Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

NACHHALTIGwirtschaften

IEA 4E PECTA: Leistungselektronik zur Steuerung und Umwandlung elektrischer Energie

Arbeitsperiode 2019 – 2021

M. Makoschitz

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

32/2021

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 Michael Paula

Auszugsweise 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:
https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/

IEA 4E PECTA: Leistungselektronik zur Steuerung und Umwandlung elektrischer Energie

Arbeitsperiode 2019 – 2021

DI Dr. Markus Makoschitz
AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Wien, März 2021

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms

IEA Forschungskooperation
im Rahmen von open4innovation

des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

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 Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie

1 Kurzfassung

Halbleiter mit breitem Bandabstand (Wide Bandgap - WBG) wie zum Beispiel Silizium Karbid (SiC) oder Gallium Nitrid (GaN) sind seit mittlerweile vielen Jahren kommerziell am Markt erhältlich. Einer der wesentlichen Vorteile dieser Technologie gegenüber herkömmlicher Silizium Komponenten ist die in der Literatur oftmals ausgewiesene mögliche erhöhte Energieeffizienz. Je nach Veröffentlichung, dort beschriebener Anwendung und Anforderungen reicht das beschriebene Energieeffizienzpotential von WBG Halbleitern vom unteren Prozent- bis teilweise in den > 10 Prozentpunktebereich. Die Energieeffizienz ist gerade bei der immer weiter voranschreitenden Elektrifizierung (steigende Durchdringung erneuerbarer Energiesysteme wie etwa Photovoltaik (PV) und Windkraft bzw. erhöhter Anteil an Elektrofahrzeugen etc.) ein wesentliches Kriterium, wenn es um die im Verbrauch benötigte Energie, deren Übertragung im elektrischen Netz und deren Erzeugung geht. Eine verbesserte Energieeffizienz bei gleichbleibendem Energieverbrauch der zugehörigen Last bedeutet im direkten Kontext einen reduzierten Energieverbrauch des Gesamtsystems (Energiewandlung, Übertragung, Verbrauch) und trägt auch indirekt zur Reduktion der CO_2 Belastung bei.

Um die Technologie WBG und deren Potential bestimmten Applikationen besser zuordnen und bewerten zu können, sowie Ergebnisse und Technologie im Bedarfsfall auch für die breite Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wurde der IEA 4E PECTA (Leistungselektronik zur Steuerung und Umwandlung elektrischer Energie Annex) gegründet und offiziell im März 2019 mit Österreich als Mitgliedsstaat gestartet. Das übergeordnete Ziel des PECTA und der österreichische Beitrag der hier beschriebenen ersten Arbeitsperiode ist es, die folgenden Themen in Zusammenhang mit WBG zu untersuchen:

- Effizienz- und Einsatzpotential
- mögliche zukünftige Fahrpläne zur Integration in aktuelle Applikationen (Roadmaps)
- Destillieren der gesammelten Ergebnisse, Beschreibung relevanter Beobachtungen und Definition einer weiteren Arbeitsperiode (Phase 2)
- nationale und internationale Wissensverbreitung

Die erarbeiteten Ergebnisse dienen als objektive Informationsquelle für diverse nationale und internationale Interessensgruppen (z.B. politische EntscheidungsträgerInnen, IndustrievertreterInnen, KundInnen aus relevanten oder artverwandten Branchen etc.). Das nationale Teilvorhaben adressierte jene durch PECTA definierten inhaltlichen Schwerpunkte und ermöglichte weiters

- nationale und internationale Vernetzungsaktivitäten und Zugang zu einem weltweiten Netzwerk aus führenden ExpertInnen im Bereich Wide Bandgap.
- freien und direkten Zugang zu aktuellen Ergebnissen durch Inputs nationaler und internationaler Universitäten, Forschungsinstitutionen und Industrie.
- Stärkung des Standorts Österreich durch die Einbringung und Rückführung der Ergebnisse und Erfahrungen aus PECTA in laufende Projekte sowie die Möglichkeit der Anbahnung und Umsetzung neuer Forschungsprojekte
- sowie erhöhte nationale und internationale Sichtbarkeit durch die Koordination von PECTA als Operating Agent.

Erkenntnisse aus Phase 1 wurden weiters dazu genutzt, um neue Inhalte für PECTAs Phase 2 zu definieren. Dies betrifft Themen und Charakterisierung von Produkten die bis zum jetzigen Zeitpunkt in der Literatur nicht ausreichend behandelt wurden.

2 Abstract

Wide bandgap (WBG) semiconductors such as silicon carbide (SiC) or gallium nitride (GaN) have been commercially available for many years now. One of the main benefits of WBG over conventional silicon (Si) devices reported in literature is the enhanced energy efficiency. Already published reports or research papers describe the energy efficiency potential of WBG semiconductors ranging from the lower percentage- to the > 10 percentage-point area. Energy efficiency is one relevant aspect, especially in the context of continuously progressing electrification of the energy and transportation sector (increasing penetration of renewable energy systems such as PV and wind power, growing share of electric vehicles etc.). In a direct context, an improved energy efficiency of a power electronics unit under constant energy consumption of a dedicated load implies a reduced energy consumption of the overall network and indirectly contributes to the reduction of CO_2 emissions.

In order to evaluate the potential of WBG technology and match its significance with different applications, as well as to make results available to the general public, the IEA 4E PECTA (Power Electronics for Electrical Energy Control and Conversion Annex) was founded and officially launched in March 2019 with Austria as one of its member states. The overall objective of PECTA and the Austrian contribution of the first work period described in this report is to investigate the following topics related to WBG:

- Efficiency potential of WBG
- possible future roadmaps for integration into current applications
- distilling the collected results, describing relevant observations and defining a further work period (phase 2)
- national and international dissemination of results.

PECTA and compiled results of its tasks serve as an objective knowledge platform for various national and international stakeholders (e.g. policymakers, industry representatives, customers from relevant or related industries, etc.). The national sub-project addressed the main topics defined by PECTA and further enabled

- national and international networking activities and access to a worldwide network of leading experts in the field of wide bandgap.
- free and direct access to latest results and inputs from national and international universities, research institutions and industry.
- Strengthening of Austria as location for research through the incorporation and feedback of results and experiences from PECTA into ongoing projects as well as the possibility of initiating and implementing new research projects.
- Increased national and international visibility for Austria throughout the coordination of PECTA as operating agent.

Findings and key observations from Phase 1 were furthermore used to define new content for PECTA's Phase 2. This involves topics such as the Life Cycle Assessment of WBG and characterization of products, not yet been sufficiently addressed in literature.

3 Ausgangslage

Seit Jahrzenten halten leistungselektronische Konverter Einzug in viele Lebensbereiche des Alltags und konnten sich dort auch erfolgreich etablieren. Dies betrifft Applikationen im kleineren Leistungsbereich (Milliwatt bis Watt) wie zum Beispiel Stromversorgungen für Haushaltsgeräte oder Handyladegeräte aber auch im mittleren und hohen Leistungsbereich (Kilowatt bis Megawatt) wie etwa PV-, Windkraftanlagen, Batteriespeicher etc. Basis der Energieumwandlung solcher Systeme bilden Silizium (Si) Leistungshalbleiter. Je nach Applikation und Anforderungen sind elektrische Effizienzen im Bereich von 90 % realisierbar. Die elektrische Effizienz von Ladegeräten für Mobiltelefone bewegt sich aktuell je nach Produkt bei etwa 87 %. Photovoltaikwechselrichter hingegen sind je nach Leistungsklasse, herstellendem Unternehmen und Konzept im Bereich 94 % - 98 % erhältlich.

Hinzu kommt, dass neben Silizium Halbleiterschaltern auch Leistungshalbleiter mit breitem Bandabstand (Wide Bandgap - WBG) wie zum Beispiel Silizium Karbid (SiC) oder Gallium Nitrid (GaN) seit mittlerweile vielen Jahren kommerziell am Markt erhältlich sind. Eine der oftmals genannten wesentlichen Vorteile dieser Technologie gegenüber herkömmlicher Silizium-Technologie ist die in der Literatur ausgewiesene erhöhte Energieeffizienz der Halbleiterkomponente. Je nach Veröffentlichung, dort beschriebener Anwendung und Anforderungen reicht das dargestellte Energieeffizienzpotential von WBG-Halbleitern vom unteren Prozent- bis teilweise in den > 10 Prozentpunktebereich. Trotz der mittlerweile langjährig am Markt verfügbaren WBG Halbleiter, gibt es nur wenige Produkte am Markt, in denen eben solche Komponenten zur Anwendung kommen.

Weiters sei erwähnt, dass das Thema „Energieeffizienz“ gerade aufgrund der immer weiter voranschreitenden Elektrifizierung (steigende Durchdringung erneuerbarer Energiesysteme wie etwa PV und Windkraft bzw. erhöhter Anteil an Elektrofahrzeugen etc.) ein wesentliches Kriterium darstellt, wenn es sich um die benötigte und somit zu erzeugende Energie und deren Übertragung im elektrischen Netz handelt. Eine verbesserte Energieeffizienz bei gleichbleibendem Energieverbrauch der zugehörigen Last bedeutet im direkten Kontext einen reduzierten Energieverbrauch des Gesamtsystems und trägt auch indirekt zur Reduktion der CO_2-Belastung bei.

Publikationen im Forschungsbereich bezogen auf WBG-Technologie beziehen sich in erster Linie auf die Entwicklung verbesserter und kostengünstigerer WBG-Halbleiter, die optimale Integration von WBG Bauteilen in bekannte Systemtopologien, Optimierung von bestehenden Lösungen auf Komponenten und Systemebene und neue Topologien, Anwendungen und Algorithmen (künstliche Intelligenz) zum verbesserten und effektiveren Einsatz von WBG. Die Energieeffizienz für wissenschaftliche Demonstratoren wird zwar in wissenschaftlichen Publikationen ausgewiesen, allerdings ist eine Bewertung mit am Markt erhältlichen Produkten oftmals nicht möglich, da für einen direkten Vergleich häufig wesentliche Informationen fehlen. Dies betrifft zum Beispiel relevante Angaben zum Messkonzept, den verwendeten Messvorrichtungen oder auch, ob Verluste durch Hilfsversorgungen bei der gemessenen elektrischen Effizienz bereits mitberücksichtigt wurden. Dieser Umstand erschwert einen fairen Vergleich von am Markt erhältlichen Silizium und WBG-Lösungen in der Regel deutlich.

Um die Technologie WBG und deren Potential bestimmten Applikationen besser zuzuordnen und zu bewerten, sowie Ergebnisse und Technologie im Bedarfsfall auch für die breite Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wurde der **IEA 4E PECTA (Leistungselektronik zur Steuerung und Umwandlung**

elektrischer Energie Annex) gegründet und mit Österreich als Mitgliedsstaat seit dessen Begründung offiziell mit März 2019 gestartet.

Der **IEA 4E Power Electronic Conversion Technology Annex PECTA** (Leistungselektronik zur Steuerung und Umwandlung elektrischer Energie Annex) ist einer von 4 Annexen aus dem 4E Technologieprogramm (Energy Efficient End-Use Equipment). PECTA wurde im März 2019 offiziell gestartet. Österreich ist seit der PECTA Begründung Mitglied und stellte dort seither die Koordination durch den Operating Agent und nationale ExpertInnen.

Das übergeordnete Ziel des **PECTA Phase 1** und der österreichische Beitrag der hier beschriebenen ersten Arbeitsperiode ist es, die folgenden Themen in Zusammenhang mit WBG zu untersuchen:

- Koordination von PECTA durch die Position des Operating Agents (**österreichischer Beitrag**).
- Untersuchung der Effizienz- und des Einsatzpotentials von WBG-Halbleitern (**österreichischer Beitrag**).
- Erstellung und Untersuchung möglicher zukünftiger Fahrpläne zur Integration in aktuelle Applikationen (Roadmaps) (**österreichischer Beitrag**).
- Destillieren der gesammelten Ergebnisse, Beschreibung relevanter Beobachtungen und Definition bzw. Erstellung eines Arbeitsplans einer weiteren Arbeitsperiode (Phase 2) (**österreichischer Beitrag**).

Weiters sollen initiale Schritte zur nationalen und internationalen Wissensverbreitung erster Ergebnisse geplant und durchgeführt werden.

Da vor allem GaN-Transistoren aktuell immer noch eine Entwicklungsphase in Richtung höherer Spannungen, Ströme und kompakterer Packages erleben, ist zu erwarten, dass auch in den nächsten Jahren und auch in zukünftig am Markt verfügbaren Produkten eine weitere Verbesserung der Technologie zu erwarten ist. Diese Annahme wird vor allem durch bereits durch die EU, Österreich und weitere Länder geförderten Vorzeigeprojekte mit österreichischer Beteiligung mit Fokus auf Halbleiterentwicklung im Bereich Gallium-Nitrid-Transistoren wie z.B. POWERBASE[1] (87 Mio. € Gesamtkosten) oder UltimateGaN[2] (48 Mio. €) bestätigt.

Daher ist es für nationale und internationale politische EntscheidungsträgerInnen umso wichtiger, das Potential dieser Technologie zu verstehen um mögliche unterstützende Maßnahmen in relevanten Teilgebieten, Sektoren bzw. für bestimmte Applikationen einleiten zu können. Dies wird als notwendig angesehen, um aktuelle Barrieren, die dieser Technologie gegenüberstehen, zu reduzieren und diese auch für private KonsumentInnen und die Industrie verfügbar zu machen.

[1] http://www.powerbase-project.eu, abgerufen am 16. März 2021
[2] http://www.ultimategan.eu/, abgerufen am 16. März 2021

4 Projektinhalt

4.1. 4E Technologieprogramm

Die IEA betreibt und organisiert diverse Technologieprogramme, die sich kritisch mit energiepolitischen, technischen und umweltnahen Themen beschäftigen. Dabei sind aktuell (2020) 38 Technologieprogramme mit über 6.000 ExpertInnen und 55 Länderbeteiligungen aktiv.

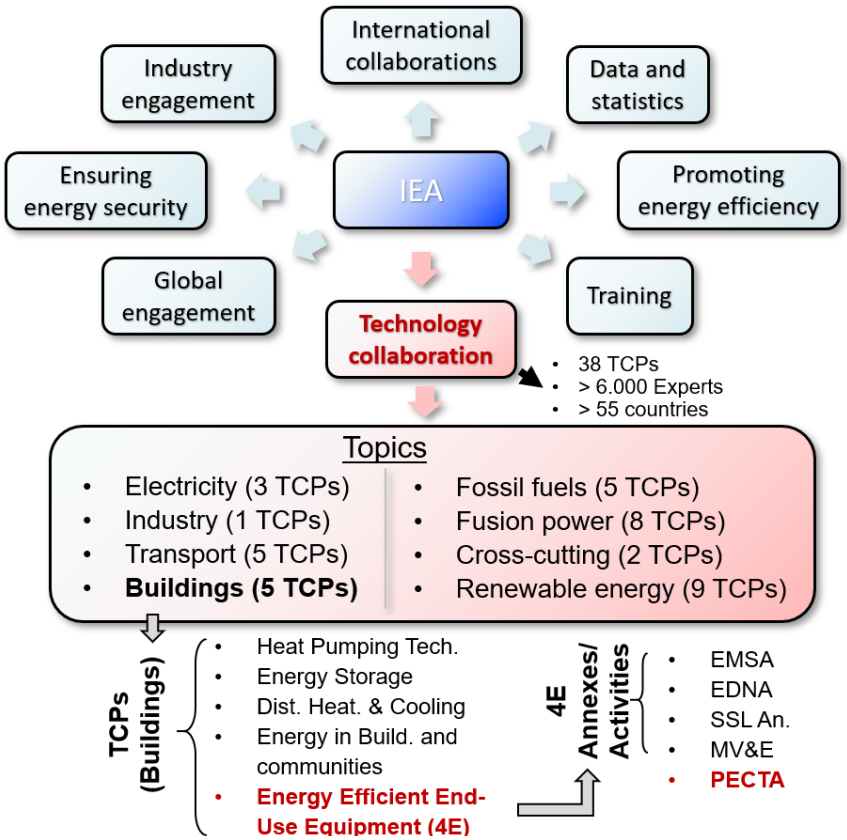

Abbildung 1: Aufbau der IEA Technologieprogrammstruktur und Unterstrukturen am Beispiel des 4E Technologieprogramms und dessen Annexe.

