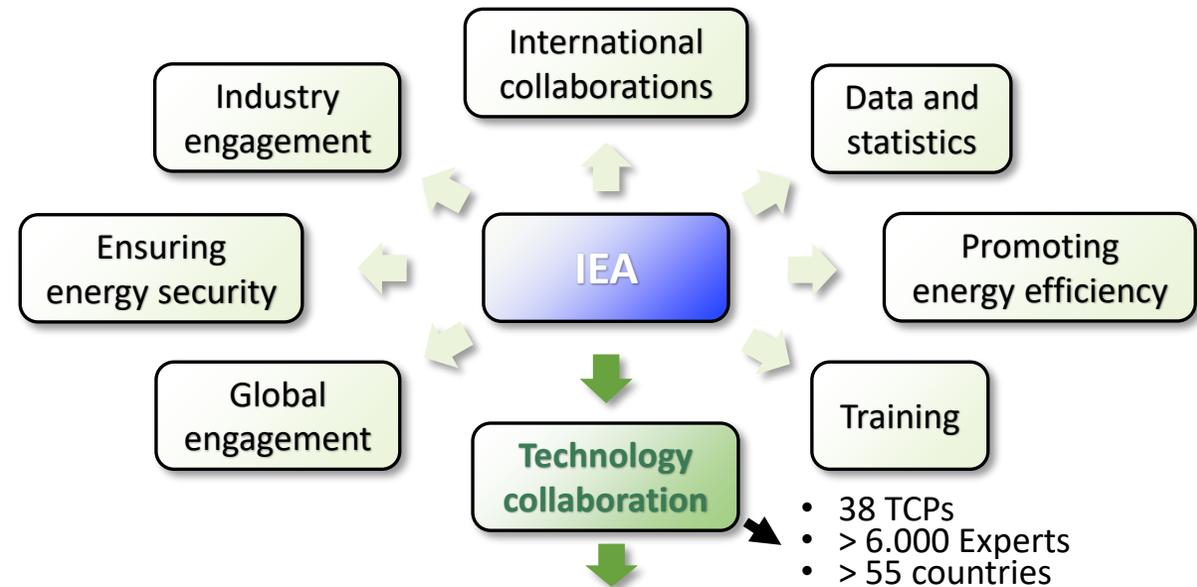
DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

IEA 4E PECTA im Überblick

Was bedeutet 4E TCP?

- **TCP:** Technology Collaboration Programme
- **4E:** Energy Efficiency of End-Use Equipment
- Aktuell sind **14 Länder** und die Europäische Kommission Mitglied im 4E TCP (AU, AT, CA, CHN, DK, FR, JP, KOR, NL, NZ, CH, SWE, UK, US, EC)
- **Link:** <https://www.iea-4e.org/>

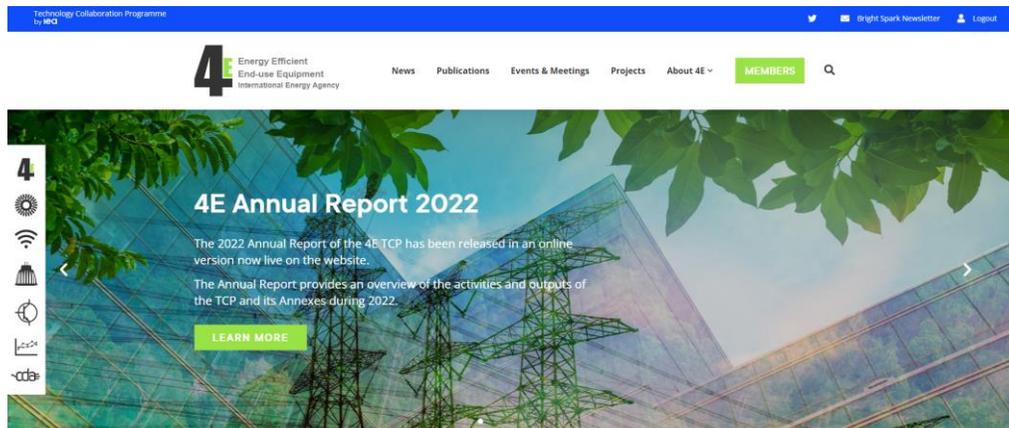


- 38 TCPs
- > 6.000 Experts
- > 55 countries

TCP Topics

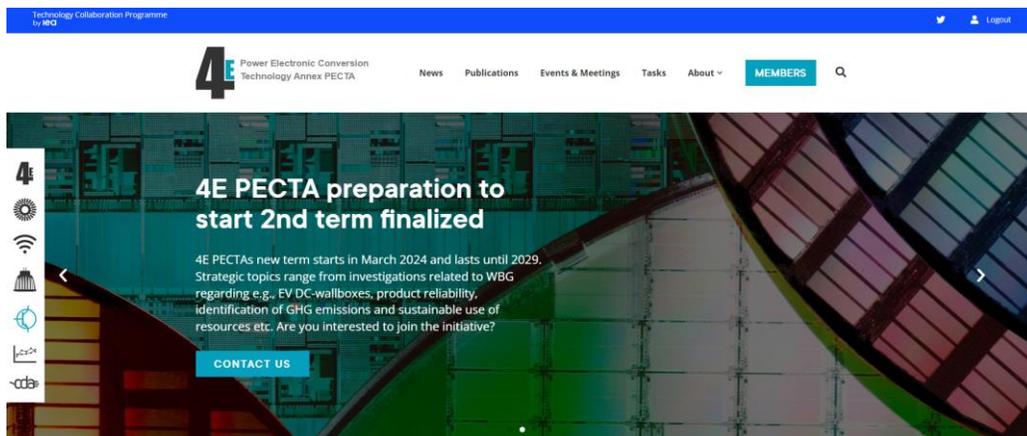
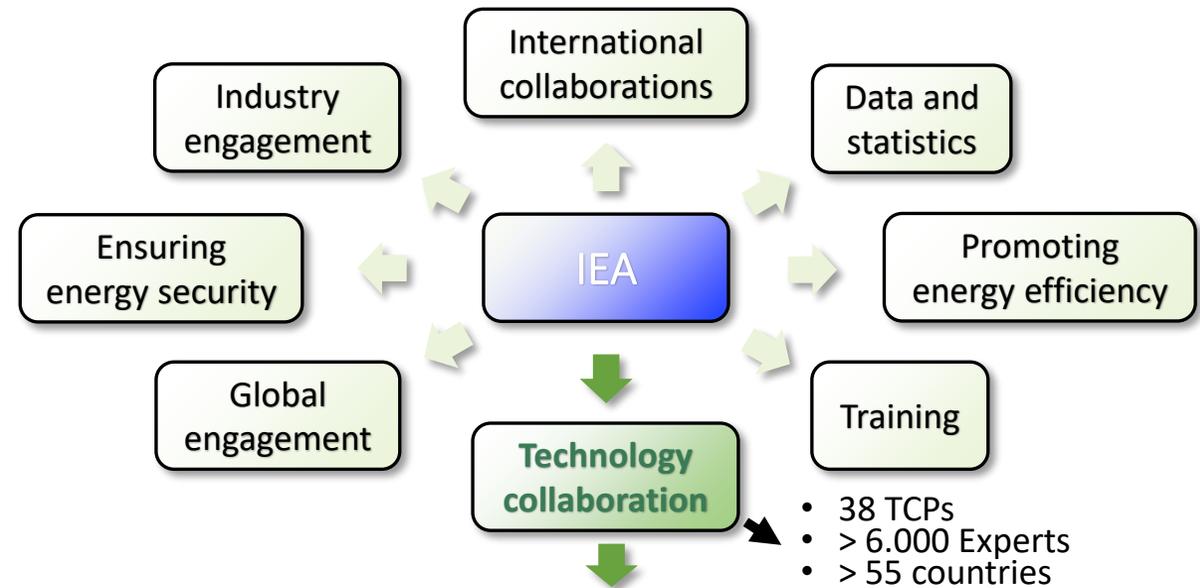
| | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Electricity (3 TCPs) • Industry (1 TCPs) • Transport (5 TCPs) • Buildings (5 TCPs) | <ul style="list-style-type: none"> • Fossil fuels (5 TCPs) • Fusion power (8 TCPs) • Cross-cutting (2 TCPs) • Renewable energy (9 TCPs) |
|--|---|

- Buildings TCPs**
- Heat Pumping Technologies
 - Energy Storage
 - Distributed Heating & Cooling
 - Energy in Build. and communities
 - **Energy Efficient End-Use Equipment (4E)**



Was bedeutet PECTA?

- **PECTA: Power Electronic Conversion Technology Annex**
- PECTA ist einer von 4 Annexen im 4E TCP
- 4 Länder sind aktuell in PECTA vertreten: CH, AT, SWE, DK
- Link: <https://www.iea-4e.org/pecta/>



TCP Topics

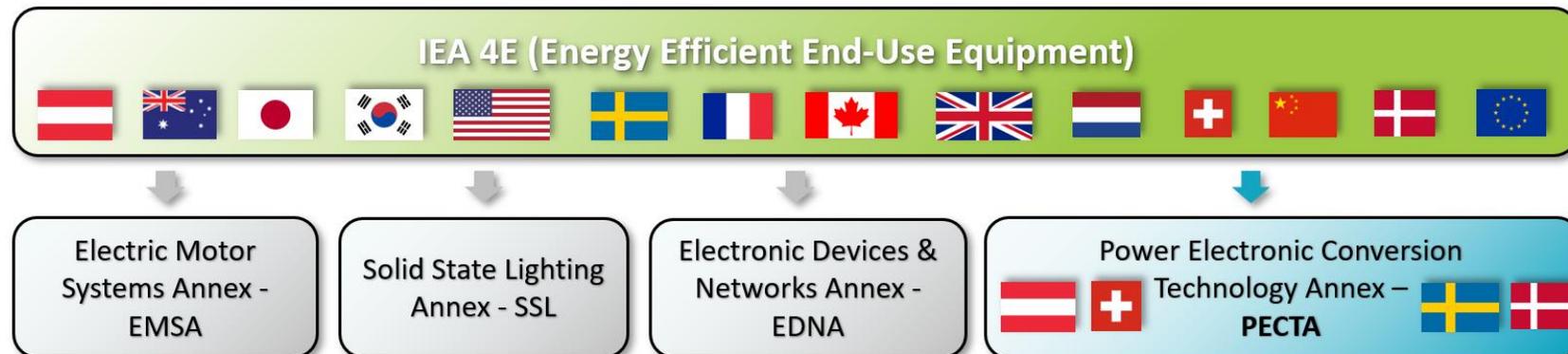
- Electricity (3 TCPs)
- Industry (1 TCPs)
- Transport (5 TCPs)
- **Buildings (5 TCPs)**
- Fossil fuels (5 TCPs)
- Fusion power (8 TCPs)
- Cross-cutting (2 TCPs)
- Renewable energy (9 TCPs)

↳ **Energy Efficient End-Use Equipment (4E) Annexes and Activities:**

- EMSA (Motors)
- EDNA (Electronic Devices)
- SSL (Lighting)
- MV&E
- **PECTA (Power Electronics)**

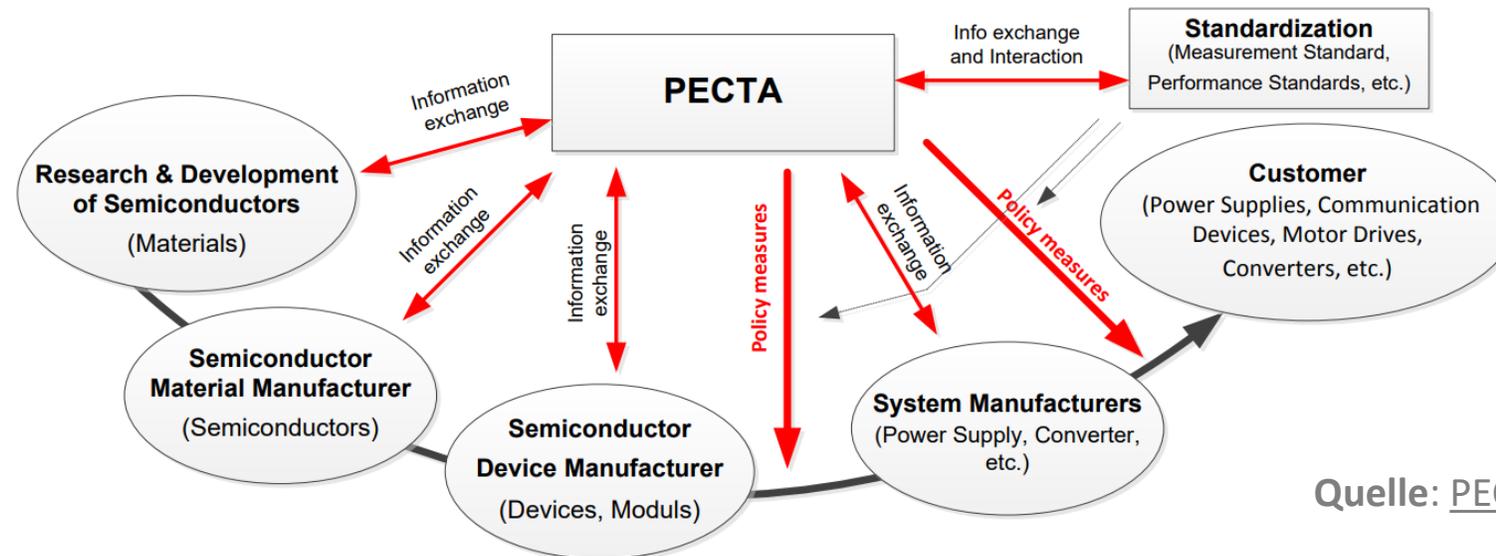
IEA 4E besteht aus 4 Annexen:

- **EMSA:** Electric Motor Systems Annex
 - <https://www.iea-4e.org/ems/>
- **EDNA:** Electronic Devices and Networks Annex
 - <https://www.iea-4e.org/edna/>
- **SSL:** Solid State Lighting Annex
 - <https://www.iea-4e.org/ssl/>
- **PECTA:** Power Electronic Conversion Technology Annex
 - <https://www.iea-4e.org/pecta/>



Übergeordnete Ziele von PECTA:

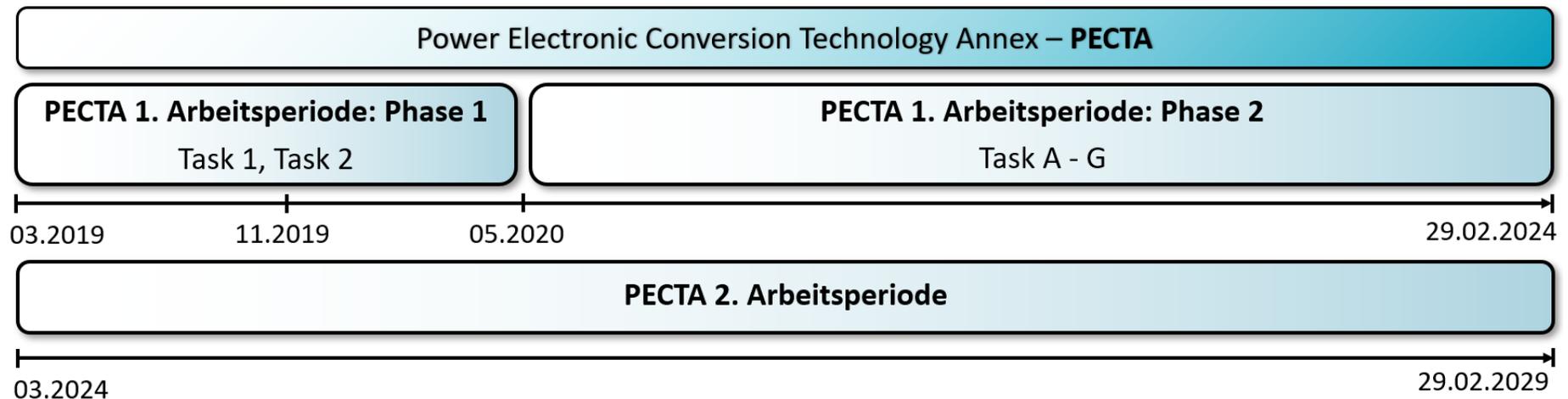
- **Sammeln und Analysieren** von Informationen über neue WBG-basierte Leistungselektronik
- Austausch von **Fachwissen** und Bündelung von Ressourcen zu dieser energieeffizienten Technologie.
- Entwicklung eines besseren Verständnisses für **politische Entscheidungsträger:innen** und relevante Interessensgruppen bzw. Stakeholder:innen, die WBG-basierte Leistungselektronik als energieeffiziente Technologie in **Koordination international akzeptabler Regierungsansätze** fördern.
- **Begleitung und Unterstützung internationaler Normungsorganisationen** bei der Bereitstellung neutraler und unabhängiger Beiträge und Ansichten zu technischen Aspekten.



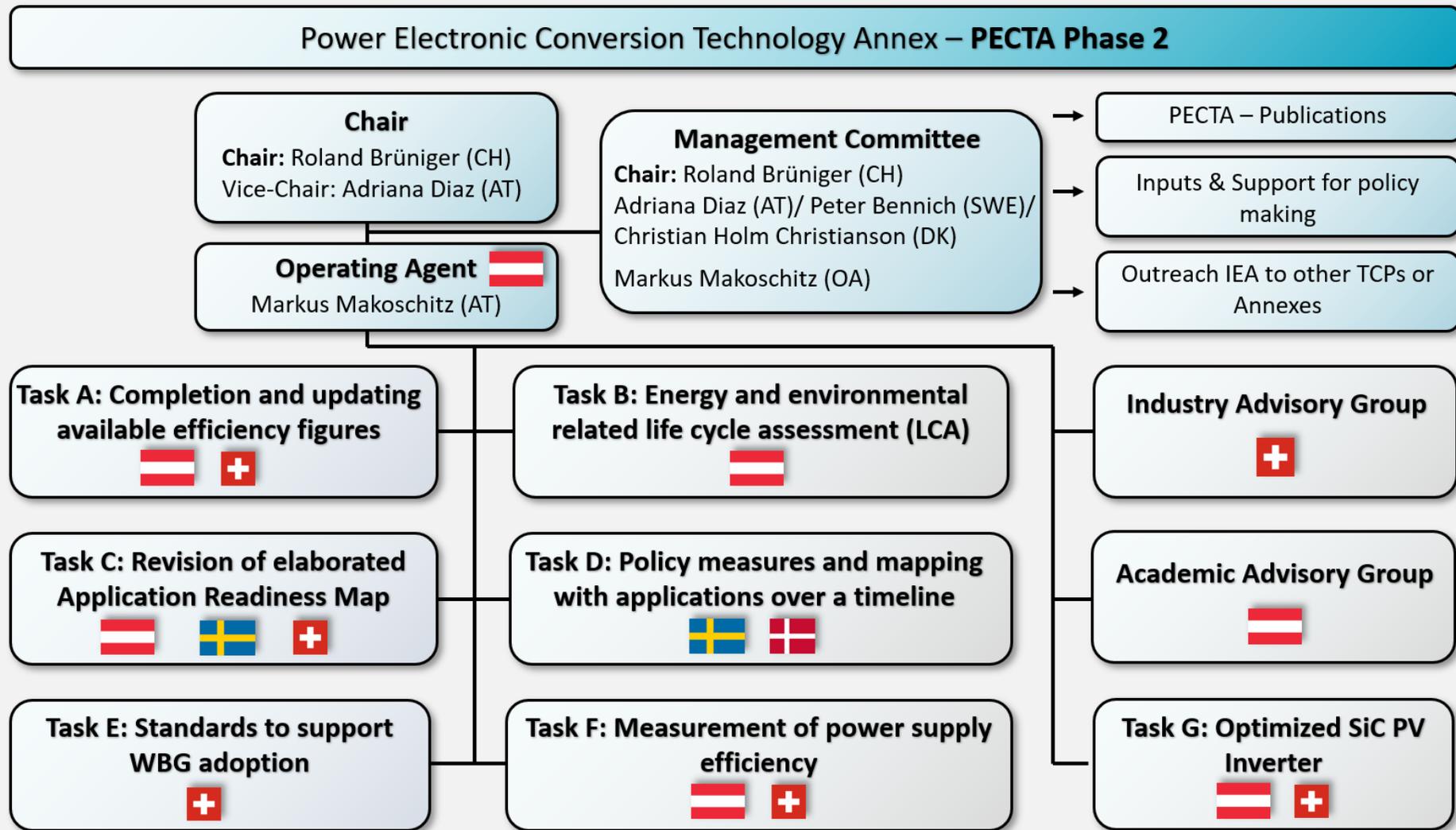
Quelle: [PECTA Factsheet](#)

PECTA Laufzeit:

- PECTA wurde im März 2019 offiziell gestartet. Dabei wurde die **erste Arbeitsperiode** in 2 Phasen unterteilt:
 - 1. Phase (PECTA Introduction Phase): März 2019 bis inklusive April 2020.
 - 2. Phase (PECTA Established Phase): Mai 2020 bis inklusive Februar 2024.
- Die **zweite Arbeitsperiode** startete mit März 2024 und läuft bis Februar 2029.
 - Ein Strategieplan für diese weitere Arbeitsphase liegt bereits vor und wurde offiziell vom 4E ExCo genehmigt.



