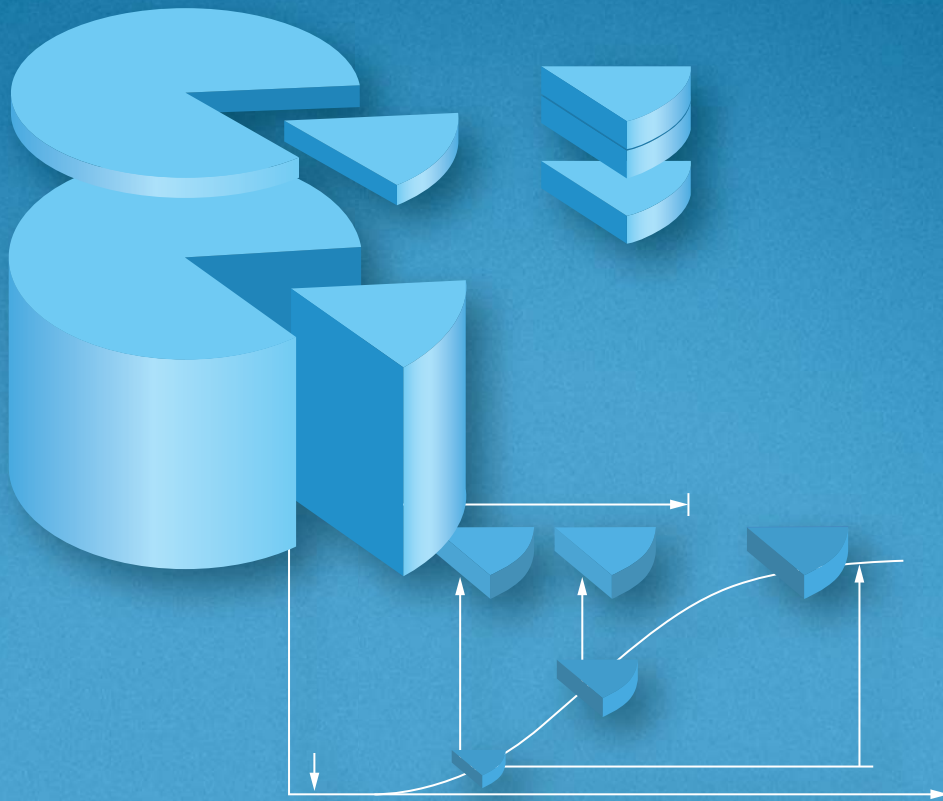




Qualitätsmanagement in der Bosch-Gruppe | Technische Statistik

6. Auswerten von **Felddaten**



BOSCH
Technik fürs Leben





Qualitätsmanagement in der Bosch-Gruppe
Technische Statistik

Nr. 6

Auswertung von Felddaten

Ausgabe 3.2021

2021-03-05 - SOCOS



Ausgabe 3.2021

2021-03-05 - SOCOS



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
1.1	Ziele der Felddatenauswertung	4
1.2	Schadteilanalyse und Problemlösung.....	5
1.3	Probleme bei der statistischen Auswertung.....	6
1.4	Datenbasis	7
1.5	Datenqualität.....	7
2	Grundlagen	8
2.1	Felddaten und Feldausfälle	8
2.2	Lebenszyklus eines Produkts im Kontext von Felddaten	9
3	Teilmarktfaktoren	10
4	Aufbereitung und Visualisierung von Felddaten	11
4.1	Treppentabelle	11
4.2	Nevada Chart	12
4.3	Isochronendiagramm	13
4.4	Säulendiagramm: Months In Service (MIS)	15
4.5	Streudiagramm: Part Time in Service (PTiS)	16
5	Hochrechnungsfaktoren.....	17
5.1	Zweck von Hochrechnungsfaktoren	17
5.2	Ermittlung von Hochrechnungsfaktoren	18
5.2.1	Einfache Ermittlung mit Hilfe der Treppentabelle.....	19
5.2.2	Graphische Ermittlung	26
5.2.3	Rechnerische Ermittlung.....	26
5.2.4	Grenzen der Methode	29
5.3	Ausfallprognose	30
5.3.1	Informationssammlung.....	30
5.3.2	Produktionsmengen	30
5.3.3	Informationen zur Logistik.....	31
5.3.4	Informationen zu Beanstandungen.....	32
5.3.5	Ermittlung der fehlerbehafteten Menge.....	32
5.3.6	Ermittlung der Ausfallzahlen bis zu einem bestimmten Datum.....	32
5.4	Risikoanalyse im Rahmen des 8D-Prozesses.....	33
5.4.1	Einführung.....	33
5.4.2	Phase 0: Vorphase	33
5.4.3	Phase 1: Frühphase der Risikoanalyse	33
5.4.5	Phase 2: Aufstellen einer Prognose (D4 bis D6)	34



5.4.6	Phase 3: Feldbeobachtung (beginnt mit D7)	34
5.4.7	Zusammenfassung	34
6	Mehrere gleiche Komponenten im Produkt	35
7	Ermittlung der Fahrstreckenverteilung	36
8	Systematische Felddatenerfassung	37
8.1	Datensicherheit	37
8.2	Datenanalyse im Rahmen von Feldtests	38
8.2.1	Klassiermethoden	38
8.2.2	Informationsgewinn aus Lastkollektiven	40
8.2.3	Datenqualität, Datenbereinigung	40
9	Weibull-Verteilung	41
9.1	Zweiparametrische Weibull-Verteilung	42
9.2	Darstellungen im Weibull-Netz	44
9.3	Interpretation der Ausfallsteilheit b	45
9.5	Dreiparametrische Weibull-Verteilung	46
9.5.1	Technische Bedeutung der ausfallfreien Zeit	46
9.5.2	Mathematische Berücksichtigung der ausfallfreien Zeit	46
9.5.3	Anmerkungen zum Parameter b bei Berücksichtigung von t_0	47
9.6	Ermittlung der Verteilungsparameter	47
9.6.1	Methode der kleinsten Quadrate	47
9.6.2	Median-Ranks-Methode	48
9.6.3	Rangregression	50
9.6.4	Ermittlung der Weibull-Parameter in EXCEL	50
9.6.5	Maximum-Likelihood-Methode	51
9.7	Vertrauensbereiche	51
9.8	Exponentialverteilung	52
10	Auswertungen auf Basis der Weibull-Verteilung	53
10.1	Beispiel eines abgeschlossenen Tests	53
10.2	Datenquellen	55
10.3	Sudden-death-Methode für Feldausfälle	56
10.4	Auswertungsmöglichkeit bei konstanter Ausfallrate	59
10.5	Auswertung mit Hilfe der Fahrleistungsverteilung	60
10.6	Zusammenfassung von Daten	60
10.7	Hochrechnungen innerhalb der Gewährleistungszeit	62
10.8	Weibull-Auswertung einer Treppentabelle	62
10.9	Weibull-Auswertung zu Isochronendiagrammen	63
10.10	Mischverteilung	64



10.11	Trennung verschiedener Ausfallmechanismen	65
11	Fehlerquellen	67
11.1	Betroffener Anteil q	67
11.2	Unsicherheit in der Wahl des Modells	67
12	Simulation von Felddaten	67
13	Begriffe und Abkürzungen	68
13.1	Symbole und Akronyme	68
13.2	Begriffe und Definitionen	68
14	Literatur	78
15	Index	80



1 Einleitung

Herausragende Qualität unserer Produkte und Dienstleistungen ist eines der obersten Unternehmensziele. Die Sicherung der Produktzuverlässigkeit als „Teil der Qualität“ erfordert eine langfristige Planung. Schon beim Beginn der Konstruktion neuer Produkte werden Qualitätsziele und somit auch Zuverlässigkeitsziele festgeschrieben und häufig auch mit den Automobilherstellern fest vereinbart.

Die entwicklungs- und fertigungsbegleitende Dauererprobung unserer Produkte ist auf diese Ziele abgestimmt. Jedoch gibt erst die Beobachtung der Produktqualität beim Endverbraucher („im Feld“) letztendlich Aufschluss darüber, ob das Qualitätsziel erreicht worden ist. Zur Produktbeobachtung gehört die Erfassung und Auswertung von Gewährleistungsdaten. Daraus abgeleitete Kenngrößen dienen Automobilherstellern und Zulieferern als Regelgrößen im umfassenden Qualitätsregelkreis.

In dieser Schrift werden Verfahren dargestellt, die solche Kenngrößen zur Beurteilung der Erzeugniszuverlässigkeit beim Endverbraucher liefern und somit im Rahmen der Qualitätsregelung und des Lieferantenvergleichs eingesetzt werden können.

ANMERKUNG: Der Einfachheit halber und dem üblichen Sprachgebrauch entsprechend wird im vorliegenden Heft das Wort „Dauer“ stellvertretend für alle möglichen, für einen Schädigungsmechanismus spezifischen Lebensdauermerkmale verwendet. Typischerweise geht es um Angaben wie Zeit/Betriebszeit (Stunden, Monate, Jahre), zurückgelegte Strecke, Fahrleistung, Anzahl von Lastwechseln, Betätigungen, Schaltvorgängen, Arbeitszyklen, Umdrehungen. Es kann sich also um messbare oder zählbare Merkmale handeln.

Als Felddaten bezeichnet man im vorliegenden Kontext die Gesamtheit aller Daten, die im Zusammenhang mit der Nutzung eines Produkts im Feld anfallen. Im engeren Sinne sind dies alle Daten, die mit Fehlern, Störungen, Mängeln und Ausfällen verbunden sind und zu Beanstandungen des Kunden führen.

Die erste Auflage des vorliegenden Hefts hat den Begriff „Felddaten“ in diesem engeren Sinne fast ausschließlich auf Reklamations- und Ausfalldaten bezogen, also die für alle Stakeholder eher negativen Aspekte des Themas. Dies ist auch weiterhin der Schwerpunkt der Kapitel 2 bis 7.

Im weiteren Sinne gehören zu den Felddaten aber auch Informationen über die Produktnutzung wie Betriebszeiten, Fahrleistungen, Verbräuche, Belastungskollektive oder Kundenfeedback in Form von Bewertungen, Erfahrungen, Wünsche und Verbesserungsvorschläge. Hier geht es also um eine eher zukunftsorientierte Grundhaltung und präventive Aspekte. Auf diesen Themenbereich geht insbesondere das Kapitel 9 ein.

Zwischen diesen Standpunkten und Sichtweisen zu unterscheiden ist nicht ganz leicht. Letztlich sollen alle dargestellten methodischen Ansätze und Aktivitäten dem Kundennutzen dienen und zur Kundenzufriedenheit beitragen. Dennoch werden im vorliegenden Heft folgende Schwerpunkte erkennbar.

- Kapitel 2 bis 7: Grundlagen, Visualisierung und einfache statistische Ansätze
- Kapitel 8 und 9: Systematische Felddatenerfassung in Bezug auf die Produktnutzung
- Kapitel 10 bis 12: Auswertungen im Zusammenhang mit der Weibullverteilung



1.1 Ziele der Felddatenauswertung

Die Normen ISO 9001 und IATF 16949 enthalten zahlreiche Anforderungen, bei denen es direkt oder indirekt um Kundenreklamationen und Feldausfälle geht, insbesondere in den Kapiteln zu:

- Risikoanalysen
- Kommunikation mit den Kunden
- Problemlösung
- Kundenbeanstandungen und Schadteilanalyse bei Feldausfällen
- Nichtkonformität und Korrekturmaßnahmen

Unabhängig davon liegt die Feldbeobachtung und Analyse von Felddaten aber auch im eigenen Interesse des Unternehmens, z. B. zum Zweck der

- frühzeitigen Entdeckung von Problemen aufgrund von Designfehlern, Herstellfehlern, fehlerhaften Zulieferteilen (Frühwarnsystem)
- Abschätzung der Kosten aus Feldbeanstandungen; Berichtswesen zu externen Fehlerkosten
- Statistische Modellierung und Prognose des weiteren Ausfallverhaltens und entsprechender Kostenentwicklungen (notwendige Rückstellungen)
- Abschätzung der Produktzuverlässigkeit und Ableitung von Designänderungen
- Untersuchung der Korrelation von Versuchs- und Felddaten, um die Zuverlässigkeitsabsicherung zukünftiger Produkte zu optimieren
- Ableitung von Strategien/Empfehlungen hinsichtlich Gewährleistung und Wartungsintervallen

In der Regel gibt es nur wenige Reaktionsmöglichkeiten:

- Software-update (over-the-air update bei IoT-fähigen Produkten)
- Service-/Kundendienst-Aktion
- Rückruf

ANMERKUNG: Ein dokumentiertes Verfahren zur Bearbeitung von Kundenreklamationen gemäß ISO 9001 und IATF 16949 deckt keine Produktbeobachtungspflichten im Rahmen der Produkthaftung ab.

LITERATURHINWEIS: [VDA Rekl], [VDA OtA]



1.2 Schadteilanalyse und Problemlösung

Die Schadteilanalyse (Befundung, part analysis) soll eine eindeutige Aussage über die Funktionserfüllung des beanstandeten Produkts führen. Das Ergebnis soll auch Aufschluss darüber geben, ob eine Reklamation anerkannt werden kann oder nicht. [VDA Feld] geht davon aus, dass das beanstandete Produkt zu diesem Zweck im Rahmen einer Standardprüfung oder Belastungsprüfung untersucht werden kann. Es gibt aber auch Fälle, in denen der Eintrag elektrischer, mechanischer oder hydraulischer Energie zu einer völligen inneren Zerstörung eines Produkts führt.

Erste am Produkt feststellbare Indizien sind z. B.

- der Fehlerort: Wo am Teil ist der Fehler lokalisiert?
- die Fehlerart: Was am Teil ist betroffen?

Aus technischer Sicht geht es im weitesten Sinn darum, festzustellen, warum ein Teil ausgefallen ist. Schadteilanalyse ist eine Art Detektivarbeit, um nachzuvollziehen, was sich abgespielt hat und zu erklären, welche Ursache(n) schließlich zum Ausfall geführt hat/haben.

In diesem Zusammenhang werden oft Begriffe benutzt wie Ausfall- oder Schadensmechanismus, Schadens-, Ausfall- oder Versagensprozess, Schädigungsmechanismus, Ausfallmodell. Gemeint ist in allen Fällen ein physikalischer, chemischer, elektrochemischer oder sonstiger Vorgang, der zu einem Ausfall führt oder geführt hat. Beispiele sind in der Regel zeitabhängige Vorgänge wie Materialermüdung, Rissbildung, Migration, Korrosion. Von spontanen Ausfällen durch Überlastung sei einmal abgesehen.

[VDA 3.2] definiert einen Schädigungsmechanismus als "Vorgänge, die aufgrund von Belastungen zu einer allmählichen Veränderung der Eigenschaften einer Einheit führen."

Das Ziel der Analyse ist die systematische Untersuchung eines Sachverhalts und seiner Ursachen. Entsprechende methodische Ansätze beschreibt das [Heft 16]. Im Fokus sind dabei insbesondere Ursache-Wirkungs-Beziehungen von Produkten, Teilen und Produktionsprozessen. Das Heft enthält auch eine Vorgehensweise zur Problemlösung bei Produktproblemen.

Die im vorliegenden Heft Nr. 6 beschriebenen Methoden können ggf. die Faktensammlung unterstützen und zur Beantwortung der 5 W-Fragen beitragen: was, wo, wann, wer, wieviel?



1.3 Probleme bei der statistischen Auswertung

Den im Abschnitt 1.1 dargestellten hohen Erwartungen an die Möglichkeiten der Felddatenauswertung stehen oft stark einschränkende Rahmenbedingungen gegenüber.

Bei frühzeitiger Entdeckung von Auffälligkeiten im Feldverhalten eines Produkts liegen nur wenige Daten dazu vor. Zugleich erwarten verständlicherweise alle Interessengruppen bereits in diesem frühen Stadium möglichst verlässliche Prognosen zum weiteren Ausfallverhalten. Es sollte allerdings jedem klar sein, dass bei statistischen Modellierungen und Analysen auf Basis kleiner Datenmengen große Unsicherheiten unvermeidlich sind. Aus statistischer Sicht bedeutet das insbesondere, dass Vertrauensbereiche dann sehr groß ausfallen. Eine ggf. notwendige Aufteilung der wenigen vorhandenen Daten z. B. wegen konkurrierender Ausfallmechanismen oder Produktvarianten verschlimmert die Situation noch zusätzlich.