Um die einzelnen Technologieprogramme besser zu katalogisieren, wurden diese zu 8 Themengruppen zusammengefasst. **Abbildung 1** zeigt dabei den Aufbau der IEA Technologiekollaborationsstruktur, die 8 Themengruppen:

- Electricity
- Industry
- Transport
- Buildings
- Fossil fuels
- Fusion power
- Cross-cutting
- Renewable energy

und deren Unterstrukturen. Dabei findet sich das **Technologieprogramm 4E (Energy Efficient End-Use Equipment**) neben fünf weiteren TCPs (Heat Pumping Technology, Energy Storage, District Heating and Cooling including Combined Heat and Power, Energy in Buildings and Communities) der Kategorie „**Buildings**“ wieder. Der **Power Conversion Technology Annex PECTA** ist weiters einer von vier Annexes im 4E Technologieprogramm.

Das 4E Technologieprogramm besteht aktuell aus 14 Mitgliedsländern:

- Österreich
- Australien
- Japan
- Südkorea
- Dänemark
- USA
- Schweden
- Frankreich
- Kanada
- Europäische Union
- Großbritanien
- Niederlande
- Schweiz
- China

Das Ziel von 4E ist Energieeffizienz als Schlüsselthema und energieeffiziente Systeme als Schlüsselkomponenten für sichere zuverlässige und leistbare Energie und Energiesysteme zu unterstützen und zu fördern. Um seine Ziele zu erreichen, nutzt das 4E TCP Fachwissen von Regierungen, Industrie, ExpertInnen und anderen TCPs für gemeinsame Forschung und Untersuchungen im Zusammenhang mit der Entwicklung und dem Einsatz energieeffizienter Geräte. Dabei priorisiert 4E jene Technologien und Anwendungen mit hohem Energieverbrauch und Energiesparpotenzial im Wohn-, Gewerbe- und Industriesektor (kein Verkehr).
Als internationale Wissensplattform bietet das 4E TCP seinen Mitgliedern Vorschläge für Richtlinien für den Energieverbrauch von Endgeräten und Systemen.

4.2. Power Electronic Conversion Technology Annex (PECTA)

PECTA ist ein Annex im Rahmen des IEA 4E Technologieprogramms (TCP – Technology Collaboration Programme) (siehe **Abbildung 2**). Im PECTA soll der Wissenstand über aktuelle und das Potential neuer Halbleitertechnologien in der Leistungselektronik mit besonderem Fokus auf der aufstrebenden Wide-Bandgap (WBG) Technologie evaluiert werden.

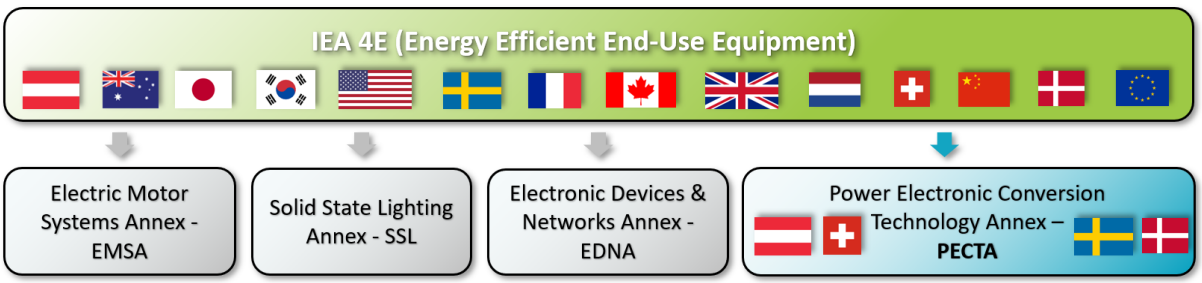

Abbildung 2: Aktuelle Struktur des 4E Technologieprogramms, bestehend aus EMSA, SSL, EDNA und PECTA.

PECTA besteht aktuell (März 2021) aus vier Mitgliedsländer (Dänemark, Österreich, Schweden, Schweiz). Die Position des Chairs wird durch Roland Brüniger (Schweiz) bekleidet. Vice-Chair (Adriana Diaz) und Operating Agent (Markus Makoschitz) sind beide durch Österreich bestellt. Zu den übergeordneten Zielen von PECTA gehören, wie schon eingangs erwähnt, die Erhebung und Analyse von Informationen über die neue WBG-basierte Leistungselektronik, die Koordination international sinnvoller Ansätze zur Förderung von WBG-basierter Leistungselektronik und die Entwicklung eines besseren Verständnisses zwischen den Regierungen und Vorschläge diverser möglicher Richtlinien zum Thema WBG. Im Einzelnen werden die Ziele wie folgt definiert:

- Sammeln und Analysieren von Informationen über neue WBG-basierte Leistungselektronik, Austausch von Fachwissen und Bündelung von Ressourcen zu dieser energieeffizienten

Technologie. Dies umfasst auch das Hosting offener Foren und den Aufbau kollaborativer Netzwerke sowie das Sammeln und Austauschen von Informationen.

- Entwicklung eines besseren Verständnisses für politische EntscheidungsträgerInnen und relevanten Interessensgruppen.
- Koordination international akzeptabler Regierungsansätze, die die WBG-basierte Leistungselektronik als energieeffiziente Technologie in privaten, gewerblichen und industriellen Endgeräten fördert.
- Begleitung und Unterstützung internationaler Normungsorganisationen (insbesondere der IEC) bei der Bereitstellung neutraler und unabhängiger Beiträge und Ansichten zu technischen Aspekten, um die Entwicklung einer globalen Norm mit besonderem Schwerpunkt auf Halbleitervorrichtungen und Modulen für WBG Komponenten zu unterstützen. Dies wird vor allem dazu dienen, die Leistung, die Verluste und die Zuverlässigkeit der entstehenden WBG-Halbleitermodule und -Geräte zu definieren.

PECTA ist aktuell in **2 Phasen** unterteilt. Phase 1 wird auch als „Introduction Phase“ bezeichnet. Diese Phase wurde durch in diesem Dokument beschriebene Arbeitsperiode abgedeckt. Phase 2 wird als „Established Phase“ bezeichnet und betrifft die aktuell laufende Arbeitsperiode 2021-2024. Eine Übersicht über die zeitliche Dauer von Phase 1 und Phase 2 ist in **Abbildung 3** dargestellt.

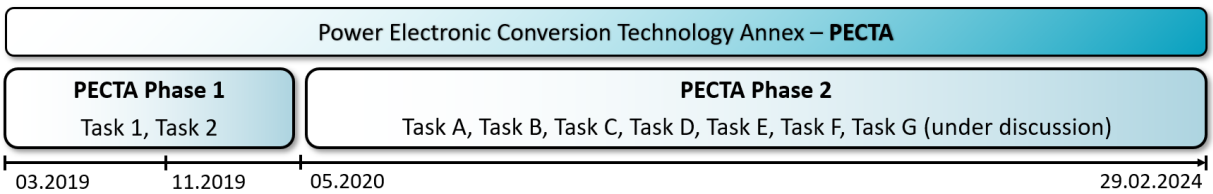

Abbildung 3: PECTA Arbeitsphasen und zugehöriger zeitlicher Ablauf.

Zusammenfassend gilt also:

- **Phase 1 - Introduction Phase (Einführungsphase)** (Task 1, Task 2)
  März 2019 bis Ende April 2020 (**abgeschlossen**)
- **Phase 2 - Established Phase** (Task A bis Task F)
  Mai 2020 bis Ende Februar 2024 (**laufend**)

4.2.1. Introduction Phase (bereits abgeschlossen)

Im Folgenden sind die relevanten Eckpunkte aus der bereits durchgeführten „Introduction Phase“ beschrieben (siehe **Abbildung 4**). Task 1 und Task 2 der Einführungsphase haben mit 1. März 2019 begonnen und wurden mit Ende April 2020 erfolgreich abgeschlossen. Dabei waren folgende Tasks für die Erarbeitung definiert:

- **Task 1: Effizienzpotenzial in leistungselektronischen Applikationen (beteiligte Länder: Österreich, Schweden, Schweiz)**
  Dieser Task identifizierte potenzielle leistungselektronische Anwendungen, die durch den Einsatz der neuen WBG-Halbleiter erhebliche Einsparungen erzielen können. Basierend auf der Analyse spezifischer Applikationen wurde das Ausmaß des Einsparpotenzials dieser Anwendungen abgeschätzt.
- **Task 2: Roadmaps für Leistungskomponenten (beteiligte Länder: Österreich, Schweden, Schweiz)**

Teil dieser Aufgabe war es, diese Bemühungen zu identifizieren und zu diskutieren, um eine globale Sichtweise zu bestimmen. Dabei wurden sogenannte „Application Readiness Maps“ (ARMs) entwickelt, die aktuelle nationale/internationale Roadmaps berücksichtigen.

- **Aufgaben der Industrial Advisory Group (IAG) (beteiligte Länder: Schweiz)**
  Die Gruppe fungierte als industrielle Verbindungsstelle, um sicherzustellen, dass neue Forschungs- und Entwicklungsergebnisse, Marktinformationen, wirtschaftliche Aspekte etc. von PECTA auch tatsächlich identifiziert und berücksichtigt wurden. Die IAG gab regelmäßig Input zu den laufenden Tasks und überprüfte kritisch den Output der laufenden Tasks.

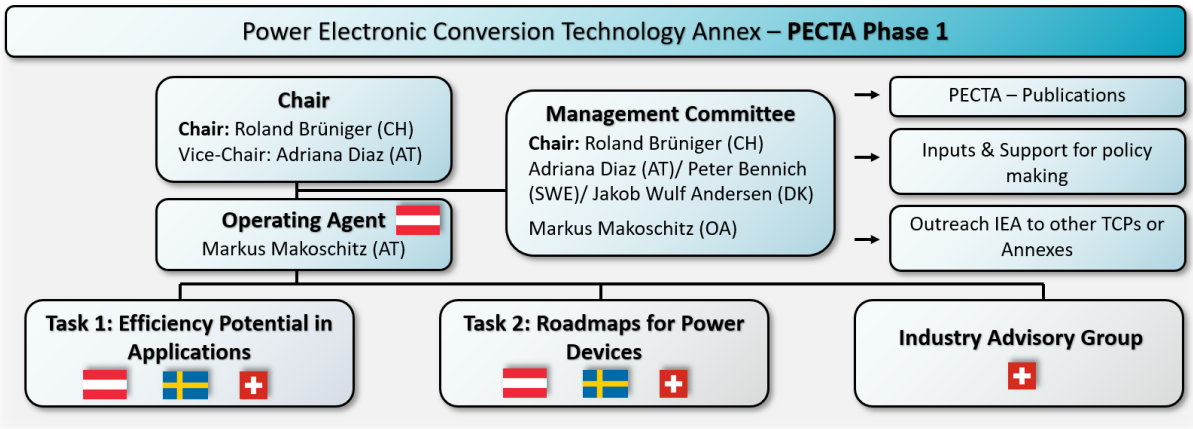

Abbildung 4: Struktur von PECTA während Phase 1. Im Zuge von PECTAs Phase 1 wurden zwei Tasks bearbeitet. Task 1: Efficiency Potential in Applications. Task 2: Roadmaps for Power Devices. Operating Agent Position bekleidet durch Österreich. Task 1 mit Beteiligung aus Österreich, Schweden und Schweiz. Task 2 mit Beteiligung aus Österreich, Schweden und Schweiz. Industry Advisory Group wird durch die Schweiz koordiniert.

4.2.2. Established Phase (laufend)

Die Established Phase hat am 1. Mai 2020 gestartet. Die geplante Laufzeit beträgt 46 Monate. Das geplante Ende wurde mit Ende Februar 2024 festgelegt. Erkenntnisse aus den Tasks 1 und 2 der „Introduction Phase“ sollen nun in konzentrierterer Form in der Established Phase detailliert betrachtet werden. Die Definition der neuen Tasks A – F liegt den „Keyfindings“ der Publikation „Wide Band Gap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map“ zugrunde. Hier wurden Erkenntnisse dazu genutzt, um die weitere Vorgehensweise für die nächsten Jahre konkret zu definieren und zu beschreiben (siehe **Abbildung 5**).

Für die „Established Phase“ wurden die Tasks wie folgt definiert:

- **Task A: Effizienzkennzahlen**
  Dieser Task geht konkreter auf die in Task 1 der „Introduction Phase“ vorevaluierten Energieeffizienz-Kennzahlen ein. Hier sollen in einem nächsten Schritt bereits bestehende Energieeffizienzzahlen weiter geschärft werden. Dies kann durch Inputs aus der Industrie geschehen die eigene Effizienzkennzahlen ihrer Produkte zur Evaluierung einbringen können.
- **Task B: Energie- und umweltrelevante Lebenszyklusanalysen**
  In der „Introduction Phase“ wurde lediglich eine erste Untersuchung der elektrischen Größen vorgenommen und anhand dieser das Effizienzpotential von diversen leistungselektronischen

Applikationen abgeschätzt. Es hat sich allerdings gezeigt, dass Potential für WBG für eine bestimmte Applikation nicht nur von der Energieeffizienzsteigerung durch die Verwendung von WBG selbst abhängt, sondern auch Faktoren wie der Energieverbrauch durch die Erzeugung eines WBG-basierten Halbleiters besonders bei Produkten mit kurzen Lebenszeiten großen Einfluss auf die Bewertung nehmen kann. Task B beschäftigt sich daher mit der Lebenszyklusanalyse für WBG-Halbleiter.

- **Task C: Überarbeitung „Application Readiness Maps“**
  Teil dieser Aufgabe ist die jährliche Anpassung der erstellten „Application Readiness Maps“ falls notwendig, um eine aktuelle Betrachtungsweise garantieren zu können. Dies soll auch in enger Abstimmung mit relevanten Vereinen geschehen, die im Bereich des Erstellens von Roadmaps aktiv sind (z.B. ECPE).
- **Task D: Policymaßnahmen und Applikations Mapping**
  In der „Introduction Phase“ wurde eine Liste verfügbarer möglicher politischer Maßnahmen skizziert. In einem weiteren Schritt sollen diese in Kategorien sortiert werden, um deren Verwendbarkeit für WBG besser beurteilen zu können. Zusätzlich soll die Frage der horizontalen und/oder vertikalen Regulierung anhand von konkreten WBG-basierten Anwendungen diskutiert werden. Weiters ist geplant ein Mapping zwischen diversen politischen Schritten und relevanten WBG-Applikation auszuarbeiten, die zeigt, zu welchem Zeitpunkt welche Art von möglichen politischen Maßnahmen hilfreich sind, um den Markteintritt bestimmter Anwendungen und/oder Geräte zu beschleunigen.
- **Task E: Messungen von Stromverbrauchseffizienz**
  Ziel dieses Tasks ist die Schärfung jener Ergebnisse aus Task 1 der „Introduction Phase“ durch konkrete Messungen und der Vergleich bereits existierender Silizium- und WBG-basierte Produkte im Bereich Handy- und Laptopladenetzteile. Sämtliche Ergebnisse aus Task E sind wesentlich für Task A.
- **Task F: Normen für WBG-Markteintritt**
  Ziel dieses Tasks ist es, Kontakt zu namhaften Gruppen wie z.B. IEC aufzunehmen und deren aktuelle Arbeiten durch bereits erarbeitete Ergebnisse seitens PECTA zu unterstützen.
- **Aufgaben der Industrial Advisory Group (IAG)**
  Die Gruppe fungiert als industrielle Verbindungsstelle, um sicherzustellen, dass neue Forschungs- und Entwicklungsergebnisse, Marktinformationen, wirtschaftliche Aspekte etc. von PECTA auch tatsächlich identifiziert und berücksichtigt wurden. Die IAG gab regelmäßig Input zu den laufenden Tasks, und überprüfte kritisch den Output der laufenden Tasks.
- **Aufgaben der Academic Advisory Group (AAG)**
  Nach der erfolgreichen Finalisierung der „Introduction Phase“ hat sich gezeigt, dass es vorteilhaft ist, akademische ExpertInnen einer Academic Advisory Group (AAG) zuzuordnen. Diese können gezielt als Unterstützung der Tasks angefragt und direkt aus der AAG rekrutiert werden. Die Koordination hierfür ist die Aufgabe des AAG-Leiters.
- **Operating Agent (OA)**
  Der Operating Agent ist für die Koordination des Annexes und sämtlicher Tasks, administrative Tätigkeiten, Organisation von Meetings, Events und Disseminationstätigkeiten sowie Unterstützung des Management Komitees verantwortlich.

