

Vorlesung Praxis Leistungselektronischer Systeme

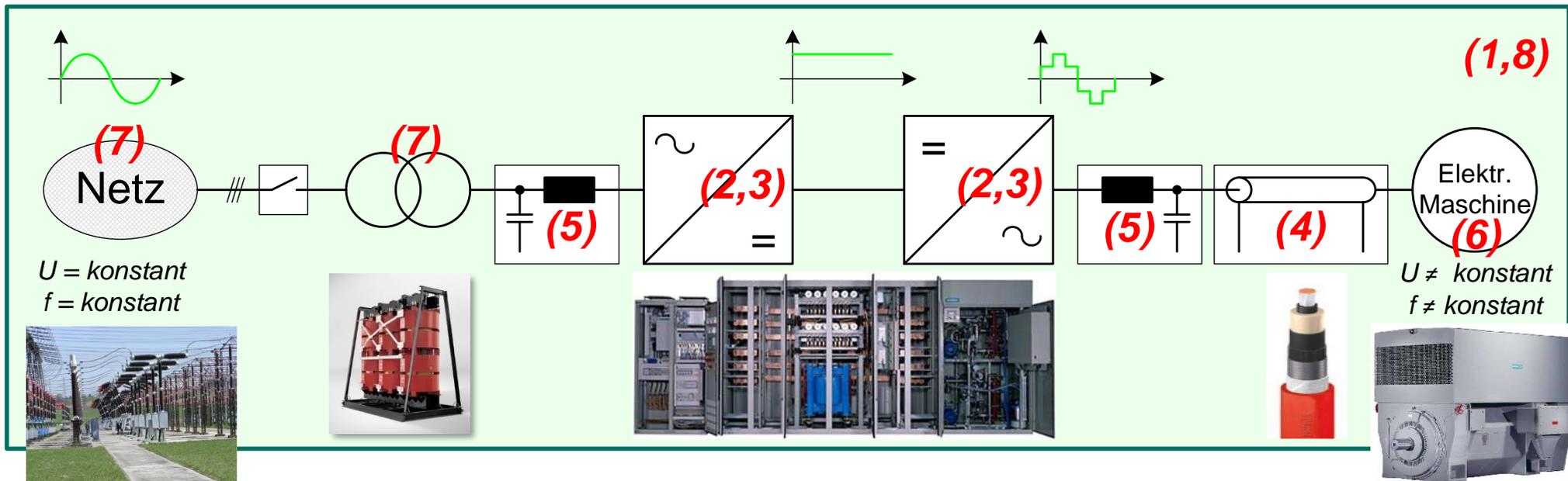
WS2021/22

Elektrotechnisches Institut (ETI) – Leistungselektronische Systeme



Vorlesungsinhalte

- Kapitel 0: Einleitung
- Kapitel 1: Systemübersicht
- Kapitel 2: Stromrichterauslegung
- Kapitel 3: Halbleiterauslegung**
- Kapitel 4: Kabel
- Kapitel 5: Filter
- Kapitel 6: Wechselwirkung Umrichter/Maschine
- Kapitel 7: Netz
- Kapitel 8: Systembetrachtungen

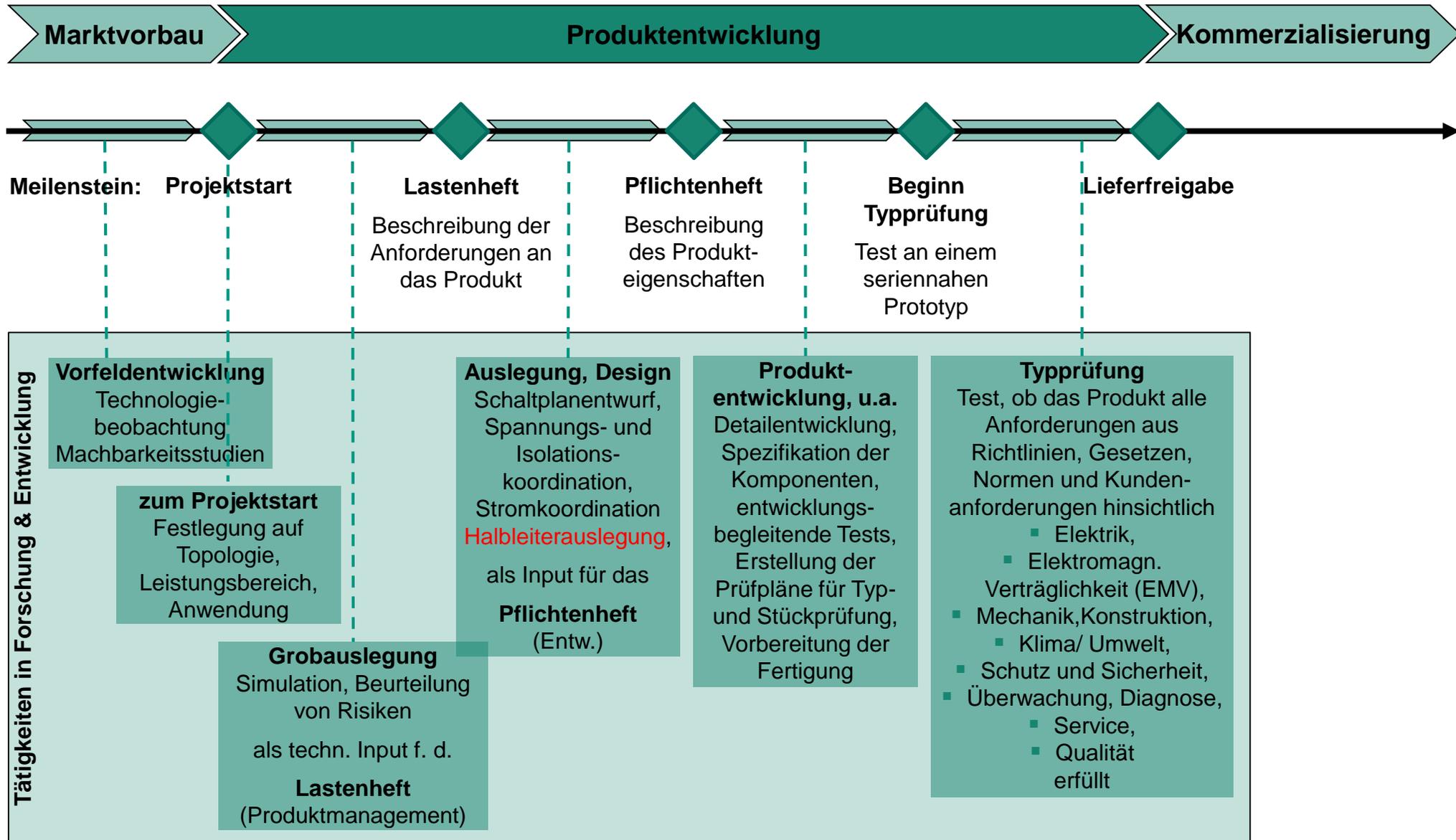


Gliederung

Halbleiterauslegung

1. Verlustberechnung
2. Entwärmung
3. Lastwechselauslegung
4. Zusammenfassung

1. Isolationskoordination – Bedeutung im Entwicklungsprozess



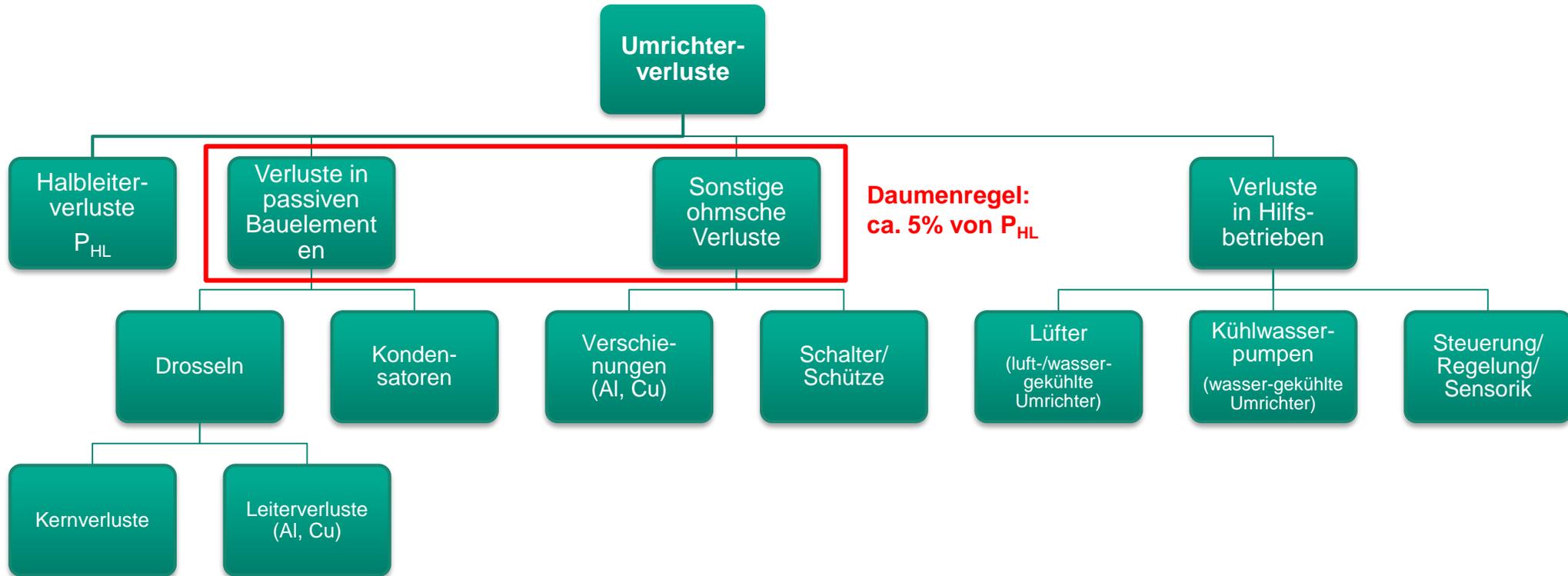
Gliederung

Halbleiterauslegung

1. **Verlustberechnung**
2. Entwärmung
3. Lastwechselauslegung
4. Zusammenfassung

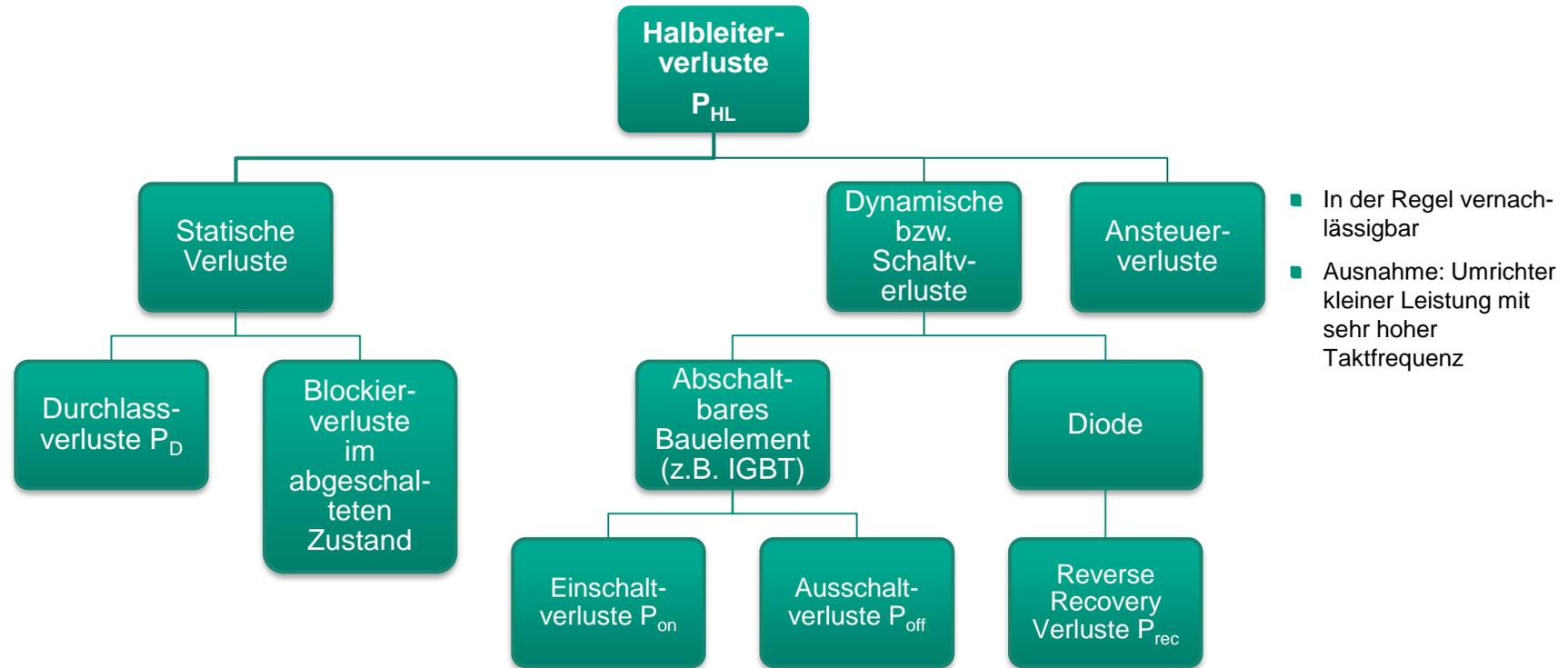
1. Verlustberechnung - Grundlagen

Verlustarten



1. Verlustberechnung - Grundlagen

Halbleiterverlustarten



Abhängig von:

- Strom I über $V_{CE(sat)} = f(I)$
- Sperrschichttemperatur
- In der Regel vernachlässigbar

Abhängig von:

- dem Kollektorstrom I_C
- der Spannung gegen den der Schalter auf- oder ab kommutiert (z.B. die Zwischenkreisspannung U_d)
- der Sperrschichttemperatur
- der Schaltfrequenz

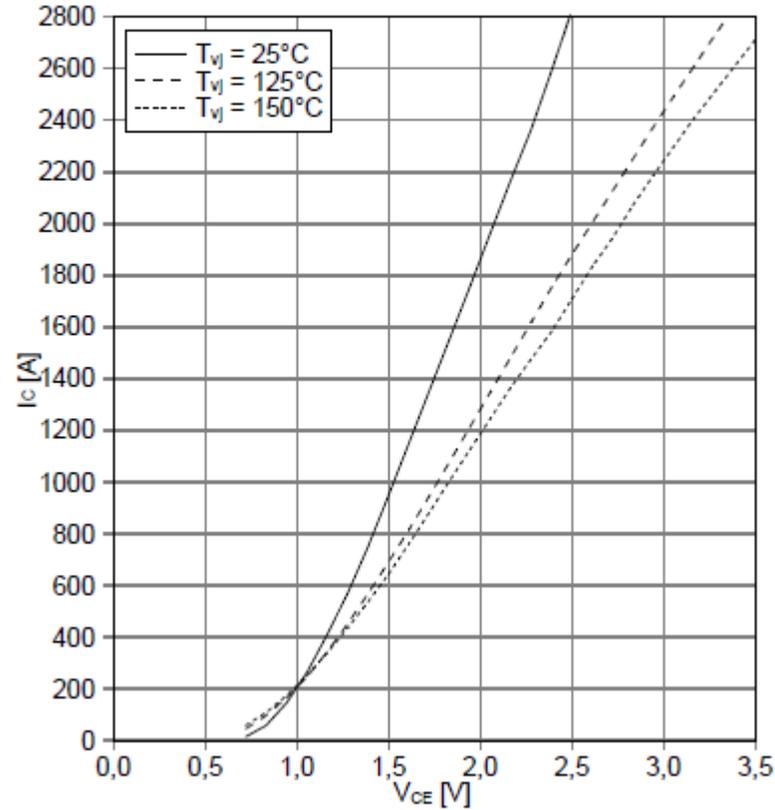
Abhängig von:

- Schaltverhalten des zugehörigen Schalters
- dem Anodenstrom I_C
- der Spannung
- der Sperrschichttemperatur
- der Schaltfrequenz

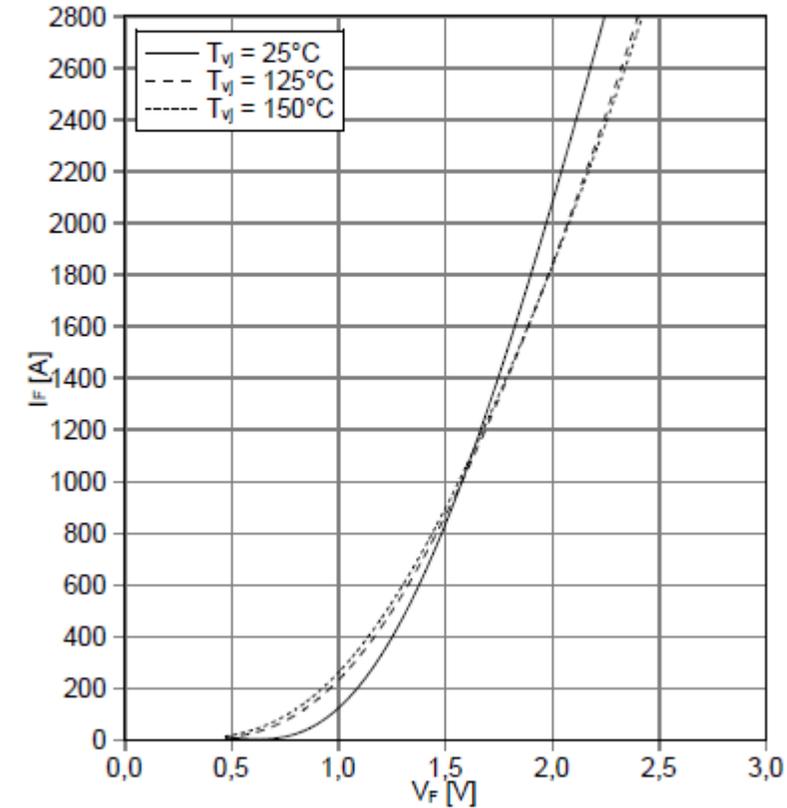
1. Verlustberechnung - Grundlagen

Durchlassverluste P_D

Ausgangskennlinie IGBT, Wechselrichter (typisch)
output characteristic IGBT, Inverter (typical)
 $I_C = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = 15\text{ V}$



Durchlasskennlinie der Diode, Wechselrichter (typisch)
forward characteristic of Diode, Inverter (typical)
 $I_F = f(V_F)$



1. Verlustberechnung - Grundlagen

Durchlassverluste P_D – Äquivalenter Durchlassstrom

**Siehe
Kapitel 2**

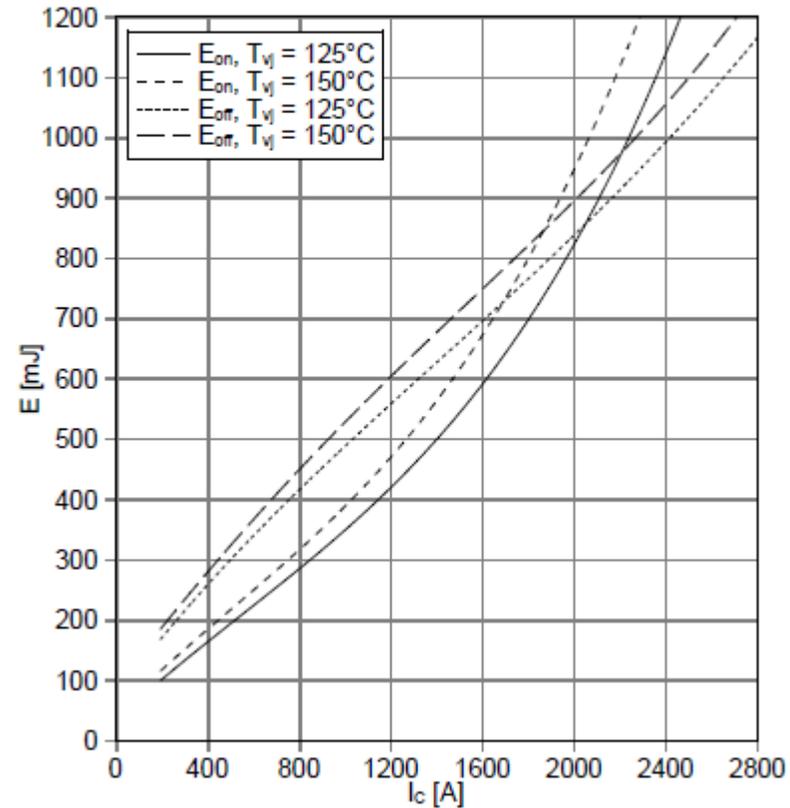
1. Verlustberechnung - Grundlagen

Ein- und Ausschaltverluste P_{on} / P_{off}

Schaltverluste IGBT, Wechselrichter (typisch)
switching losses IGBT, Inverter (typical)

$$E_{on} = f(I_c), E_{off} = f(I_c)$$

$$V_{GE} = \pm 15 \text{ V}, R_{Gon} = 0.47 \text{ } \Omega, R_{Goff} = 0.68 \text{ } \Omega, V_{CE} = 900 \text{ V}$$

