



Alexander Baumeister

# **Lebenszykluskosten alternativer Verfügbarkeits- garantien im Anlagenbau**

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Ernst Troßmann

**GABLER EDITION WISSENSCHAFT**

## Inhaltsverzeichnis

A. Bedeutung von Verfügbarkeitsgarantien im Maschinen- und Anlagenbau.....	1
B. Gestaltungsalternativen zur Beeinflussung der Lebenszykluskosten von Verfügbarkeitsgarantien.....	9
I. Verfügbarkeitsgarantien als spezielle Form von Lifecycle-Garantien im Anlagenbau.....	9
1. Garantieerklärungen aus rechtlicher Sicht.....	9
2. Überblick über die Elemente einer Garantieerklärung.....	11
3. Differenzierungsmerkmale von Garantien.....	13
4. Ausgestaltungsvarianten von Lifecycle-Garantien im Anlagenbau.....	31
5. Absatzpolitische Bedeutung von Garantien im Maschinen- und Anlagenbau.....	34
a) Bedeutung von Bindungseffekten der Initialkaufentscheidung im Maschinen- und Anlagenbau.....	34
b) Garantien als Ansatzpunkt zum Abbau der Lock-in-Problematik im Anlagengeschäft.....	37
II. Einsatz der Lebenszyklusrechnung im Garantiemanagement.....	39
1. Lebenszyklusrechnung als Informationsinstrument für das Garantiemanagement.....	39
2. Schwerpunktsetzungen der Literatur zur anlagenspezifischen Lebenszyklusrechnung.....	41
a) Kundenseitige Lebenszyklusrechnungen für Anlagen.....	41
b) Herstellerseitige Lebenszyklusrechnungen für Anlagen.....	44
3. Systematisierung der Zahlungswirkungen von Lifecycle-Garantiealternativen.....	46
4. Bedeutung von Verweilzeitangaben für die Abbildung der Garantiezahlungswirkungen.....	50
III. Grundansätze zur garantievertraglichen Operationalisierung und zur Messung der Anlagenverfügbarkeit.....	52
1. Varianten der garantievertraglichen Abgrenzung der Anlagenverfügbarkeit.....	52
2. Wichtige Funktionen zur Abbildung des Ausfallverhaltens.....	56
3. Kennzeichnung ausgewählter Lebensdauervertiefungsfunktionen.....	60

4. Zentrale Kenngrößen zur Verfügbarkeitsoperationalisierung .....	69
5. Ansatzpunkte einer Ermittlung der Systemzuverlässigkeit als Basis von Verfügbarkeitsprognosen .....	72
a) Prinzipielle Ausrichtungen in der Analyse der Systemzuverlässigkeit.....	72
b) Einsatz der Booleschen Systemtheorie für die Bestimmung der Systemverfügbarkeit .....	75
IV. Zentrale Ansatzpunkte zur Beeinflussung der Verfügbarkeit als Garantiegestaltungsalternativen .....	79
1. Kennzeichnung von Instandhaltungsmaßnahmen.....	79
2. Ansatzpunkte zur Beeinflussung der Anlagenverfügbarkeit .....	81
3. Kennzeichnung grundlegender Merkmale von Instandhaltungsstrategien ....	98
C. Einsatzmöglichkeiten erneuerungstheoretischer Lösungsansätze für die Gestaltung von Verfügbarkeitsgarantien .....	114
I. Möglichkeit zur exakt-analytischen Lösung von Entscheidungsproblemen in der Steuerung der Lebenszykluskosten von Verfügbarkeitsgarantien .....	114
1. Bestimmung von Erneuerungsgleichungen zur Ermittlung von Instandsetzungskostenbarwerten im Garantiezeitraum.....	114
2. Grenzen der analytischen Bestimmung der Erneuerungsgleichung.....	119
a) Abhängigkeit der Berechnungsmöglichkeit von Faltungspotenzen vom zugrunde liegenden Verteilungstyp.....	119
b) Besondere Schwierigkeiten bei mehrdimensionalen Erneuerungsgleichungen .....	121
3. Alternative Ansatzpunkte zur Ermittlung der Erneuerungsgleichung.....	124
II. Einsatz approximativer Erneuerungsfunktionen für die Abbildung der Wirkungen von Garantieentscheidungen .....	126
1. Approximationen der Erneuerungsgleichung bei gewöhnlichen und alternierenden Erneuerungsprozessen .....	126
2. Einsatzbeispiel einer approximativen Erneuerungsfunktion für garantiebegründete Konstruktionsentscheidungen.....	128
a) Ausstattungsdetails der Garantie und Ausgangsdaten für das Fallbeispiel .....	128
b) Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer konstruktiven Beeinflussung der Parameter der Lebensdauerverteilung .....	133