Wie bereits in **Abbildung 4** ersichtlich, war Österreich in PECTAs Arbeitsphase 1 sowohl an Task 1 „Efficiency Potential in Applications“ als auch an Task 2 „Roadmaps for Power Devices“ beteiligt. In Task 1 wurde gemeinsam mit Vertretern aus dem universitären Umfeld (AIT, TU Graz, EPFL, KTH, Uni Bath,

Uni Warwick, KUAS) ein Set an relevanten leistungselektronischen Applikationen erarbeitet. Erste, aus der Literatur verfügbare Effizienzwerte und Erwartungswerte an Effizienzsteigerungspotential, wurden für bestimmte Applikationen (Windkraft, Elektromobilität, PV, Ladegeräte für Mobiltelefone) gesammelt und aus weltweiter Bedarfssicht ausgewertet. Task 1 hat weiters gezeigt, dass es kaum Erfahrung über elektrische Effizienzwerte für Produkte im Feld gibt, da aktuell kaum WBG basierte Produkte am Markt verfügbar sind. Dies wurde auch von der im PECTA gegründeten „Industry Advisory Group" bestätigt. Da bei PECTA die Erhebung des Effizienzpotentials von WBG im Vordergrund steht, reicht es nicht, ausschließlich den Parameter der Energieeffizienz als Vergleichswert heranzuziehen. Aus diesem Grund wurde für Phase 2 Task F – Messungen von Stromverbrauchseffizienz gegründet, um eine tiefergehende Analyse der aktuellen Situation und Reife von WBG zu ermöglichen.

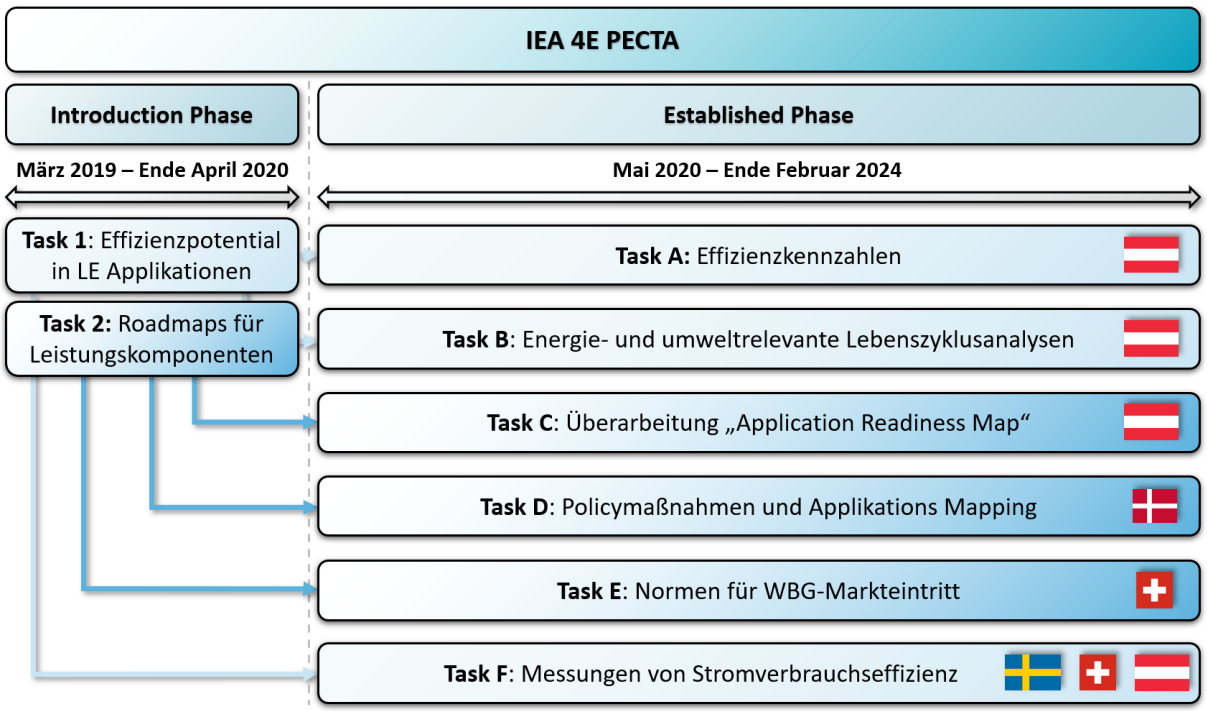

Abbildung 5: Spezifische Darstellung der Taskaufteilung aus „Established Phase" und deren Relevanz und Bezug aus PECTAs „Introduction Phase". Eine indikative Aufteilung der Länderbeteiligung ist ebenfalls dargestellt. Diese kann sich im Laufe der Arbeitsperiode der jeweiligen Tasks noch adaptiert werden.

In Task 2 wurde gemeinsam mit AIT, Uni Bath, NCSU, TU Graz, ETHZ, KUAS, EPFL, Aalborg, KTH und Linköping University und ECPE im Web verfügbare Roadmaps zum Thema WBG analysiert und eine Roadmap und „Application Readiness Maps" für die Materialien SiC und GaN abgeleitet. Dabei wurden folgende Roadmaps als Referenz herangezogen:

- ECPE European Center for Power Electronics, **"WBG Roadmap Lead Applications for SiC and GaN"** (ECPE WBG Roadmap, 2020).
- PowerAmerica, **"Strategic Roadmap for Next Generation Wide Band Gap Power Electronics"** (PowerAmerica Roadmap, 2018).
- IEEE Power Electronic Society, **ITRW "International Technology Roadmap on Wide Band Gap Semiconductors"** (IEEE Power Electronics Society ITRW, 2019).
- Yole Roadmap (Yole, 2015).

Zusammengefasst wurden die folgenden Tätigkeiten im Zuge dieser Arbeitsperiode durchgeführt:

- Umfassende Internetrecherche zum aktuellen Stand der Technik von WBG.
- Analyse von Produktdatenblättern, Studien, wissenschaftlichen Publikationen und Vorträgen zum Thema WBG.
- Organisation von nationalem und internationalem Erfahrungsaustausch zwischen Taskmitgliedern und/oder der Industry Advisory Group.
- Organisation eines ExpertInnen-Workshops.

Sämtliche für Phase 2 definierte Tasks (A-F) sind in **Abbildung 5** dargestellt. Dieser Bericht fokussiert sich auf die Ergebnisse aus Phase 1, da die Tasks für Phase 2 erst kurz vor Berichtslegung gestartet wurden. Die Ergebnisse der Phase 2 werden daher im nationalen FFG/IEA Bericht für die Arbeitsperiode 2021-2024 veröffentlicht.

5 Ergebnisse

5.1. Relevante Applikationen

Das Gebiet der Leistungselektronik und deren Anwendungsgebiete betrifft eine Vielzahl unterschiedlichster Applikationen. Relevante Leistungsklassen reichen vom kleinen Leistungsbereich (Milliwatt/Watt) wie zum Beispiel Stromversorgungen für Haushaltsgeräte oder Handyladegeräte bis hinein in den hohen Leistungsbereich (Megawatt/Gigawatt) wie zum Beispiel Windkraftgroßanlagen. Ebenso verhält es sich mit benötigten Spannungsniveaus die je nach Applikation von Millivolt/Volt (Signalverarbeitung) bis in den > 100 Kilovolt (Hochspannungsleitung) Bereich reichen. Die Begriffszuordnungen „Niederspannung“, „Mittelspannung“ oder „Hochspannung“ betreffen je nach Applikation unterschiedliche Größenordnungen. Um für den aktuellen Bericht eine einheitliche Begriffszuordnung festzulegen, wurden die in **Tabelle 1** genannten Spannungsbereiche den oben genannten Begriffen und vordefinierten Anwendungsgebieten zugeordnet.

Tabelle 1: Vordefinierte Spannungsbereiche für bestimmte Anwendungsgebiete.

Spannungs-bereich / Applikation	Niederspannung	Mittelspannung	Hochspannung
Automotive	12 V_{DC}	12 V_{DC}- 60 V_{DC}	> 60 V_{DC}
Industrie	< 1000 V_{AC}/1500 V_{DC}	1 kV_{AC}- 52 kV_{AC}	> 52 kV_{AC}
Energieübertragung	< 1000 V_{AC}	1 kV_{AC}- 52 kV_{AC}	> 52 kV_{AC}

Weiters wurden im Zuge von Task 1 mögliche für WBG relevante Applikationen beispielhaft definiert (siehe **Tabelle 2**), die für eine zukünftige Betrachtung miteinbezogen werden. Anwendung der Energieübertragung im Niederwattbereich wurden hier nicht berücksichtigt. Eine detaillierte Darstellung der jeweiligen Applikationen ist im 4E PECTA Report (Makoschitz et al, 2020) beschrieben.

Tabelle 2: Mögliche für WBG relevante Anwendungsgebiete.

Mögliche Anwendungsgebiete für die Integration von WBG Technologie		
1) Elektrifizierung des Straßenverkehres	2) Elektrifizierung des Bahnverkehrs	3) Lichttechnik
4) Elektrische Heiz- und Kühltechnik	5) Energiespeicher (Batterie)	6) Windenergie
7) Sonnenenergie (PV)	8) Luftfahrt	9) Schifffahrt
10) Elektrische Antriebe	11) Energieübertragung (Verteilung)	12) Netzgeräte (AC-DC)
13) Hilfsversorgungen	14) Unterbrechungsfreie Stromversorgungen	15) Datencenter

5.2. WBG - Wesentliche Unterschiede und Merkmale

Siliziumbasierte Leistungshalbleiter sind aktuell eine weltweit etablierte Lösung für leistungselektronische Systeme und deren Anwendung. Dies wurde im Laufe der Jahre vor allem durch die immer besser werdende Qualität des Materials, eine fortschrittlichere Prozessfertigung und zugehörige Verfahren sowie neuen Bauelementarchitekturen erreicht. Zu den wichtigsten Typen gehören:

- die klassische Diode in unterschiedlichen Ausführungen (z.B. Schottky etc.),
- der Bipolar-Transistor,
- der Thyristor,
- der IGCT (integrated gate-commutated thyristor),
- der MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor),
- der IGBT (insulated gate bipolar transistor).

Neben der Entwicklung von Silizium-basierten Bauelementen wurde parallel ebenfalls an wide bandgap basierter Halbleitertechnologie geforscht. WBG-Halbleiter und deren inhärenten Materialeigenschaften bieten erhebliche Vorteile auf Bauelementebene im Vergleich zu klassischem Silizium. Aktuell etabliert sich im wissenschaftlichen Bereich und am internationalen Markt eine Dominanz von zwei Halbleitermaterialien mit einem solchen weiten Bandabstand:

- Silizium Karbid (SiC – Silicon Carbide), hier im speziellen die Polytype 4H-SiC (wobei „4“ für die Anzahl der einzelnen Doppelschichtfolgen und „H“ für eine Hexagonal-Gitterstruktur der 14 Bravais Gitter steht) und
- Gallium Nitrid (GaN – Gallium Nitride).

Der größere Bandabstand von WBG-Materialien zwischen Valenz- und Leitungsband im Vergleich zu Silizium resultiert in verbesserte charakteristische Parameter wie zum Beispiel eine deutlich höhere kritische elektrische Feldstärke, oder eine höhere maximale Elektronengeschwindigkeit bei gleichbleibender elektrischer Feldstärke im Vergleich zu Silizium. Die wichtigsten Parameter für einen Vergleich von WBG und Si-Technologie sind im Radardiagramm in **Abbildung 6** angegeben.

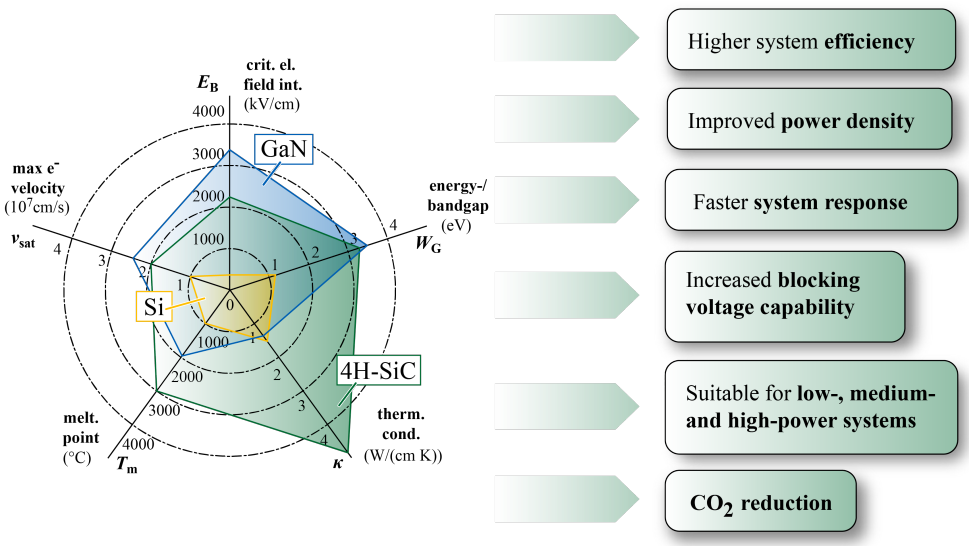

Abbildung 6: Gegenüberstellung von Silizium, Silizium-Karbid und Gallium-Nitrid in einem Radardiagramm (Makoschitz et al, 2020).

Durch die in **Abbildung 6** genannten Kennzahlen ergeben sich diverse Vorteile WBG-basierter Halbleiter im Vergleich zu klassischen Si-Lösungen. Einige davon sind im Folgenden kurz aufgelistet:

- Höhere Spannungsfestigkeit von WBG-Halbleiterkomponenten bei gleicher Waferdicke nach Dünnung des Grundmaterials (im Vergleich zu Si), geringere Schalt- und Leitverluste
- Niedrigere Leitverluste im Teillastbetrieb des Systems
- Höhere Schaltfrequenzen realisierbar (kompaktere Bauweise und höhere Leistungsdichte möglich)
- Höherer Wirkungsgrad bei gleicher Systemintegration und damit direkte CO_2-Reduktion
- Höhere maximale Chip- und daher auch Arbeitstemperatur

Diese Eigenschaften der WBG-Bauelemente (insbesondere SiC und GaN) führen zu einer Erweiterung des "Silizium-Limits". Die jeweiligen Abhängigkeiten der Materialien im Vergleich mit aktuell verfügbaren Komponenten sind in **Abbildung 7** dargestellt. WBG bietet daher für leistungselektronische Lösungen, Vorteile wie einen verbesserten Wirkungsgrad bei höheren Stromdichten, Frequenzen und/oder Temperaturen, sowie eine mögliche kompaktere Bauweise des Halbleiters selbst, der passiven Bauelemente und des Kühlsystems. Folglich lässt sich dadurch auch das Volumen des Gesamtsystems erheblich reduzieren.

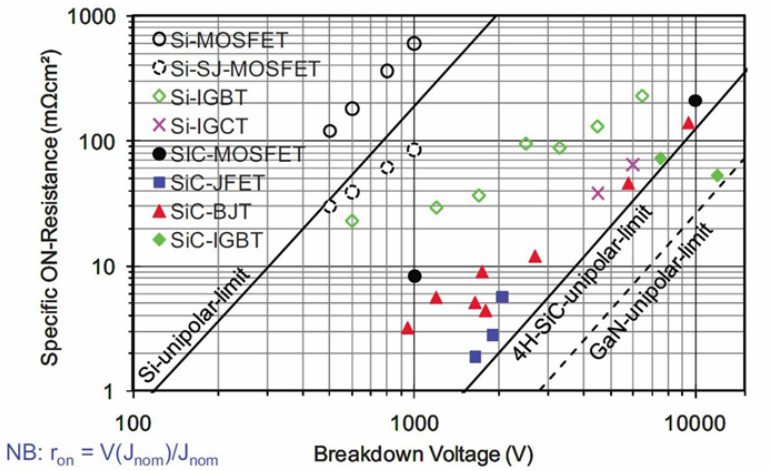

Abbildung 7: Vergleich aktueller spezifischer Leitwiderstände von Si, SiC und GaN (Kaminski, 2012).

Weiters ergeben sich bei einem Vergleich zwischen Si, SiC und GaN weitere Unterschiede im Verhalten und der Ansteuerung von GaN-Transistoren:

- Gate-Ladung: GaN-Bauteile haben im Allgemeinen geringere Gate-Ladungsanforderungen als Si oder SiC. Dies ermöglicht höhere Schaltfrequenzen und ein schnelleres Ein- bzw. Ausschalten des Transistors als bei herkömmlichen Bauteilen.
- Niedrigere Schwellenspannung: GaN-Bauelemente besitzen in der Regel eine Schwellenspannung von 1.2 V – 1.6 V, verglichen mit typischen Werten von zirka 3 V bei Si oder SiC. Prinzipiell ist keine negative Gate-Source Spannung zur Deaktivierung des GaN-Bauelements notwendig. Allerdings wird diese bei bestimmten Typen empfohlen, um parasitäres Wiedereinschalten und somit mögliche Brückenkurzschlüsse zu verhindern.