Der gegenteilige Fall, d. h. eine rasch zunehmende Anzahl von Ausfällen, erfreut allenfalls den Statistiker, da die große Datenbasis ihm seine Arbeit erleichtert. Für den Hersteller bedeutet das aber, sich um eine schnelle Ermittlung der Grundursachen, Eingrenzung der betroffenen Produkte und wirksame Problemlösung kümmern zu müssen.

In Diagrammen, welche als Abszisse (horizontale Achse) eine Zeitachse darstellen, entsprechen die am weitesten rechts liegenden Datenpunkte der maximalen Lebensdauer, die ein Produkt des Datensatzes erreicht hat. Über diesen Zeitpunkt hinausgehende Extrapolationen, um Aussagen über das Verhalten der Produkte zu noch größeren Zeiten abzuleiten, sind mit Skepsis zu betrachten. Das gilt insbesondere auch für Produkte, die noch nicht lange im Feld sind.

Im Allgemeinen sind Felddaten hinsichtlich Einsatzzeit oder Fahrstrecke der Produkte beschränkt. Selbst bei großzügigen Garantiezusagen von Fahrzeugherstellern gibt es meist eine Beschränkung auf eine maximale Fahrleistung. Darüber hinaus kann die Garantie für bestimmte Fahrzeugkomponenten zeitlich reduziert oder ausgeschlossen sein. Über Ausfälle, die sich nach der Gewährleistungs- oder Garantiezeit ereignen, erhält der Fahrzeughersteller i. Allg. keine Informationen, sofern er keinen eigenen Pannendienst unterhält. In der Regel setzen solche Dienstleistungen aber kostenpflichtige Anschlussgarantien oder Schutzbriefe voraus. Unterschiedliche Garantiezeiten und länderspezifische Gewährleistungsgesetze erschweren also die Felddatenauswertung.

Sofern an den Produkten eines bestimmten Produktionszeitraums bis zu einem Zeitpunkt t nach der Inbetriebnahme keine Ausfälle aufgetreten sind, ist lediglich eine Aussage über die Mindestzuverlässigkeit anhand des Success-Run-Prinzips möglich [Heft 13].



1.4 Datenbasis

Für die Auswertung von Felddaten werden je nach Fragestellung z. B. folgende Angaben benötigt:

- Produktionsdatum (PD unkodiert, tt.mm.jj) oder Produktionsmonat/-quartal
- In diesem Monat gefertigte Stückzahl, Produktionsmenge (Produkte, Fahrzeuge)
- Kaufdatum des Produkts bzw. Zulassungsdatum des Fahrzeugs
- Ausfalldatum/Reklamationsdatum
- Einsatzzeit, Betriebszeit/Fahrleistung bis zum Ausfall (in Zeiteinheiten oder km/mls)
- Ggf. Fahrstrecken-Verteilung der betrachteten Grundgesamtheit

Es ist in der Regel vorteilhaft, die Daten entsprechend dem Produktionsdatum zu ordnen.

[VDA Feld] listet darüber hinaus einige Informationen auf, welche zur Fehleranalyse und Eingrenzung betroffener Produkte relevant sein können, z. B.

- Fahrzeugdaten, wie etwa Motor- und Getriebevarianten, Sonderausstattungen z. B. Anhängerkupplung
- Einsatzbedingungen, z. B. landesspezifische und klimatische Besonderheiten, Kraftstoffqualität

1.5 Datenqualität

Vor einer Datenanalyse muss erfahrungsgemäß eine Prüfung und Bereinigung der Datenbasis erfolgen. Bei Auswertungen der Felddaten von Pkw wurden etwa folgende Beobachtungen gemacht:

- der Datensatz enthält 0-km-Ausfälle
- das Verkaufsdatum liegt vor dem Produktionsdatum, die „Lagerzeit“ wird negativ
- Produktionsdatum und Ausfalldatum sind identisch; Betriebszeit ist null
- in wenigen Fällen ungewöhnlich große Fahrleistungen, z. B. > 169 Tkm/Jahr
- einzelne unplausible Daten, z. B. 2 km in 7 Monaten bei zugelassenem Fahrzeug
- auch möglich: sehr lange „Lagerzeiten“ vor Inbetriebnahme, z. B. mehr als 1 Jahr
- Produkte verschiedener Produktklassen sind gemischt (z. B. Ausfalldaten von 2-, 4- und 6-Zylinder-Motoren im selben Datensatz)
- unterschiedliche Maßeinheiten, z. B. Angaben in 1000 km statt km
- Eingabefehler, Übertragungsfehler, Tippfehler, fehlende Angaben

Anmerkung 1: 0-km- oder 0-h-Ausfälle entsprechen der Lebensdauer null. Sie können nicht im Rahmen einer Weibull- oder Lognormal-Verteilung beschrieben werden ($\log(0) \rightarrow -\infty$).

Anmerkung 2: Es ist nicht völlig auszuschließen, dass Datensätze statistische Ausreißer enthalten, weil Produkte außerhalb des vorgesehenen Gebrauchs (intended use) oder missbräuchlich verwendet werden (misuse), z. B.

- Einsatz von Fahrzeugen auf Rennstrecken oder im Rennbetrieb auf öffentlichen Straßen
- Verwendung des Bremspedals für Bodybuilding-Übungen bei Stillstand des Fahrzeugs
- Dauerbetrieb von Heimwerker-Tools im professionellen Bereich
- Überlastung von Elektrogeräten durch Anbau falscher/ungeeigneter Werkzeuge



2 Grundlagen

Wenn es um Felddaten und mögliche Risiken im Feld geht, ist es wichtig, grundlegende Konzepte und Begriffe zu erläutern, um Fehlinterpretationen und Missverständnisse zu vermeiden. Daher müssen in diesem Kontext einige umgangssprachliche Formulierungen durch eindeutige Definitionen präzisiert werden.

2.1 Felddaten und Feldausfälle

Wie bereits im Kapitel "Einführung" beschrieben, gibt es zwei Arten von Felddaten: Daten zu Belastungen und Ausfällen.

Kurz gesagt geht es bei Belastungen im Feld um die Belastungen, die eine Fahrzeugflotte im Laufe der Zeit erfahren hat, unabhängig davon, ob Ausfälle aufgetreten sind oder nicht.

Diese Belastungen sind von besonderer Bedeutung, wenn es darum geht, das zeitliche Ausfallverhalten mathematisch zu modellieren, um Vorhersagen treffen zu können. Das Kapitel 9 enthält eine weiterführende Darstellung, wie solche Informationen systematisch gesammelt werden.

Bei Daten zu Feldausfällen geht es dagegen um einen konkreten Sachverhalt, bei dem die Erwartungen an die Produktqualität im Feld nicht erfüllt werden. Diese Daten stellen eine wichtige Quelle für Auswertungen zur Produktqualität dar. Ihre Erfassung ist aber auch notwendig aufgrund gesetzlicher Anforderungen zur Feldbeobachtung. Deshalb ist die Implementierung geeigneter Prozesse zur Erfassung und zum Umgang mit Felddaten für Bosch eine Selbstverständlichkeit.

Für das Verständnis der Qualität und des Abdeckungsgrads von Felddaten ist es notwendig, die Schritte zu verstehen, die erfolgen, nachdem sich ein Feldausfall ereignet hat und bis Bosch davon erfährt.

Aufgrund des Ausfalls bringt der Kunde das Fahrzeug zu einer Werkstatt. Abhängig von der Art des Ausfalls (Fehlerursache) und der Dringlichkeit der Reparatur wird dies bereits die echte Ausfallzeit etwas verwischen. In der Werkstatt müssen dann zwei Dinge passieren: Die Werkstatt muss die richtige(n) Fehlerursache(n) finden und diese in die Datenbank des OEM eintragen.

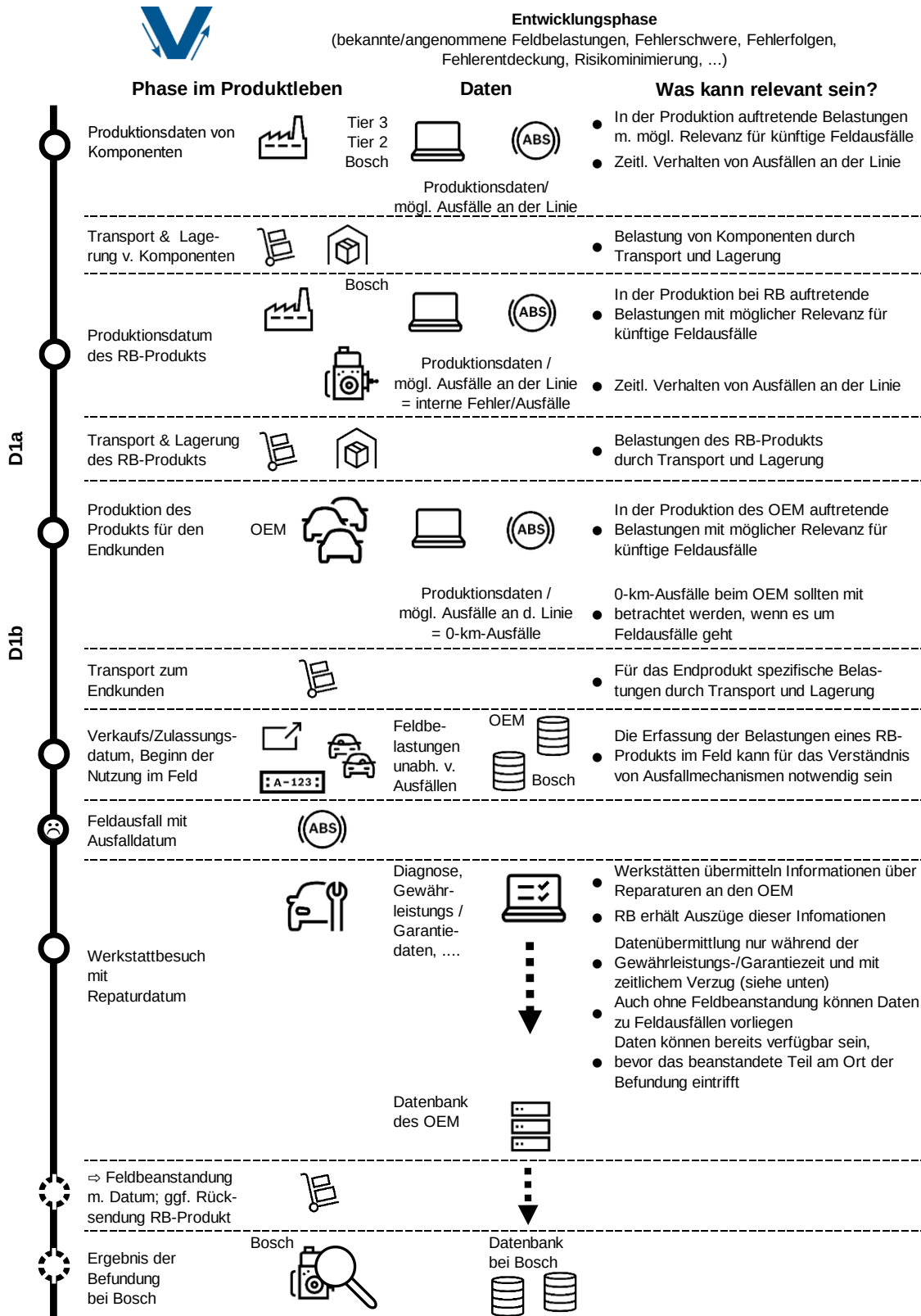
Des Weiteren muss die Werkstatt sich an den vom OEM vorgesehenen Prozess zum Umgang mit Ausfallteilen halten, damit diese beim OEM und/oder Bosch ankommen. Mit einigen Kunden hat Bosch Vereinbarungen getroffen, wonach nur Teile aus bestimmten Märkten zur weiteren Untersuchung an Bosch übermittelt werden. Nach dem Abschluss einer solchen Untersuchung kann dem Ausfall/Fehler eine Grundursache (root cause) zugeordnet werden, sofern das nicht bereits anderweitig möglich war, z. B. aufgrund der OBD-Daten (On-Board-Diagnose des Fahrzeugs).

Es kann also einen großen Unterschied machen, welche Art von Felddaten verwendet wird und man muss deren Unzuänglichkeiten verstehen. Viele Automotive-Kunden von Bosch haben die Möglichkeit, unmittelbar Gewährleistungs- oder Felddaten aus eigenen Datenbanken auszuwerten. Jedoch ist in dem Fall die Grundursache oft unklar und die Bosch-Verantwortlichkeit für den Ausfall ist nicht unbedingt klar und bestätigt.



2.2 Lebenszyklus eines Produkts im Kontext von Felddaten

Der typische Lebenszyklus eines Bosch-Produkts ist in der folgenden Abbildung 1 schematisch und exemplarisch für den Automotive-Bereich dargestellt, um einige Stufen und grundlegende Begriffe zu erläutern, die im Fall eines Ausfalls relevant sind.



Das relevante Produktleben beginnt nicht mit seiner Endmontage vor der Auslieferung an den Endkunden. Die Historie eines Produkts beginnt bereits mit der Herstellung seiner Komponenten. Es ist relevant, unter welchen Bedingungen ein Produkt hergestellt wird oder welchen Belastungen das Produkt oder seine Komponenten ausgesetzt wurde(n), egal ob es sich um das Endprodukt handelt, das der Endkunde erhält oder um die Komponenten eines größeren Systems.

Es gibt mehrere Produktionsdaten, die Produktionsdaten der Komponenten, des Bosch-Produkts und des Endprodukts. Des Weiteren kann es andere Produktionsdaten von Zwischenprodukten geben, wenn Bosch als Tier2-Lieferant fungiert. Eng mit diesen Zeitpunkten verknüpft sind Angaben zum Produktionszeitraum, Produktionslos und Lieferlos. Diese Angaben können wichtig sein für die Ermittlung oder Eingrenzung eines betroffenen Produktionsvolumens.

3 Teilmarktfaktoren

Unter der Annahme, dass sich das Ausfallverhalten von Produkten in einem Teilmarkt auf andere Länder/Märkte übertragen lässt, so kann die Beanstandungs- bzw. Ausfallquote für den Gesamtmarkt über sogenannte Teilmarktfaktoren ermittelt werden.

In der Regel entspricht der Teilmarkt einem oder mehreren Ländern oder einer Region.

Der Ansatz zur Hochrechnung über Teilmarktfaktoren setzt voraus, dass alle Beanstandungen aus einem Teilmarkt gemeldet und die beanstandeten Produkte aus diesem Teilmarkt für Fehleranalysen zur Verfügung stehen.

Aus Sicht eines Fahrzeugherstellers wird der Teilmarktfaktor in erster Näherung durch das Verhältnis der Produktions-/Zulassungszahlen im Teilmarkt und der Gesamtproduktionszahl im zu betrachtenden Zeitraum bestimmt.

Ansonsten kommen als Teilmarktfaktoren z. B. folgende Verhältniszahlen in Frage:

- Verhältnis der Anzahl ausgefallener Teile, die an den Hersteller zurückgesandt werden und der Anzahl der insgesamt im Feld ausgefallenen Teile
- Verhältnis der Anzahl in einer bestimmten Region ausgefallener Teile und der Anzahl weltweit ausgefallener Teile
- Verhältnis der Anzahl in einer bestimmten Region produzierter Teile und der Anzahl weltweit produzierter Teile

Die Anwendbarkeit dieser recht simplen Methode ist allerdings in Frage zu stellen, wenn z. B. das Melde- und Rücksendeverhalten des Kunden unzuverlässig ist oder es markt- oder modellspezifische Unterschiede beim Ausstattungsanteil von Fahrzeugen gibt.