---

III. Verfügbarkeitserfassung von Systemstrukturen durch Markov-Prozessmodelle .....	142
1. Notwendigkeit einer Modellierung der Systemstruktur.....	142
2. Modellierung des Systemverhaltens mit Markov-Prozessen .....	146
a) Grundzüge der Modellierung von Zustandsübergängen in Markov-Prozessen .....	146
b) Ermittlung absoluter Zustandswahrscheinlichkeiten eines Markov-Prozesses als Basis für die Bestimmung der Systemverfügbarkeit .....	149
3. Fallbeispiel zur Modellierung des Systemverhaltens mit Markov-Prozessen .....	151
a) Mögliche Systemzustände bei unterschiedlichen Ausgangsdaten des Fallbeispiels.....	151
b) Verfügbarkeitsanalyse von Systemkonfigurationen mit komponentenweise identisch verteilten Lebens- und Reparaturdauern .....	152
c) Beispielhafte Einsatzmöglichkeiten des modellierten Systemverhaltens im Lifecycle-Garantiemanagement .....	159
d) Ermittlung des Systemzustands bei komponentenspezifischen Lebensdauer- und Instandsetzungsdauerverteilungen .....	161
4. Abhängigkeit des Lifecycle-Cost-Garantiemanagements von Modellierungs- und zugehörigen Lösungsmöglichkeiten technischer Systemverfügbarkeiten .....	171
D. Simulation als Informationsbasis für Garantieentscheidungen.....	174
I. Grundlagen eines Simulationsansatzes für die Gestaltung verfügbarkeitsbestimmter Lifecycle-Cost-Garantien .....	174
1. Grundstruktur simulativer Lösungsansätze.....	174
a) Kernidee von Simulationsrechnungen .....	174
b) Zentrale Merkmale von Simulationsmodellen.....	176
c) EDV-technische Umsetzung von Simulationskonzepten.....	177
2. Simulative Umsetzung komponenten- und systemspezifischer Verfügbarkeitsprognosen .....	179
a) Simulation der Systemverfügbarkeit bei einer Markov-Prozessmodellierung mit komponentenspezifischen Lebens- und Reparaturdauerverteilungen .....	179

b) Rechengenauigkeit der simulativen Lösung einer Erneuerungs- gleichung.....	184
II. Einsatzmöglichkeiten der Simulation im Garantemanagement.....	187
1. Fallbeispiel zum Einsatz einer Simulations-Standardsoftware im Lifecycle-Garantiemanagement .....	187
a) Simulation der Garantiezahlung aus dem Grundbeispiel .....	187
b) Implementierte Auswertungstools als Vorteil einer Simulations- Standardsoftware.....	189
c) Auswirkungen der Beeinflussung der Reparaturzeit auf den Kapitalwert der Garantie-Nettozahlungen.....	192
2. Abbildungsvorteile einer simulativen Ermittlung des Kapitalwerts der Garantie-Nettozahlungen .....	196
3. Ermittlung des notwendigen Stichprobenumfangs.....	201
III. Kopula-Konzept zur Simulation mehrdimensionaler Verfügbarkeitsgarantien .....	210
1. Ermittlungsproblematik bei der Simulation multivariat verteilter Zufallsgrößen .....	210
2. Anforderungen an die Konstruktion multivariater Verteilungsfunktionen .....	215
3. Konzept der Kopulas als Ausgangspunkt für die Simulation multivariat verteilter Größen .....	218
a) Merkmale einer Kopula.....	218
b) Kennzeichnung ausgewählter Kopulas.....	219
4. Möglichkeiten der Simulationsumsetzung bei einer gegebenen Kopula .....	223
a) Grundzüge der Transformationsmethode.....	223
b) Rekursive Simulation mit univariat bedingten Verteilungen .....	225
5. Umsetzung des Kopulakonzepts in der Simulation des Kapitalwerts der Garantie-Nettozahlungen.....	229
a) Fallbeispiel für die Simulation bei bivariaten Verteilungsfunktionen .....	229
b) Fallbeispiel zur Simulation bei einer trivariaten Verteilungsfunktion.....	232
c) Kopula-Konzept zur Analyse mehrdimensional beschränkter Verfügbarkeitsgarantien.....	235