- Niedrigere maximale Gate-Source-Spannung: Diese liegt bei GaN-Transistoren bei maximal 10 V. Als Vergleich: Bei Si oder SiC MOSFETs beträgt die maximale Gate-Source-Spannung üblicherweise zwischen 20 V – 24 V.
- Leckstrom: Ein Nachteil von GaN-Transistoren ist der höhere Leckstrom als bei SiC oder Si-Bauelementen. Dies ist der GaN Architektur (physikalischer Aufbau) geschuldet.
- Keine intrinsische Rückwertsdiode bei GaN-Bauelemente. Jedoch besitzt der GaN-Transistor in Rückwärtsrichtung diodenähnliches Verhalten ohne Anwesenheit der Reverse-Recovery-Ladung.
- Thermisches Verhalten: GaN verhält sich im Prinzip sehr ähnlich wie Si. Beide Materialien weisen deutlich schlechteres Verhalten als SiC auf.

Abbildung 8 zeigt die Vorteile von GaN-Transistoren der niedrigeren Gate-Ladung bei gleichzeitig geringerem Leitwiderstand im Vergleich zu Si- oder SiC-Halbleiterkomponenten.

Sowohl SiC- als auch GaN-Halbleiter stehen prinzipiell in direkter Konkurrenz zueinander. Nach aktuellem Stand der Technik ist dieser überlappende Bereich auf eine Spannungsklasse von ca. 650 V beschränkt. Über dieser Spannungsklasse gibt aktuell noch keinen GaN-Transistor am Markt (Kaskode und Bidirektionale Schalter ausgenommen) und unter dem angegeben Spannungsbereich keinen konkurrenzfähigen SiC-MOSFET. Prinzipiell wären also beide Materialtypen in der Lage die klassische Si-IGBT bzw. MOSFET-Technologie vom Markt zu verdrängen. Si-IGBT bzw. MOSFET Hersteller besitzen allerdings durch ihre Jahrzehnte lange Erfahrung „im Feld“ den etablierten Marktanteil und darauf aufbauend immer noch intensiv getätigte Forschungsarbeit, einen derart großen Technologievorsprung, dass es weder bei SiC noch bei GaN zu erwarten ist, dass diese den klassischen IGBT in den nächsten Jahren komplett vom Markt verdrängen können.

Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass WBG-Halbleiter aufgrund des hohen Interesses seitens Industrie und bei entsprechender Förderung und Verbreitung national sowie international sowohl SiC als auch GaN in Zukunft hohe Marktanteile in bestimmten, besonders relevanten Applikationen lukrieren.

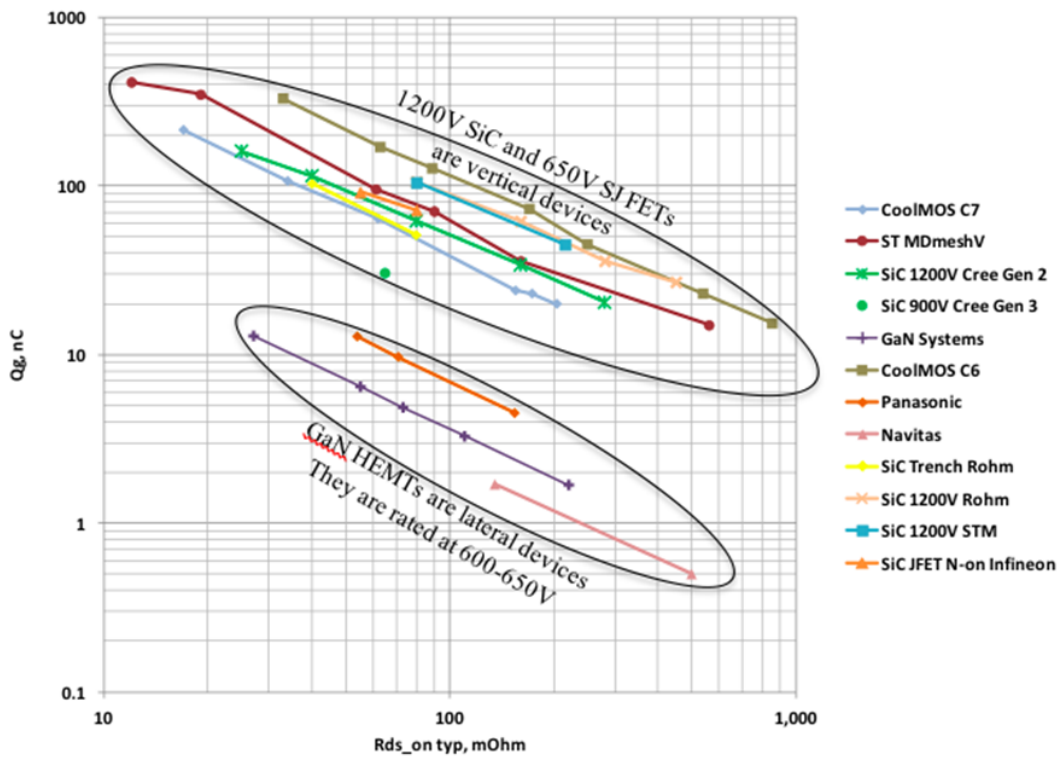

Abbildung 8: Vergleich von Si, SiC und GaN mittels Betrachtung der Gate-Ladung und des charakteristischen Leitwiderstandes (ITRW Roadmap, 2020).

5.3. Roadmaps und PECTA Application Readiness Maps

5.3.1. Roadmap-Analyse

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Ergebnisdiskussion relevanter Wide Bandgap Roadmaps und der Entwicklung der PECTA Application Readiness Maps. Dabei werden relevante Erkenntnisse der folgenden Roadmaps analysiert:

- ECPE European Center for Power Electronics, **"WBG Roadmap Lead Applications for SiC and GaN"** (ECPE WBG Roadmap, 2020).
- PowerAmerica, **"Strategic Roadmap for Next Generation Wide Band Gap Power Electronics"** (PowerAmerica Roadmap, 2018).
- IEEE Power Electronic Society, **ITRW "International Technology Roadmap on Wide Band Gap Semiconductors"** (IEEE Power Electronics Society ITRW, 2019).
- Yole Roadmap (Yole, 2015).

<u>ECPE Roadmap:</u>

Relevante Treiber für Automotive Anwendungen und systemrelevante Komponenten sind Gewichts- und Volumenreduzierung, sowie eine verbesserte Energieeffizienz. Reduziertes Volumen der einzelnen Komponenten erlaubt mehr Flexibilität im Design, wohingegen ein geringeres Gewicht und eine verbesserte Systemeffizienz eine größere Fahrzeugreichweite bei gleichbleibender Batteriekapazität und somit eine weitere CO_2-Reduktion bedeutet. WBG-Halbleiter (hier in erster Linie aktuell 650 V oder

1.2 kV SiC-MOSFETs) sind bereits in Produkten am Markt verfügbar oder werden aktuell beworben (z.B. TESLA Model 3) und es wird erwartet, dass diese bis 2025 einen großen oder dominanten Marktanteil für Traktionsumrichter, DC/DC-Wandlern, On-Board Ladegeräten bzw. induktiven Ladensystemen lukrieren werden. Bei GaN-Transistoren (bis 650 V) wird die Marktdurchdringung sowohl deutlich langsamer als auch in einer geringeren Anzahl an Applikationen als bei SiC-MOSFETs gesehen. Aktuell beschränkt sich der Markt auf DC/DC-Wandler mit geringerer Leistung oder On-Board-Ladegeräten.

Für Bahnanwendungen im Bereich der Motorantriebe sind heute bereits SiC-MOSFETs im Spannungsklassenbereich 1.7 kV bis 3.3 kV verfügbar und ExpertInnen der ECPE erwarten, dass diese bis 2025 einen hohen Marktanteil besitzen. Längerfristig wird erwartet, dass SiC-MOSFETs im Bereich 1.7 kV bis 6.5 kV bis 2035 am Markt dominieren werden.

Im Bereich der PV-Anlagen wird der Wirkungsgrad neben der Baugröße als eine der treibenden Faktoren gesehen. Si-SiC Hybridmodule (Si-IGBT und SiC-Dioden) sind bereits am Markt verfügbar und es wird erwartet, dass sie in den kommenden Jahren einen dominanten Marktanteil sowohl für Systeme mit niedriger Leistung (650 V, < 600 W), mittlerer Leistung (1.2 kV, < 30 kW) als auch für Systeme mit hoher Leistung (1.2 kV bis 1.7 kV, > 30 kW) haben werden. SiC-MOSFETs werden über einen längeren Zeitraum betrachtet, sowohl für Anwendungen mit mittlerer als auch mit hoher Leistung hohe Marktanteile lukrieren können. Für kleine Leistungen und für Power Optimizer wird GaN eine als lukrative Alternative zu herkömmlichen Silizium-Komponenten gesehen. Dies betrifft vor allem den Niederspannungsbereich (100 V).

Bei Windkraft-Anlagen gibt es derzeit keine kostengünstigen SiC-Alternativen zum dort dominierenden 1.7 kV Si-IGBT. Da man allerdings von einer weiteren Kostenreduktion bei SiC-Halbleitern in diesem Sektor ausgeht wird auch dort SiC in Zukunft eine Rolle spielen. Auch mögliche Einsparungen aufgrund kompakterer Filtersysteme oder vereinfachter Kühlkonzepte kann den Einsatz von SiC attraktivieren.

Die Leistungselektronik für Industrie, Automation und Robotik umfasst Antriebsumrichter und Servoantriebe. Diese stehen ebenfalls unter hohem Kostendruck. Kurzfristig werden SiC-Si Hybridlösungen als Alternative zu Si-IGBT Lösungen gesehen. Langfristig (bis 2035) wird erwartet, dass der SiC-MOSFET (im Bereich 1.2 kV bis 1.7 kV) einen signifikanten Marktanteil erreichen kann. Auch hier wird GaN als Alternative gesehen. Dies betrifft aber ausschließlich den niedrigeren Spannungsbereich < 650 V.

Für Antriebe im hohen Leistungsbereich für Spannungsniveaus von 1.2 kV bis 6.5 kV wird erwartet, dass der Si IGBT als dominierendes Produkt für leistungselektronische Lösungen erhalten bleibt.

PowerAmerica Roadmap:

PowerAmerica veröffentlichte eine Roadmap, die sich sehr stark auf technische Aspekte von WBG fokussiert. Dabei geht es bei dieser Roadmap unter anderem um die Performance von WBG-Halbleitern, sowie aktueller Kostenentwicklung in Euro pro Ampere. Weiters konzentriert sich die Roadmap auf einen 5-Jahres-Horizont und behandelt Themen wie Strategien zur:

- Kostenreduktion,
- Verbesserung der Zuverlässigkeit und Qualität und
- Performance-Optimierung.

PowerAmerica sieht enorme Wachstumschance für WBG-basierte Halbleiter. Dies betrifft sowohl SiC als auch GaN. SiC weist kurzfristig ein höheres Wachstumspotential als GaN auf. Als Grund dafür wird auch hier das hohe Interesse an SiC im Automotive Bereich, gefolgt von Lösungen für PV und Datenzentren genannt. In der Roadmap wird SiC für Anwendungen mit höheren Spannungen (> 600 V) in Betracht gezogen, während GaN als Kandidat für Spannungen < 650 V genannt wird. Weiters werden kritische Faktoren identifiziert, die eine schnellere Marktpenetration verhindern. Dies betrifft zum Beispiel hohe Kosten von WBG für Hochstromanwendungen oder die Zuverlässigkeit und Validierung der selbigen für GaN-Transistoren.

ITRW Roadmap:

Die ITRW Roadmap ist auf eine kurzfristige (0 - 5 Jahre), mittelfristige (5-10 Jahre) und langfristige (10 - 20+ Jahre) Betrachtung von WBG ausgerichtet. In kurzfristigen Szenarien sieht die Roadmap ähnlich wie auch schon Roadmaps von ECPE und PowerAmerica großes Potential für SiC in bestimmten Applikationen (z.B. Automotive, PV) stärker Fuß zu fassen und hier die Möglichkeit den Marktanteil zu erhöhen. Dies betrifft z.B. Traktionsantriebe im Allgemeinen, Schnellladesysteme für Elektrofahrzeuge, Wechselrichter für PV-basierte Stromerzeugung aber auch Lösungen für Hochgeschwindigkeits- und/oder Nahverkehrszüge.

Die ITRW Roadmap sieht ähnlich wie auch ECPE und PowerAmerica Roadmap GaN mit höheren Marktanteilen erst in einer Mittelfristbetrachtung. Relevante Applikationen für GaN-basierte Lösungen sind Anwendungen mit hohen Stückzahlen im Niederspannungsbereichs. Dies betrifft zum Beispiel leistungselektronische Lösungen für Datencenter, klassische Ladegeräte wie Stromversorgungen für Laptop oder Mobiltelefone, On-Board-Charger für Elektrofahrzeuge und Photovoltaik-Wechselrichter.

Eine Übersicht der Markteinschätzung für SiC- und GaN-basierte Bauelemente ist in **Abbildung 9** und **Abbildung 10** dargestellt. Diese Einschätzung wurde sowohl in der ITRW als auch PowerAmerica Roadmap publiziert.

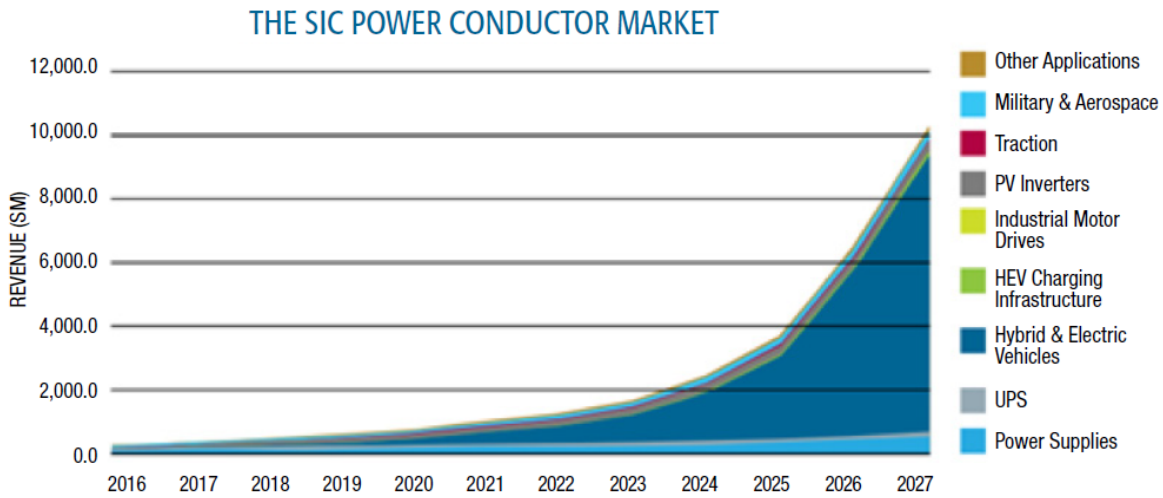

Abbildung 9: Markteinschätzung der ITRW Roadmap für SiC-basierte Leistungshalbleiter bis 2027 (ITRW Roadmap, 2020).

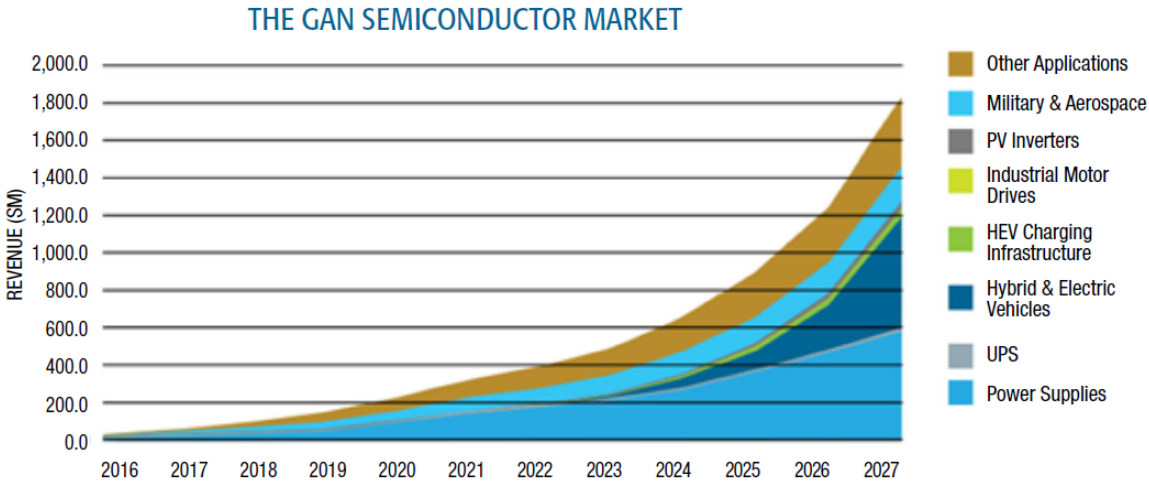

Abbildung 10: Markteinschätzung der ITRW Roadmap für GaN-basierte Leistungshalbleiter bis 2027 (ITRW Roadmap, 2020).

