

Der IGBT in der Traktion - Anwendungen & Anforderungen, Technologie & Zuverlässigkeit

Dr. Schütze
AIM PMD ID TM

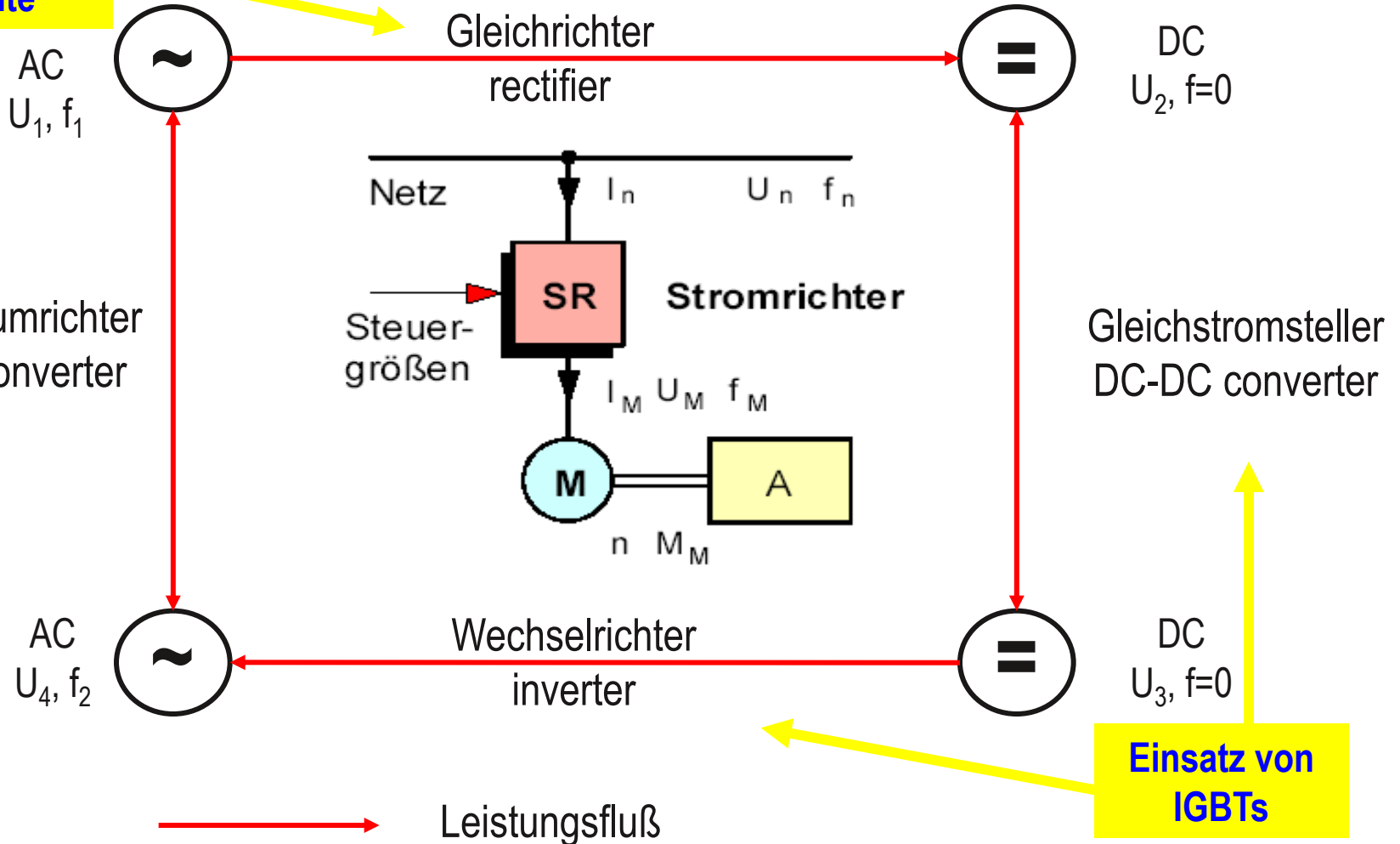
38. Tagung Moderne Schienenfahrzeuge
14. - 17. September 2008
Technische Universität Graz



Never stop thinking

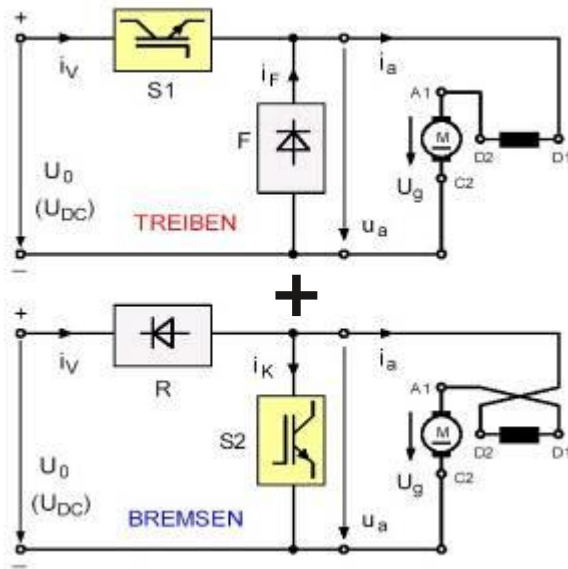
Abgrenzung der Anwendungen für den Einsatz von IGBTs