IEA 4E PECTA im Überblick - Organigramm



Task B: Energie- und umweltrelevante Lebenszyklusanalysen

Team:

Technische Universität Wien

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung

Research Group Ecodesign



AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Center for Energy

Electric Energy Systems - Leistungselektronik

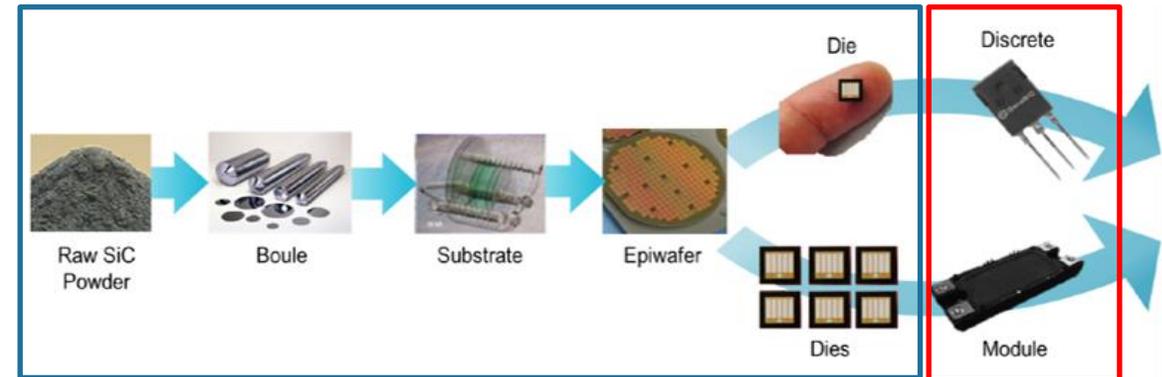


Einleitung und Übersicht

- Wide Bandgap (WBG) Komponenten
- Der “Life Cycle Thinking” Ansatz



Herstellungsprozess von SiC Halbleitern – Ein Blick auf den Energieverbrauch



Quelle: PECTA

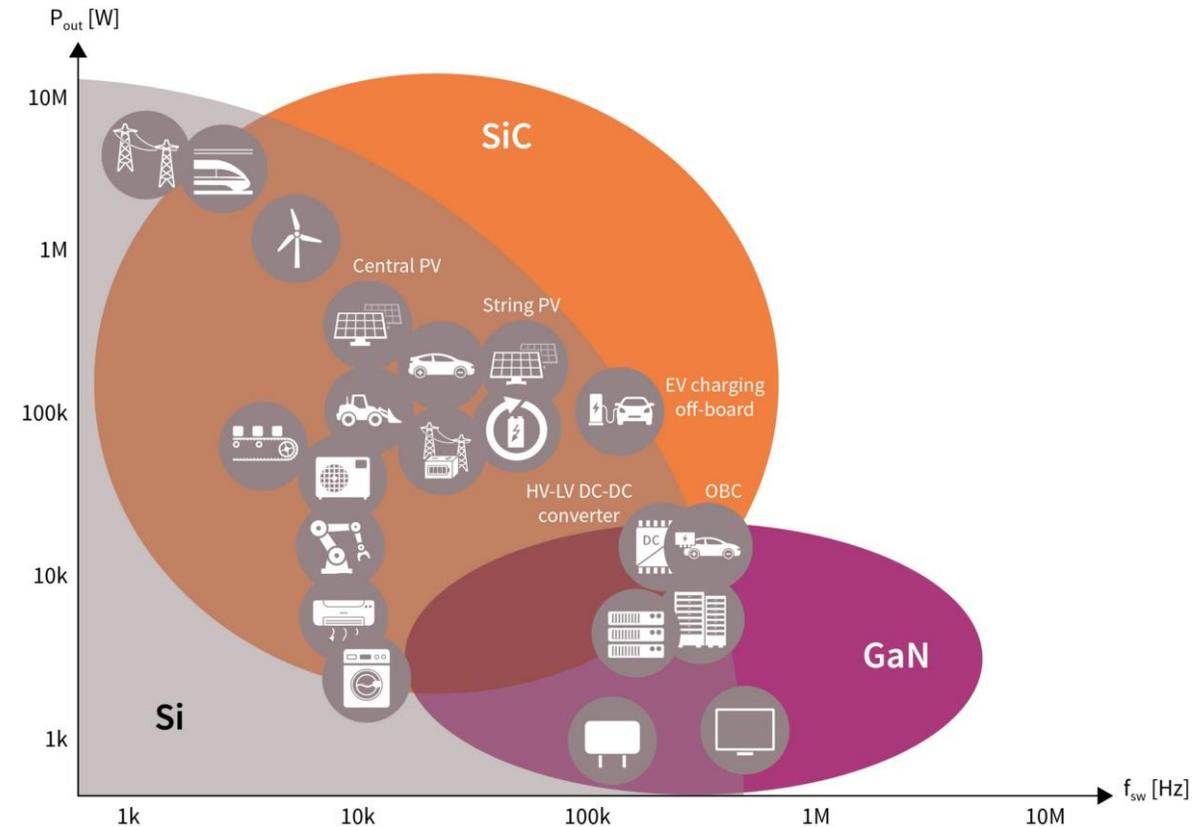
Design Aspekte bei Ladegeräten und der Einfluss aufgrund von WBG-Halbleitern

- Einfluss der WBG-Technologie auf das Design von handelsüblichen Handy-/Laptopladegeräten und PV-Wechselrichtersysteme
- Untersuchung eines am Markt erhältlichen GaN Ladegerätes: Aufbereitung der Komponenten und Untersuchung zur Ökobilanz



WBG Charakteristik:

- Gegenstand der Untersuchung im Task sind in erster Linie **Silizium-Karbid (SiC)** und **Gallium-Nitrid (GaN)** Halbleiter. Diese bereits kommerziell für relevante Spannungs- und Strombereiche verfügbar.
- **Wide Band Gap (WBG):** Hohe **Energiedifferenz** im Halbleiter zwischen **Valenz-** und **Leitungsband**.
- Der breitere Bandabstand im Vergleich zu Silizium erlaubt es mittels SiC und GaN Halbleiter mit potentiell **höheren Sperrspannungen**, **Sperrschichttemperaturen (SiC)** und **Schaltfrequenzen** umzusetzen.



Quelle: Infineon: Wide Bandgap Semiconductors (SiC/GaN) - Infineon Technologies

Ziele:

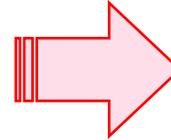
- Betrachtung der Umweltaspekte und -auswirkungen der WBG-Technologie entlang des Lebenszyklus für ausgewählte Geräte
- Bewertung des „Trade-Offs“ im Zusammenhang mit der auf Silizium basierenden Technologie für die Leistungsumwandlung.

Dabei ist Task B in 3 wesentliche Hauptgebiete unterteilt:

- **Gebiet 1:** Hauptfokus auf **Materialien** und **Fertigungsprozesse** bei WBG-Halbleitern
- **Gebiet 2:** Untersuchung beim **Einfluss** auf das **Design** von Geräten unter Verwendung von WBG-Halbleitern.
- **Gebiet 3:** Untersucht die Energie- und Materialaspekte des „end-of-life“ von WBG-Technologien.

Der "Life Cycle Thinking" Ansatz

- Betrachtung auf Komponentenebene
- Starker Fokus auf den Herstellungsprozess und dessen Energieverbrauch



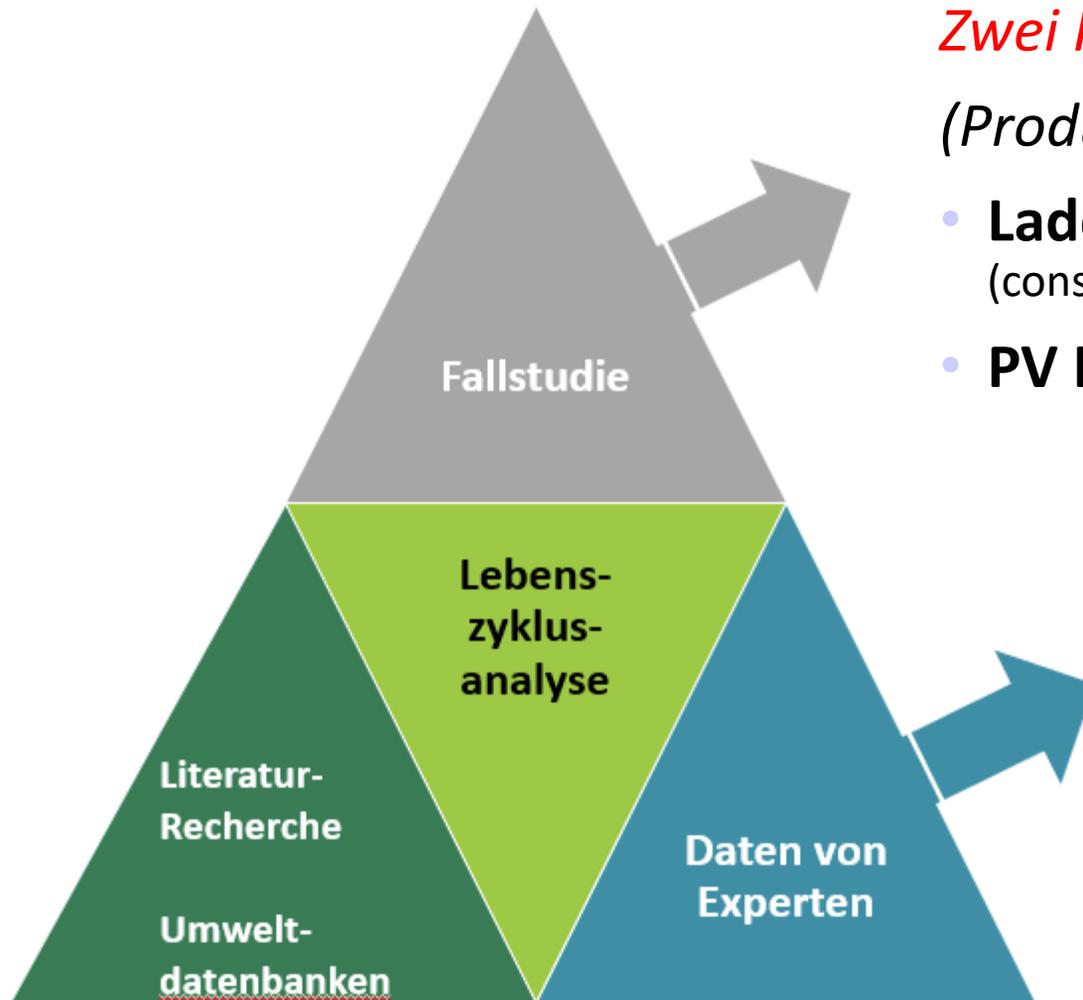
- Boule-Wachstum
- Prozessausbeute
- Chipgrößenverhältnis



- Betrachtung auf Produktebene
- Starker Fokus auf Designaspekten
- Treibhausgaspotential (**GWP** – global warming potential)



- Effizienz
- Materialeinsparung
- Weitere Effekte



Zwei Fallstudien

(Produkt- Level)

- **Ladegeräte**
(consumer market)
- **PV Inverter**

Experten Interviews

(Geräte- und Produktebene)

- **Industrie**
- **Akademische Partner**

Aufschlüsselung

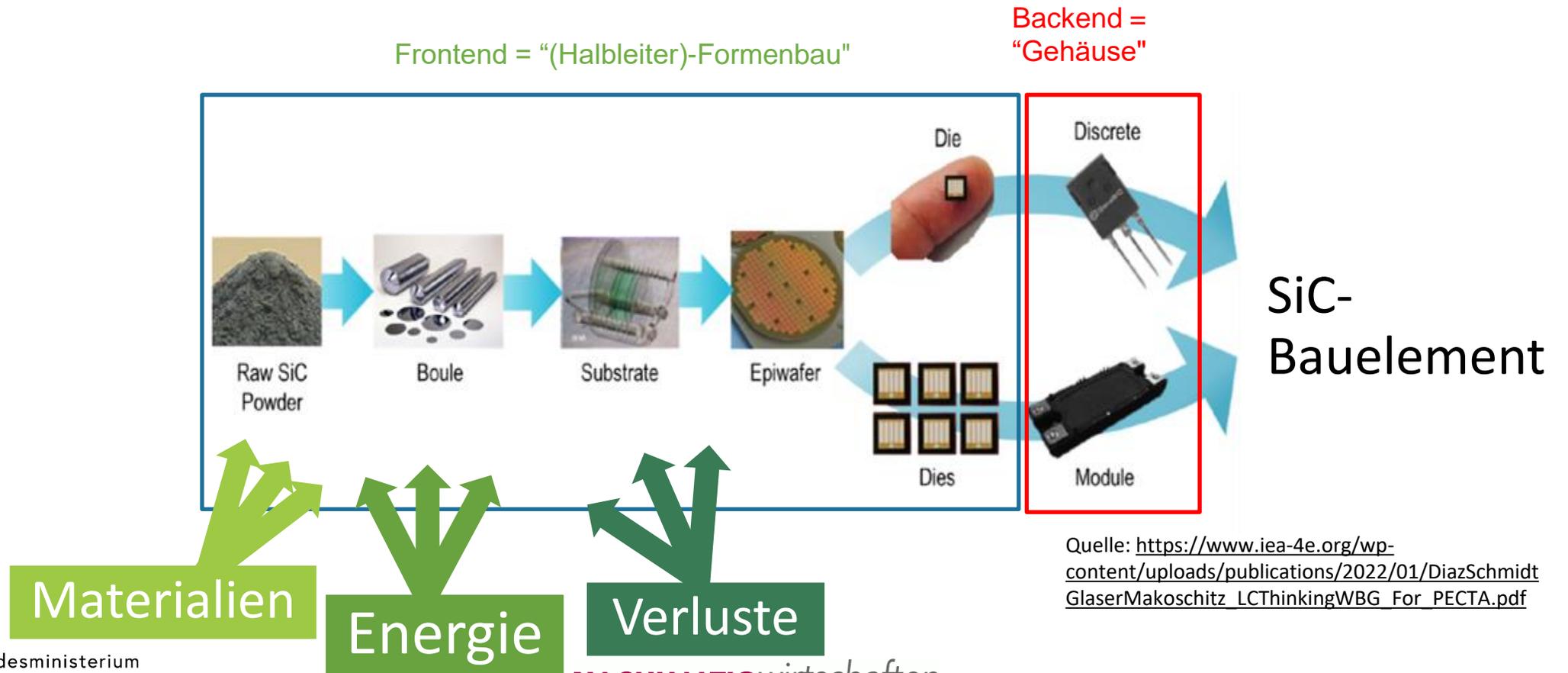
Daten

Optimierte
LZA

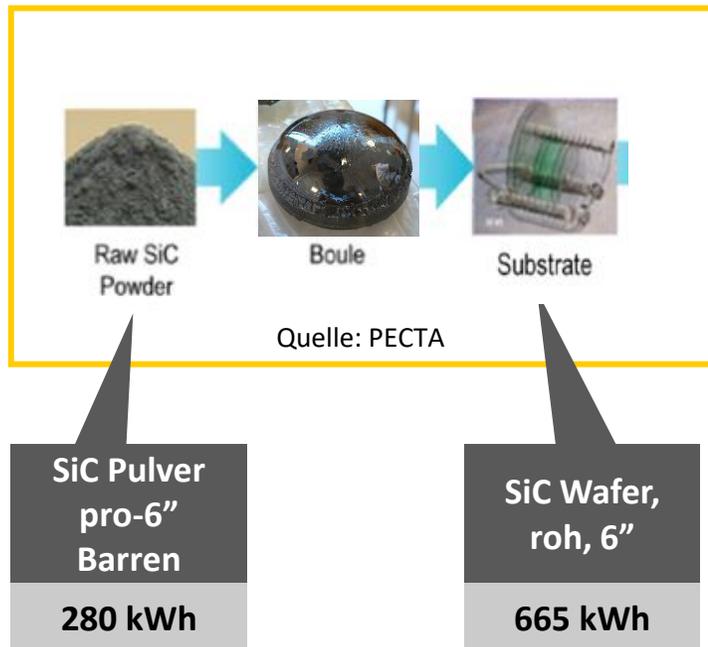
Daten

Herstellung eines – SiC Halbleiters

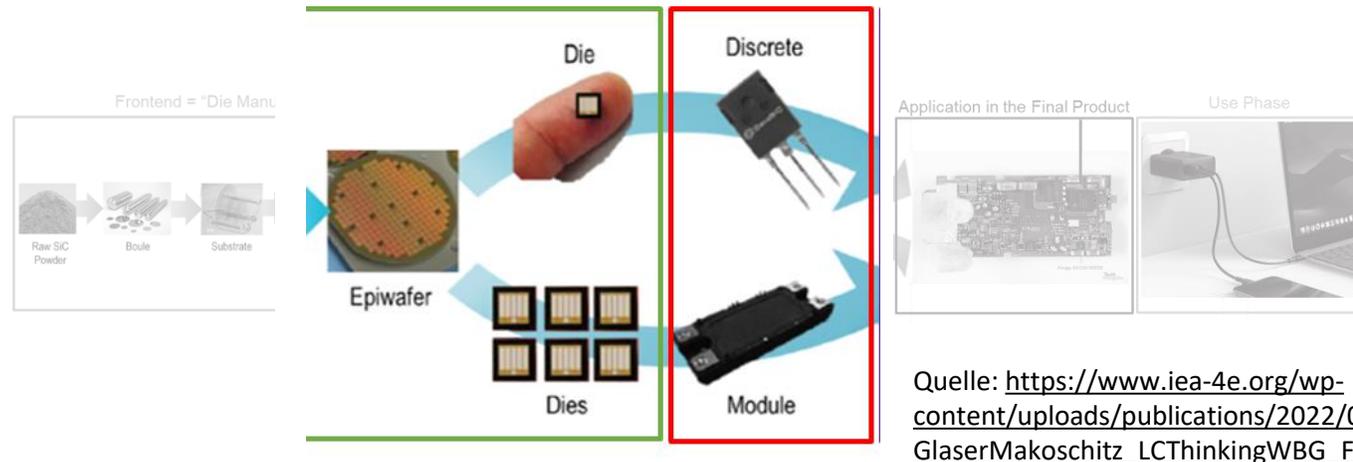
Betrachtung der Energie, der Materialien und der Verluste in den verschiedenen Herstellungsschritten



Quelle: https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2022/01/DiazSchmidtGlaserMakoschitz_LCThinkingWBG_For_PECTA.pdf



- **Zusätzlicher Prozess:**
Si -> SiC Material: Acheson-Verfahren + Schleifen
- SiC Barren: "**Boule**"
-> Physikalische Gasphasenabscheidung
- **Kleinerer Wafer-Durchmesser:** 4-6"
(Si: 8 bis 12 Zoll)
- Schneiden, Schleifen, Polieren
Bruchkantenverluste im Bereich 50 - 75%

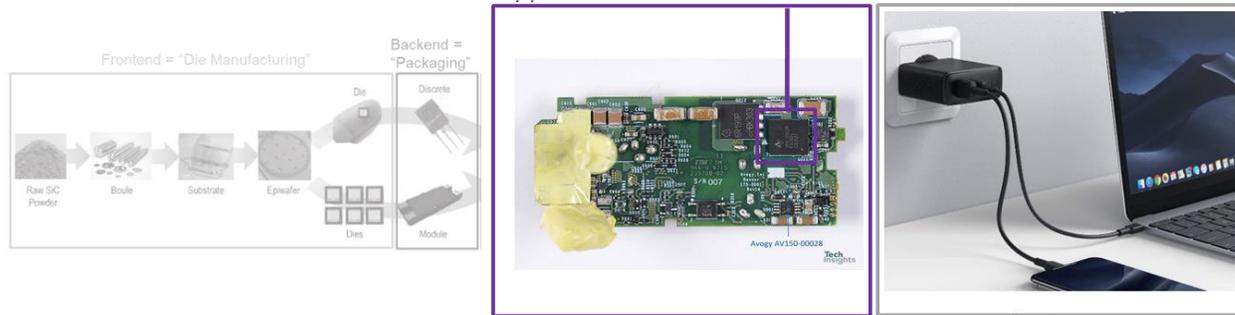


Quelle: https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2022/01/DiazSchmidt_GlaserMakoschitz_LCThinkingWBG_For_PECTA.pdf

- Wafer-Verarbeitung: Wafer -> "Die": ähnlich wie bei Si-Bauteilen (z. B. MOSFET)
- Verpackung: hinsichtlich der Energie, **ähnlich wie bei Si-Bauteilen**
- **Geringere Ausbeute**, ca. 75 % im Vergleich zu ca. 90 % bei Si-Bauteilen

92kWh/6-Zoll-Äquivalent unpolierter Si-Wafer, ein Verhältnis von etwa 1:7
(Si: 92kWh / SiC: 665kWh)

2 WBG Applikationen im Fokus



Quelle: https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2022/01/DiazSchmidtGlaserMakoschitz_LCThinkingWBG_For_PECTA.pdf

Ladegeräte



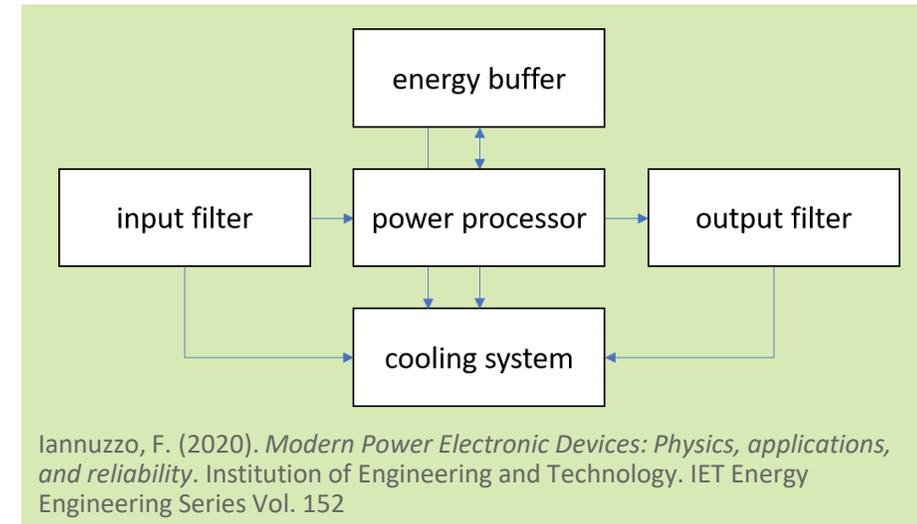
- Auswirkungen der WBG auf das Design (z. B. Größe, Kühlung, sonstige Auswirkungen).
- Rationalisierte Lebenszyklusanalysen (LCA) → Treibhauspotenzial (GWP)
- Der Schwerpunkt liegt auf den Phasen **Material**, **Herstellung** und **Verwendung**.

