

Kapitel 3

Zuverlässigkeitsanalyse am Beispiel eines Getriebes

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche
*Institut für Maschinenelemente (IMA),
Abteilung Zuverlässigkeitstechnik,
Universität Stuttgart*

Gliederung

3.0 Einleitung

3.1 Systemanalyse

3.2 Bestimmung der Systemelementzuverlässigkeiten

3.3 Berechnung der Systemzuverlässigkeit

Gliederung

3.0 Einleitung

3.1 Systemanalyse

3.2 Bestimmung der Systemelementzuverlässigkeiten

3.3 Berechnung der Systemzuverlässigkeit

Sicherstellung der Systemzuverlässigkeit

Konstruktiv:

Optimaler Konstruktionsprozess mit ausgereiften Methoden und -verfahren

- genaues und voll-ständiges Lastenheft
- **Gesicherte Berechnung mit genau erfassten Lastkollektiven**
- Bewährte Konstruktionsrichtlinien
- **Frühzeitige und umfassende Erprobung**
- ...

Analytisch:

Ermittlung bzw. Prognose der Zuverlässigkeit durch Zuverlässigkeitsmethoden und anschließender Optimierung

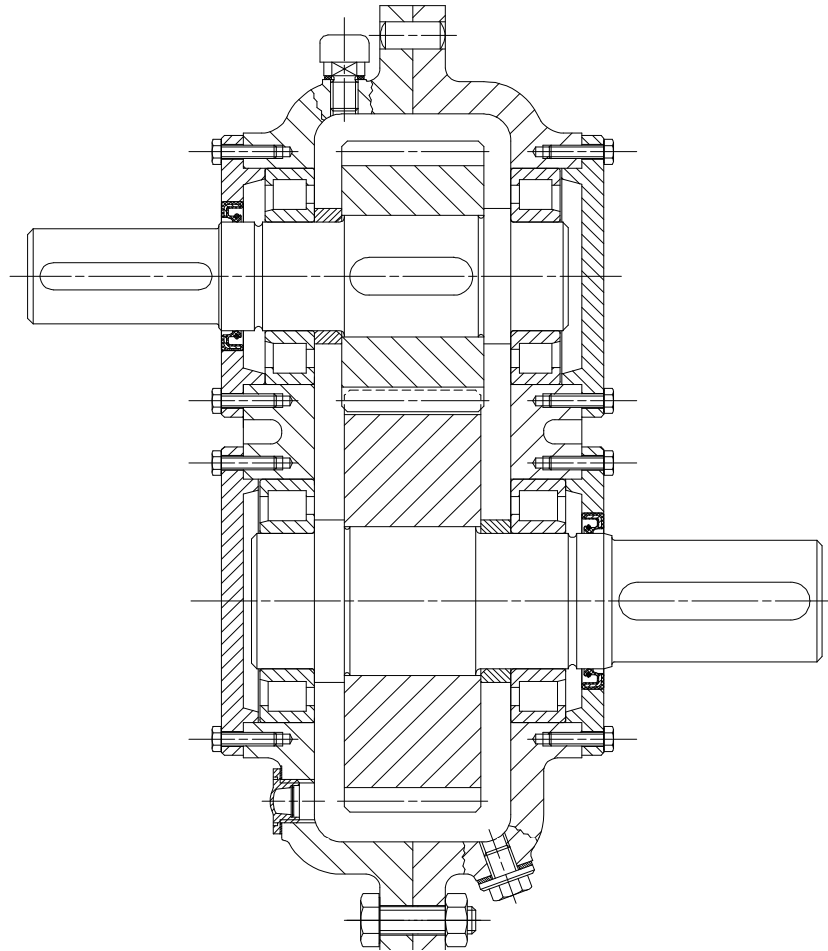
qualitativ

- Systematische Untersuchung der Auswirkungen von Fehlern und Ausfällen
- Ausfallartenanalyse
- ...
Methoden:
 - FMEA/FMECA
 - FTA
 - Ereignisablaufanalyse
 - Checklisten

quantitativ

- Berechnung der voraussagbaren Zuverlässigkeit
- Ausfallratenanalyse
- Probabilistische Zuverlässigkeitsanalyse
- ...
Methoden:
 - Boole
 - Markov
 - FTA

