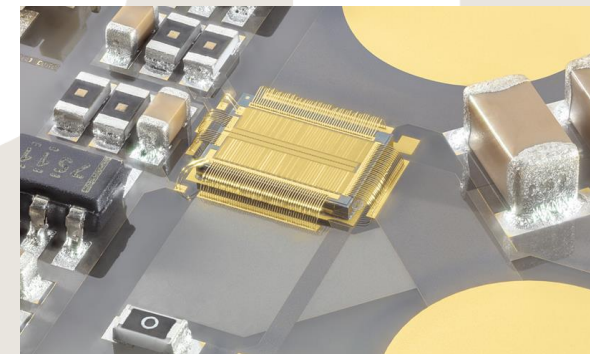
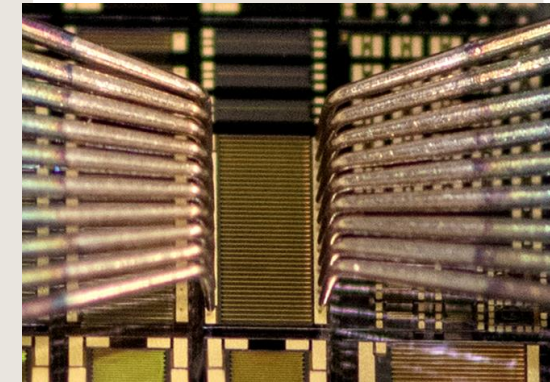
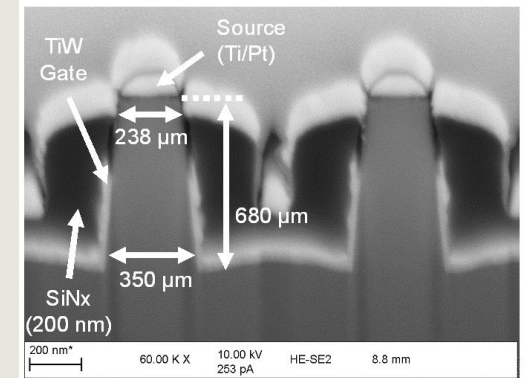


Neue Halbleitertechnologien für effiziente Konversion von elektrischer Energie

Joachim Würfl
Ferdinand-Braun-Institut gGmbH
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

joachim.wuerfl@fbh-berlin.de

Berlin Brandenburger Optik-Tag 2021



Motivation: Effiziente Konversion von elektrischer Energie

- Praktisch die gesamte Energie wird auf eine Form umgesetzt die für den Verbraucher geeignet ist

Reduktion von Konversionsverlusten:

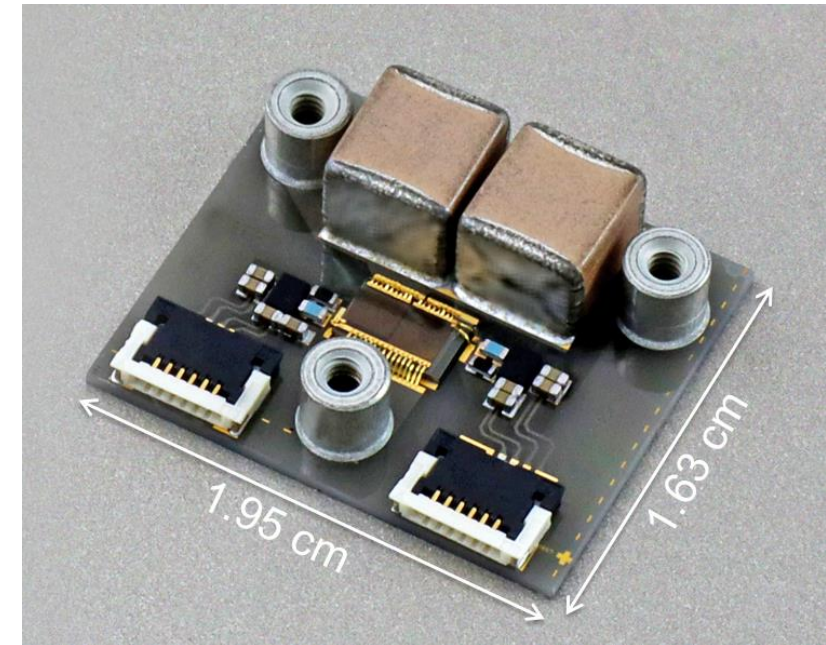
→ erfordert effizientere Halbleiterschalter