Einsatz bipolarer Bauelemente



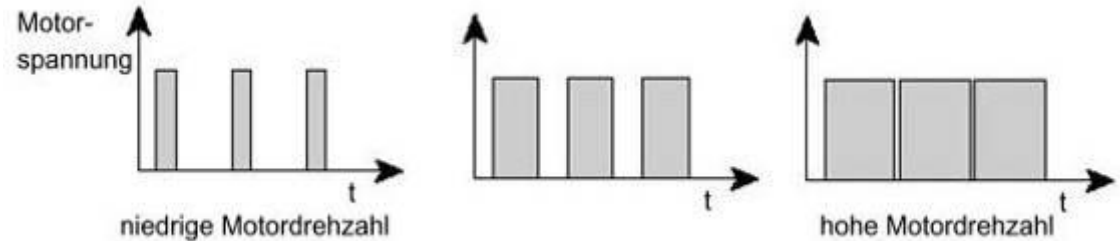
Anwendung von IGBTs

Anwendung von IGBTs in der Traktion: Chopper plus DC Motor

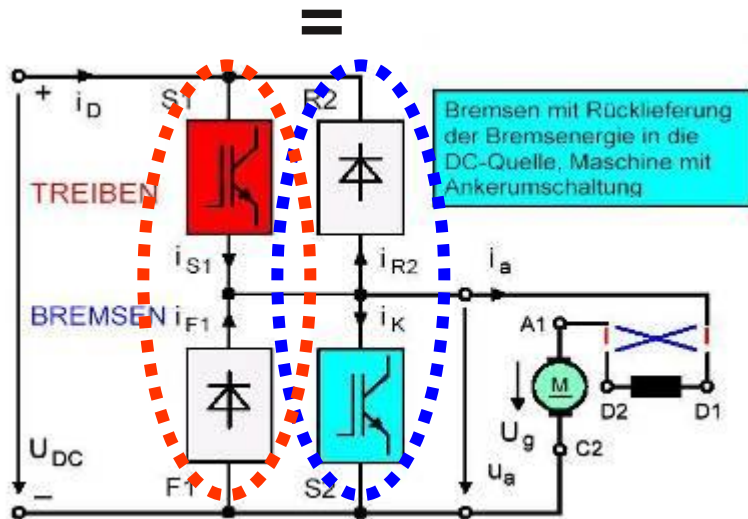


Chopper

Steuerung über z.B. Pulsbreitensteuerung



Umkehr der Energierichtung (Mehrquadranten-Betrieb) durch Ankerumschaltung

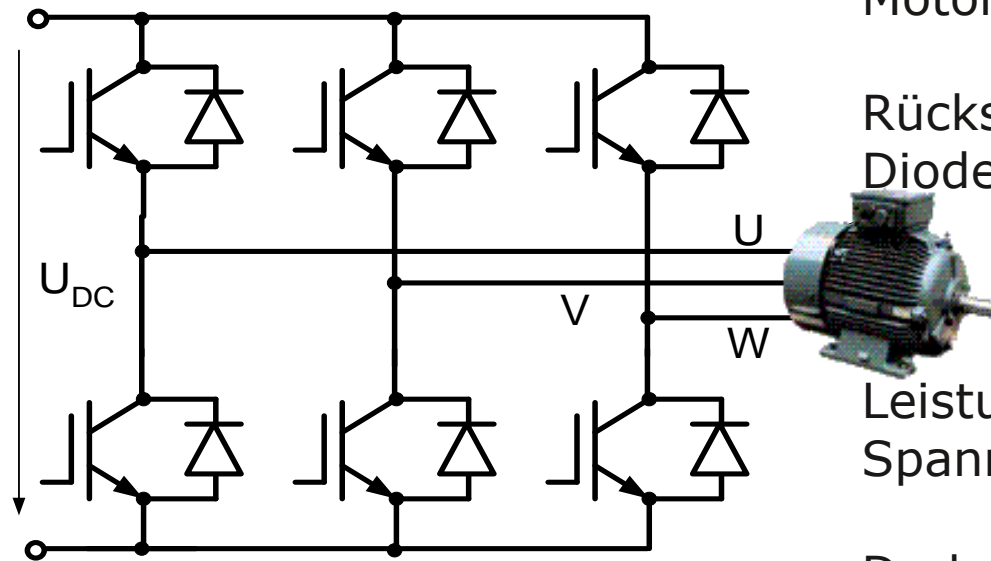


2-Quadrantensteller

Motorischer Betrieb über Tiefsetzsteller

Nutzbremse über Hochsetzsteller

Anwendung von IGBTs in der Traktion: Inverter plus AC Motor



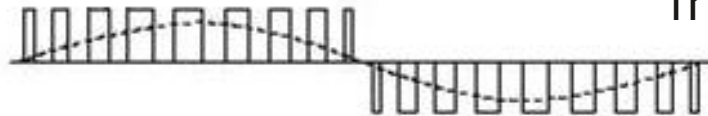
Motorischer Betrieb über die IGBTs

Rückspeisung über die antiparallelen Dioden

Leistungsverstellung über die Spannungs-Zeitfläche

Drehzahlverstellung über die Grundfrequenz

Spannung
zw. U und V



... bei fallender
Spannung

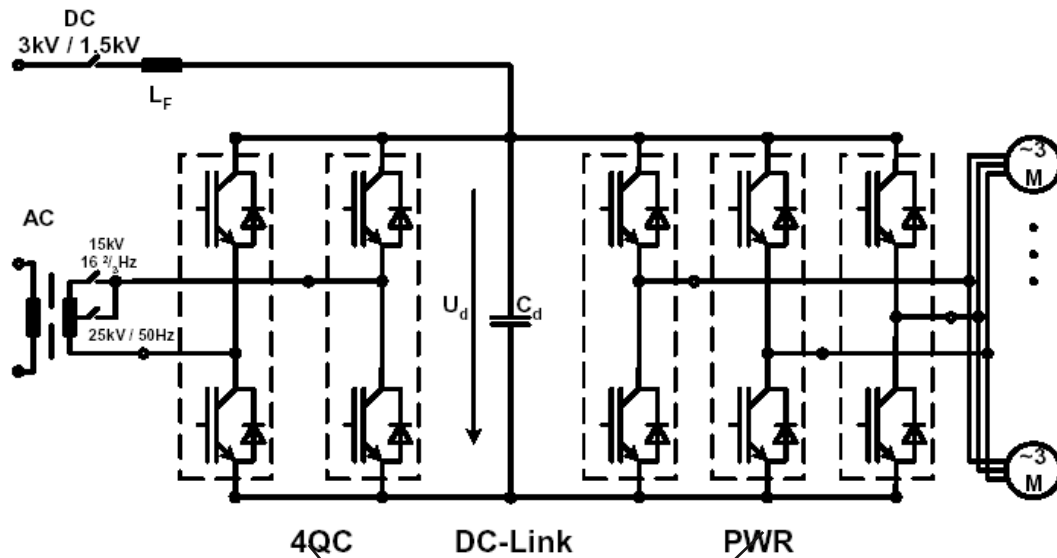


... bei steigender
Frequenz

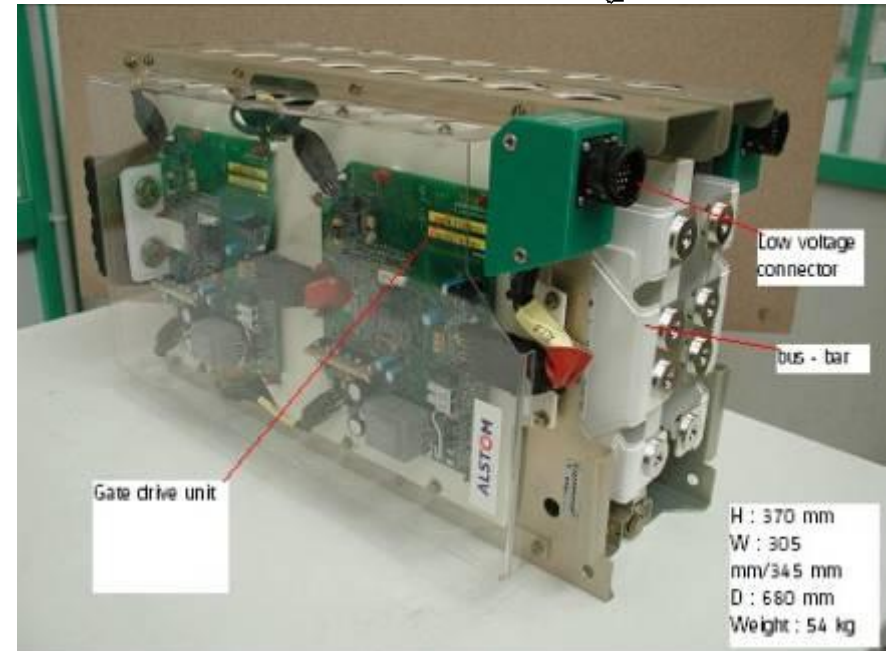
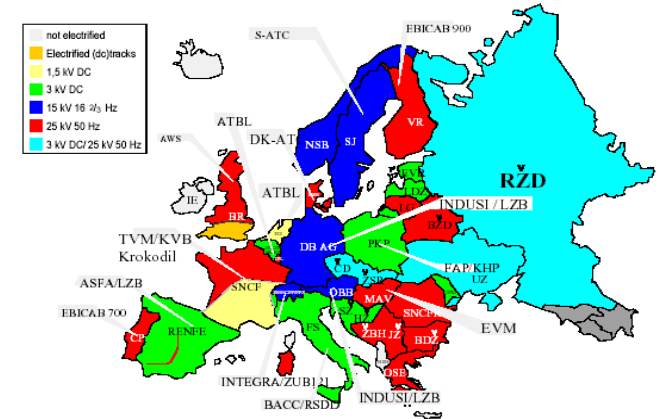


----- : Mittelwert
Spannung

Schaltung eines Mehrsystem-Traktionsstromrichters



Mehrfach-Parallelschaltung
von Modulen



Quelle: Alstom /Lacote - A new generation of 6.5 kV IGBT modules for European interoperable rolling stock

Anwendung von IGBTs

Beispiele für Lokomotivanwendungen mit 6,5kV IGBTs



SIEMENS

BR 189 , TAURUS up to 4 system locomotive for cross border operation



**BOMBARDIER
TRANSPORTATION**

Class 185 (TRAXX) Multi-system locomotive for cross-border freight traffic between Switzerland and Italy



ALSTOM

Prima 6000 High Speed - High Power Locomotive



Talgo

L 9202 2-system locomotive for cross-border traffic between Spain (3kV DC 1668mm) and France (25kV/50Hz 1435mm) gauge

