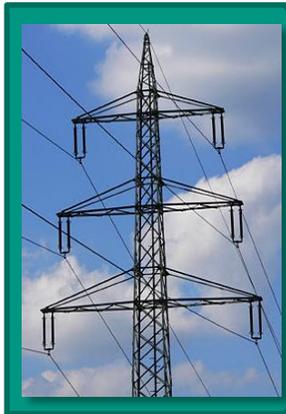


# Vorlesung Praxis Leistungselektronischer Systeme

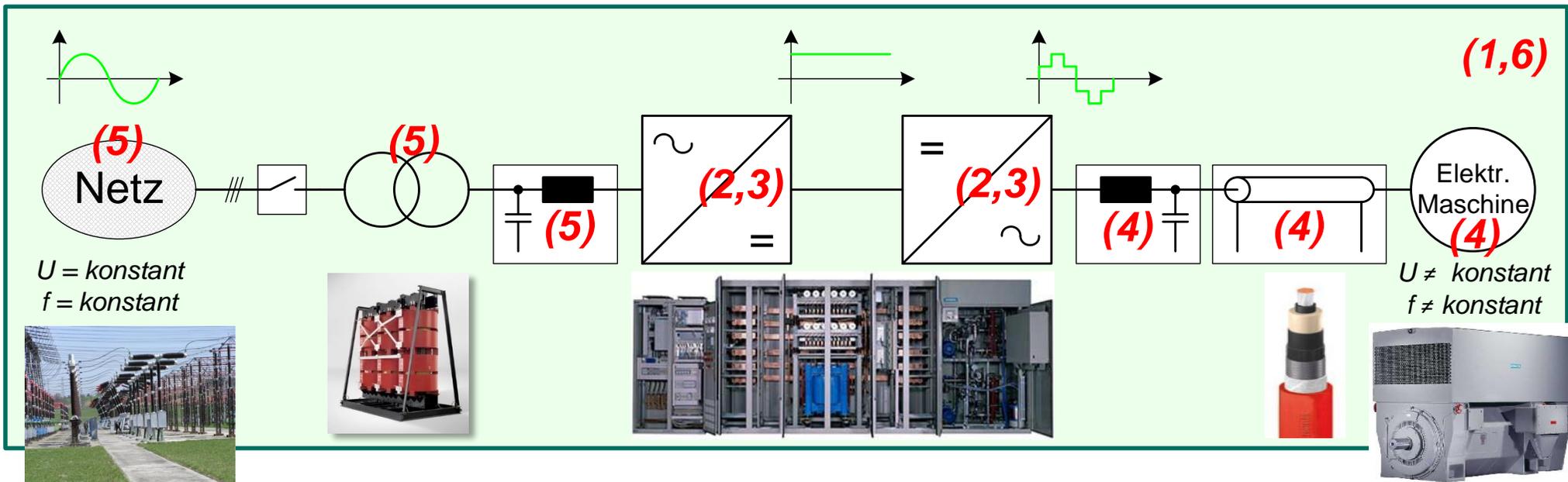
**WS2017/18**

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

## Systembetrachtungen

1. Übersicht
2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen
3. Zusammenfassung

# Gliederung

## Systembetrachtungen

1. Übersicht
2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen
  1. Motivation
  2. Begriffe
  3. Einschränkungen
  4. Berechnung
3. Zusammenfassung

# 1. Übersicht

## Motivation

Die zunehmende Verbreitung leistungselektronischer Systeme wird von folgenden Trends getrieben:

- Einsatz regenerativer Energien, u.a.
    - Wind,
    - Photovoltaik.
  - Realisierung von Netzdienstleistungen durch leistungselektronische Stellglieder, u.a.
    - Hochspannungs-Gleichstromübertragung,
    - Bahnnetzkupplungen (1~ 16,7 Hz / 3~ 50 Hz)
  - Einsatz drehzahlveränderlicher, elektrischer Antriebe, u.a.
    - zur Erhöhung der Energieeffizienz,
    - für die Realisierung technisch und wirtschaftlich optimierter, industrieller Prozesse, z.B.
      - Antriebe von Kreuzfahrtschiffen
      - Ersatz von Dampfturbinen als Antrieb von Kompressoren, Verdichtern in der Prozessindustrie
- **Leistungselektronik wird oft noch als störend (d.h. zusätzlich) empfunden.**
- **Um die Akzeptanz und die Ausbreitung von leistungselektronischen Systemen zu ermöglichen, kommt der Zuverlässigkeit eine entscheidende Bedeutung zu.**

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

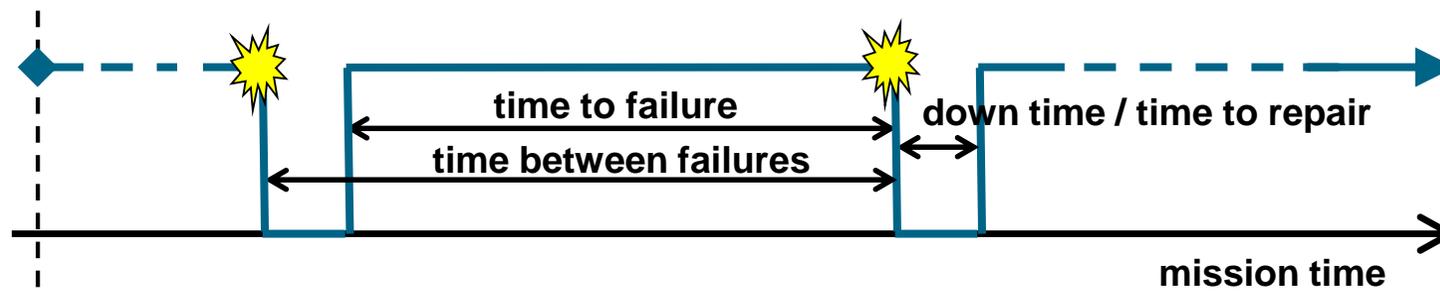
### Motivation

- Der unerwartete Ausfall eines Antriebs kann hohe Kosten verursachen, die über den reinen Materialwert weit hinausgehen können (z.B. Produktionsausfall in der Prozessindustrie).
- Für die Rentabilitätsbetrachtungen des Anlagenbetreibers ist es daher sehr wichtig, abschätzen zu können,
  - wie lange die Anlage bis zu einem Ausfall betrieben werden kann,
  - wie lange es dauert, die Anlage nach einem Ausfall wieder in Betrieb zu setzen,
  - mit welchen Kosten bei einem Ausfall für die Reparatur und den Produktionsausfall zu rechnen ist.
- Der Ausfall von Geräten ist ein stochastischer Prozess. Daher lassen sich immer nur Wahrscheinlichkeiten bzw. Erwartungswerte angeben.