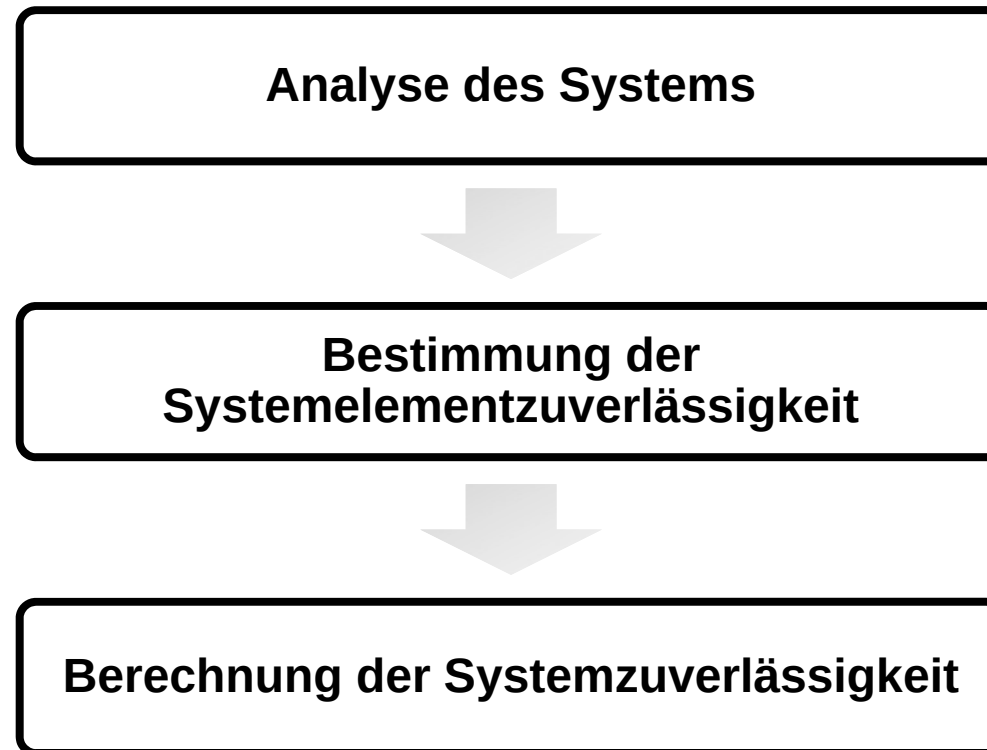
Beispiel-System: Einstufiges Zahnradgetriebe



s. Abb. 3.1

Prof. Bertsche

Ablaufschema zur Ermittlung der Systemzuverlässigkeit



Gliederung

3.0 Einleitung

3.1 Systemanalyse

3.2 Bestimmung der Systemelementzuverlässigkeiten

3.3 Berechnung der Systemzuverlässigkeit

Ablaufschema zur Analyse des Systems

Bauelemente des Systems ermitteln
(Bauelement = Bauteil bzw. Bauteilschnittstelle)



Systemelemente für Berechnung festlegen
(Systemelement = Bauelement je Schadensart)



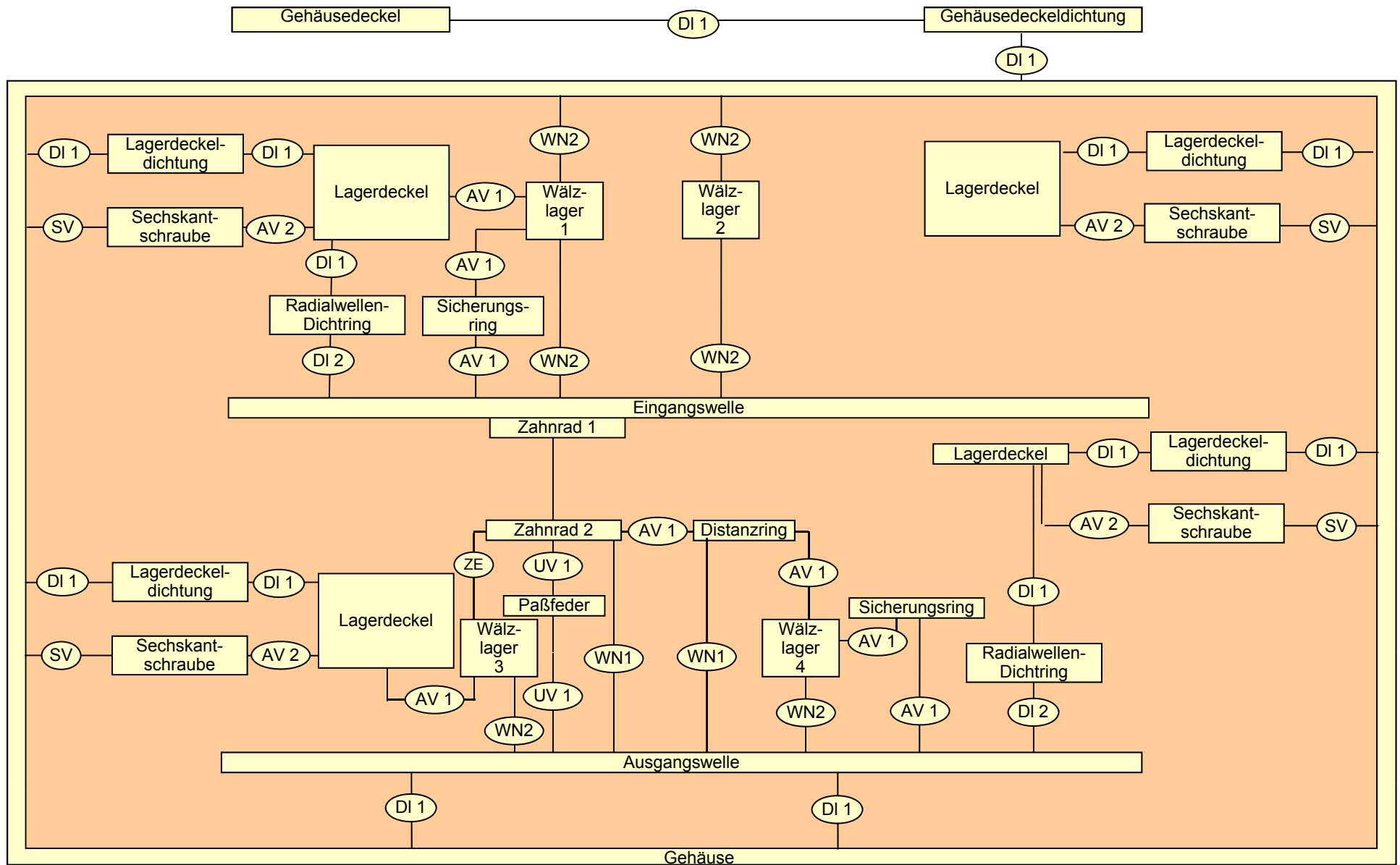
Systemelemente klassifizieren
(A-, B-, C-Einteilung oder FMEA/FMEcA-Analyse)