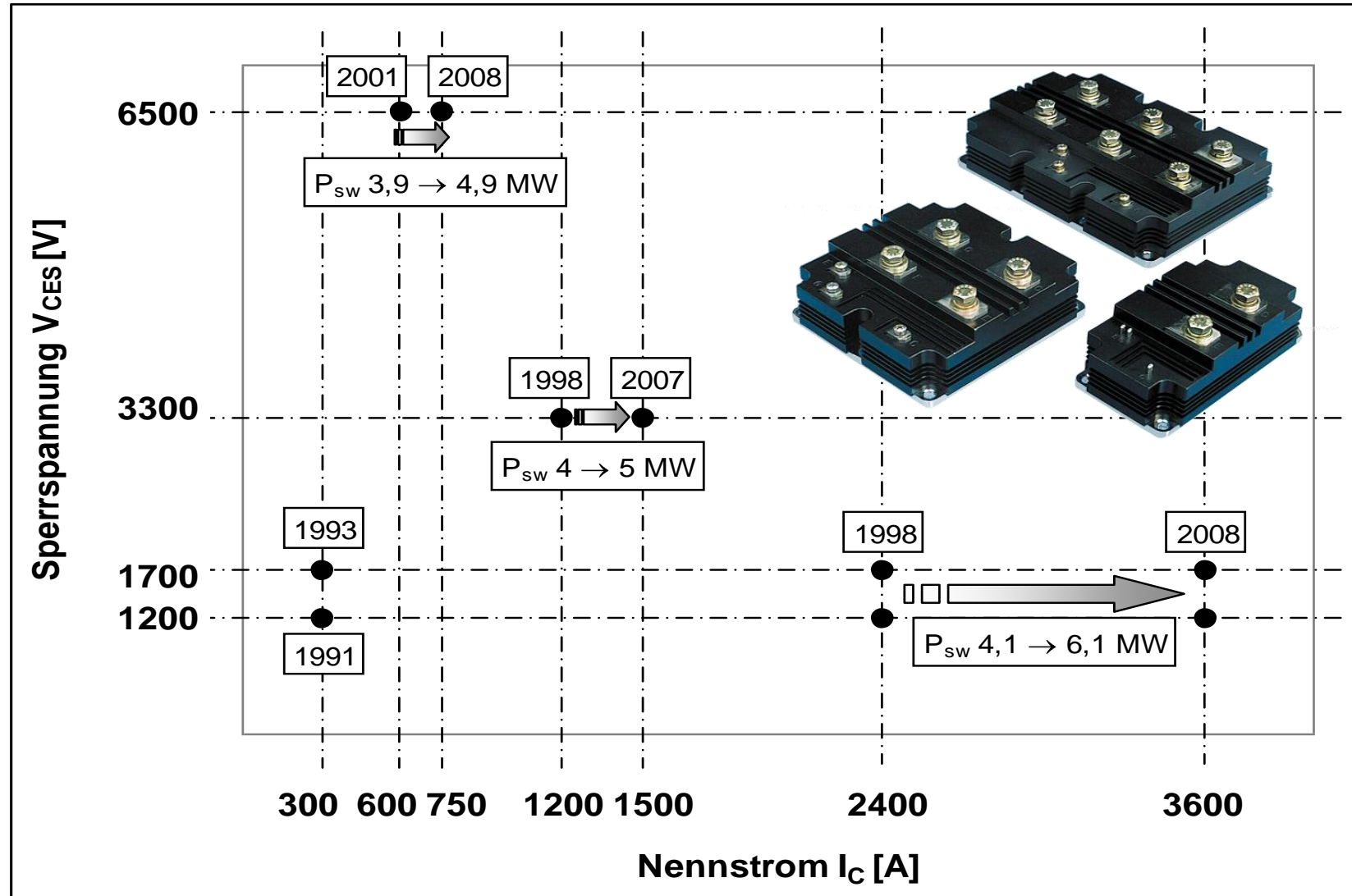




NEVZ 2ES4K 2-section locomotive

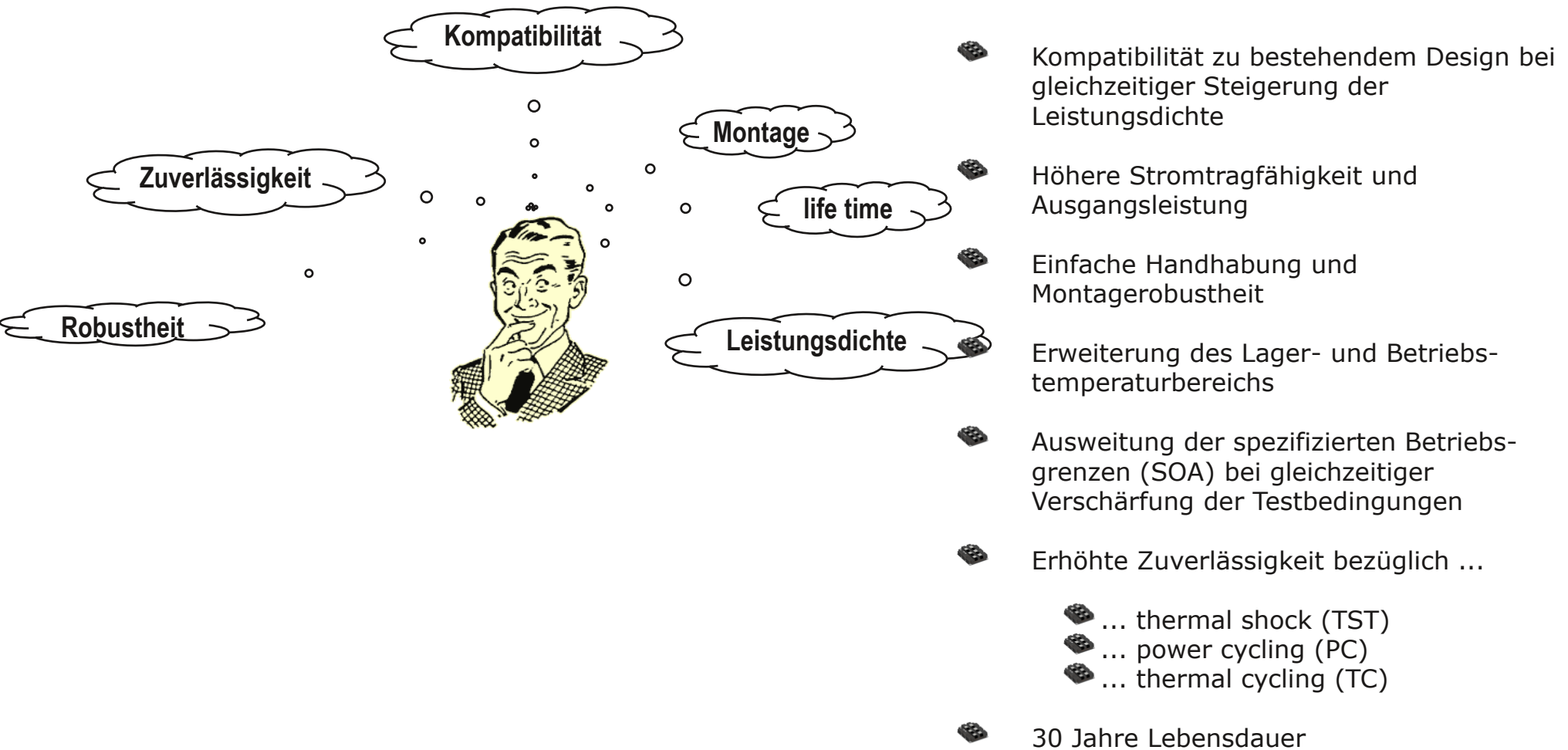
Netzspannung	eingesetzte IGBT Spannungsklasse
🔌 600 VDC (max. ca. 900VDC)	1200 V
🔌 750 VDC (max. ca. 1100 VDC)	1700 V
🔌 bis ca. 1300 VDC geregelt	2500 V
🔌 1500 VDC (max. ca. 2100 VDC)	3,3 kV (oder 1700 V in Serie)
🔌 bis ca. 2500 V geregelt	4,5 kV
🔌 3000 VDC (max. ca. 4400 VDC)	6,5 kV (oder 3,3 kV in Serie)

Entwicklung der Modul-Nennströme und Schaltleistungen

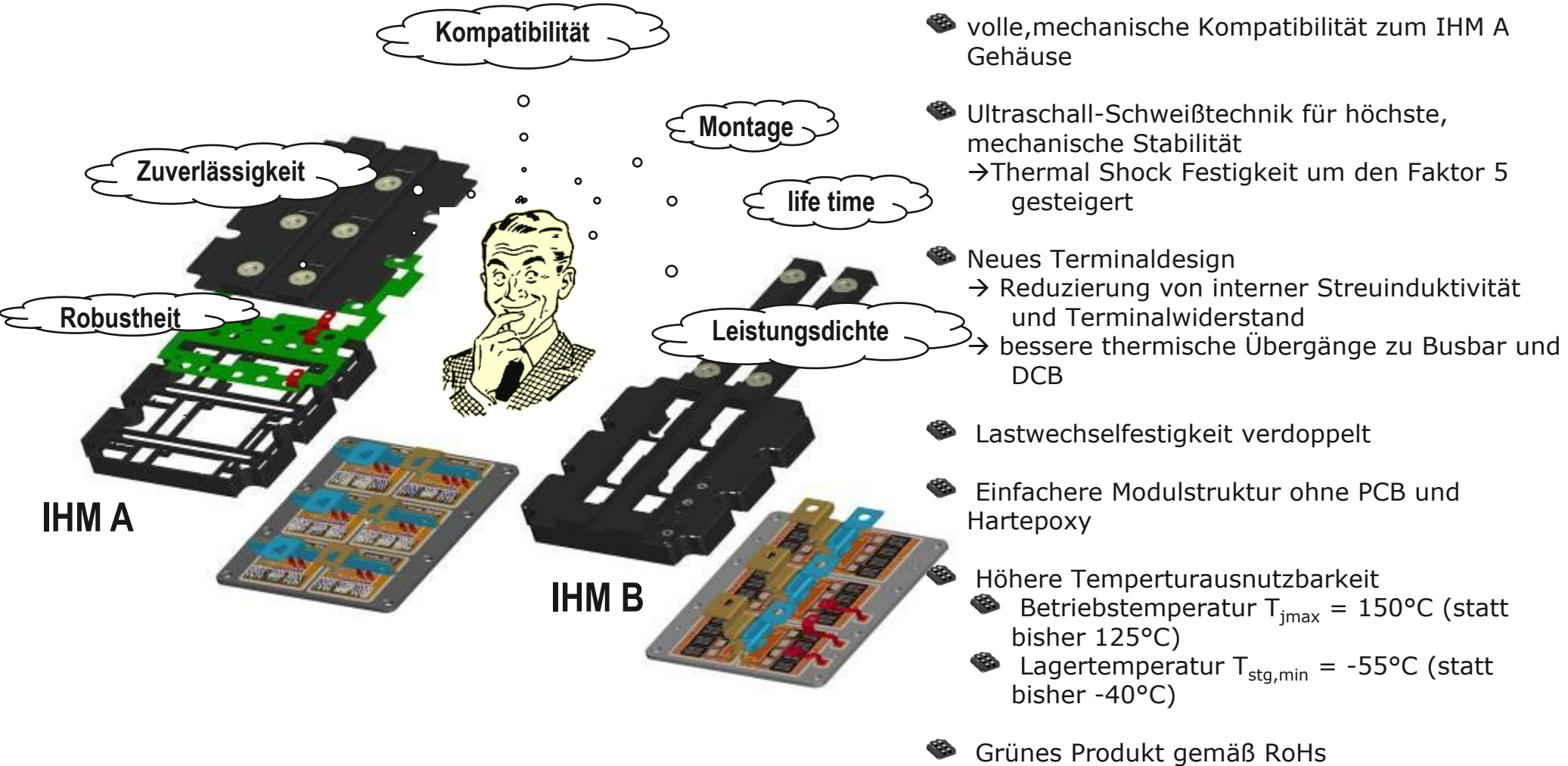


Anwendung von IGBTs

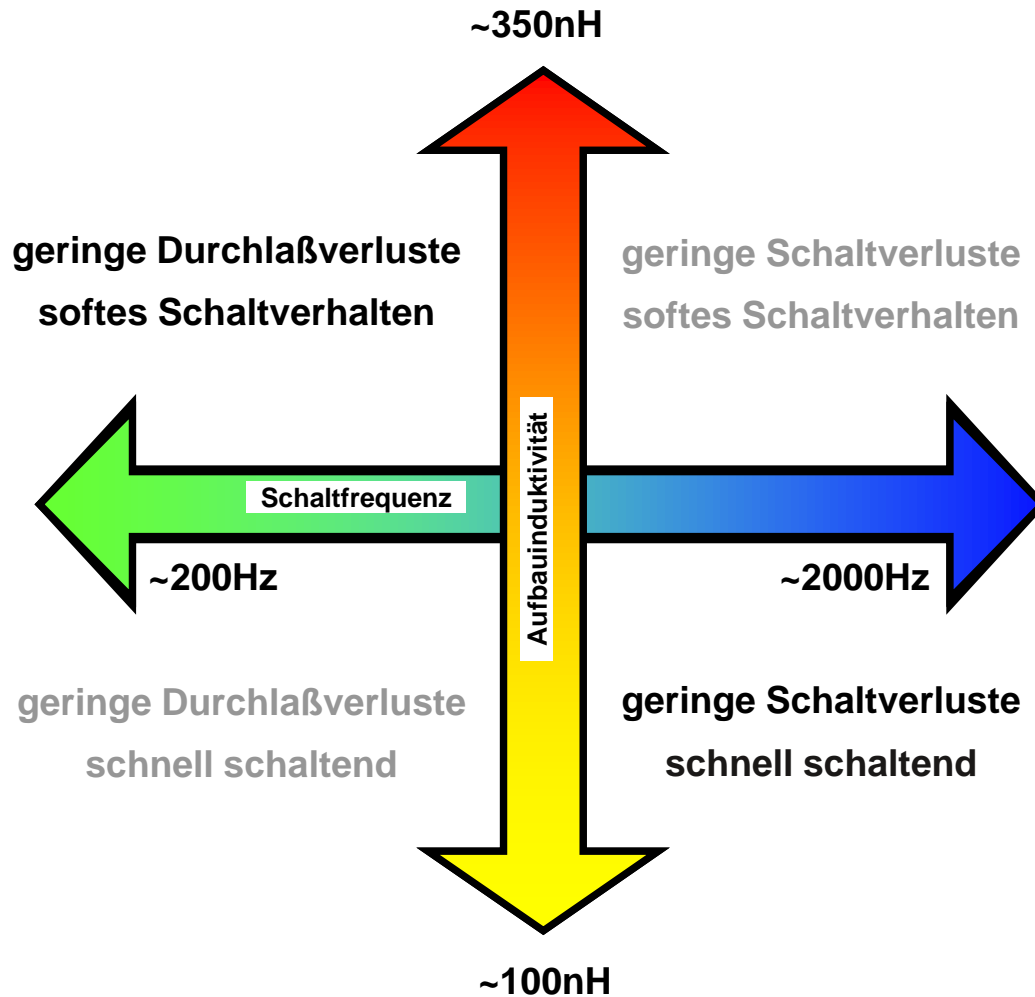
Elektrische und mechanische Anforderungen der Traktion an neue Bauelemente