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

### Begriffe

- **MTTF: Mean Time to Failure**
- **MTBF: Mean Time Between Failures** (enthält Reparaturzeiten)
- **MTTR: Mean Time to Repair**
- **Zuverlässigkeitsfunktion  $r(t)$** : Wahrscheinlichkeit, dass ein System zu einem bestimmten Zeitpunkt noch funktioniert
- **Redundanz**: mehr Teile als notwendig  $\Rightarrow$  Betrieb bei ausgefallenen Teilen möglich
- **Ausfallrate**: erwartete Anzahl der Ausfälle pro Zeit
- **FIT-Rate (Failure In Time)**: Einheit für die Ausfallrate: Ausfälle pro  $10^9$  h.  
(gewählt um Zahlen in einer handlicheren Größenordnung - ca. 0 bis 100000 - zu erhalten).



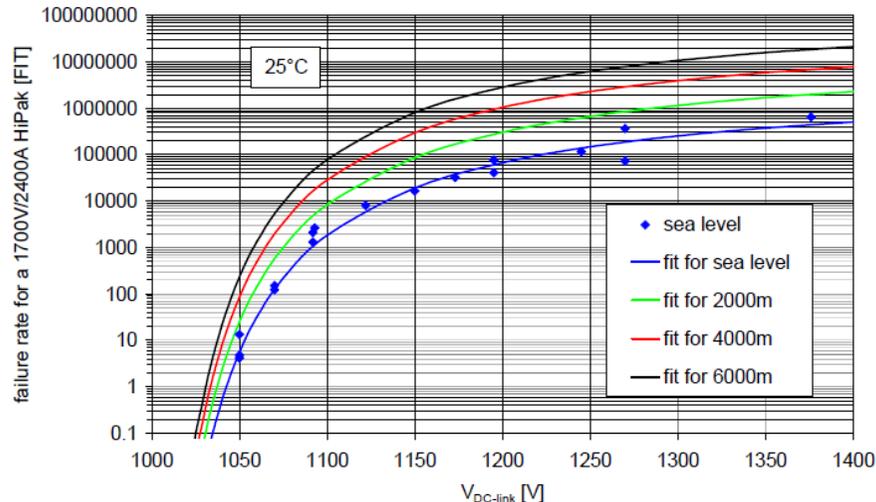
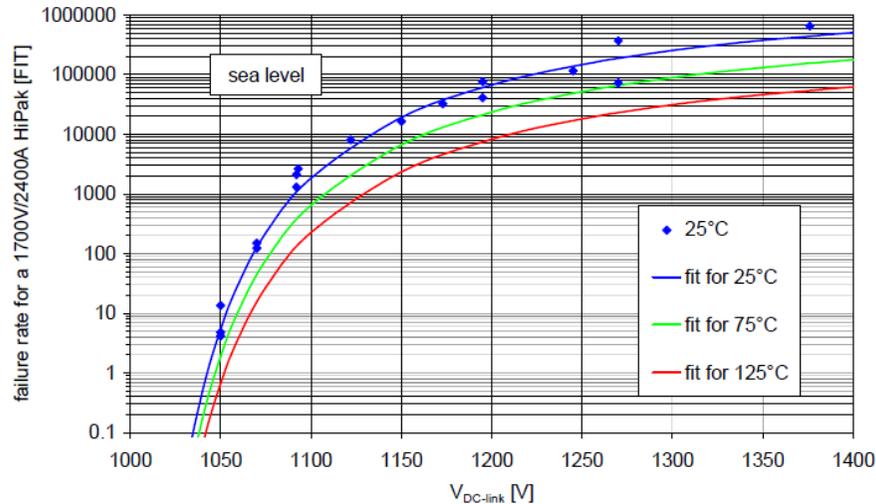
## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

### Bestimmung der Ausfallraten

- Idealfall: Auswertung von einer großen Anzahl Feldausfälle
  - Feldausfälle: Betrieb unter realen Betriebsbedingungen
  - Große Anzahl: stochastisch belastbare Aussagen
  - Oft nicht möglich, da
    - Stückzahl zu klein,
    - keine Informationen über Ausfälle (Ursache, Randbedingungen) vorhanden.
- Alternative: Beschleunigte Alterungsversuche (Accelerated Life Test)
  - Laborbetrieb unter härteren Bedingungen (Spannung, Strom, Temperatur usw.) als im Feld  
⇒ provoziert Ausfälle,
  - Benötigt Modell der Fehlerentstehung, um auf Normalbedingungen schließen zu können,
  - Hoher Testaufwand.

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

### Bestimmung der Ausfallraten: Beispiel 1700V / 2400A IGBT-Modul (ABB)



■ Ausfallrate von Halbleitern ist u.a. abhängig von:

- Chipfläche (1),
- DC-Spannung (1),
- Temperatur (2),
- Aufstellhöhe (3).

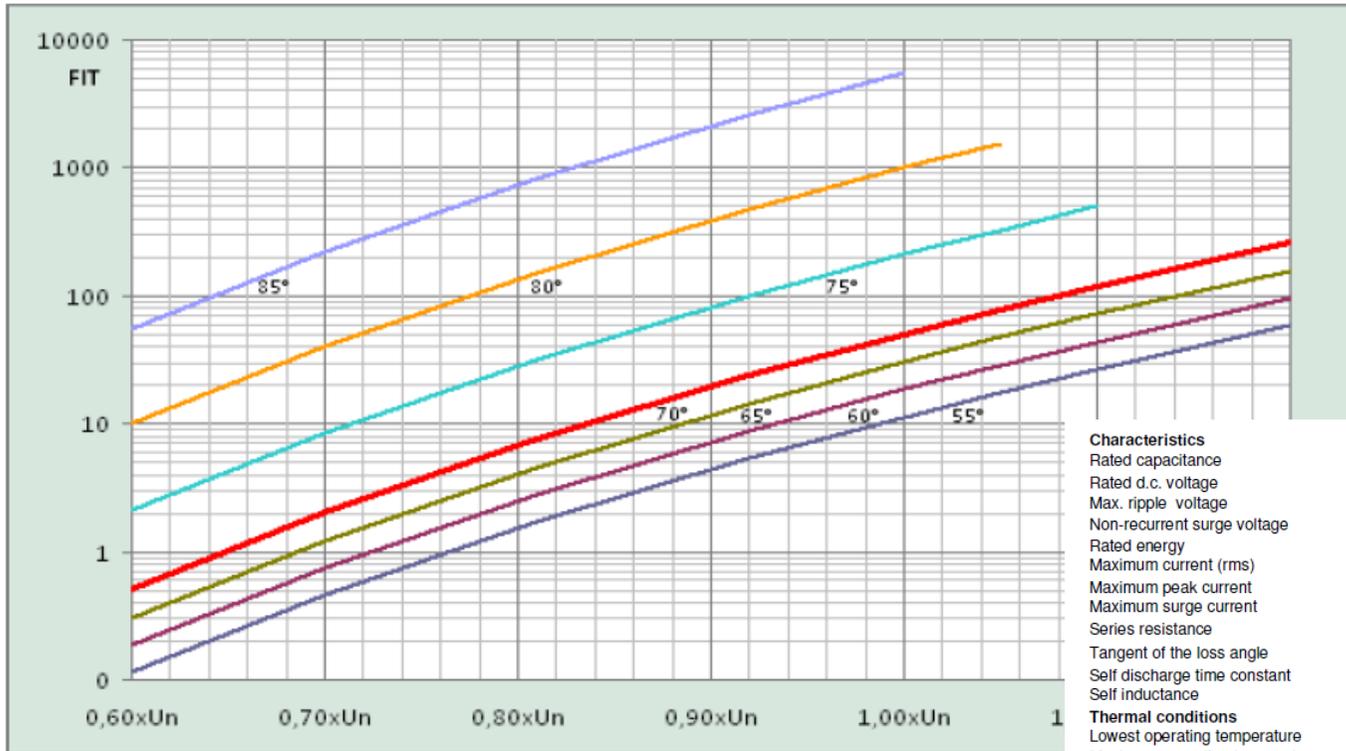
- ① the dependence on the DC-voltage ( $V_{DC}$  in volts,  $V_{DC} > C_1$ ) at nominal conditions, i.e. 25°C and sea level  
 ② the dependence on the temperature ( $T_{vj}$  in degrees Celsius), term equals unity if  $T_{vj}$  equals 25°C  
 ③ the dependence on the altitude ( $h$  in meters above sea level), term equals unity if  $h$  equals 0, i.e. sea level.  
 Altogether the formula reads:

$$\lambda(V_{DC}, T_{vj}, h) = \underbrace{C_3 \cdot \exp\left(\frac{C_2}{C_1 - V_{DC}}\right)}_{①} \cdot \underbrace{\exp\left(\frac{25 - T_{vj}}{47.6}\right)}_{②} \cdot \underbrace{\exp\left(\frac{1 - \left(1 - \frac{h}{44300}\right)^{5.26}}{0.143}\right)}_{③}$$

Quelle: ABB

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

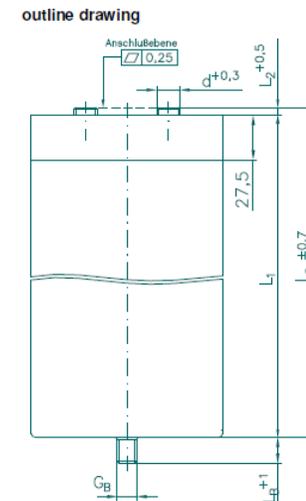
### Bestimmung der Ausfallraten: Beispiel 1200V / 750µF PP-Folien-Kondensator



- Ausfallrate von Kondensatoren ist u.a. abhängig von:
  - Energieinhalt,
  - DC-Spannung,
  - Temperatur.

$C_N$	750 µF ±5%
$U_{NDC}$	1200 V
$U_r$	250 V
$u_s$	1800 V
$W_N$	540 Ws
$I_{max}$	80 A
$\hat{i}$	7.2 kA
$I_s$	21.6 kA
$R_s$	0.71 mΩ
$\tan\delta_0$	$2 \times 10^{-4}$
$C \times R_{is}$	5000 s
$L_s$	50 nH
$\theta_{min}$	-25 °C
$\theta_{max}$	85 °C
$R_{th}$	2 K/W
$\theta_{storage}$	-40...+85 °C
	50 FIT*
	100000 h
	≤70 °C