PV Inverter



Ausgehend von der WBG-Theorie

- Höhere Schaltfrequenz
- Reduziert passive Komponenten
- Effizienz kann gesteigert werden
- Höhere Leistungsdichte von Produkten



Welche Effekte/Auswirkungen gibt es auf das Design?

Untersuchte Variablen



Relevant für **Material**
und **Produktionsstufen**

Relevant für
Nutzungsphasen

Größe des Leistungsprozessors

Effizienz

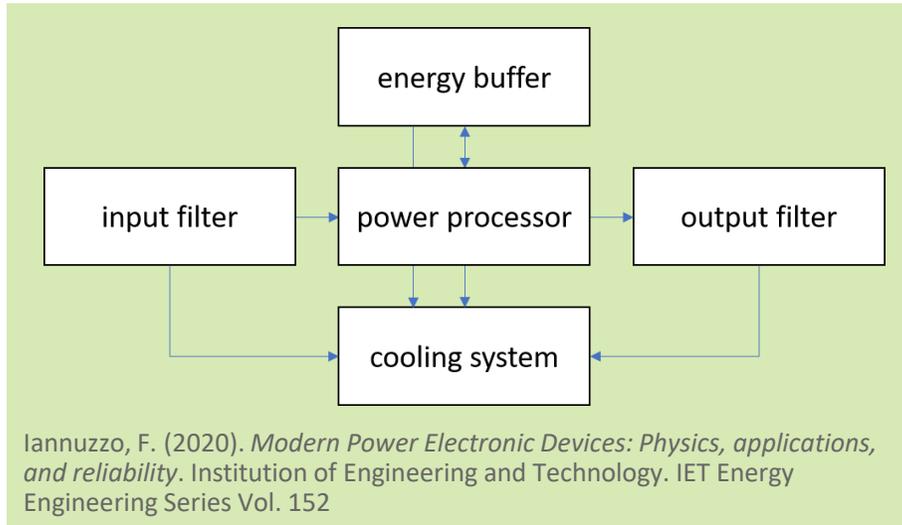
Größe der Filter(input/output)

... andere ?

Größe des Kühlsystems

Größe des Energiepuffers

Einfluss von WBG auf das Design eines 65 W Ladegeräts



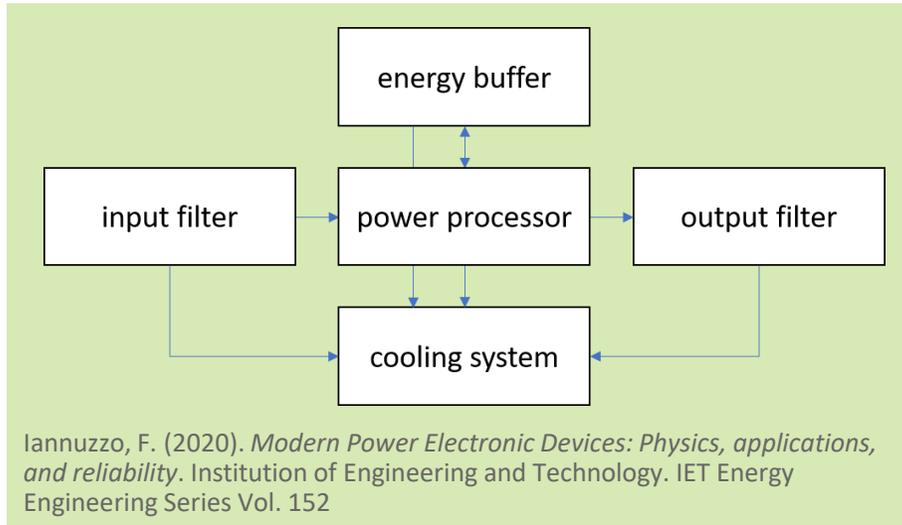
| Funktionsblock | Ladegerät |
|--------------------|--------------------|
| Eingangsfiler | +10% bis zu -50% |
| Leistungsprozessor | Bis zu -20% (Kern) |
| Energiepuffer | Keine Auswirkung |
| Kühlsystem | Bis zu -50% |
| Ausgangsfiler | Bis zu -50% |
| Rest | Keine Auswirkung |
| Total | Bis zu -30% |



Für ein Ladegerät können ca. **1,30 kg CO₂-eq** für Material and Fertigungsphasen eingespart werden ⁽²⁾.

Geschätzte Auswirkungen auf die Größe
(nach Angaben von Experten¹)

Einfluss von WBG auf das Design eines PV Wechselrichters



| Funktionsblock | PV Inverter |
|--------------------|------------------|
| Eingangsfiler | Bis zu -50% |
| Leistungsprozessor | Bis zu -40% |
| Energiepuffer | Keine Auswirkung |
| Kühlsystem | -1% bis zu -2% |
| Ausgangsfiler | Bis zu -50% |
| Rest | Keine Auswirkung |
| Total | -10% up to -20% |

Geschätzte Auswirkungen auf die Größe
(nach Angaben von Experten¹)

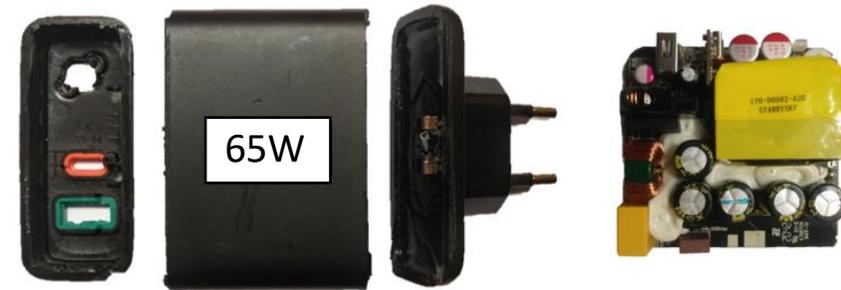
Für einen PV Inverter können zwischen **22,7kg CO₂-eq** und **45,5kg CO₂-eq** in den Material und Herstellungsphasen eingespart werden⁽²⁾.



Nur Si basierte Komponenten



Mit GaN Komponenten



4,43 kg CO₂-eq

- Kein Stecker und Kabel
- Gemessene Effizienz
- Keine "Die" großen Messung

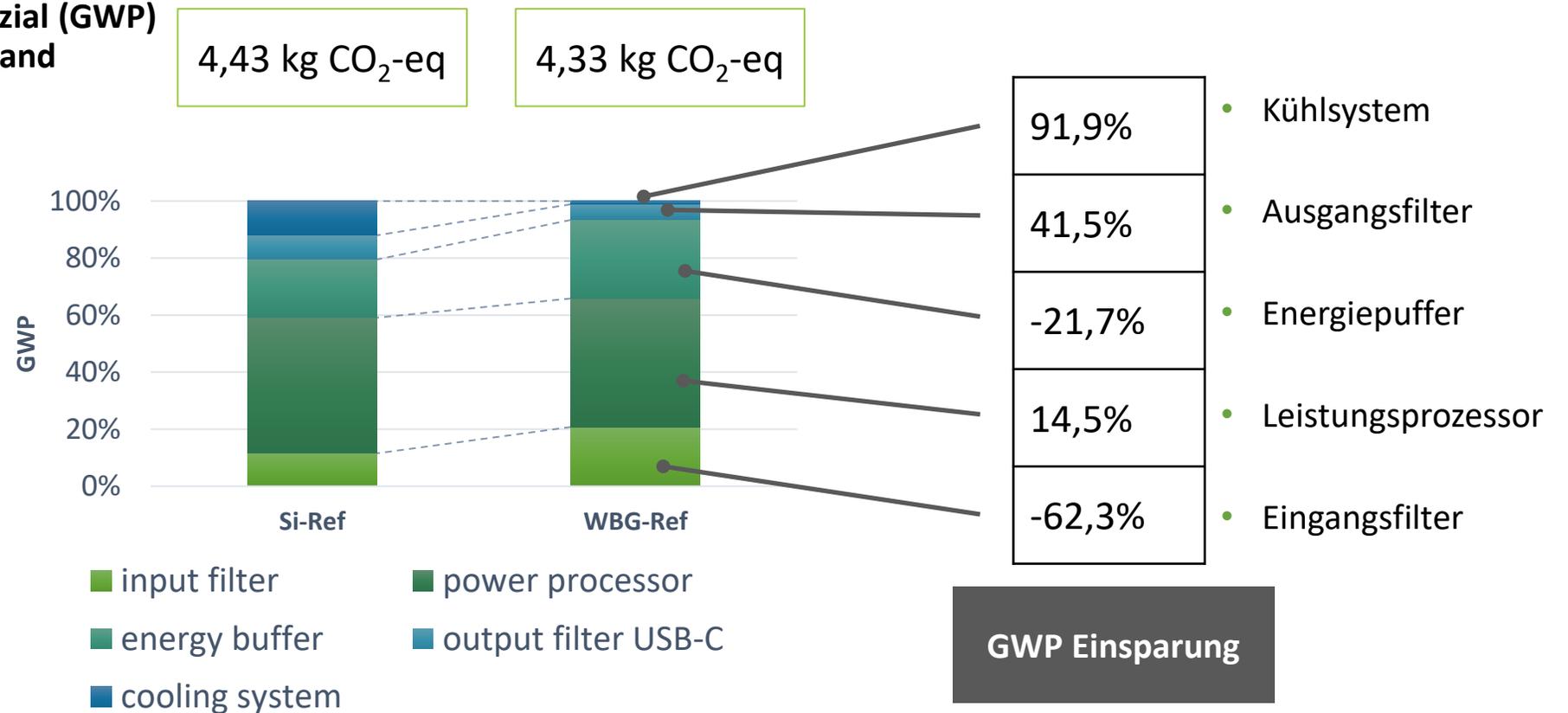


4,33 kg CO₂-eq

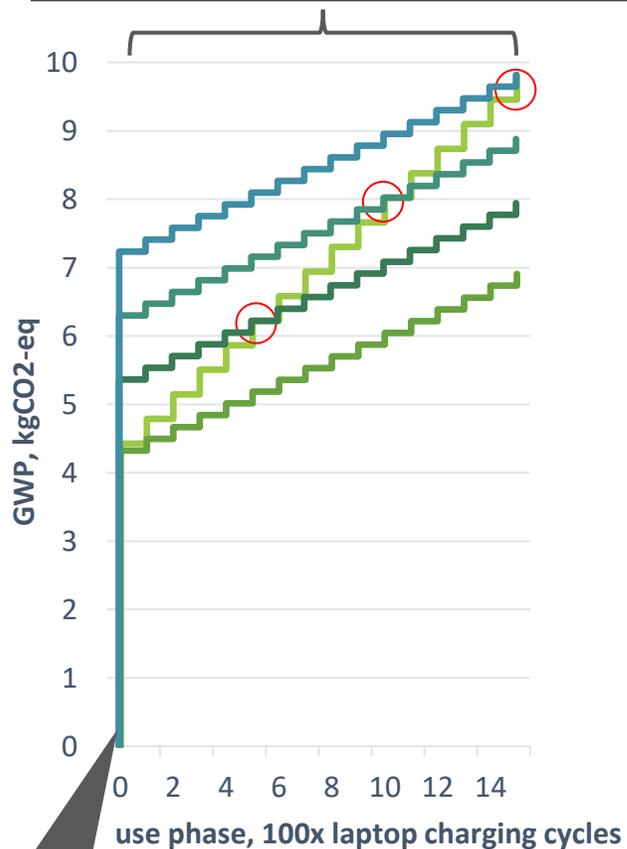
- Diff. Szenarien für die Herstellung von GaN-Komponenten
- Gemessene Effizienz
- Keine "Die" Größen Messung

Treibhausgaspotential im Detail – 65 W Netzteile

**Treibhauspotenzial (GWP)
für Materialien and
Fertigung:**



Aufgrund der Energieeffizienz während der Nutzungsphase



Aufgrund von Materialien und Herstellung
Innovation und Technologie

Nutzungsphasen unter Berücksichtigung:

- Laptop Lade-Szenario
- Effizienz:
Si-Ref = 70% bis zu 88%
WBG-Ref = 83,50% bis zu 94 %
- Strommix für Österreich

Resultate:

- WBG-Referenz: **0,59 kg CO₂-eq**
 Model 1 → 500 Ladezyklen:
1,63 kg CO₂-eq
 Model 2 → 1000 Ladezyklen:
2,57 kg CO₂-eq
 Model 3 → 1500 Ladezyklen:
3,5 kg CO₂-eq

Task B von PECTA untersucht die Umweltauswirkungen von Wide-Band-Gap-halbleitertechnologischen Anwendungen:



Die **Energieauswirkungen** von Material- and Herstellungsprozessen für SiC und GaN → *Publikation ist verfügbar.*



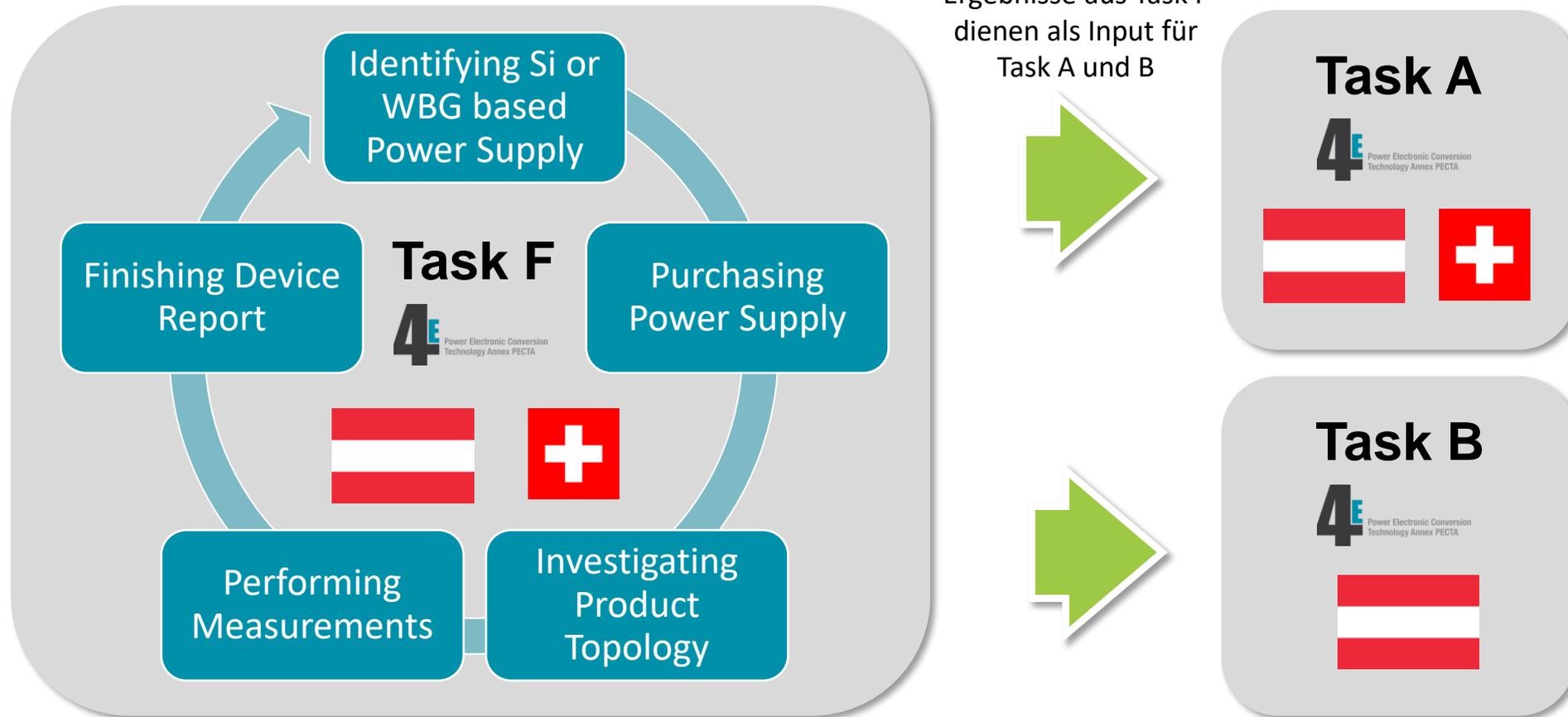
Die **Gestaltungsaspekte und Auswirkungen** von WBG in ausgewählten Anwendungen, für Consumer Ladegeräte und PV Inverter → *Publikation befindet sich in Vorbereitung.*



Die **Kritikalität** und die potenziellen Mengen von SiC/GaN in Halbleiterabfällen, die politischen Maßnahmen für End-of-Life (EoL), **EoL-Behandlungsprozesse**, Ecodesign-Grundsätze zur Optimierung des EoL und Empfehlungen für politische Entscheidungsträger → *Arbeiten sind im Gange.*

Task F: Messungen von Stromverbrauchseffizienz

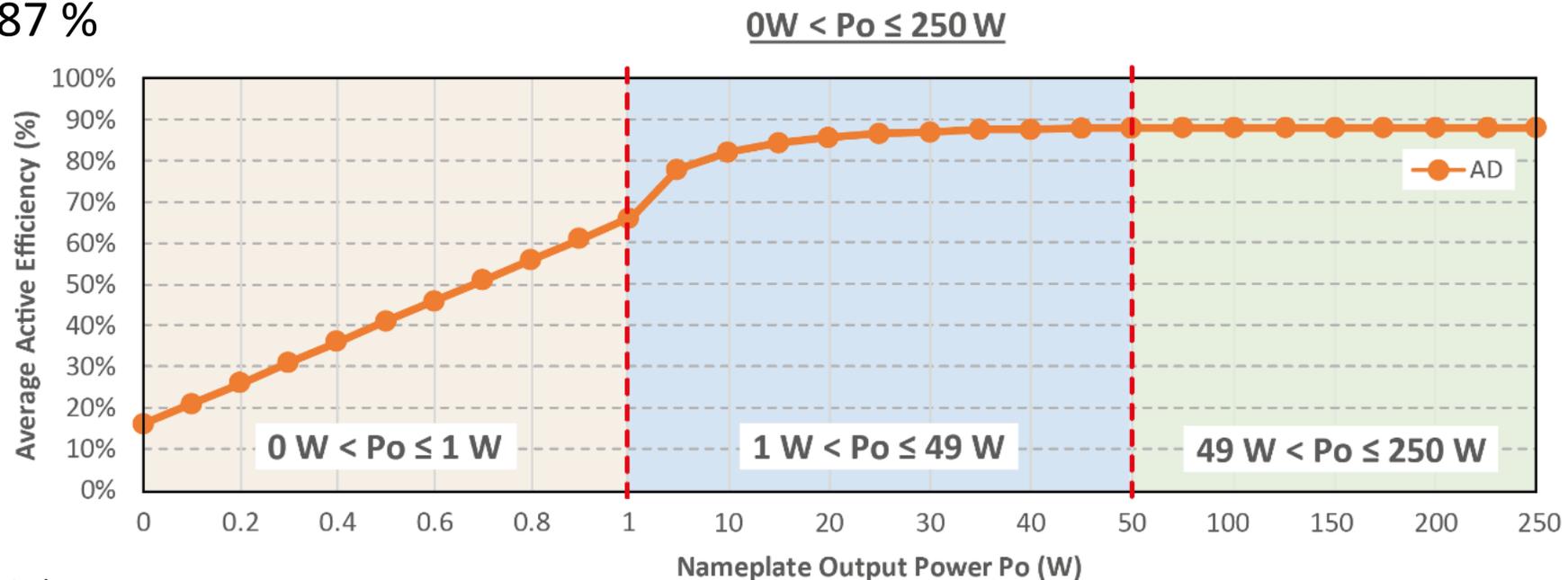
Ziel: Energieeffizienzmessungen von Ladegeräten mit niedriger Leistung (< 65 W)



- EU-Regulierung
- Generelles Messsetup
- Messsetup mit Power Analyzer
- Messresultate verschiedener Netzteile (GaN and Si)
- Vergleich der unterschiedlichen Netzteile
- Messsetup mit Oszilloskop und Zweikammer-Kalorimeter zur Kalibrierung
- Schlussfolgerungen