Zuverlässigkeits-Struktur (Boolesches Seriensystem) mit den A- und B-Systemelementen aufstellen (evtl. über Leistungsfluss)

s. Abb. 3.3

Prof. Bertsche



Abkürzungen des Funktionsdiagramms

Abk.	Bezeichnung	Symbol
ZE	Zahneingriff	
SV	Schraubverbindung	
AV	Verbindung in axialer Richtung	1: Formschluss 
		2: Reibschluss 
		3: Stoffschluss 
DI	Dichtung	1: statisch 
		2: dynamisch 
WN	Wellen-Naben-Verbindung	1: Zentrierung 
		2: Lagersitz 
UV	Verbindung in Umfangsrichtung	1: Formschluss 
		2: Reibschluss 

Ablaufschema zur Analyse des Systems

Bauelemente des Systems ermitteln
(Bauelement = Bauteil bzw. Bauteilschnittstelle)



Systemelemente für Berechnung festlegen
(Systemelement = Bauelement je Schadensart)



Systemelemente klassifizieren
(A-, B-, C-Einteilung oder FMEA/FMEcA-Analyse)



Zuverlässigkeits-Struktur (Boolesches Seriensystem) mit den A- und B-Systemelementen aufstellen (evtl. über Leistungsfluss)

s. Abb. 3.3

Prof. Bertsche

Bauelemente des Systems

Gehäuse	Sicherungsring 2
Gehäusedeckel	Distanzring
Gehäuseschrauben	Lagerdeckel 1
Gehäusedeckeldichtung	Lagerdeckel 2
Eingangswelle	Lagerdeckel 3
Ausgangswelle	Lagerdeckel 4
Zahnrad 1	Lagerdeckeldichtung 1
Zahnrad 2	Lagerdeckeldichtung 2
Paßfederverbindung	Lagerdeckeldichtung 3
Wälzlager 1	Lagerdeckeldichtung 4
Wälzlager 2	Radialwellendichtring 1
Wälzlager 3	Radialwellendichtring 2
Wälzlager 4	Sechskantschraube 1-12
Sicherungsring 1	

Ablaufschema zur Analyse des Systems

Bauelemente des Systems ermitteln
(Bauelement = Bauteil bzw. Bauteilschnittstelle)



Systemelemente für Berechnung festlegen
(Systemelement = Bauelement je Schadensart)



Systemelemente klassifizieren
(A-, B-, C-Einteilung oder FMEA/FMEcA-Analyse)



Zuverlässigkeits-Struktur (Boolesches Seriensystem) mit den A- und B-Systemelementen aufstellen (evtl. über Leistungsfluss)

s. Abb. 3.3

Prof. Bertsche

Systemelemente für Berechnung

Gehäuse	Sicherungsring 1
Gehäusedeckel	Sicherungsring 2
Gehäuseschrauben	Distanzring
Gehäusedeckeldichtung	Lagerdeckel 1
Eingangswelle	Lagerdeckel 2
Ausgangswelle	Lagerdeckel 3
Zahnrad 1 Bruch	Lagerdeckel 4
Zahnrad 2 Bruch	Lagerdeckeldichtung 1
Zahnrad 1/2 Grübchen	Lagerdeckeldichtung 2
Paßfederverbindung	Lagerdeckeldichtung 3
Wälzlager 1	Lagerdeckeldichtung 4
Wälzlager 2	Radialwellendichtring 1
Wälzlager 3	Radialwellendichtring 2
Wälzlager 4	Sechskantschraube 1-12

Ablaufschema zur Analyse des Systems

Bauelemente des Systems ermitteln
(Bauelement = Bauteil bzw. Bauteilschnittstelle)



Systemelemente für Berechnung festlegen
(Systemelement = Bauelement je Schadensart)



Systemelemente klassifizieren
(A-, B-, C-Einteilung oder FMEA/FMEcA-Analyse)



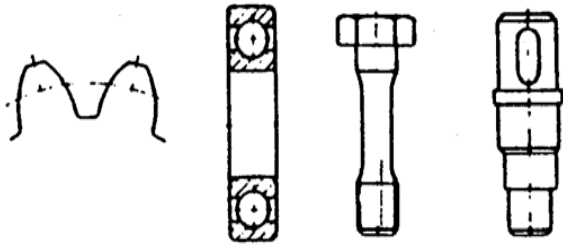
Zuverlässigkeits-Struktur (Boolesches Seriensystem) mit den A- und B-Systemelementen aufstellen (evtl. über Leistungsfluss)

s. Abb. 3.3

Prof. Bertsche

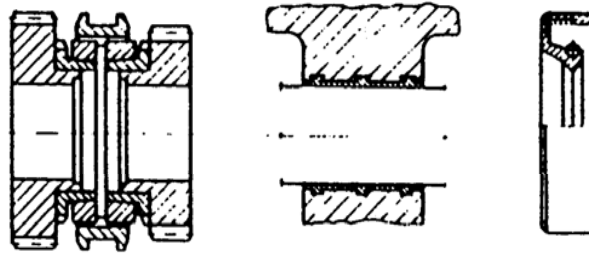
A-, B- und C-Klassifizierung

A-Teile (risikoreich) z.B.