4 Aufbereitung und Visualisierung von Felddaten

4.1 Treppentabelle

Die Erfahrung zeigt, dass 0-km-Ausfälle und Feldausfälle oft spezifischen Fehlerursachen zugeordnet werden können, wenn ausschließlich Produkte betroffen sind, die während eines bestimmten Produktionszeitraum hergestellt wurden. In diesem Fall würde man erwarten, dass es einen systematischen Zusammenhang zwischen Okm- oder Feldqualität und Produktionsdatum gibt. In der Regel gibt es keinen systematischen Zusammenhang zwischen Okm- oder Feldqualität und dem Verkaufsdatum. Folglich ist das Verkaufsdatum gewöhnlich kein relevanter Anhaltspunkt.

Die Treppentabelle ist eine Darstellung der nach Meldezeitraum (Monat, Quartal) und Fertigungszeitraum (Monat, Quartal) geordneten Ausfälle eines Produkts. Dazu werden alle seit Beginn des Fertigungsmonats bis zum Ende des Erfassungsmonats gemeldeten Ausfälle (beim Endkunden aufgetretenen und von RB akzeptierten Beanstandungen) aufsummiert und absolut und/oder anteilig (in ppm), d. h. bezogen auf die gesamte bis zum Ende des Erfassungsquartals gefertigte Menge, angegeben.

PQ	← Erfassungsquartal (EQ)												
	3Q.2017	2Q.2017	1Q.2017	4Q.2016	3Q.2016	2Q.2016	1Q.2016	4Q.2015	3Q.2015	2Q.2015	1Q.2015	4Q.2014	3Q.2014
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
3Q.2014	3193	3181	3079	2972	2747	2559	2223	1805	1314	831	413	147	12
4Q.2014	3353	3324	3258	3113	2890	2662	2095	1403	861	480	99	4	
1Q.2015	2381	2319	2228	2110	1929	1698	1145	750	406	147	17		
2Q.2015	2574	2558	2360	2178	1766	1342	765	457	132	17			
3Q.2015	3331	3233	2913	2541	1891	1250	492	209	33				
4Q.2015	3190	3021	2650	2123	1484	817	237	27					
1Q.2016	3739	3500	2862	2409	1632	518	0						
2Q.2016	2684	2451	1680	1011	451	36							
3Q.2016	1601	1230	493	110	12								
4Q.2016	768	621	197	18									
1Q.2017	332	173	14										
2Q.2017	38	15											
3Q.2017	0												

Tab. 1: Treppentabelle; Stand Ende 12.2017



4.2 Nevada Chart

Das Nevada-Chart ist ein Standardformular zur Sammlung von Daten für eine Weibull-Analyse. Zu jedem Zeitabschnitt, in dem Teile in Betrieb genommen wurden, gehört eine Angabe der Teileanzahl und eine nach Ausfallmonaten geordnete Anzahl der Feldrückläufer.

Die Anzahl der Teile "in service" minus die Anzahl ausgefallener Teile ergibt die Anzahl der noch in Betrieb befindlichen Teile im Feld. Im Rahmen der Weibull-Analyse werden die noch in Betrieb befindlichen Teile wie "Herausnahmen" (suspensions) behandelt.

Im folgenden Beispiel wurden 1750 Teile im März 2016 in Betrieb genommen. Im April 2016 sind drei Teile ausgefallen und wurden zurückgeschickt. Die übrigen 1747 Teile sind noch im Betrieb und können potenziell in den folgenden Monaten ausfallen.

Am Ende des Analysezeitraums werden alle in Betrieb genommenen Teile, die nicht ausgefallen sind, als "Herausnahmen" (suspensions) betrachtet.

Die Tabelle muss für jede Ausfallart separat erstellt und ausgewertet werden.

Anzahl Teile	In Service Datum	Anzahl der Feldrückläufer im Rücksendemonat											
		Feb. 16	Mär. 16	Apr. 16	Mai 16	Jun. 16	Jul.16	Aug. 16	Sep. 16	Okt. 16	Nov. 16	Dez. 16	
1500	Jan. 2016	0	3	1	0	2	3	3	1	3	4	1	
1750	Feb. 2016		1	4	1	2	2	3	2	0	2	2	
1750	Mär. 2016			3	4	2	5	3	4	1	1	2	
2000	Apr. 2016				4	1	2	2	1	2	1	1	
2500	Mai 2016					0	3	2	1	2	1	1	
3000	Jun. 2016						1	1	2	2	4	3	
2500	Jul. 2016							5	2	2	4	3	
1500	Aug. 2016								1	3	0	2	
1500	Sept. 2016									2	4	1	
2500	Okt. 2016										0	1	
3500	Nov. 2016											1	
3500	Dez. 2016												

Tab. 2: Nevada Chart

ANMERKUNG: Die Erstellung des Nevada Charts von Hand ist ein mühsamer und fehlerträchtiger Vorgang, insbesondere, wenn nicht-triviale Verzugszeiten berücksichtigt werden müssen.



4.3 Isochronendiagramm

Entnimmt man dieser Tabelle die Ausfallanteile gleichaltriger Produkte (Zeitraum zwischen Fertigung und Erfassung ist konstant), so lässt sich daraus die sogenannte Isochronendarstellung (das Isochronen- oder Schichtliniendiagramm) ableiten. Isochronen sind Kurven gleichen Erzeugnisalters. Ausfälle werden in diesem Fall also nicht über dem Erfassungsmonat aufgetragen, sondern dem Fertigungsmonat zugeordnet.

In der Abb. 2 sind die Isochronen für das Erzeugnisalter 0, 3, 6, 9, 12 und 24 Monate (MIS, Months in Service, Einsatzzeit). Die 0-Monats-Isochrone fasst Ausfälle von Erzeugnissen zusammen, deren Alter weniger als einen Monat beträgt. In diesem Fall sind also Fertigungsmonat und Meldemonat identisch, entsprechend den Eintragungen am gestuften unteren Rand der Treppentabelle.

Verfolgt man eine Isochrone nach rechts, so sind zeitliche Änderungen der Produktqualität unmittelbar erkennbar. Insbesondere bietet es sich an, Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung beispielsweise in Form von konstruktiven Modifikationen oder Änderungen der Produktions- und Montageprozesse an der Zeitachse zu vermerken.

Deren Wirksamkeit ist dann am weiteren Verlauf der Isochronen mit entsprechender zeitlicher Verzögerung erkennbar. Ebenso kann aus dem Verhalten der untersten Isochronen schon frühzeitig auf eine kritische Tendenz bzgl. der Erzeugnisqualität eines Fertigungsquartals geschlossen werden.

Da die bis zum Ende des Erfassungsmonats ausgefallenen Erzeugnisse eines Produktionsmonats aufsummiert werden, können sich die Isochronen nicht überschneiden. Es ist allenfalls möglich, dass keine nennenswerten Ausfälle von Erzeugnissen aus dem betrachteten Produktionsmonat mehr auftreten. In diesem Fall nimmt der Ausfallanteil dieses Produktionsmonats nicht weiter zu, und die folgenden Isochronen berühren sich in dem entsprechenden Punkt.

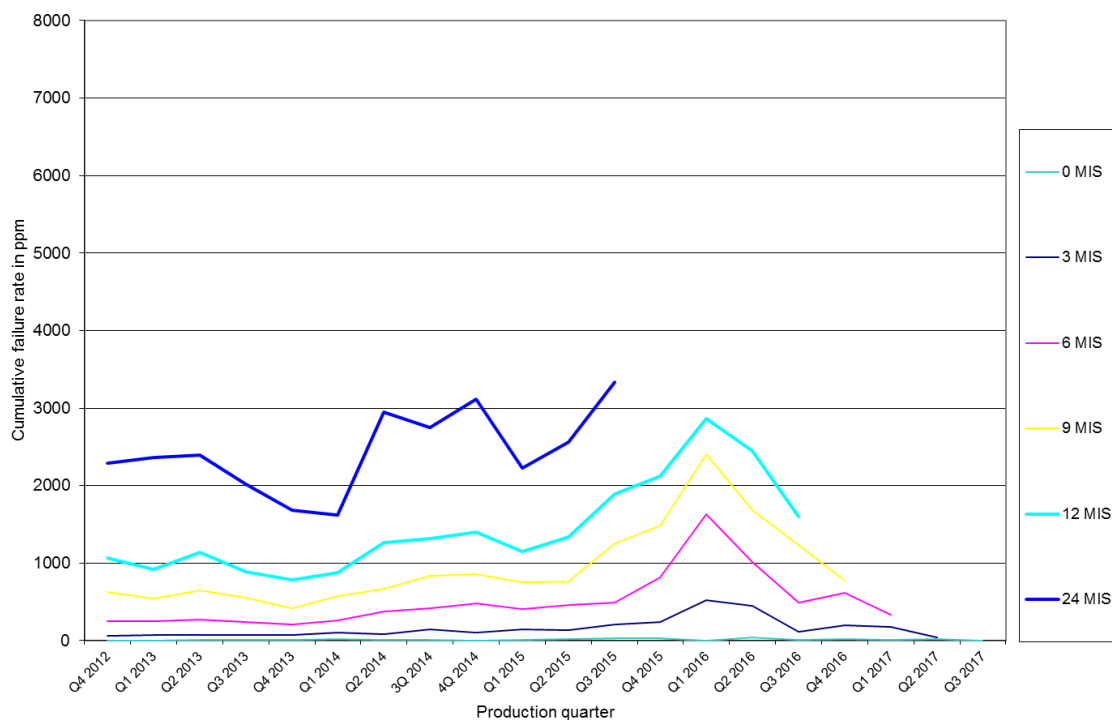


Abb. 2: Isochronendiagramm; Stand: Ende 12.2017.



Die Werte der Isochronen bei einem bestimmten Fertigungsmonat (von unten nach oben) entsprechen den in der Treppentabelle von rechts nach links abzulesenden Werten in der dem betrachteten Fertigungsmonat entsprechenden Zeile. Eine bestimmte Isochrone entspricht einer "Diagonalen" in der Treppentabelle.

Die Treppentabelle und die Isochronendarstellung basieren auf den tatsächlich gemeldeten und anerkannten Ausfällen. Deren Zahl entspricht nicht notwendigerweise der Zahl der tatsächlich aufgetretenen Ausfälle. Ursachen dafür können z. B. sein:

- der Fehler tritt nur unter bestimmten Betriebsbedingungen auf,
- der Fahrzeugfahrer wird nicht auf den Fehler aufmerksam,
- der Fahrer sieht sich wegen des subjektiv unbedeutenden Fehlers zu keiner Reklamation veranlasst,
- die Kfz-Händler-Werkstatt findet nicht die wahre Fehlerursache oder „vertröstet“ den Fahrzeugbesitzer.

Selbstverständlich spielt auch das Serviceverhalten des Fahrzeugherstellers eine Rolle. Er kann beispielsweise

- einen Rückruf aller betroffenen Fahrzeuge veranlassen,
- die Werkstätten auffordern, im Rahmen von Wartungsdiensten auf das Fehlerbild zu achten,
- die Werkstätten auffordern, die Fahrzeugbesitzer gezielt nach dem Auftreten des Fehlers zu befragen.

Sofern ein Teil der in einem bestimmten Zeitraum gefertigten Erzeugnisse ins Ausland, oder in Gebiete mit unvollständiger Erfassung geliefert werden, ist der gemeldete Ausfallanteil um einen bestimmten Faktor kleiner, als der tatsächliche Ausfallanteil. Dieser sogenannte Teilmarktfaktor muss bei den dem Erstausrüsterkunden zu erstattenden Gewährleistungskosten berücksichtigt werden.

Zum Zweck der Ermittlung von notwendigen Gewährleistungsrückstellungen ist eine Hochrechnung der gemeldeten Ausfälle auf das Ende der Garantiezeit (bei Kulanzgewährung auch darüber hinaus) erforderlich. Wegen der vorstehend beschriebenen Problematik ist dies jedoch nur mit relativ großer Unsicherheit möglich.

Hinweis: In der Literatur sind gelegentlich Isochronendiagramme wiedergegeben, bei denen die einzelnen Isochronen trotz gleicher Bedeutung etwas abweichend von obigem Beispiel mit <1 , <2 , ..., $<n$ gekennzeichnet sind. Zusätzlich kann am oberen Rand zu jedem Fertigungsquartal die zugehörige Fertigungsmenge angegeben sein. Es ist offensichtlich, dass das Isochronendiagramm den praktischen Anforderungen entsprechend modifiziert werden kann.



4.4 Säulendiagramm: Months In Service (MIS)

Dieses Diagramm stellt für einzelne Fahrzeug-Produktionsjahre die Anzahl von Beanstandungen pro Million verkaufter Komponenten dar.

Datenquellen sind entsprechende Datenbanken mit Beanstandungsdaten, z. B. der Global Warranty Analyzer (GWA).

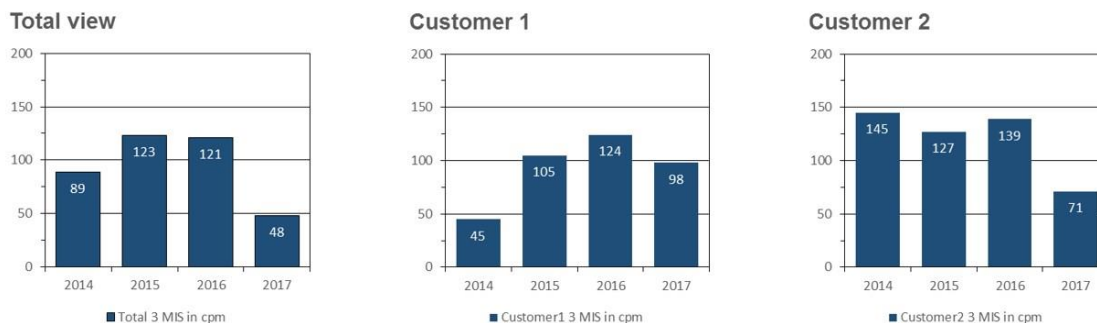
Darin sind alle Beanstandungen berücksichtigt (Bosch-Verantwortung, Kundenverantwortung, in Spezifikation und offen / wird untersucht).

Die Analyse auf Basis von 3-MIS-Daten (die Beanstandungen traten innerhalb der ersten 3 Monate nach Fahrzeug-Zulassung auf) fokussiert auf die Anlaufqualität eines Produkts. Bei der 24-MIS-Analyse gilt das Interesse der Robustheit des Produkts.

Aufgrund der Tatsache, dass die Analyse sich auf aktuelle Kundendaten stützt, wird angenommen, dass alle Feldbeanstandungen darin eingeschlossen sind und kein Teilmarktfaktor zur Anwendung kommt. Es geht bei dieser Darstellung nicht um Prognosen.

Den analysierten Daten entsprechend gibt die Darstellung eher einen allgemeinen Überblick wie im nachfolgenden Beispiel oder sie wird für eine detailliertere Betrachtungsweise erstellt.

Field Quality, 3 MIS Field complaints GWA (cpm), Focus Launch Performance



Field Quality, 24 MIS Field complaints GWA (cpm), Focus Robust Products

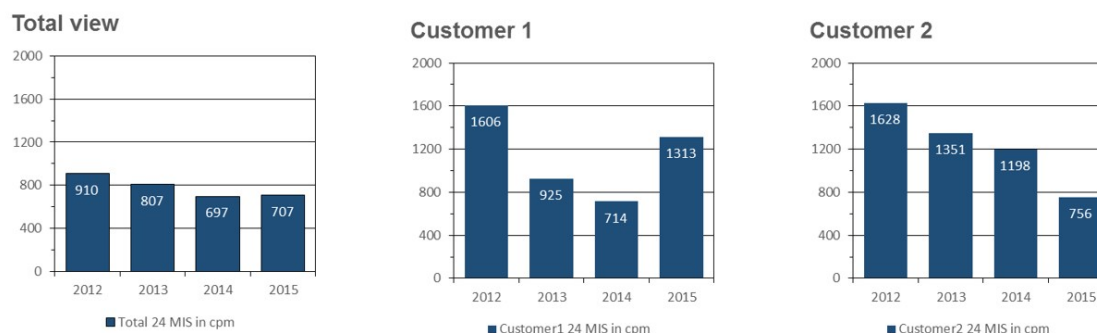


Abb. 3: Säulendiagramme: Months in Service



4.5 Streudiagramm: Part Time in Service (PTiS)

Die „PTiS-Wolke“ stellt zu den Ausfalldaten (Produktausfällen) das Produktalter über dem Produktionsdatum dar.