- Wide Bandgap Halbleiter (WBG) wie SiC, GaN, Ga_2O_3 , AlN im Fokus der Entwicklungen

Prinzip:

Reduktion von Schaltverlusten durch kompaktere Bauweise kombiniert mit besserer on-Leitfähigkeit

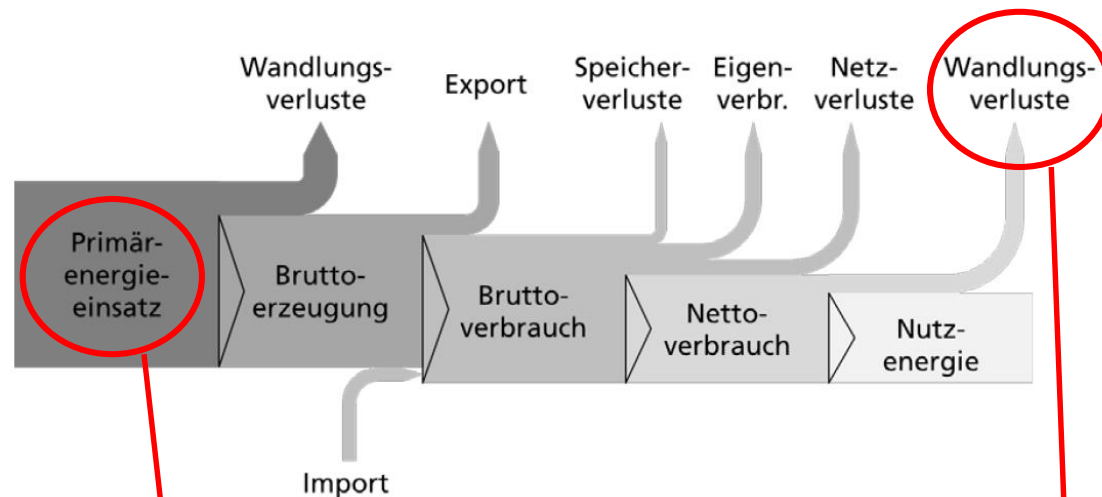
→ Erfordert hohe Durchbruchspannungsfestigkeit



2 kW GaN high-speed Leistungsmodul
auf AlN-Keramik

Joint Lab Power Electronics (FBH – TUB)