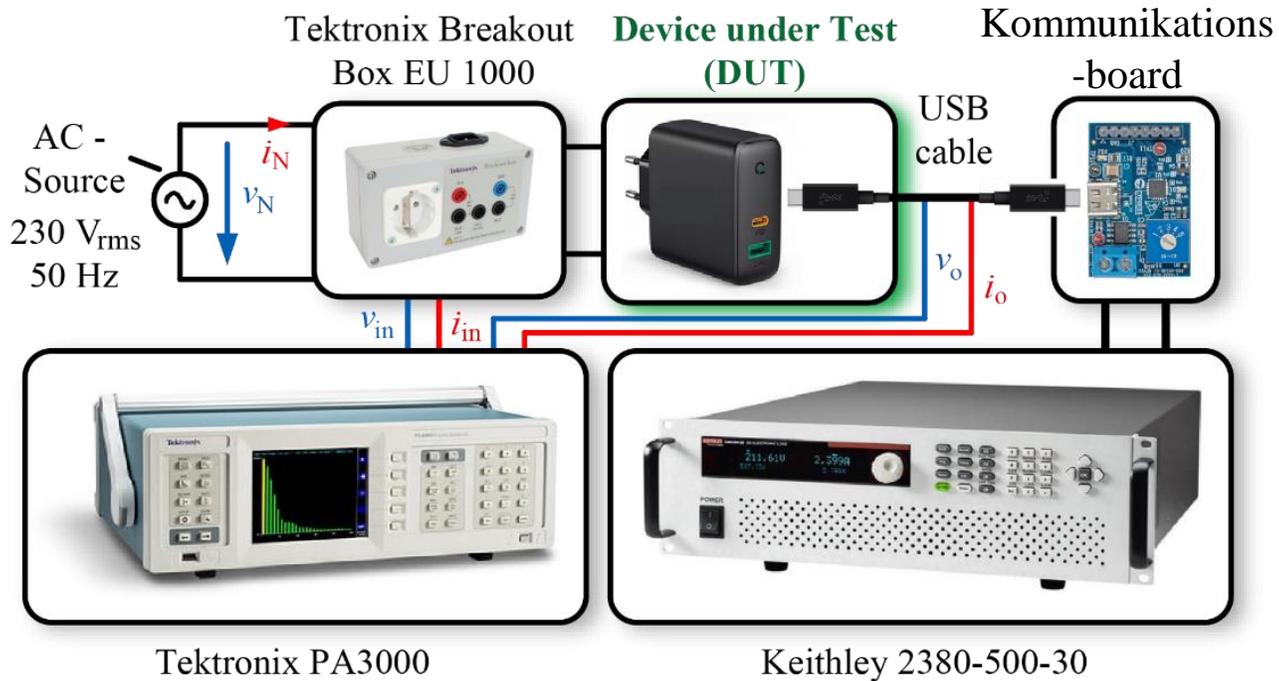
gültig seit 1. April 2020

- Gilt für elektrische und elektronische Haushalts- und Bürogeräte
- Definiert den Stromverbrauch und die durchschnittliche Effizienz externer Netzteile für die niedrigste Ausgangsspannung
- Durchschnittlicher aktiver Wirkungsgrad für externe AC-DC-Netzteile (AD), $P_o > 50$ W:
 $\eta = 87\%$



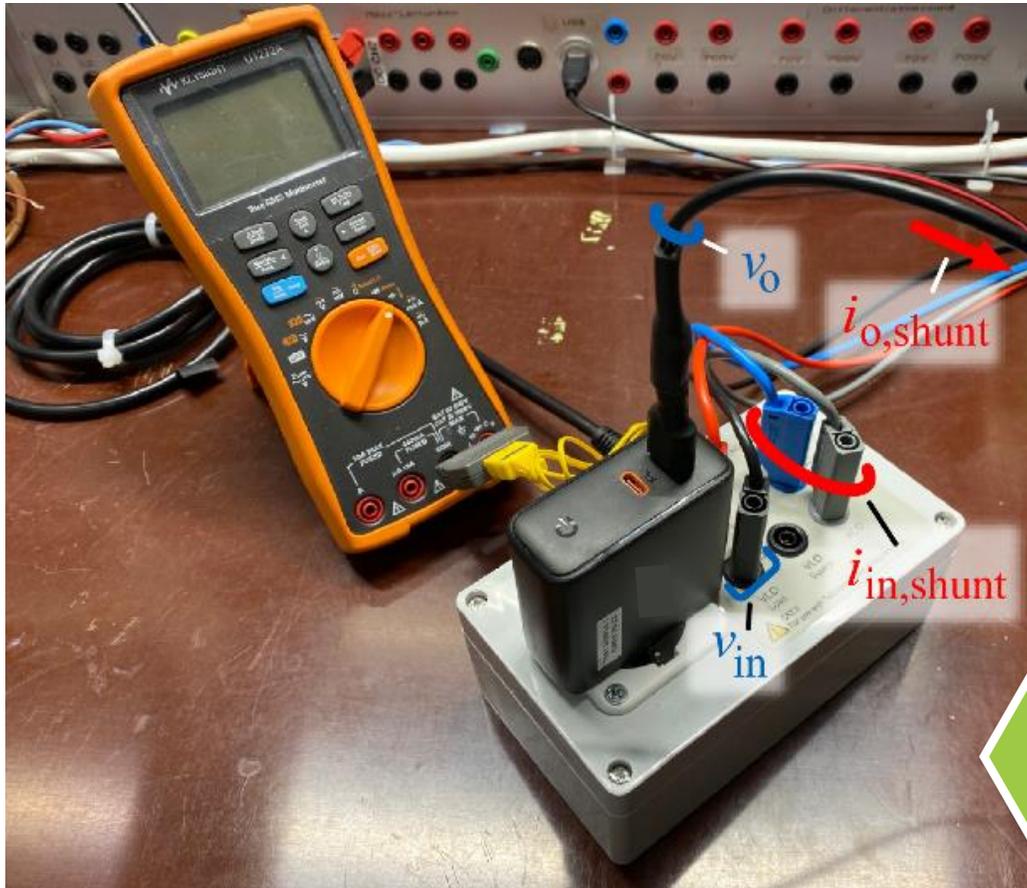
Weitere Informationen zum Produkt sind:

- Schaltfrequenz Besonders Relevant
- Topologie Besonders Relevant
- Gesamtvolumen/-Gewicht Besonders Relevant
- Interne Spannungen (ggf. z.B. Drain-Source-Spannung) Besonders Relevant
- Package (thermische Impedance) Von Vorteil
- Kommutationskreis bezogen auf par. Induktivitäten (Power loop) Von Vorteil
- Transformatorkerngröße and Type Von Vorteil
- Volumen der EMV-Filter Baugruppe Von Vorteil



PD Ausgangsspezifikation:

| DC Ausgangsspannung | Maximaler DC Ausgangsstrom | Maximale Ausgangsleistung |
|---------------------|----------------------------|---------------------------|
| 5 V | 3 A | 15 W |
| 9 V | 3 A | 27 W |
| 12 V | 3 A | 36 W |
| 15 V | 3 A | 45 W |
| 20 V | 3 A (3.25 A) | 60 W |



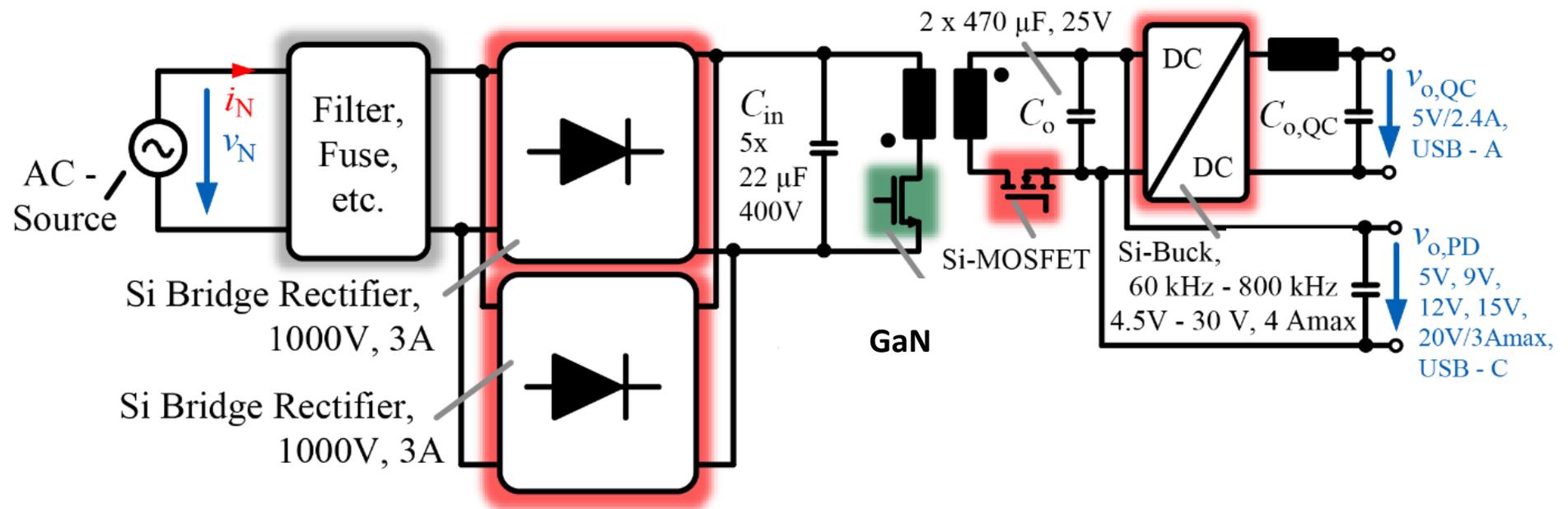
- Power Analyser: Tektronix PA3000
 - Integrierter 1 A Shunt: Für Eingangstrommessungen
 - Integrierter 30 A Shunt: Für Ausgangstrommessungen
- Tektronix Breakout- Box: BB1000-EU (240 V)
- Stromsenke/el. Last: Keithley 2380-500-30

Spannungsmessungen so nah wie möglich am DUT!

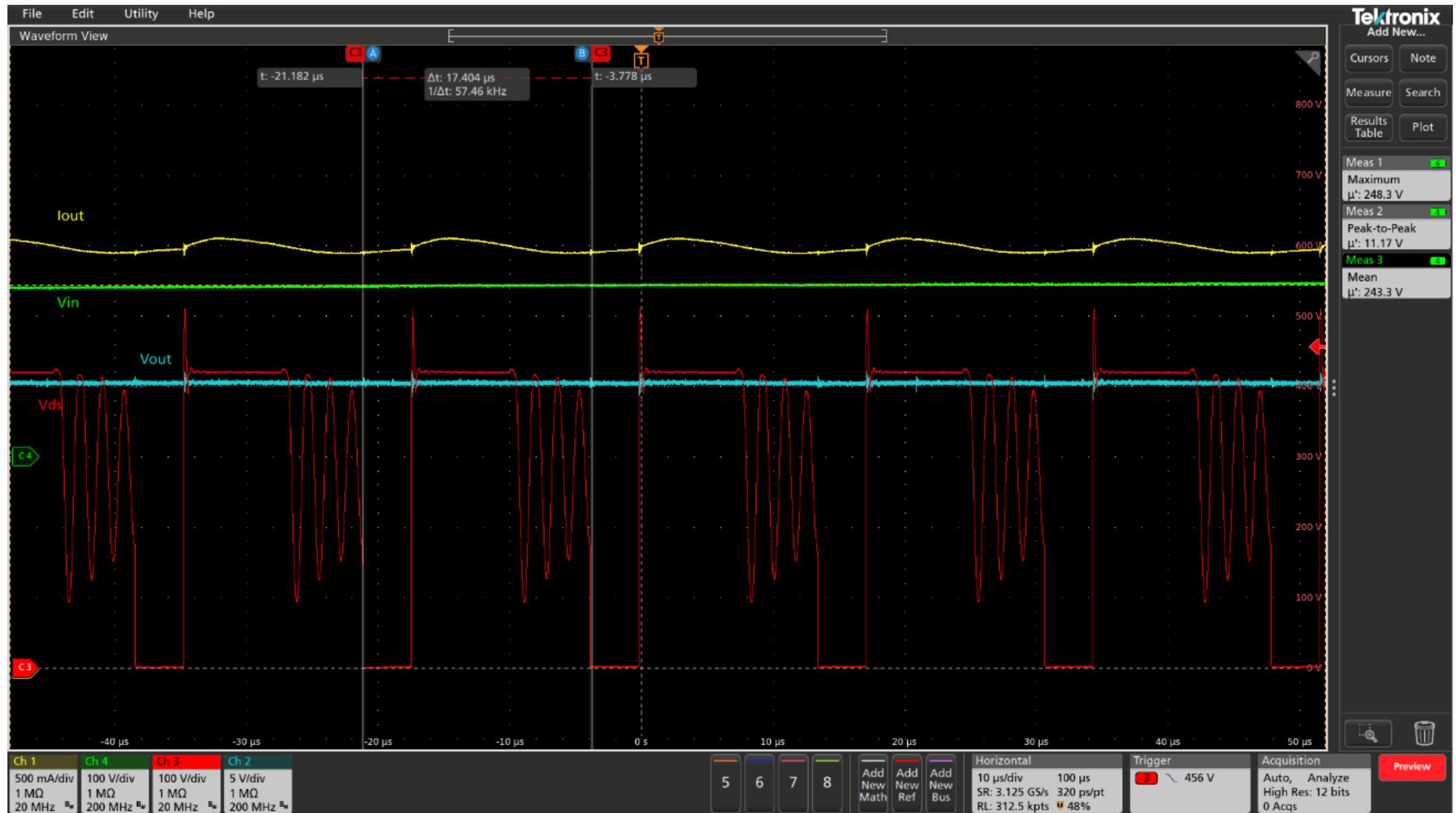
Mess-Prüfstand mit Tektronix Breakout- Box, Netzteil, Spannungs- sowie Strommessungen und einem Keysight U1272A zur Messung der Umgebungstemperatur.

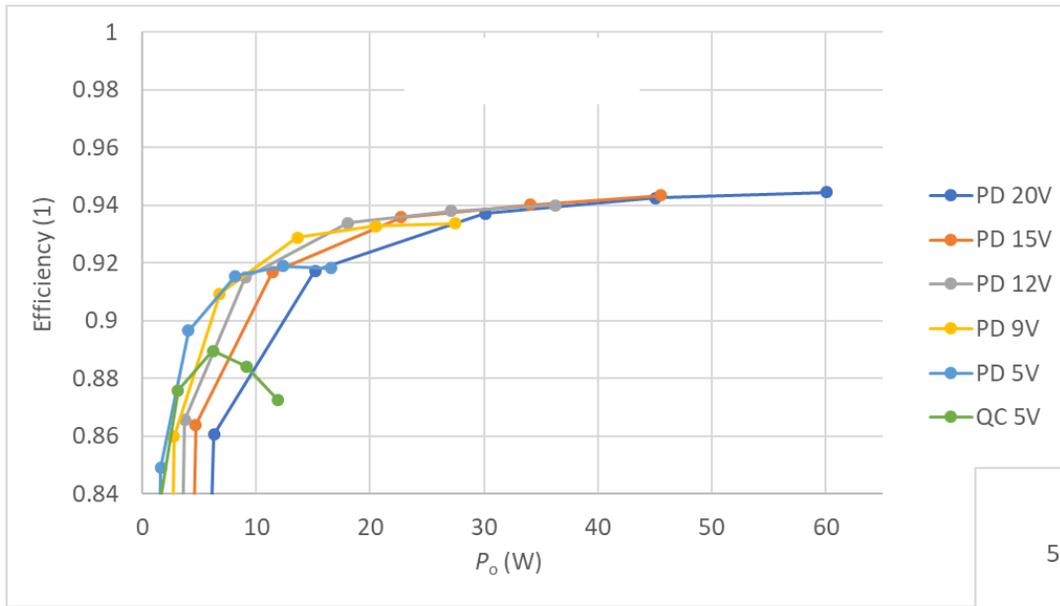
In dieser Abbildung sind der Power Analyser, die Stromquelle und die Kommunikationsboard nicht enthalten.

- B4 + Flyback (+ DC/DC Converter für QC)
- GaN: Flyback- primärseitig geschalten
- Si: Dioden- Brückengleichrichter, sekundärseitig Geschalten + DC/DC Converter



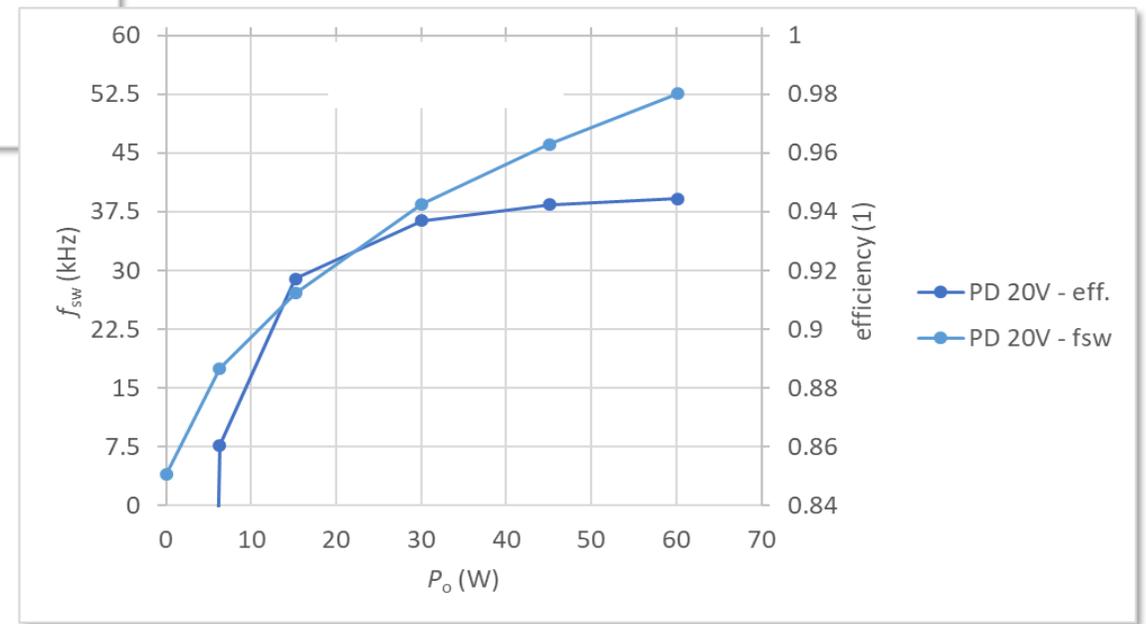
GaN A – Messergebnisse

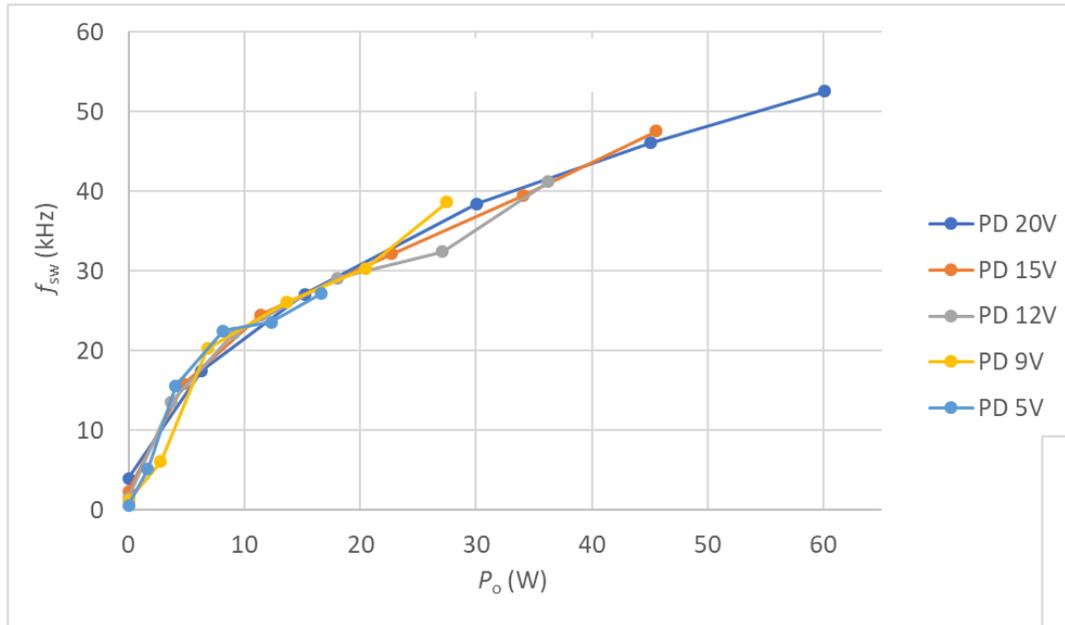




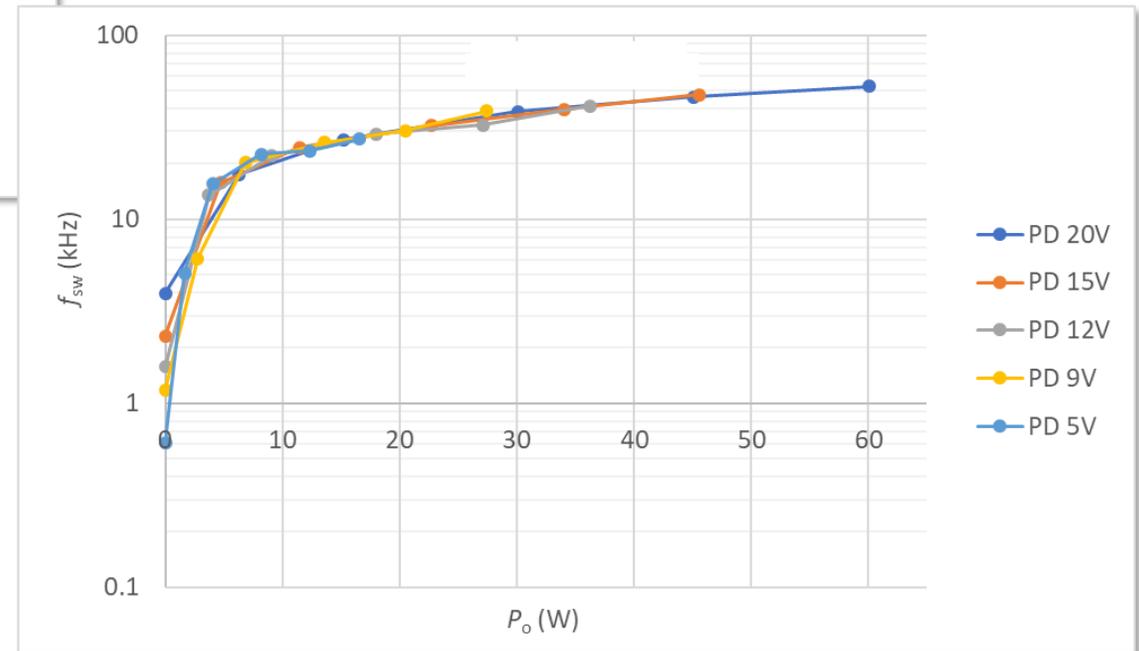
- Höhere Ausgangsspannung → Höhere Effizienz
- Anpassung der Schaltfrequenz f_{sw} des Flyback- Konverters unter Teil- bzw. Nulllastbetrieb

- QC: Niedrigste Effizienz (allerdings zusätzlicher DC/DC Konverter mit f_{sw} bis zu 800 kHz!)