Der Zeitraum PTiS in Monaten beginnt mit dem Zeitpunkt, an dem das Teil das Produktionswerk verlässt und endet mit dem Zeitpunkt seines Ausfalls. Dies schließt also die Zeitdauern für die Lagerung, den Versand und den Transport bis zur Inbetriebnahme mit ein. Die Größe PTiS wird für jedes Produktionsdatum angegeben.

Die Linie, die Vergangenheit und Zukunft trennt, zeigt zum Zeitpunkt der Diagrammerstellung die maximal mögliche „time in service“ für jedes Produktionsdatum.

Die punktierte Linie „Claims known“ stellt die zeitliche Differenz dar zwischen „line separating past/future“ (Tennlinie Vergangenheit/Zukunft) und der durchschnittlichen Zeit, die vergeht, zwischen Reparatur/Beanstandung und dem Eintrag in die Bosch Garantiedatenbank (IQIS) und der Untersuchung der Beanstandung.

Der Bereich zwischen der Linie „line separating past/future“ (Tennlinie Vergangenheit/Zukunft) und der Linie „claims known“ entspricht dem Zeitraum, in dem schon Beanstandungen aufgetreten sein können, die aber noch nicht in der Bosch Garantiedatenbank registriert und/oder noch nicht analysiert worden sind.

Die Zeit D1 bis zur Fahrzeugzulassung ist die durchschnittliche Zeit zwischen dem Produktionsdatum des Teils und dem Datum der Zulassung oder der Inbetriebnahme des Fahrzeugs.

Wie auch anhand von Abb. 5 ersichtlich ist, zeigen jüngere Produktionsdaten stets einen positiven Trend. Die „PTiS-Wolke“ erklärt diesen Trend, indem sie die Verzögerungszeiten und die maximal mögliche Einsatzzeit für jedes Produktionsdatum darstellt.

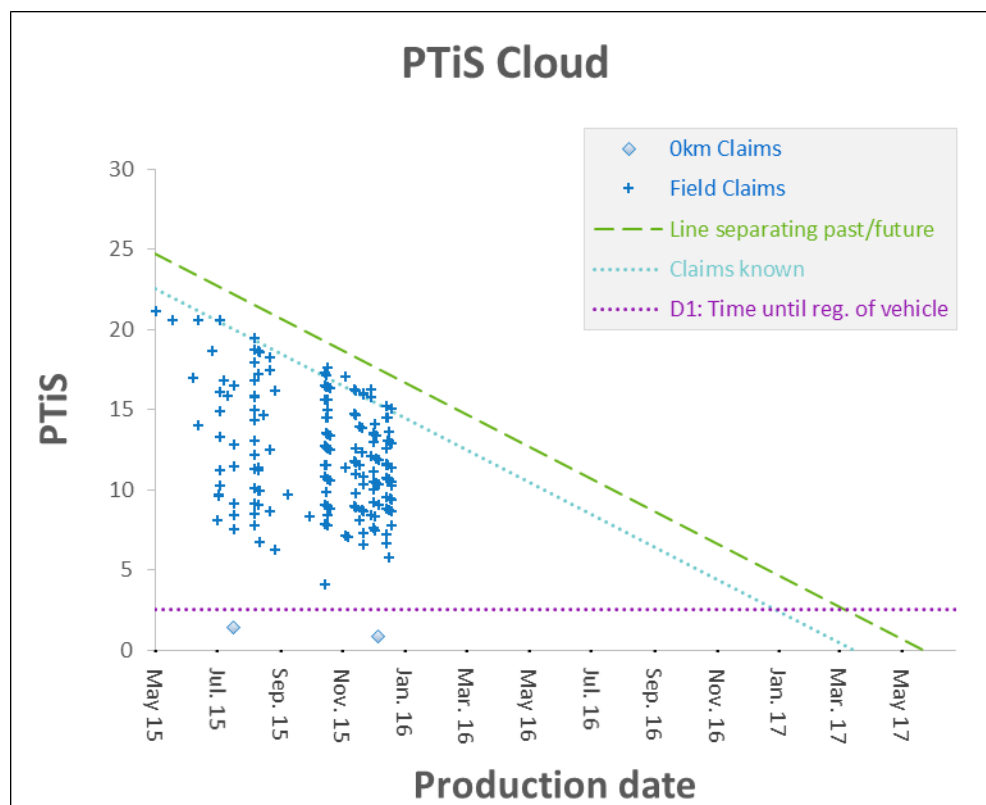


Abb. 4: Streudiagramm



5 Hochrechnungsfaktoren

5.1 Zweck von Hochrechnungsfaktoren

Im Rahmen der Produktbeobachtung in der Nutzungsphase besteht der Wunsch, so früh wie möglich auf Basis des aktuellen Ausfallverhaltens eines Produkts im Feld einen Schluss auf die zu erwartende Endbeanstandungsquote zu ziehen.

Die Notwendigkeit einer solchen Hochrechnung ergibt sich z. B. zum Zwecke der kaufmännischen Abwicklung (auch zur Fertigungsplanung und ggf. zur Planung der Endbevorratung nach Fertigungsauslauf) von Gewährleistungsfällen und im Rahmen der Berichterstattung.

Betrachtet man zu einem festen Zeitpunkt eine Darstellung der auf das jeweilige Produktionsdatum bezogenen aktuellen Beanstandungsquoten (Ist-Beanstandungsquoten), so ist — zumindest bei jüngeren Fertigungsdaten — immer ein positiver Trend erkennbar (s. Abb. 5), d. h. die Beanstandungsquote ist um so kleiner, „je jünger das Produktionsdatum ist“.

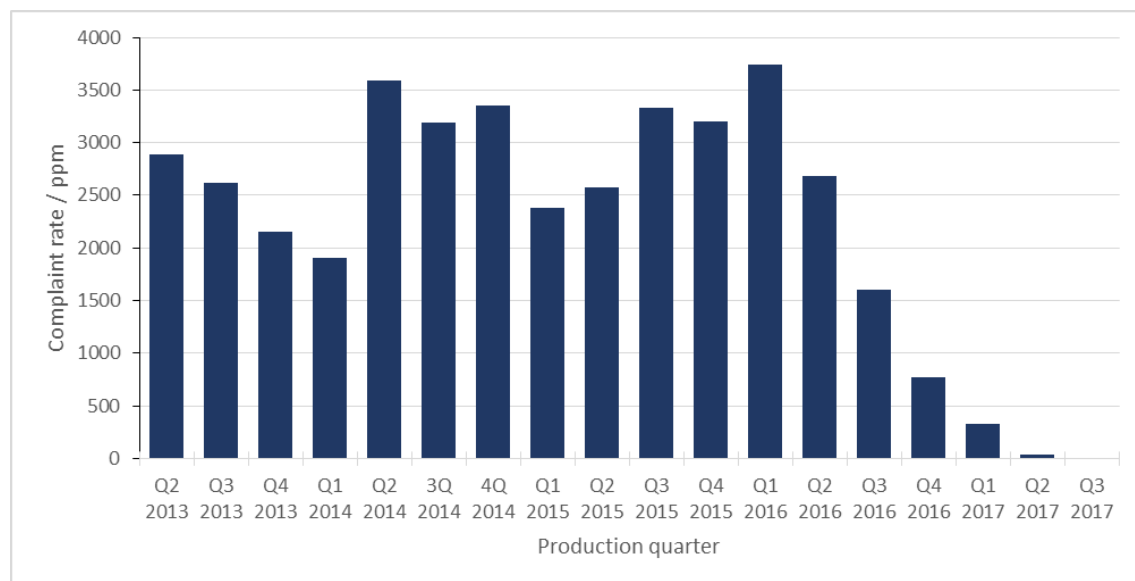


Abb. 5: Darstellung der Beanstandungsraten für jedes Produktionsquartal

Wie in Abschnitt 2.2 schematisch dargestellt, ist die Ursache für diesen Effekt die statistische Verteilung der Zeitintervalle zwischen der Fertigung der Produkte und der Meldung ihrer Ausfälle.

Erst nach Ablauf einer gewissen Zeit, die deutlich über die Gewährleistungsfrist (ggf. zuzüglich einer begrenzten Kulanzzeit) hinausgeht, hat sich die Summe der Beanstandungen asymptotisch einem Endwert angenähert. Im Falle einer einjährigen Gewährleistungsfrist stellt sich der Endwert typischerweise erst nach drei bis vier Jahren (nach PD) ein.

Zweck der Hochrechnung ist es, auf Basis einer aktuell gegebenen Beanstandungsquote den voraussichtlichen Endwert der Beanstandungsquote zu bestimmen. Dieser Endwert ergibt sich durch Multiplikation der aktuellen Beanstandungsquote mit dem Hochrechnungsfaktor.



5.2 Ermittlung von Hochrechnungsfaktoren

Hochrechnungsfaktoren können auf Grundlage der bis zum aktuellen Zeitpunkt bekannten Beanstandungsquoten eines Erzeugnisses (ggf. eines vergleichbaren Produkts) ermittelt werden. Verfolgt man die Entwicklung der Beanstandungsquoten in Abhängigkeit von der Zeit nach PD (dem Alter der Erzeugnisse), so beobachtet man für die verschiedenen Fertigungszeiträume unterschiedliche Endwerte (Abb. 6).

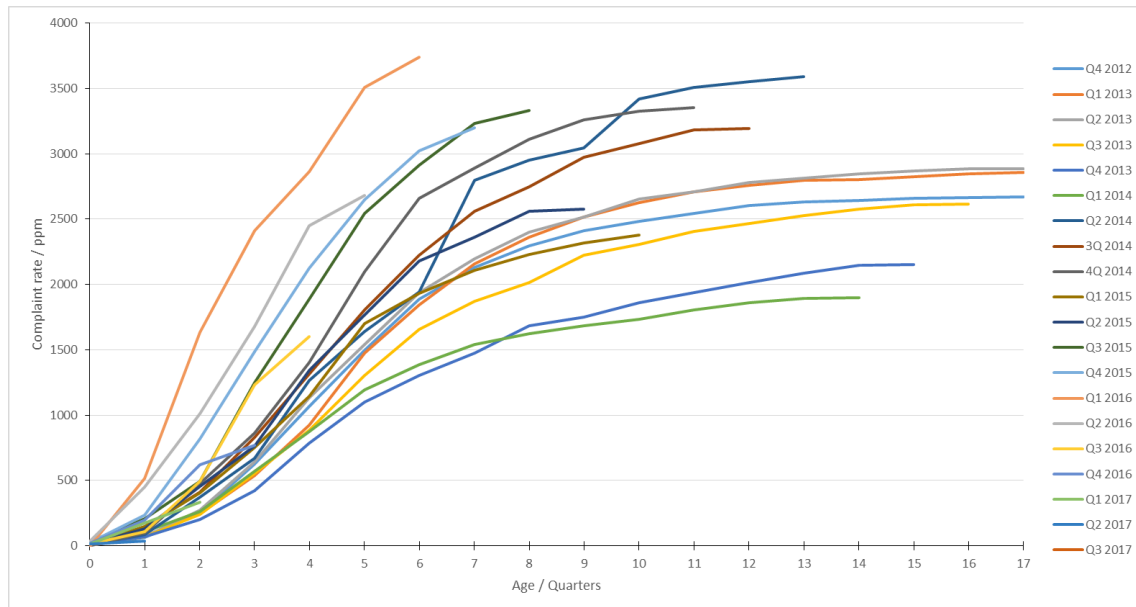


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung der Beanstandungsquoten (in ppm, bezogen auf die Fertigungsmenge)

Dividiert man die zu den Punkten einer Kurve (in Abb. 6) gehörenden ppm-Zahlen durch den von der Kurve erreichten Endwert und trägt die so ermittelten Prozentwerte über der Zeit auf, so ergibt sich eine normierte Darstellung nach Abb. 7.

Sind die Verläufe der normierten Kurven ähnlich, d. h., das normierte zeitliche Verhalten der Beanstandungsquote ist unabhängig vom Produktionsdatum, so kann durch Mittelwertbildung eine mittlere Kurve bestimmt werden, die als repräsentativ für dieses Produkt betrachtet wird. Die gesuchten Hochrechnungsfaktoren entsprechen dann den Kehrwerten der Normierungsfaktoren.

Die Kurve zum Produktionsquartal (PQ) 2Q.15 erreicht nach 7 Quartalen 2360 ppm (Abb. 6). Die Beanstandungsquoten der Vergleichs quartale haben nach 7 Quartalen im Mittel etwa 79 % des jeweiligen Endwerts erreicht (Abb. 7).

Ist der zeitliche Verlauf der ppm-Zahlen bei dem betrachteten Produktionsquartal dem der Vergleichs quartale ähnlich, so wird die Beanstandungsquote einen Endwert von etwa $\frac{2360 \text{ ppm}}{0,76} \approx 3105 \text{ ppm}$ erreichen.

Der Hochrechnungsfaktor hat also hier den Wert $\frac{1}{0,76} \approx 1,32$.



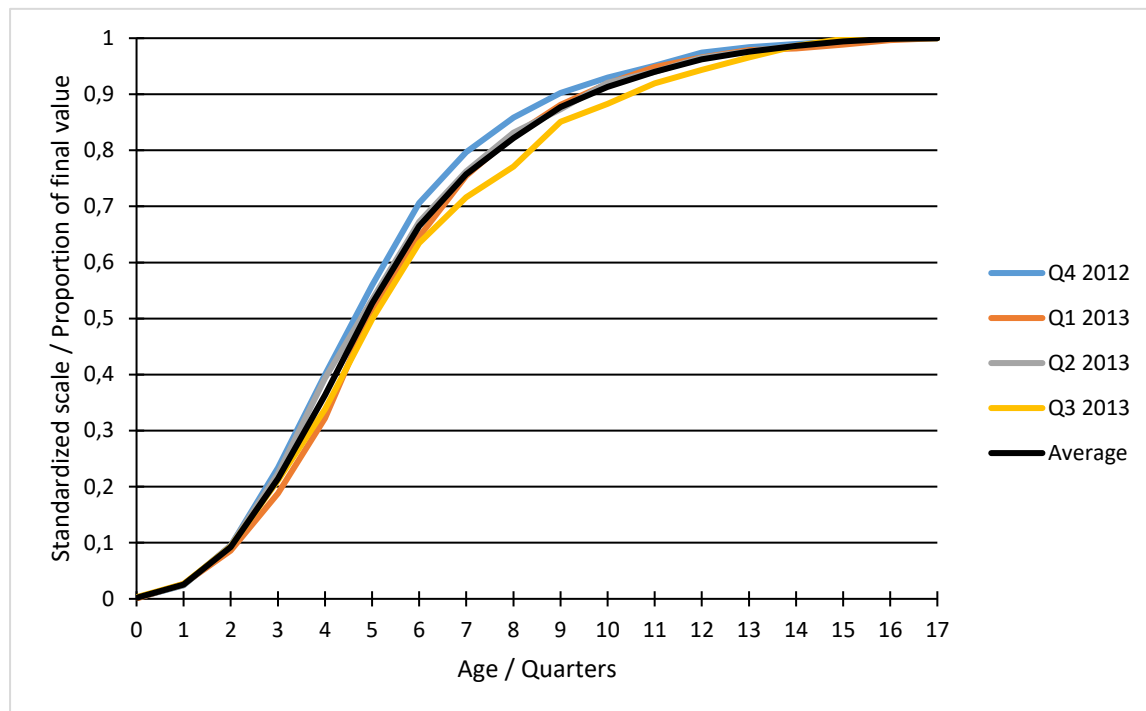


Abb. 7: Zeitliche Entwicklung der normierten (auf den Endwert bezogenen) Beanstandungsquote (für 4 Fertigungsquartale)

5.2.1 Einfache Ermittlung mit Hilfe der Treppentabelle

Im Folgenden wird ein einfaches Verfahren zur Ermittlung von Hochrechnungsfaktoren aus den in einer Treppentabelle (vgl. Abschnitt 4.1) enthaltenen Daten beschrieben.