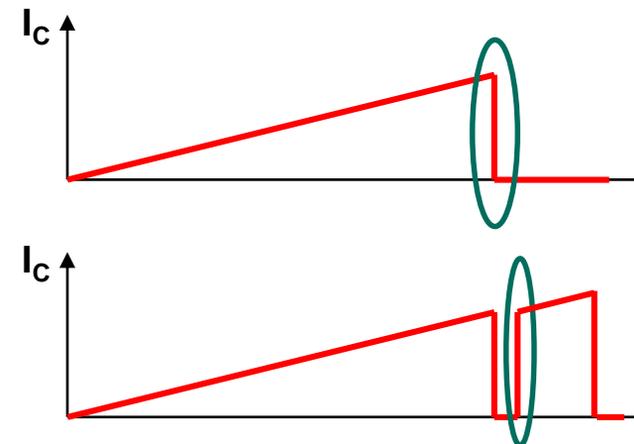
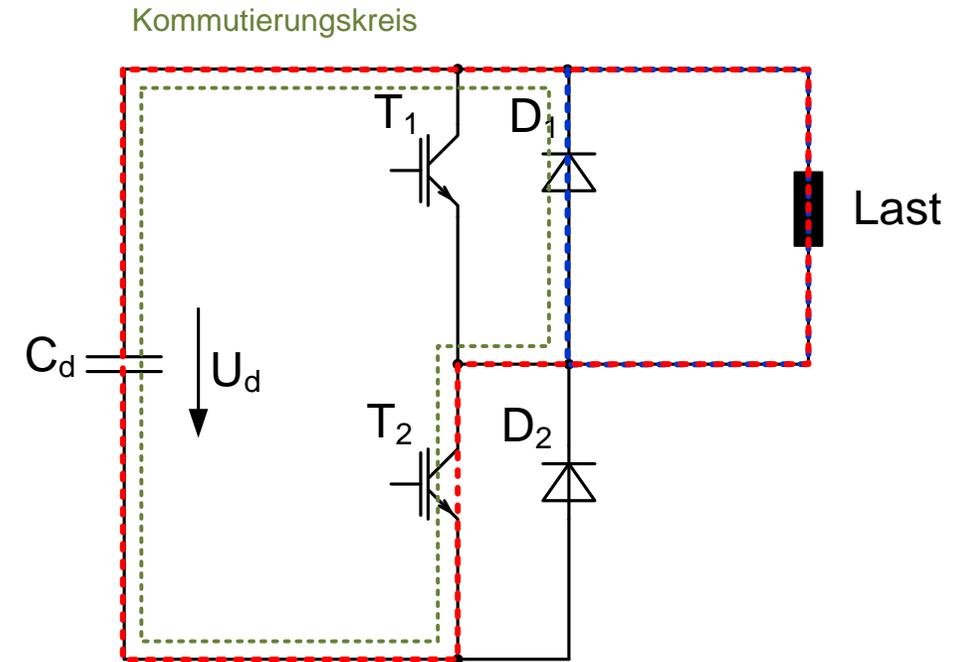


1. Verlustberechnung - Grundlagen

Ein- und Ausschaltverluste P_{on} / P_{off}

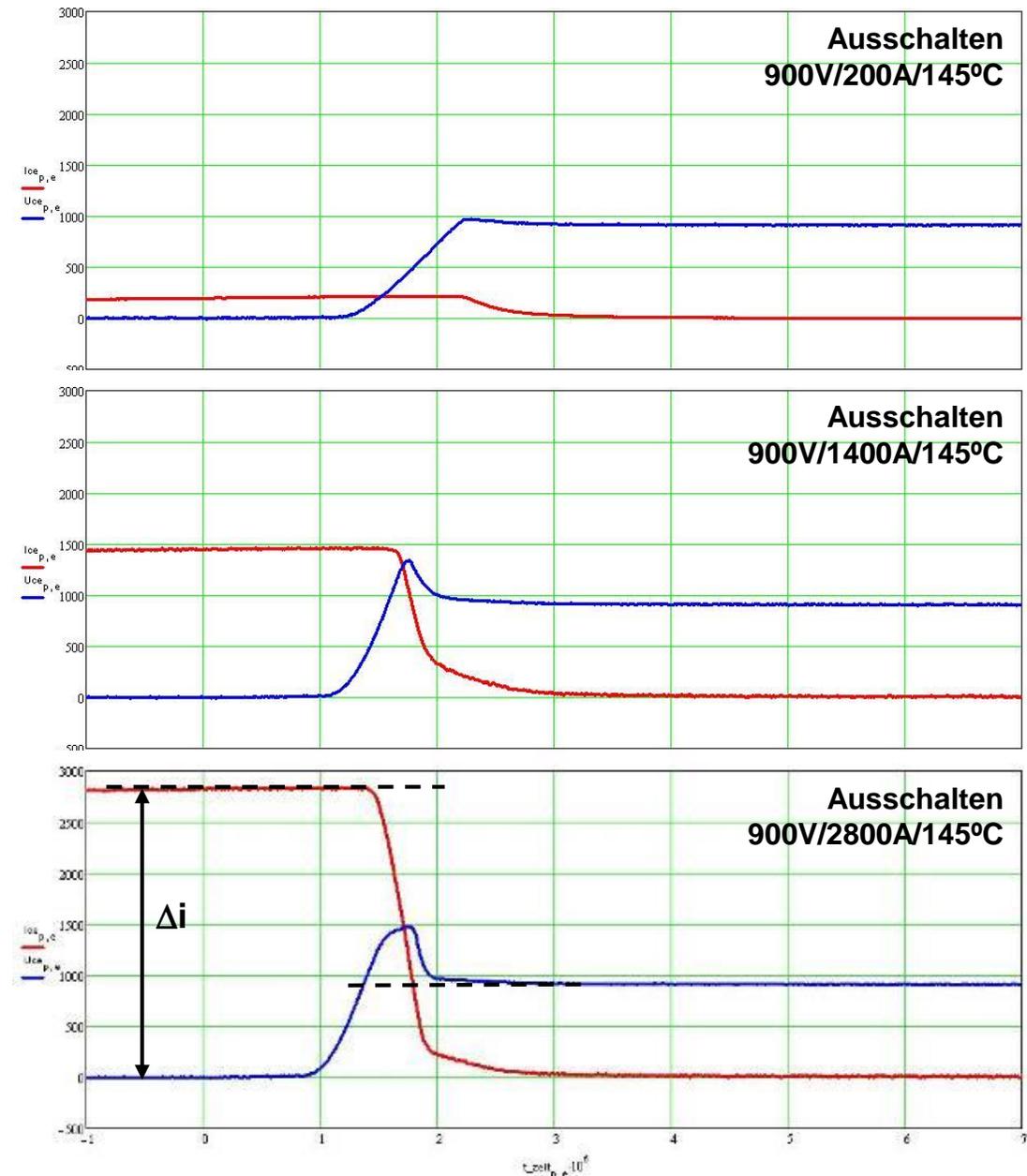
Bestimmung der Verluste:

- Device under Test:
 - IGBT: T_2
 - Diode: D_1
- In Originalaufbau mit Zwischenkreis, Verschienung: dadurch korrekte Berücksichtigung der Streuinduktivität
- mit Originalansteuerung
- Last: Drossel
- U_d =variabel (z.B. 600V, 900V, 1100V, 1300V)
- Junctiontemperatur T_j =variabel (z.B. -40°C , -20°C , 0°C , 25°C , 65°C , 90°C , 145°C)
- Einzelimpulsversuch für
 - das IGBT- Ausschaltverhalten oder
- Doppelimpulsversuch für
 - das IGBT-Einschaltverhalten und das
 - FWD Ausschaltverhalten



1. Verlustberechnung - Grundlagen

Ausschaltverluste P_{off}



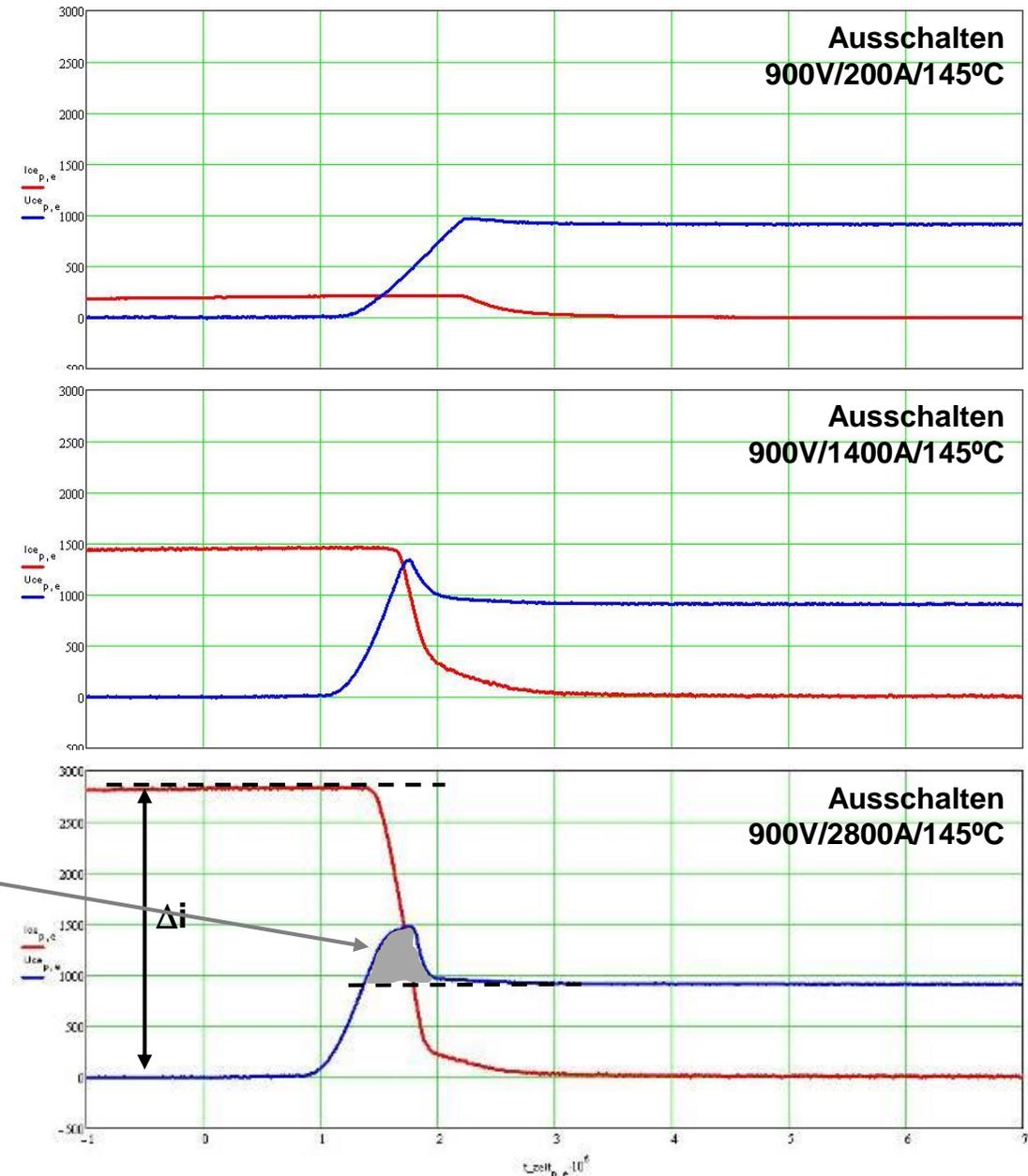
1. Verlustberechnung - Grundlagen

Ausschaltverluste P_{off}

A. Bestimmung der Streuinduktivität aus dem Integral der Überspannung:

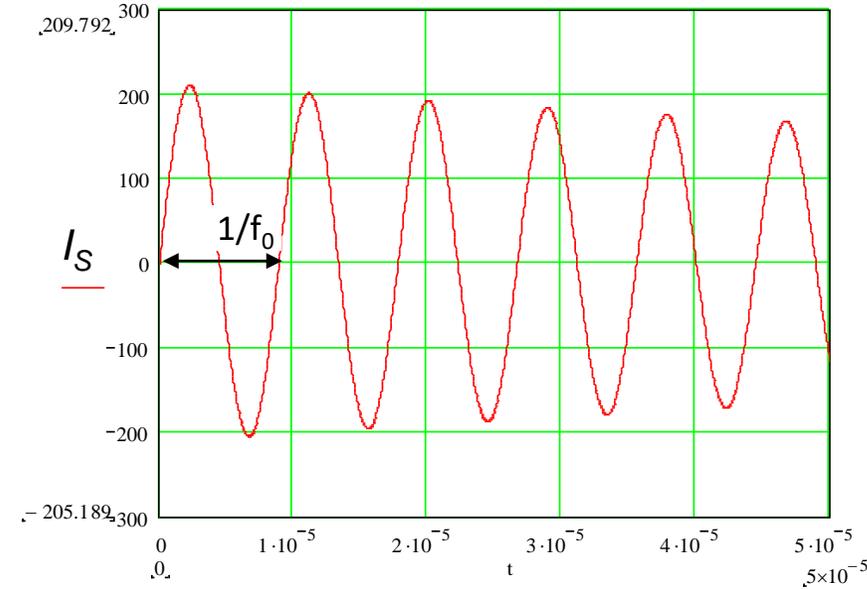
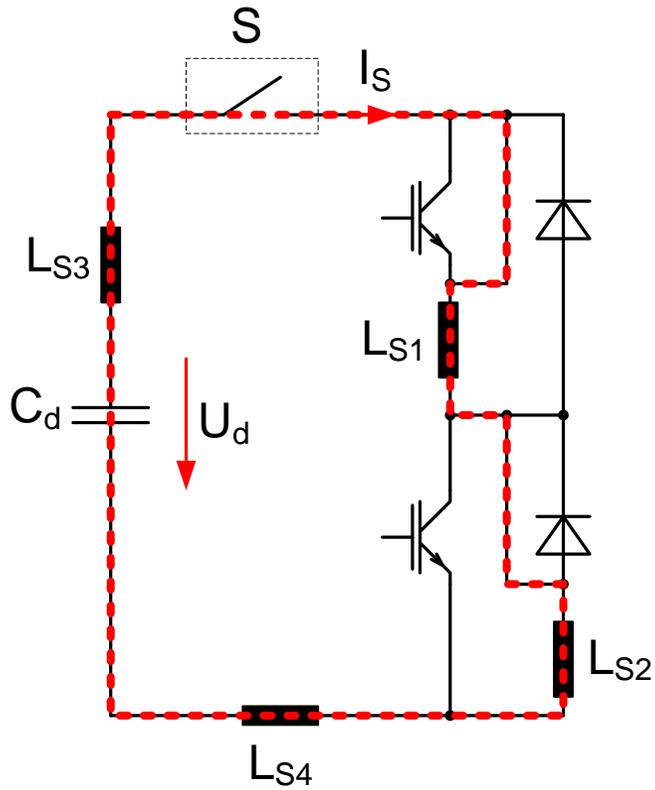
- 1. Schritt:
 - Bestimmung der Überspannung im Schaltaugenblick
 - Bildung der Differenz aus Schaltspannung und Zwischenkreisspannung für $U_{\text{ges}} > U_d$
- 2. Schritt:
 - Bestimmung der Überspannungszeitfläche durch Integration über den Zeitverlauf

$$L_S = \frac{\int (u_{CE}(t) - U_d) dt}{\Delta i}$$
$$L_S \sim \frac{400V \cdot 0,6\mu s}{2800A} = 86nH$$



1. Verlustberechnung - Grundlagen

B. Bestimmung Streuinduktivität über die Resonanzfrequenz des Schwingkreises mit dem ZK-Kondensator



Kurzschlussstrom
$$I_S = \frac{U_d}{\omega \sum L_S} e^{-\delta t} \cdot \sin \omega_0 t$$