Bauelemente-Optimierung für Anforderungen der Traktion am Beispiel des IHM B



Bauelemente-Optimierung für Anforderungen der Traktion am Beispiel des 3,3kV IGBT3



- Optimierung hinsichtlich zwei verschiedener Anwendungsfälle:
- „fast“ Version mit niedrigem $E_{on} + E_{off}$ und hohen Schaltfrequenzen bis 2kHz, geringe Aufbauinduktivität $L_s < 100\text{nH}$ erforderlich
- „soft“ Version mit niedrigem V_{cesat} und V_f bei niedrigen Schaltfrequenzen, hohe Aufbauinduktivitäten bis zu 350nH zulässig
- Robustheit gegen Höhenstrahlung $V_{CED}(T_{vj} = 25^\circ\text{C}, 100 \text{ fit}) = 2100\text{V}$
- höhere Nennströme, um Parallelschaltung zu reduzieren / vermeiden

Simulation erreichbarer Umrichterströme

Verglichene Bauelemente:

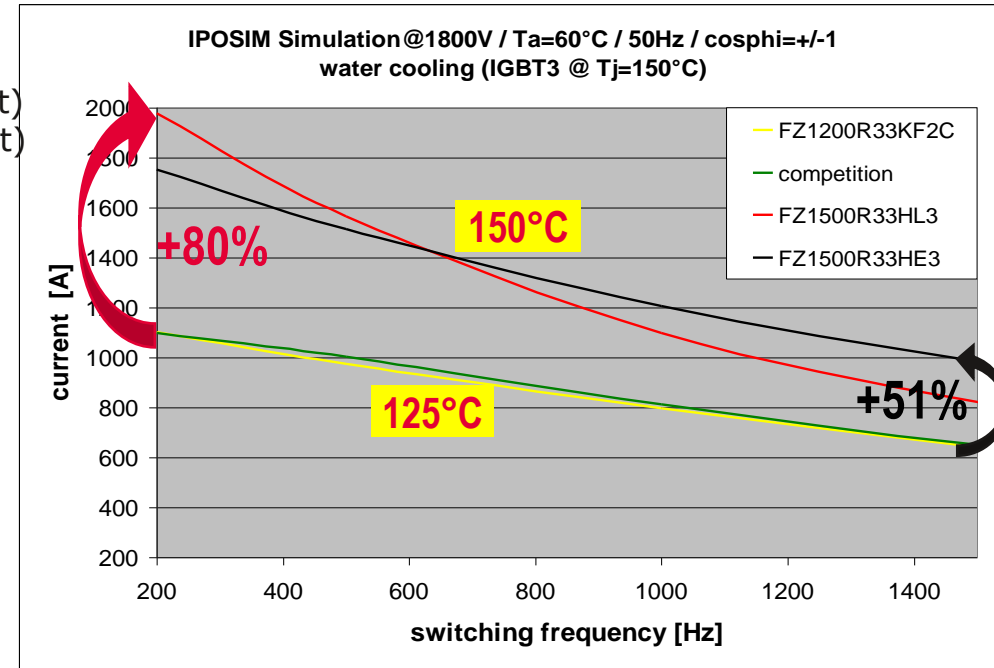
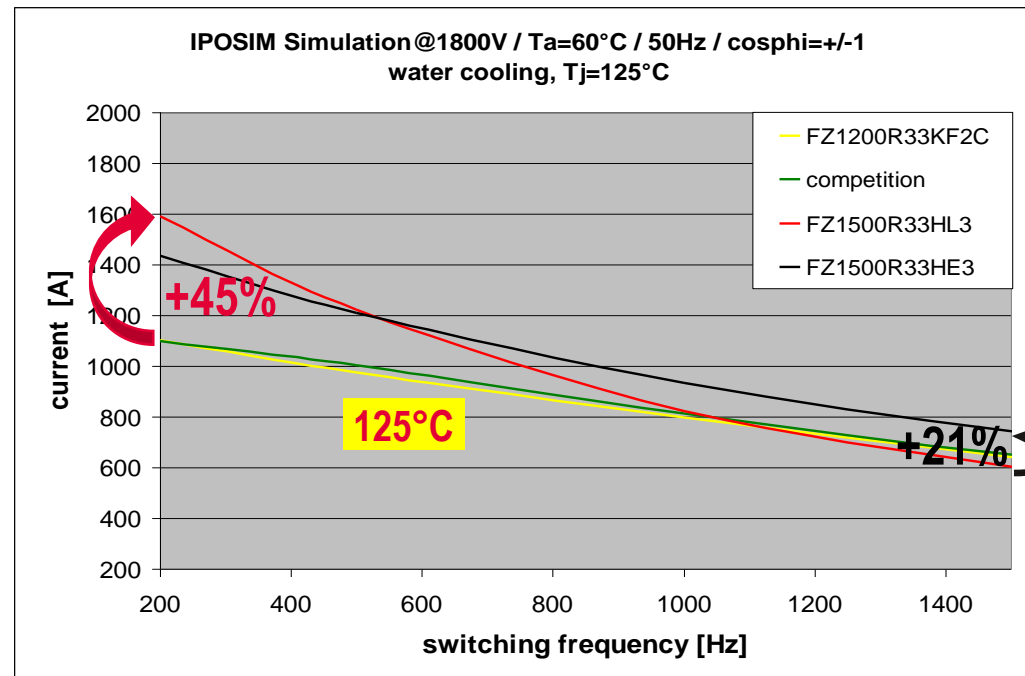
- FZ1200R33KF2C (2nd gen. NPT)
- FZ1500R33HL3 (3. Gen. Feldstopp plus Trench im IHM-B, soft)
- FZ1500R33HE3 (3. Gen. Feldstopp plus Trench im IHM-B, fast)

Alle Simulationen wurden unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt:

1800V / 50Hz / $m=1$ / $f_{sw}=200...1500\text{Hz}$ / $T_{jmax}=125^\circ\text{C}$ / $\cos\phi=1$ (IGBT) oder $\cos\phi=-1$ (Diode)

Mit Wasserkühlung: $T_a = 60^\circ\text{C}$ / $R_{thhs} = 6 \text{ K/kW}$

max. erreichbare Ströme für $T_{vjmax}=125 \text{ C}$



max. erreichbare Ströme für $T_{vjmax}=125 \text{ C}$
und für IHM-B bei $T_{vjmax}=150 \text{ C}$

Anforderungen an IGBTs

IGBT – GTO Vergleich



Der GTO ...

- muß (beim Abschalten) gegen Wiedereinschalten geschützt werden
- hat eine begrenzte Stromtragfähigkeit beim Einschalten
- Abschalt- du/dt ist durch Beschaltung zu begrenzen
- Einschalt- di/dt ist durch Induktivitäten zu begrenzen
- dadurch zusätzliche Kosten, Gewicht, Volumen und Kosten

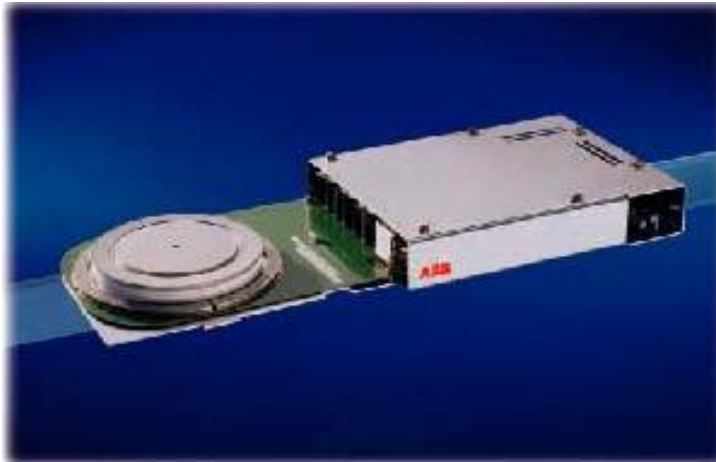
Der IGBT ...

- ist in weitem Rahmen in seiner Schaltgeschwindigkeit nicht limitiert
- du/dt und di/dt durch das Gate steuerbar
- keine Beschaltung oder weitere Komponenten notwendig
- durch isolierten Aufbau einfache Montage
- Ansteuerung durch einfachen und günstigen Treiber



IGBT Technologie

IGBT – IGCT Vergleich



Der IGCT ...