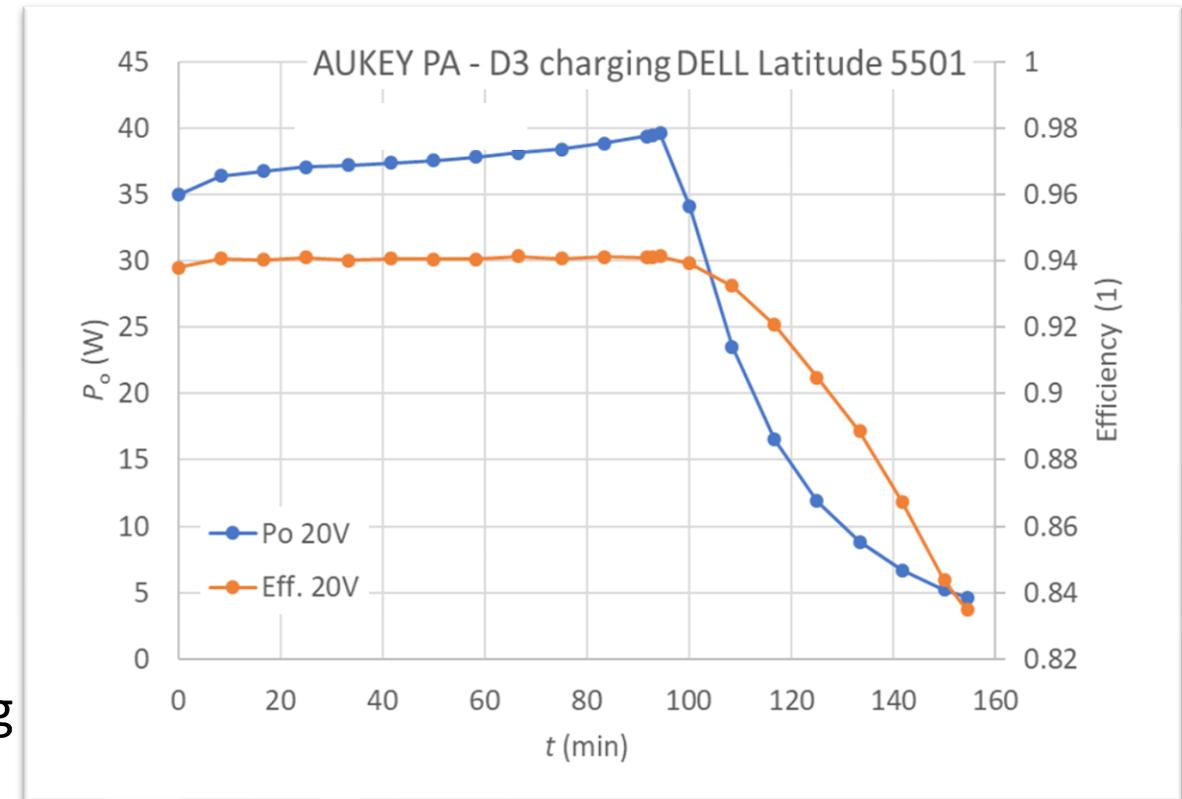




- Schaltfrequenz ohne Last (Leerlauf) < 3 kHz.
- Nur geringe Schaltfrequenzabweichungen in Abhängigkeit der Ladespannung (die größten Unterschiede ergeben sich im Leerlauf)



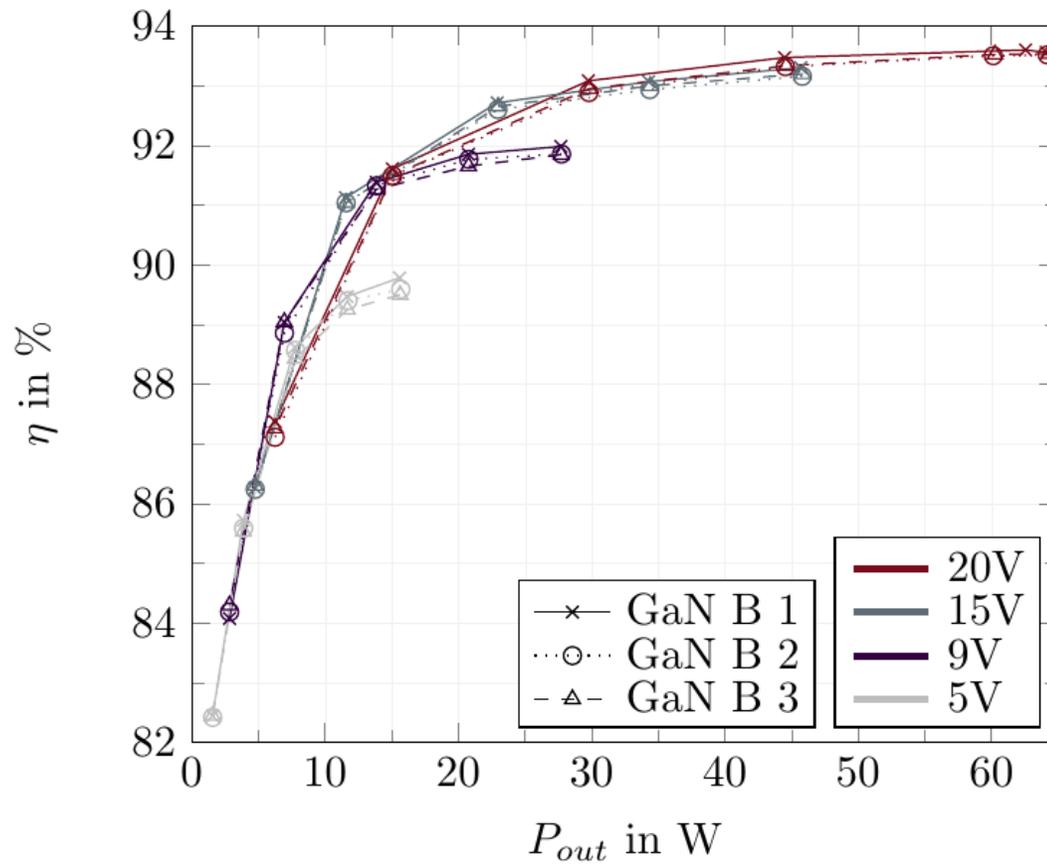
- Laptop komplett entladen (< 10%)
- Laptop geschlossen und heruntergefahren. Dies ist notwendig, um eine stabile Ladekurve sicherzustellen
- PD Laden: 20 V, DELL Laptop
- Maximal gelieferte Leistung während regulärem Ladevorgang: 40 W
- 60 W ausschließlich bei Laptop im Arbeitsmodus geliefert (Überbrückung kurzfristiger CPU-Anforderungen).
- Wenn PD und QC simultan angefordert wurden, resultierte eine maximale Eingangsleistung < 50 W.

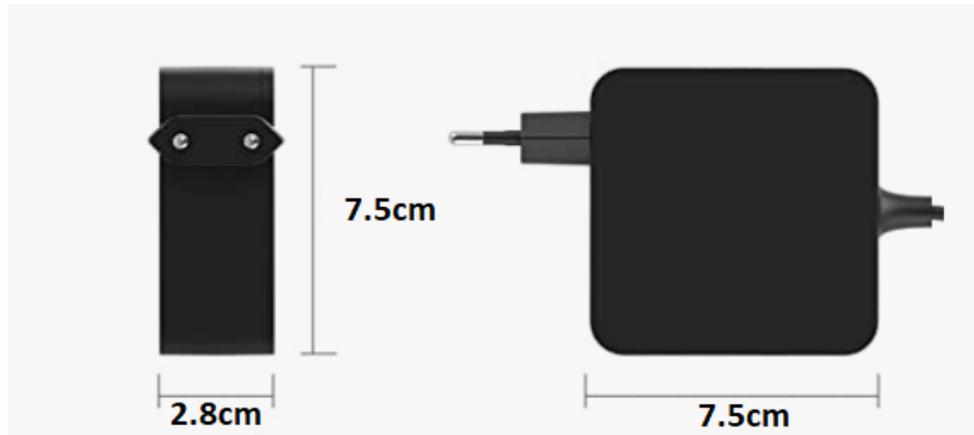




- Topologie: Gleichrichterbrücke gefolgt von einem Flyback und einer USB PD- PCB
- GaN ICs und Komponenten ausschließlich an der Primärstufe des Flyback's
- Zu kompakt verbaut, um die Schaltfrequenz zu messen
- Ausschließlich 5V, 9V, 15V und 20 V möglich (12V nicht möglich)
- **Leistungsdichte**
 - **0.977 kW/dm³ oder 17.07 W/in³** – ohne Steckeranschluss
- Spezifische Energie
 - 0.556 kW/kg – inklusive Steckeranschluss

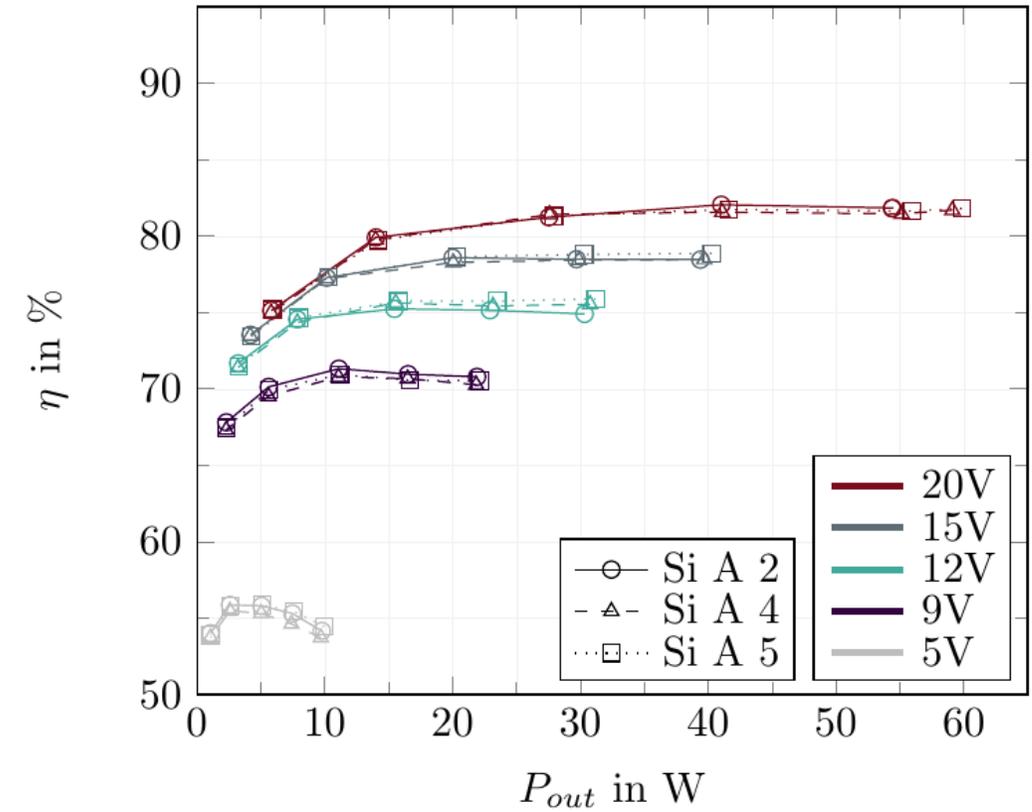
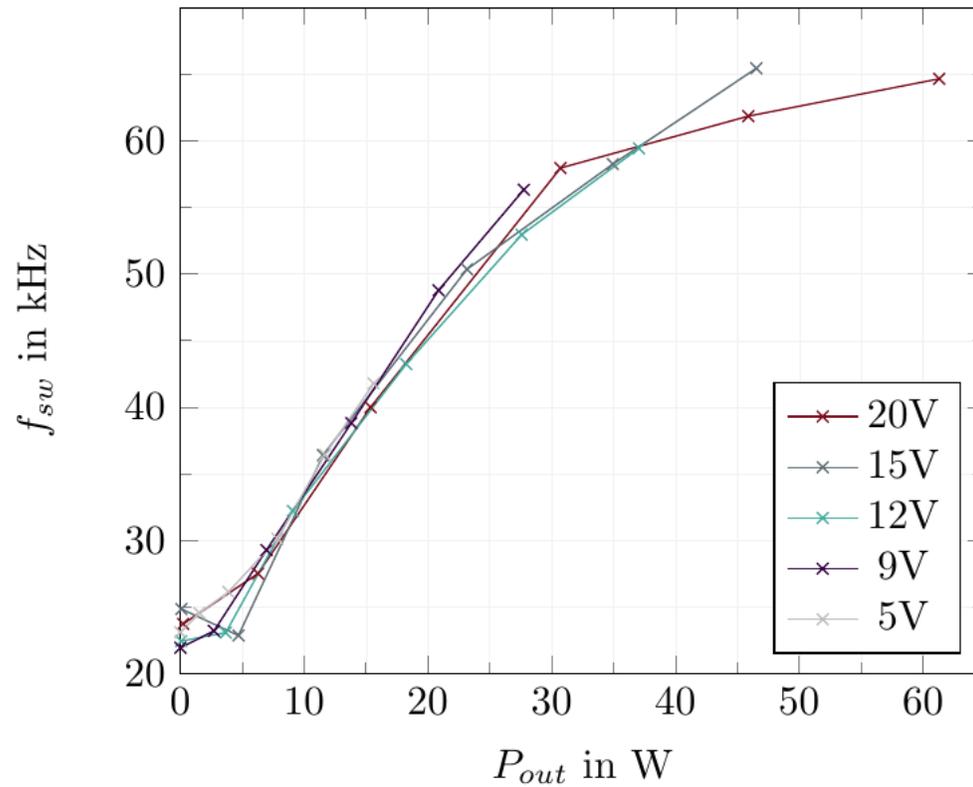
mit 10%, 25%, 50%, 75%, und 100% Belastung

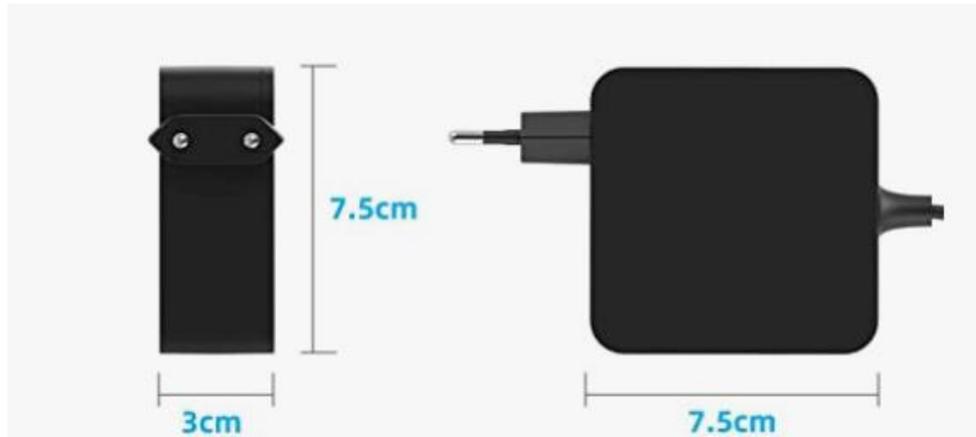




- Topologie: Gleichrichterbrücke gefolgt von einem Flyback-Konverter
- **Leistungsdichte**
 - **0.385 kW/dm³** or 6.33 W/in³
 - ohne Steckeranschluss
- Specific energy
 - 0.359 kW/kg
 - inklusive Steckeranschluss

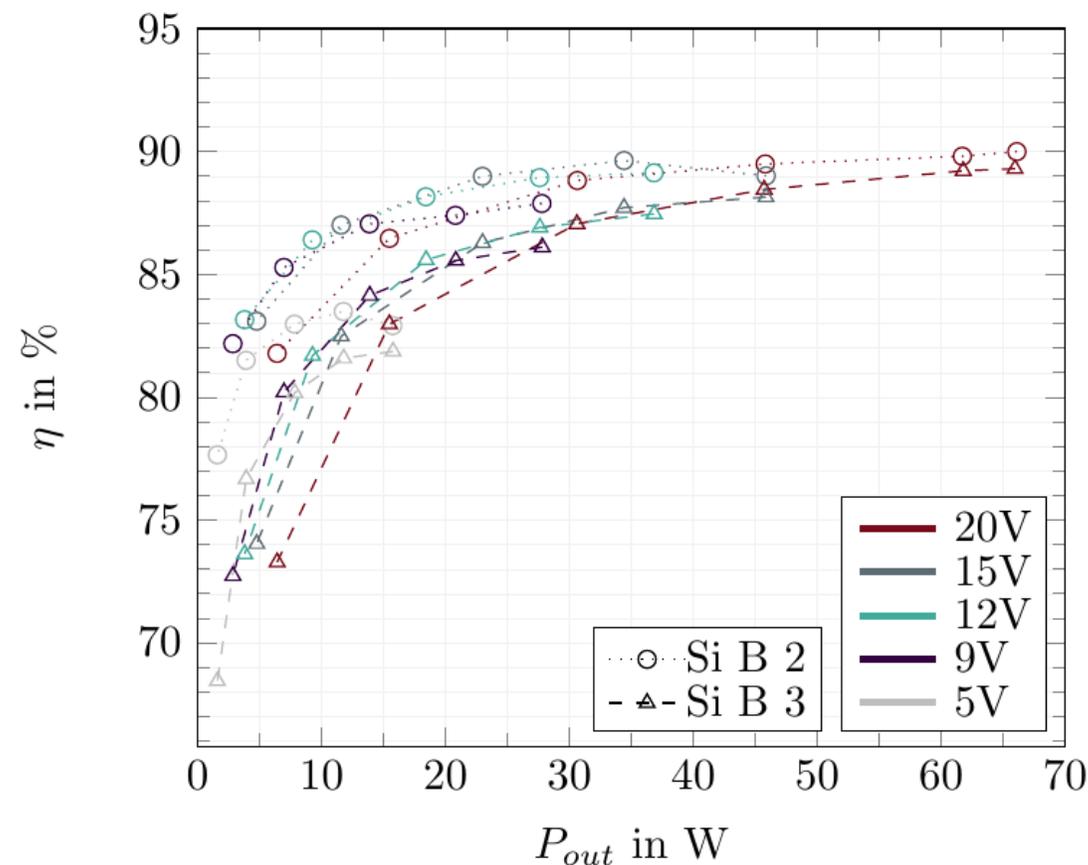
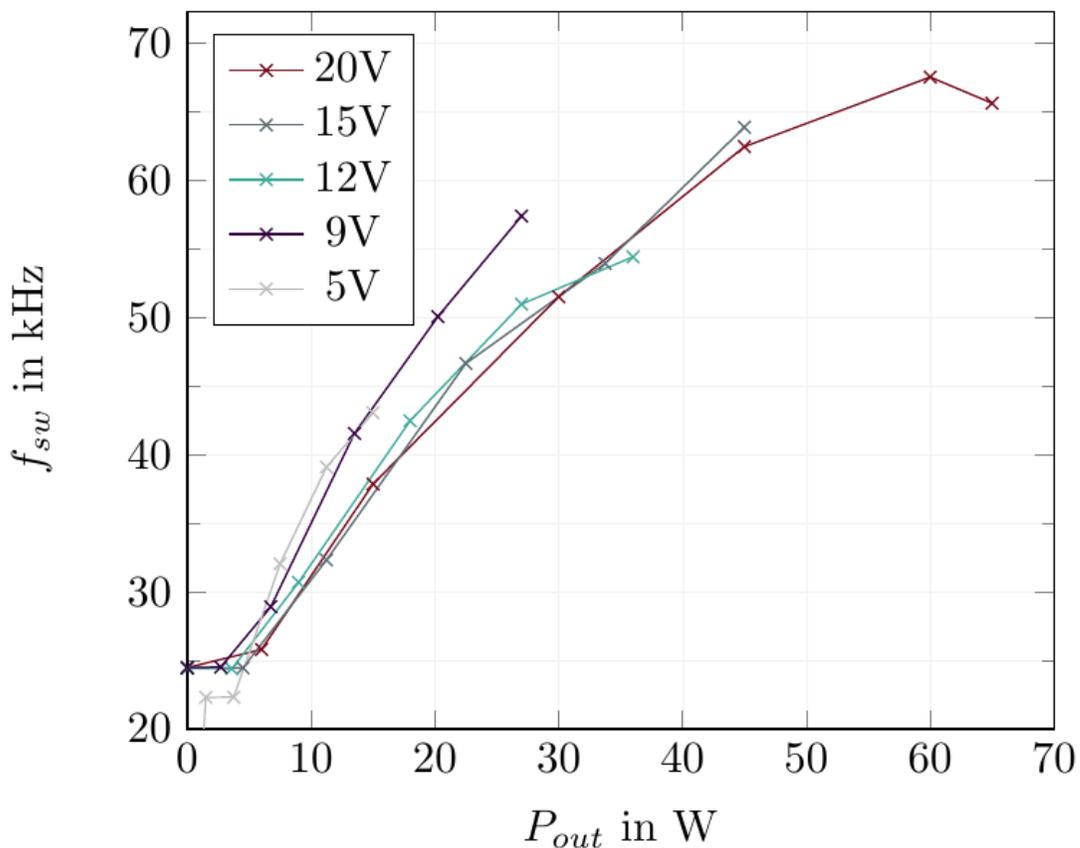
mit 10%, 25%, 50%, 75%, und 100% Belastung