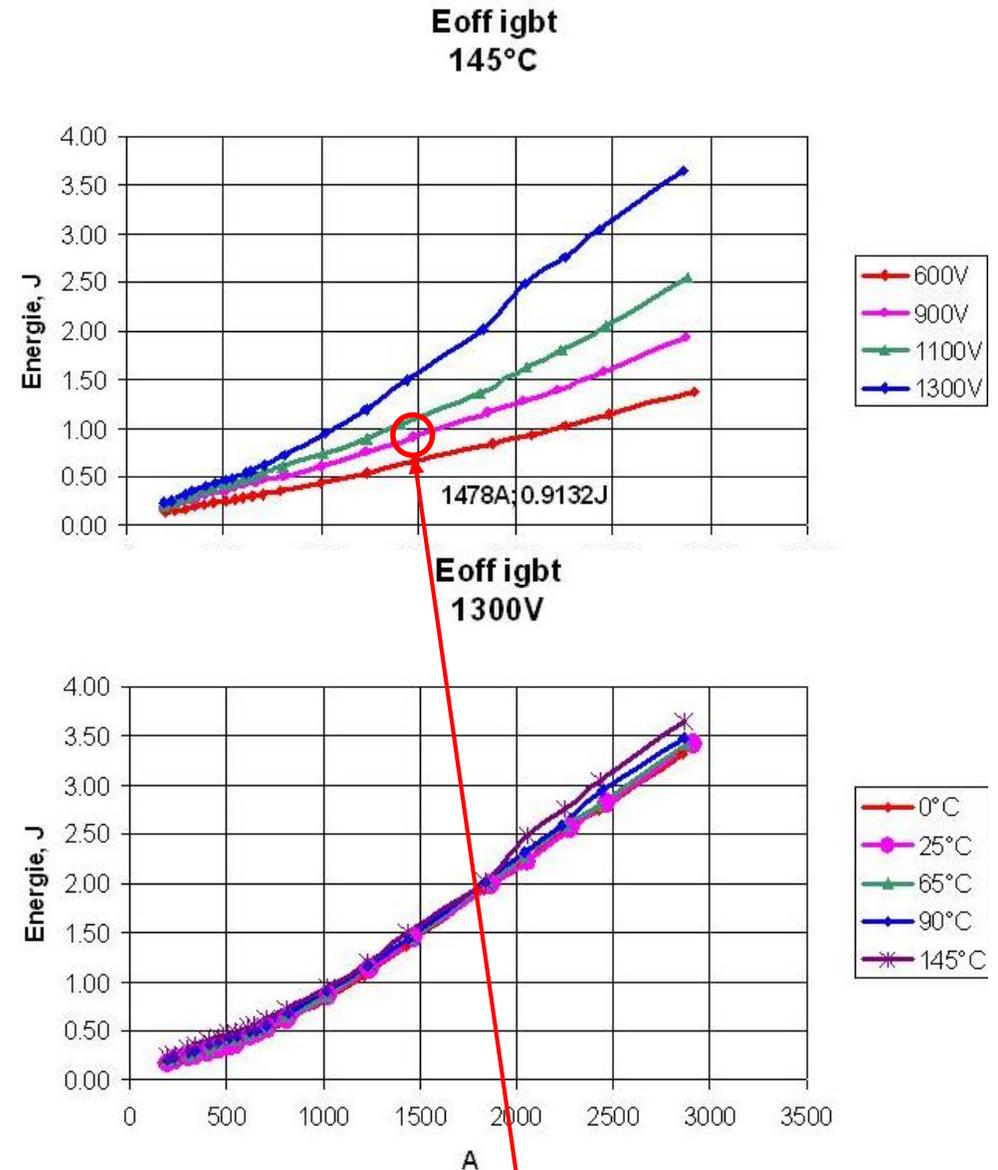
$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\sum L_S \cdot C_d}}$$

$$\delta = \frac{R_S}{2 \cdot \sum L_S}$$

1. Verlustberechnung - Grundlagen

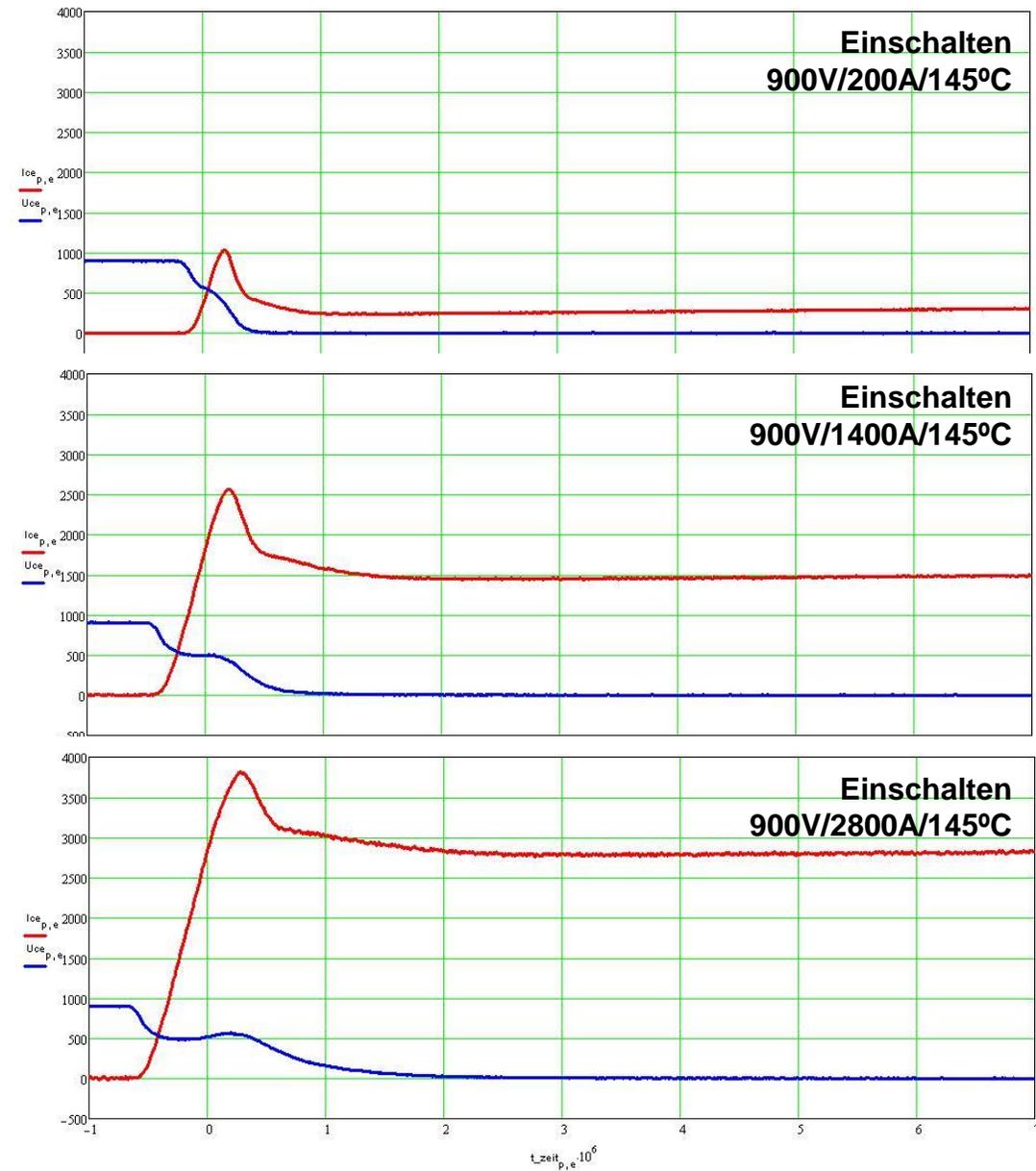
Ausschaltverluste P_{off}



Abschaltverlustenergie pro Puls Turn-off energy loss per pulse	$I_c = 1400 \text{ A}$, $V_{CE} = 900 \text{ V}$, $L_s = 30 \text{ nH}$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$	E_{off}	440	mJ
	$V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $du/dt = 2500 \text{ V}/\mu\text{s}$ ($T_{vj} = 150^\circ\text{C}$)	$T_{vj} = 125^\circ\text{C}$		625	
	$R_{Goff} = 0,68 \ \Omega$	$T_{vj} = 150^\circ\text{C}$		650	

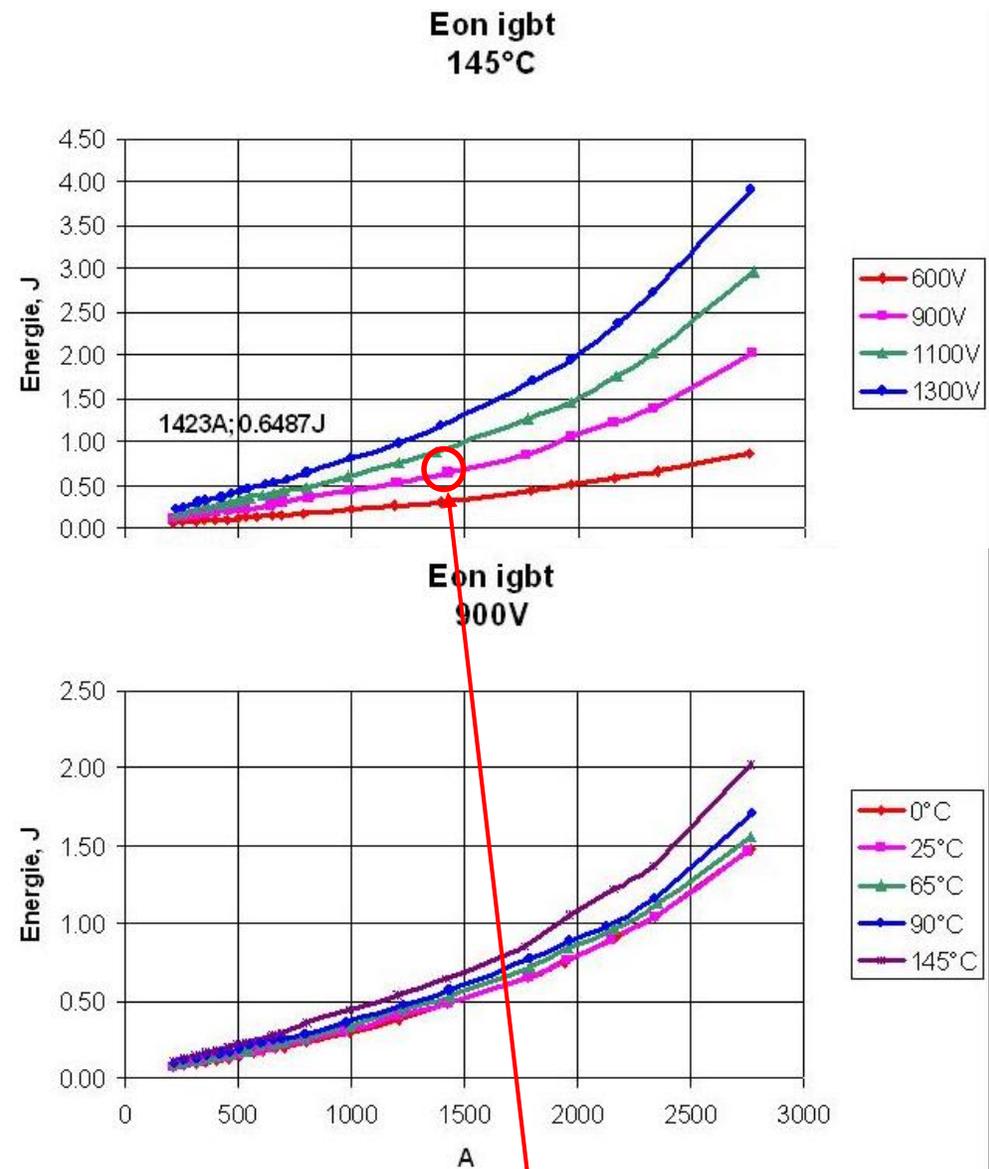
1. Verlustberechnung - Grundlagen

Einschaltverluste P_{on}



1. Verlustberechnung - Grundlagen

Einschaltverluste P_{on}



Einschaltverlustenergie pro Puls
Turn-on energy loss per pulse

$I_C = 1400 \text{ A}$, $V_{CE} = 900 \text{ V}$, $L_S = 30 \text{ nH}$
 $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $di/dt = 9500 \text{ A}/\mu\text{s}$ ($T_{vj} = 150^\circ\text{C}$)
 $R_{Gon} = 0,47 \ \Omega$

$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$
 $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$
 $T_{vj} = 150^\circ\text{C}$

E_{on}

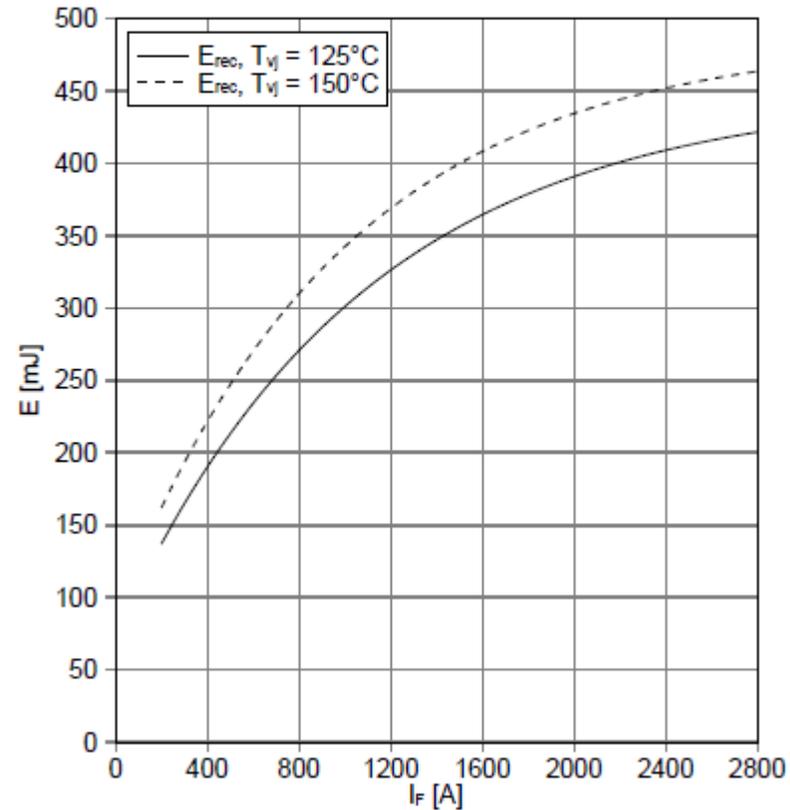
340
500
560

mJ
mJ
mJ

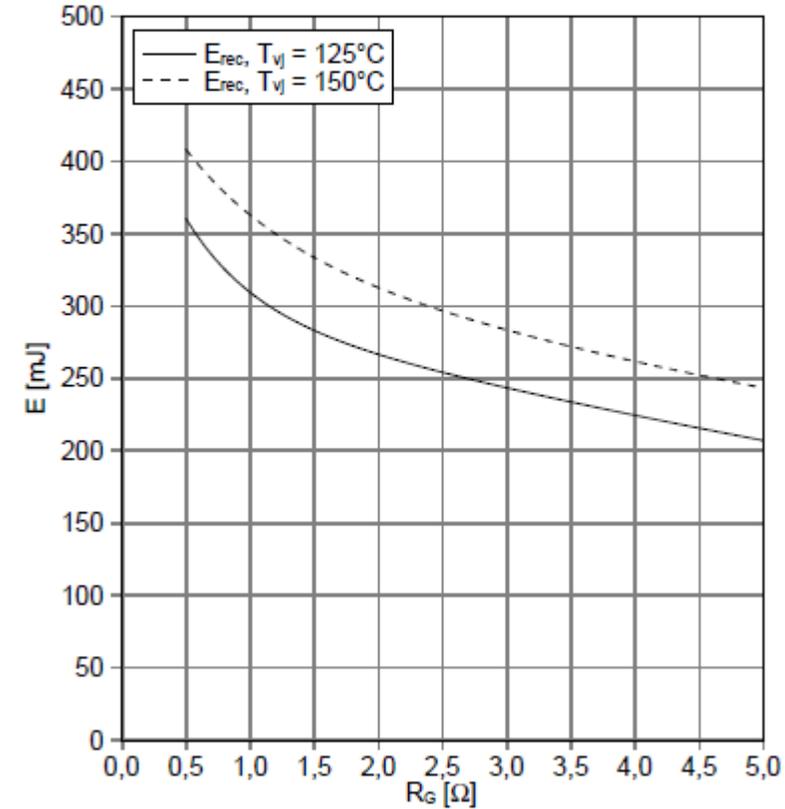
1. Verlustberechnung - Grundlagen

Reverse Recovery Verluste der Diode P_{rec}

Schaltverluste Diode, Wechselrichter (typisch)
switching losses Diode, Inverter (typical)
 $E_{rec} = f(I_F)$
 $R_{Gon} = 0.47 \Omega$, $V_{CE} = 900 \text{ V}$



Schaltverluste Diode, Wechselrichter (typisch)
switching losses Diode, Inverter (typical)
 $E_{rec} = f(R_G)$
 $I_F = 1400 \text{ A}$, $V_{CE} = 900 \text{ V}$



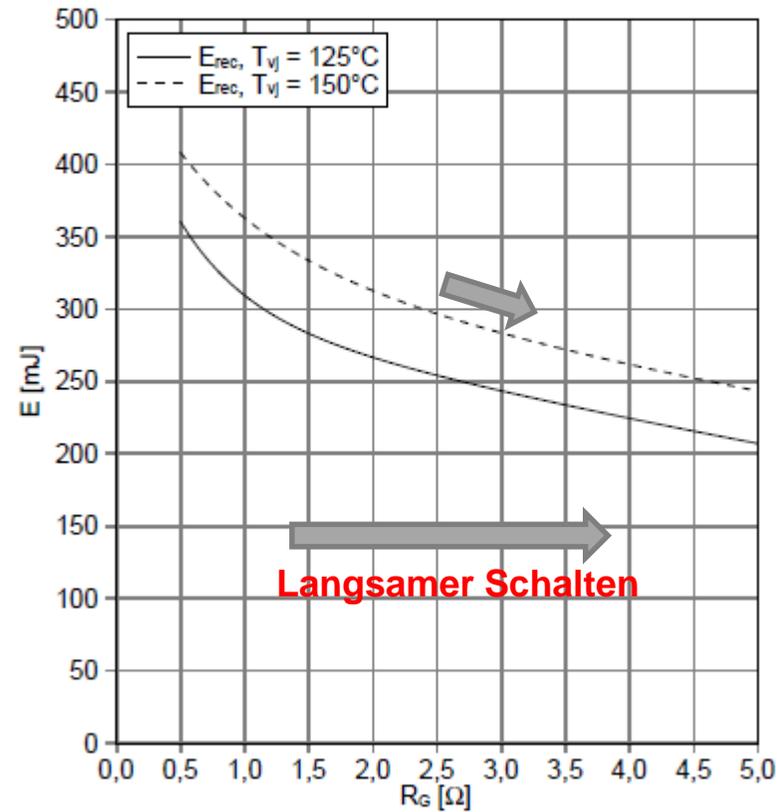
1. Verlustberechnung - Grundlagen

Reverse Recovery Verluste der Diode P_{rec}

Schaltverluste Diode, Wechselrichter (typisch)
switching losses Diode, Inverter (typical)

$$E_{rec} = f(R_G)$$

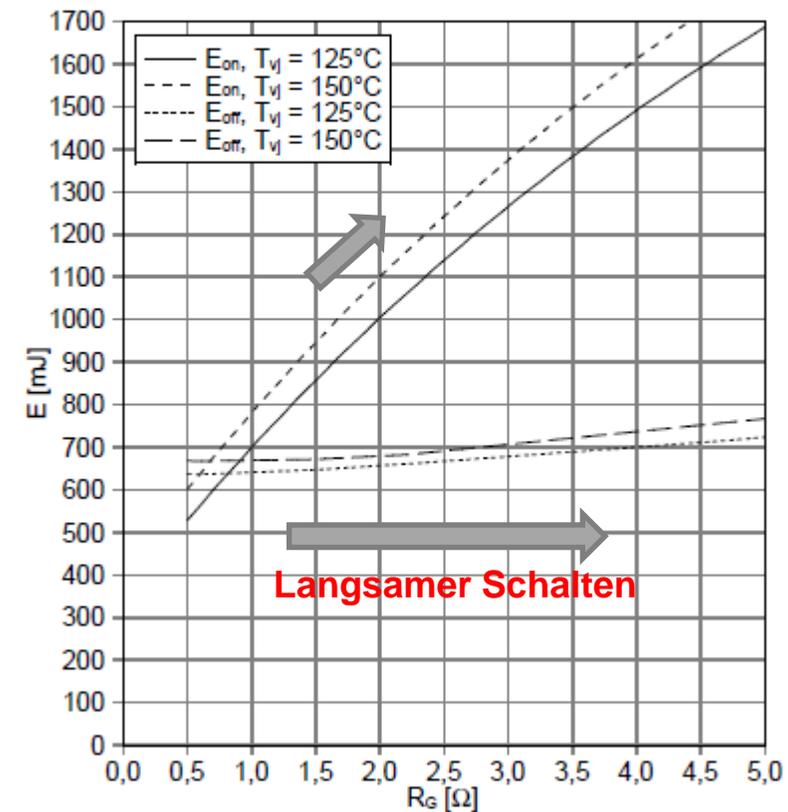
$$I_F = 1400 \text{ A}, V_{CE} = 900 \text{ V}$$



Schaltverluste IGBT, Wechselrichter (typisch)
switching losses IGBT, Inverter (typical)