- hat das Schaltverhalten eines bipolaren Bauelementes und die Durchlaßcharakteristik eines Thyristors
- aufwändiger Treiber notwendig (Abschaltverstärkung=1)
- hohe Anzahl von Treiberkomponenten reduziert die Zuverlässigkeit
- Hohe Überstromtragfähigkeit (<> Abschaltstrom!)
- Serienschaltung einfach zu realisieren

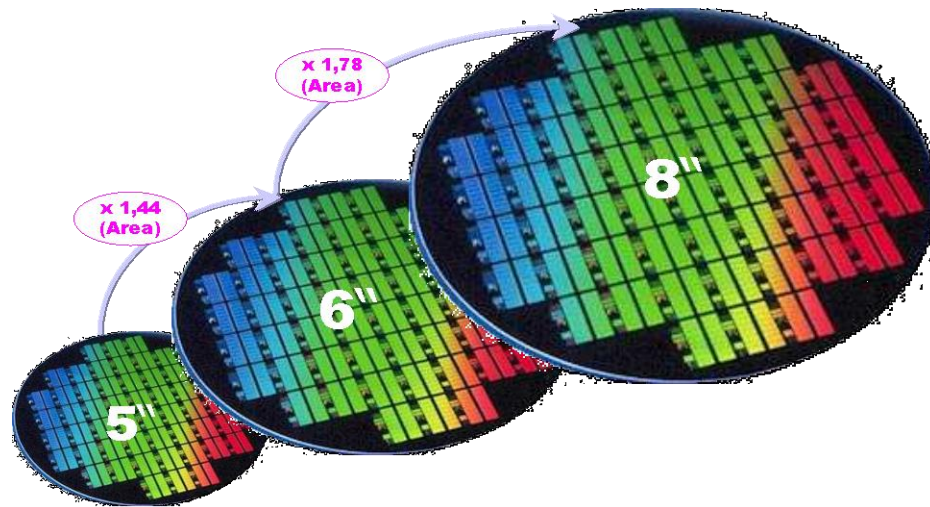
Der IGBT ...

- ist ein MOSFET Bauelement mit der Durchlaßcharakteristik von bipolaren Bauelementen
- einfacher Treiber mit geringer Leistung
- volle Abschaltfähigkeit innerhalb des RBSOA
- Parallelschaltung einfach zu realisieren



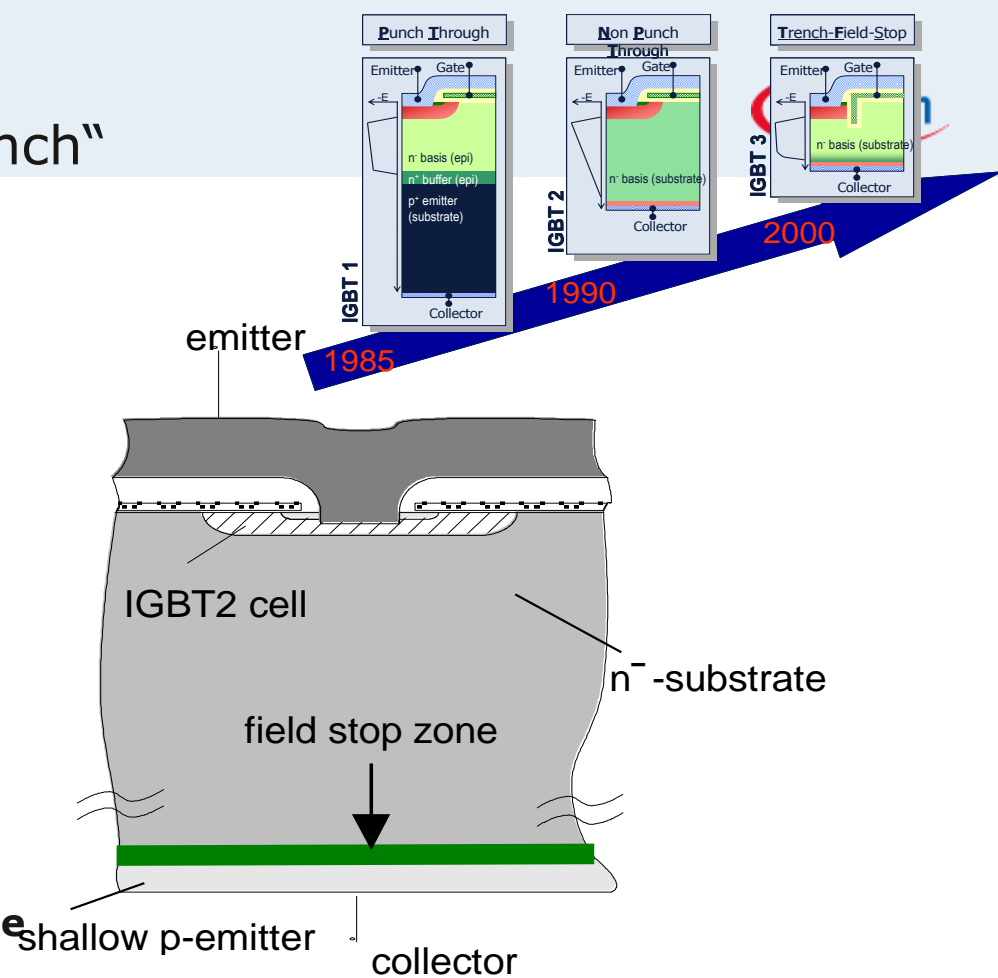
IGBT Technologie

IGBT Technologie „Feldstopp plus Trench“



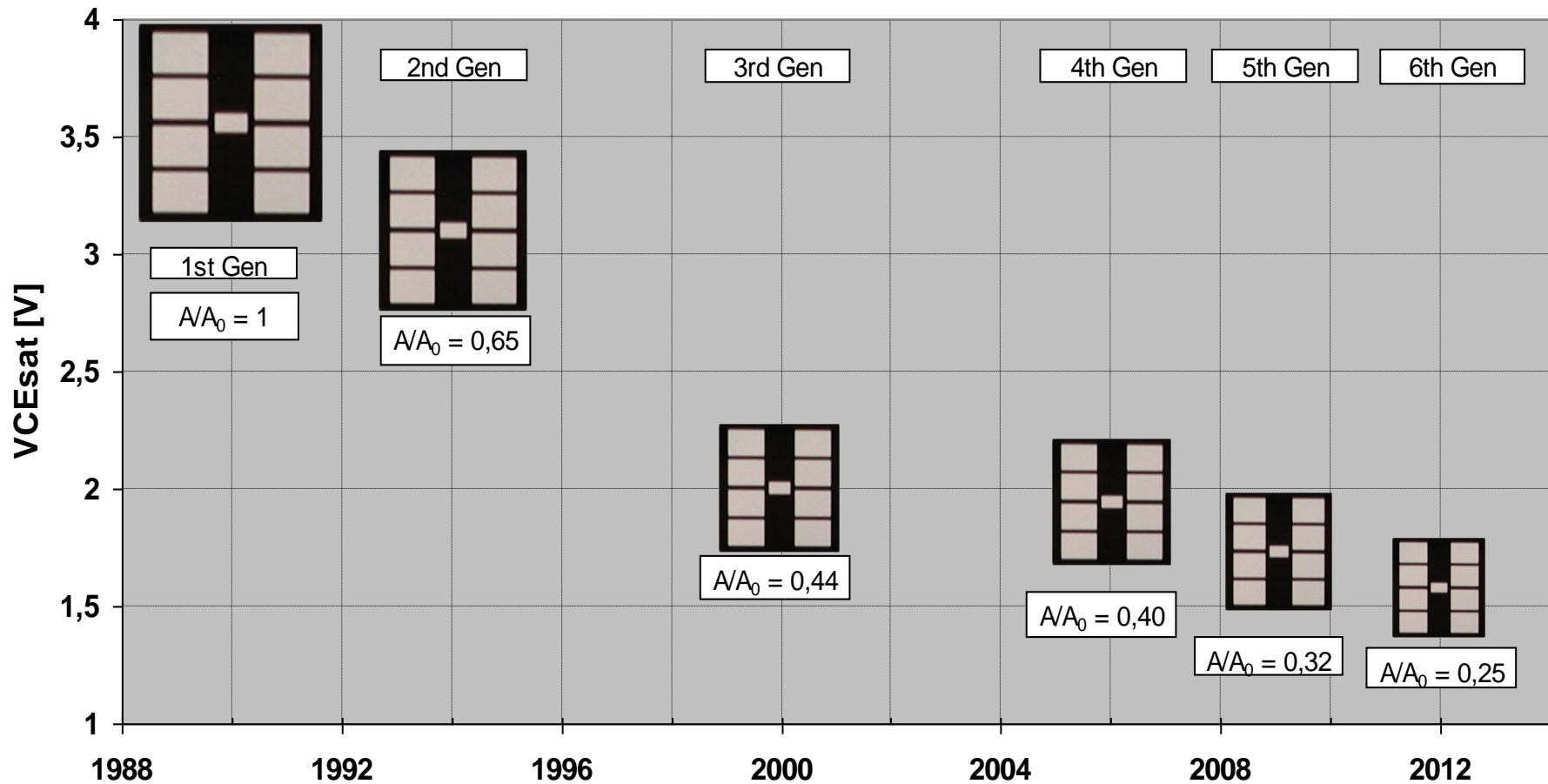
Die implantierte **Feldstoppzone** optimiert die vertikale Struktur des NPT IGBTs hinsichtlich:

- geringere Chipdicke
→ **Reduziert statische und dynamische Verluste**
- keine epitaxialen Prozesse mit der Gefahr eines Präzisionsverlusts in der Rückseiteneinstellung
- keine zusätzlichen Maßnahmen zur Ladungsträger-Lebensdauereinstellung
→ **vorzügliche Reproduzierbarkeit der elektrischen Parameter**
- geringerer Tailstrom beim Abschalten
→ **Reduzierung der tailbedingten Abschaltverluste**
- positiver Temperaturkoeffizient des V_{CEsat} wie vom NPT IGBT bekannt
→ **einfache Parallelschaltfähigkeit von Chips und Modulen**