E. Entwurf eines Simulationsmodells für das verfügbarkeitsbestimmte Lifecycle-Cost-Garantiemanagement .....	249
I. Kennzeichnung zentraler Merkmale des entwickelten Programms SIMGARANT zur Simulation von Lifecycle-Garantiewirkungen .....	249
1. Kennzeichnung zentraler Modellannahmen .....	249
2. Überblick über die Ausgestaltung zentraler Modellierungsbereiche in SIMGARANT .....	257
II. Überblick über die Modellierung des Komponentenverhaltens .....	260
1. Bedeutung des Aggregationsniveaus der Zustandsmodellierung für die Beurteilung garantiepolitischer Gestaltungsmaßnahmen .....	260
2. Abgrenzung der in SIMGARANT modellierten Komponentenzustände .....	262
3. Zulässige Zustandsübergänge in SIMGARANT .....	270
4. Markierungseinsatz zur Lenkung von Zustandsübergängen .....	275
5. Erfassung systeminduzierter Abhängigkeiten bei Instandhaltungsverweildauern .....	278
III. Details zur Redundanzbehandlung in SIMGARANT .....	280
1. Prinzip der Redundanzabbildung in SIMGARANT .....	280
2. Kernmerkmale der implementierten Funktionsübernahmestrategie .....	281
3. Instandhaltungsstrategische Besonderheiten bei Komponentenreserven .....	284
4. Abbildung der Laufzeitauswirkungen von Instandhaltungsmaßnahmen bei Komponentenreserven .....	287
5. Ermittlung des Garantiefalleintritts bei Reservehaltung .....	293
IV. Konzept der Alterungsmodellierung zur Ermittlung der Übergabe- information beim Zustandswechsel von Systemkomponenten .....	296
1. Altersabhängige Modellierung des Belastungswechsels von Reservekomponenten .....	296
a) Vorgehensweise bei der Komponentenaltersberücksichtigung in bedingten Lebensdauerverteilungen .....	296
b) Fallbeispiel zur Altersberücksichtigung bei einem Belastungswechsel .....	300
2. Modellierungsmöglichkeiten der Alterung intakter Komponenten in instandhaltungsfreien Laufzeit-Unterbrechungszeiten .....	302

3. Berücksichtigung des Erneuerungsgrads bei Instandhaltungsmaßnahmen im Komponentenalter.....	307
4. Fallbeispiel für die simulative Abbildung der Zustandsentwicklung in SIMGARANT .....	311
V. Kennzeichnung der Ablaufstruktur des Simulationstools SIMGARANT .....	320
1. Überblick über das in SIMGARANT realisierte Ablaufkonzept.....	320
2. Isolierte Prognosen der Verweildauern der Komponenten in den modellierten Zuständen.....	328
a) Ablaufstruktur für den Fall von Komponentenreserven .....	328
b) Verweildauerprognosen für den Klar- und Unklarzustand im reservefreien Fall .....	334
3. Abwicklung von Reparatur- oder Wartungswarteschlangen mit Priorisierungsregeln .....	336
4. Ermittlungsbereiche des Systemzustands .....	342
5. Umsetzung vorbeugender Instandsetzungsstrategien .....	345
6. Markierungskonzept zur Steuerung der Zustandsübergänge.....	347
a) Überblick über notwendige Ummarkierungsprüfbereiche.....	347
b) Besonderheiten bei der Abbildung von Lastwechselentscheidungen .....	353
c) Garantiefallmarkierung bei Komponenten- und Funktionsgarantien .....	362
7. Ermittlung der Garantiefrist bei Regenerationsgarantien .....	363
8. Berücksichtigung von Instandhaltungsüberlappungen am Ende des Garantiezeitraums .....	365
9. Vorgehen bei der Ergebnisaufbereitung .....	370
VI. Fallbeispiele zum Einsatz des Simulationstools SIMGARANT.....	372
1. Überblick über die komponentenspezifischen Ausgangsdaten für die Simulationsbeispiele.....	372
2. Komponentenübergreifende Festlegungen und Ergebnisse für den Basisfall .....	376
3. Auswirkungen ausgewählter Gestaltungsalternativen auf den Kapitalwert der Garantie-Nettozahlungen.....	379
a) Beispiele technischer Ansatzpunkte zur Garantierfolgsgestaltung.....	379
b) Beispiele ausgewählter garantievertraglicher Gestaltungsansätze .....	384

---

4. Ansatzpunkte zur simulativen Lösung ausgewählter Entscheidungsprobleme im Garantiemanagement .....	386
a) Bestimmung der Mindestangebotsprämie einer Garantieverlängerungsoption .....	386
b) Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer Komponentenwartung .....	389
F. Weiterentwicklungsmöglichkeiten des Simulationstools SIMGARANT für die Steuerung von Lifecycle-Garantien .....	392