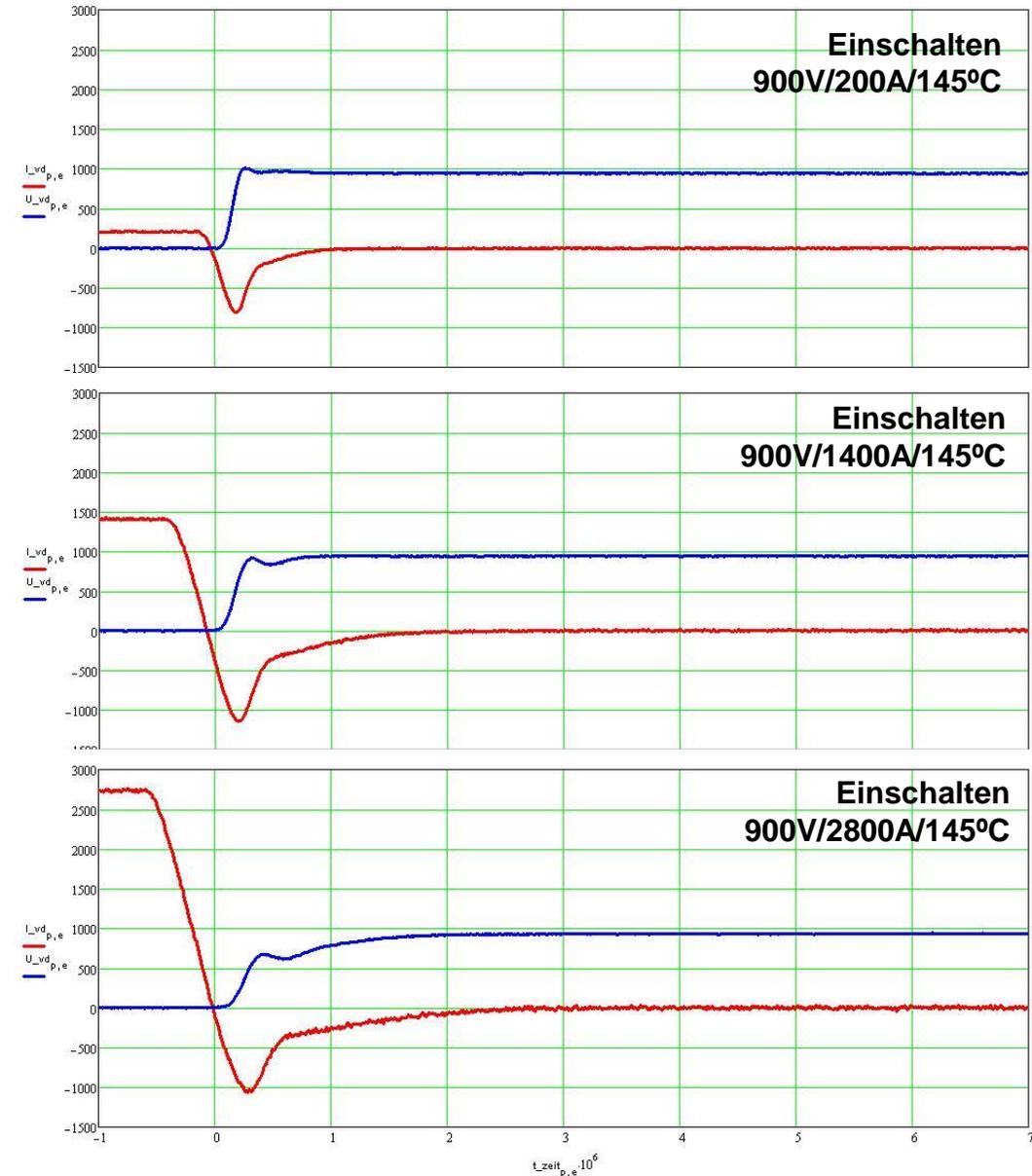
$$E_{on} = f(R_G), E_{off} = f(R_G)$$

$$V_{GE} = \pm 15 \text{ V}, I_C = 1400 \text{ A}, V_{CE} = 900 \text{ V}$$



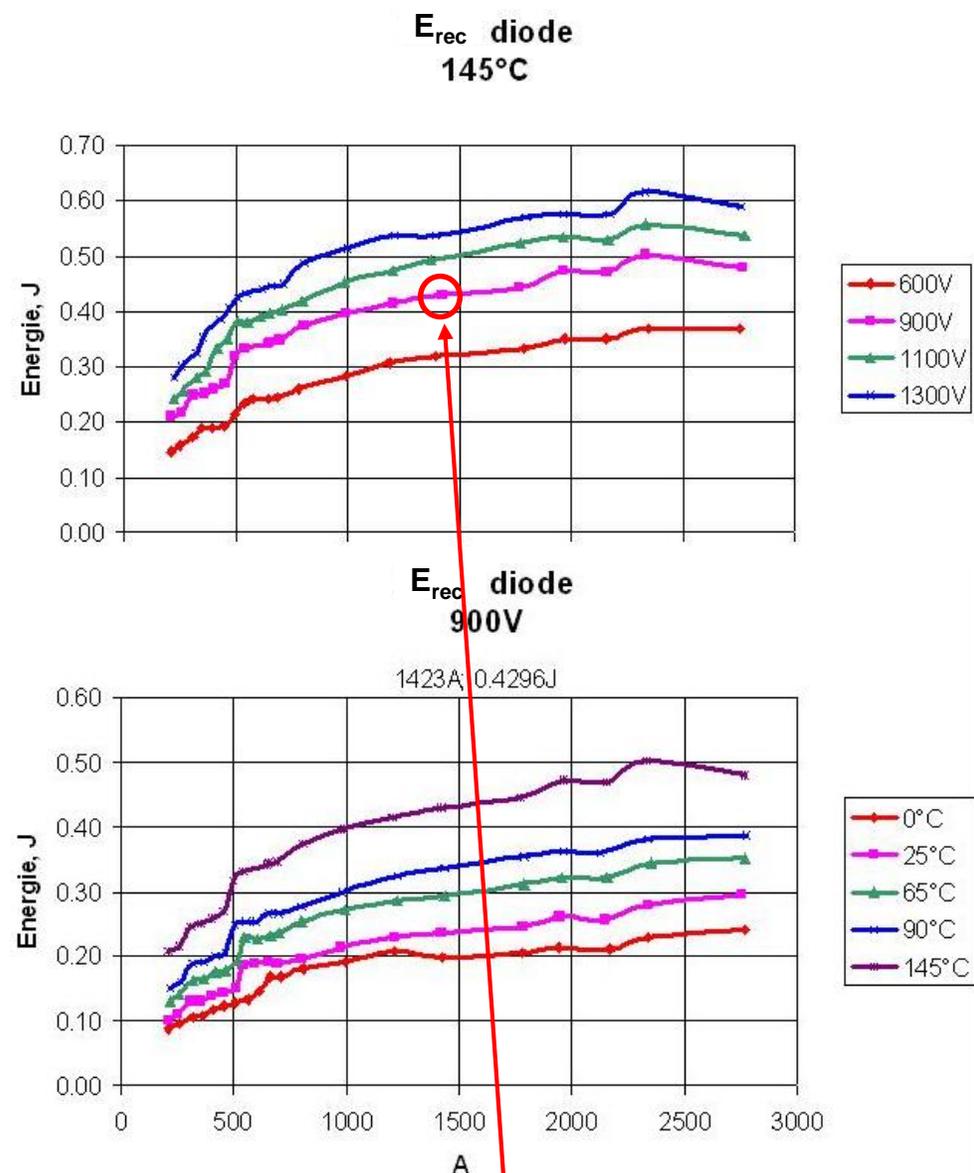
1. Verlustberechnung - Grundlagen

Reverse Recovery Verluste der Diode P_{rec}



1. Verlustberechnung - Grundlagen

Reverse Recovery Verluste der Diode P_{rec}

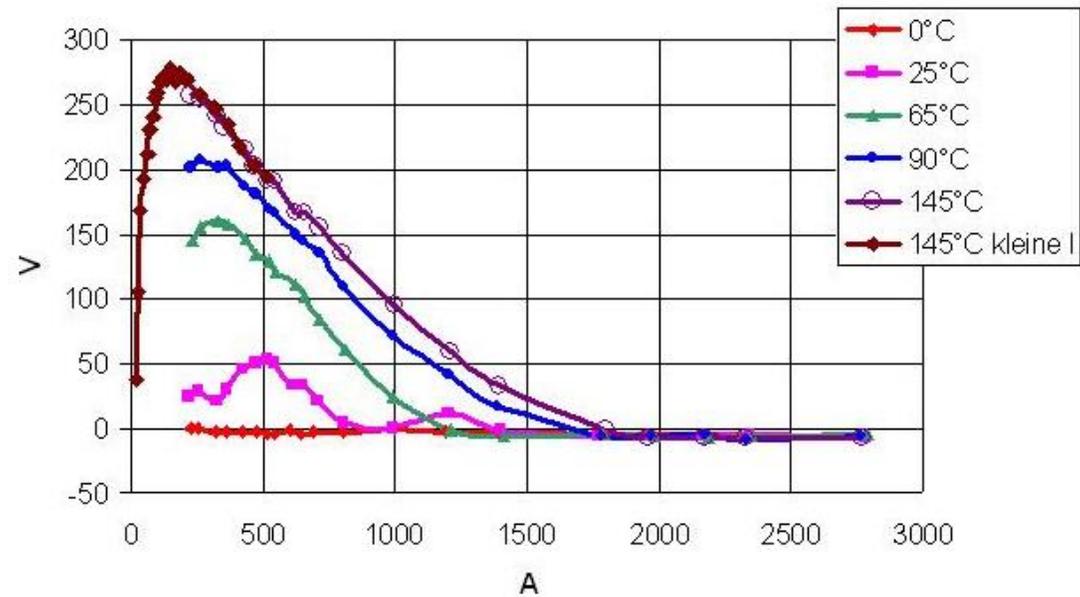
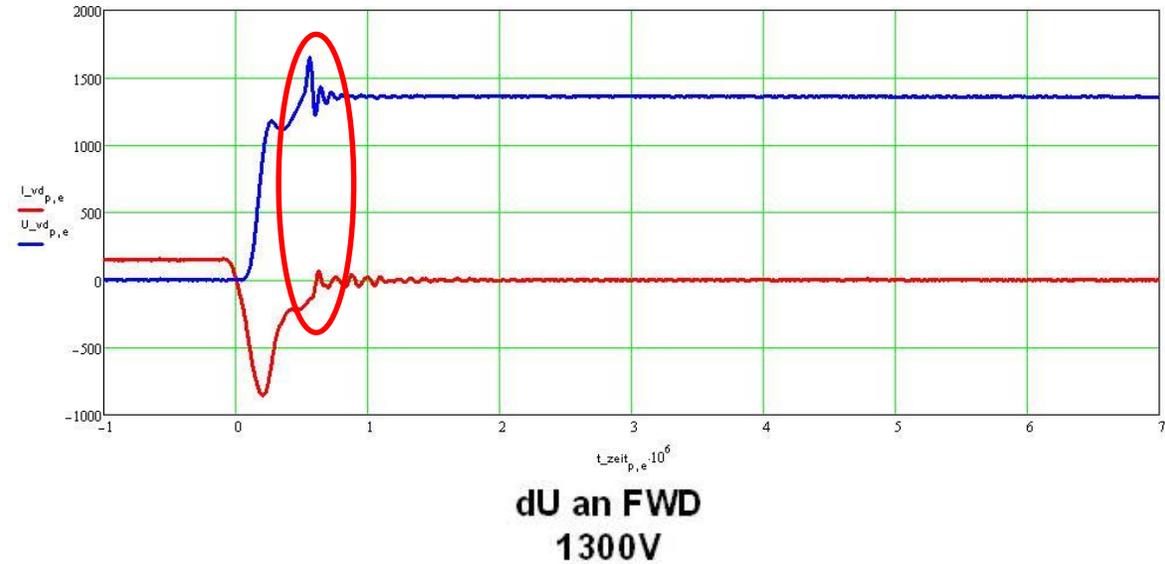
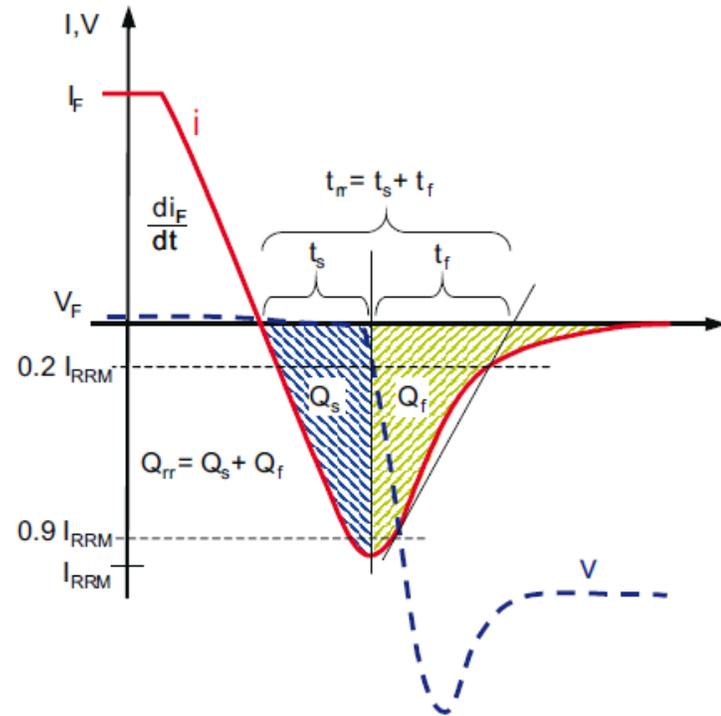


Abschaltenergie pro Puls	$I_F = 1400 \text{ A}$, $-di_F/dt = 10000 \text{ A}/\mu\text{s}$ ($T_{vj}=150^\circ\text{C}$)	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$	195	mJ
Reverse recovery energy	$V_R = 900 \text{ V}$	$T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	345	mJ
	$V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 150^\circ\text{C}$	385	mJ

1. Verlustberechnung - Grundlagen

Reverse Recovery Verluste der Diode P_{rec}

Besonders kritisch:
„Abreißen“ des Rückstroms bei kleinen Strömen

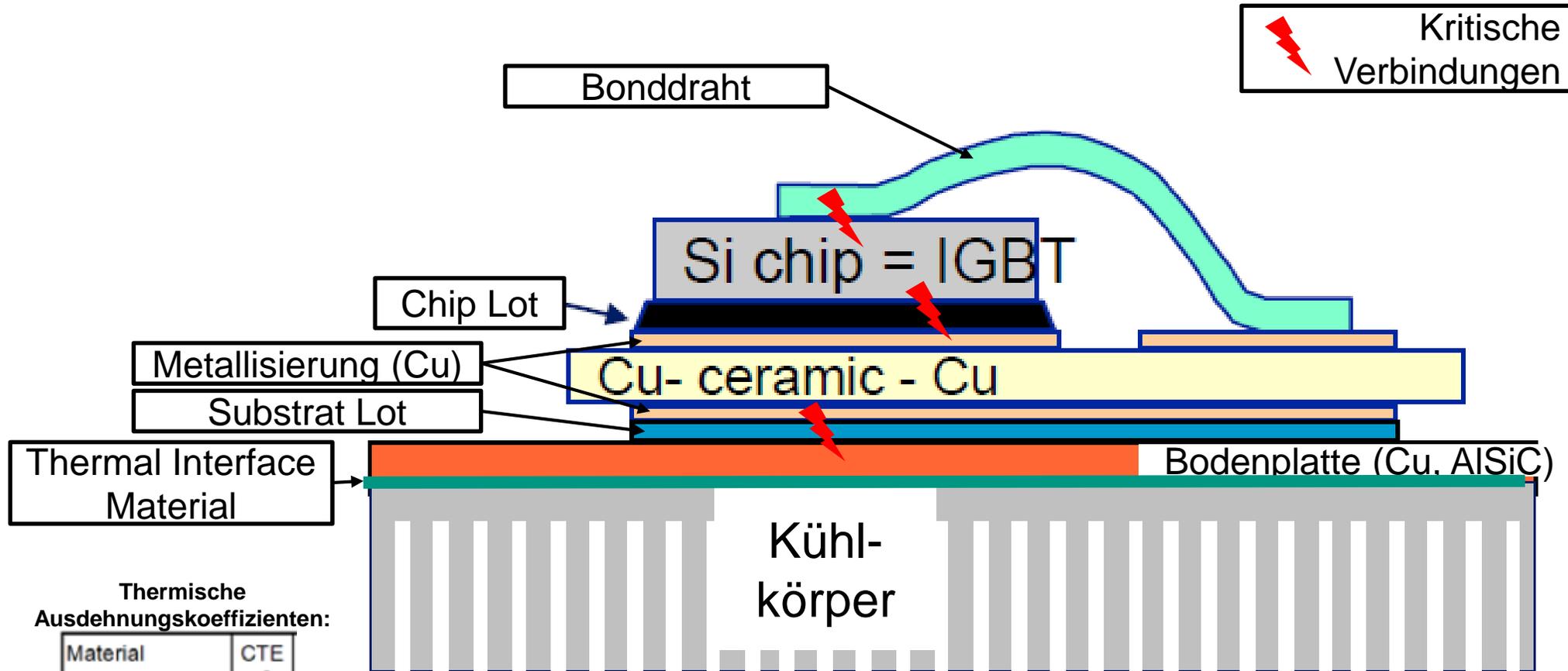


Gliederung

Halbleiterauslegung

1. Verlustberechnung
2. **Entwärmung**
3. Lastwechselauslegung
4. Zusammenfassung

2. Entwärmung - Modulaufbau eines Leistungshalbleiters



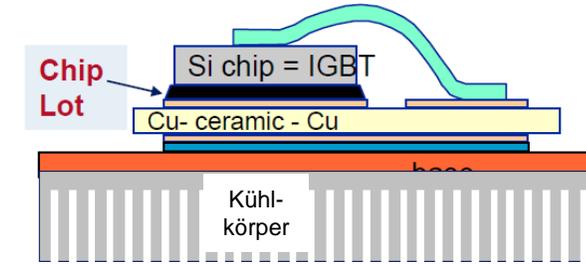
Thermische Ausdehnungskoeffizienten:

Material	CTE 10 ⁻⁶ /K
Chip (IGBT) Si	3,5
AlN -DCB	8,2
Al ₂ O ₃ - DCB	10,7
AlSiC base plate	7
Cu base plate	17
Bond wire Al	23

- Verlustleistung muss über viele Schichten abgeführt werden
 - Wichtig: Hohe thermische Leitfähigkeit bei gleichzeitig hohem Isolationsvermögen (→ Keramik)
- Hauptproblem:**
- Unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten (CTE = **C**oefficient of **T**hermal **E**xpansion) der verbundenen Materialien
 - Thermische Zyklierung führt zu mechanischer Belastung (Verspannung) der Verbindungen

2. Entwärmung – Thermisches Ersatzschaltbild

- Thermische Effekte können durch elektrische Ersatzschaltbilder nachgebildet und beschrieben werden.
- Dabei werden dreidimensionale Anordnungen auf eindimensionale Modelle abgebildet.
- Problem: Ungenauigkeiten z.B. durch thermische Verkopplungen, Wärmespreizung und Randeffekte
- Abhilfe: 3D-FEM-Simulation statt analytischer Ansatz.