Einsparpotenzial durch effizientere Halbleiter

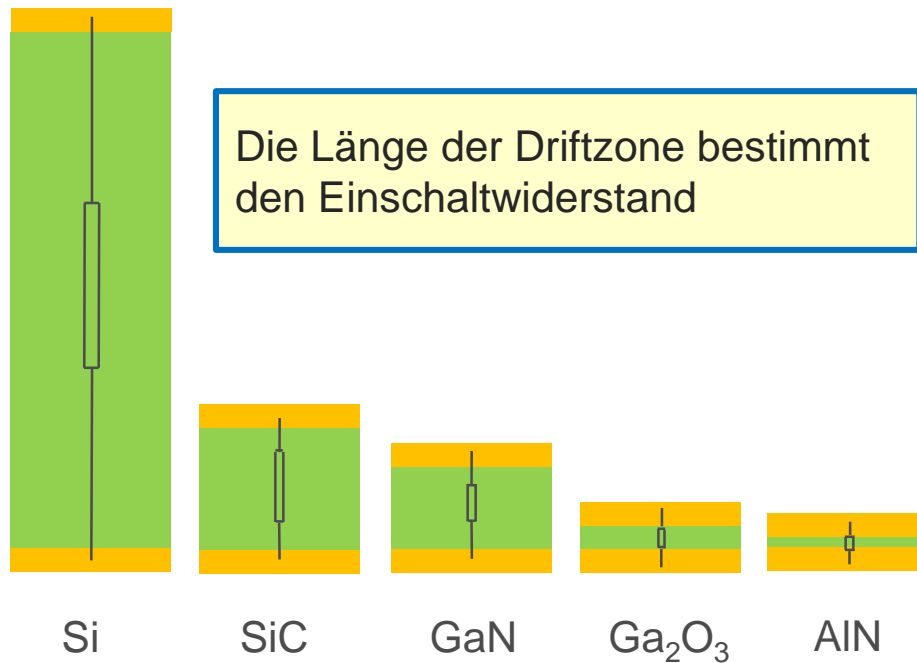


Projizierte Einsparungen durch effizientere Halbleiter in den USA 2025				
Sektor	Primärenergie durch Bauteile >650V [Peta Joule]		Elektrizität durch Bauteile >650V [TWh]	
	von	Bis	von	bis
Datencenter	150	175	13,6	15,9
Erneuerbare Energien	99	198	8,5	17,8
Industrieantriebe	120	328	11,1	30,3
Antriebe				
Schienenverkehr	6	50	0,5	3,2
E-Fahrzeuge	40	180	1,9	6,4
Summe	415	931	35,5	73,7

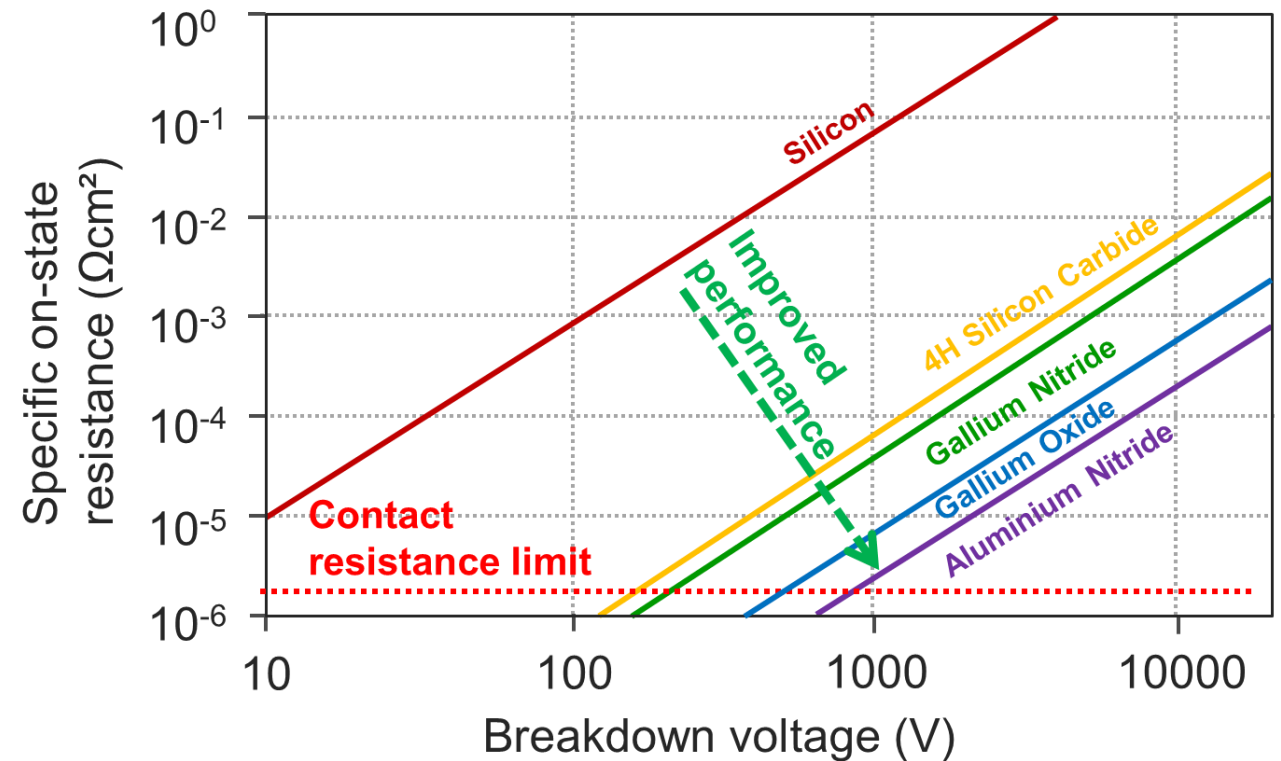
Im ersten HJ 2021 in Deutschland aus Kohle erzeugter Strom: 70,2 TWh*