Gesucht wird der zu erwartende Endwert der Beanstandungsquote für ein bestimmtes PQ. Der zum Auswertzeitpunkt bekannte Wert der Ausfallquote für dieses PQ findet sich in der Spalte des jüngsten Erfassungsquartals (EQ, 3. Spalte). Er repräsentiert ein bestimmtes Alter. Nun wird nach einem Vergleichswert gleichen Alters in einem möglichst weit zurückliegenden („alten“) Quartal gesucht, für das der Endwert stabil ist. Für „Alter“ > 14 Quartale kann von einem stabilen Endwert ausgegangen werden.

Daten (PQ) gleichen Alters sind in Tabellenfeldern zu finden, die jeweils auf einer von links unten nach rechts oben verlaufenden Diagonalen in der Treppentabelle liegen.

Der Endwert für dieses PQ findet sich wieder in der Spalte des jüngsten EQ. Die Division dieses Endwertes durch den Vergleichswert ergibt für dieses PQ einen Hochrechnungsfaktor für das bestimmte Alter. Damit kann nun der Momentanwert des gesuchten PQ multipliziert werden, und es ergibt sich der ungefähr zu erwartende Endwert für das gesuchte PQ (vgl. Beispiel auf der folgenden Seite).

Bei dieser Methode wird vorausgesetzt, dass sich die Beanstandungsquote für das betrachtete Quartal genauso entwickelt wie die des zum Vergleich herangezogenen, einige Jahre zurückliegenden Quartals. Man nimmt also an, dass sich die Randbedingungen bzgl. der in Abschnitt 5.2.4 genannten Einflussgrößen (z. B. Fertigungs- und Entwicklungsqualität, Meldeverhalten) seither nicht oder nur wenig verändert haben.



Tabelle 3

FQ (PQ)	Erfassungsquartal (EQ)																	
	3Q.2017	2Q.2017	1Q.2017	4Q.2016	3Q.2016	2Q.2016	1Q.2016	4Q.2015	3Q.2015	2Q.2015	1Q.2015	4Q.2014	3Q.2014	2Q.2014	1Q.2014	4Q.2013	3Q.2013	2Q.2013
2Q.2013	2884	2884	2871	2845	2816	2783	2712	2655	2518	2398	2199	1939	1539	1136	645	275	70	7
3Q.2013	2615	2611	2579	2525	2467	2403	2308	2226	2016	1872	1659	1304	885	554	243	69	7	
4Q.2013	2153	2146	2085	2017	1938	1858	1749	1683	1474	1302	1039	784	422	204	68	11		
1Q.2014	1899	1893	1862	1804	1736	1684	1625	1542	1388	1194	874	572	262	108	15			
2Q.2014	3589	3551	3506	3422	3044	2953	2798	1946	1633	1264	670	371	87	8				
3Q.2014	3193	3181	3079	2972	2747	2559	2223	1805	1314	831	413	147	12					
4Q.2014	3353	3324	3258	3113	2830	2662	2085	1403	861	430	93	4						
1Q.2015	2381	2319	2228	2110	1929	1638	1145	750	406	147	11							
2Q.2015	2574	2558	2360	2178	1766	1342	765	457	132	17								
3Q.2015	3331	3233	2913	2541	1891	1250	492	209	33									
4Q.2015	3199	3021	2650	2123	1484	817	237	27										
1Q.2016	3739	3509	2862	2409	1632	518	0											
2Q.2016	2684	2451	1680	1011	451	36												
3Q.2016	1601	1230	493	110	12													
4Q.2016	768	621	197	18														
1Q.2017	332	173	14															
2Q.2017	38	15																
3Q.2017	0																	

Beispiel:

Gesucht: Endwert für PQ 4Q.2015

Aktueller Wert: 3199 ppm

Alter: 7 Quartale (3.2017 – 4.2015)

Vergleichswert: 1474 ppm (Schnittpunkt PQ 4Q.13/EQ 3Q.15)

Endwert (PQ 4Q.13): 2153 ppm

Hochrechnungsfaktor: $2153 \text{ ppm} / 1474 \text{ ppm} = 1,46$ Hochgerechneter Endwert für PQ 4Q.15: $3199 \text{ ppm} * 1.46 = 4671 \text{ ppm}$ 

5.2.2 Graphische Ermittlung

Analog zur Vorgehensweise nach Abschnitt 5.2.1 können Endbeanstandungsquoten auch mit Hilfe von Schichtlinien (Abb. 8) ermittelt werden. Dazu wird auf einer Linie gleichen Alters (Isochrone) in der Vergangenheit (zurückliegendes PQ) ein Vergleichswert gesucht. Dieser Wert hat nach heute vorliegenden Daten zu einem bestimmten Endwert geführt (oberste Isochrone des zum Vergleichswert gehörenden PQ). Daraus ergibt sich der auf das aktuelle Quartal anzuwendende Hochrechnungsfaktor. Schwäche der Methode wie oben (Abschnitt 5.2.1).

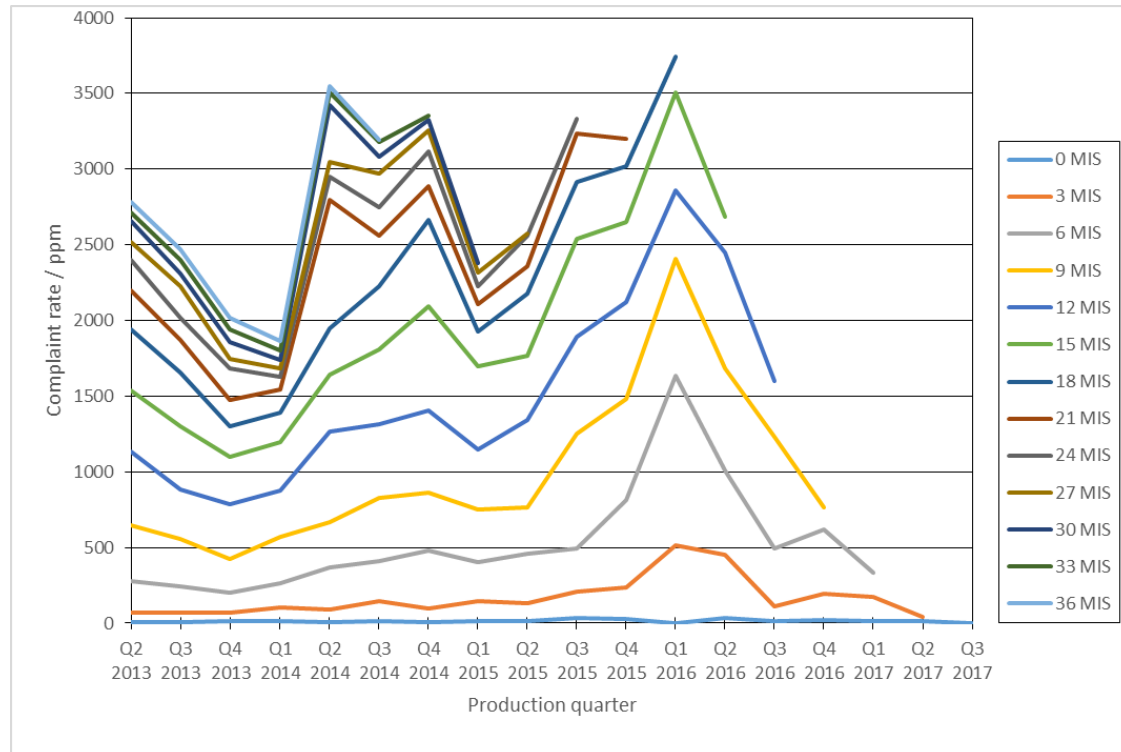


Abb.8: Isochronendiagramm zu den Daten der Tabelle 3

5.2.3 Rechnerische Ermittlung

Um auch die „jüngeren Daten“ in die Ermittlung der Hochrechnungsfaktoren einzubeziehen und die Berechnung damit auf eine breitere Basis zu stellen, wird nachstehend beschriebene Vorgehensweise empfohlen.

Mit Hilfe eines geeigneten Rechnerprogramms (z. B. Excel) wird die Treppentabelle (Tabelle 4) in die Form der Tabelle 5 transformiert. Hierin sind die kumulativen Beanstandungsquoten für jedes Fertigungsquartal in Abhängigkeit vom Alter nach PD in Quartalen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die in einer Zeile (festes PD) der Treppentabelle (Tabelle 4) von rechts nach links angegebenen Werte sich in der entsprechenden Spalte (gleiches PD) der Tabelle 5 wiederfinden.

Die dort zeilenweise von oben nach unten abzulesenden Werte entsprechen den Schnittpunkten der (0., 1., 2., ...) Isochronen mit der senkrechten Linie beim zugehörigen PD im Isochronendiagramm (vgl. Abb. 8).



In jeder Spalte (festes PQ) der Tabelle 4 wird dann das Verhältnis zweier übereinanderliegender Werte berechnet und in der dem Zähler entsprechenden Zelle der Tabelle 5 eingetragen. Jede so ermittelte Zahl entspricht dem Faktor, um den sich die Beanstandungsquote gegenüber dem Wert des vorangegangenen Quartals erhöht hat. Selbstverständlich ist dies nur sinnvoll, wenn der Nenner > 0 ist.

Zum besseren Verständnis dazu folgendes Beispiel:

Von den Erzeugnissen des Fertigungsquartals 2Q.13 wurden zwei Quartale später (Alter = 2 Quartale) 645 ppm beanstandet. Die kumulative Beanstandungsquote lag im darauf folgenden Quartal (Alter = 3 Quartale) bei 5092 ppm. Sie hat sich also um den Faktor $\frac{645}{275} = 2,35$ erhöht. Diese Zahl entspricht sozusagen einem „momentanen Hochrechnungsfaktor“ und ist in der Tabelle 5.2.3.2 in der zugehörigen Zelle (Spalte 2Q.2013, Zeile: Alter = 3) eingetragen.

Die „momentanen Hochrechnungsfaktoren“ werden dann pro Altersstufe über alle PQ (waagrecht) gemittelt (siehe Spalte Mittelwert MW). Dabei bleiben Zellen, in denen das Symbol ∞ auftritt, unberücksichtigt.

Die gesuchten Hochrechnungsfaktoren (Spalte PF) ergeben sich schließlich als Produkt aller Mittelwerte ab der betrachteten Zeile.

Die Zahl 3,74 (in Spalte PF) beispielsweise ergibt sich durch Multiplikation aller Mittelwerte: $1,57 \cdot 1,34 \cdot 1,19 \cdot 1,14 \cdot \dots \cdot 1,00 = 3,74$. Dies ist der Hochrechnungsfaktor für das vierte Quartal nach PD. Entsprechend findet man den Hochrechnungsfaktor für das fünfte Quartal nach PD durch Multiplikation aller Mittelwerte ab dieser Zeile (Alter = 5 Quartale): $1,34 \cdot 1,19 \cdot 1,14 \cdot \dots \cdot 1,00 = 2,38$.

Mit dieser Methode werden alle nutzbaren Daten der Treppentabelle zur Ermittlung der Hochrechnungsfaktoren herangezogen.

Es wäre denkbar, bei der Mittelwertberechnung eine altersabhängige Gewichtung vorzunehmen. Entsprechende Versuche haben jedoch gezeigt, dass eine breitere Basis zu bevorzugen ist.

Die Werte in den Zeilen der Altersstufen 1 Quartal und (zum Teil) 2 Quartale zeigen eine sehr große Streuung. Dies gilt für die anfängliche Quote der Beanstandungsmeldungen ebenso wie für die daraus berechneten „momentanen Hochrechnungsfaktoren“. Letztendlich ist dies auf die in Abschnitt 5.2.4 genannten Einflüsse zurückzuführen.

Insbesondere können sich für die ersten Quartale (Alter) Hochrechnungsfaktoren ergeben, welche die Zahl 10 deutlich überschreiten.

Wegen der erkennbaren großen Unsicherheit wird davon abgeraten, für die jüngsten 2 - 3 Quartale hochgerechnete Beanstandungsquoten zu ermitteln.



Auswertung von Felddaten

Produktionsquartal (PQ)																		
Alter	2Q.2013	3Q.2013	4Q.2013	1Q.2014	2Q.2014	3Q.2014	4Q.2014	1Q.2015	2Q.2015	3Q.2015	4Q.2015	1Q.2016	2Q.2016	3Q.2016	4Q.2016	1Q.2017	2Q.2017	3Q.2017
0	7	7	11	15	8	12	4	11	17	33	27	0	36	12	18	14	15	0
1	70	69	68	108	87	147	93	147	132	209	237	518	451	110	197	173	38	
2	275	243	204	262	371	413	430	406	457	492	817	1632	1011	493	621	332		
3	645	554	422	572	670	831	861	750	765	1250	1484	2409	1680	1230	768			
4	1136	885	784	874	1264	1314	1403	1145	1342	1891	2123	2862	2451	1601				
5	1539	1304	1099	1194	1633	1805	2085	1638	1766	2541	2650	3509	2684					
6	1939	1659	1302	1388	1946	2223	2662	1929	2178	2913	3021	3739						
7	2199	1872	1474	1542	2798	2559	2830	2110	2360	3233	3199							
8	2398	2016	1683	1625	2953	2747	3113	2228	2558	3331								
9	2518	2226	1749	1684	3044	2972	3258	2319	2574									
10	2655	2308	1858	1736	3422	3079	3324	2381										
11	2712	2403	1938	1804	3506	3181	3353											
12	2783	2467	2017	1862	3551	3193												
13	2816	2525	2085	1893	3589													
14	2845	2579	2146	1899														
15	2871	2611	2153															
16	2884	2615																
17	2884																	

Produktionsquartal (PQ)																			MW	PF
Alter	2Q.2013	3Q.2013	4Q.2013	1Q.2014	2Q.2014	3Q.2014	4Q.2014	1Q.2015	2Q.2015	3Q.2015	4Q.2015	1Q.2016	2Q.2016	3Q.2016	4Q.2016	1Q.2017	2Q.2017	3Q.2017		
0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---		
1	10,00	9,86	6,18	7,20	10,88	12,25	23,25	13,36	7,76	6,33	8,78	1,00	12,53	9,17	10,94	12,36	2,53		9,67	228,7
2	3,93	3,52	3,00	2,43	4,26	2,81	4,62	2,76	3,46	2,35	3,45	3,15	2,24	4,48	3,15	1,92			3,22	23,7
3	2,35	2,28	2,07	2,18	1,81	2,01	2,00	1,85	1,67	2,54	1,82	1,48	1,66	2,49	1,24				1,96	7,3
4	1,76	1,60	1,86	1,53	1,89	1,58	1,63	1,53	1,75	1,51	1,43	1,19	1,46	1,30					1,57	3,7
5	1,35	1,47	1,40	1,37	1,29	1,37	1,49	1,43	1,32	1,34	1,25	1,23	1,10						1,34	2,4
6	1,26	1,27	1,18	1,16	1,19	1,23	1,28	1,18	1,23	1,15	1,14	1,07							1,20	1,8
7	1,13	1,13	1,13	1,11	1,44	1,15	1,06	1,09	1,08	1,11	1,06								1,14	1,5
8	1,09	1,08	1,14	1,05	1,06	1,07	1,10	1,06	1,08	1,03									1,08	1,3
9	1,05	1,10	1,04	1,04	1,03	1,08	1,05	1,04	1,01										1,05	1,2
10	1,05	1,04	1,06	1,03	1,12	1,04	1,02	1,03											1,05	1,2
11	1,02	1,04	1,04	1,04	1,02	1,03	1,01												1,03	1,1
12	1,03	1,03	1,04	1,03	1,01	1,00													1,02	1,1
13	1,01	1,02	1,03	1,02	1,01														1,02	1,0
14	1,01	1,02	1,03	1,00															1,02	1,0
15	1,01	1,01	1,00																1,01	1,0
16	1,00	1,00																	1,00	1,0
17	1,00																		1,00	1,0

Tabellen 4 (oben) und 5 (unten). Erläuterungen s. Text.



5.2.4 Grenzen der Methode

Die „Güte“ der ermittelten Hochrechnungsfaktoren und somit der Hochrechnung selbst wird durch vielfältige Einflüsse begrenzt. Hier sind zu nennen:

- das erzeugnispezifische Meldeverhalten,
- sporadische Sammelmeldungen der EA-Kunden,
- lange Lagerzeiten bei RB oder beim Kunden,
- das Ausfallverhalten der Erzeugnisse,
- das Nutzungsverhalten der Kunden,
- die unterschiedlichen Gewährleistungs-/Kulanzzeiten.