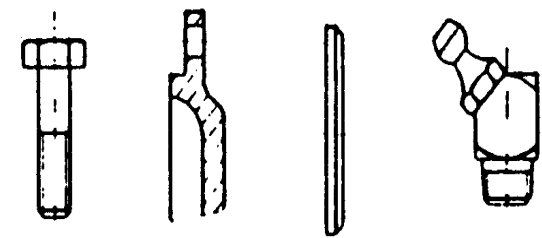
- Beanspruchung durch definierbare statische und dynamische Belastung; Lastkollektiv bekannt; leistungsführend
- Lebensdauerberechnung möglich und weitgehend gesichert
- Ausfallverhalten aus Wöhlerversuchen bekannt; Formparameter $b > 1,0$

B-Teile (risikoreich) z.B.



- Beanspruchung vorwiegend durch Reibung, Verschleiß, extreme Temperaturen; Erschütterungen, Schmutz und Korrosion
- Lebensdauerberechnung nicht möglich oder nicht gesichert
- Ausfallverhalten schätzen oder durch Versuche ermitteln; Formparameter $b \geq 1,0$

C-Teile (risikoneutral) z.B.



- Beanspruchung stochastisch durch Stöße, Reibung, Verschleiß etc.
- keine rechnerische Auslegung möglich
- nur Zufalls- oder Frühausfälle; Formparameter $0 < b \leq 1,0$

Systemelemente klassifizieren

Gehäuse	C	Sicherungsring 1	C
Gehäusedeckel	C	Sicherungsring 2	C
Gehäuseschrauben	C	Distanzring	C
Gehäusedeckeldichtung	C	Lagerdeckel 1	C
Eingangswelle	A	Lagerdeckel 2	C
Ausgangswelle	A	Lagerdeckel 3	C
Zahnrad 1 Bruch	A	Lagerdeckel 4	C
Zahnrad 2 Bruch	A	Lagerdeckeldichtung 1	C
Zahnrad 1/2 Grübchen	A	Lagerdeckeldichtung 2	C
Paßfederverbindung	A	Lagerdeckeldichtung 3	C
Wälzlager 1	A	Lagerdeckeldichtung 4	C
Wälzlager 2	A	Radialwellendichtring 1	B
Wälzlager 3	A	Radialwellendichtring 2	B
Wälzlager 4	A	Sechskantschraube 1-12	C

Ablaufschema zur Analyse des Systems

Bauelemente des Systems ermitteln
(Bauelement = Bauteil bzw. Bauteilschnittstelle)



Systemelemente für Berechnung festlegen
(Systemelement = Bauelement je Schadensart)



Systemelemente klassifizieren
(A-, B-, C-Einteilung oder FMEA/FMEcA-Analyse)



Zuverlässigkeits-Struktur (Boolesches Seriensystem) mit den A- und B-Systemelementen aufstellen (evtl. über Leistungsfluss)

s. Abb. 3.3

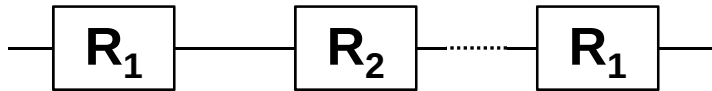
Prof. Bertsche

Voraussetzungen für die Anwendung der Systemtheorie nach Boole

- System ist “**nicht-reparierbar**”
(erster Systemausfall beendet Systemlebensdauer)
- Bauelemente können nur die beiden Zustände “**funktionsfähig**” oder “**ausgefallen**” annehmen
- Bauelemente sind “**unabhängig**”
(Ausfallverhalten eines Bauelements wird durch andere nicht beeinflusst)

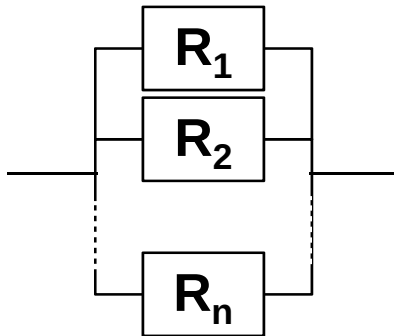
Boolesche Grundstrukturen von Zuverlässigkeitsschaubildern

a) Serienstruktur



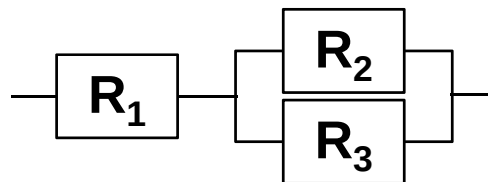
$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \quad \text{mit } i = 1, \dots, n$$

b) Parallelstruktur



$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad \text{mit } i = 1, \dots, n$$