* Statistisches Bundesamt, Pressemitteilung Nr. 429 vom 13. September 2021

Vergleich von WBG (Wide Bandgap) Halbleitern gegenüber Silizium



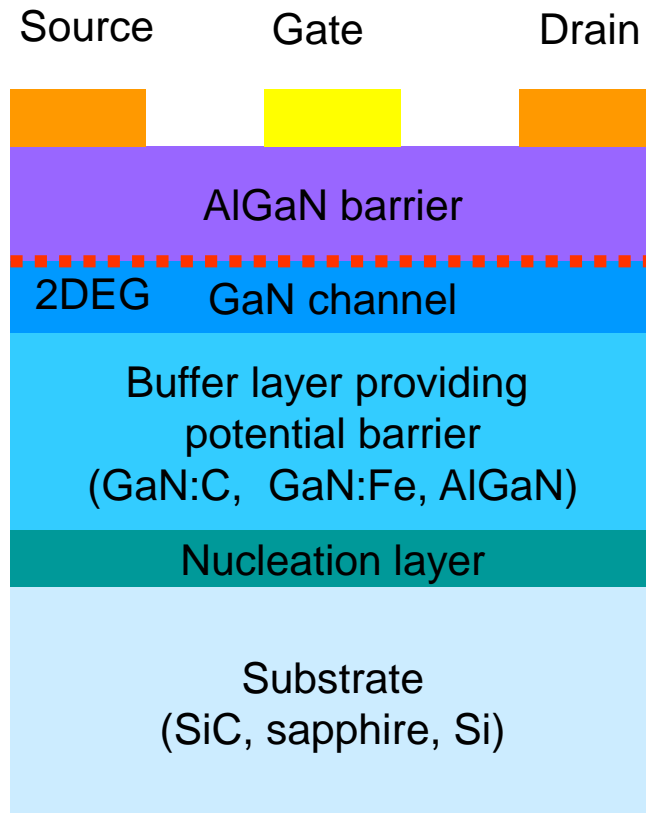
Relative Dimension der Driftzone bei verschiedenen Halbleitern



WBG Halbleiter im Vergleich

	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	β -Ga ₂ O ₃	AlN
Bandabstand E_g (eV)	1.1	1.4	3.26	3.4	4.6-4.9	6.2
Durchbruchsfeldstärke E_{crit} (10 ⁶ V/cm)	0.3	0.4	2.2	3.3	8 (est.)	10 - 20
Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r	11.9	12.9	10.1	9	10	8.3 – 9.3
Wärmeleitfähigkeit k (W/Kcm)	1.5	0.55	4.5	2.3	Anisotrop: 0.23 in [010] 0.13 in [100]	3.5
Elektronenbeweglichkeit μ_e (cm ² /Vs)	1350	8000	900	1150	300	Nicht veröffentlicht
Sättigungsgeschwindigkeit v_{sat} (10 ⁷ cm/s)	1.0	2.0	2.0	3	Nicht veröffentlicht	
Baliga´s FOM bezogen auf Si ($\epsilon_r \mu_e E_{crit}^3$)	1	15	340	870	3444	6000 - 30000