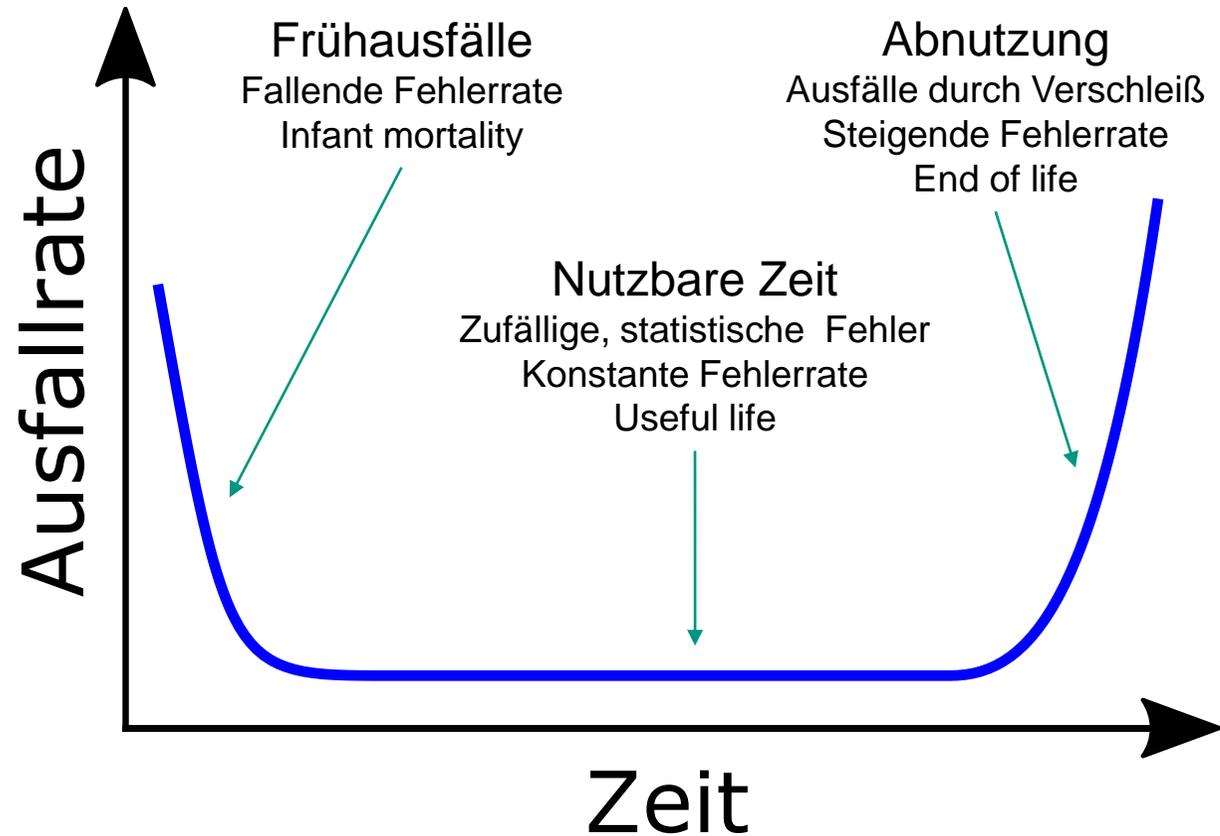
\* See FIT-RATE diagram on pg.3



Quelle: Electronicon

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

### Badewannenkurve

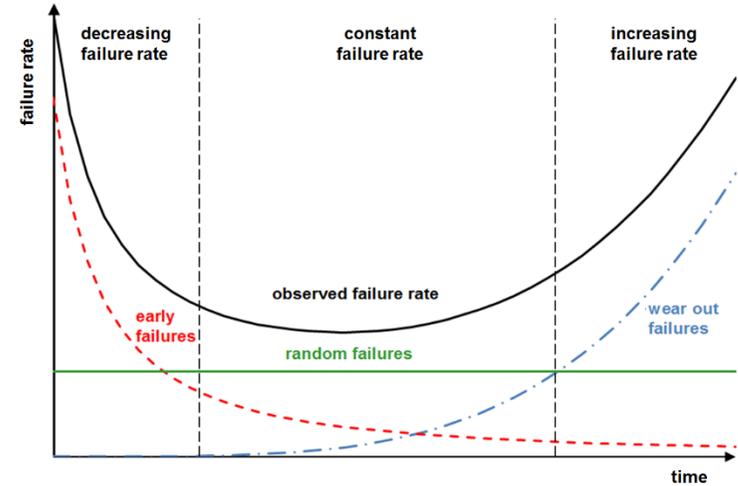


Vereinfachende Annahmen:

- Alle Frühausfälle sind bei Tests und während der Inbetriebnahme aufgetreten
  - Die Anlage wird nicht bis in den End-of-Life-Bereich hinein betrieben
- ⇒ Nur der Useful-Life-Bereich wird betrachtet
- Konstante Ausfallrate, einfache Berechenbarkeit

# 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

## Badewannenkurve



Fehlertyp	Frühausfälle	Zufällige Ausfälle	Ausfälle durch Abnutzung
<b>Vorhersehbarkeit</b>	Nein, aber i.d.R. durch Maßnahmen der Qualitätssicherung erkennbar	Nicht vorhersehbar. Nur statistisch beschreibbar.	Nur schwer statistisch vorhersehbar.
<b>Mögliche Ursachen für (erhöhte) Ausfallrate</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produktionsfehler</li> <li>- Materialdefekt durch Fehler bei Transport / Lagerung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Höhenstrahlung (Halbleiter)</li> <li>- Spontane Ausfälle</li> <li>- Fehlbedienung (z.B. durch Betrieb außerhalb der zulässigen Parameter) führt zu höheren Ausfallraten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mechanische, thermische, elektrische Belastung und Abnutzung</li> </ul>
<b>Gegenmaßnahmen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eingangsprüfung in der Produktion</li> <li>- Stückprüfung</li> <li>- Tests unter realen Bedingungen in der Inbetriebnahmephase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Condition Monitoring → Überwachung der Betriebsbedingungen</li> <li>- Einbau redundanter Komponenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Service- und Wartungskonzept, z.B. mit „preventive maintenance“</li> <li>- Condition Monitoring</li> </ul>

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

### Mathematische Zusammenhänge

- Eine Zuverlässigkeitsfunktion  $r(t)$  hat folgende Eigenschaften:

- $r(0) = 1$  „Am Anfang funktioniert das Gerät.“
- $r(\infty) = 0$  „Irgendwann ist das Gerät ausgefallen.“
- $\frac{dr(t)}{dt} < 0$  „Alle Geräte, die ausgefallen sind, bleiben ausgefallen.“

- Bei konstanter Ausfallrate  $\lambda$  gilt:

$$r(t) = e^{-\lambda t}$$

- Im Allgemeinen ist die Ausfallrate  $\lambda(t)$  definiert als:

$$\lambda(t) = -\frac{\frac{dr(t)}{dt}}{r(t)}$$

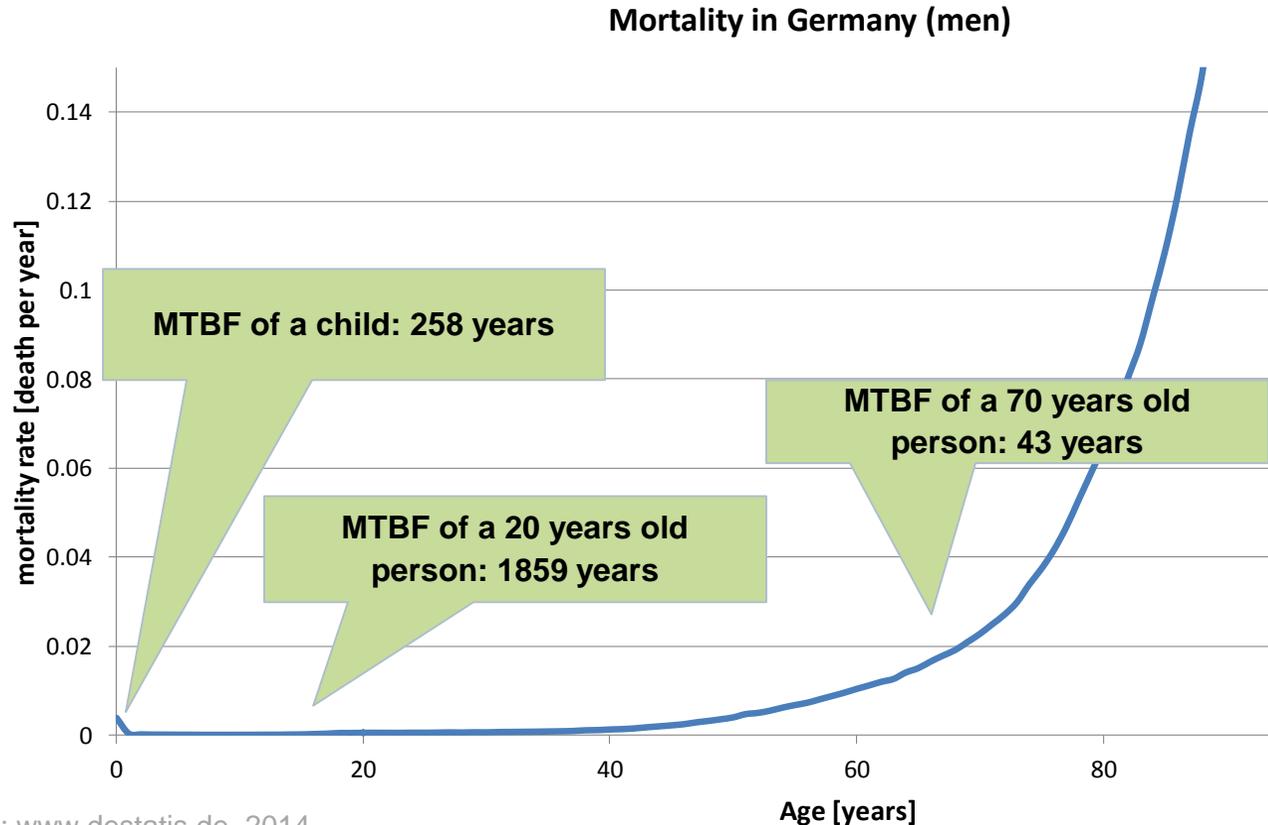
- Die MTTF berechnet sich nach:

$$MTTF = \int_0^{\infty} r(t) dt$$

- Bei konstanter Ausfallrate  $\lambda$  gilt:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen