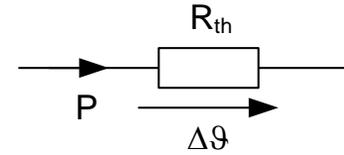
Analogien:

Elektrisches Netzwerk			Thermisches Netzwerk		
Bez.	Symbol	Einheit	Bez.	Symbol	Einheit
Spannung	U	V	Temperatur-differenz	ΔT	K
Strom	I	A	(Verlust)-Leistung	P	W
Ladung	Q	C = A·s	(Verlust)-Energie	Q	J = W·s
Widerstand	R	Ω	Thermischer Widerstand	R_{th}	K/W
Kapazität	C	$F = (A \cdot s)/V$	Thermische Kapazität	C_{th}	$(W \cdot s)/K = J/K$
Zeitkonstante	$\tau = R \cdot C$	s	Thermische Zeitkonstante	$\tau_{th} = R_{th} \cdot C_{th}$	s
Leitfähigkeit	γ	$1/(\Omega \cdot m)$ $= A/(m \cdot V)$	Thermische Leitfähigkeit	λ	W/(m·K)

2. Entwärmung – Thermisches Ersatzschaltbild

- Thermischer Widerstand

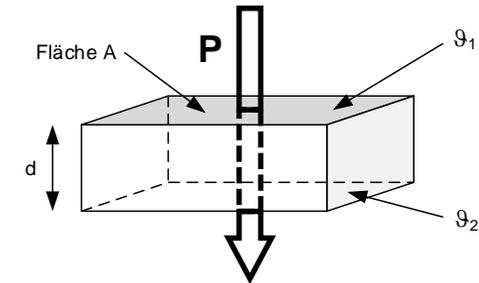
$$R_{th} = \frac{\Delta\vartheta}{P}$$



- Thermische Leitfähigkeit

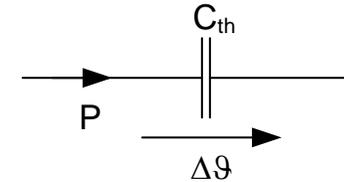
$$\lambda = \frac{d}{R_{th} \cdot A}$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2 = P \cdot R_{th} = P \cdot \frac{d}{\lambda \cdot A}$$



- Thermische Kapazität

$$C_{th} = \frac{Q}{\Delta\vartheta} = \frac{\int P \cdot dt}{\Delta\vartheta}$$



- Spezifische Wärmekapazität

$$c_{th} = \frac{C_{th}}{m}$$

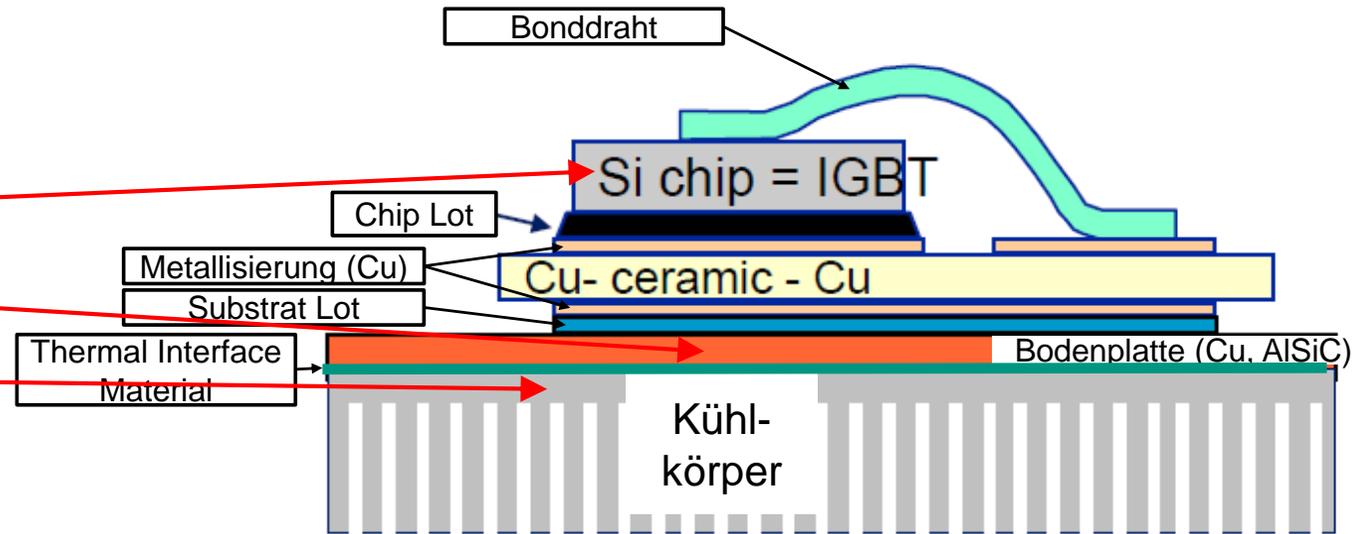
- Typische Werte:

Material	λ in W/(m·K)	c_{th} in (W·s)/(K·kg)
Kupfer	380	382
Aluminium	< 235	896
Wasser		4200
Al ₂ O ₃ (Keramik)	~ 28	< 1050
AlN (Keramik)	< 220	738

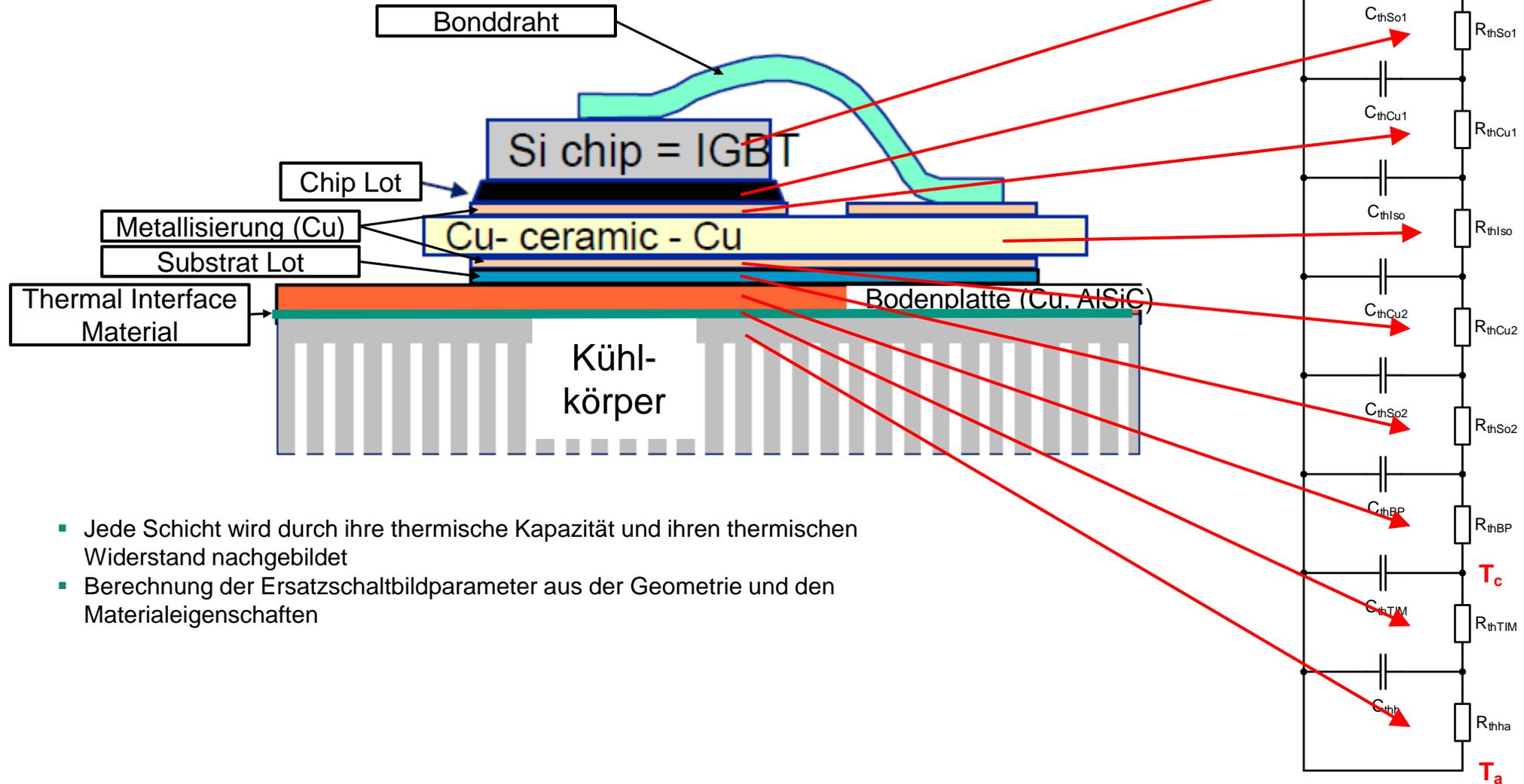
2. Entwärmung – Thermisches Ersatzschaltbild

Indizes

	Engl.	Dt.
j	junction	Sperrschicht (Chip)
c	case	Gehäuse, Bodenplatte
h	heatsink	Kühlkörper
a	ambient	Umgebung (Kühlmedium: Luft, Wasser, Öl)



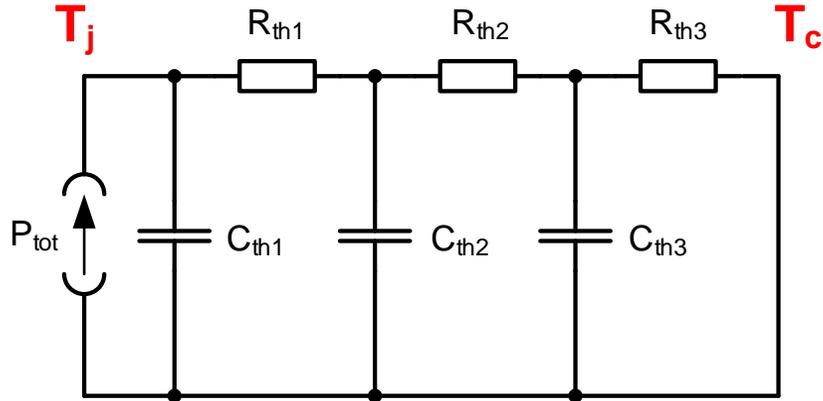
2. Entwärmung – Thermisches Ersatzschaltbild



- Jede Schicht wird durch ihre thermische Kapazität und ihren thermischen Widerstand nachgebildet
- Berechnung der Ersatzschaltbildparameter aus der Geometrie und den Materialeigenschaften

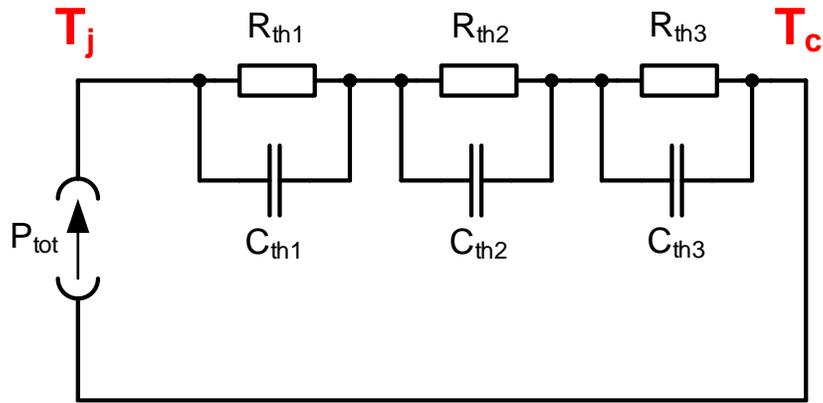
2. Entwärmung – Thermisches Ersatzschaltbild

Kettenbruchdarstellung (physikalisches Modell, Cauer Modell)



- Spiegelt den realen, physikalischen Aufbau des Halbleiters mit den Wärmekapazitäten und dazwischengeschalteten Wärmewiderständen wieder.
- Lässt sich aus dem Aufbau und den Materialeigenschaften aufstellen.
- Problematisch: Thermische Spreizung (ggf. 3D-Simulation)
- Die einzelnen RC-Glieder sind den einzelnen Schichten (Chip, Chip-Lot, Substrat, Bodenplatte) zuzuordnen.
- RC-Glieder sind nicht vertauschbar.
- Einzelne Knoten repräsentieren die inneren Temperaturen der Schichtenfolge.
- Netzwerk kann nicht analytisch berechnet werden

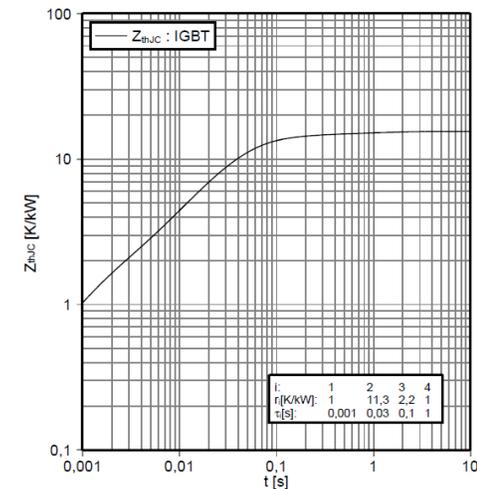
Partialbruchdarstellung (mathematisches Modell, Foster Modell)



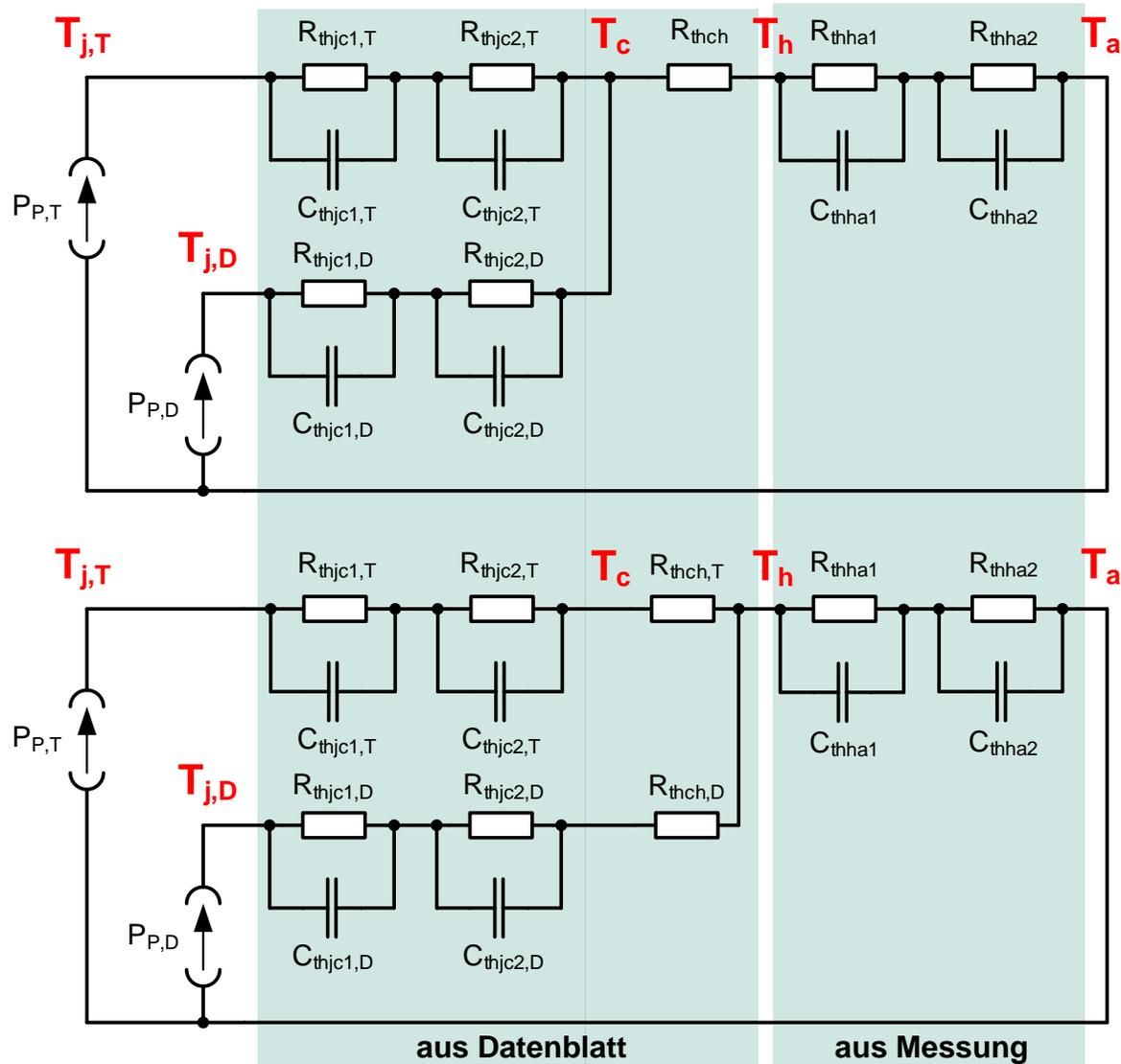
$$Z_{thjc}(t) = \sum_{n=1}^3 R_{thn}(t) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}})$$

- Die einzelnen RC-Glieder repräsentieren nicht mehr die Schichtenfolge.
- Einzelne Knoten haben keine physikalische Bedeutung.
- Koeffizienten lassen sich
 - aus Abkühlkurven durch „curve matching“ oder
 - Durch mathematische Umrechnung aus Cauer Modell bestimmen.
- Angabe der r, τ -Paare in den Datenblättern
- RC-Glieder sind vertauschbar.
- Netzwerk kann analytisch berechnet werden

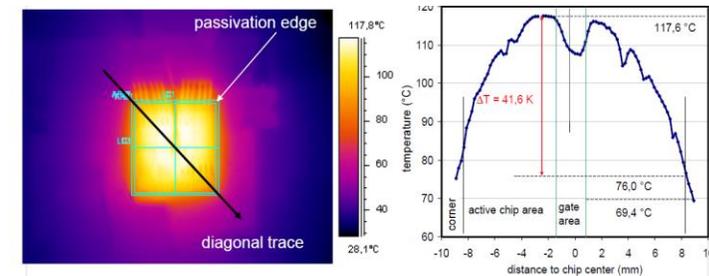
Transienter Wärmewiderstand IGBT, Wechselrichter
transient thermal impedance IGBT, Inverter
 $Z_{thjc} = f(t)$



2. Entwärmung – Thermisches Ersatzschaltbild



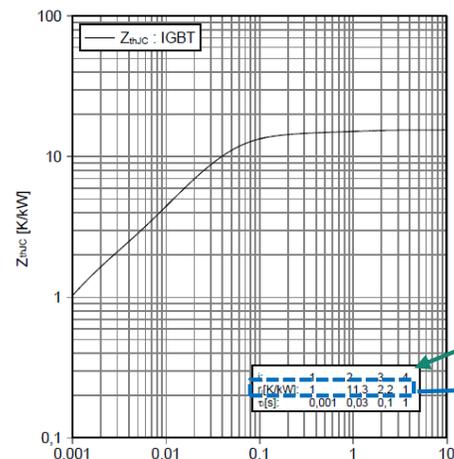
- Die Kopplung von Foster Netzwerken ist eine Näherung.
 - Problem: korrekte Modellierung der Kopplung und gegenseitigen Beeinflussung zwischen den Wärmequellen
 - Nicht möglich: Mischung von Foster und Cauer Netzwerken
-
- Datenblätter geben meist 3-5 R_{th}, C_{th} -Paare für die Strecke Junction–Case an. Die Daten entsprechen i.d.R. den „End of life“-Werten, d.h. eine gewisse Alterung ist bereits mit berücksichtigt.
 - Die Messung der Junction-Temperatur ist aufwändig und erfolgt entweder direkt (z.B. mit Thermokamera am offenen Modul, s.u.) oder indirekt (z.B. durch Messung des temperaturabhängigen Spannungsabfalls)



Quelle: Semikron

2. Entwärmung – Thermisches Ersatzschaltbild - Datenblattangaben

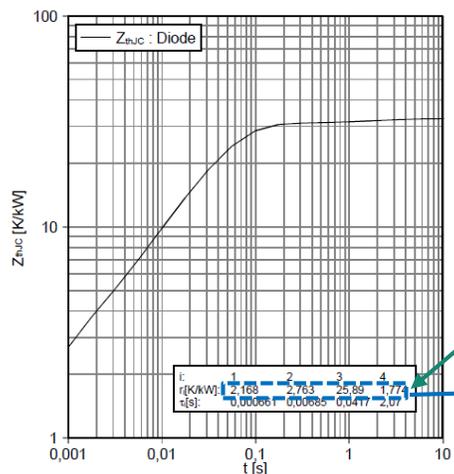
Transienter Wärmewiderstand IGBT, Wechselrichter
transient thermal impedance IGBT, inverter
 $Z_{thJC} = f(t)$