GaN Technologie



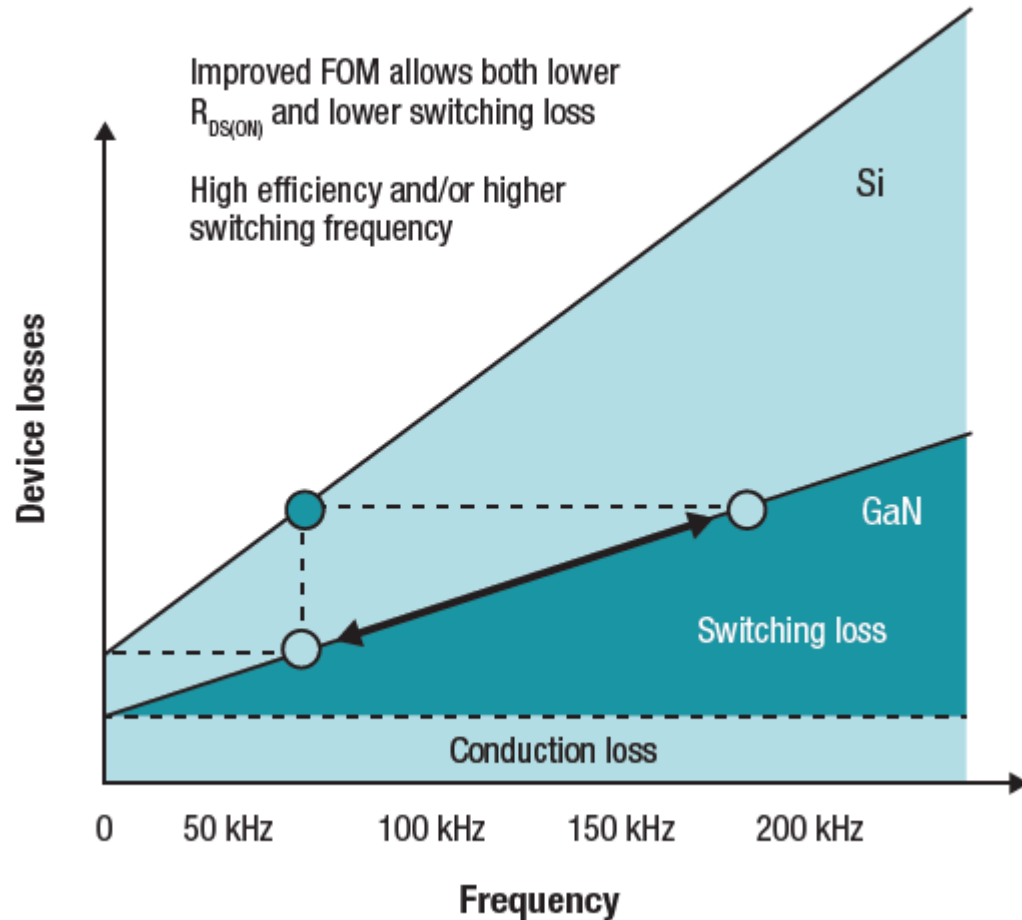
Heteroepitaxie auf Fremdsubstraten

Hoch zuverlässige
Mikrowellenbauelemente

	GaN (Volume n)	4H SiC	Al ₂ O ₃ Sapphire	Si (111)
Lattice mismatch (%)	0	3.1	13	17
Thermal Conductivity (W/cmK)	2.3	4	0.3	1.48
Thermal exp. coefficient (x10 ⁻⁶ /K) (RT / 1000°C)	3.7 / 5.5	4.0 / 5.0	5.9 / 9.9	2.4 / 4.4
Availability / Price				
Potential for high volume production				