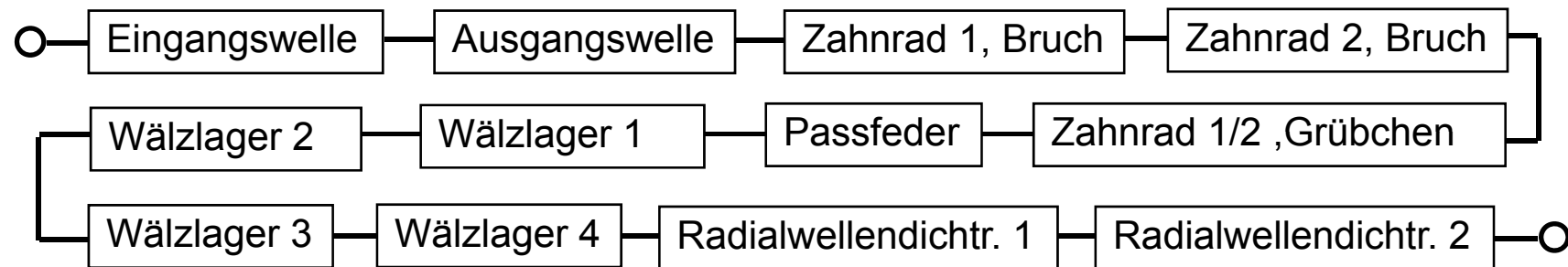
c) Kombinierte Struktur



$$R_S = R_1 [1 - (1 - R_2) \cdot (1 - R_3)]$$

Systemgleichung aus Zuverlässigkeitsstruktur aus A- und B-Systemelementen

Zuverlässigkeits-Blockschaltbild (Boolesche Serienstruktur):



s. Abb. 3.9

System-Gleichung

$$R_{\text{System}} = R_{\text{Eing.welle}} \cdot R_{\text{Ausg.welle}} \cdot R_{\text{Zahnrad1,Bruch}} \cdot R_{\text{Zahnrad2,Bruch}} \cdot R_{\text{Zahnrad1/2,Grübchen}} \cdot R_{\text{Passfeder}} \cdot R_{\text{Wälzlager1}} \cdot R_{\text{Wälzlager2}} \cdot R_{\text{Wälzlager3}} \cdot R_{\text{Wälzlager4}} \cdot R_{\text{RWDR1}} \cdot R_{\text{RWDR2}}$$