**MTBF wird oft als durchschnittliche Lebensdauer missverstanden. Formel  $1/FIT$  gilt nur konstante Fehlerraten!**

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

### Kombination von Einzel-Zuverlässigkeiten

- Ein System besteht üblicherweise aus diversen Einzelkomponenten
- Das System funktioniert, wenn alle Einzelkomponenten funktionieren
- Multiplikation der Einzel-Zuverlässigkeiten ergibt Gesamt-Zuverlässigkeit  $r_G$ :

$$r_G(t) = r_1(t) \cdot r_2(t) \cdot \dots \cdot r_n(t)$$

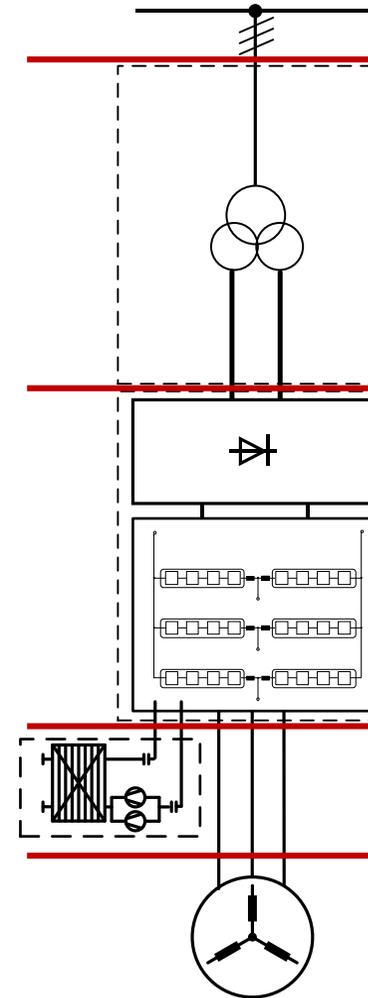
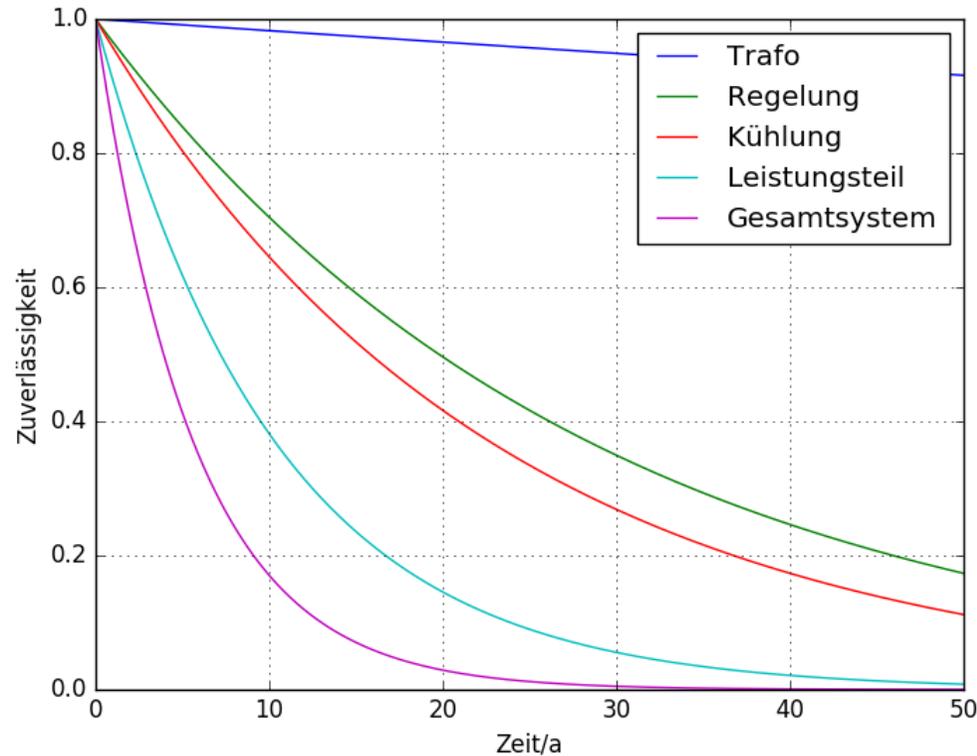
Bei konstanten Ausfallraten ergibt sich daher:

$$r_G(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_n t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t}$$

- Die Kombination von Systemen mit konstanter Ausfallrate ergibt wieder ein System mit konstanter Ausfallrate. Diese ist die Summe der Ausfallraten der Komponenten.

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

### Beispiel: Drehzahlveränderlicher Großantrieb



Umrichtersystem	
	FIT / MTTF
<b>Netztransformator</b>	200 570a
<b>Leistungsteil</b>	11000 10a
<b>Elektronik</b>	4000 28a
<b>Kühlanlage</b>	5000 23a
<b>Gesamte Ausfallrate MTTF</b>	<b>20200</b> <b>5.7a</b>

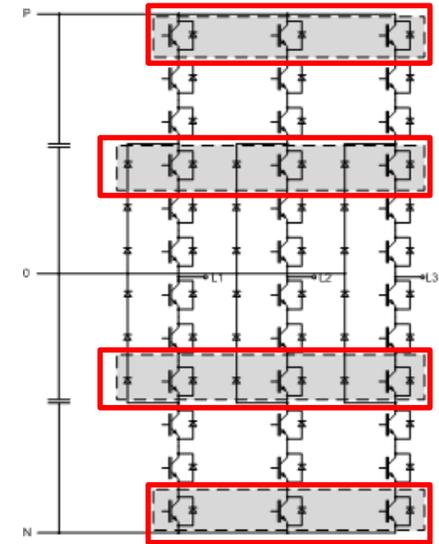
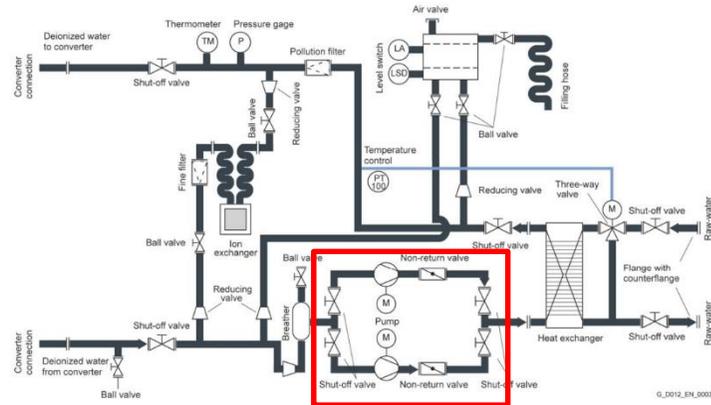
## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

### Redundanz

- Wesentliche Komponenten sind mehrfach vorhanden, um Zuverlässigkeit zu erhöhen.