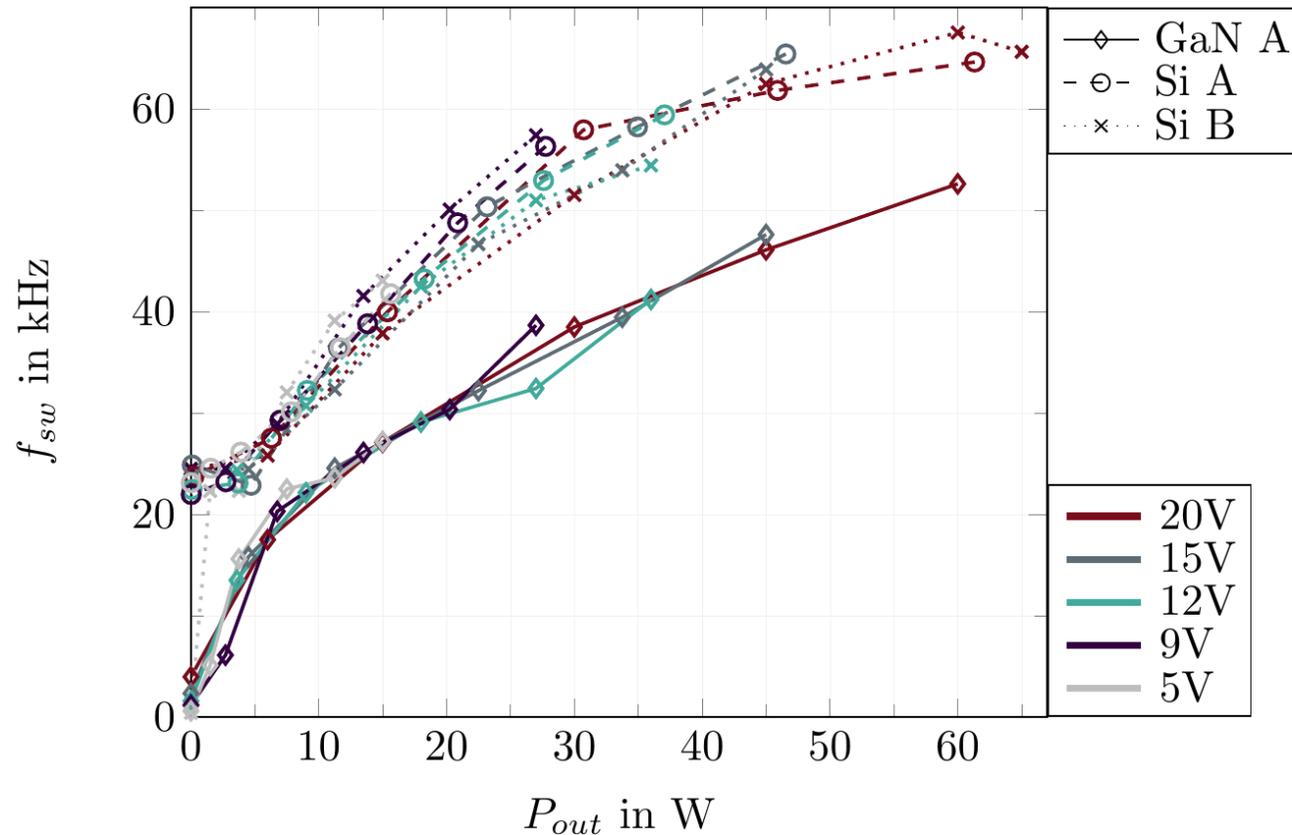


- Topologie: Gleichrichterbrücke gefolgt von einem Flyback-Konverter und einer USB- PCB
- Leistungsdichte
 - **0.385 kW/dm³** or 6.33 W/in³
 - ohne Steckeranschluss
- Specific energy
 - 0.374 kW/kg
 - inclusive Steckeranschluss

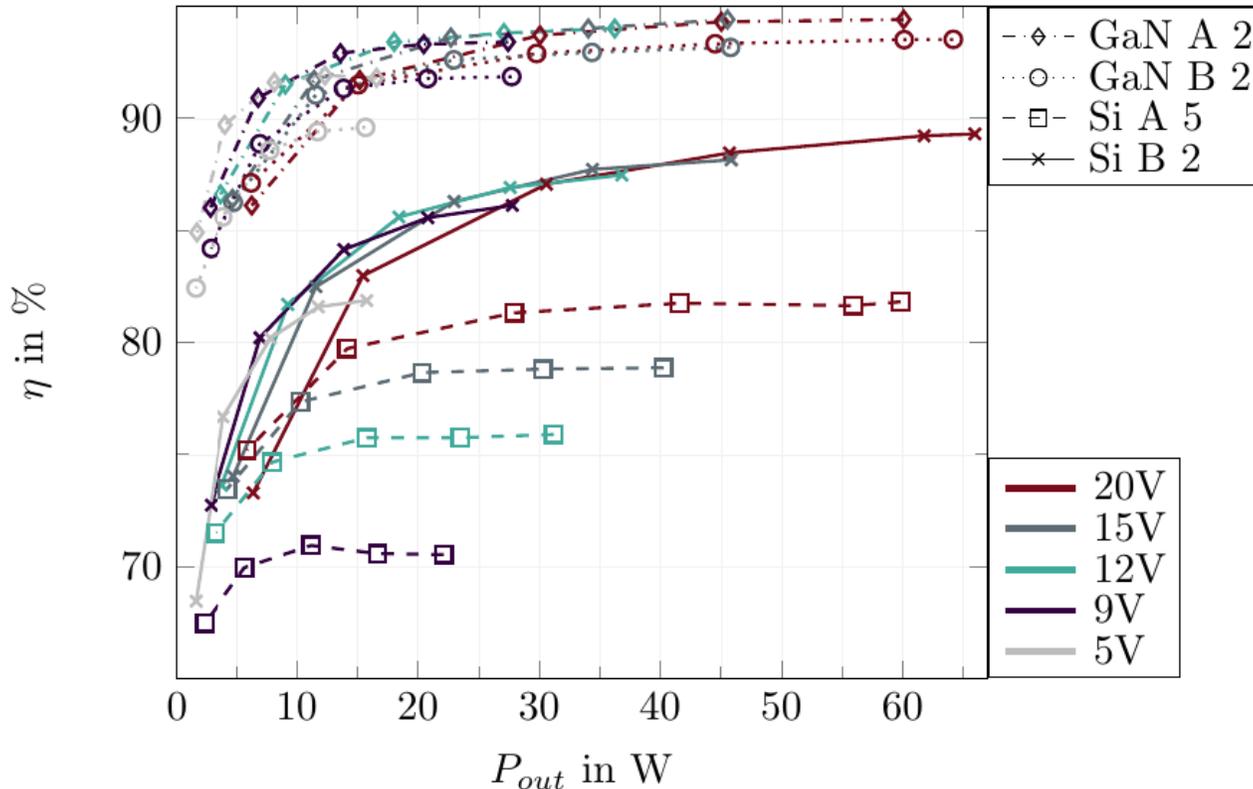
mit 10%, 25%, 50%, 75%, und 100% Belastung



Vergleich

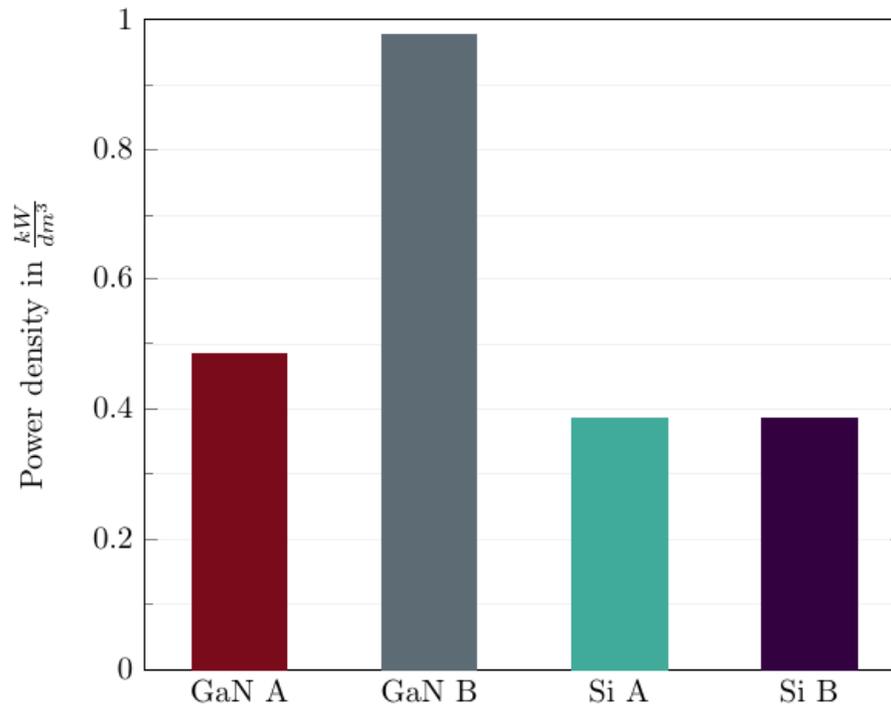


- Si-Ladegeräte: Schaltfrequenzen der unterschiedlichen Produkte sind ähnlich
- GaN-Ladegeräte: die Schaltfrequenzen dieser Ladegeräte sind sowohl im Vollastbetrieb als auch im Leerlauf niedriger als die Si-Referenzgeräte.

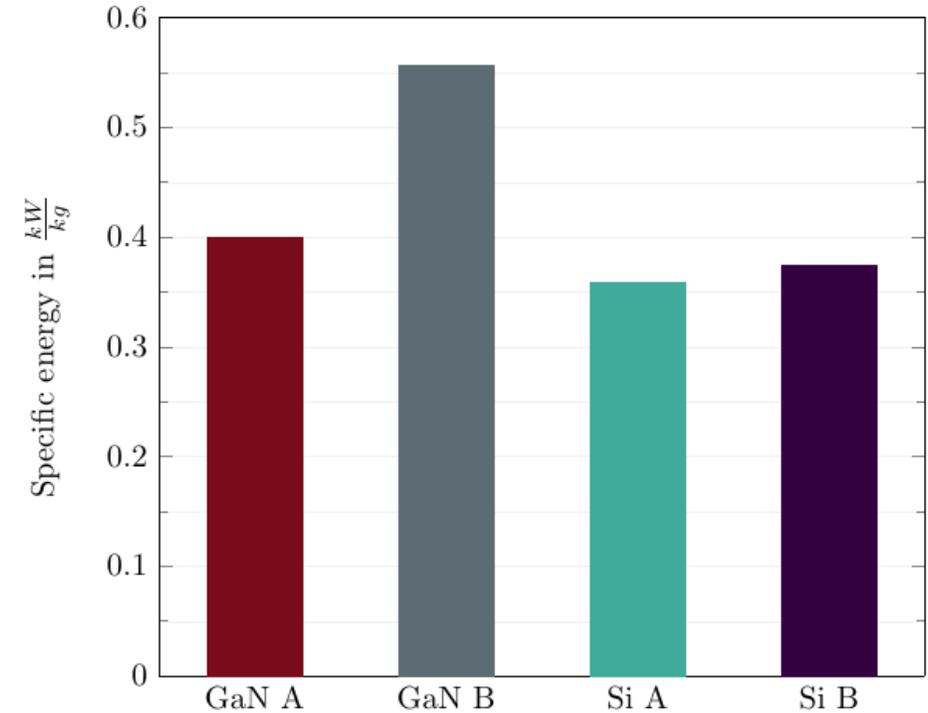


- Effizienz nimmt mit niedrigerer Ausgangsleistung ab, kann aber durch die Anpassung der Schaltfrequenz über weite Leistungsbereiche relative constant gehalten werden.
- Effizienzcharakteristiken der unterschiedlichen GaN Komponenten sind vergleichbar
- GaN weist selbst bei niedrigerer Ausgangsleistung eine höhere Effizienz als Si auf

Leistungsdichte



Leistung-zu-Gewicht Verhältnis

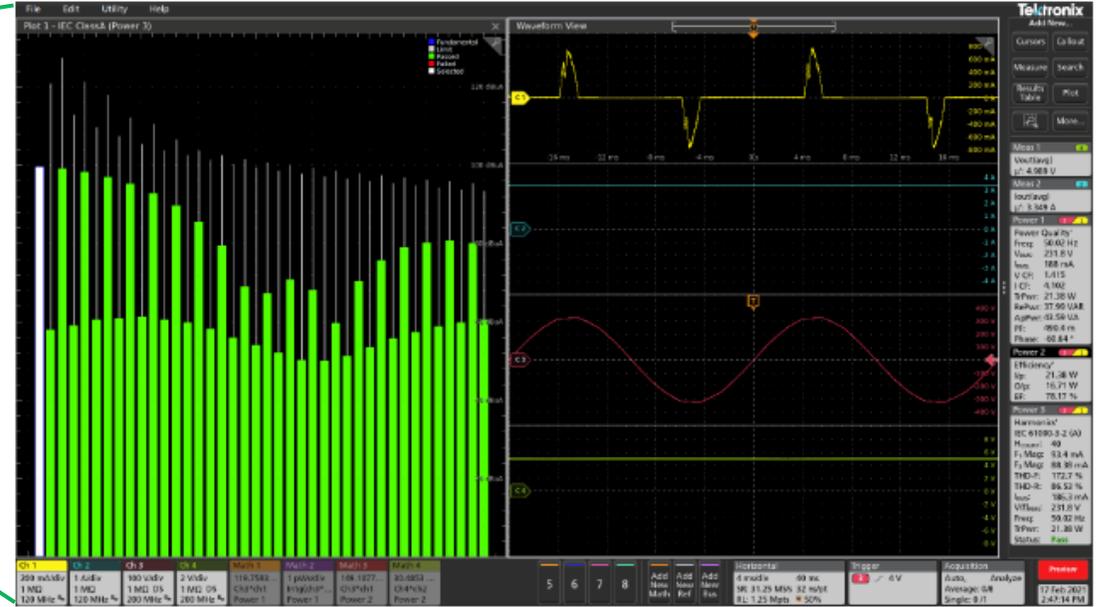


Messansatz 2: Oszilloskop und Zweikammer-Kalorimeter

Messaufbau für elektrische Messungen mit Oszilloskop

Effizienz und Leistungsdichte sind die Kriterien, die zum Vergleich verschiedener GaN- und Si-basierter Ladegeräte herangezogen werden:

MSO68B (Erweitert für Leistungsmessungen)



TCP0030A
(1 mA, 120 MHz)



THDP0200 (200 MHz)

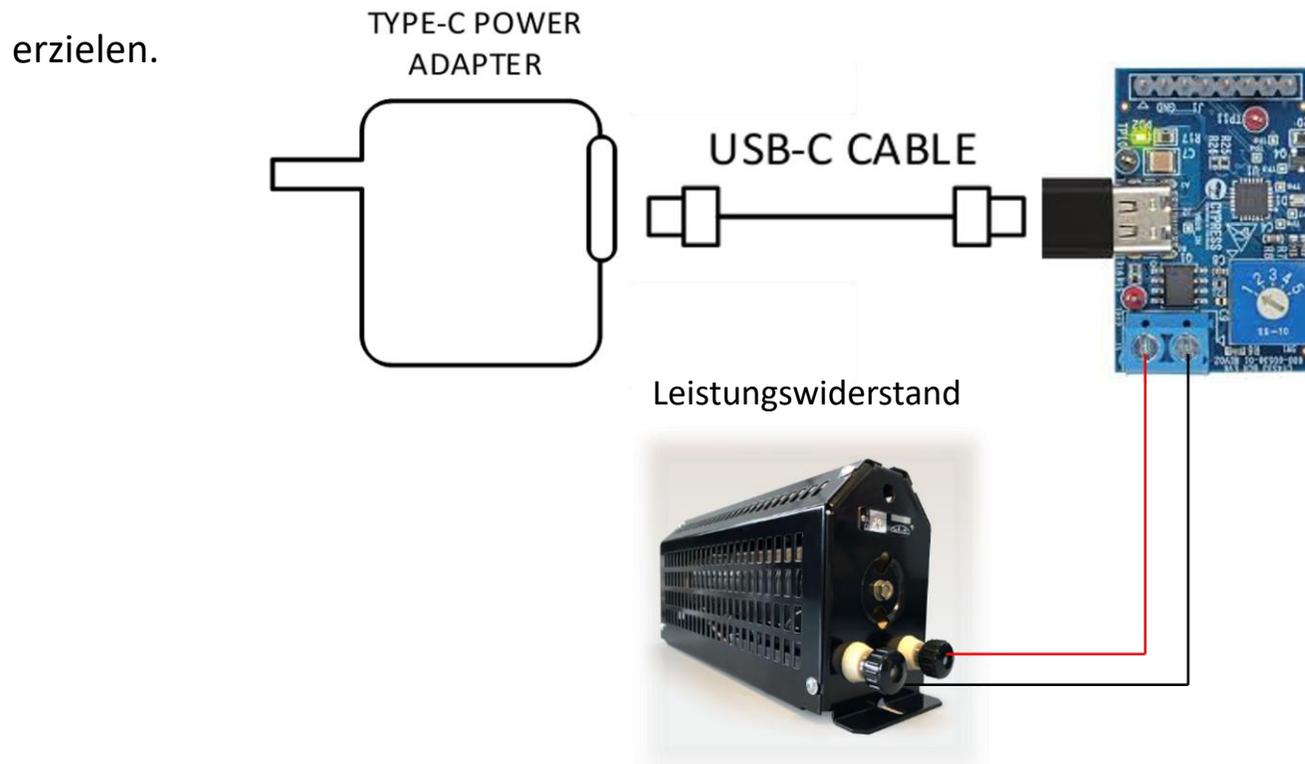


Entnommene Parameter :

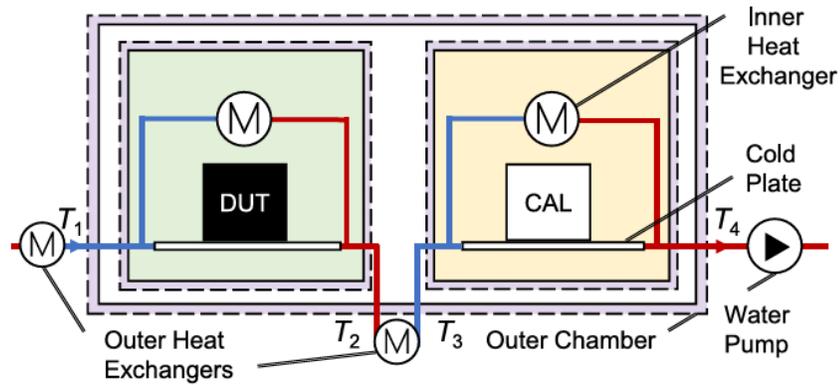
- Effizienz
- Harmonische Gesamtverzerrung (THD):
- Keine Anforderungen für diese Leistungstufen
- Leistungsdichte (*volumetrisch/gravimetrisch*)

Zugang zu den höheren Spannungsmodi des Netzteils ermöglichen:

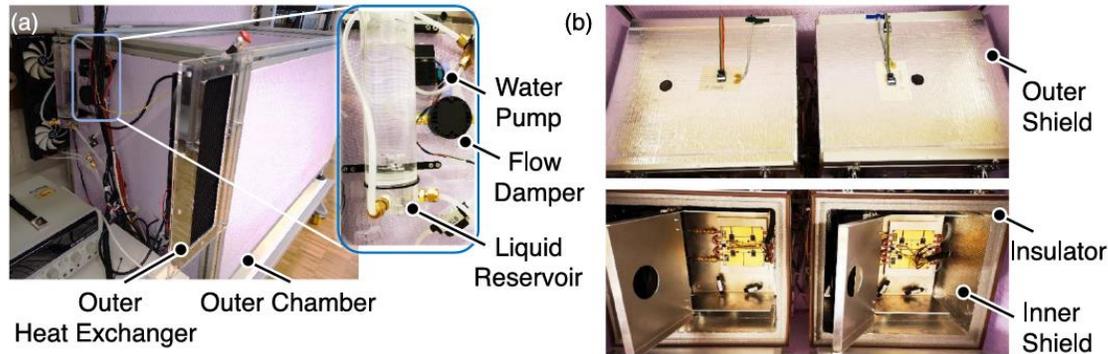
- Ein spezielles Kommunikationsinterface, welches Zugriff auf das USB-Kommunikationsprotokoll bietet
- Die Ausgangsspannung kann auf 5/9/12/15/20 V eingestellt werden, um unterschiedliche maximale Leistungen zu erzielen.