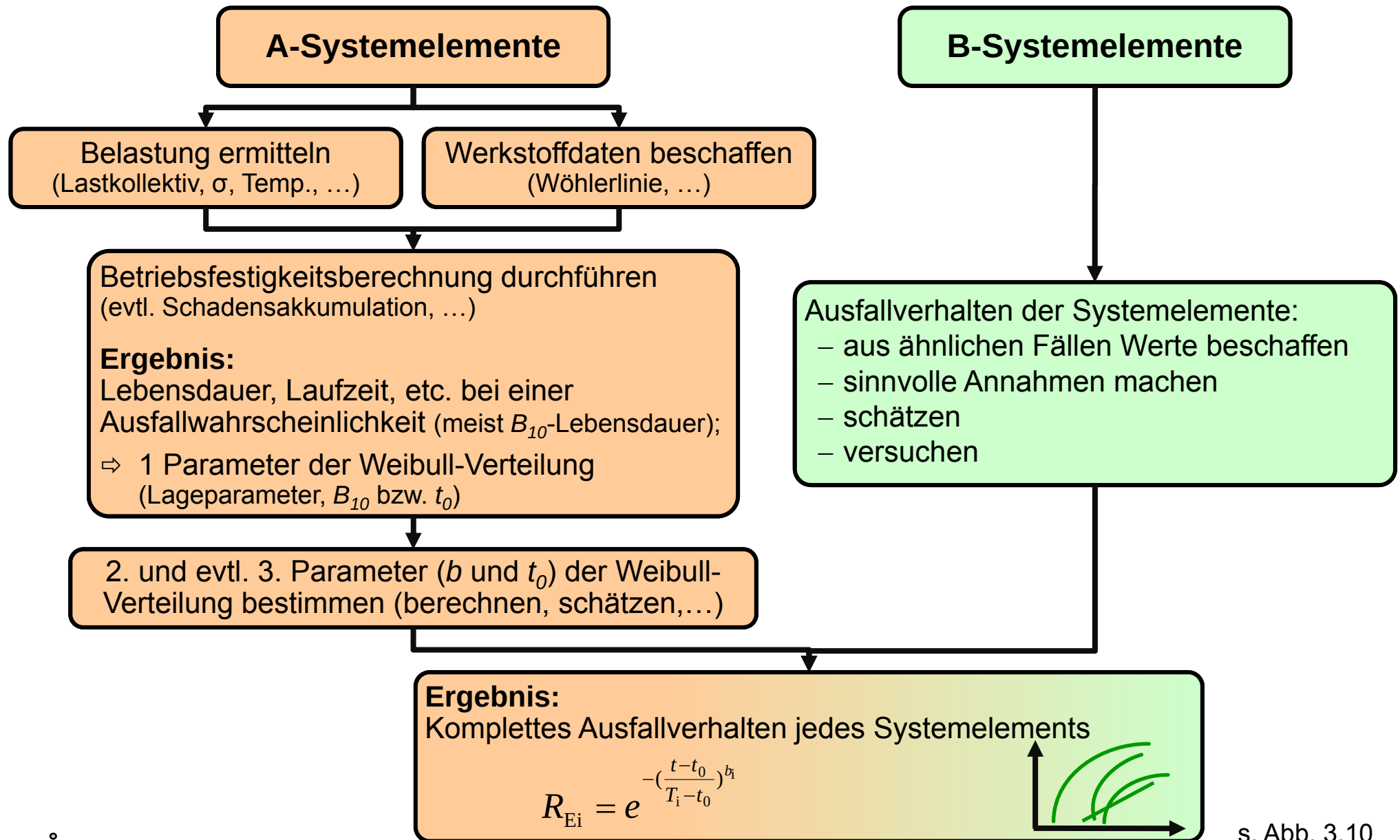
Gliederung

3.0 Einleitung

3.1 Systemanalyse

3.2 Bestimmung der Systemelementzuverlässigkeiten

3.3 Berechnung der Systemzuverlässigkeit



s. Abb. 3.10
Prof. Bertsche

B_1 - und B_{10} -Lebensdauern der Systemelemente

Systemelemente	Berechnete Lebensdauern
Eingangswelle	dauerfest
Ausgangswelle	dauerfest
Zahnrad 1 Bruch	70.000 Umdr. EW (B_1)
Zahnrad 2 Bruch	120.000 Umdr. EW (B_1)
Zahnrad 1/2 Grübchen	500.000 Umdr. EW (B_1)
Passfederverbindung	dauerfest
Wälzlager 1	1.500.000 Umdr. EW (B_{10})
Wälzlager 2	dauerfest
Wälzlager 3	dauerfest
Wälzlager 4	2.500.000 Umdr. EW (B_{10})

s. Abb. 3.11



⇒ Anhand Gleichungen (7.1) und (7.2) können die B_1 - und B_{10} -Lebensdauern in die charakteristische Lebensdauer T umgerechnet werden.



Weibullparameter der Systemelemente

Weibullparameter der A-Systemelemente

	b	T	t_0	f_{tB}
Zahnrad 1 Bruch	1,4	106.600	68.600	0,9
Zahnrad 2 Bruch	1,8	185.000	114.500	0,85
Zahnrad 1/2 Grübchen	1,3	2.147.300	450.700	0,6
Wälzlager 1	1,11	9.400.000	300.000	0,2
Wälzlager 4	1,11	15.700.000	500.000	0,2

s. Tabelle 3.1

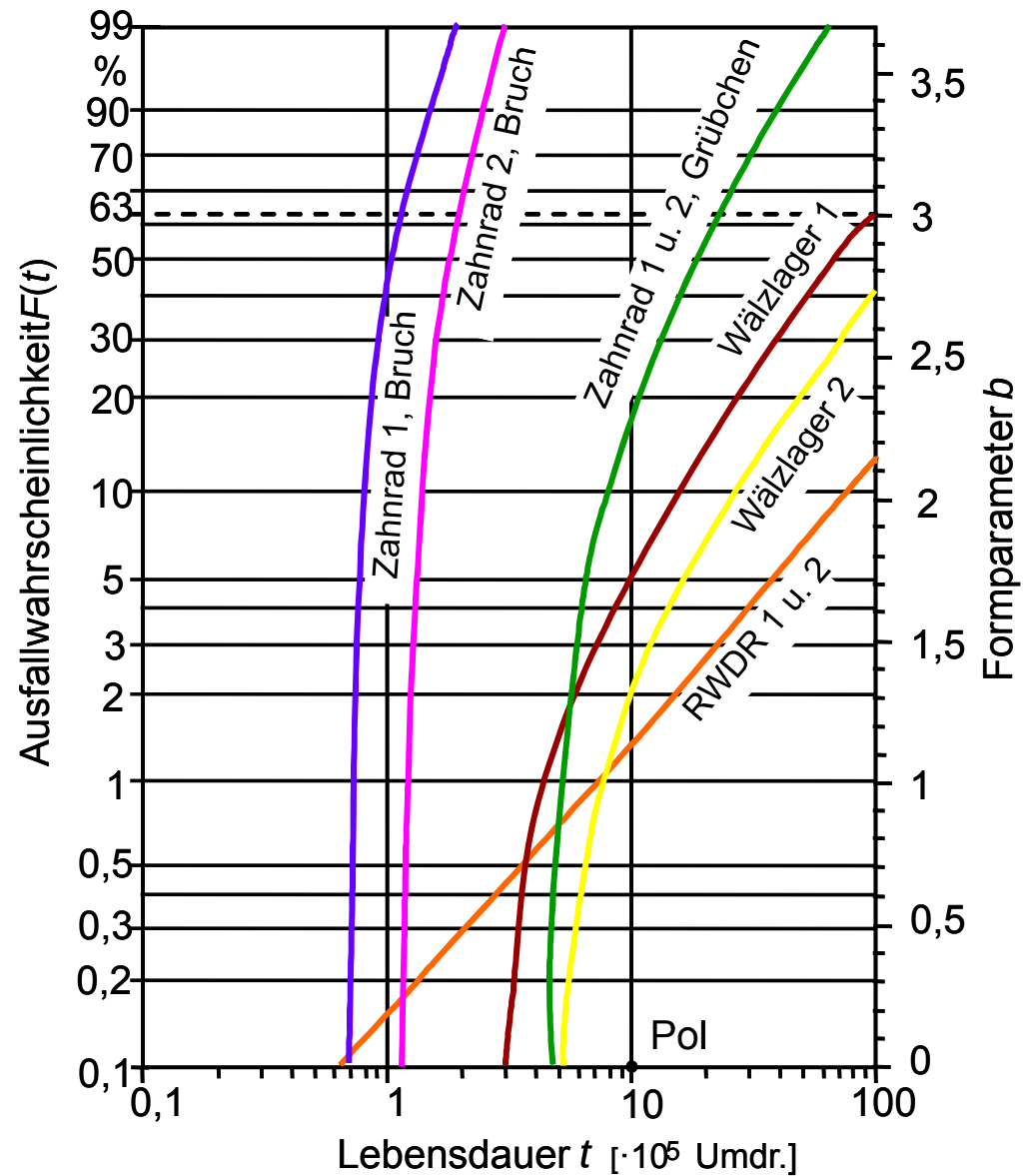
Weibullparameter der B-Systemelemente

	b	T	t_0	f_{tB}
RWDR 1	1,0	66.000.000	0	0
RWDR 2	1,0	66.000.000	0	0

s. Tabelle 3.2



⇒ Die fehlenden Parameter b und t_0 werden berechnet bzw. geschätzt.