Die Triebfeder für heutige
GaN Leistungselektronik

Vorteile von GaN gegenüber Si Leistungsschaltern



Effizienzvorteile von GaN durch:

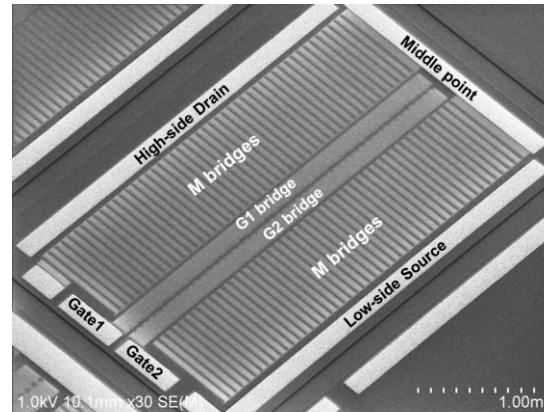
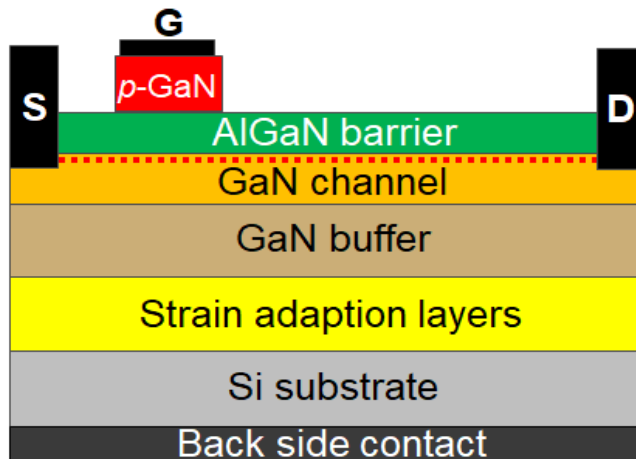
- Geringerer Einschaltwiderstand bei gleicher Spannungsfestigkeit
- Höhere Schaltteilheiten und Schaltfrequenzen
 - Kleinere und leichtere Leistungskonverter
- Aber: Austausch GaN gegenüber Si in der Regel nicht direkt möglich
 - Schaltungen sind zu adaptieren und auf GaN hin zu optimieren

Von Steve Tom, Texas Instruments: GaN drives energy efficiency to the next level (<https://www.electronicdesign.com/power-management/gan-drives-energy-efficiency-next-level>)