Evolution der Chip-Leistungsdichte bei Infineon

Beispiel: 75A/1200V IGBT

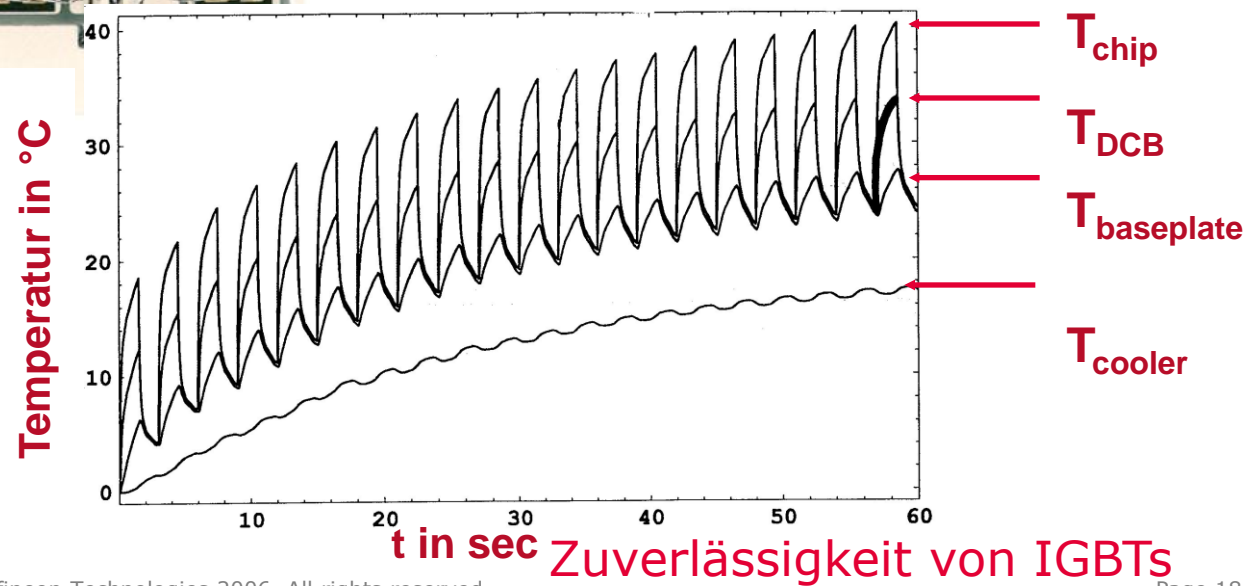
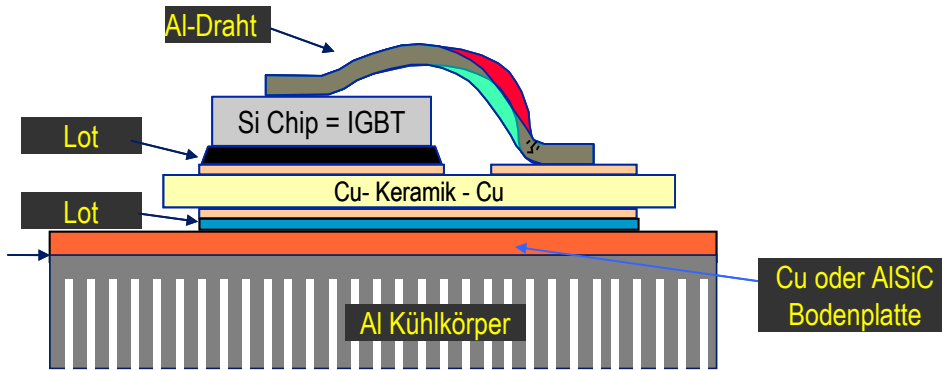
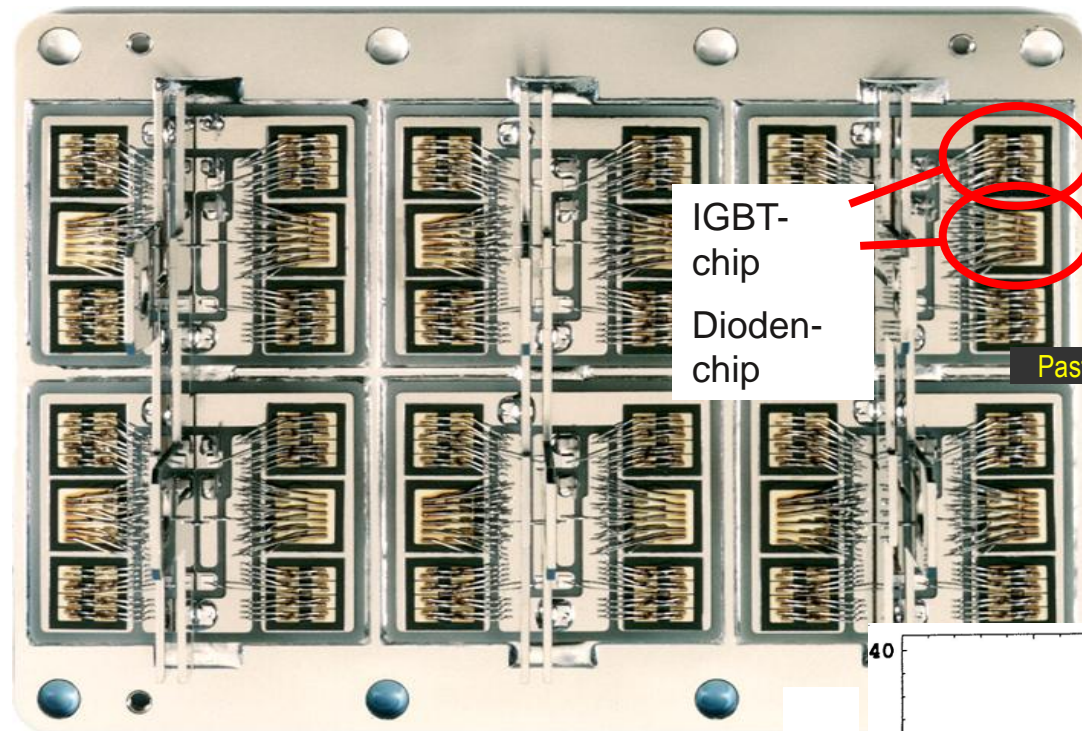


Technologiefortschritt am Beispiel des 3,3kV IGBTs

		standard 2nd gen. KF2C	low loss 2nd gen. KL2C	Trench+FS 3rd gen. HL3	Trench+FS 3rd gen. HE3
IGBT		NPT	NPT with field stop	NPT Trench with field stop	NPT Trench with field stop
optimized regarding -->		low switching losses	low saturation voltage high DC stability	low saturation voltage high DC stability	low switching losses high DC stability
V_{cesat}(V)	25°C	3.4	3.0	2.15	2.7
	125°C	4.3	3.7	2.5	2.95
E_{on}(mJ) 125°C		2200	3150	2550	2200
E_{off}(mJ) 125°C		1550	1900	2200	1550
Diode		Emcon	Emcon with field stop	Emcon 3 field stop	Emcon 3 field stop
V_f(V)	25°C	2.8	2.6	2.05	2.5
	125°C	2.8	2.55	2.0	2.5
E_{rec}(mJ) 125°C		1550	1650	2650	1350
switching frequency		... 1000Hz	... 500Hz	... 500Hz	... 2000Hz
housing insulation		IHM A 6kV	IHM A 6kV	IHM B 6kV	IHM B 6kV
DC stability 100fit @		1800V	2150V	2100V	2100V
Tvjmax		125°C	125°C	150°C	150°C

for better comparability all Vcesat, Vf and switching energies are rated @ 1200A

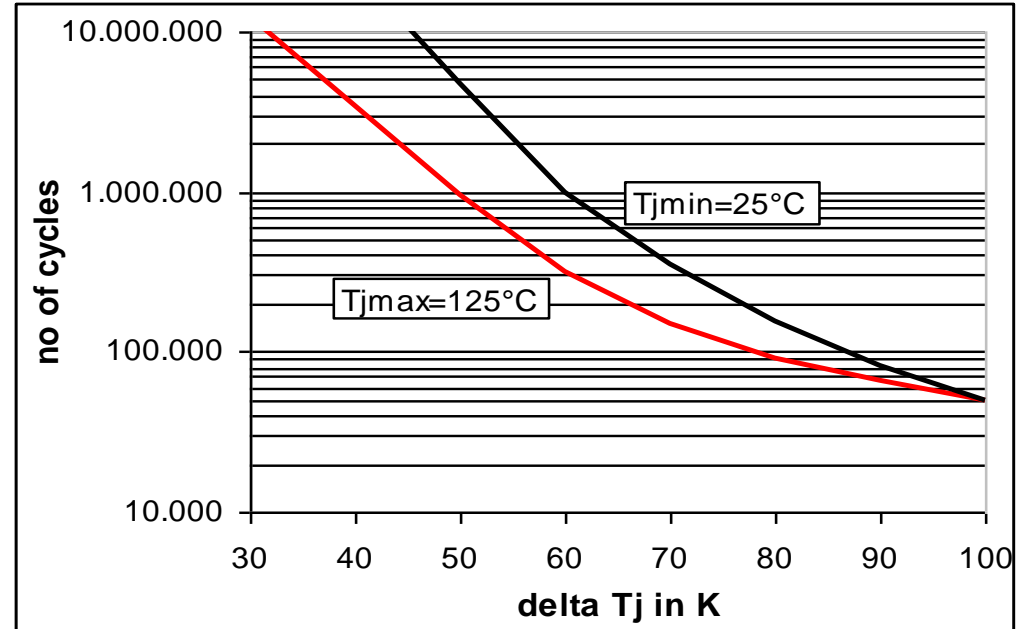
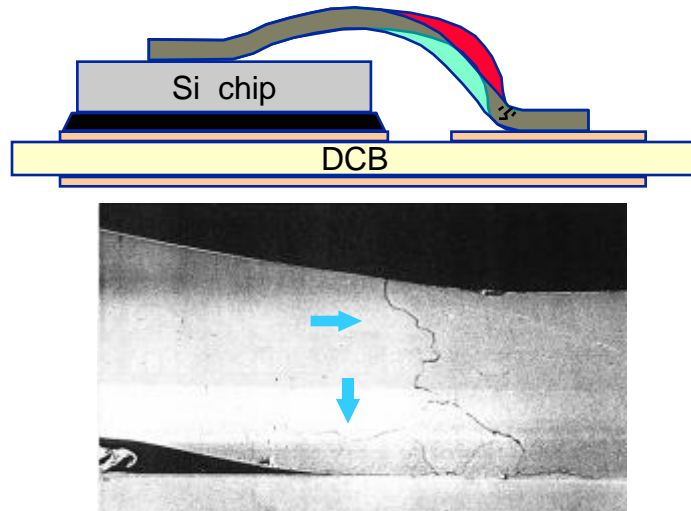
Was versteht man unter Wechsellastfestigkeit ?