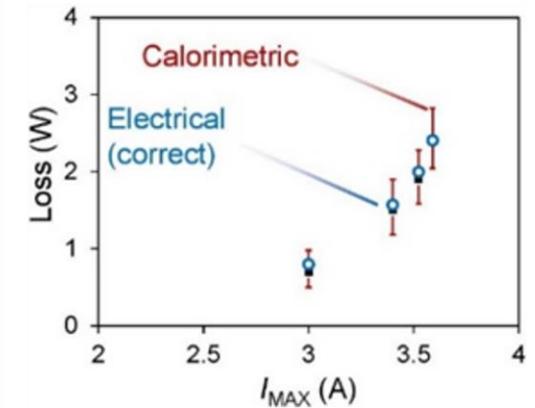
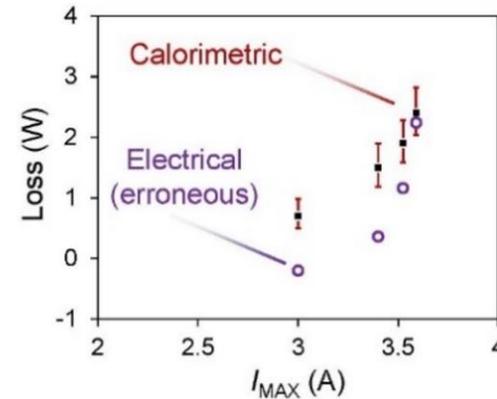
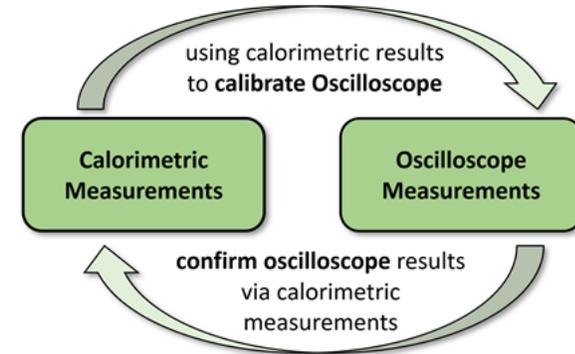
Hochpräzises Zweikammer-Kalorimeter [1]



$$T_2 - T_1 = T_4 - T_3 \Leftrightarrow P_{DUT} = P_{CAL}$$



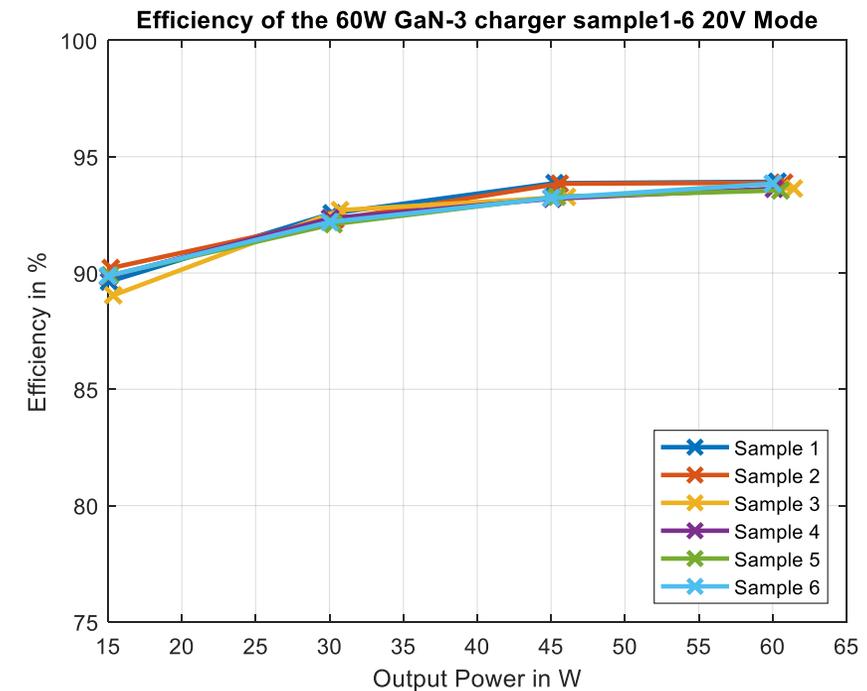
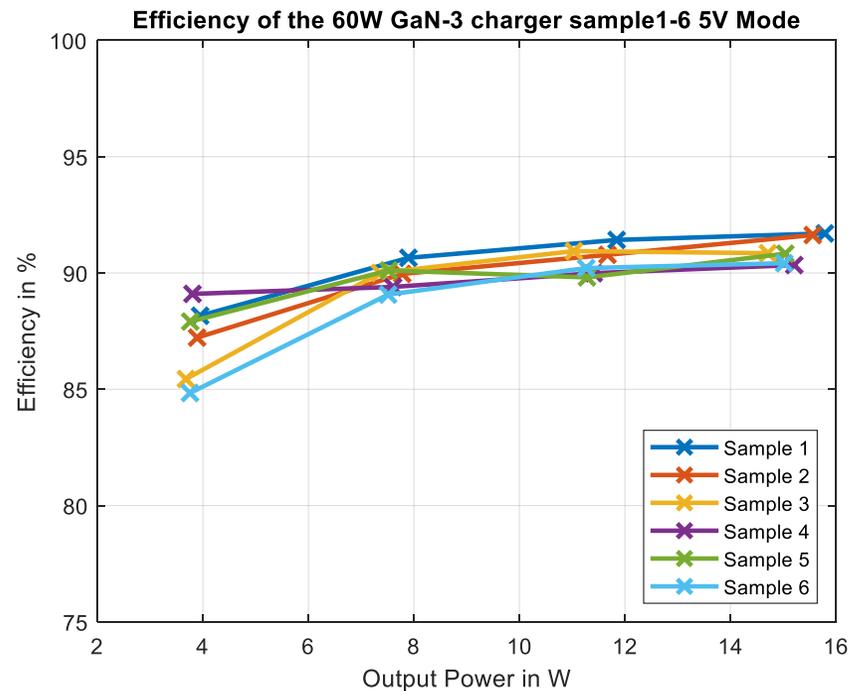
Ansatz für die Kalibrierung



Der elektrische Aufbau wurde zunächst mit dem Kalorimeter kalibriert und überprüft [1]

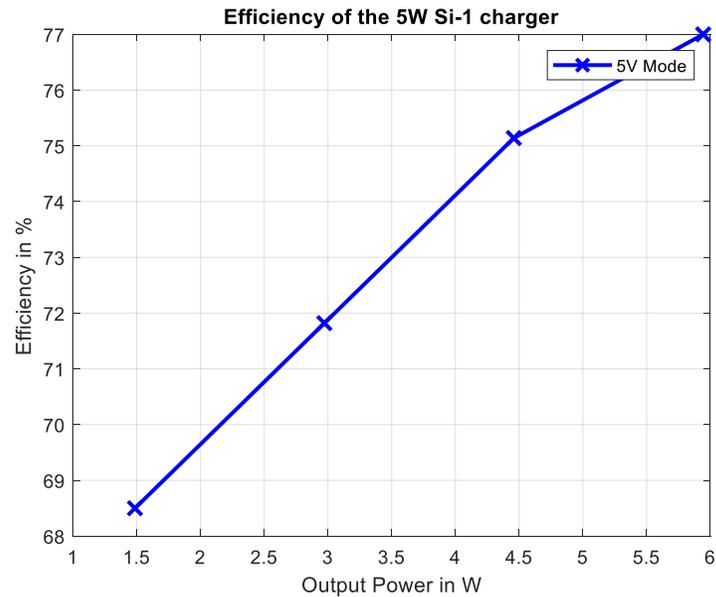
[1] A. Jafari et al., High-Accuracy Calibration-Free Calorimeter for the Measurement of Low Power Losses," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 1, pp. 23-28, 2021 (recognized with the 2021 IEEE Power Electronics Prize Letter Award)

60W GaN-basiertes Ladegerät - Samples 1-6

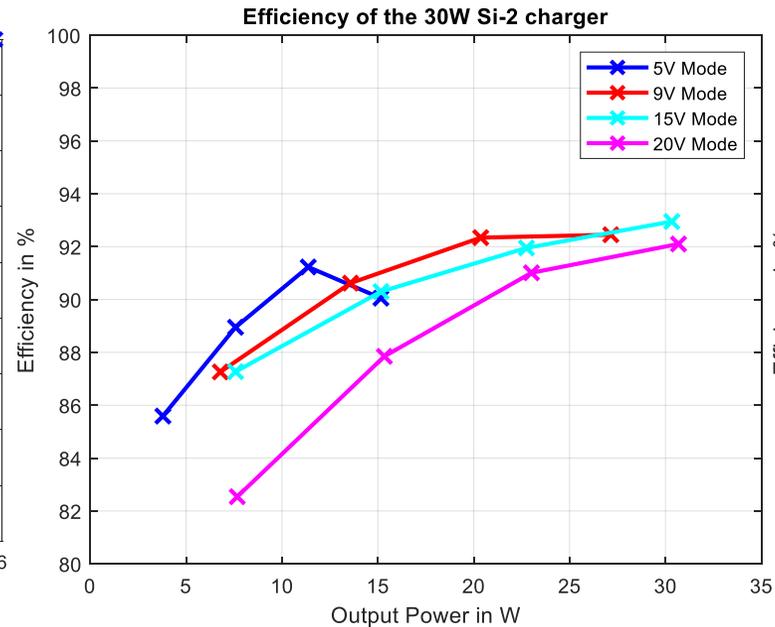


- Konsistentes elektrisches Messverfahren im hohen Leistungsbereich für verschiedene Modi
- Größere Unterschiede zwischen den Samples bei niedrigen Leistungen beobachtet

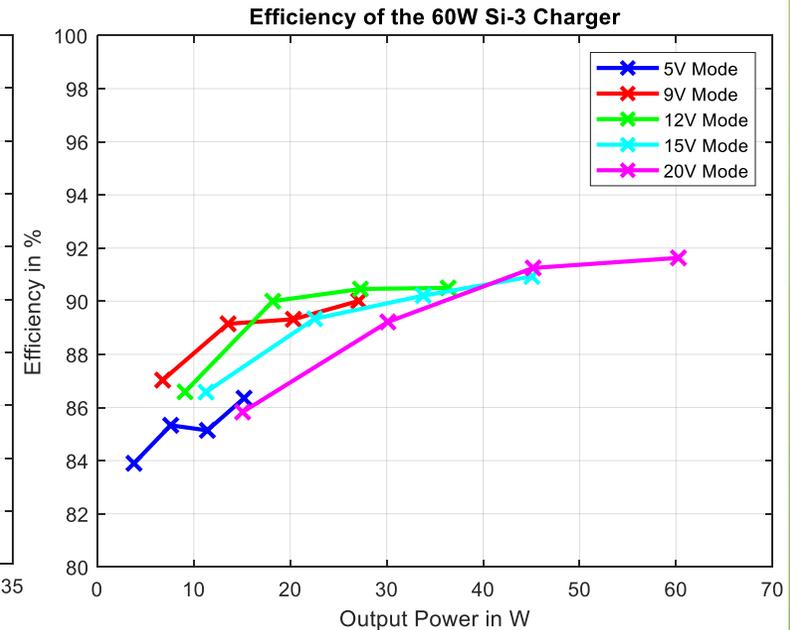
- Si-1 Ladegerät – 5 W



- Si-2 Ladegerät – 30 W



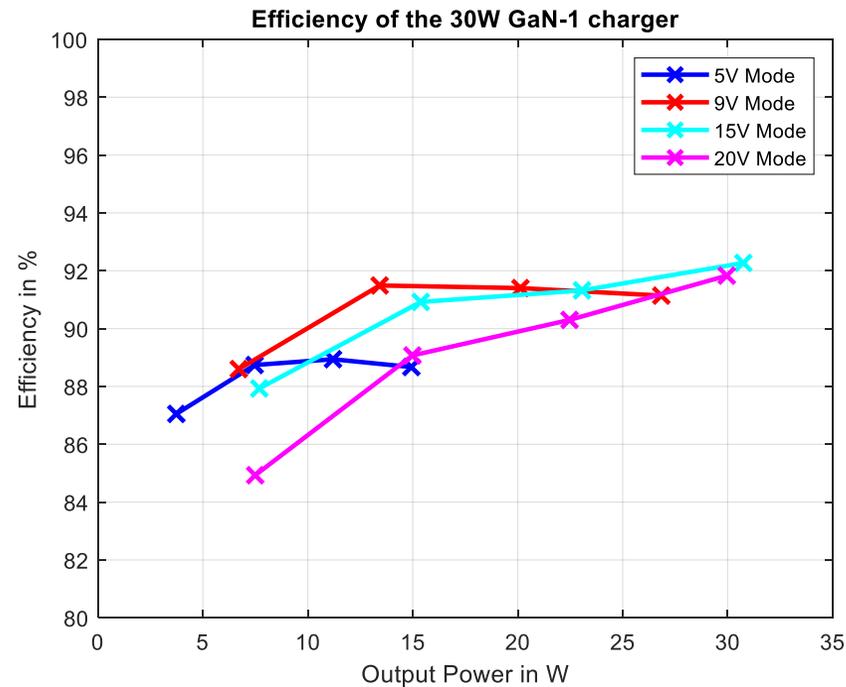
- Si-3 Ladegerät – 60 W



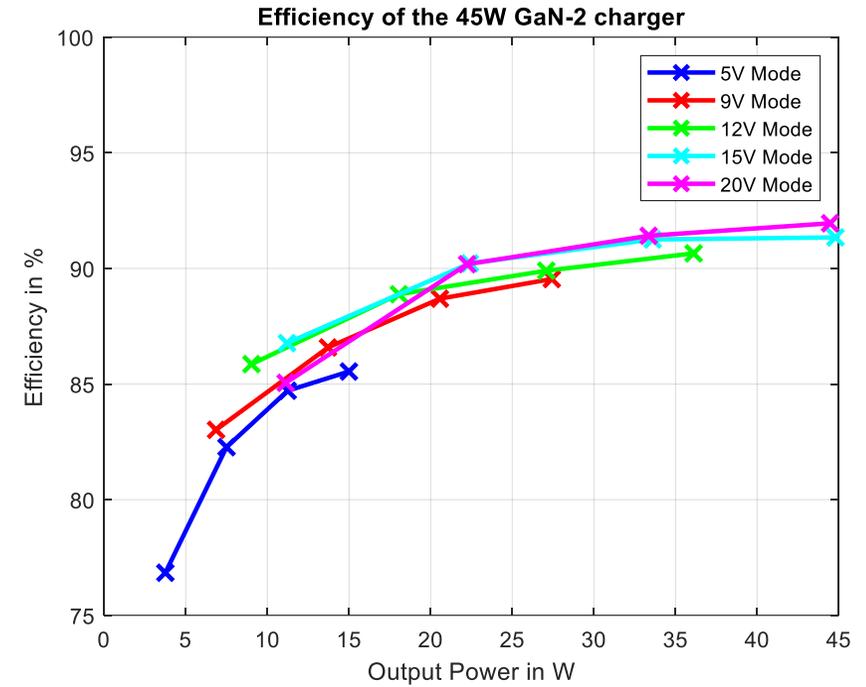
Nicht alle Spannungsmodi weisen den gleichen Wirkungsgrad auf:

Der Modus mit der niedrigsten Spannung, der auf die Nennleistung zugreift, ist generell effizienter.

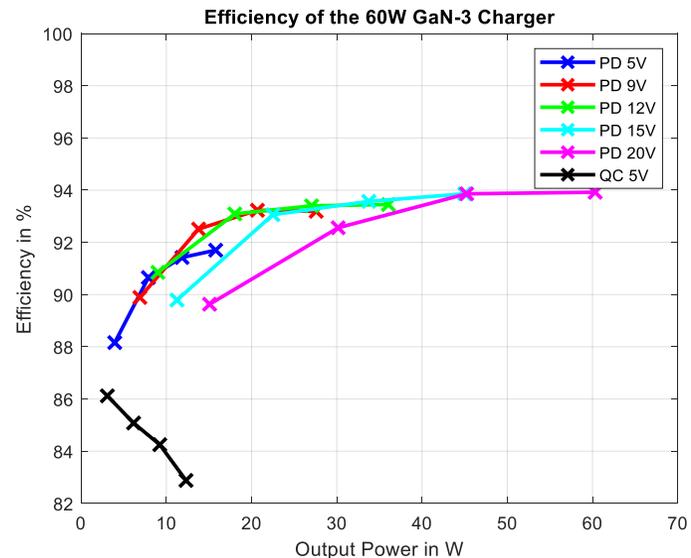
- GaN-1 Ladegerät – 30 W



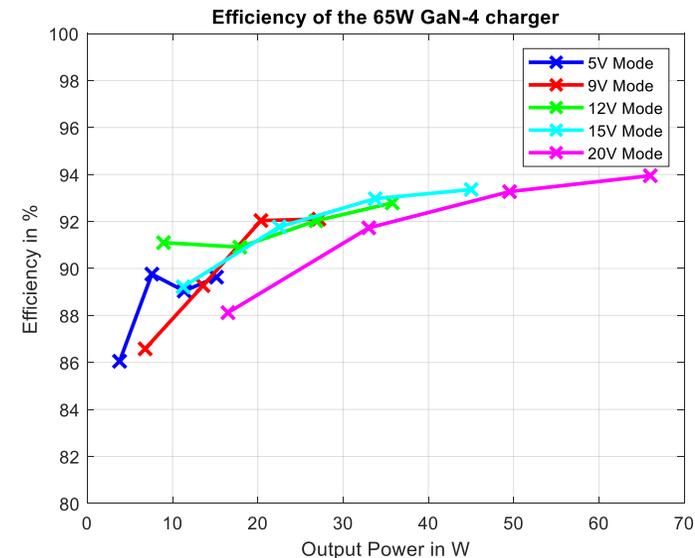
- GaN-2 Ladegerät – 45 W



- GaN-3 Ladegerät – 60 W



- GaN-4 Ladegerät – 65 W

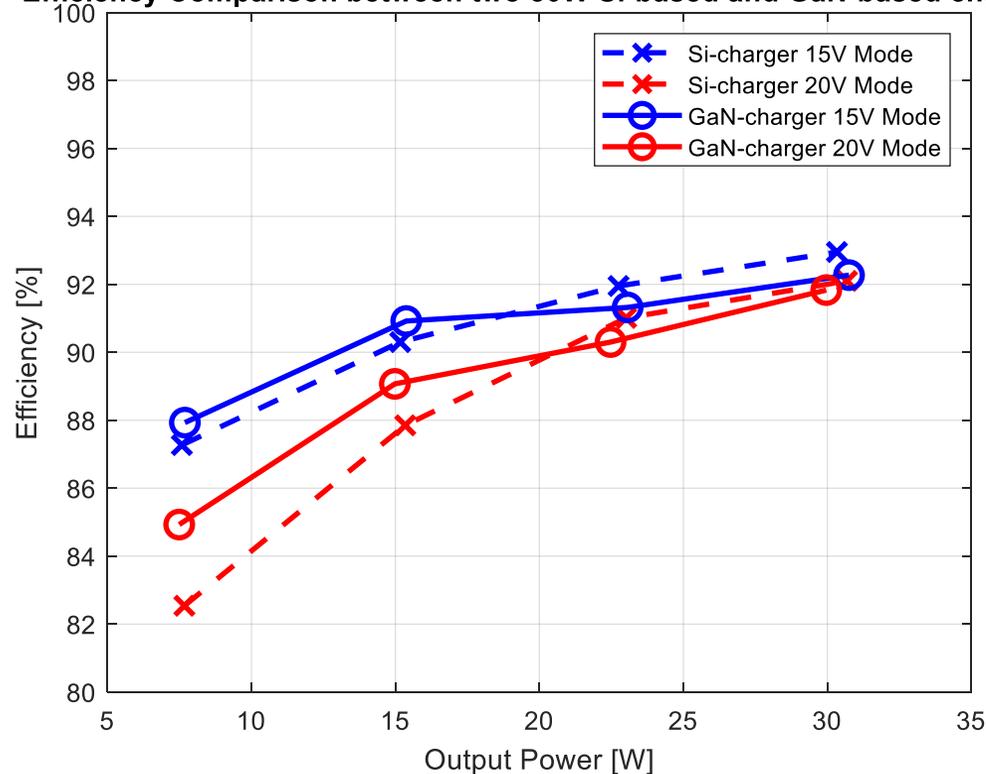


Nicht alle Spannungsmodi weisen den gleichen Wirkungsgrad auf:

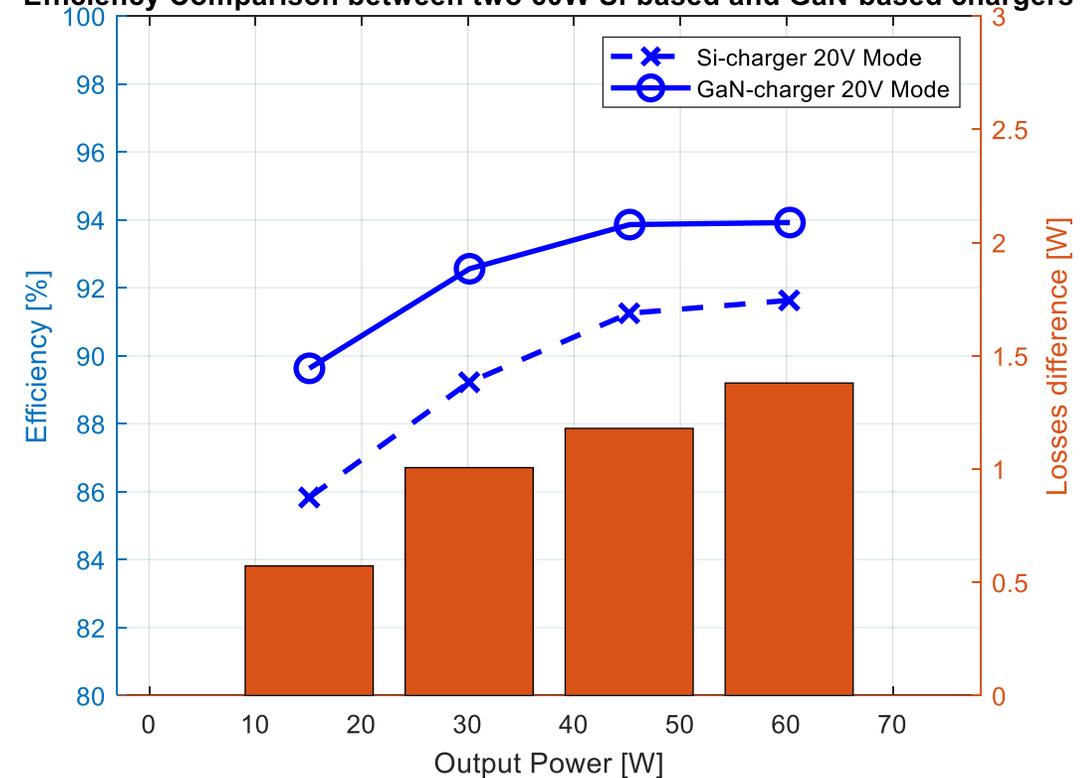
Der Modus mit der niedrigsten Spannung, der auf die Nennleistung zugreift, ist generell effizienter.