Z_{th} für Einzelimpulse der Länge t

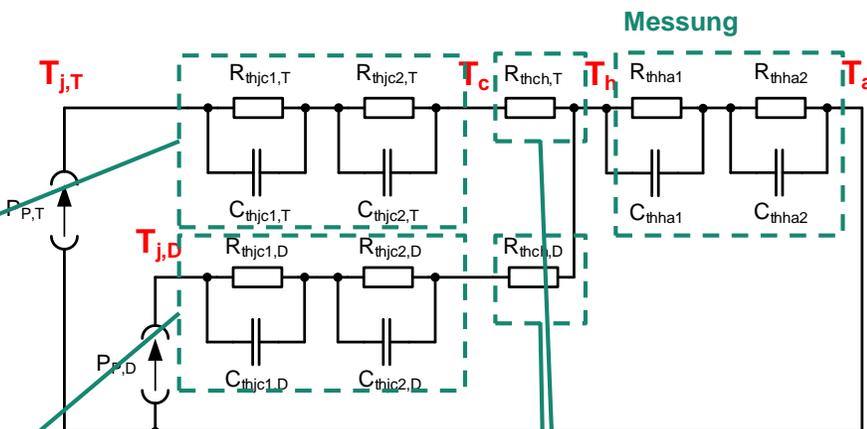
Wärmewiderstand, Chip bis Gehäuse Thermal resistance, junction to case	pro IGBT / per IGBT	R_{thJC}	15,5	K/kW	Stationärer Wert
Wärmewiderstand, Gehäuse bis Kühlkörper Thermal resistance, case to heatsink	pro IGBT / per IGBT $\lambda_{Paste} = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} / \lambda_{grease} = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	R_{thCH}	11,5	K/kW	

Transienter Wärmewiderstand Diode, Wechselrichter
transient thermal impedance Diode, Inverter
 $Z_{thJC} = f(t)$



Z_{th} für Einzelimpulse der Länge t

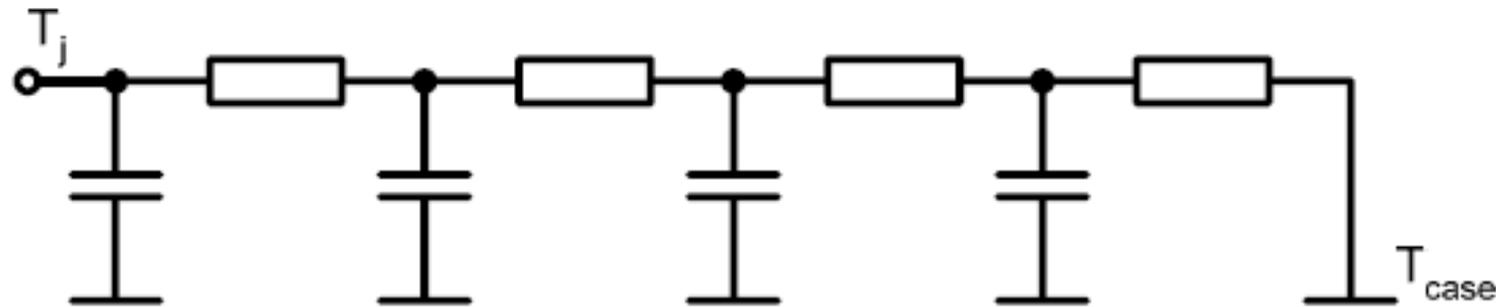
Wärmewiderstand, Chip bis Gehäuse Thermal resistance, junction to case	pro Diode / per diode	R_{thJC}	32,5	K/kW	Stationärer Wert
Wärmewiderstand, Gehäuse bis Kühlkörper Thermal resistance, case to heatsink	pro Diode / per diode $\lambda_{Paste} = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} / \lambda_{grease} = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	R_{thCH}	11,5	K/kW	



2. Entwärmung – Thermisches Ersatzschaltbild

Kettenbruchdarstellung (*Cauer Modell*)

- Spiegelt den realen, physikalischen Aufbau des Halbleiters mit den Wärmekapazitäten und dazwischengeschalteten Wärmewiderständen wieder.
- Lässt sich aus dem Aufbau und den Materialeigenschaften aufstellen.
- Problematisch: Thermische Spreizung (ggf. 3D-Simulation)
- Die einzelnen RC-Glieder sind den einzelnen Schichten (Chip, Chip-Lot, Substrat, Bodenplatte) zuzuordnen.
- Einzelne Knoten repräsentieren die inneren Temperaturen der Schichtenfolge.

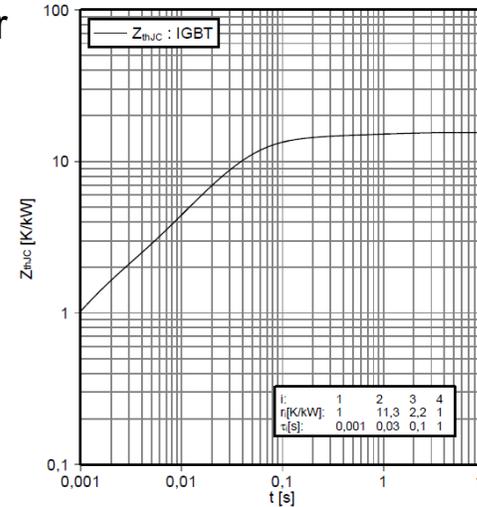


2. Entwärmung – Thermisches Ersatzschaltbild eines Moduls

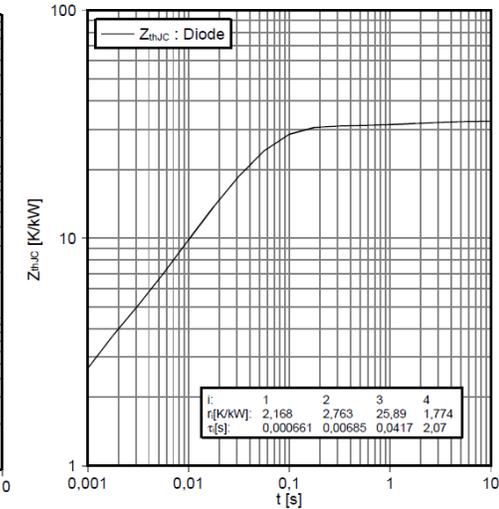
Partialbruchdarstellung (*Foster Modell*)

- Die einzelnen RC-Glieder repräsentieren nicht mehr die Schichtenfolge.
- Einzelne Knoten haben keine physikalische Bedeutung.
- Koeffizienten lassen sich aus Abkühlkurven durch „curve matching“ bestimmen.
- Angabe der r, τ -Paare in den Datenblättern

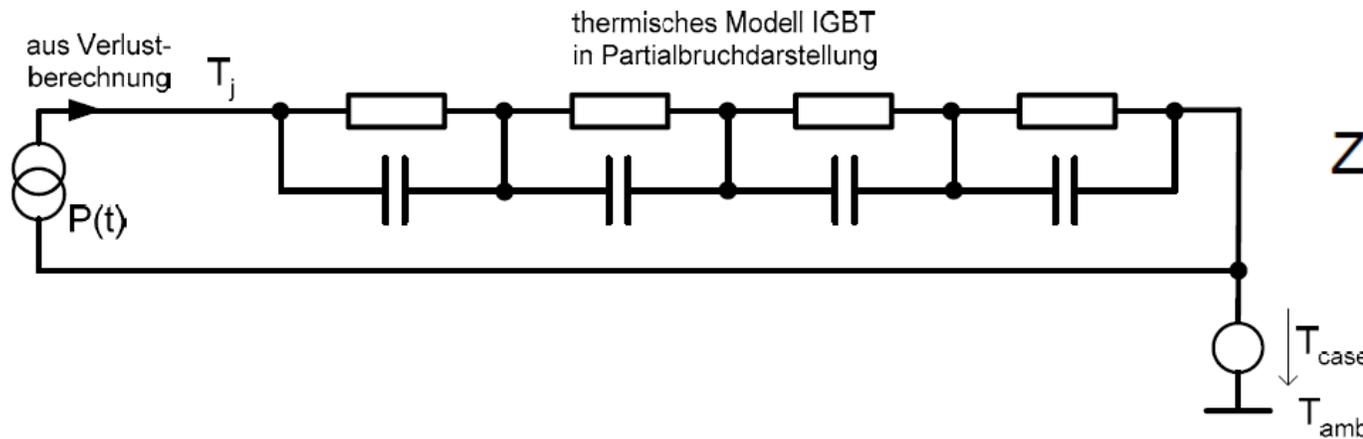
Transienter Wärmewiderstand IGBT, Wechselrichter
transient thermal impedance IGBT, inverter
 $Z_{thjc} = f(t)$



Transienter Wärmewiderstand Diode, Wechselrichter
transient thermal impedance Diode, inverter
 $Z_{thjc} = f(t)$



$$T_j(t) = P(t) * Z_{thjc}(t) + T_{case}(t)$$

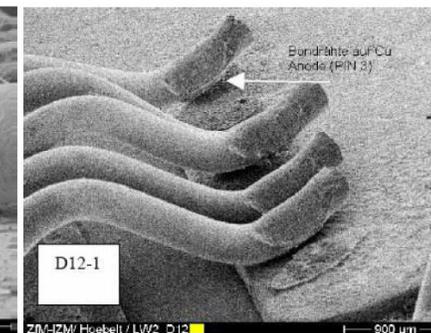
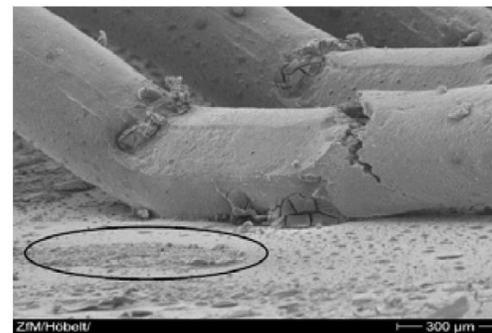
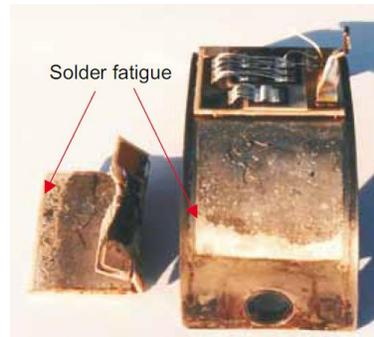
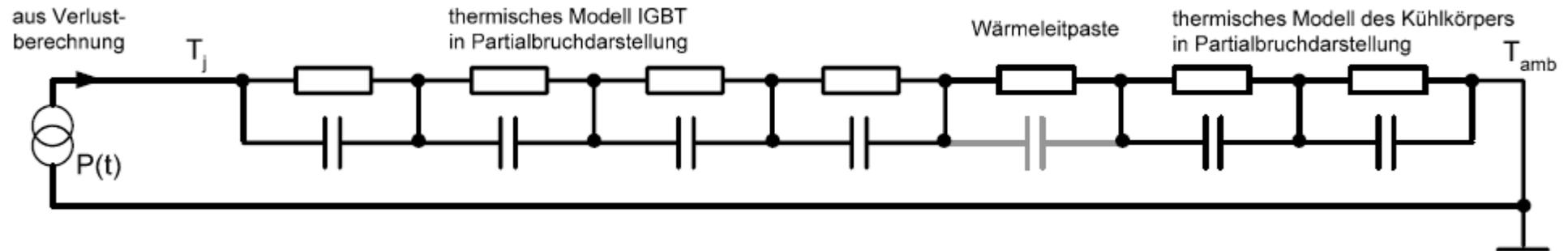


$$Z_{thjc}(t) = \sum_{i=1}^n r_i \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}})$$

2. Entwärmung – Therm. Ersatzschaltbild eines Modul + Kühlkörper

Partialbruchdarstellung (*Foster Modell*)

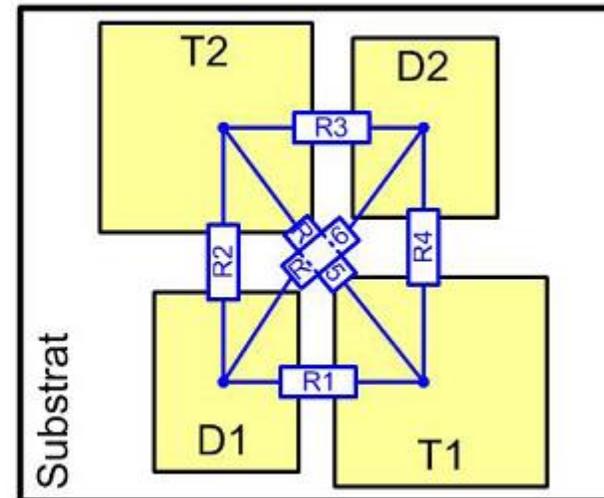
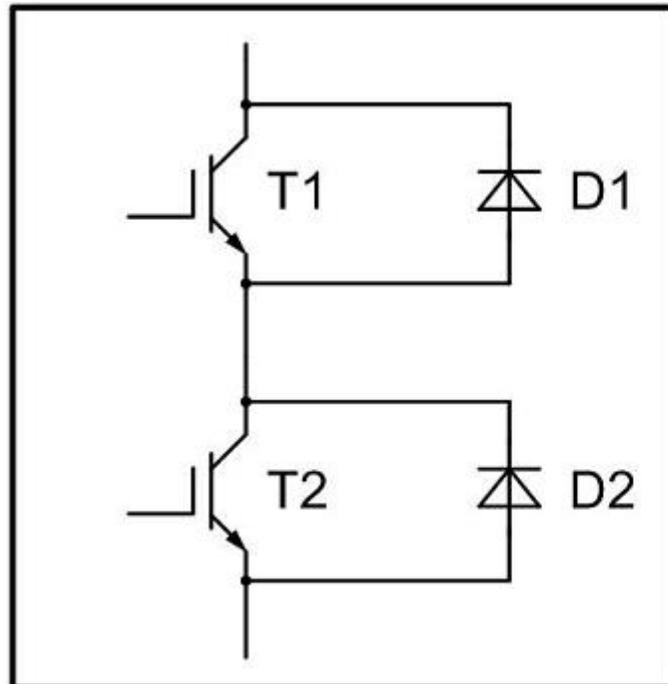
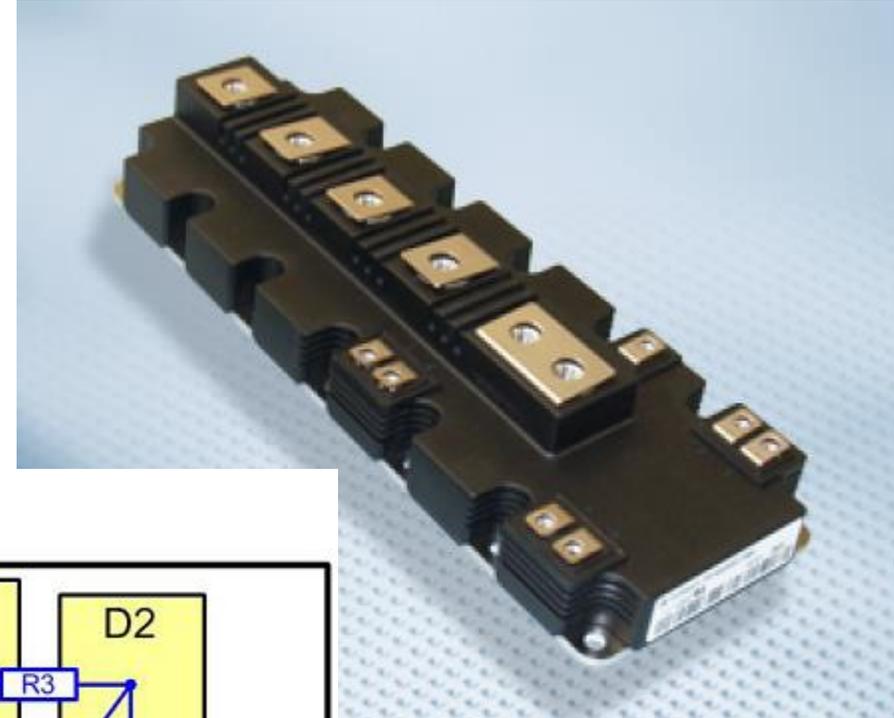
- T_{case} = konstant gilt in der Praxis vor allem bei „schnellen“, d.h. kapazitätsarmen Wasserkühlkörpern nicht
- Kühlkörper muss mit modelliert werden
- In der Praxis: **Messung des anwendungsspezifischen Kühlkörpermodells** und Verwendung des **Modulmodells aus dem Datenblatt** mit den worst case, d.h. „end-of-life“-Angaben (inkl. Delamination des Lots und dadurch z.B. 20% höhere R_{th} -Werte)



2. Entwärmung – Therm. Ersatzschaltbild eines Modul + Kühlkörper

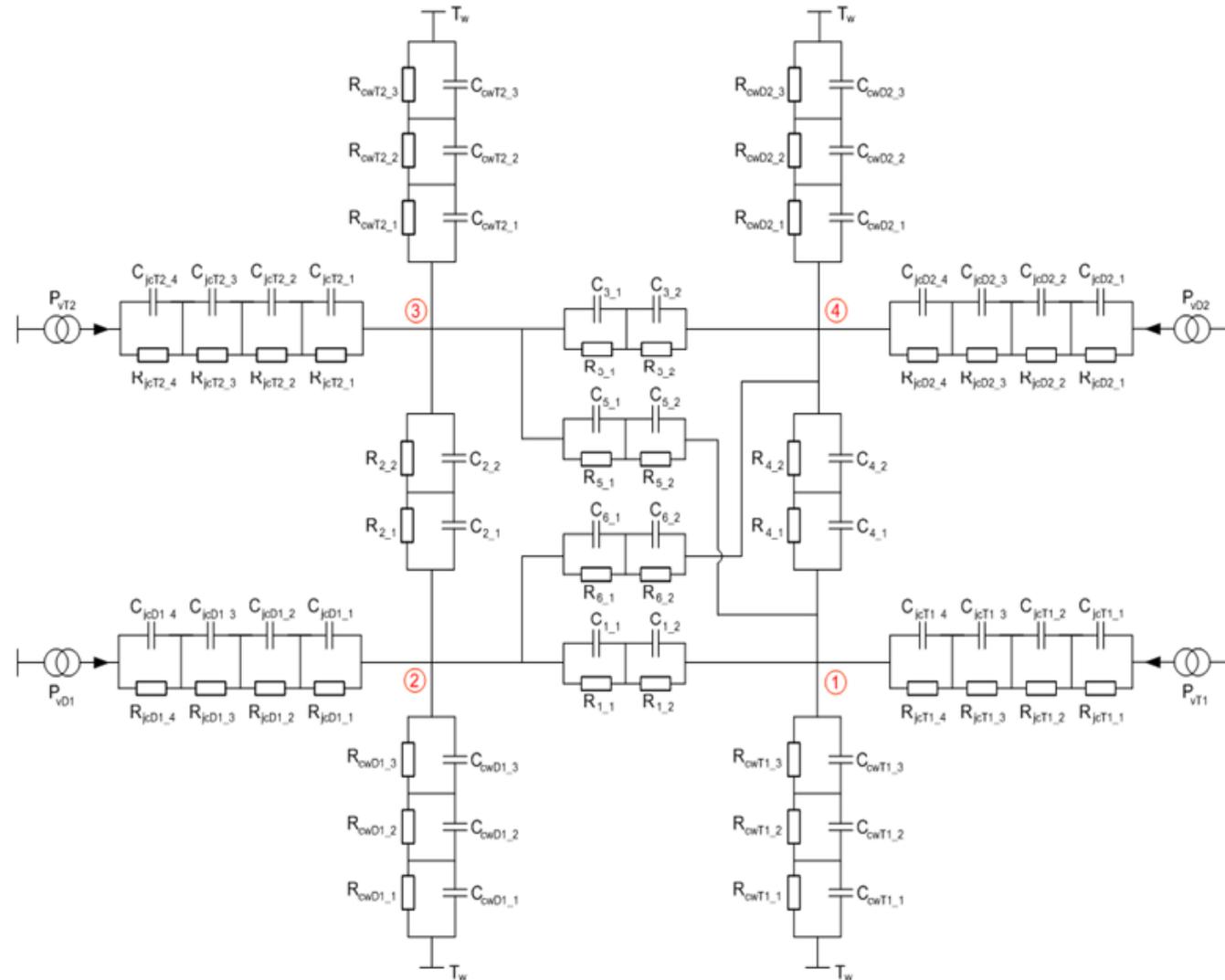
Beispiel: FF1400R17IP4

- Halbbrückenmodul
- $V_{CEmax}=1700V$
- $I_{Cmax}=2 \times 1400A=2800A$
- P: rel. hohe Schaltverluste, rel. niedrige Durchlassspannung
- 4: 4. Chipgeneration