s. Abb. 3.12

Prof. Bertsche

Gliederung

3.0 Einleitung

3.1 Systemanalyse

3.2 Bestimmung der Systemelementzuverlässigkeiten

3.3 Berechnung der Systemzuverlässigkeit

Ablaufschema zur Berechnung der Systemzuverlässigkeiten

Ausfallverhalten des Systems ergibt sich aus den Systemelementenzuverlässigkeiten:

$$R_S = e^{-\left(\frac{t-t_{01}}{T-t_{01}}\right)^{b_1}} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_{02}}{T-t_{02}}\right)^{b_2}} \cdot \dots$$

Gesucht:

Systemlebensdauer bei best. Systemzuverlässigkeit
(z.B. $t_S = ?$ für $R_S = 90\%$)

Gesucht:

Systemzuverlässigkeit bei best. Systemlebensdauer
(z.B. $R_S = ?$ für $t_S = 100.000 \text{ LW}$)

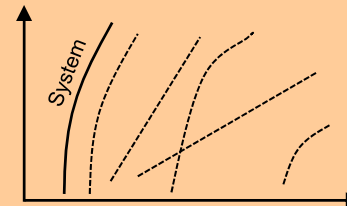
Iterative Lösung:

t_S in Systemgleichung so lange variieren, bis sich ein
gesuchtes $R_S(t)$ ergibt
(Bauteile mit $t_0 > t_S$ nicht berücksichtigen)

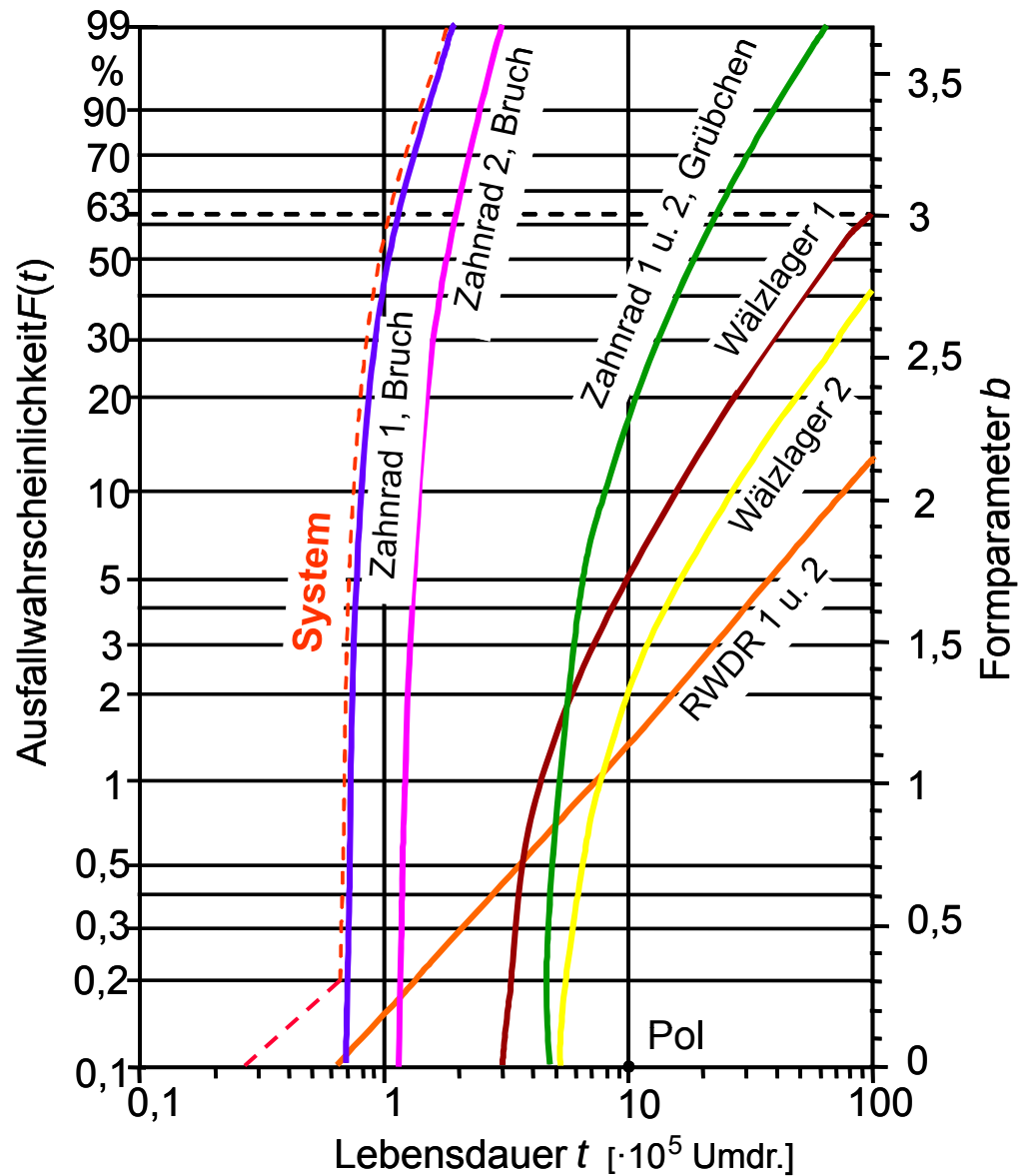
Analytische Lösung:

t_S in Systemgleichung einsetzen $R_S(t)$
(Bauteile mit $t_0 > t_S$ nicht berücksichtigen)