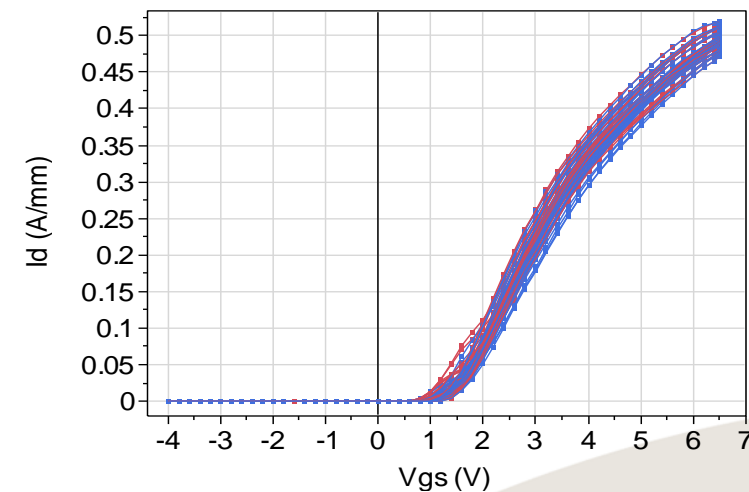
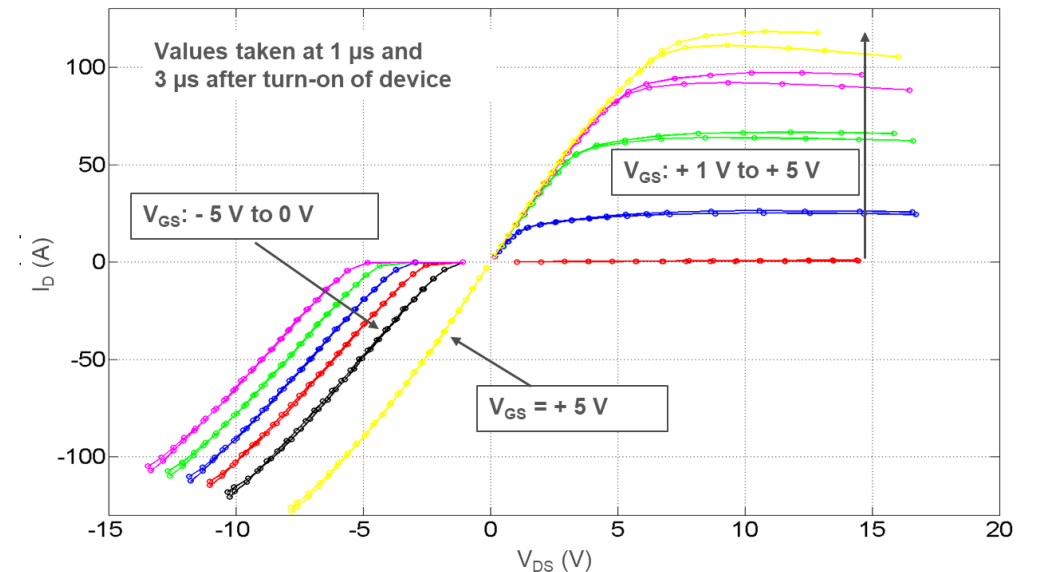
Prognostizierte Anwendungen von GaN Bauelementen (aus Sicht von Texas Instruments)