2. Entwärmung – Therm. Ersatzschaltbild eines Modul + Kühlkörper

Beispiel: FF1400R17IP4

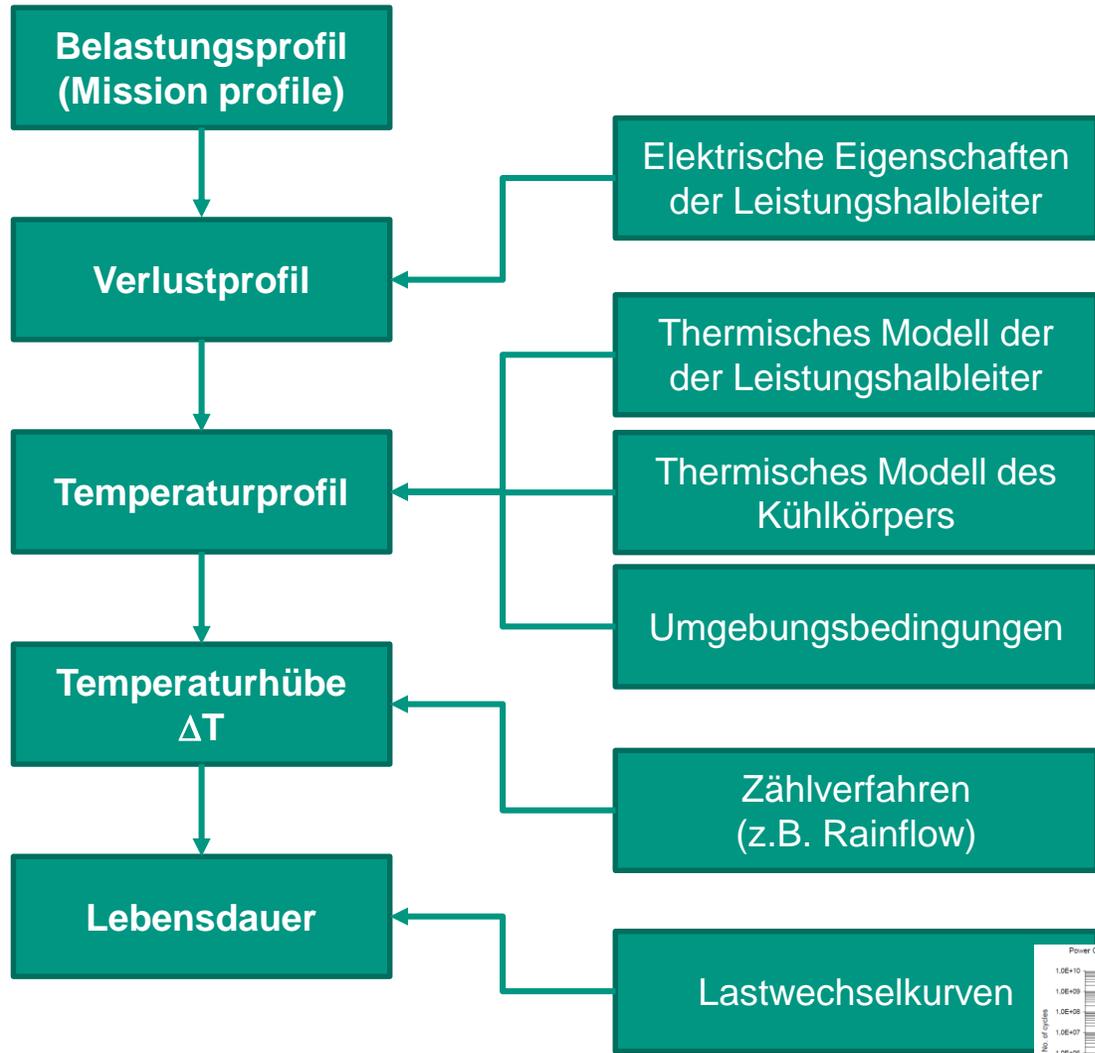


Gliederung

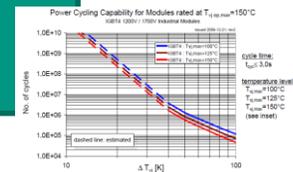
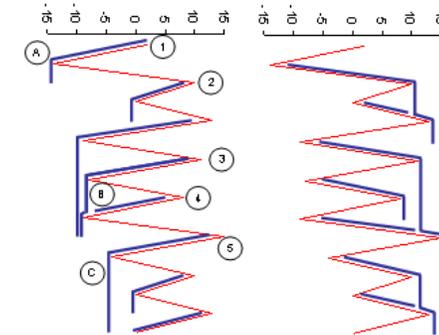
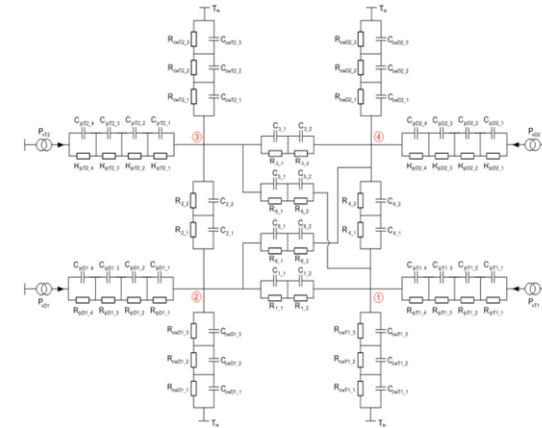
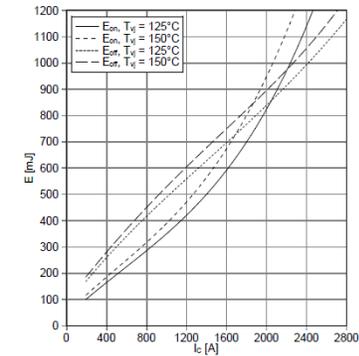
Halbleiterauslegung

1. Verlustberechnung
2. Entwärmung
3. Lastwechselauslegung
4. Zusammenfassung

3. Lastwechsellaslegung

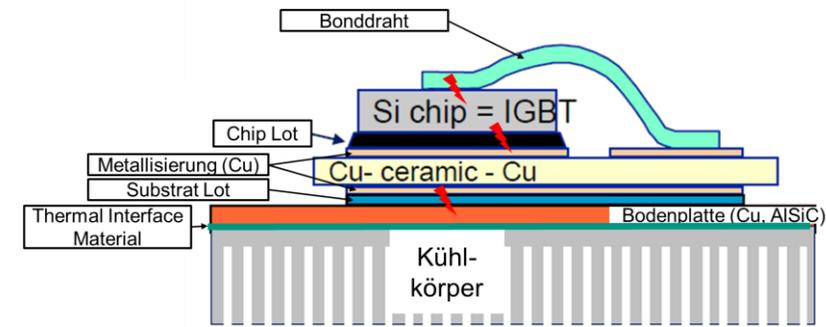


Schaltverluste IGBT-Wechselrichter (typisch)
switching losses IGBT inverter (typical)
 $E_{on} = f(I_c)$, $E_{off} = f(I_c)$
 $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_{Qon} = 0.47\ \Omega$, $R_{Qoff} = 0.68\ \Omega$, $V_{CE} = 900\text{ V}$

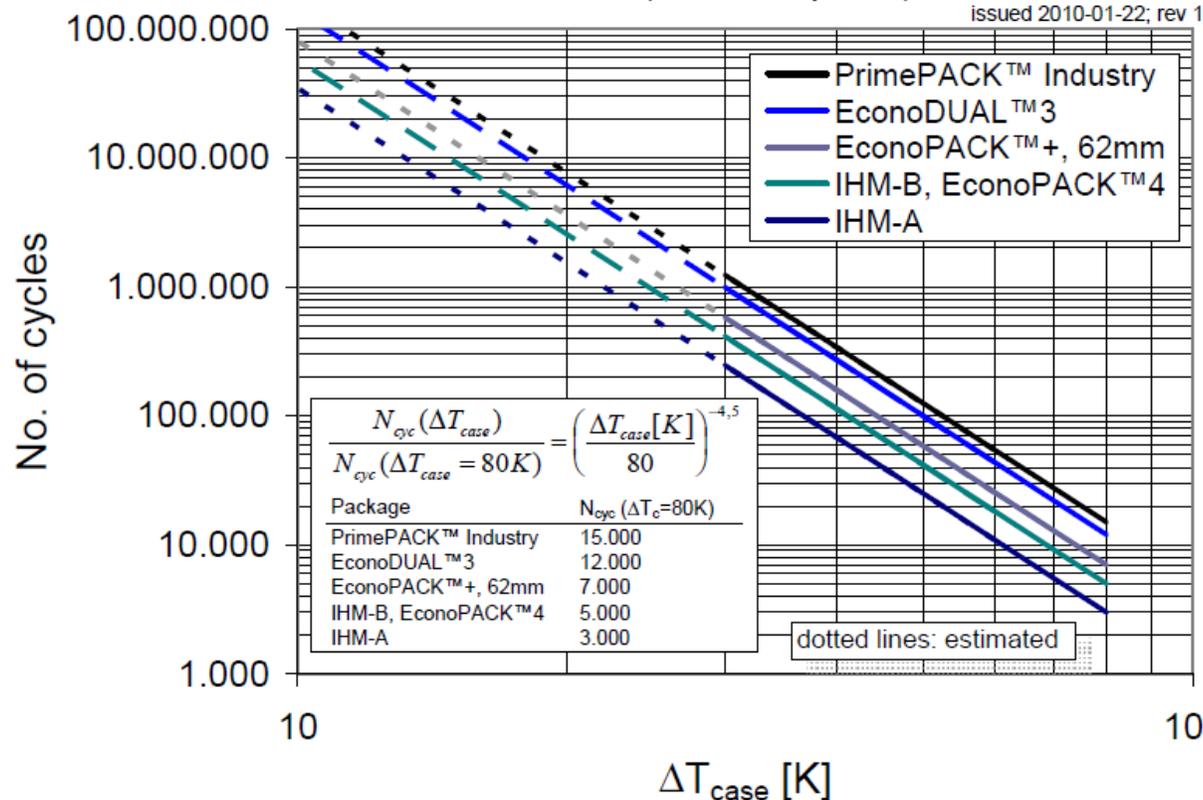


3. Lastwechselauslegung – Thermal Cycling

- Beschreibt die Lastwechselfestigkeit der Substratlötung



Thermal Cycling (TC) Capability for Industrial Modules (Cu baseplate)



cycle time:

$t_{on} + t_{off}$ typ. 5min

temperature level:

$T_{case,min} = 25^\circ C$

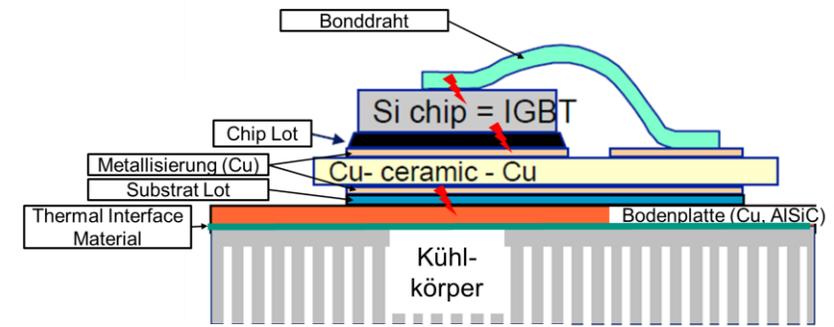
load conditions:

T-rise by internal active heating
T-fall by external cooling

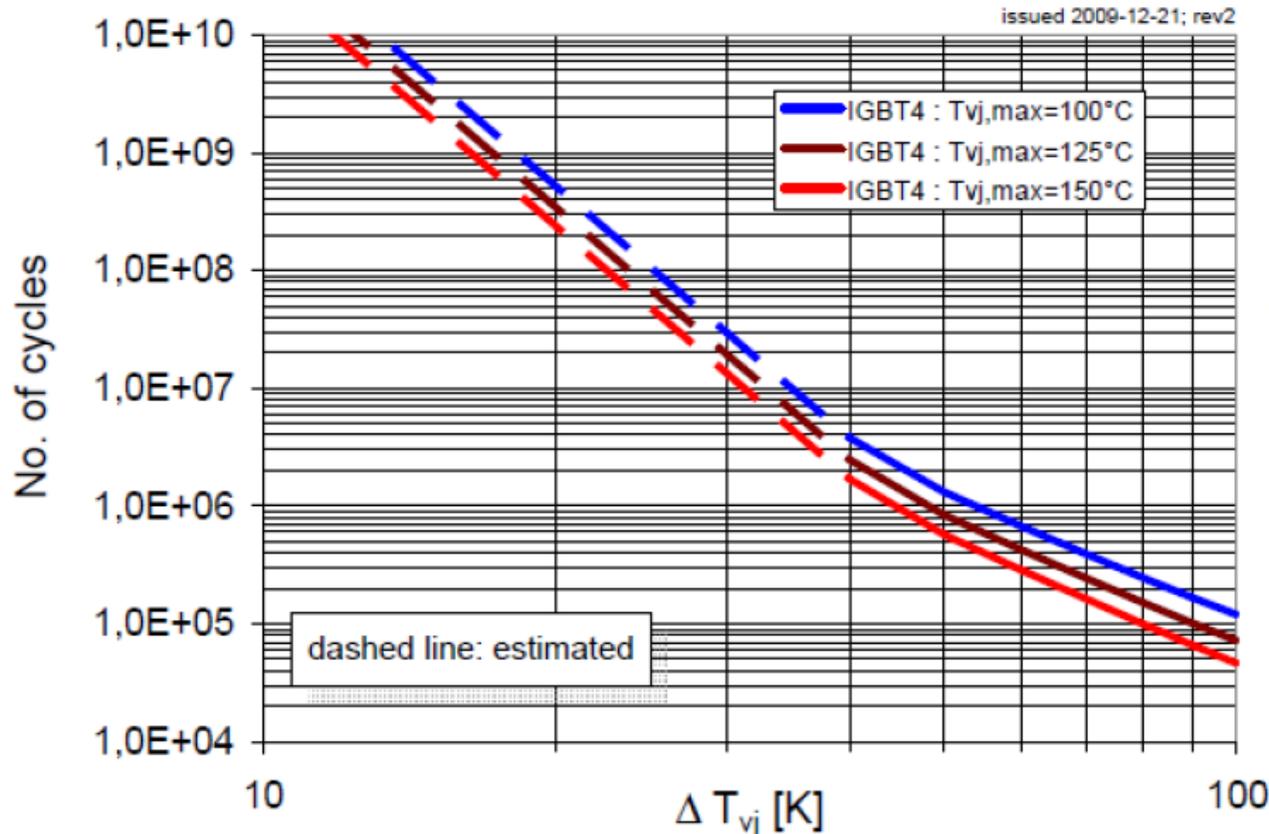
For an overall lifetime estimation the respective dependency $N=f(\Delta T_{vj})$ has also to be taken into account ("Power cycling curve"). By means of the TC-curve the ruggedness of the substrate to baseplate connection is specified

3. Lastwechselauslegung – Power Cycling

- Beschreibt die Lastwechselfestigkeit der Chip- und Bondlötung



Power Cycling Capability for Modules rated at $T_{vj,op,max}=150^{\circ}\text{C}$
IGBT4 1200V / 1700V Industrial Modules



cycle time:

$$t_{cyc} \leq 3,0s$$

temperature level:

$$T_{vj,max} = 100^{\circ}\text{C}$$

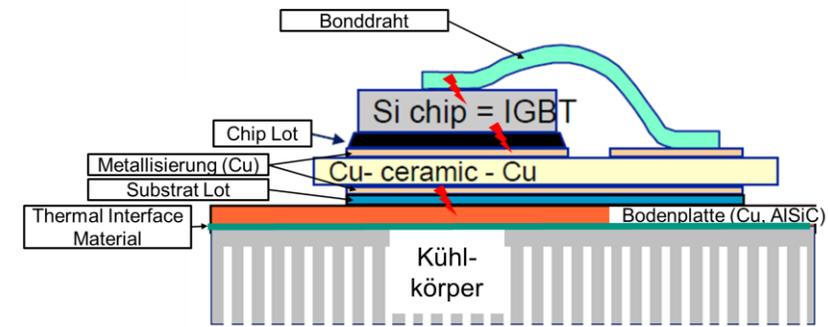
$$T_{vj,max} = 125^{\circ}\text{C}$$

$$T_{vj,max} = 150^{\circ}\text{C}$$

(see inset)

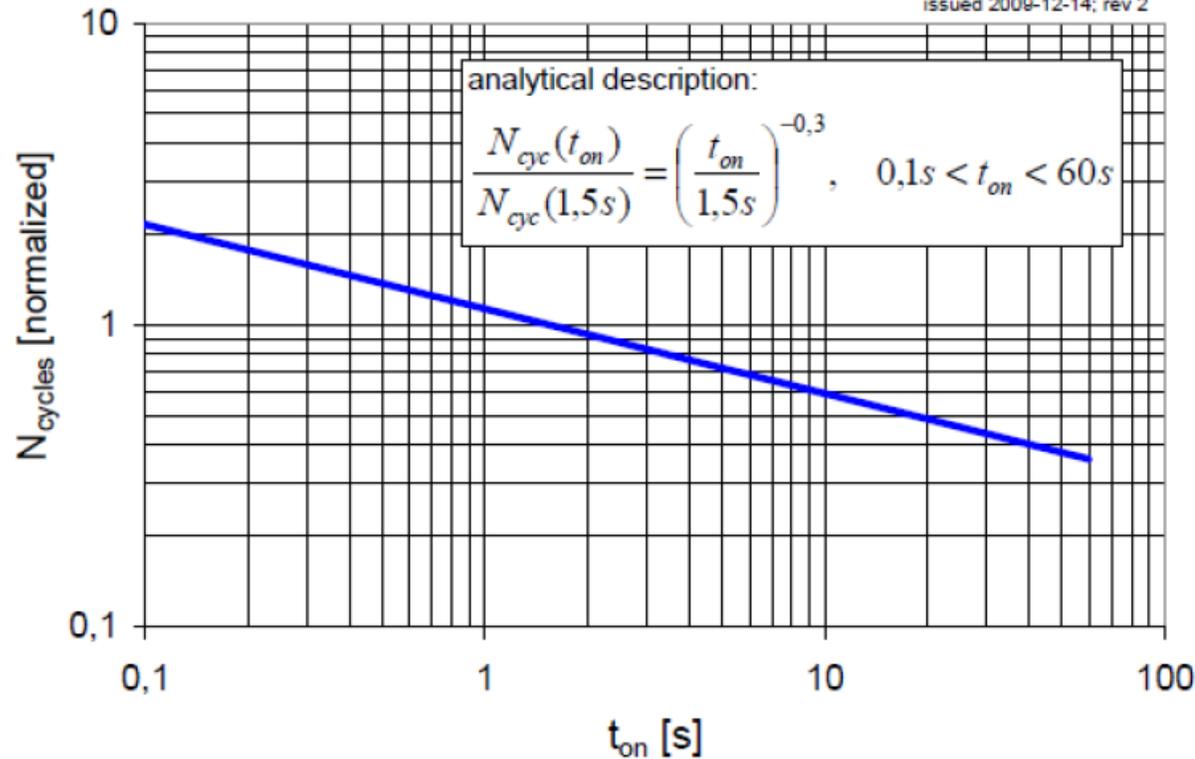
3. Lastwechselauslegung – Power Cycling

- Beschreibt die Lastwechselfestigkeit der Chip- und Bondlötung
- Auch die rel. Einschaltdauer muss berücksichtigt werden