Mit mehreren Wertpaaren $R_S(t_S)$:
Kurve des Systemausfallverhaltens



s. Abb. 3.13



s. Abb. 3.12

Prof. Bertsche

Bedingung für die Berechnung der Systemzuverlässigkeit

Dreiparametrische Systemelemente haben nur dann einen Einfluss auf die Systemlebensdauer t_{xS} (bzw. B_{xS}), wenn gilt:

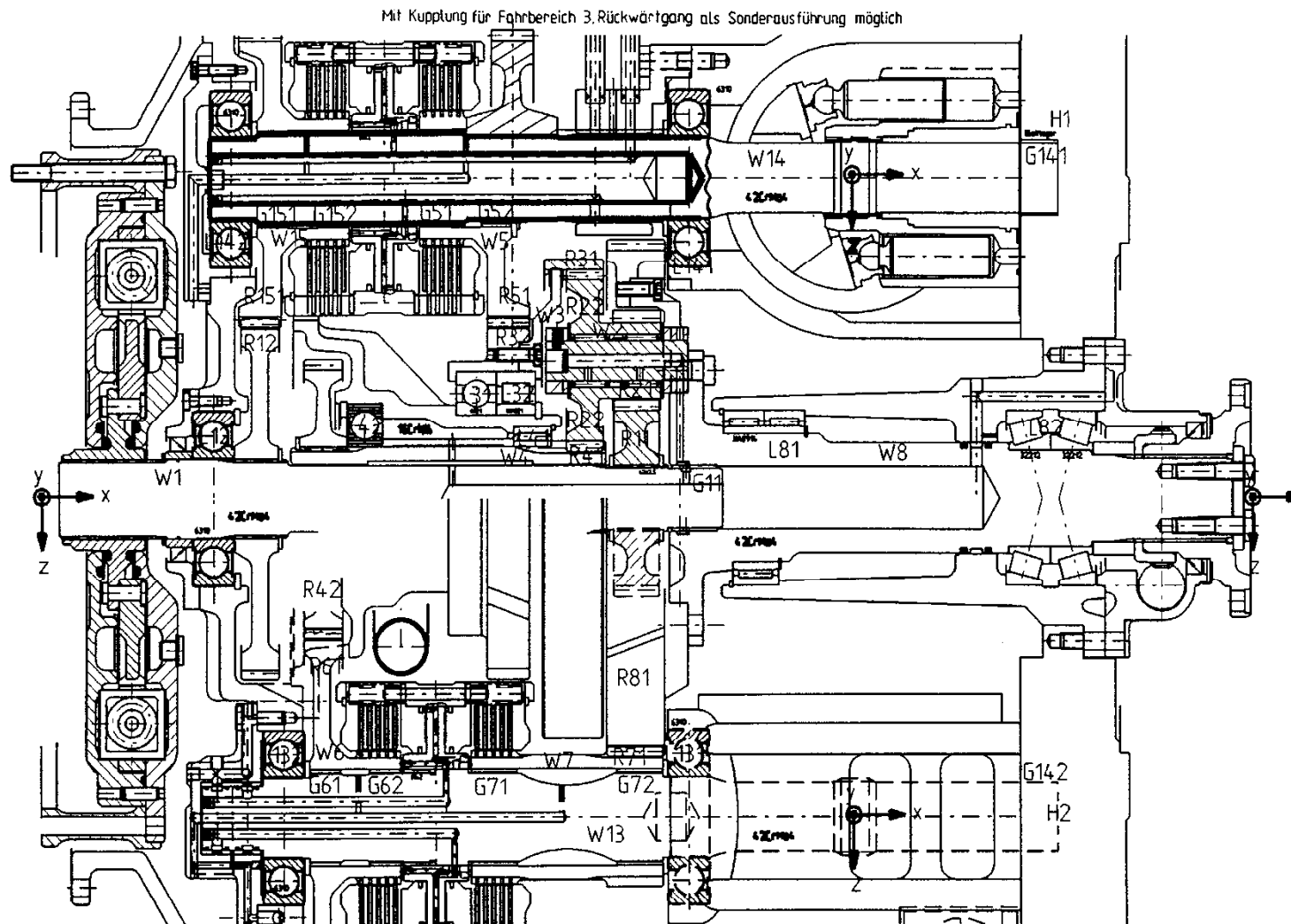
$$t_0 < t_{xS} \quad (3.2)$$

⇒ Für das Beispielgetriebe ergibt sich das Ausfallverhalten ausschließlich durch die vier Systemelemente

- Zahnrad 1 Bruch,
- Zahnrad 2 Bruch,
- RWDR 1,
- RWDR 2.

Die **Systemgleichung** lautet in diesem Fall:

$$R_{\text{System}} = R_{\text{Zahnrad 1, Bruch}} \cdot R_{\text{Zahnrad 2, Bruch}} \cdot R_{\text{RWDR1}} \cdot R_{\text{RWDR2}} \quad (3.3)$$



$T_{1\max} = 900\text{Nm}$, $i_{g\max} = 14$, Fa. Voith Turbo GmbH Heidenheim