<u>Yole Roadmap:</u>

Yole gilt als bekanntes Unternehmen, mit Fokus auf Marktanalysen und Roadmaps für verschiedene als relevant geltende Technologien. Deren SiC und GaN Roadmaps sind in **Abbildung 11** und **Abbildung 12** veranschaulicht. Für SiC Anwendungen entspricht der prognostizierte Umsatz bis 2023 einer Größenordnung wie schon bei ITRW und PowerAmerica vorgestellt. Lediglich die Verteilung für relevante Applikationen variiert zwischen den jeweiligen Roadmaps. Aber auch Yole sieht den kurzfristigen Treiber für SiC im Bereich Automotive und dessen Komponenten und Anwendungen.

Für GaN präsentiert Yole zwei verschiedene Szenarien: eine konservative Entwicklung, diese wird als "Base case scenario #2" bezeichnet und ein zweites optimistischeres Szenario ("Bull-Case-Szenario"). Hier wird davon ausgegangen, dass GaN in den besonders attraktiven Markt der Ladegeräte (Charger), vor allem im Bereich der „Wireless Charger“ für Haushaltsgeräte und Mobiltelefone noch schneller vordringt als bisher angenommen.

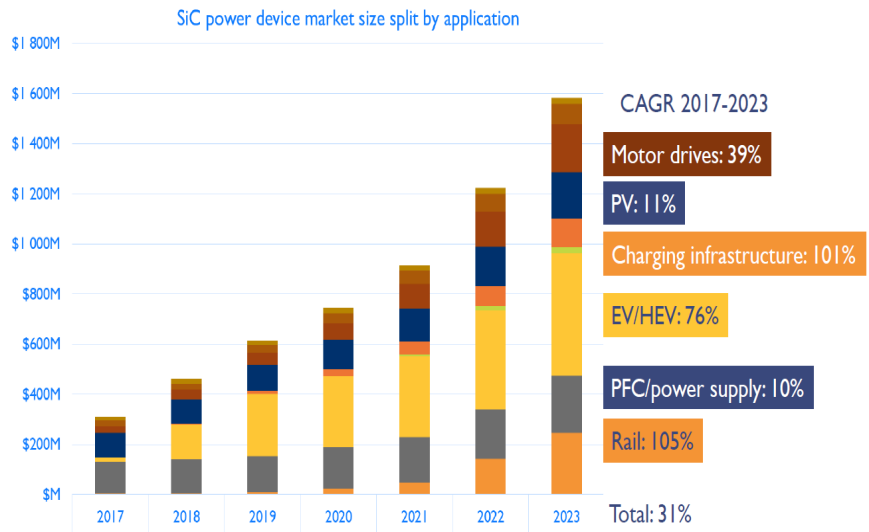

Abbildung 11: Markteinschätzung der Yole Roadmap für SiC-basierte Leistungshalbleiter bis 2023 (Yole, 2015).

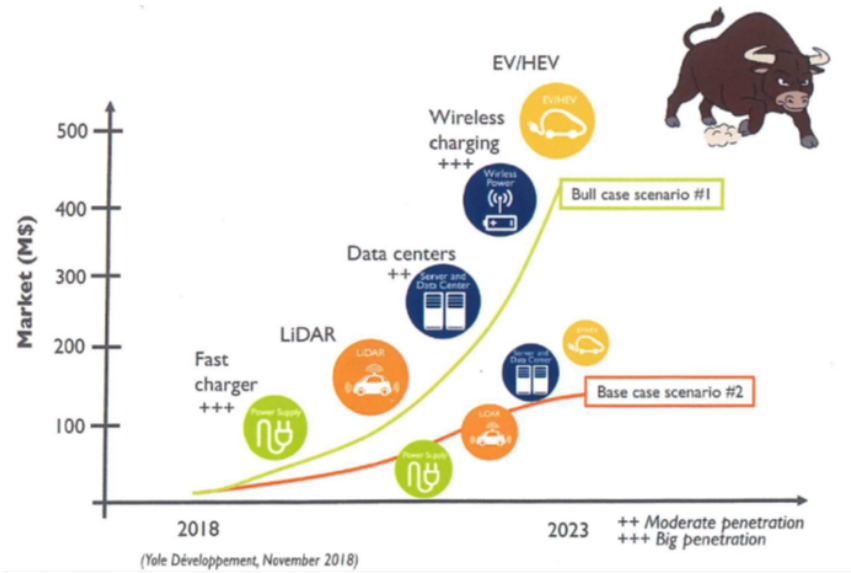

Abbildung 12: Markteinschätzung der Yole Roadmap für GaN-basierte Leistungshalbleiter bis 2023 (Yole, 2015).

5.3.2. PECTA Application Readiness Maps (ARMs)

Auf Basis der Ergebnisse und Erkenntnisse der vorab beschriebenen Roadmaps konnte PECTA mit der Unterstützung von Vertretern von ECPE, ITRW und PowerAmerica die sogenannten PECTA Application Readiness Maps (ARMs) entwerfen. Diese zeigen einerseits eine aktualisierte Sichtweise aller Roadmaps über einen Zeithorizont bis 2035 und erlauben gleichzeitig eine Darstellung der Ergebnisse mit geteiltem Fokus auf GaN (GaN-ARM - **Abbildung 13**) und SiC (SiC-ARM - **Abbildung 14** bis **Abbildung 17**) für relevante Applikationen wie sie in den bereits bestehenden Roadmaps spezifiziert wurden. Darüber hinaus dient die Application Readiness Map (ARM - **Abbildung 18** bis **Abbildung 20**) mit Blick auf WBG-relevante Anwendungen als Grundlage für PECTA's Phase 2, in der auch mögliche Effekte durch politische Maßnahmen und Einflüsse auf die jeweiligen Applikationen dargestellt werden sollen. Sämtliche, bereits zuvor erörterten Erkenntnisse, sowie Ergebnisse basierend auf Diskussionen mit InteressensvertreterInnen sind in diesen ARMs (GaN-ARM, SiC-ARM und ARM) abgebildet.

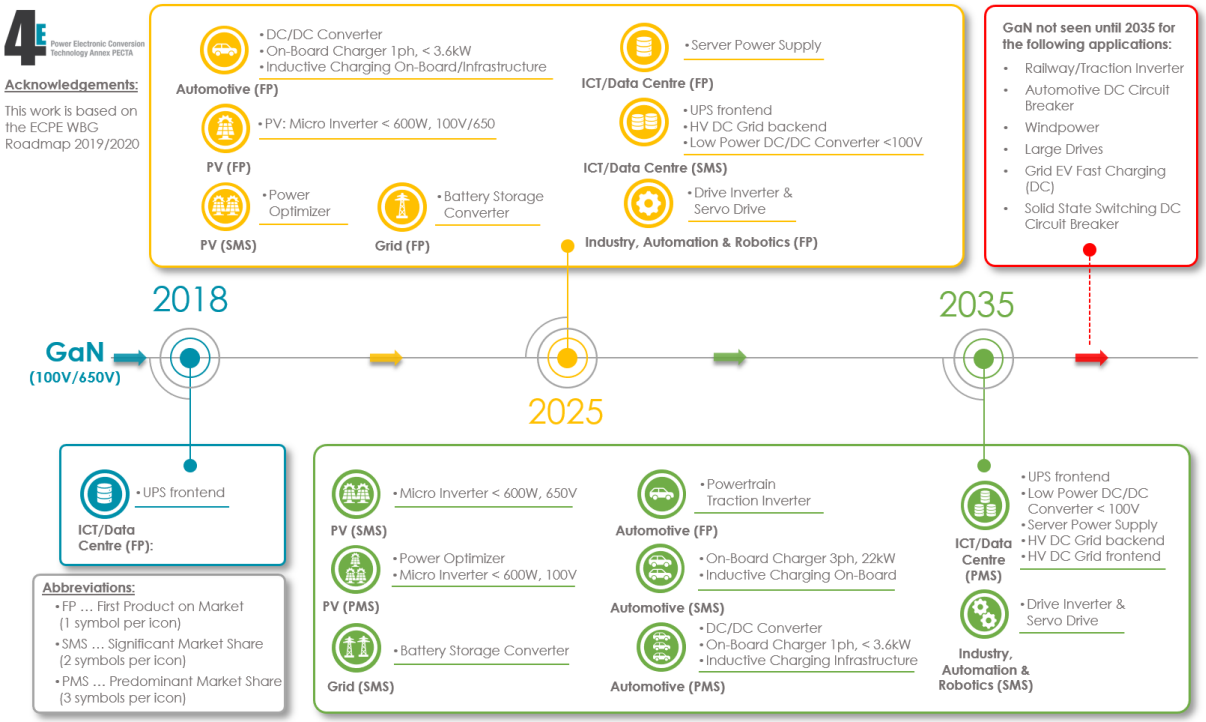

Abbildung 13: GaN basierte Application Readiness Map für 100 V bis 650 V Komponenten für einen Zeithorizont bis 2035.

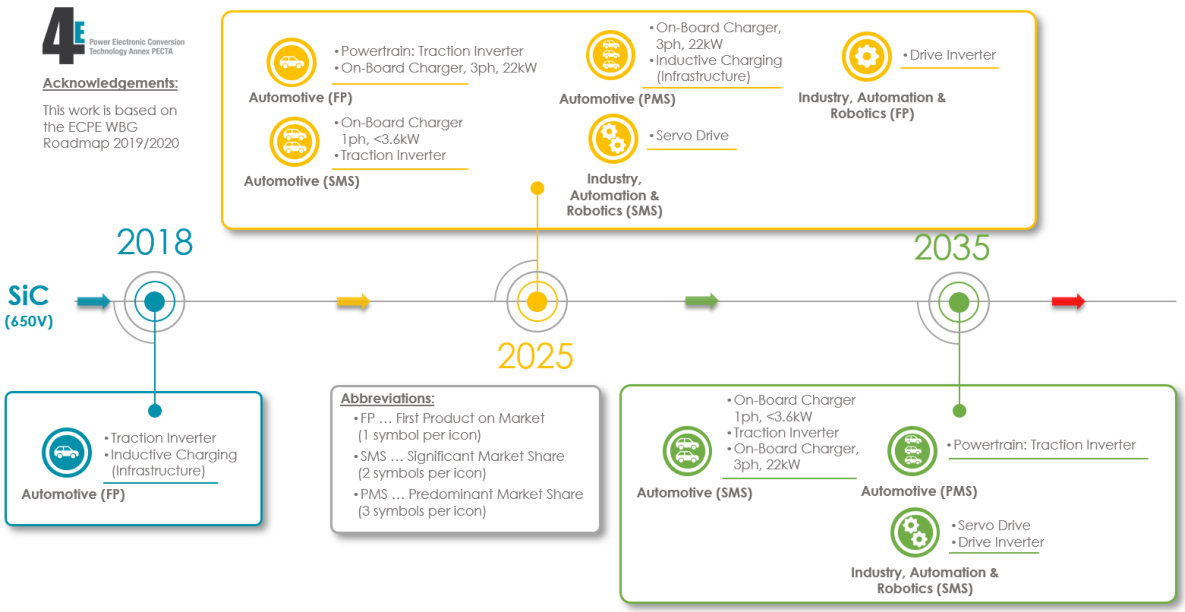

Abbildung 14: SiC basierte Application Readiness Map für 650 V Komponenten für einen Zeithorizont bis 2035.

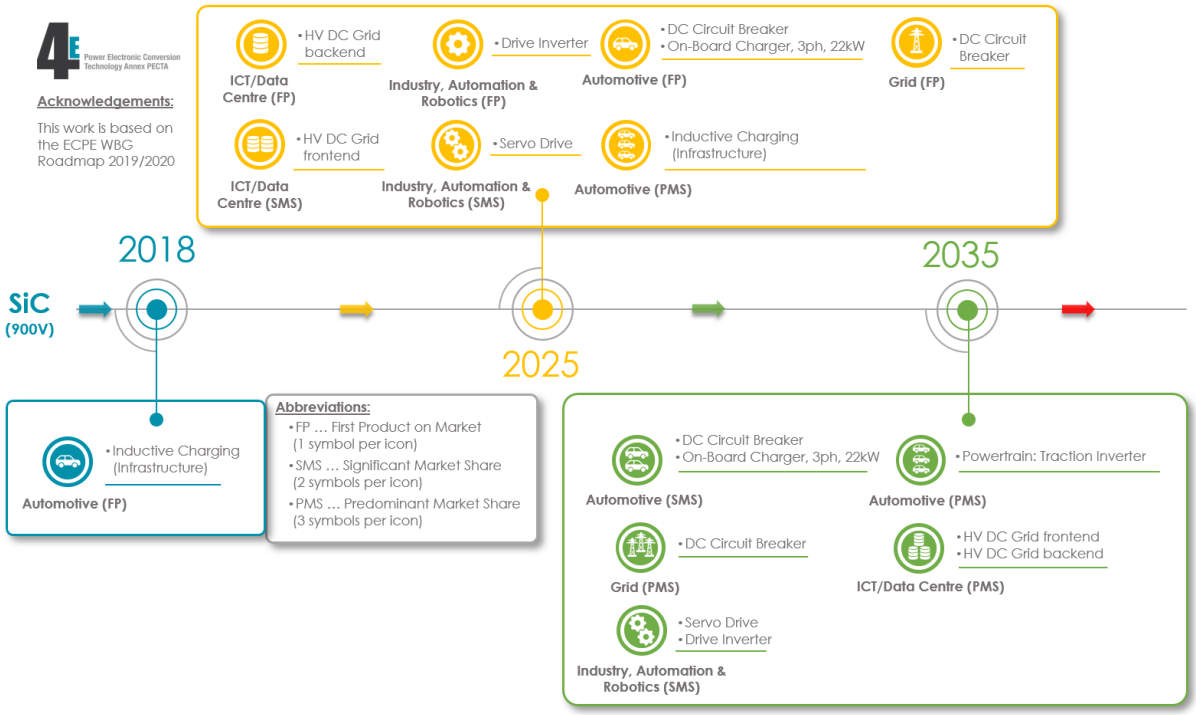

Abbildung 15: SiC basierte Application Readiness Map für 900 V Komponenten für einen Zeithorizont bis 2035.

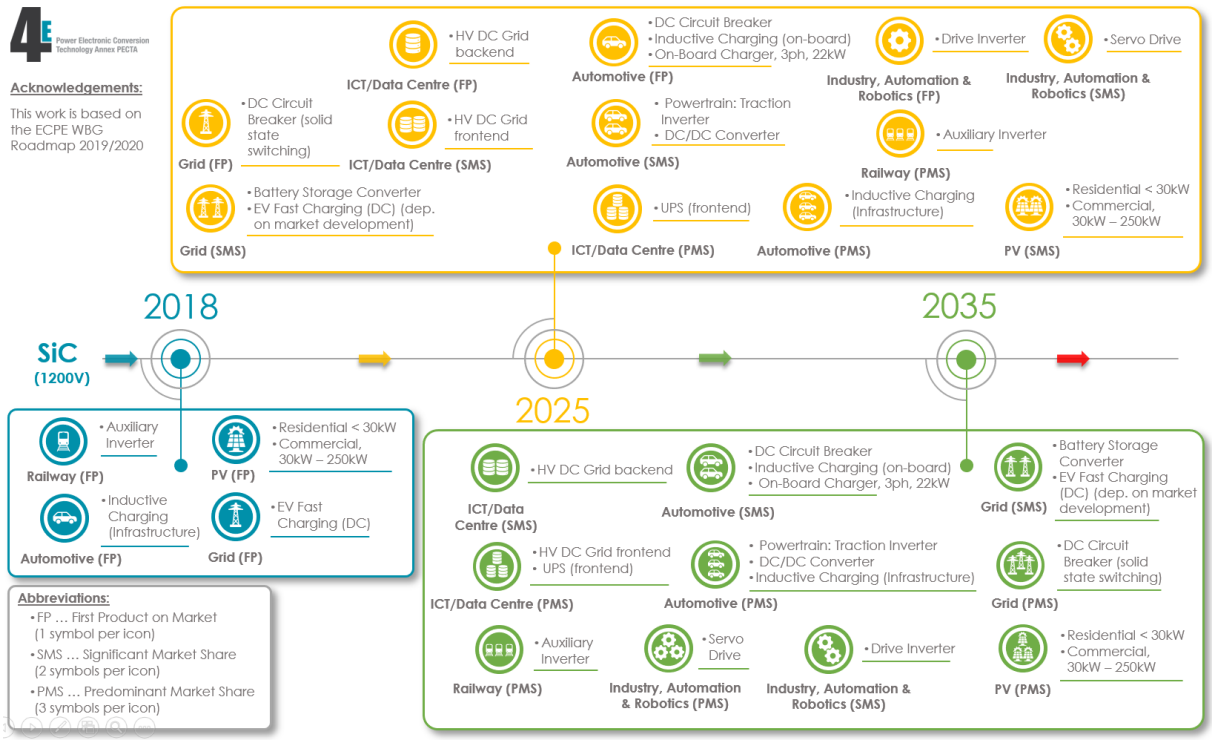

Abbildung 16: SiC basierte Application Readiness Map für 1.2 kV Komponenten für einen Zeithorizont bis 2035.