Der Einfluss dieser Störgrößen muss im Einzelfall abgeschätzt werden.

Erfahrungsgemäß sollten für Fertigungsquartale, die (bezogen auf das Auswertedatum) weniger als 2-3 Quartale zurückliegen, keine Hochrechnungen durchgeführt werden, da hier meist die Datenbasis für eine vertrauenswürdige Aussage noch nicht ausreicht.



5.3 Ausfallprognose

In diesem Kapitel wird erklärt, wie künftige Ausfälle auf Basis von Felddaten vorhergesagt werden können. Genauer gesagt besteht die Vorhersage in der Angabe der Anzahl von Teilen, die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt ausgefallen sein werden. Typischerweise werden dabei sowohl die erwartete Anzahl als auch die untere und obere Vertrauensgrenze angegeben.

5.3.1 Informationssammlung

Die wesentlichen Eingangsinformationen zu einer Vorhersage des Feldgeschehens sind die aktuell bekannten Beanstandungen sowie die monatlichen Fertigungsmengen. Dabei ist zu beachten, dass je nach vorliegendem Einzelfall eine höhere Auflösung notwendig sein kann, z. B. Produktionsmengen pro Woche oder Tag.

5.3.2 Produktionsmengen

Zur Festlegung der relevanten Produktionsmengen ist es erforderlich, dass nur diejenigen Produkte betrachtet werden, die aufgrund der Grundursache ausfallen können. Jeder Fehler in den Eingangsinformationen verfälscht das Analyseergebnis. Dies wirft unmittelbar zwei Fragen auf:

1. In welchem Zeitraum wurden fehlerhafte Teile hergestellt?
2. Welcher Anteil der im betrachteten Zeitraum hergestellten Teile ist von dem Fehler betroffen?

Die erste Frage kann nur im Rahmen des Problemlösungsansatzes beantwortet werden. Der relevante Fertigungszeitraum entspricht der Zeit, in der die TRC wirksam war. Folglich ist dieser Zeitraum durch den beginnenden Einfluss der TRC sowie die Umsetzung der Abstellmaßnahmen begrenzt.

Leider ist diese Information zu dem Zeitpunkt, an dem die Risikoanalyse vorbereitet wird, häufig nicht verfügbar. Als vorläufige Antwort auf die erste Frage kann der relevante Zeitraum durch das Produktionsdatum des ersten beanstandeten Teils bis zum aktuellen Datum festgelegt werden. Das widerspricht ganz und gar der Intuition, da so nicht die maximal mögliche Anzahl von Teilen betrachtet wird. Auf den zweiten Blick aber ist diese Abschätzung recht konservativ, da sie von der kleinsten Felderfahrung ausgeht und so die prognostizierte Ausfallrate maximiert.

Wenn für den besagten Zeitraum die monatlichen Fertigungsmengen noch nicht bekannt sind, sondern nur die Gesamtmenge hergestellter Teile, so ist es am besten, wenn man die Gesamtfertigungsmenge gleichmäßig auf den Zeitraum verteilt. Man sollte dabei aber nicht vergessen, dass innerhalb des fraglichen Zeitraums ein Ereignis eingetreten sein könnte, das die Produktion beeinflusst hat. In dem Fall ist es notwendig, den Fertigungszeitraum aufzuteilen. Die Einflüsse können sich auf die Abweichung am Produkt als auch deren Auswirkungen beziehen. Solche Ereignisse können z. B. Wartung, Prozessänderungen oder andere sein.

Je nach Situation kann es auch sinnvoll und notwendig sein, die Gesamtmenge aufzuteilen und die Teilmengen bestimmten Linien, Maschinen oder Formnestern zuzuordnen.

Auf die zweite Frage wird in Abschnitt 11.1 eingegangen.



5.3.3 Informationen zur Logistik

Ebenso wichtig für die Analyse ist die sorgfältige Berücksichtigung logistischer Informationen. Insbesondere dann, wenn die Teile bis zum Analysezeitpunkt erst seit Kurzem im Feld sind, haben Verzögerungszeiten beträchtlichen Einfluss auf das Analyseergebnis. Die längerfristige Vorhersage hängt in kritischer Weise von der Gewährleistungszeit ab, da diese ja den Zeitraum beschränkt, in dem ein Teil beanstandet werden kann.

Des Weiteren sollte nicht vernachlässigt werden, dass tatsächlich nur eine Teilmenge aller Ausfälle beanstandet wird. Dies kann mit Hilfe des sogenannten Feldfaktors modelliert werden, der in kodierter Form die Wahrscheinlichkeit angibt, dass ein Ausfall tatsächlich beanstandet wird.

Verzugszeiten

Davon gibt es diese vier zu berücksichtigenden Arten:

- D1a Die Zeit, die vergeht, bis das Teil im Werk des OEM ankommt, d. h., die Zeit zwischen der Herstellung bei Bosch und dem Einbau beim OEM.
- D1b Die Zeit zwischen der Montage beim OEM und der Zulassung des Fahrzeugs.
- D2-0km Die Zeit, die vergeht, bis eine 0-km-Beanstandung des OEM bei Bosch eingeht, d. h., bis die Beanstandung analysiert und einem bestimmten Problem zugeordnet wird.
- D2-Field Die Zeit, die vergeht, bis eine Feldbeanstandung bei Bosch eingeht, d. h., bis die Beanstandung analysiert und einem bestimmten Problem zugeordnet wird.

Es ist klar, dass diese zeitlichen Verzögerungen die Datenqualität begrenzen. Daher ist es wesentlich, sie angemessen zu berücksichtigen.

Sie können anhand der allgemeinen Daten aus der Beanstandungsdatenbank abgeleitet werden. Dazu nutzt man die Tatsache aus, dass eine Verzögerungszeit unabhängig von der Ausfallursache ist. In den meisten Fällen ist es ausreichend, dafür eine ganze Zahl anzusetzen, z. B. zwei Monate für die Zeit zwischen Herstellung bei Bosch und Weiterverwendung beim OEM (D1a = 2 Monate). Jedoch kann gelegentlich auch eine höhere Präzision notwendig sein, wenn z. B. die Verzögerungszeiten große Schwankungen aufweisen. In der Literatur wird vorgeschlagen, in solchen Fällen statistische Verteilungen zu verwenden, um zu beschreiben, wieviele Teile sich zu einem bestimmten Zeitpunkt im Feld befinden.

Gewährleistungszeit und Lebensdauer

Der Kürze halber wird im Folgenden nur auf die Gewährleistungszeit ausführlich eingegangen. Die Konzepte und Vorstellungen zur Einbeziehung der Lebensdauer in die Analyse sind dieselben. Die Gewährleistungszeit beeinflusst die Analyse in Bezug auf zwei Aspekte.

Zunächst beschränkt sie die Sichtweite im Rahmen der Anpassung einer Weibull-Verteilung. Es sei z. B. angenommen, dass einige Teile, die potenziell ausfallen können, sich seit fünf Jahren im Feld befinden. Daraus könnte man schließen, dass die Felderfahrung sich auf eben diese fünf Jahre erstreckt. Weil aber die Gewährleistungszeit typischerweise drei Jahre beträgt, ist der "beobachtbare Zeitstrahl" nach drei Jahren abgeschnitten.

Des Weiteren muss die Gewährleistungszeit im Rahmen der Ausfallprognose mitberücksichtigt werden. Wenn die Parameter der Weibull-Verteilung bekannt (abgeschätzt) sind und eine Ausfallprognose erstellt wird, muss man beachten, dass Teile, deren Alter die Gewährleistungszeit übersteigt, nicht mehr beanstandet werden können.



5.3.4 Informationen zu Beanstandungen

Die Beanstandungs-Datenbank sollte die folgenden Felder enthalten:

1. Datum der Produktion bei Bosch
2. Datum der Fahrzeugproduktion beim OEM
3. Zulassungsdatum des Fahrzeugs
4. Ausfalldatum
5. Berichtsdatum, d. h. Datum, zu dem die Beanstandung in der Datenbank erscheint

Aus diesen Informationen kann die Zeit im Feld abgeleitet werden. Außerdem können Verzögerungszeiten ermittelt werden, sofern eine hinreichende Zahl von Beanstandungen vorliegt.

In den meisten Fällen sind die oben angegebenen Informationen ausreichend. Falls allerdings die den Ausfall aktivierende Belastung z. B. von der Fahrleistung abhängt, werden weitere Informationen benötigt. Außer der Fahrleistung kommen z. B. die Betriebsstundenzahl, Ein-/Ausschaltzyklen oder saisonale Effekte in Frage, um Belastungen quantitativ zu erfassen.

5.3.5 Ermittlung der fehlerbehafteten Menge

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die für eine Risikoanalyse benötigten Informationen näher erläutert. Darin wurde kurz die Tatsache angesprochen, dass die Anzahl der potenziell ausfallgefährdeten Teile für eine aussagefähige Analyse von wesentlicher Bedeutung ist. In diesem Abschnitt werden nun einige Methoden zur Unterstützung des Analyseprozesses dargestellt.

In den meisten Fällen werden statistische Methoden angewandt, um die Menge betroffener Teile abzuschätzen.

- Wenn die Abweichung bei allen gelieferten Produkten vorliegt (das ist z. B. bei einem Softwarefehler der Fall), ist dieser Schritt nicht relevant
- Ermittlung einer Untergrenze und einer Obergrenze für die Gesamtzahl betroffener Teile; Standardmethoden dazu sind:
 - Stichprobenprüfung
 - Prüftormethode
 - Schätzungen auf Basis von Verteilungen und Erfahrung

5.3.6 Ermittlung der Ausfallzahlen bis zu einem bestimmten Datum

- In den meisten Fällen kann das zeitabhängige Ausfallgeschehen mit Hilfe einer Weibull-Verteilung beschrieben werden.
- Ermittlung der Belastung (z. B. Einsatzzeit), der die bis heute gelieferten fehlerbehafteten Teile ausgesetzt waren
- Anhand der Auswirkung der Abweichung sollte abgeleitet werden, ob im Weibull-Modell ein dritter Parameter in Betracht gezogen / verwendet werden muss.
- Einem Mindestwert der Lebensdauer entspricht ein positiver 3. Weibullparameter (ausfallfreie Zeit).
- Voralterung während der Herstellung entspricht einem negativen dritten Weibullparameter.



5.4 Risikoanalyse im Rahmen des 8D-Prozesses

5.4.1 Einführung

Im Rahmen einer Risikoanalyse werden vier Phasen unterschieden, während denen sich die Zielsetzung und sogar der methodische Ansatz verändern.

Der technische Teil des Beanstandungsprozesses ist der 8D-Prozess.

5.4.2 Phase 0: Vorphase

Es ist klar, dass das Risiko eines Feldausfalls mit dem Zeitpunkt beginnt, zu dem ein Fahrzeug mit einer bestimmten Abweichung im Feld in Betrieb genommen wird. Mit der Abweichung ist ein Problem im Sinne von [Heft 16] gemeint. Typischerweise ist die Grundursache Bosch noch nicht bekannt, wird fälschlicherweise für das Feldgeschehen als irrelevant beurteilt oder als Grundrauschen behandelt. Wir betrachten hier nur Abweichungen, die von einem Bosch-Produkt ausgehen. Eine Abweichung mit unbekannter technischer Grundursache wird in der Regel während des Beanstandungsprozesses entdeckt. Der technische Teil dieses Vorgangs ist der 8D-Prozess. Die Vorphase endet, sobald Bosch das Problem bekannt wird und der 8D-Prozess zu der Abweichung startet.

5.4.3 Phase 1: Frühphase der Risikoanalyse

Die Frühphase startet mit dem 8D-Prozess zum ausgefallenen Produkt. Im Rahmen des 8D-Prozesses wollen wir die technische Grundursache verstehen und beseitigen. Gleichzeitig wüssten wir gerne die Anzahl der zu erwartenden weiteren Ausfälle in der Produktionsmenge, die sich bereits im Feld befindet. Wenn sich bereits viele Ausfälle ereignet haben, der Kunde bereits eskaliert hat oder sogar sicherheitskritische Ausfallarten möglich sind, kann diese Frage nicht zurückgestellt werden. Je nach Ergebnis können Entscheidungen mit starken wirtschaftlichen Auswirkungen daraus folgen. In solchen Fällen ist keine Antwort keine Option.

Die Antwort auf die Frage nach der potenziellen Ausfallmenge hängt stark von der noch unbekannten technischen Grundursache ab. Um den Konflikt zu bewältigen, der sich aus der notwendigen Zeit für die Analyse des Problems und zur Erarbeitung einer Lösung einerseits und dem Bedarf einer Ausfallprognose andererseits ergibt, ist es notwendig, mit Hilfe von Annahmen und Expertenwissen eine entsprechende Vorhersage zu berechnen/erstellen.

Die typische Situation in dieser Phase ist, dass

1. wir eine Annahme über die technische Grundursache brauchen,
2. nicht alle möglichen Aktivierungsmechanismen zu einem Ausfall bekannt sind,
3. die Produktionsmenge, die von der Abweichung / dem Fehler betroffen ist, nicht bekannt ist.

Man muss sich des Folgenden bewusst sein: Es ist sehr wichtig, sofort mit der Risikoanalyse zu beginnen. In dieser Phase basiert die Risikoanalyse noch auf Annahmen und wird als vorläufig betrachtet.



5.4.5 Phase 2: Aufstellen einer Prognose (D4 bis D6)

Sobald die technische Grundursache verstanden ist (Abschluss von D4) und alle Fehlermechanismen bekannt sind (Ausweitung der Abweichung / Fehlerfortpflanzung verstanden), können die betroffenen Mengen abgeschätzt werden. Die Ausfallprognose wird abgeleitet vom physikalischen Verständnis der Grundursache sowie aus Felddaten und Tests. Die getroffenen Annahmen müssen plausibel und mit dem (internen/externen) Kunden abgestimmt sein.

5.4.6 Phase 3: Feldbeobachtung (beginnt mit D7)

Solange das Feldverhalten (0 km, Feld) mit der Ausfallprognose im Einklang steht (Anzahl der Ausfälle ist kleiner als die in der Ausfallprognose angegebene Obergrenze), braucht die Prognose nicht überarbeitet zu werden, d. h., die Risikoanalyse ist aktuell. In IQIS sammelt die Q8 alle Beanstandungen mit derselben TRC (in der Praxis kann es zeitweilig mehrere Q8-Meldungen geben).

5.4.7 Zusammenfassung

- Das Risikoanalyseteam muss sich stets bewusst sein, in welcher Phase der Risikoanalyse es sich befindet und sich entsprechend verhalten. Das macht den Umgang mit Qualitätsthemen effektiver und effizienter. Es können sogar unproduktive Eskalationen vermieden oder reduziert werden.
- Aufgrund von aktuellem Wissen kann es notwendig sein, zu früheren Phasen zurückzukehren und diese erneut zu durchlaufen.



6 Mehrere gleiche Komponenten im Produkt

An Kraftfahrzeugen sind oft mehrere gleiche Komponenten verbaut, z. B. Zündkerzen, Zündspulen, Injektoren, ABS-Sensoren, Fensterhebermotoren. Beim Vierzylindermotor etwa werden sich in der Regel bereits Auffälligkeiten im Betrieb zeigen und durch die Motorkontrollleuchte angezeigt werden, auch wenn nur einer der vier Zylinder betroffen ist.

Die folgende Berechnung kann nur dann zu einem sinnvollen Ergebnis führen, wenn die Anzahl der defekten Teile korrekt ermittelt und dokumentiert wird, sowie weitere einschränkende Rahmenbedingungen erfüllt sind (z. B. eng begrenzter Fertigungszeitraum, Auftreten des Fehlers ist unabhängig von der Fahrleistung oder Einsatzzeit, Unabhängigkeit der einzelnen Komponentenausfälle voneinander).

Die Wahrscheinlichkeit, dass z. B. von vier gleichen Komponenten genau k defekt sind, kann mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Binomialverteilung berechnet werden.