Power Cycling

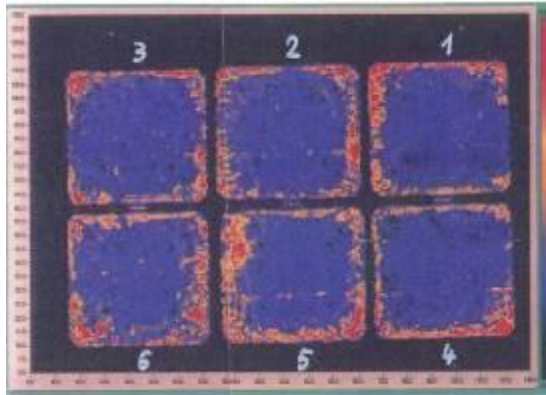
Power Cycling

Betrieb des Systems aus Chip und Bonddraht
zwischen zwei Sperrschicht-Temperaturen

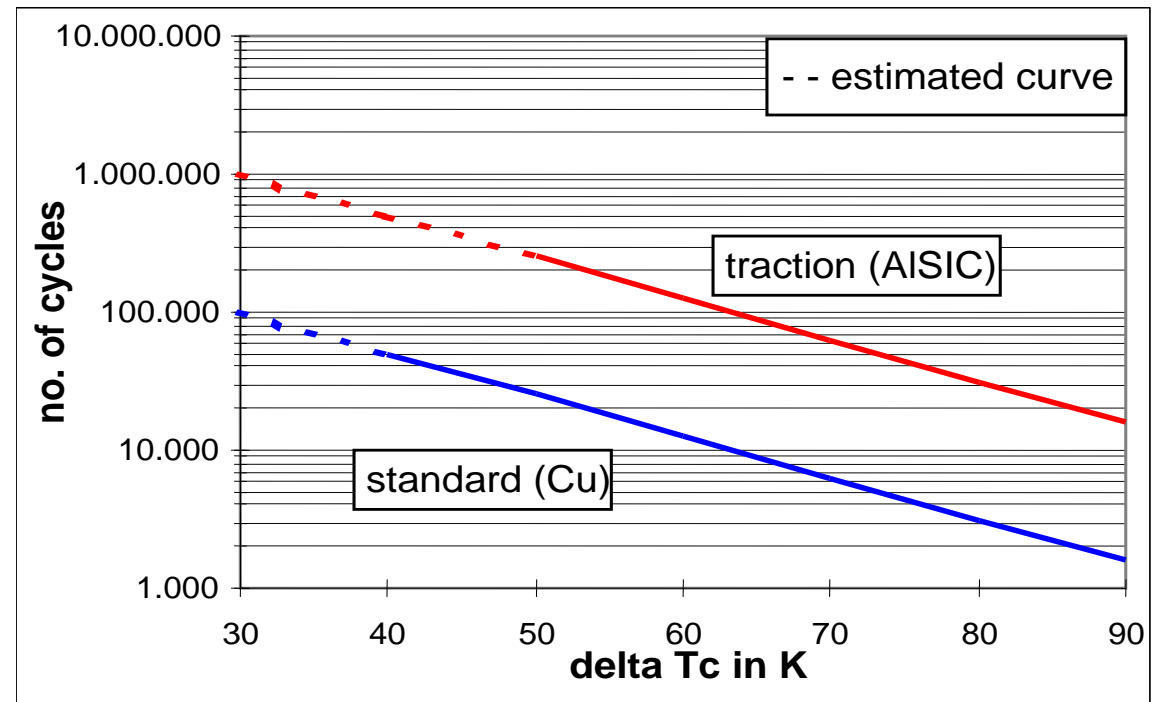
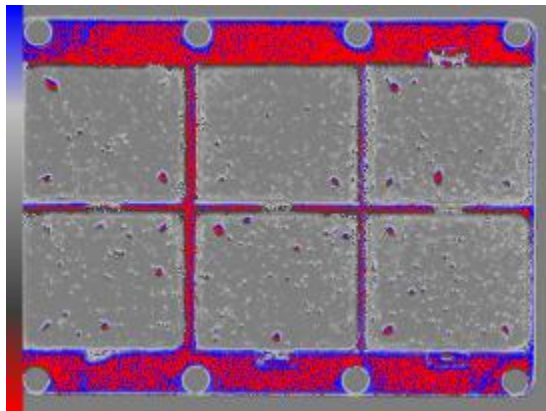


Zuverlässigkeit von IGBTs

Thermal Cycling Wechsellast-Betrieb der Bodenplatte zwischen zwei Temperaturen

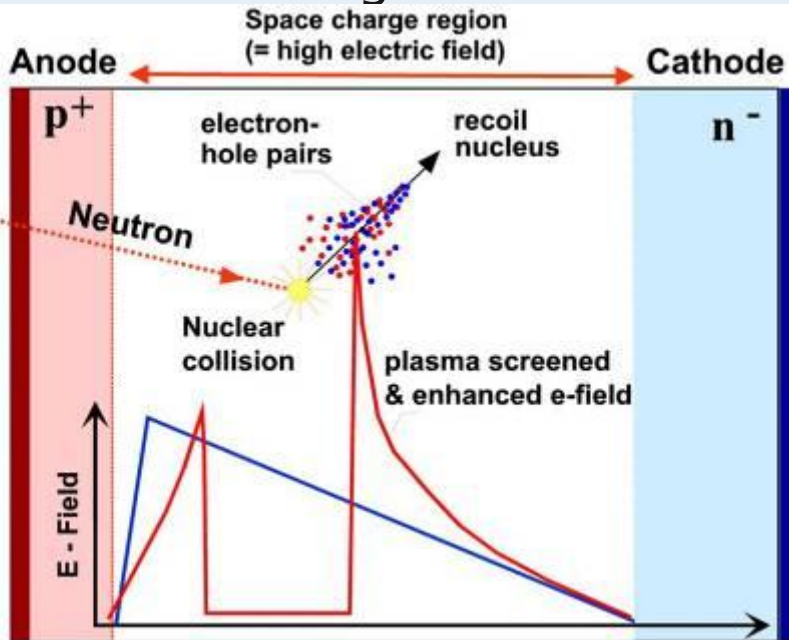


↑Cu nach 4000 Zyklen
Ultraschall-Aufnahme der Löttschicht bei $\Delta T_c = 80K$
↓ AlSiC nach 20.000 Zyklen



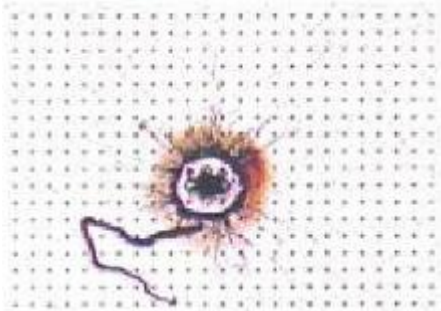
Zuverlässigkeit von IGBTs

Welche Wirkung hat Höhenstrahlung auf einen Halbleiter ?

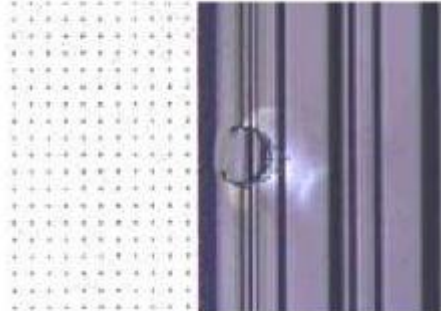


Hochenergetische Teilchen aus der Höhenstrahlung können durch Kollision im Halbleiter ein Plasma erzeugen, das aufgrund massiver Ladungsträgermultiplikation zu einem Durchschlag in dem betroffenen Chip führt. Die Wahrscheinlichkeit dafür wird durch Angabe eines Fit-Wertes (z.B. 100fit @ xxxV) spezifiziert.