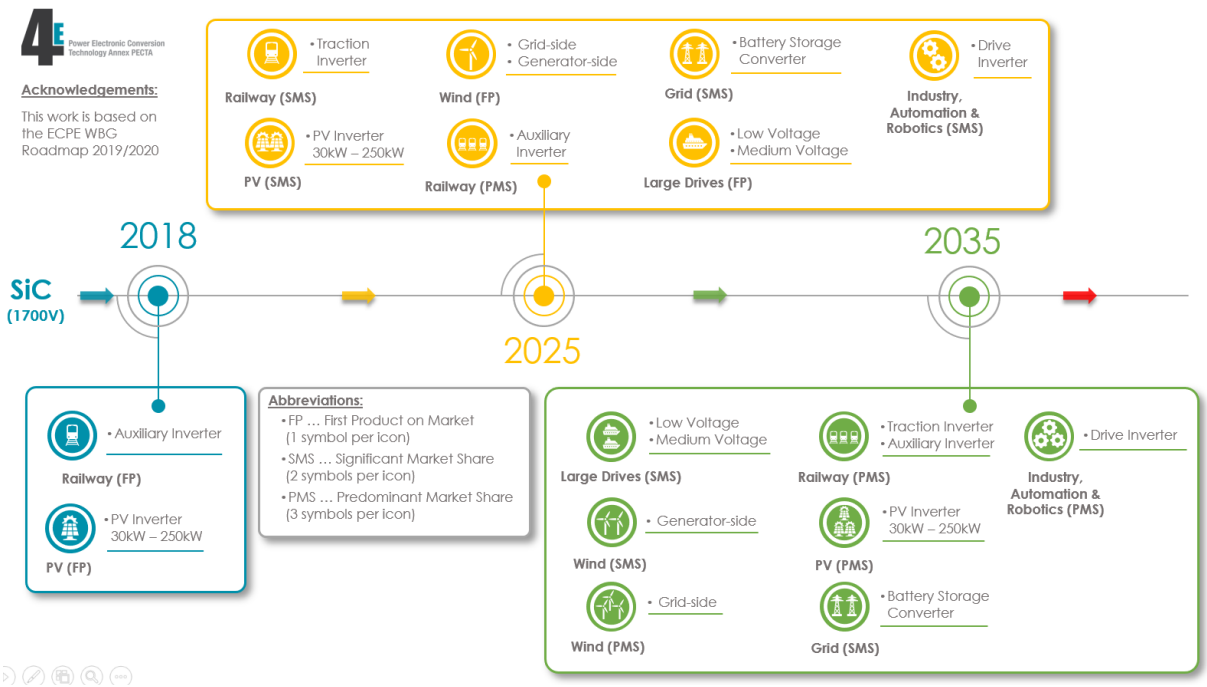

Abbildung 17: SiC basierte Application Readiness Map für 1.7 kV Komponenten für einen Zeithorizont

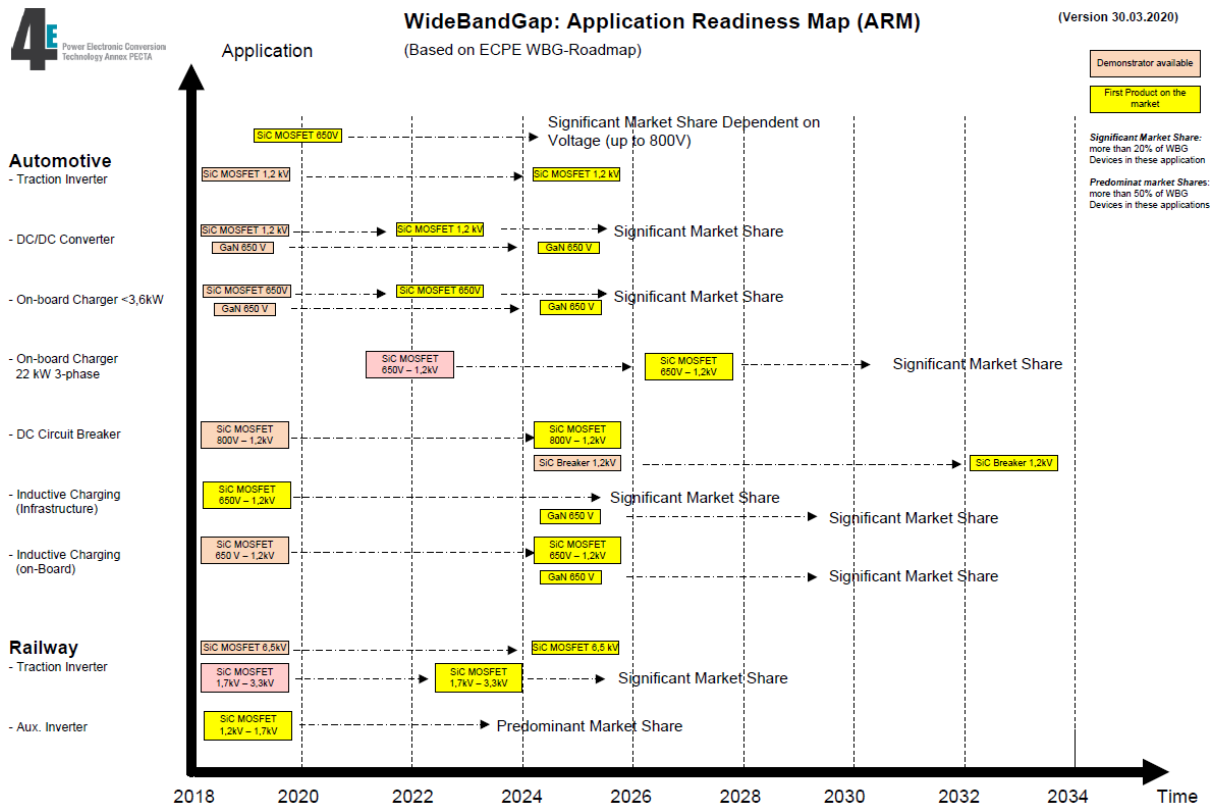

Abbildung 18: Application Readiness Map für Automotive und Railway für einen Zeithorizont bis 2032.

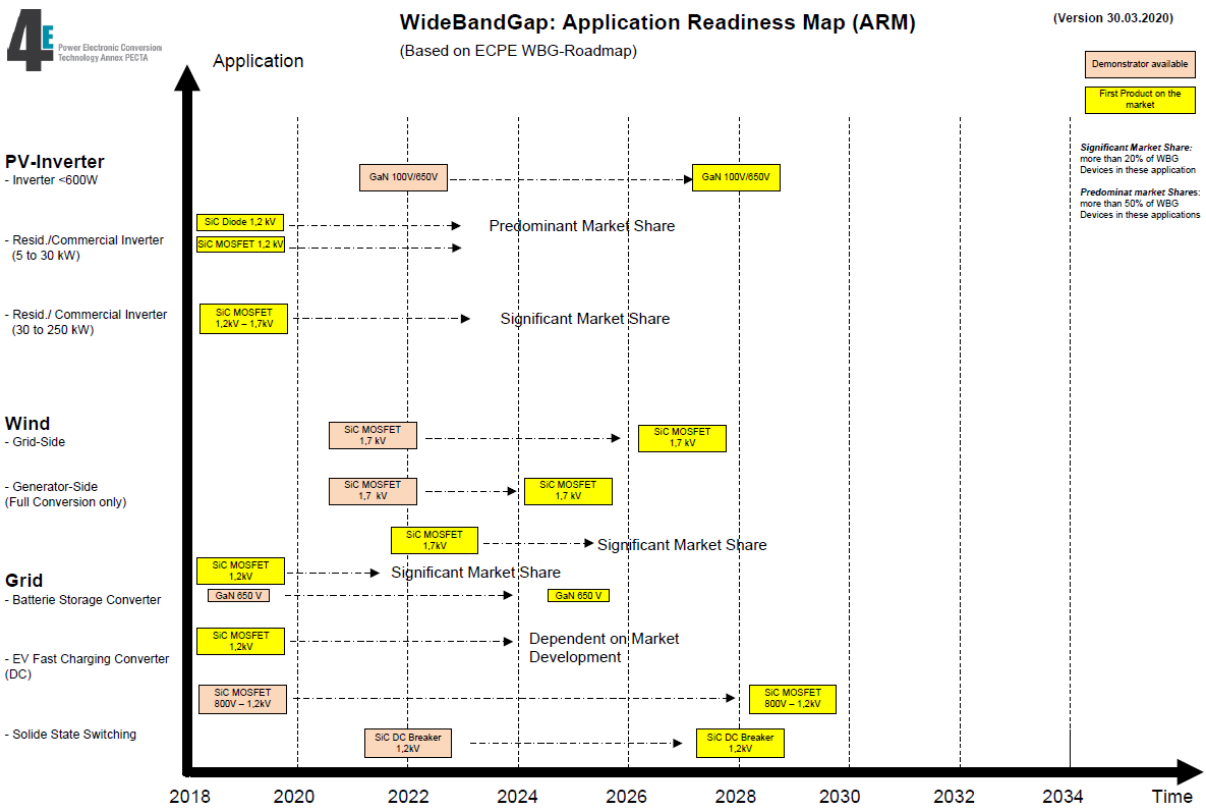

Abbildung 19: Application Readiness Map für PV, Wind und Netzapplikationen für einen Zeithorizont bis 2028.

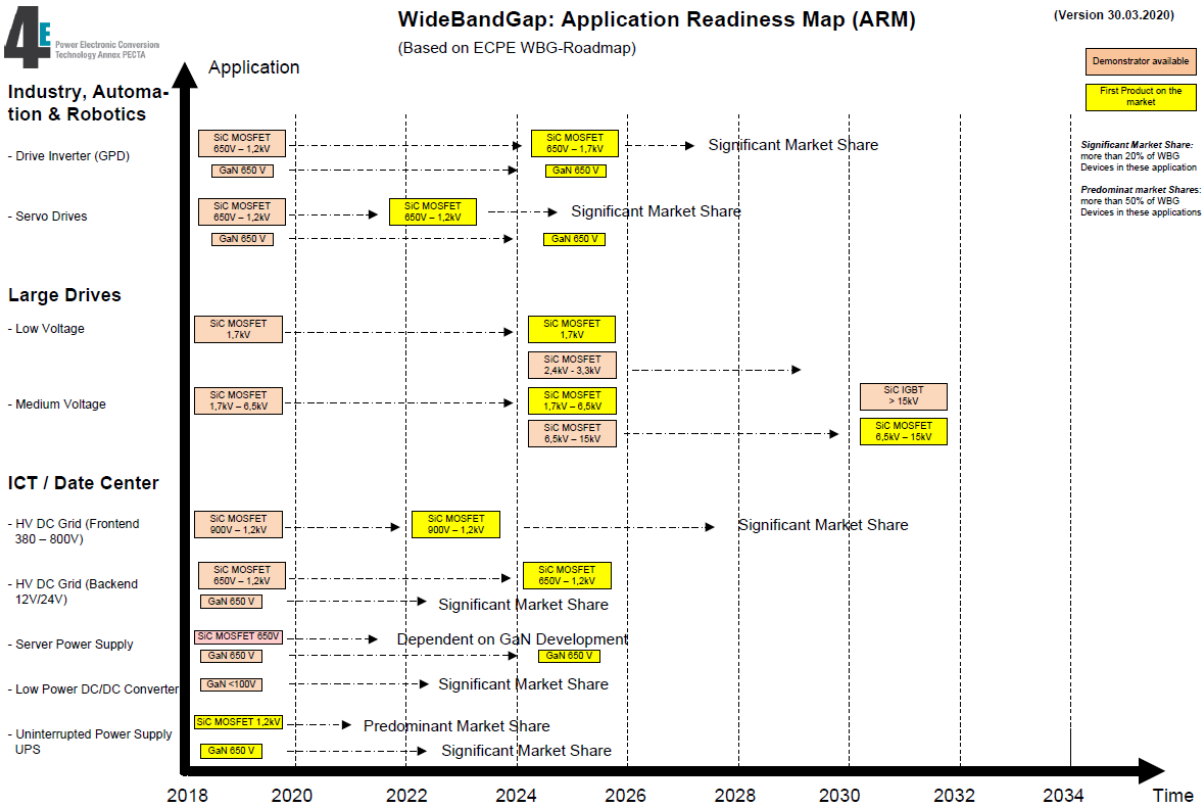

Abbildung 20: Application Readiness Map für Industrieanwendungen, Großantriebe, ICT und Datencenter für einen Zeithorizont bis 2030.

5.4. Energieeinsparpotential

Im aktuellen Kapitel wird das auf Literaturrecherche basierende Ergebnis einer ersten Abschätzung zur potentiellen globalen Energieeinsparung für ausgewählte Applikationen beschrieben. Diese Abschätzung basiert auf der Annahme, dass für die jeweils betrachteten Anwendungen siliziumbasierte Leistungshalbleiter durch jene auf Wide-Bandgap Basis ersetzt werden, wobei gleichzeitig alle Eigenschaften, Effekte und Synergien, wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, genutzt werden. Die in **Tabelle 3** und **Abbildung 21** angegebenen Zahlen sind das Ergebnis weiterführender Untersuchungen und Berechnungsmodelle wie in der jeweiligen Literatur beschrieben. Für eine detaillierte Zusammenfassung wird auf den vollständigen PECTA-Report mit dem Titel „Wide Band Gap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map“ unter https://nachhaltigwirtschaften.at/de/iea/publikationen/iea-4e-pecta-wide-band-gap-technology-2020.php verwiesen.

Zur Berechnung der jeweiligen Ergebnisse wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- **Elektrofahrzeuge:** Die Höhe der Energieeinsparung wird unter der Annahme berechnet, dass alle neu produzierten Autos weltweit batterieelektrische Fahrzeuge sein werden (70 Mio./Jahr), bei durchschnittlichem Fahrverhalten und durchschnittlicher Fahrstrecke.
- **Windenergieerzeugung:** Das hier angegebene Ergebnis beschreibt eine Steigerung der Energieerzeugung, die durch die Reduktion an Umwandlungsverlusten beim Energietransfer vom Generator zu den Netzanschlussklemmen erreicht wird.
- **PV-Energieerzeugung:** Das hier angegebene Ergebnis beschreibt eine Steigerung der Energieerzeugung, die durch die Reduktion an Umwandlungsverlusten beim Energietransfer vom Generator zu den Netzanschlussklemmen erreicht wird.
- **Stromversorgung (AC-DC):** Das hier angeführte Einsparpotential umfasst Laptops, Tablets und Mobiltelefone.
- **Rechenzentren:** Die Abschätzung beschreibt ein Szenario, das sowohl den Umstieg von Silizium auf WBG-Technologie als auch von AC auf DC-basierte Energieverteilung berücksichtigt.

Tabelle 3: Erste Abschätzung des weltweiten Energieeinsparpotentials bei einem Umstieg von Silizium auf WBG für ausgewählte Applikationen.