- Beispiele:

- Zweite Kühlwasserpumpe



- In Reihe geschaltete IGBT Press-Pack Bauelemente

- Bezeichnung: N+1, N+2, usw.

Die Zahl gibt an wie viele zusätzliche Komponenten vorhanden sind.

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

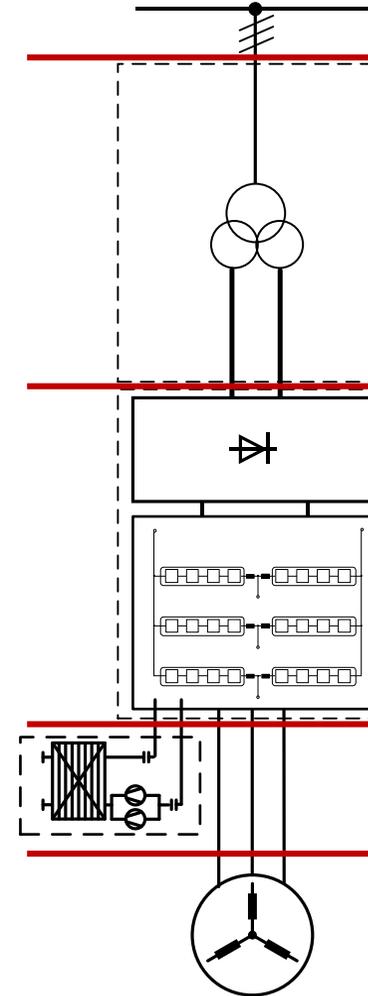
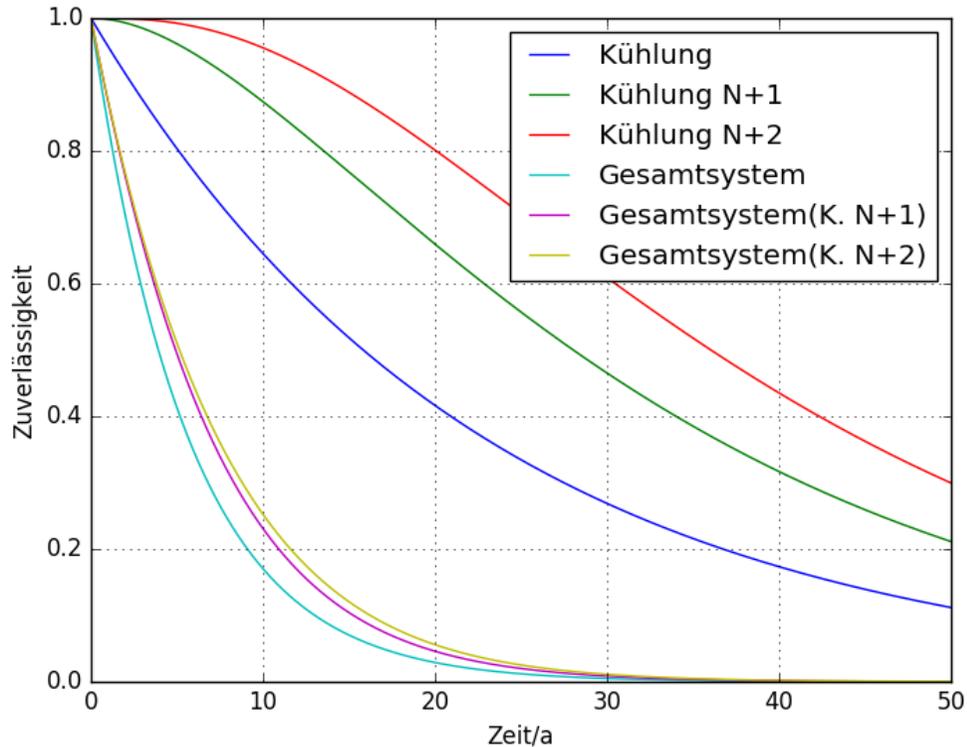
### Redundanz – Einfaches Beispiel

- System aus zwei gleichen Komponenten, von denen eines funktionieren muss, damit das System funktioniert.
- Das System fällt erst dann aus, wenn beide Komponenten ausfallen.
- Ausfallwahrscheinlichkeit einer Komponente:  $1 - r(t)$
- Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems:  $f(t) = (1 - r(t))^2 = r(t)^2 - 2r(t) + 1$
- Wahrscheinlichkeit, dass das Gesamtsystem funktioniert:  
 $r_G(t) = 1 - f(t) = 2r(t) - r(t)^2$
- Mit konstanter Ausfallrate  $\lambda$  also:  
 $r_G(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$
- Hier ist zu beachten, dass das redundante System **keine** konstante Ausfallrate mehr hat:

$$-\frac{dr_G}{dt} \frac{1}{r_G} = -\frac{-2\lambda e^{-\lambda t} + 2\lambda e^{-2\lambda t}}{2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}} = \frac{2\lambda(1 - e^{-\lambda t})}{2 - e^{-\lambda t}}$$

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

### Beispiel: Drehzahlveränderlicher Großantrieb mit redundanter Kühlwasserpumpe



Umrichtersystem	
	MTTF
Netztransformator	570a
Leistungsteil	10a
Elektronik	28a
Kühlanlage N+0	23a
N+1	34a
N+2	42a
<b>Gesamt: N+0</b>	<b>5.7a</b>
N+1	6.8a
N+2	7.1a

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

### Reparatur ausgefallener Komponenten

- Präventive Wartung ist im Modell mit konstanten Ausfallraten nicht möglich.
- Bei Redundanz können die ausgefallenen Komponenten gewartet werden
- Vollständige Wartung setzt die Ausfallrate auf den Anfangswert zurück
- Entscheidend ist Reparaturhäufigkeit
  - Wartungsintervalle: Größenordnung Jahre
  - Reparatur bei laufendem Betrieb: Größenordnung Tage (nur Zeit für Ersatzteilbeschaffung und Reparatur)

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

### Berechnung MTTF mit Reparatur

- Präventive Wartung ist im Modell mit konstanten Ausfallraten nicht möglich (da Ausfälle rein statistisch auftreten).