Power Cycling Capability : typ. dependance on t_{on}
 IGBT4 Industrial Modules rated at $T_{vj,opmax}=150^{\circ}C$

issued 2009-12-14; rev 2

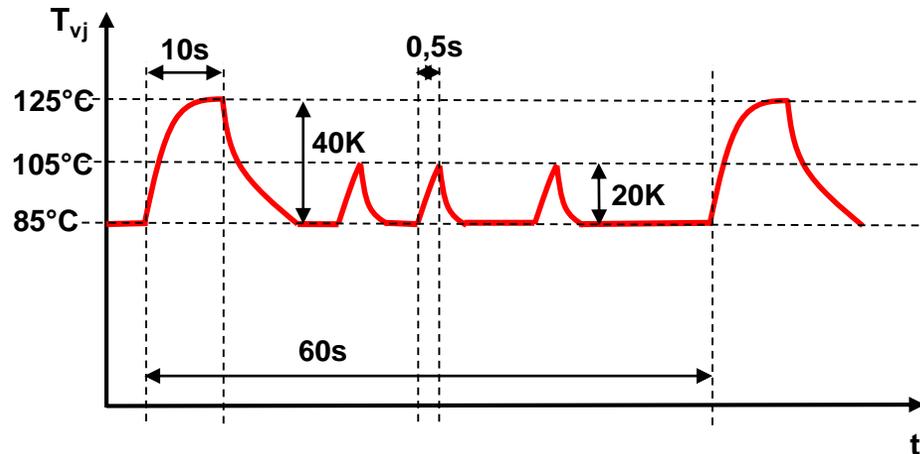
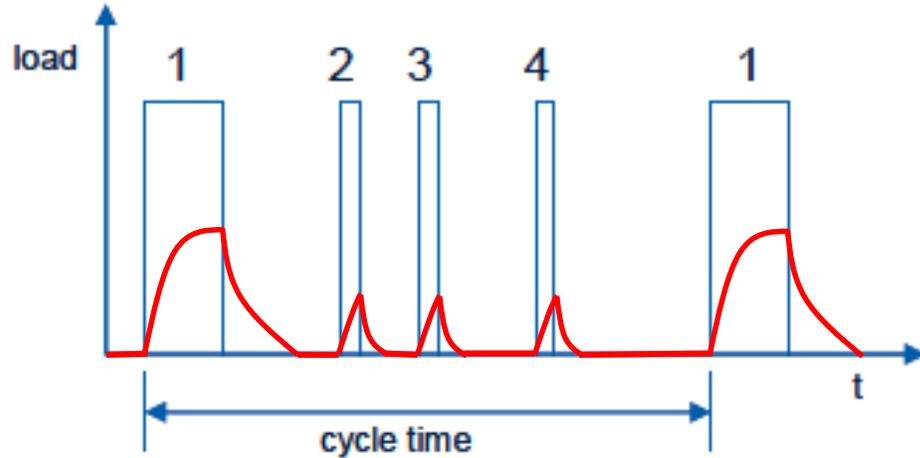


disclaimer:

$N_{cyc}=f(t_{on})$ -
 behaviour is only
 applicable if other
 impact parameters
 ($I, T_{vjmax}, \Delta T_{vj}$) are
 kept constant

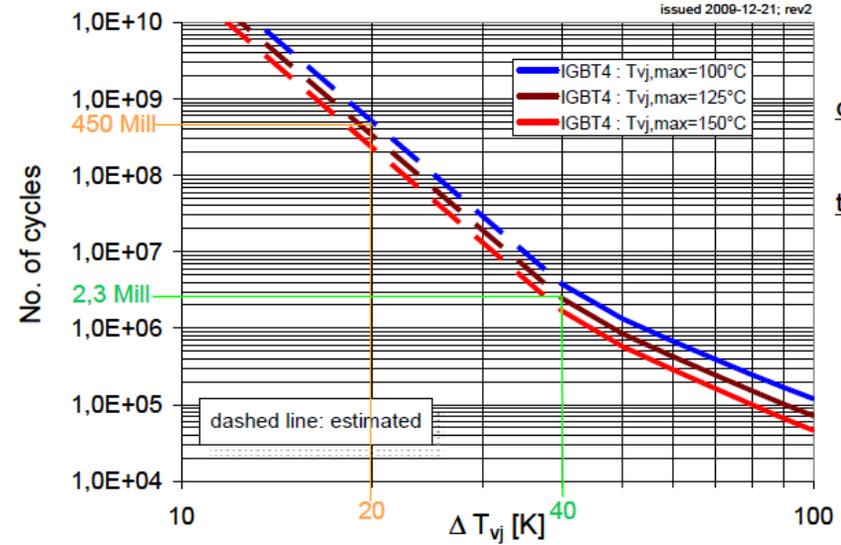
3. Lastwechselauslegung – Beispiel

- Lastzyklus eines Antriebs mit einer Periodendauer von 60s:



Power Cycling Capability for Modules rated at $T_{vj,op,max}=150^{\circ}C$

IGBT4 1200V / 1700V Industrial Modules



cycle time:
 t_{cyc} typ. 3s

$t_{on} = 1,5s$

temperature level:

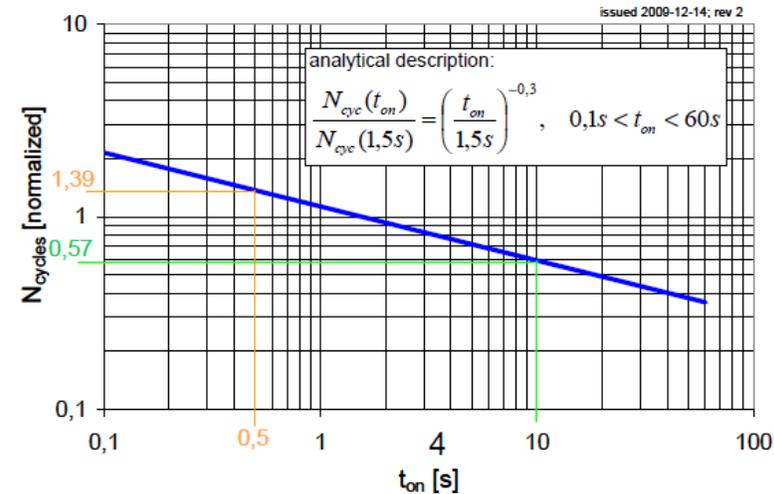
$T_{vj,max} = 100^{\circ}C$

$T_{vj,max} = 125^{\circ}C$

$T_{vj,max} = 150^{\circ}C$

(see inset)

Power Cycling Capability : typ. dependance on t_{on}
IGBT4 Industrial Modules rated at $T_{vj,op,max}=150^{\circ}C$



disclaimer:

$N_{cyc} = f(t_{on})$ -
behaviour is only
applicable if other
impact parameters
(I , $T_{vj,max}$, ΔT_{vj}) are
kept constant

3. Lastwechselauslegung – Beispiel

- Jeder Temperaturhub verbraucht Lebensdauer.
- Anzahl der Gesamtzyklen (jeweils bestehend aus vier Einzelzyklen)

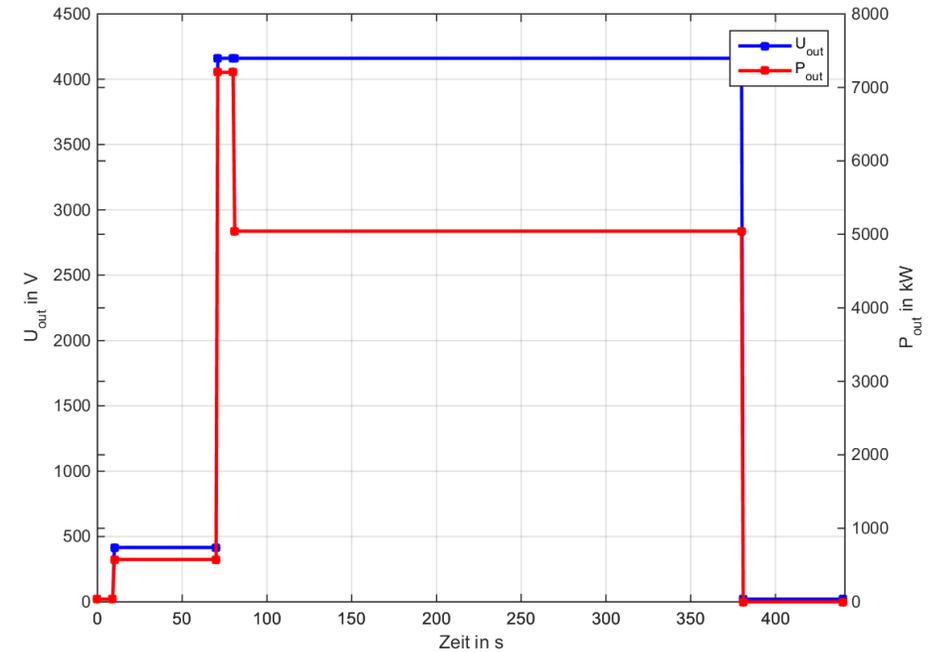
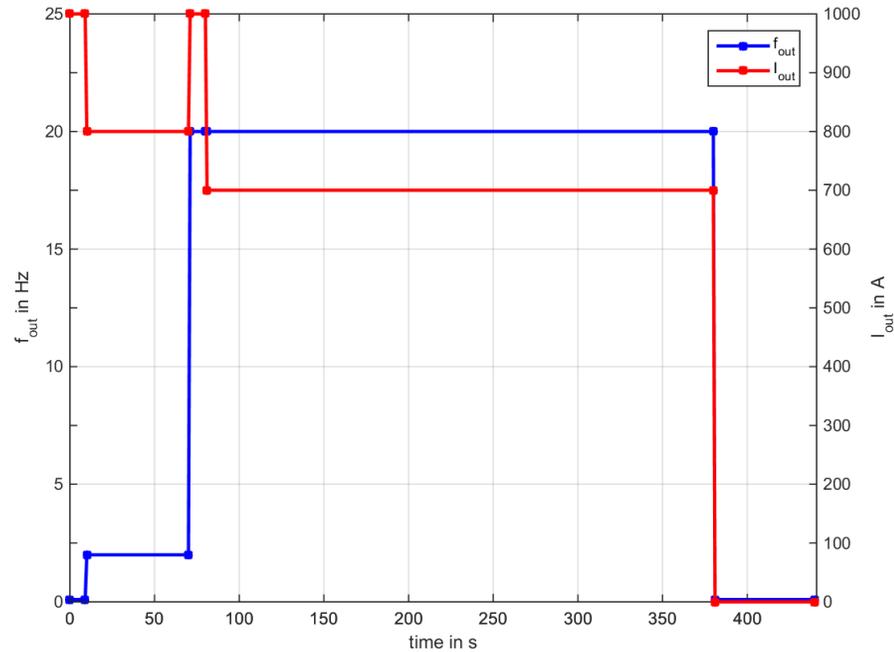
$$N_{cycle} = \frac{1}{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} + \frac{1}{N_3} + \frac{1}{N_4}}$$

$$N_{cycle} = \frac{10^6}{\frac{1}{1,3} + \frac{1}{626} + \frac{1}{626} + \frac{1}{626}} = 1,292 \cdot 10^6 \text{ Zyklen}$$

load	Δt_{vj} [K]	$t_{vj \text{ max}}$ [°C]	cycles at $t_{on}=1,5s$	$t_{on}[s]$	correlation factor	cycles at t_{on}	no of loads per cycle	estimated total allowed load cycle numbers	used life time	total cycle time [s]	estimated total lifetime [operation h]
1	40	125	2,30E+06	10	0,57	1,30E+06	1		99,38%		
2 to 4	20	105	4,50E+08	0,5	1,39	6,26E+08	3		0,62%		
								1,292E+06		60	2,156E+04

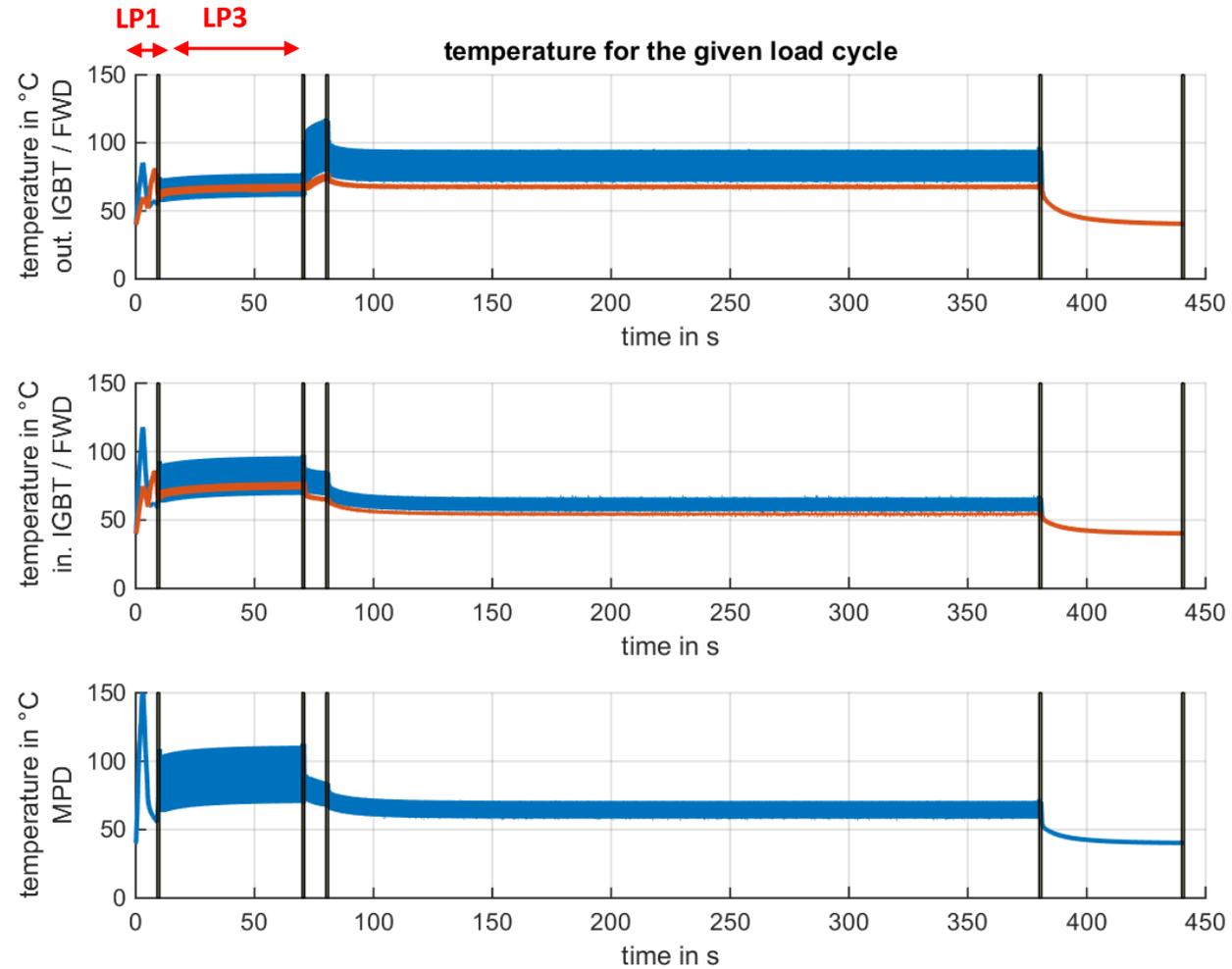
3. Lastwechselauslegung – Beispiel

- Lastzyklus eines Walzgerüsts mit einer Periodendauer von 440s:



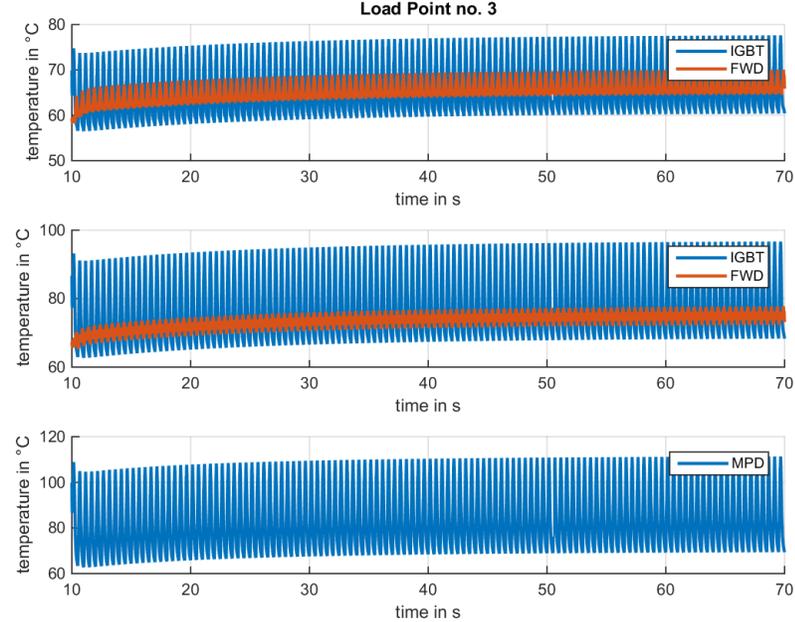
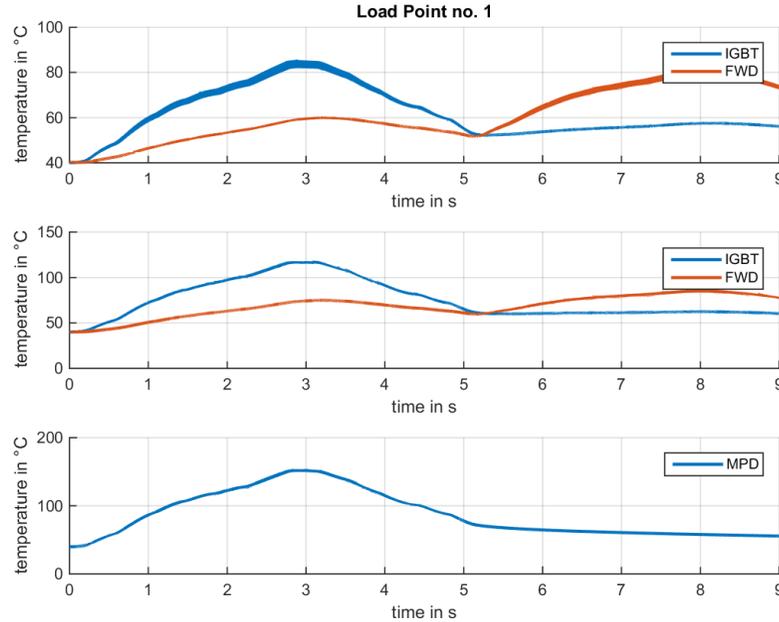
3. Lastwechselauslegung – Beispiel

- Lastzyklus eines Walzgerüsts mit einer Periodendauer von 440s:



3. Lastwechselauslegung – Beispiel

- Lastzyklus eines Walzgerüsts mit einer Periodendauer von 440s:



	ouIGBT	ouFWD	inIGBT	inFWD	MPD
Tmax :	[85.5	81.5	118	86.4	153.6
Tmean:	[61.8	60.5	75.3	68.2	87.2
Tmin :	[40	40	40	40	40]

kritisch

Große Temperaturhübe bei MPD mit ca. 40K

4. Zusammenfassung