Vergleich - elektrische Effizienz (Si, GaN)

Efficiency Comparison between two 30W Si-based and GaN-based charger



Efficiency Comparison between two 60W Si-based and GaN-based chargers

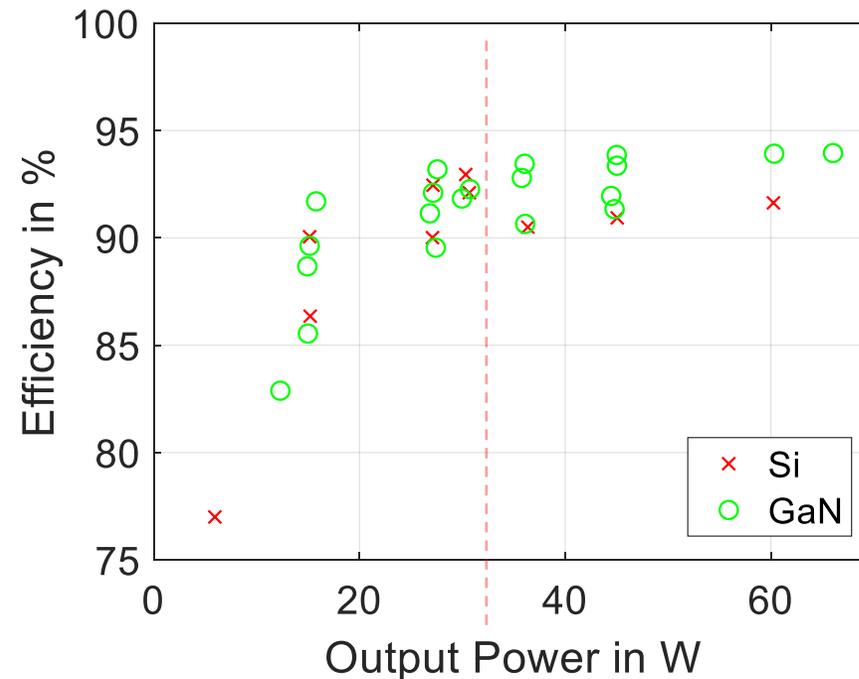


Bei den 30W-Ladegeräten auf Si- und GaN-Basis ist die Leistung sehr ähnlich;

Bei den 60W-Ladegeräten zeigt die GaN-basierte Lösung einen höheren Wirkungsgrad
(27 % weniger Verluste)

Vergleich - elektrische Effizienz (Si, GaN)

Ergebnisse für unterschiedliche Ladegeräte in verschiedenen Spannungsmodi mit maximaler Ausgangsleistung

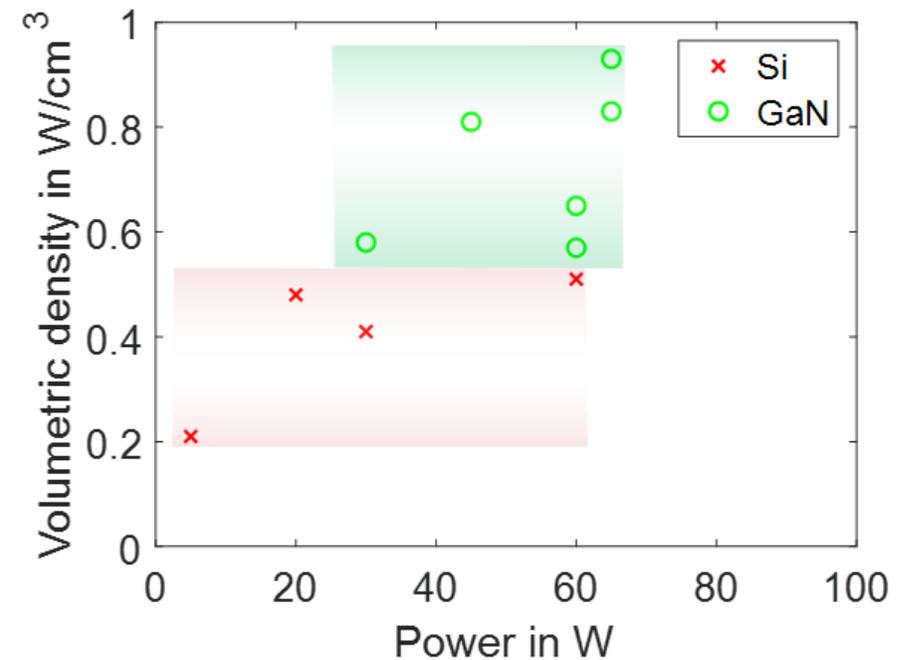
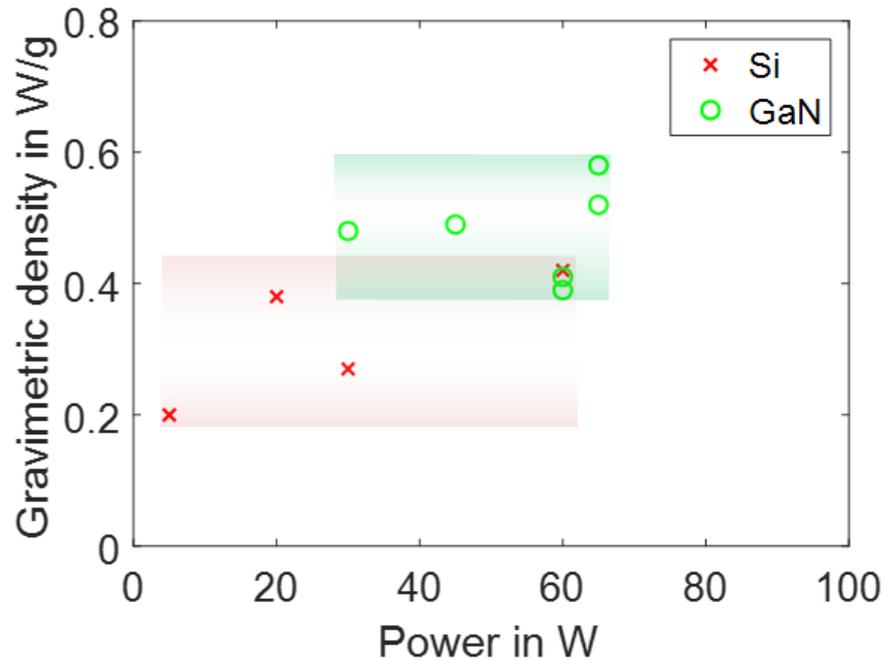


Im Allgemeinen übertreffen GaN-basierte Ladegeräte die Si-basierten im Leistungsbereich über 30 W an Effizienz:

Erkennbar ist eine Steigerung der Effizienz um etwa 2-3%

Vergleich - Leistungsdichten (Si, GaN)

Gesamtausgangsleistungsdichte für jedes Ladegerät bei Vollast



GaN-basierte Ladegeräte bieten höhere Leistungsdichten (*volumetrisch und gravimetrisch*):
bei GaN bis zu zweimal höher als bei Si-Ladegeräten

Vernetzung und Ergebnistransfer

Zielgruppen und Interessensvertreter:innen

IEA 4E PECTA bereits ein starkes Netzwerk bestehend aus nationalen und internationalen Vertreter:innen aus den Bereichen i) Forschung, ii) Industrie und iii) Politik vorweisen.

Um alle Stakeholder (sowohl national also auch international) entsprechend über die gesamte Laufzeit erfolgreich einzubinden, hat sich PECTA unter anderem den folgenden Disseminationstools bedient:

National:

| Nationale Kommunikationsstrategie | PECTA Website | Nachhaltig Wirtschaften Website | Policy Brief | Workshops | Einbindung in Lehrtätigkeiten |
|-----------------------------------|---------------|---------------------------------|--------------|-----------|-------------------------------|
| Forschung | X | X | | X | X |
| Industrie | X | X | | X | X |
| Politik | X | X | X | X | |

International:

| Internationale Kommunikationsstrategie | PECTA Website | Präsentation bei 4E ExCo Meetings und Annex Meetings | Nachhaltig Wirtschaften Website | Präsentation/ Publikationen auf int. Fachtagung | Policy Brief | Workshops |
|--|---------------|--|---------------------------------|---|--------------|-----------|
| Forschung | X | | X | X | | X |
| Industrie | X | | X | X | | X |
| Politik | X | X | X | | X | X |

- Auf der PECTA Website werden PECTA Publikationen und aktuelle Neuigkeiten sowie Ankündigungen verbreitet.
- Die Nachhaltig Wirtschaften Webseite bietet aktuelle Informationen über den IEA 4E PECTA Annex.
- Workshops ermöglichen es Expert:innen und politischen Interessensvertreter:innen Inputs zum aktuellen Status unterschiedlicher Tasks einzubringen und sich über aktuelle Themen an denen gerade gearbeitet wird zu informieren.
- Sämtliche Ergebnisse und Fortschritte wurden auch 2-mal jährlich beim 4E ExCo Meeting präsentiert und diskutiert.
- Disseminationsaktivitäten wie zum Beispiel Vorträge, Publikationen etc. sind in den nachfolgenden Tabellen ausführlich dargestellt.

Disseminationsaktivitäten

| Datum | Event | Titel |  | Autoren | Art der ö. Beteiligung |
|------------|---|---|---|--|------------------------|
| Mar. 2021 | WBG Power Center Seminar | IEA/PECTA activities Seminar | - | P. Bennich, P. Bergman | - |
| Mar. 2021 | Kurzpräsentation im Zuge d. Vorlesung – TU Wien | Renewable Energy Power Electronic Converters | x | M. Makoschitz | Vortrag |
| April 2021 | PECTA Experts Workshop | PECTA Experts Workshop 2021 | x | PECTA Taskleaders, MC und OA | Vortrag |
| April 2021 | Online Publication | 4E annual report 2020 (PECTA) | x | M. Ellis, M. Makoschitz et al. | Publikation |
| Nov. 2021 | CIGRE Conference | New Power Electronics Technologies for Future Power Systems | x | M. Makoschitz, S. Biswas | Publikation & Vortrag |
| 2021/2022 | e.nova Konferenz 2021 | A “Life cycle thinking” approach to assess differences in the energy use of SiC vs. Si power semiconductors | x | A. T. Diaz, S. Schmidt, S. Glaser, M. Makoschitz | Publikation & Vortrag |

| Datum | Event | Titel |  | Autoren | Art der ö. Beteiligung |
|-------------|---|---|---|---|------------------------|
| Okt. 2021 | Kurzpräsentation im Zuge d. Vorlesung – FH Technikum Wien | Ansteuerschaltungen in der Leistungselektronik | x | M. Makoschitz | Vortrag |
| Jänner 2022 | Online Publication | 4E annual report 2021 (PECTA) | x | M. Ellis, M. Makoschitz et al. | Publikation |
| März 2022 | Kurzpräsentation im Zuge d. Vorlesung – TU Wien | Renewable Energy Power Electronic Converters | x | M. Makoschitz | Vortrag |
| April 2022 | PECTA Experts Workshop | PECTA Established Phase and task status until 2022 | x | M. Makoschitz, R. Brüniger, A. Diaz, P. Bennich | Vortrag |
| Juni 2022 | KTH conference | Wide Bandgap Semiconductors for Sustainable Power Electronics | - | C.-M. Zetterling | - |

Disseminationsaktivitäten

| Datum | Event | Titel |  | Autoren | Art der ö. Beteiligung |
|-----------|--|--|---|---|------------------------|
| Juni 2022 | AIT Strategic Advisory Board Meeting | The potential of WBG semiconductors | x | M. Makoschitz | Vortrag |
| Okt. 2022 | Kurzpräsentation im Zuge d. Vorlesung – FH Technikum Wien | Ansteuerschaltungen in der Leistungselektronik | x | M. Makoschitz | Vortrag |
| Nov. 2022 | IEEE Austria Chapter Event Series – Modern Power System Technologies – Towards a Sustainable Energy Future | Environmental Impacts of Wide Band Gap Semiconductor Technology Applications | x | R. Pammeringer, S. Glaser Event Organisator: M. Makoschitz | Vortrag |
| Dez. 2022 | Abstimmungsmeeting BMK | IEA 4E PECTA | x | M. Makoschitz | Vortrag |
| März 2023 | Online Publication | 4E annual report 2022 (PECTA) | x | M. Ellis, M. Makoschitz et al. | Publikation |

Disseminationsaktivitäten

| Datum | Event | Titel |  | Autoren | Art der ö. Beteiligung |
|-----------|--|---|---|---|-------------------------------------|
| März 2023 | Kurzpräsentation im Zuge d. Vorlesung – TU Wien | Renewable Energy Power Electronic Converters | x | M. Makoschitz | Vortrag |
| Mai 2023 | Going Green Care Innovation Konferenz 2023 | Design Aspects and Environmental Impacts of Wide Band Gap Based Semiconductor Technology in Chargers for Electronic Devices | x | S. Glaser, A. T. Diaz, M. Makoschitz | Publikation & Vortrag |
| Sep. 2023 | 25 th European Conference on Power Electronics and Applications | Application Readiness Map for WBG-Semiconductor-Based Applications | x | M. Thoben, M. Pfof | Publikationsbegutachtung und Inputs |
| Sep. 2023 | 25 th European Conference on Power Electronics and Applications | Looking beyond energy efficiency – Environmental aspects and impacts of WBG devices and applications over their life cycle | x | S. Glaser, P. Feuchter, A. Díaz | Publikation & Vortrag |
| Sep. 2023 | 25 th European Conference on Power Electronics and Applications | Measurement of WBG-based power supplies | x | H. Zhu , A. Jafari, K. Machtinger, M. Makoschitz, E. Matioli | Publikation & Vortrag |

Disseminationsaktivitäten

| Datum | Event | Titel |  | Autoren | Art der ö. Beteiligung |
|-----------|--|--|---|--|--------------------------|
| Sep. 2023 | 25 th European Conference on Power Electronics and Applications | Switching losses in power devices: From dynamic on resistance to output capacitance hysteresis | - | E. Matioli, H. Zhu, N. Perera, M. S. Nikoo, A. Jafari, R. van Erp | - |
| Sep. 2023 | 25 th European Conference on Power Electronics and Applications | Identifying the potential of SiC technology for PV inverters | x | T. Eskilson, A. Jehle, P. Schmidt, M. Makoschitz, F. Baumgartner | Publikation & Vortrag |
| Sep. 2023 | 25 th European Conference on Power Electronics and Applications | Energy saving potential of WBG-commercial power converters in different applications | x | L. B. Spejo, E. Nonis, N. Schulz, R. A. Minamisawa | Publikationsbegutachtung |
| Sep. 2023 | 25 th European Conference on Power Electronics and Applications | Policy measures to drive WBG for end use equipment | - | B. S. Hansen | Interview |
| Sep. 2023 | 25 th European Conference on Power Electronics and Applications | Reliability of WBG, results of a Pre-Scoping Study | - | Kaichen Zhang, Francesco Iannuzzo, Christian Holm Christiansen, Danish | - |

Disseminationsaktivitäten

| Datum | Event | Titel |  | Autoren | Art der ö. Beteiligung |
|-------------|-------------------|--|---|---|--------------------------|
| Jänner 2024 | PECTA Publication | Wide Band Gap Technology: Energy and environmental related Life Cycle Assessment (LCA) | x | S. Glaser, P. Feuchter, R. Pamminer, A. Díaz | Publikation |
| Jänner 2024 | PECTA Publication | Energy saving potential of WBG commercial power converters in different applications | x | L. B. Spejo, E. Nonis, N. Schulz, R. A. Minamisawa, M. Makoschitz | Publikation |
| Jänner 2024 | PECTA Publication | Application Readiness Map for Wide Bandgap (WBG) Semiconductors | x | M. Thoben , M. Pfof | Publikationsbegutachtung |
| Jänner 2024 | PECTA Publication | Analysis and Loss Measurements of WBG-Based Devices | - | H. Zhu, N. Perera, A. Jafari, E. Matioli | - |
| Jänner 2024 | PECTA Publication | Energy Efficiency Measurement of Wide Bandgap Based Power Supplies | x | K. Machtinger, H. Zhu, M. Makoschitz, E. Matioli, R. Brueniger. | Publikation |

Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Einsatzgründe und Wirkungsgrad im Bereich von Ladegeräten bis 65 W:

- **Leistungsdichte** und **Effizienz** sind die beiden Hauptgründe für den Einsatz von GaN in Ladegeräten: Die **Industrie** zielt in erster Linie auf eine **höhere Leistungsdichte** ab und weniger darauf, die Vorschriften in Bezug auf den Wirkungsgrad deutlich zu übertreffen.
- Der Wirkungsgrad variiert erheblich zwischen den einzelnen Produkten, wobei **Lösungen auf GaN-Basis im Leistungsbereich von 60 W besser sind als solche auf Si-Basis**. Die Verbesserung könnte auch darauf zurückzuführen sein, dass die GaN-basierten Systeme in jüngerer Zeit entwickelt und konstruiert wurden als die Si-basierten Systeme.
- Trotz **höherer Leistungsdichte** konnte bei einigen Netzteilen auch eine Steigerung des Wirkungsgrads erreicht werden. Die Kombination aus beidem resultiert in einer Reduktion des Volumens der Kühllösungen, was sich ebenfalls sehr positiv auf die Umwelt auswirkt, da am Ende der Lebensdauer des Produkts weniger Müll zur Entsorgung anfällt.
- Der Umstieg auf GaN-basierte Ladegeräte im Bereich < 65 W, könnte nach aktuellem Stand weltweit jährlich **etwa 2.2 TWh** an verbrauchter Energie einsparen.

Weitere Erkenntnisse:

- Gemäß der aktuellen EU-Kommissionsverordnung 2019/1782 für externe Netzteile, muss die durchschnittliche Effizienz für Ausgangsleistungen **über 49 W mindestens 88 %** betragen.
- Die **GaN-basierten Ladegeräte zeigten im Allgemeinen eine deutlich bessere Energieeffizienz**. Daher könnten die Anforderungen wie in der Regulierung festgelegt, erhöht werden, um die Einführung von GaN-basierten bzw. effizienteren Technologien am Markt zu fördern.
- Weiters sei darauf hingewiesen, dass heutige 20 V, 65 W Ladegeräte bereits mit einer Vielzahl an verschiedenen Funktionalitäten ausgestattet sind wie zum Beispiel:
 - Geräte mit nur 1 PD-Ausgang: 5 V (15 W) bis 20 V (65 W)
 - Geräte mit 2 Ausgängen:
 - erster Ausgang: PD-Laden z. B. 5 V (15 W) bis 20 V (65 W)
 - zweiter Ausgang: entweder PD-Laden 5 V (15 W) bis 20 V (65 W) oder Quick-Charger 5 V (15 W)
 - mehr als zwei Ausgänge: Kombination der oben definierten Varianten.

Weitere Erkenntnisse:

- Weiters adressiert ein Ausgang mehrere unterschiedliche Spannungen und spezifische maximale Leistungswerte pro Spannungsebene (begrenzt durch den Ausgangsstrom in diesem spezifischen Fall von 3 A).
- Die EU-Kommissionsverordnung 2019/1782 für externe Netzteile geht jedoch nicht im Detail darauf ein, wie mit einem einzelnen Ladegerät umzugehen ist, dass unterschiedliche Spannungs- und Leistungsstufen sowie mehrere Ausgänge bietet.
- Der PECTA Operating Agent und das PECTA Management Komitee befinden sich zu diesem Thema bereits in enger Abstimmung mit Vertreter:innen der Europäischen Kommission, die bereits eine Anpassung der Regulierung anstreben.
- Weiters konnte gezeigt werden, dass die GaN basierte Netzteile nicht nur kompakter und effizienter sind, sondern über Ihre gesamte Lebensdauer inklusive Herstellung am Ende zu einer reduzierten Umweltbelastung führen.

Empfehlungen:

- Es wird empfohlen, weitere Messungen und Untersuchungen im Bereich der Ladegeräte mit niedriger Leistung fortzuführen, um neue noch effizientere Technologien frühzeitig zu identifizieren.
- Weiters wird empfohlen, die Untersuchungen für relevante Applikationen mit höherer Leistung zu erweitern. Auf Basis der PECTA GaN und SiC ARM (Application Readiness Map) sind z.B. die folgenden Produktklassen relevant: DC-Wallboxen, Ladegeräte für Laptops mit höherer Leistung (z.B. 180 W), Netzteile für z.B. Datencenter.

Ausblick:

- PECTA's erste Arbeitsperiode endete mit Februar 2024. Die zweite Arbeitsperiode begann im März 2024, und wird sich unter anderem auch mit den oben vorgeschlagene Themengebieten beschäftigen.
- Die Strategie der zweiten PECTA Arbeitsperiode (inklusive möglicher Arbeitspakete), auf Basis der Erkenntnisse der bereits erfolgreich abgeschlossenen PECTA Teilprojekte der ersten Arbeitsperiode, wurde bereits definiert und sowohl vom PECTA Management Komitee als auch vom 4E ExCo genehmigt.