- Reparaturintervall  $T_R$

- Zuverlässigkeitsfunktion ohne Reparatur  $r(t)$

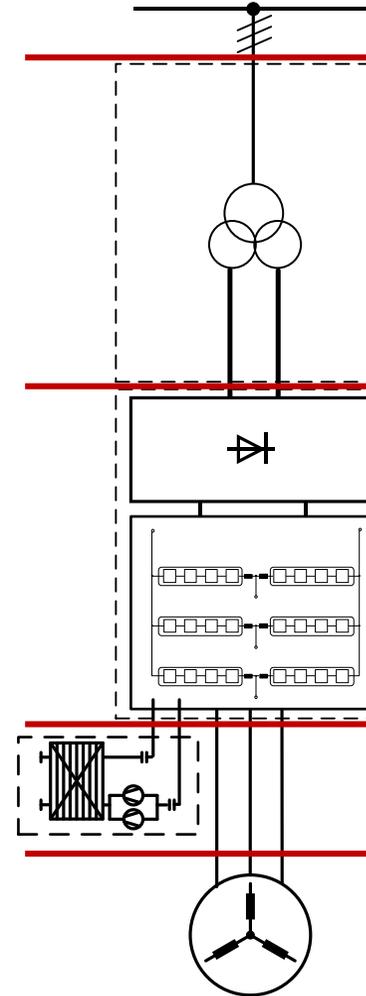
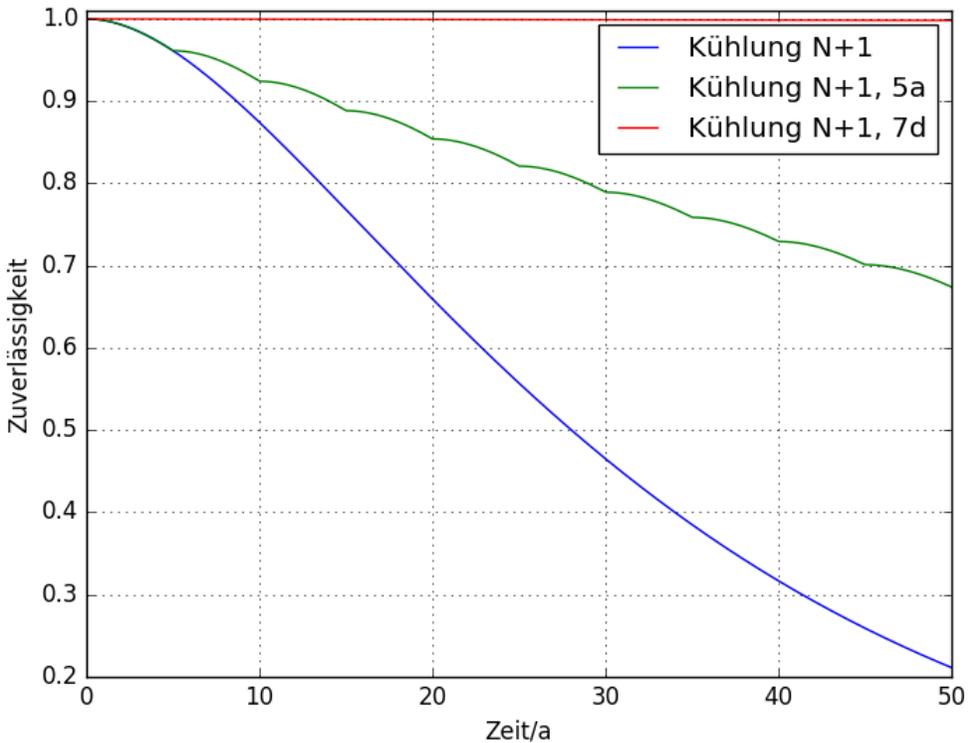
- Zuverlässigkeitsfunktion mit Reparatur  $r_R(t)$

- $r_R(t) = r(t - nT_R) \cdot r(T_R)^n$  mit  $n = \left\lfloor \frac{t}{T_R} \right\rfloor$

- $MTTF = \int_0^{\infty} r_R(t) dt = \int_0^{T_R} r(t) dt \cdot \sum_{i=0}^{\infty} r(T_R)^i = \frac{\int_0^{T_R} r(t) dt}{1 - r(T_R)}$

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

### Beispiel: Drehzahlveränderlicher Großantrieb mit redundanter Kühlwasserpumpe



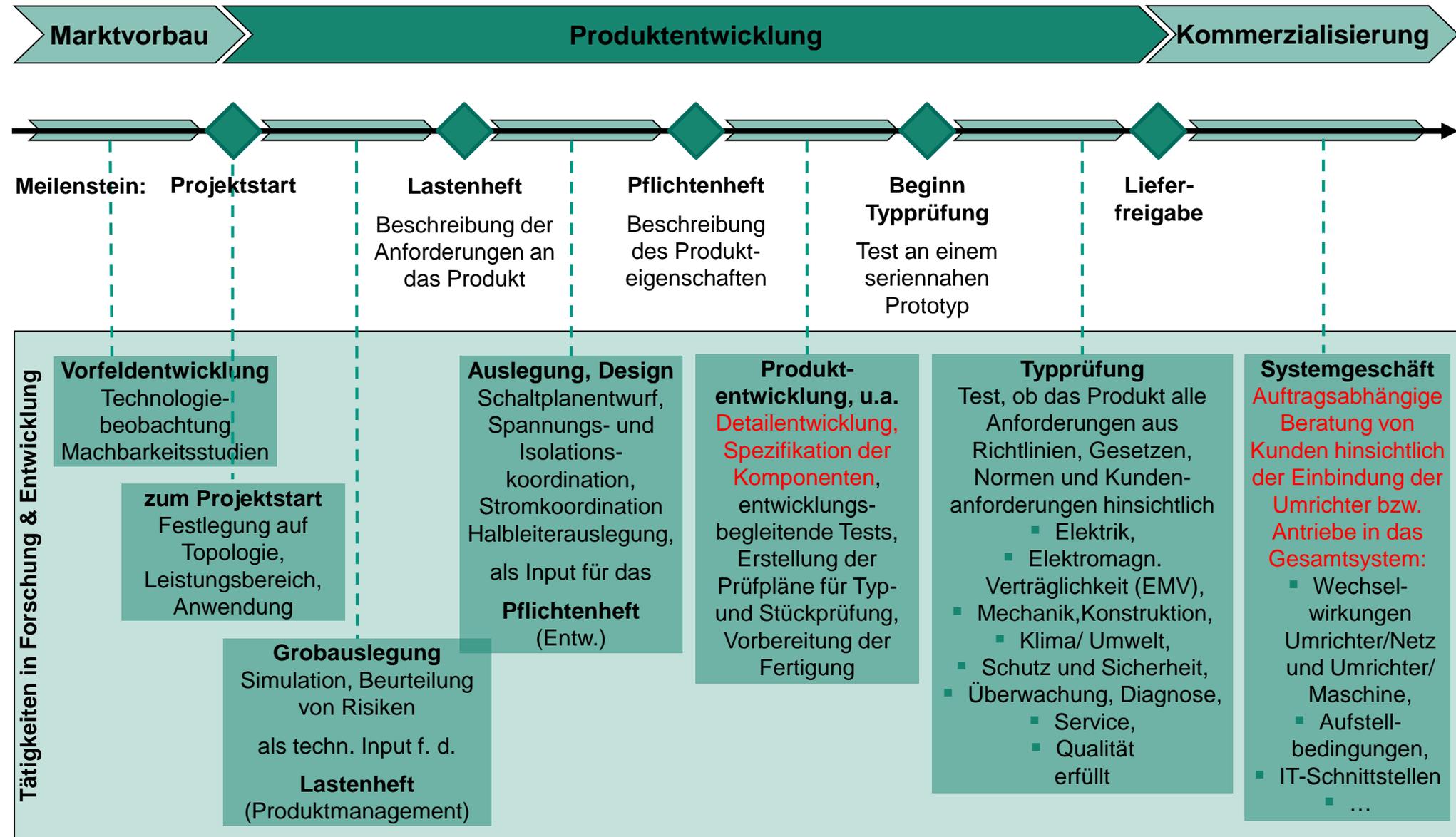
Umrichtersystem	
	MTTF
Netztransformator	570a
Leistungsteil	10a
Elektronik	28a
N+1 (keine Reparatur)	34a
N+1 (5a bis Reparatur)	127a
N+1 (7d bis Reparatur)	27203a
<b>Ges.: N+1</b>	<b>6.8a</b>
<i>N+1 (5a b. Rep.)</i>	<i>7.1a</i>
<i>N+1 (7d b. Rep.)</i>	<i>7.5a</i>