Applikation	Energieeinsparung (TWh/year)
Elektrofahrzeuge	11.7
Windkraft	35.6
PV	10.3
Ladegeräte (AC-DC)	7.8
Datencenter	28.4

Weiterhin ist zu beachten, dass der Anteil von PV und Windkraft in den nächsten 30 Jahren stark zunehmen wird. Im Vergleich zu 2018 wird die Energieerzeugung durch Windkraftanlagen im Jahr 2050

voraussichtlich 17-mal höher sein ((DNV, 2019) - siehe **Abbildung 22**). Darüber hinaus wird prognostiziert, dass der Anteil der Energieerzeugung durch PV-Kraftwerke von 1.99 EJ im Jahr 2018 auf 96 EJ ansteigen wird, was 48-mal höher ist als im Jahr 2018.

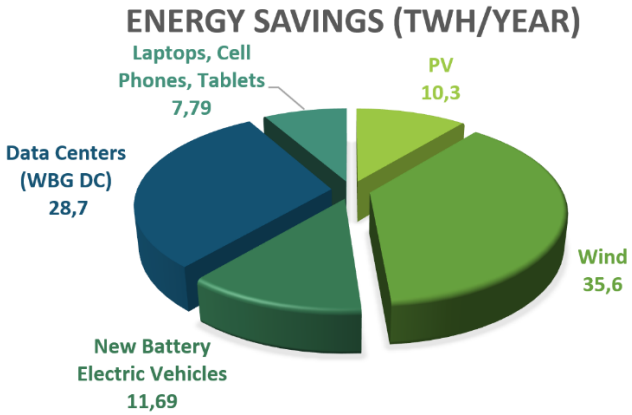

Abbildung 21: Energieeinsparpotential für ausgewählte Applikationen in Terawattstunden pro Jahr (Makoschitz et al, 2020).

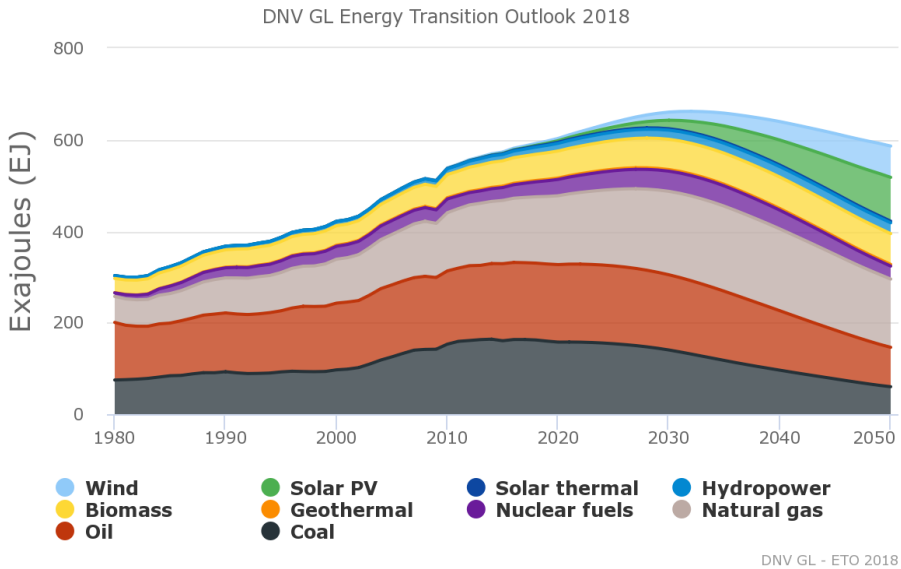

Abbildung 22: Weltprimärenergieversorgung nach Energieträgern (DNV, 2019).

Das Ergebnis zeigt klar, dass die Effizienzsteigerung in Prozentpunkten pro Applikation nicht allein ausschlaggebend ist, um ein hohes Maß an Energieeinsparung zu erreichen. Auch Applikationen mit geringer Effizienzsteigerung aber hoher installierter Leistung wie zum Beispiel Windkraft oder PV können einen wesentlichen Anteil am Gesamteinsparpotential besitzen. Aufgrund des auch in Zukunft durch die Länder weiter vorangetriebenen Umstieg auf erneuerbare Energieträger sowie weltweite Investitionen im Bereich „Digitalisierung“ werden die hier beschriebenen Applikationen als besonders relevant angesehen.

5.5. Publikationsübersicht

In **Tabelle 4** sind sämtliche Kommunikationsaktivitäten und Publikationen der ersten Arbeitsperiode übersichtlich dargestellt. Jene Publikationen und Vorträge, an denen Österreich stark mitwirken konnte wurden ebenfalls gekennzeichnet.

Tabelle 4: PECTA – Ergebniskommunikation im Zuge der ersten Arbeitsperiode.

Jahr	Event	Titel		Autoren/ Vortragende	Art der ö. Beteiligung
Okt. **2018**	56. Fachtagung der Österreichischen Gesellschaft für Energietechnik im OVE	Leistungselektronik – Schlüsseltechnologien (Key Enabling Technologies – KET) der Energiewende	**X**	M. Makoschitz	Vortrag
März **2019**	ECPE SiC & GaN User Forum	ECPE SiC&GaN User Forum	**X**	M. Makoschitz	Teilnahme/Netzwerken
März **2019**	Kurzpräsentation im Zuge d. Vorlesung – TU Wien	Vorlesungstitel: Renewable Energy Power Electronic Converters	**X**	M. Makoschitz	Vortrag
Sept. 2019	BMK – IEA Vernetzungstreffen	IEA 4E PECTA: Leistungselektronik zur Steuerung und Umwandlung elektrischer Energie	**X**	M. Makoschitz	Vortrag
Nov. 2019	Kurzpräsentation im Zuge d. Vorlesung - FH Technikum Wien	Ansteuerschaltungen in der Leistungselektronik	**X**	M. Makoschitz	Vortrag
März 2020	Kurzpräsentation im Zuge d. Vorlesung – TU Wien	Vorlesungstitel: Renewable Energy Power Electronic Converters	**X**	M. Makoschitz	Vortrag
Mai 2020	Online Publikation	Wide Bandgap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map	**X**	M. Makoschitz, R. Brüniger, A. Diaz, et. al	Publikation
Juli 2020	PCIM Europe – International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management	PECTA – A New Energy Efficiency Initiative of the International Energy Agency (IEA)	**X**	M. Makoschitz	Vortrag

Jahr	Event	Titel		Autoren/ Vortragende	Art der ö. Beteiligung
Sept. 2020	BMK – IEA Vernetzungstreffen	IEA 4E PECTA: Leistungselektronik zur Steuerung und Umwandlung elektrischer Energie	**X**	M. Makoschitz	Teilnahme, Netzwerken
Okt. 2020	Kurzpräsentation im Zuge d. Vorlesung - FH Technikum Wien	Ansteuerschaltungen in der Leistungselektronik	**X**	M. Makoschitz	Vortrag
Nov. 2020	Online Publikation	4E PECTA Factsheet for Term 2020-2024	**X**	R. Brüniger, A. Diaz, M. Makoschitz	Publikation
Feb. 2020	Online Publikation	Huge energy-savings by WBG semiconductors		B. Vogel	
Mai 2020	Online Publikation	Wie der Strom effizienter umgewandelt werden kann		B. Vogel	
Nov 2020	Motor Summit 2020	WBG-Technology: Efficiency potential and application readiness map	**X**	R. Brüniger	Erstellung der Präsentation für Diss. Zwecke
Nov 2020	e.nova 2020	The efficiency potential and application readiness of wide bandgap technology	**X**	M. Makoschitz, A. Diaz	Publikation, Präsentationserst., Vortrag
Nov 2020	IEA - Today in the Lab - Tomorrow in Energy	New Semiconductor materials will deliver significant energy savings.	**X**	M. Makoschitz	Publikation
Dez. 2020	Online Publikation **Policy Brief**	The Energy Efficiency Potential and Application Readiness of Wide Band gap Technology	**X**	R. Brüniger, M. Makoschitz, A. Diaz	Publikation
Jan. 2021	Online Publikation	Switching Elements of the Thrifty Variety		B. Vogel	

Alle Publikationen sind frei über https://www.iea-4e.org/pecta/publications/ und https://nachhaltig-wirtschaften.at/de/iea/publikationen/iea-4e-pecta-wide-band-gap-technology-2020.php zugängig.

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

6.1. Zielgruppen und InteressensvertreterInnen

Im Zuge von PECTA werden die folgenden in **Abbildung 23** dargestellten Zielgruppen adressiert. PECTA fördert die Vernetzung dieser Gruppen durch Workshops und Seminare, um eine leichtere und verbesserte Kommunikation zu ermöglichen. Dies betrifft unter anderem (aber nicht ausschließlich) die folgenden Zielgruppen:

- Firmen zur Herstellung von Leistungshalbleitermaterialien
- Firmen zur Herstellung von Leistungshalbleiterkomponenten
- KundInnen (z.B. im Bereich Stromversorgung, Gleichrichtersysteme, Wechselrichtersysteme, Antriebstechnik etc.)
- SystemherstellerInnen
- Forschungs- und Entwicklungsgruppen im Bereich der Leistungshalbleitertechnik
- Politische EntscheidungsträgerInnen
- Normengremien für zukünftig relevante Standardisierungen

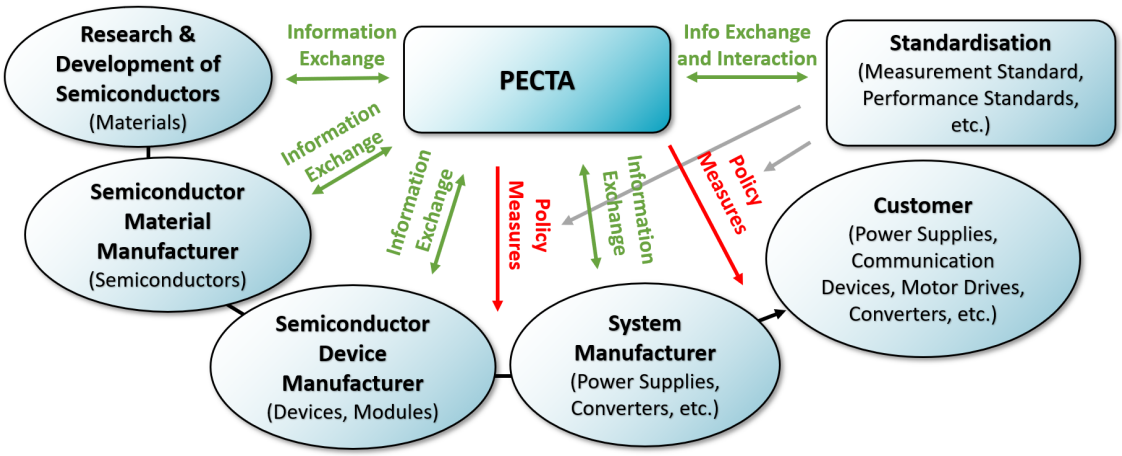

Abbildung 23: PECTA Annex und geplanter Informationsfluss für Förderungen und Entscheidungshilfen im Bereich von WBG.

PECTA dient somit als Kommunikationsplattform für InteressensvertreterInnen. Diese können Inputs im Zuge der jeweiligen Tasks einbringen und somit wesentliche und vor allem aktuelle Beiträge für mögliche Empfehlungen an politische EntscheidungsträgerInnen und/oder Standardisierungsgruppen leisten. Mögliche politische Maßnahmen zur Unterstützung einer bestimmten Technologie können also sinnvollerweise im Produktionspfad zwischen SystemherstellerInnen und EndkundInnen gesetzt werden. Am Beispiel von Ladegeräten wäre dies beispielsweise die Festlegung oder die Eröhung einer unteren Effizienzschranke für diverse Produktgruppen, die die Integration von WBG-basierten Komponenten unterstützt.

Durch die Mitarbeit von VertreterInnen aus Forschung und Industrie sollen Treiber und Barrieren der WBG-basierten Technologie identifiziert, besser verstanden und durch politische Programme treibende Maßnahmen aufrecht erhalten, unterstützende Regelungen eingeführt und Restriktionen reduziert werden.

6.2. Kommunikation und Dissemination

Um die Ergebnisse von PECTA für österreichische Strategien, Unternehmen und Projekte zu verwerten, wurde eine Reihe an Kanälen genutzt, um unterschiedlichste Interessensgruppen bereits in dieser sehr frühen Phase zu erreichen und in Diskussionen einzubinden. Eine Zusammenfassung der nationalen und internationalen Kommunikationsstrategie ist in **Tabelle 5** und **Tabelle 6** dargestellt.

Tabelle 5: PECTA - nationale Kommunikationsstrategie.

Nationale Kommunikations-strategie	PECTA Web-site	Nachhaltig Wirtschaften Website	Policy Brief	Workshops	Einbindung in Lehrtätigkeiten
Forschung	x	x		x	x
Industrie	x	x		x	x
Politik	x	x	x	x	

Tabelle 6: PECTA - internationale Kommunikationsstrategie.

Internationale Kommunikati-onsstrategie	PECTA Website	Präsentation bei 4E ExCo Meetings und Annex Meetings	Nachhaltig Wirtschaf-ten Website	Präsenta-tion/Publikatio-nen auf int. Fach-tagung	Policy Brief	Work-shops
Forschung	x		x	x		x
Industrie	x		x	x		x
Politik	x	x	x		x	x

Ein wesentlicher Schwerpunkt sämtlicher Disseminationstätigkeiten bildet die PECTA-**Website** (https://www.iea-4e.org/pecta/). Diese bietet eine Übersicht über aktuell laufende Tasks, Mitgliedsstaaten, AnsprechpartnerInnen und aktuelle ExpertInnen aus dem universitären und industriellen Umfeld. Sämtliche Publikationen im Zusammenhang mit PECTA werden auf der PECTA Website veröffentlicht. Die Publikationen auf der PECTA-Website sind für alle Zielgruppen zugängig und der Informationsgehalt entsprechend aufbereitet. Um eine noch größere Reichweite zu erzielen, ist die PECTA-Website in die Homepage des übergeordneten Technologieprogramms IEA 4E TCP eingebunden. Um relevante Ergebnisse und Highlights auch national unter österreichischen Interessensgruppen zu verbreiten, ist die Publikation auf der IEA-Website des BMK entscheidend. Diese ermöglicht InteressensvertreterInnen aus Forschung und Industrie einen Überblick über Highlights diverser Annexaktivitäten sowohl in deutscher als auch englischer Sprache.

Die Einbettung der Ergebnisse in **Lehrinhalte an nationalen universitären Einrichtungen** ist ein weiterer relevanter Kanal, um zukünftige VertreterInnen aus Industrie und Forschung bereits in einem frühen Ausbildungsstadium auf die Relevanz, positiver und negativer Aspekte sowie Kernfragen beim Technologievergleich aufmerksam zu machen. Weiters hilft die systemische Darstellung der Integration von WBG in leistungselektronische Komponenten dabei, ein stärkeres Verständnis für die Technologie auf Komponentenebene zu schaffen.

Workshops werden dazu genutzt, um sämtliche InteressensvertreterInnen im Rahmen von PECTA zu versammeln, um aktuelle Ergebnisse und Fragestellungen aus den jeweiligen Tasks des Annexes zu betrachten und mit einem breiteren Publikum als den jeweiligen Taskmitgliedern zu bearbeiten. Es wird dabei zwischen Workshops unterschieden, die in erster Linie Mitgliedern im Annex vorbehalten sind und jene die für eine breite Öffentlichkeit zugängig gemacht werden. Wurden in der ersten Arbeitsphase nur Workshops exklusiv für PECTA-Mitglieder veranstaltet, sind für die zweite Arbeitsphase Workshops geplant, die für sämtliche Interessensgruppen zugängig sein sollen.

Der sogenannte „**Policy Brief**“ ist ein Werkzeug für breite Öffentlichkeitsarbeit, dass eine Vielzahl von relevanten Ergebnissen und Erkenntnissen in einer Kurzübersicht in möglichst einfacher technischer Ausgestaltung zusammenfasst. Dies unterstützt vor allem die Zielgruppe politischer EntscheidungsträgerInnen dabei, sich einen schnellen Eindruck über mögliche Empfehlungen oder Beobachtungen des Annexes zu verschaffen.

Publikationen und Präsentationen auf internationalen Fachtagungen ermöglichen einerseits die Verbreitung technischer Ergebnisse und Erkenntnisse und andererseits, den Zugang zu einem noch breiteren Pool an ExpertInnen mit breitem Fachwissen. Diskussionen im Zuger der Präsentation oder durch Netzwerkaktivitäten können das Einbinden zusätzlicher InteressentInnen, sowie die Verfügbarkeit aktueller Informationen oder möglicher zukünftiger Einschätzungen zur Folge haben.