$P(n, k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k}$ Hier die Ergebnisse $P(4, k)$ für $k = 0, 1, 2, 3, 4$ und $p = 0,02$:

k	0	1	2	3	4
$P(4, k)$	0,9224	0,0753	0,0023	3,14E-05	1,60E-07

Bei der Auswertung von Felddaten ist der Anteil p nicht bekannt. Man kann aber versuchen, ihn auf folgende Weise abzuschätzen. Das Verhältnis der Wahrscheinlichkeiten für $k = 2$ und $k = 1$ ist $\frac{0,0023}{0,0753} = 0,0306$. Analog dazu lassen sich die übrigen Verhältniszahlen ermitteln. Im Falle $p = 0,1 = 10\%$ kann man erwarten, dass bei etwa 16,7 % der Reparaturen zwei Komponenten getauscht werden müssen statt nur einer. Die Wahrscheinlichkeiten für $k > 2$ sind bei kleinem p vernachlässigbar.

p	2 / 1	3 / 1	4 / 1
0,01	0,0152	0,0001	2,58E-07
0,02	0,0306	0,0004	2,12E-06
0,05	0,0789	0,0028	3,64E-05
0,10	0,1667	0,0123	3,43E-04

Tab. 6

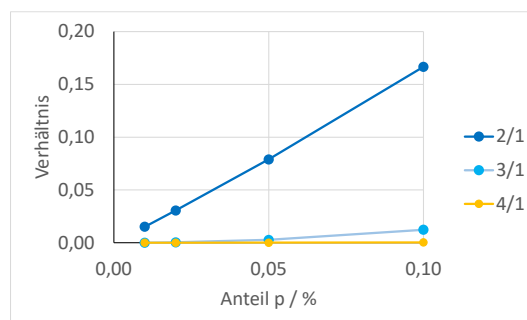


Abb. 9

Wenn also die Anzahlen N_1 und N_2 der Reparaturen bekannt sind, bei denen ein oder zwei Komponenten getauscht wurden, kann man aus diesem Verhältnis $r = \frac{N_2}{N_1}$ auf den Anteil p der Grundgesamtheit schließen: $p = \frac{2 \cdot r}{3 + 2 \cdot r}$

ANMERKUNG: Die beschriebene Situation entspricht einem Urnenmodell mit einem Anteil p fehlerhafter Einheiten in der Grundgesamtheit, s. [Heft 2]. Es setzt eine homogene Durchmischung der fehlerfreien und fehlerhaften Komponenten voraus.

Die Berechnung kann nur dann zu einem sinnvollen Ergebnis führen, wenn die Anzahl der defekten Teile korrekt ermittelt und dokumentiert wird.



7 Ermittlung der Fahrstreckenverteilung

Wenn möglich sollte die Jahres-km-Verteilung aus unabhängigen repräsentativen Daten (z. B. des Fahrzeugherstellers) bestimmt werden. Statistisch korrekt wäre die Schätzung aufgrund einer Stichprobe nur, wenn nach dem Zufallsprinzip vor der Inbetriebnahme festgelegt würde, welche Fahrzeuge die (repräsentative) Stichprobe umfasst. Man weiß dann noch nicht wie viele ausfallen werden.

Die in Gewährleistungsdaten enthaltenen Ausfälle beruhen i. Allg. auf einer Vielzahl verschiedener Ausfallmechanismen. Aus diesem Grund erscheint es gerechtfertigt, die Jahres-km-Verteilung anhand der vorhandenen Daten zu schätzen. Das Ergebnis könnte aber aufgrund der Negativauswahl, welche die ausschließliche Betrachtung von Garantiefällen ja darstellt, verfälscht sein und sollte daher auf Plausibilität geprüft werden.

Bei jedem Einzelfall kann anhand der zeitlichen Differenz von Zulassungsdatum und Ausfalldatum sowie des Kilometerstands zum Ausfallzeitpunkt die mittlere jährliche Fahrleistung berechnet werden.

$$\text{Jahres} - \text{km} = \frac{\text{km-Stand bei Ausfall}}{\text{Ausfalldatum} - \text{Zulassungsdatum}} \cdot 365 \text{ Tage} \quad (\text{bei taggenauem PD}) \quad \text{oder}$$

$$\text{Jahres} - \text{km} = \frac{\text{km-Stand bei Ausfall}}{\text{Ausfallmonat} - \text{Zulassungsmonat}} \cdot 12 \text{ Monate} \quad (\text{bei monatsgenauem PD})$$

Erfahrungsgemäß ist die Lognormalverteilung ein geeignetes Modell zur Beschreibung dieser Verteilung (s. z. B. [VDA 3.1] u. [Pauli]). Durch Darstellung der Daten im Wahrscheinlichkeitsnetz der Lognormalverteilung oder durch einen statistischen Anpassungstest kann überprüft werden, ob diese Annahme im vorliegenden Fall zutreffend ist. Die folgende Abb. 10 zeigt ein Beispiel mit recht guter Annäherung.

Eine Zufallsgröße ist genau dann lognormalverteilt, wenn der Logarithmus dieser Größe normalverteilt ist. Die Kenngrößen μ und σ der zugrundeliegenden Normalverteilung können als Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten Daten berechnet werden (s. [Heft 3]).

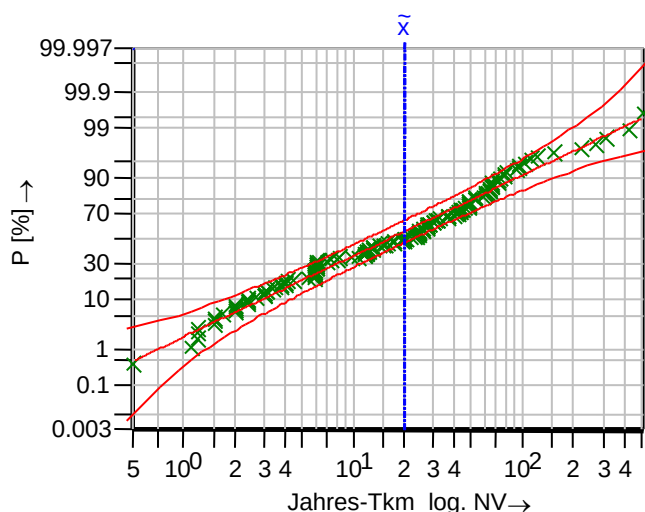


Abb. 10: Darstellung der jährlichen Fahrleistungen im Wahrscheinlichkeitsnetz der Lognormalverteilung

Alle Werte liegen innerhalb des 90%-Konfidenzbereichs.

ANMERKUNG: Die jährlichen Fahrleistungen (Fahrleistungsverteilungen) können z. B. länderspezifisch unterschiedlich sein.



8 Systematische Felddatenerfassung

Für die Entwicklung eines neuen Produkts ist es wichtig, die im Feld auftretenden Belastungen realistisch einzuschätzen, um das Produkt für die geplante Lebensdauer betriebssicher und dennoch kostengünstig auslegen zu können, sowie kritische Betriebszustände und Feldausfälle zu vermeiden.

Bei der systematischen Feld-Daten-Erfassung (sFDE) geht es darum, funktionale Daten und Belastungsdaten von Produkten zu gewinnen, die sich beim Endbenutzer im Feld befinden.

Moderne Möglichkeiten der Sensorik und Signalverarbeitung erlauben es, solche Daten zu generieren, sammeln, verdichten, speichern und zu übermitteln. Dazu müssen aktuelle Produkte aber bereits über die dafür notwendige Hardware verfügen. Die entsprechenden Komponenten müssen also im aktuellen Produkt bereits vorhanden und nutzbar sein, um die gewünschten Informationen für ein neues Produkt der nächsten oder sogar übernächsten Generation gewinnen zu können.

Man stößt hier gewissermaßen auf das Henne-Ei-Problem. Die Entwicklung muss bereits wissen, welche Daten benötigt werden, um in Form von Hardware und Software die Voraussetzungen für die Datenerfassung zu schaffen. In diesem Kontext wird auch der Begriff „Design to Diagnose“ verwendet. Die Produkte sollten so designt werden, dass sie (mindestens) hinreichend gut diagnostiziert und analysiert werden können. Beispielsweise kann der Einsatz eines zusätzlichen Sensors zunächst als zusätzlicher Kostenfaktor wahrgenommen werden, der die Produktentwicklung und -herstellung verteuert. Auf den zweiten Blick kann sich aber, bezogen auf die Lebensdauer des Produkts, ein positiver Kosten-/Nutzen-Effekt ergeben, z. B. durch geringere Service- und Garantiekosten aufgrund einer verbesserten Diagnosemöglichkeit.

8.1 Datensicherheit

Bei der Datenerfassung im Feld genießen Anforderungen im Bereich der Datensicherheit und Vertraulichkeit höchste Priorität. Die Erfassung personenbezogener Daten ist nur erlaubt, wenn eine rechtliche Grundlage vorliegt und diese einen in der Grundlage abgedeckten Zweck erfüllt. Beispiele für mögliche Rechtsgrundlagen sind u. a. das legitime Interesse des Herstellers (z. B. im Bereich Produktqualität und -sicherheit) oder das explizite Einverständnis zur Datenerfassung durch das sogenannte „Data Subject“, d. h. den Nutzer des überwachten Produkts.

Kann sichergestellt werden, dass bei der Datenerfassung keine personenbezogenen Daten erhoben werden, entbindet das nicht von der Sorgfaltspflicht im Umgang mit den Daten.

Beim Design einer Lösung zur Datenerfassung ist daher die Einbeziehung der Rechtsabteilung mit Schwerpunkt Datenschutz erforderlich, u. a. zur Bewertung, ob ein Personenbezug vorliegt und wenn ja, welche rechtliche Grundlage zur Erfassung verwendet werden kann.



8.2 Datenanalyse im Rahmen von Feldtests

Ein Ziel der Auswertung von Felddaten ist es, praxisnahe Anforderungen daraus abzuleiten und dafür geeignete Testprofile. Eine gute Möglichkeit, solche Felddaten zu sammeln, sind Feldtests mit einer begrenzten Anzahl von Anwendern. Falls der Endanwender Geräte nicht unmittelbar in seinem Bereich in Betrieb nehmen und ausprobieren kann, besteht die Möglichkeit, ihn zu Bosch einzuladen und dort die Geräte testen zu lassen. Ein kritischer Aspekt dabei ist die Auswahl einer repräsentativen Gruppe von Anwendern, die sich wesentlich auf die Testergebnisse auswirken kann.

Daten, die beim Anwender gesammelt werden, sind oft Zeitreihen mit hoher Abtaste. Nach mehreren Stunden Betrieb können so große Datenmengen im Bereich einiger Gigabytes zusammenkommen. Im Interesse der Vergleichbarkeit solcher Daten ist eine Datenreduktion erforderlich. Dazu werden oft Klassiermethoden eingesetzt.

8.2.1 Klassiermethoden

Man unterscheidet Zählverfahren, 1-parametrische und 2-parametrische Klassiermethoden. Beispiele für Zählverfahren:

- Ereigniszähler (z. B. Starts des Geräts, Schalterbetätigungen)
- Zeiterfassung (z. B. Motorlaufzeit)

1-parametrisch

- Verweildauerzählung (time-at-level counting)
- Spannenpaar-Verfahren (range-pair counting)
- 1-parametrische Rainflow-Zählung

2-parametrische Zählung

- 2-parametrische Rainflow-Zählung
- 2-parametrische Verweildauerzählung (time-at-level counting)

In vielen Fällen hat die Betriebsdynamik beim Anwender einen großen Einfluss auf die Belastung der Komponenten. Die Betriebsdynamik kann mit Hilfe des Spannenpaar-Verfahrens oder der Rainflow-Zählung erfasst werden. Im folgenden Beispiel wird das Spannenpaar-Verfahren benutzt, um die von einem Gerät im Feldtest ertragenen Lastzyklen zu ermitteln. Dazu wird die Häufigkeit der Zyklen in Abhängigkeit von deren Höhe (Schwingbreite „delta“) ausgewertet.

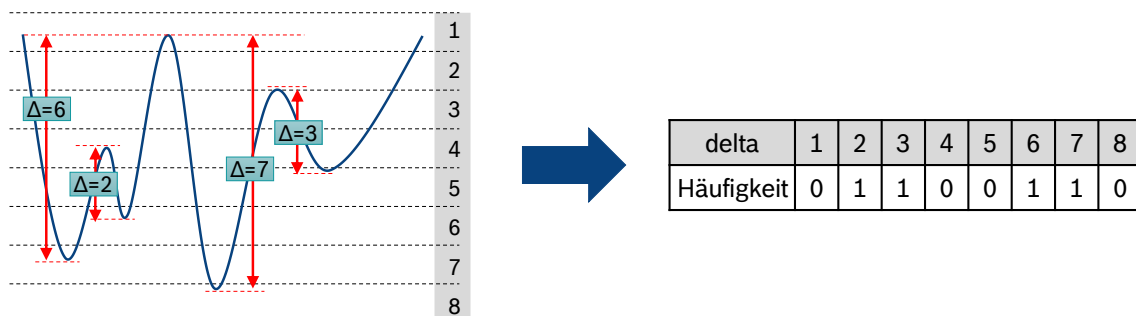


Abb. 11: Zählung nach dem Spannenpaar-Verfahren



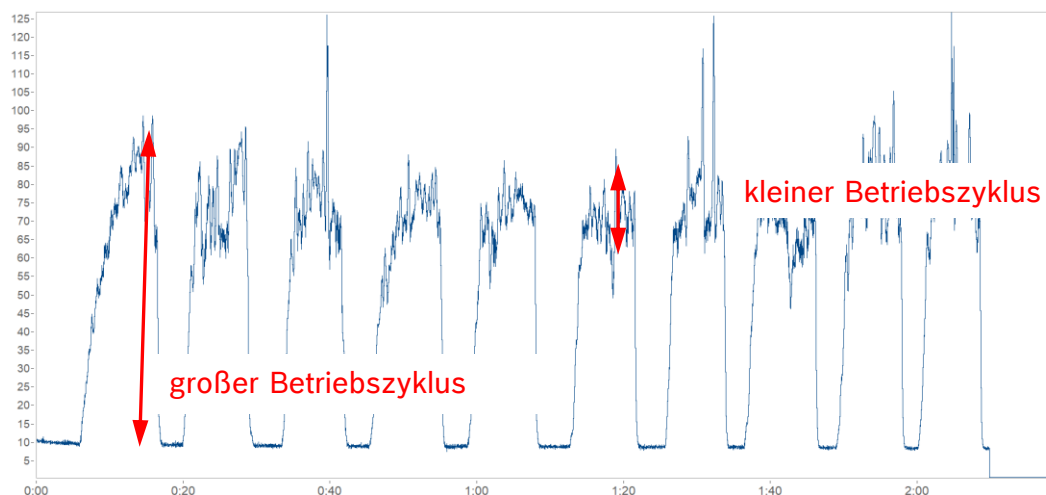


Abb. 12: Typische gemessene Zeitreihe.

Durch Bereichs-Paar-Zählung wurden die Zeitreihen in folgende Lastwechseldiagramme umgewandelt.