## 2. Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen

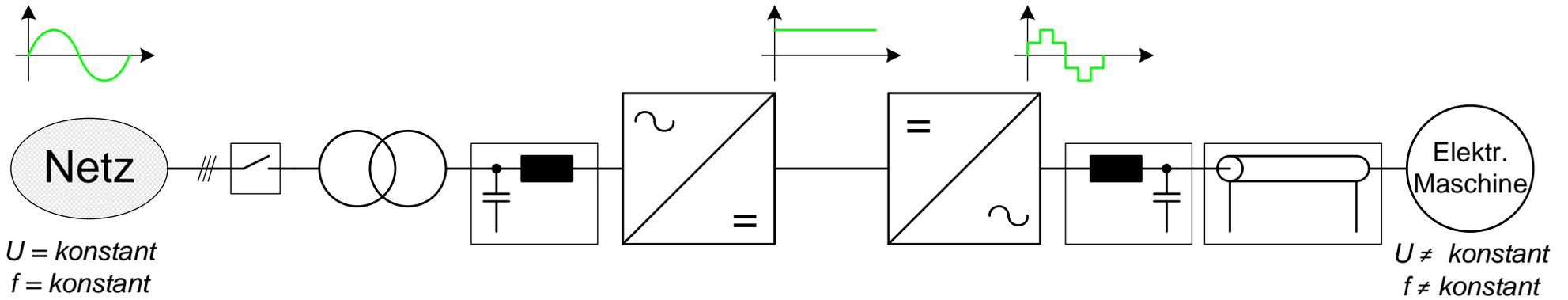
### Zusammenfassung

- Zuverlässigkeit ist wichtig für Rentabilität
- Annahme konstanter Ausfallraten
  - $MTTF=1/\text{Ausfallrate}$
- Redundanz verbessert Zuverlässigkeit
  - Höhere Anzahl von Komponenten erhöht die Ausfallrate zunächst,
  - Ausfallrate nicht mehr konstant,
  - MTTF Berechnung erfordert Integral der Zuverlässigkeitsfunktion.
- Reparaturhäufigkeit ist maßgeblich für die Zuverlässigkeit redundanter Systeme

## 2. Zuverlässigkeit – Bedeutung im Entwicklungsprozess



# 3. Zusammenfassung



# 3. Systembetrachtungen

## Zusammenfassung

- Alle Systemkomponenten müssen ideal aufeinander abgestimmt sein, um einen zuverlässigen Betrieb zu ermöglichen.
- Alle Faktoren, die eine erhöhte Ausfallrate bedeuten könnten, müssen eliminiert werden (nur die statistische Ausfallrate bleibt).
- Die Beobachtung des Feldgeschehens ist wichtig für die Angabe realistischer Ausfallraten (meist jedoch nur schwer realisierbar).
- Redundanzen müssen ggf. entsprechend der Systemanforderungen an die Zuverlässigkeit mit berücksichtigt werden, sofern wirtschaftliche Randbedingungen dies zulassen.
- Berechnungsumgebung für die Beurteilung der Zuverlässigkeit von Leistungselektronischen Systemen gewinnt sehr stark an Bedeutung.
- Input für die Berechnung der Zuverlässigkeit kommt zum großen Teil aus der thermischen und elektrischen Auslegung der Komponenten, z.B.
  - Temperaturbelastung (auch Wechsellasten),
  - Spannungsbelastung

# 3. Prüfungsrelevante Themen

## Kapitel 1:

- Wesentliche Komponenten eines leistungselektronischen Systems?
- Spannungsebenen?
- Stromrichtertopologien für den LV- und MV-Bereich (Eigenschaften, Vor/Nachteile)?
- Welche wesentliche Eigenschaften und Vor-/Nachteile haben diese Schaltungen?
- Welche Leistungshalbleiter werden verwendet?

# 3. Prüfungsrelevante Themen

## Kapitel 2:

- Was leistet eine Isolationskoordination?
- Isolationskoordination – Begriffe?
- Isolationskoordination – Prinzipielle Vorgehensweise?
  
- Lichtbogenfestigkeit – Was bedeutet das?
- Lichtbogenfestigkeit – Stromberechnung und -verlauf?
- Lichtbogenfestigkeit – Maßnahmen?
  
- Strom-/Spannungskoordination – Warum? Unter welchen worst case Bedingungen?

# 3. Prüfungsrelevante Themen

## Kapitel 3:

- Verlustarten in Umrichtern?
- Verlustarten in Halbleitern?
- Prinzipielle Strom- und Spannungsverläufe an Leistungshalbleitern während des Schaltens? Wo entstehen die Verluste?
- Methoden zur Bestimmung der Streuinduktivität im Kommutierungskreis?
  
- Thermische Ersatzschaltbilder?
- Lastwechselauslegung – Wesentliche Einflussfaktoren?

# 3. Prüfungsrelevante Themen

## Kapitel 4, 5, 6:

- Wie beeinflusst ein Umrichter die Betriebsweise einer elektrischen Maschine?
- Was ist bei langen Kabeln zu beachten?
- Welche Maßnahmen gibt es, die Maschine zu entlasten?
  
- Arten von Filtern? Wann werden welche Filter eingesetzt?
- Schaltbild/Auslegungskriterien du/dt-Filter?
- Schaltbild/Auslegung Sinusfilter?
  
- Arten von Lagerströmen?
- Gegenmaßnahmen?

# 3. Prüfungsrelevante Themen

## Kapitel 7:

- Transformatorconfigurationen?
- Auslegungskriterien für Transformatoren?
  
- Ausbreitung von Netzurückwirkungen?
- Gegenmaßnahmen?
- Schaltbild/Auslegungskriterien Netzfilter?

# 3. Prüfungsrelevante Themen

## Kapitel 8:

- Zuverlässigkeit: Begriffe?
- Badewannenkurve?
- Zuverlässigkeitsfunktion?
- Redundanz? Auswirkungen auf Zuverlässigkeit?