4E ExCo und Annexmeetings sind durch das Technologieprogramm 2-mal jährlich veranstaltete Events, bei denen sämtliche LändervertreterInnen des Technologieprogramms einen Überblick über die geleistete Arbeit im Annex erhalten. Im 4E ExCo Meeting findet üblicherweise eine Kurzpräsentation zum Status und den Ergebnissen des jeweiligen Annexes statt. Ein ausführlicheres Meeting stellt das Annexmeeting dar. Diese dauern üblicherweise von einem halben Tag bis hin zu maximal zwei vollen Tagen. TeilnehmerInnen sind sowohl LändervertreterInnen von Annexmitgliedsländern sowie VertreterInnen mit Beitrittsabsichten zu dem betreffenden Annex. Auf nationaler Ebene findet weiters in der Regel kurz vor einer 4E ExCo Veranstaltung ein Meeting mit nationalen TeilnehmerInnen an 4E Annexen statt. Dies betrifft aktuell EMSA, EDNA und PECTA.

Sämtliche Disseminationstätigkeiten im Zuge der ersten Arbeitsperiode 2019-2021 sind in **Tabelle 4** gelistet. Diese beschreibt auch den österreichischen Beitrag zur jeweiligen Disseminationstätigkeit.

Da PECTA in seiner ersten Arbeitsperiode und der Gründung 2019 als junger Annex gilt, sind aktuell noch keinerlei Gesetzgebungen, Normen oder Standards durch die aktuelle Annexarbeit entstanden. Durch die Mitarbeit im Zuge der Mission Innovation Austria konnte aber bereits ein wesentlicher Beitrag zur nationalen FTI-Politik geleistet werden (**BMK**, **„Umsetzungsplan zur Energieforschungsinitiative in der Klima- und Energiestrategie“, IRE.10: Energieeffizienz elektrischer Energiewandlung, IRE.10 Autoren: Markus Makoschitz, Adriana Diaz**). Weiters waren die Ergebnisse und Erkenntnisse

der ersten Arbeitsphase der Grundstein für die Definition weiterer Tasks und der zukünftigen Strategie und Ausrichtung von PECTA (siehe auch PECTA Phase 2 Task A-F).

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Die Umsetzung politischer Maßnahmen und somit die Anwendung verschiedener politischer Instrumente zeigt in der Regel ein beschleunigendes Verhalten, um eine schnellere Markteinführung einer vielversprechenden Technologie zu erwirken. Dies zeigt auch das folgende Statement aus (Europäische Kommission, 2015): "Ohne energiepolitische Maßnahmen wäre der Verbrauch in den EU29-Ländern im Jahr 2013 um etwa 11 % höher gewesen“. Ziel muss es daher sein, mögliche politische Maßnahmen zu definieren, die eine Einführung von WBG-Halbleitern für Applikationen mit hohem Energieeinsparpotential fördern. Die internationale Energieagentur (IEA) veröffentlichte und kategorisierte bereits ein mögliches Set an Instrumenten (siehe **Tabelle 7**). Diese IEA-Kategorien sind besonders vorteilhaft, um mögliche Perspektiven und den Handlungsspielraum von politischen EntscheidungsträgerInnen besser zu verstehen und bei der Organisation eines Portfolios von Maßnahmen zu unterstützen (IEA 4E EDNA, 2017). Dabei wird zwischen „verpflichtenden Instrumenten“ und „freiwilligen Instrumenten“ unterschieden. Die in **Tabelle 8** verwendeten Abkürzungen/Buchstaben (z.B. policy making available information I-I, I-T) beziehen sich dabei auf den in **Tabelle 7** dargestellten Maßnahmenkatalog (z.B. I-I: Information & education – Information provision).

Wie jene Beispiele aus **Tabelle 8** bereits zeigen, können Energieeinsparungen durch politische Maßnahmen auf der Geräteebene z. B. durch Kennzeichnung mittels Energielabels und Ökodesign-Anforderungen (Mindestanforderungen an die Energie- und Funktionsleistung) und auf den verschiedenen Systemebenen gefördert werden. Dementsprechend werden Energieeinsparungen auf Geräteebene typischerweise durch ein besseres Produktdesign realisiert, welches in der Regel die Implementierung einer effizienteren Technologie nach sich zieht, z. B: LEDs anstelle von Glühbirnen. Einsparungen auf Systemebene lassen sich durch die Auslegung und Auswahl der Komponenten eines Systems unter Berücksichtigung der Ziele des entsprechenden Systems erreichen (IEA 4E EDNA, 2017).

Prinzipiell kann die Politik einen integrativen Ansatz verfolgen, indem sie Akteure aus Technologie, Markt und Politik einbezieht (Long, 2019). Da sich sowohl SiC als auch GaN im Reifegrad deutlich unterscheiden, ist es wichtig, bei der Anwendung politischer Instrumente sowohl zwischen den jeweiligen Technologien als auch bestimmten Applikationen zu unterscheiden. Um weitere detailliertere Aussagen treffen und Vorschläge an die FTI-Politik erbringen zu können, wird PECTA fortgeführt (Phase 2, Task A - F). Österreich wird auch weiter als einer der Hauptakteure im Annex vertreten sein und somit einen wesentlichen Beitrag bei der Analyse relevanter Kernfragen liefern.

Tabelle 7: Durch die IEA veröffentlichter Maßnahmenkatalog für politische EntscheidungsträgerInnen (IEA 4E EDNA, 2017).

Main Type		Sub Type 1		Sub type 2	
Economic Instrument	E	Direct investment	D	Funds to sub-national governments	F
				Infrastructure investments	I
				Procurement rules	P
				RD&D Funding	R
		Fiscal/Financial incentives	F	Feed-in tariffs/premiums	F
				Grants and subsidies	G
				Loans	L
				Tax relief	Tr
				Taxes	T
				User charges	C
		Market-based instruments	M	GHG emissions allowances	A
				Green certificates	G
				White certificates	W
Information & education	I	Implementation advice/Aid	A		
		Information provision	I		
		Performance label	L	Comparison label	C
				Endorsement label	E
		Professional training & qualification	T		
Policy support	P	Institution creation	I		
		Strategic planning	S		
		Auditing	A		
Regulatory instruments	R	Codes & standards	C	Building codes & standards	B
				Product standards	P
				Sectoral standards	S
				Vehicle fuel economy & emissions standards	V
		Monitoring	M		
		Obligation schemes	Ob		
		Other mandatory requirements	O		
Research, development & deployment (RD&D)	RD	Demonstration project	D		
		Research program	R	Technology deployment and diffusion	Dp
				Technology development	Dv
Voluntary approaches	V	Negotiated agreements (Public-private sector)	N		
		Public voluntary schemes	V		
		Unilateral commitments (Private sector)	C		

Tabelle 8: Unterscheidung zwischen möglichen verpflichtenden und freiwilligen Maßnahmen, basierend auf jenem durch die IEA veröffentlichten Maßnahmenkatalog (IEA 4E EDNA, 2017).

		Nature of policy measure		
		Supportive	***Voluntary***	***Mandatory***
Type of policy measure	***Information***	Policy: making available information (I-I, I-T) Example: disseminating information on smart lighting systems	Policy: voluntary energy label (I-L-E) Example: ENERGYSTAR	Policy: mandatory energy label (I-L-C) Example: Korean Rational Energy Utilization Act
	Financial	Policy: direct Investment in infrastructure and RD&D (E-D-I, -R) Examples: OpenADR, National Laboratories	Policy: grants, loans, tax incentives for energy efficiency (E-F-G, -Tr) Example: grants and tax relief in Korea	Policy: taxes and fees on devices and networks (E-F-T, -C) Example: absence of taxes or fees on Internet
	Conformity	Policy: technology development and deployment (RD-R-Dp) Example: Green Button	Policy: voluntary agreement by manufacturers (V-N) Example: Set-Top Box voluntary agreement	Policy: minimum efficiency performance standards (R-C-B, R-C-P) Examples: building codes and product standards

Literaturverzeichnis

China Advanced Semiconductor Industry Innovation Alliance, "Technology Roadmap for Wide Band Gap Power Electronics 2018" http://www.casa-china.cn/uploads/soft/190731/12_1010538821.pdf, (abgerufen am 18. März 2021; 14:12).

DNV, "Energy Outlook 2018", 2019. https://eto.dnv.com/2018/#132548, (abgerufen am 19. März 2021; 09:54).

ECPE European Center for Power Electronics, https://www.ecpe.org/, (abgerufen am 18. März 2021; 14:00).

ECPE WBG Roadmap, "ECPE WBG Roadmap Lead Applications for SiC & GaN", 2020. https://www.ecpe.org/research/roadmaps-strategy-papers/roadmaps/, (abgerufen am 19. März 2021; 10:15)

Europäische Kommission, "The impact of energy efficiency policies on energy consumption in the EU Member States: a new approach based on Energy Policy indicators", 2015, https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC98236/jrc%20report_jrc98236-pdf.pdf (abgerufen am 19. März 2021; 11:07).

IEA 4E EDNA Annex: "Encouraging Intelligent Efficiency - Study of policy opportunities", 2017, https://www.iea-4e.org/document/400/encouraging-intelligent-efficiency-study-of-policy-opportunities (abgerufen am 19. März 2021; 15:31).

IEEE Power Electronics Society ITRW, "International Technology Roadmap on Wide Band Gap Semiconductors", https://www.ieee-pels.org/standards/about-itrw and https://resourcecenter.ieee-pels.org/roadmap/PELSPRO0020.html, 2019, (abgerufen am 18. März 2021; 14:10).

Kaminski N.: "SiC and GaN Devices - Competition or Coexistence?" 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Nuremberg, Germany, 2012.

Long M.: "Semiconductors and a strategic National Technology Policy", 2019, https://cyber.fsi.stanford.edu/publication/semiconductors-and-strategic-national-technology-policy (abgerufen am 19. März 2021; 10:12).

Makoschitz M., Krischan K., Bergmann P., Diaz A., Brueniger R., „Wide Band Gap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map", 4E PECTA report, 2020, https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2020/05/PECTA_Report_Total-V10final-May-2020.pdf, (abgerufen am 01. März 2021; 08:11).

PowerAmerica, https://poweramericainstitute.org/, (abgerufen am 18. März 2021; 14:05).

PowerAmerica Roadmap, "Strategic Roadmap for Next Generation Wide Band Gap Power Electronics", 2018, https://poweramericainstitute.org/wp-content/uploads/2018/02/PowerAmerica_Roadmap_Final-Public-Version-February-2018.pdf, (abgerufen am 19. März 2021; 10:25).

POWERBASE: http://www.powerbase-project.eu/funding.html, (abgerufen am 16. März 2021; 17:50).

SiC Alliance, "SiC Road Map" http://www.sicalliance.jp/data/doc/1539751125_doc_2_0.pdf, (abgerufen am 18. März 2021; 14:14).

UltimateGaN: http://www.ultimategan.eu/ bzw. https://kaernten.orf.at/v2/news/stories/2981313/#15473,1641106,1557754619, (abgerufen am 16. März 2021; 17:55).

Yole, "GaN and SiC Devices for Power Electronics", August 2015.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der IEA Technologieprogrammstruktur und Unterstrukturen am Beispiel des 4E Technologieprogramms und dessen Annexe. 11
Abbildung 2: Aktuelle Struktur des 4E Technologieprogramms, bestehend aus EMSA, SSL, EDNA und PECTA. 12
Abbildung 3: PECTA Arbeitsphasen und zugehöriger zeitlicher Ablauf. 13
Abbildung 4: Struktur von PECTA während Phase 1. Im Zuge von PECTAs Phase 1 wurden zwei Tasks bearbeitet. Task 1: Efficiency Potential in Applications. Task 2: Roadmaps for Power Devices. Operating Agent Position bekleidet durch Österreich. Task 1 mit Beteiligung aus Österreich, Schweden und Schweiz. Task 2 mit Beteiligung aus Österreich, Schweden und Schweiz. Industry Advisory Group wird durch die Schweiz koordiniert. 14
Abbildung 5: Spezifische Darstellung der Taskaufteilung aus „Established Phase“ und deren Relevanz und Bezug aus PECTAs „Introduction Phase“. Eine indikative Aufteilung der Länderbeteiligung ist ebenfalls dargestellt. Diese kann sich im Laufe der Arbeitsperiode der jeweiligen Tasks noch adaptiert werden. 16
Abbildung 6: Gegenüberstellung von Silizium, Silizium-Karbid und Gallium-Nitrid in einem Radardiagramm (Makoschitz et al, 2020). 19
Abbildung 7: Vergleich aktueller spezifischer Leitwiderstände von Si, SiC und GaN (Kaminski, 2012).20
Abbildung 8: Vergleich von Si, SiC und GaN mittels Betrachtung der Gate-Ladung und des charakteristischen Leitwiderstandes (ITRW Roadmap, 2020). 22
Abbildung 9: Markteinschätzung der ITRW Roadmap für SiC-basierte Leistungshalbleiter bis 2027 (ITRW Roadmap, 2020). 24
Abbildung 10: Markteinschätzung der ITRW Roadmap für GaN-basierte Leistungshalbleiter bis 2027 (ITRW Roadmap, 2020). 25
Abbildung 11: Markteinschätzung der Yole Roadmap für SiC-basierte Leistungshalbleiter bis 2023 (Yole, 2015). 25
Abbildung 12: Markteinschätzung der Yole Roadmap für GaN-basierte Leistungshalbleiter bis 2023 (Yole, 2015). 26
Abbildung 13: GaN basierte Application Readiness Map für 100 V bis 650 V Komponenten für einen Zeithorizont bis 2035. 27
Abbildung 14: SiC basierte Application Readiness Map für 650 V Komponenten für einen Zeithorizont bis 2035. 27
Abbildung 15: SiC basierte Application Readiness Map für 900 V Komponenten für einen Zeithorizont bis 2035. 28
Abbildung 16: SiC basierte Application Readiness Map für 1.2 kV Komponenten für einen Zeithorizont bis 2035. 28
Abbildung 17: SiC basierte Application Readiness Map für 1.7 kV Komponenten für einen Zeithorizont 29
Abbildung 18: Application Readiness Map für Automotive und Railway für einen Zeithorizont bis 2032. 29

Abbildung 19: Application Readiness Map für PV, Wind und Netzapplikationen für einen Zeithorizont bis 2028. 30
Abbildung 20: Application Readiness Map für Industrieanwendungen, Großantriebe, ICT und Datencenter für einen Zeithorizont bis 2030. 30
Abbildung 21: Energieeinsparpotential für ausgewählte Applikationen in Terawattstunden pro Jahr (Makoschitz et al, 2020). 32
Abbildung 22: Weltprimärenergieversorgung nach Energieträgern (DNV, 2019). 32
Abbildung 23: PECTA Annex und geplanter Informationsfluss für Förderungen und Entscheidungshilfen im Bereich von WBG. 35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vordefinierte Spannungsbereiche für bestimmte Anwendungsgebiete. 18
Tabelle 2: Mögliche für WBG relevante Anwendungsgebiete. 18
Tabelle 3: Erste Abschätzung des weltweiten Energieeinsparpotentials bei einem Umstieg von Silizium auf WBG für ausgewählte Applikationen. 31
Tabelle 4: PECTA – Ergebniskommunikation im Zuge der ersten Arbeitsperiode. 33
Tabelle 5: PECTA - nationale Kommunikationsstrategie. 36
Tabelle 6: PECTA - internationale Kommunikationsstrategie. 36
Tabelle 7: Durch die IEA veröffentlichter Maßnahmenkatalog für politische EntscheidungsträgerInnen (IEA 4E EDNA, 2017). 40
Tabelle 8: Unterscheidung zwischen möglichen verpflichtenden und freiwilligen Maßnahmen, basierend auf jenem durch die IEA veröffentlichten Maßnahmenkatalog (IEA 4E EDNA, 2017). 41

Abkürzungsverzeichnis

4E	Energy Efficient End-Use Equippment
AC	Alternating Current
ARM	Application Readiness Map
Art.	Artikel
BGBl.	Bundesgesetzblatt
BMK	Bundesministerium für Kilmaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
DC	Direct Current
EDNA	Electronic Devices & Networks Annex
EMSA	Electric Motor System Annex
GaN	Gallium Nitrid
IAG	Industry Advisory Group
IEA	International Energy Agency
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Integrated Gate-Commutated Thyristor
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
LCA	Life Cycle Assessment
MC	Management Committee
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
OA	Operating Agent
PECTA	Power Electronic Conversion Technology
PV	Photovoltaik
Si	Silicon
SiC	Silizium Karbid
SSL	Solid State Lighting
TCP	Technology Collaboration Programme
TWh	Terrawattstunde(n)
V	Volt

W	Watt
WBG	Wide Bandgap

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
bmk.gv.at