FBH p-GaN selbstsperrende Technologie



Ausgangs- und Transferkennlinien



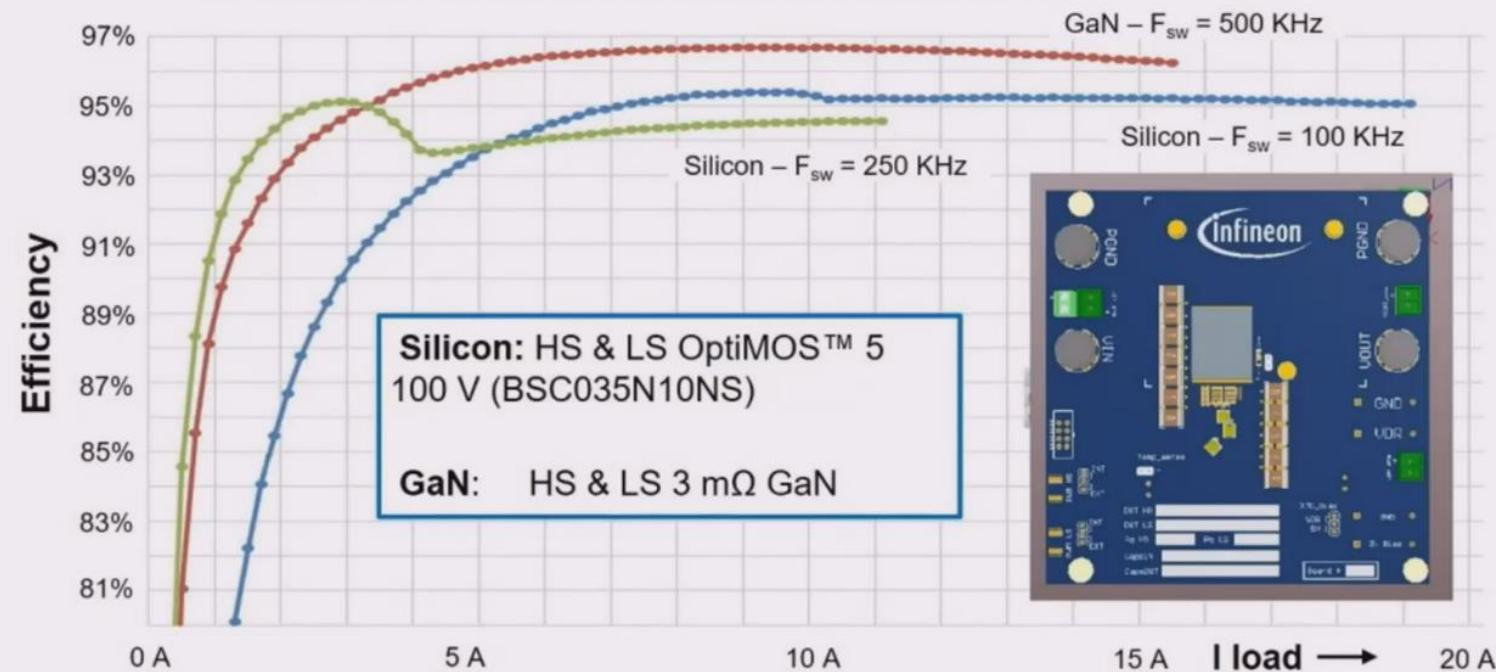
GaN-on-Si HFET

- Selbstsperrende Technologie, Schwelle etwa +1 V
- 60 m Ω Einschaltwiderstand
- 600 V Nennspannung

Integrierte Halbbrücke

Vergleich GaN/Si: Buck-Converter 45 V in \rightarrow 12 V out

Intermediate bus converter for AI:
1% better at 5 times higher switching frequency!



Aus WIPDA 2021, Gerad Deboy, Keynote presentation

20 kW 3-Phasen on-board Ladegerät für E-Autos 10 kW/l

3-Φ EV Battery Charger system reaching 10 kW/l

infineon
ETH zürich

- › $400V_{\text{rms,in}} \rightarrow 250...800 V_{\text{dc,out}}$
- › **3-Φ Vienna Rectifier**
 - › 550 kHz: CoolGaN + CoolSiC Schottky
- › **Isolated DC/DC Converters**
 - › 4x Dual Active Bridges – Series Stacked
 - › 140...560 kHz: CoolGaN
- › Novel Modulation Method: **synergetic control, 1/3 PWM**

4 x DAB

VR Stage

10 kW/L (164 W/in³)
95% (exp.)

- Leistungsdichte mit Silizium-Leistungselektronik: 2-4 kW/l
- GaN ermöglicht 10x höhere Konversionsfrequenz (550 kHz)

Aus WIPDA 2021, Gerad Deboy, Keynote presentation

Zusammenfassung

Einsparung von elektrischer Energie

- Alleine die konsequente Reduktion von Konversionsverlusten macht Kraftwerkblöcke obsolet
- Prognostizierte Einsparung in Deutschland pro Jahr: ca. 12 TWh: (3-4 mittlere Kohlekraftwerke)

GaN Technologie ist wesentlicher Schwerpunkt

- Technologie ist vergleichsweise ausgereift (laterale Designs)
- Kommerziell zunehmend verfügbar

Neue Möglichkeiten durch schnell schaltende Konverter

- Einsparung von Gewicht und Volumen
- Mobile Systeme (E-Auto, elektrisches Fliegen...)

Neue Halbleitermaterialien mit weiter verbesserten Eigenschaften in der Forschung

- Galliumoxid (Ga_2O_3)
- Aluminiumnitrid (AlN)