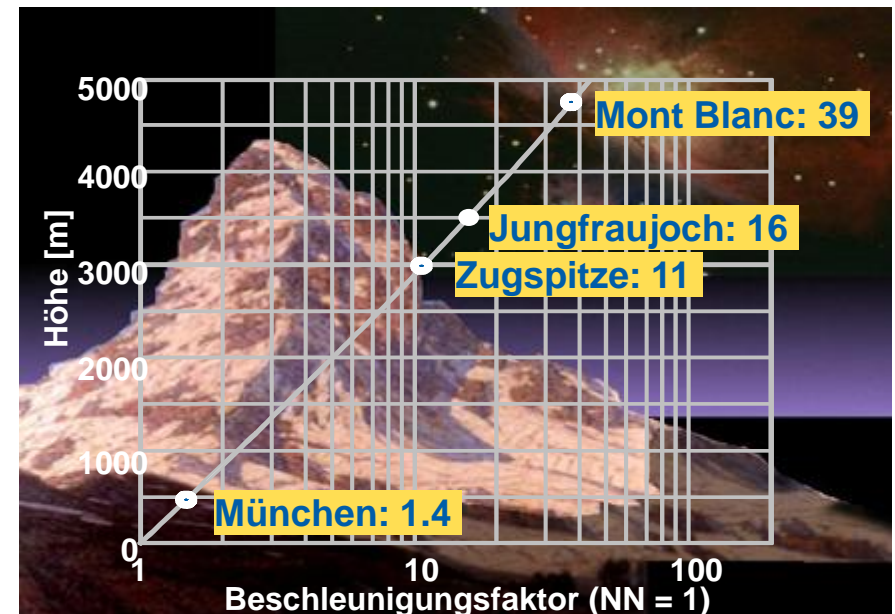
Cell field defect



Edge termination defect



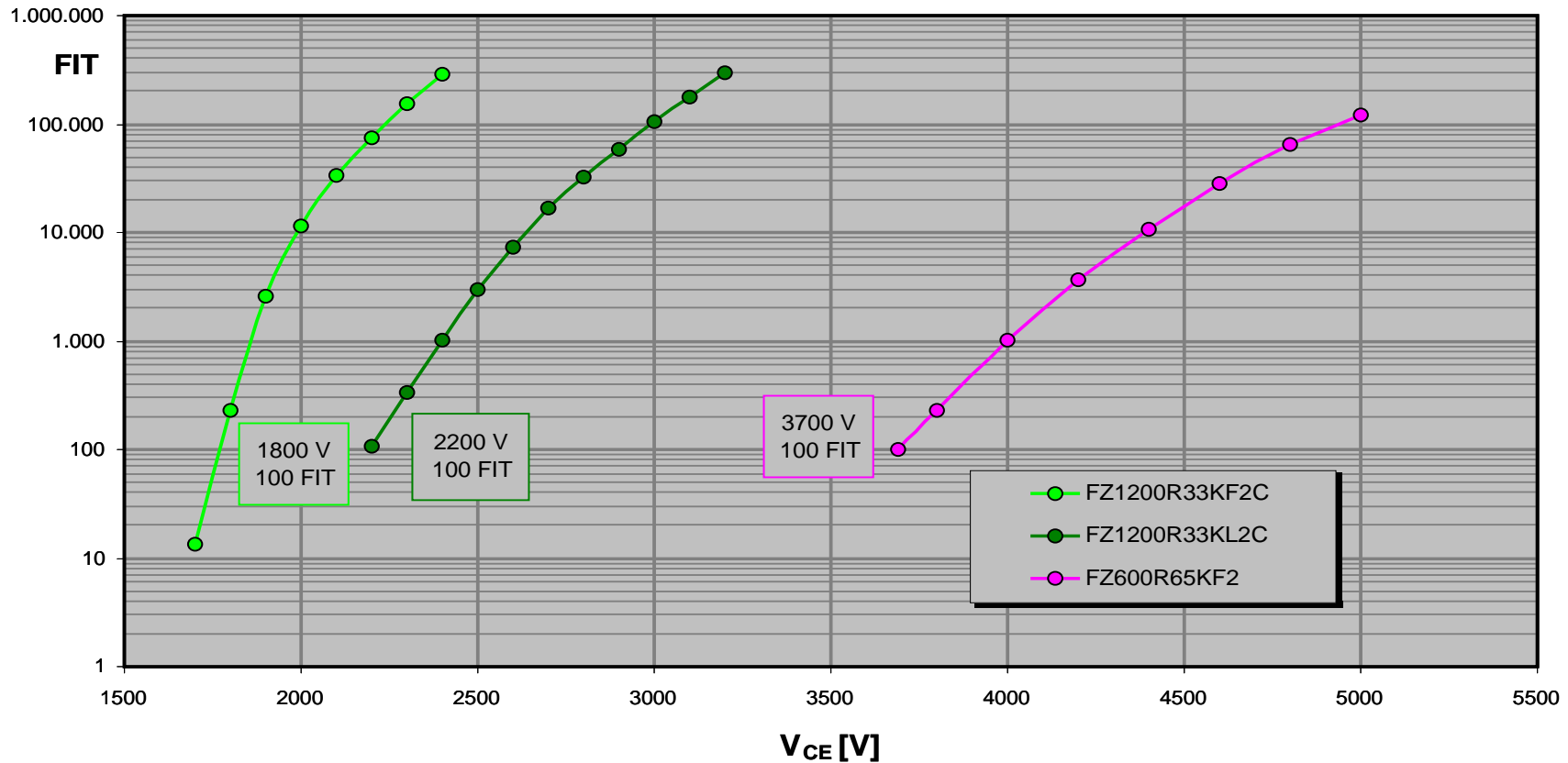
Fehlerbilder



Höhenabhängige Beschleunigungsfaktoren

Höhenstrahlungskurven

Cosmic ray effects, $T_j = 25^\circ\text{C}$, sea level



Höhenstrahlung ist ein stochastischer Prozess, der gut beschrieben und daher in der Auslegung berücksichtigt werden kann

Definition von FIT und MTBF

Eine Fehlerrate λ wird bestimmt aus der Anzahl Fehler r während einer Testzeit t von n Komponenten. Die Einheit für Fehlerraten ist:

1 fit (**f**ailures **i**n **t**ime) = 1 Fehler in 10^9 Betriebsstunden des Bauelementes.

Fehlerraten werden verwendet, um den MTBF-Wert (**m**ean **t**ime **b**etween **f**ailures) einer Anlage, die sich aus i Bauelementen mit individuellen Fehlerraten λ_i zusammensetzt, zu berechnen:

$$\text{MTBF} = 1/\sum \lambda_i$$

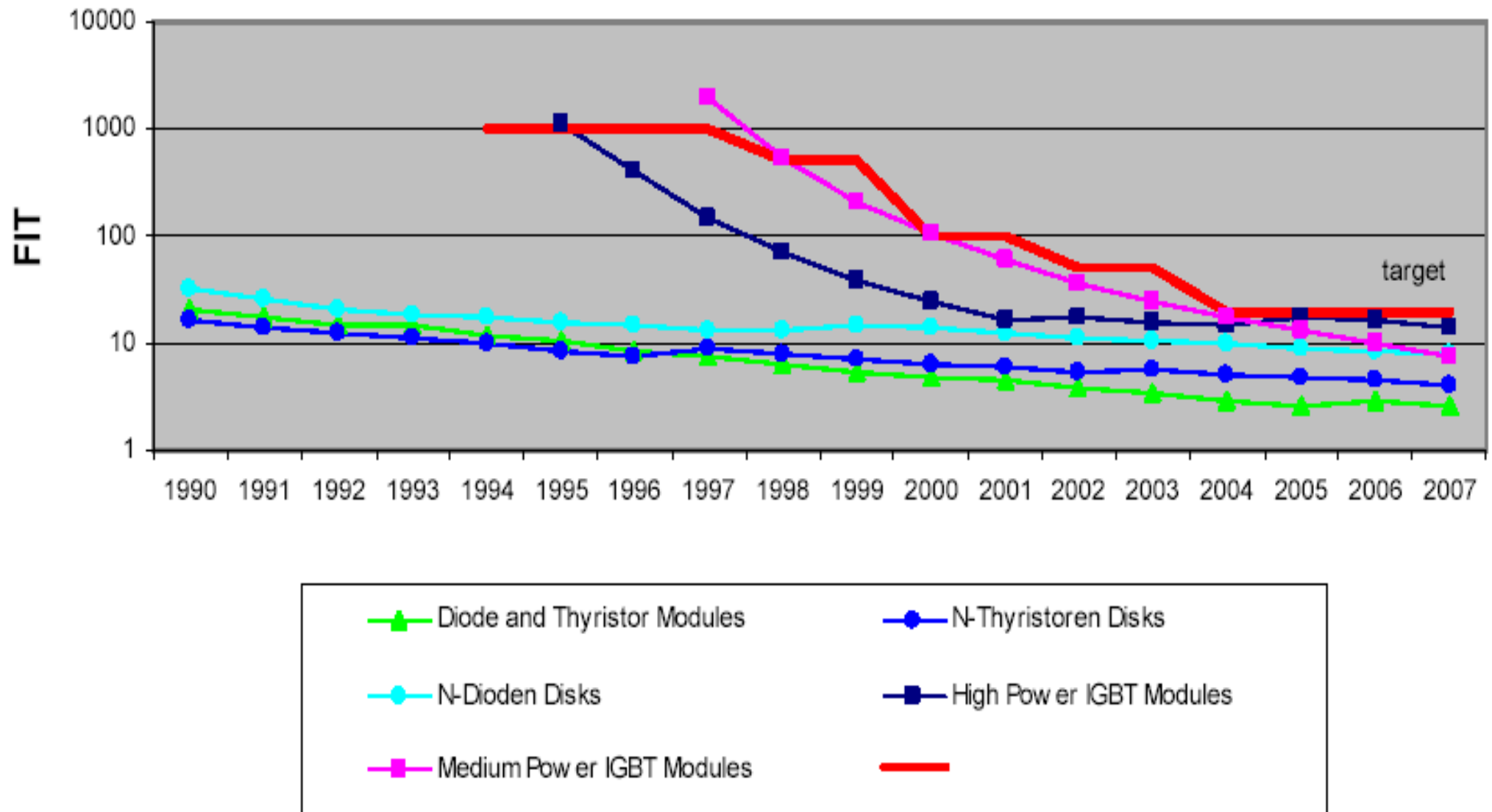
$$1 \text{ Fit} = 1 \times 10^{-9} \text{ h}^{-9} = 1 \text{ Fehler in } 10^9 \text{ Betriebsstunden}$$

MTBF Berechnung

100	: Fitrade des Bauelements bei geg. Spannung
50	: Anzahl der Bauelemente in der Anwendung
18	: Betriebsdauer in Stunden pro Tag
300	: Betriebsdauer in Tagen pro Jahr

$$\text{MTBF} = 37 \text{ Jahre für } 50 \text{ Bauelemente in der Anwendung}$$

Aktuelle Fit Raten verschiedener Bauelementefamilien



Zuverlässigkeit von IGBTs

Zusammenfassung

- IGBTs sind in der Traktionstechnik in sämtlichen Spannungsebenen (600-3000V) etabliert. GTOs und IGCTs finden kaum Anwendung.
- Dabei wird ein Leistungsbereich von einigen 100kW (mit 1200/1700V IGBTs) bis zu > 6MW (mit 6,5kV IGBTs) abgedeckt.
- Traktionsanwendungen sind die Haupttriebfedern für Innovationen bezüglich Robustheit (z.B. durch US-Schweißtechnik) und Zuverlässigkeit (z.B. Steigerung der Wechsellastfestigkeit durch neue Bond- und Löttechniken)
- Die Ausnutzbarkeit der Module (bei gleicher Baugröße!) wird nicht nur durch verbesserte Chipeigenschaften, sondern auch durch verbesserte Materialeigenschaften gesteigert (z.B. Erweiterung des Betriebs- und Lagertemperaturbereiches; neues Terminaldesign für höhere Ströme; reduzierte Widerstände durch optimierte Chipanordnung)
- Die Leistungsdichte wird weiter steigen (höhere Chipstromdichte; $T_{jmax} = 150^{\circ}\text{C}$; leistungsfähigere Modulkonzepte; Einsatz von Wasserkühlsystemen)

Der IGBT in der Traktion - Anwendungen & Anforderungen, Technologie & Zuverlässigkeit

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