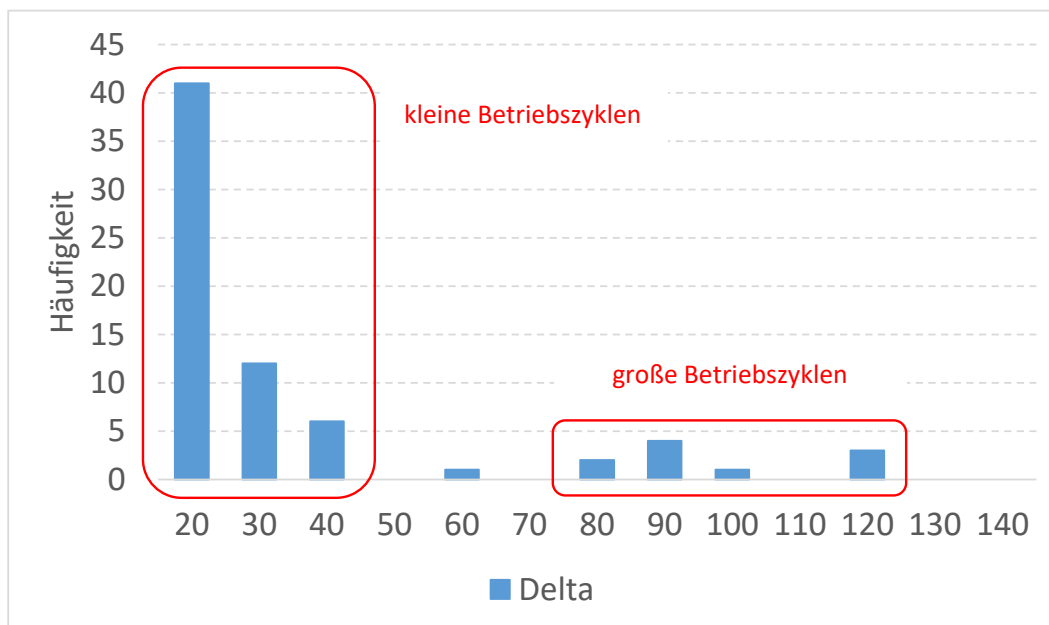


Abb. 13: Häufigkeiten kleiner und großer Betriebszyklen als Ergebnis der Bereichs-Paar-Zählung

Insgesamt wurden 10 große Betriebszyklen mit Höhen zwischen 80 und 120 Einheiten gezählt, 60 kleinere mit Lastwechseln zwischen 20 und 40. Diese Werte können benutzt werden, um zwischen verschiedenen Anwendern und Lastprofilen zu unterscheiden. Allerdings muss man für einen Vergleich die Häufigkeiten auf dieselben Bezugsgrößen normieren (z. B. Häufigkeit pro Stunde, Tag, km, ...).

Weiterführende Methoden und Erläuterungen zu Lastkollektiven und Zählverfahren findet man z. B. in [Haibach], [Köhler] und [DIN 45667].



8.2.2 Informationsgewinn aus Lastkollektiven

Aus Lastkollektiven lassen sich je nach Betrachtung unterschiedliche Informationen ableiten.

Einzelbetrachtung: Das Lastkollektiv eines einzelnen Produkts (über einen gewissen Zeitraum) kann gegen die Spezifikation der einzelnen Bestandteile des Produkts geprüft werden, z. B. um Aussagen über die Restlebensdauer des Produkts (bei gleichbleibender Belastung) zu machen.

Gruppierte Betrachtung: Ein produktspezifisches Lastkollektiv kann im Vergleich zu den einzelnen oder gruppierten Lastkollektiven von Produkten gleichen Typs und gleicher Anwendungsumgebung Hinweise auf eine Unter- oder Überlastung des Produkts gegenüber dem Durchschnitt geben („Ausreißer-Erkennung“).

Die Summe aller Lastkollektive kann verwendet werden, um bezogen auf ein lastbestimmendes Merkmal ein bestimmtes Quantil zu ermitteln, z. B. das 95%-Quantil: 95 % aller betrachteten Produkte haben eine geringere Belastung.

8.2.3 Datenqualität, Datenbereinigung

Eine ausreichend gute Datenqualität ist Grundvoraussetzung für jede Datenanalyse. Andernfalls können die aus den Daten gewonnenen Ergebnisse zu falschen Schlussfolgerungen führen.

Der jeweilige Use Case bedingt, was unter „ausreichend guter Datenqualität“ verstanden wird. Wenn ein Datensatz beispielsweise für einen Großteil der Messgrößen lückenhaft ist, die Daten eines für den Informationsgewinn wesentlichen Merkmals aber vollständig vorliegen, so steht der gezielten Analyse dieses Merkmals nichts im Wege.

Kriterien, die bei der Bewertung der Datenqualität herangezogen werden können, sind beispielsweise die:

- Anzahl der erfassten Datenpunkte vs. Anzahl der erwarteten Datenpunkte (z. B. gut einsetzbar bei einer festen Abtastfrequenz),
- Anzahl der Datenlücken (z. B. bei minütlicher Abtastung: Anzahl der Lücken > 5 min),
- maximale Zeitdauer ohne Datenerfassung innerhalb des Datensatzes.

Skaliert auf längere Zeiträume:

- Anzahl der Tage mit Datenlücken
- Maximale Anzahl Tage ohne Daten pro Monat/Jahr

Je nach Use Case und dessen Sensitivität gegenüber fehlenden Daten sind entsprechende Grenzwerte festzulegen, bei deren Überschreitung die Daten nicht oder nur eingeschränkt verwendet werden sollten.

Welche Vorteile hat der Kunde von der Datenerfassung und Condition Monitoring?

- Nicht mehr Wartung als nötig, ausfallfreier Betrieb seiner Anlage, niedrige Servicekosten
- kurzfristige Reparatur, weil dem Servicetechniker der Fehler bereits bekannt ist
- Software updates online möglich
- Empfehlung zu passendem Gerät (Gerätekategorie oder Geräteprogramm)

Welche Vorteile hat der Hersteller des Produkts?

- Richtige konstruktive Auslegung des Produkts (kein under/over engineering)
- Chancen für neue Geschäftsmodelle und Dienstleistungsangebote?



9 Weibull-Verteilung

Der schwedische Ingenieur W. Weibull [Weibull] entwickelte Anfang der 50er Jahre unter ganz allgemeinen Voraussetzungen die universelle Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion, von der er zeigen konnte, dass sie in vielen Fällen eine gute Beschreibung der Eigenschaften von realen Objekten darstellt:

- Zugfestigkeit von Stahl
- Reißfestigkeit von Baumwollfasern
- Partikelgröße von Flugasche
- Ermüdungslebensdauer eines Stahls

Weibull schreibt in [Weibull], dass er nie der Ansicht gewesen sei, diese Funktion sei immer gültig. Dennoch hat sich die Weibullsche Verteilungsfunktion in vielen Fällen als Modell bewährt und ist heute untrennbar mit der Auswertung von Lebensdaueruntersuchungen verbunden.

Ausgangsbasis für eine Weibull-Auswertung sind meist Ausfallzeiten von Prüfobjekten, die auf einem oder mehreren Prüfständen jeweils bis zum Ausfall beansprucht worden sind.

Unterteilt man die Zeitachse in gleich große Intervalle und trägt die Anzahl der Ausfälle in jedem Intervall gegen die Anzahl der zu Beginn des Intervalls noch intakten Erzeugnisse auf (Ausfallquote), so kann sich eine Darstellung wie in Abb. 14 ergeben.

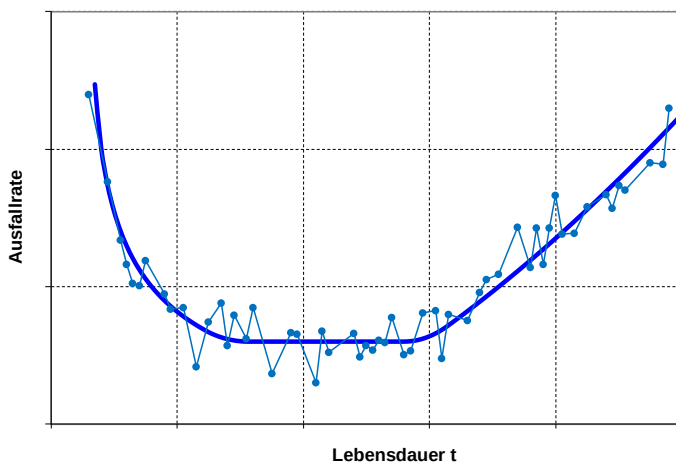


Abb. 14: „Badewannenkurve“ (schematisch)

Aufgrund der Ähnlichkeit mit dem Schnittbild eines Längsschnitts durch eine Badewanne trägt der Graph der Ausfallrate $\lambda(t)$ den Namen „Badewannenkurve“.

Die empirisch ermittelte Ausfallquote (Punkte) ist eine Schätzung der theoretischen Ausfallrate $\lambda(t)$, veranschaulicht durch die durchgezogene Kurve.

Die Badewannenkurve ergibt sich i. Allg. durch Überlagerung mehrerer Ausfallarten und wird daher in die drei Bereiche fallender, konstanter und ansteigender Ausfallrate unterteilt.

ANMERKUNG 1: Übertragen auf die Lebensdauer eines Menschen entsprechen die genannten Bereiche etwa den Lebensphasen Kindheit (Totgeburt, plötzlicher Säuglingstod, Tod durch Kinderkrankheiten), Erwerbsalter (Unfälle in Beruf und Freizeit, tödliche Erkrankungen, Operationen), Ruhestand (Alterschwäche, erhöhte Unfallgefahr).

ANMERKUNG 2: Durch die Weibull-Verteilung lassen sich die drei Bereiche nur separat beschreiben. In der Literatur tauchen daher immer wieder Modellansätze mit drei oder mehr Parametern auf, die in der Lage sind, die Badewannenkurve mit nur einer Verteilungsfunktion zu beschreiben, z. B. die von Hjorth vorgeschlagene IDB-Verteilung (Increasing, Decreasing, Bathtub-shaped).

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Weibull-Verteilung und ihre Anwendung im Rahmen der Risikoanalyse. Man muss sich dabei bewusst sein, dass die Weibull-Analyse allein keine Risikoanalyse/Risikobeurteilung darstellt, solange die wesentlichen Elemente fehlen, die in den vorangegangenen Kapiteln behandelt sind.



9.1 Zweiparametrische Weibull-Verteilung

Parameter der zweiparametrischen Weibull-Verteilung sind die charakteristische Lebensdauer T und der Formparameter b . Durch Auftragung gemessener Ausfallzeiten t_i von Produkten, Komponenten oder Bauteilen im Weibull-Netz können Schätzwerte dieser beiden Parameter bestimmt werden. Verfahren hierzu sind im Abschnitt 9.6 angegeben.

t Lebensdauer

b Formparameter oder Weibull-Exponent. Die Größe b bestimmt die Steigung der Geraden im Weibull-Netz — daher auch die alternative Bezeichnung Ausfallsteilheit — und erlaubt eine Charakterisierung des Ausfallverhaltens.

Die charakteristische Lebensdauer T gibt die Zeit an, bis zu der 63 % der Einheiten einer Grundgesamtheit ausgefallen sind. T wird auch als Skalenparameter bezeichnet.

T Durch Einsetzen von T in die Verteilungsfunktion $F(t)$ ergibt sich $F(T) = 1 - \frac{1}{e} = 63,2 \%$.

t_0 Ausfallfreie Zeit

Formeln und Definitionen

Funktion	Definition bzgl. der Grundgesamtheit	Definition bzgl. einer Betrachtungseinheit
Ausfalldichtefunktion $f(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$	Ableitung der Ausfall-Wahrscheinlichkeitsfunktion. $f(t) \cdot dt$: Anteil der Grundgesamtheit, der im folgenden Zeitintervall dt ausfällt	$f(t) \cdot dt$: Wahrscheinlichkeit, dass eine Einheit, die bis zum Zeitpunkt t überlebt hat, im folgenden Zeitintervall dt ausfällt.
Ausfall-Wahrscheinlichkeitsfunktion $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$	Ausfallanteil einer Grundgesamtheit ab Beanspruchungsbeginn bis zu einer Zeit t .	Wahrscheinlichkeit, dass die Einheit bis zu einer Zeit t ausfallen wird.
Zuverlässigkeitsfunktion $R(t) = 1 - F(t)$	Anteil einer Grundgesamtheit, der eine vorgegebene Zeit t überlebt.	Überlebenswahrscheinlichkeit: Wahrscheinlichkeit, dass die Einheit die Zeit t überlebt.
Ausfallrate $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1}$	$\lambda(t) \cdot dt$: Anteil des Restbestands, der im folgenden Zeitintervall dt ausfällt (empirisch: Ausfallquote).	$\lambda(t) \cdot dt$: Wahrscheinlichkeit, dass eine Einheit des Restbestands, der bis zum Zeitpunkt t überlebt hat, im folgenden Zeitintervall dt ausfällt.



Weitere Beziehungen

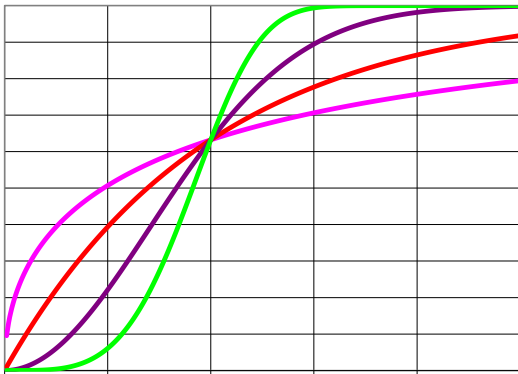
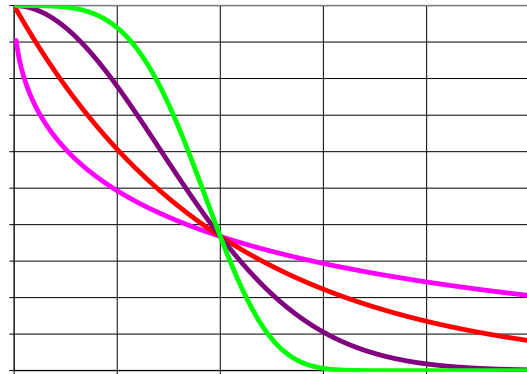
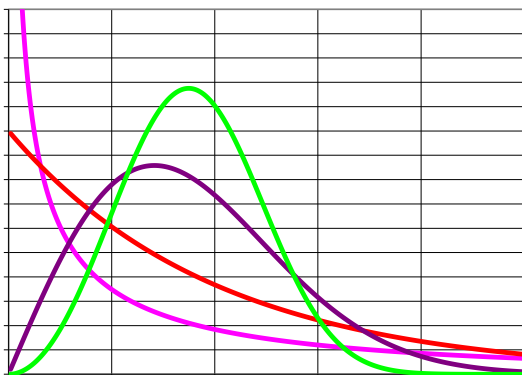
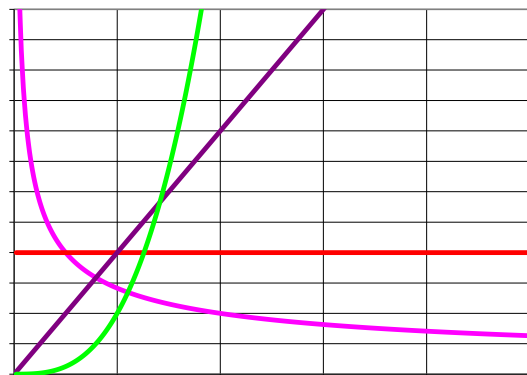
Der Erwartungswert von t , also die mittlere Zeit bis zum Ausfall (Mean Time To Failure) ist

$$E(t) = MTTF = T \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$$

t_q ist das q -Quantil der Weibull-Verteilung, also die Zeit, bis zu welcher der Anteil q der Grundgesamtheit ausgefallen ist:

$$t_q = MTTF \cdot \frac{\left[-\ln\left(1 - \frac{q}{100}\right)\right]^{\frac{1}{b}}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)} \quad \text{bzw.} \quad t_q = T \cdot \left[-\ln\left(1 - \frac{q}{100}\right)\right]^{\frac{1}{b}}$$

$t_{0,5}$ ist der Median der Verteilung, auch als B_{50} bezeichnet: $t_{0,5} = T \cdot (\ln(2))^{\frac{1}{b}}$

Verteilungsfunktion $F(t)$ Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ Dichtefunktion $f(t)$ Ausfallrate $\lambda(t)$ 

— $b=0,5$ — $b=1$ — $b=2$ — $b=4$

Abb. 15: Verläufe von $F(t)$, $R(t)$, $f(t)$ und $\lambda(t)$ für $T=1$ und verschiedene Werte von b



9.2 Darstellungen im Weibull-Netz

Wie folgende Gleichung zeigt, überführt die Transformation $\ln(-\ln(1 - F(t)))$ Weibull-verteilte Daten $(t_i; F(t_i))$ in einen linearen Zusammenhang:

$$y_i = \ln(-\ln(1 - F(t_i))) = b \cdot \ln(t_i) - b \cdot \ln(T)$$

Er entspricht einer Geradengleichung $y = b \cdot x + a$

mit Steigung b und Achsenabschnitt $a = -b \cdot \ln(T)$.

Die Auftragung der Punkte $y_i = \ln(-\ln(1 - F(t_i)))$ gegen $\ln(t_i)$ im Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibull-Verteilung ergibt daher eine Darstellung, die näherungsweise einer Geraden mit Steigung b entspricht.

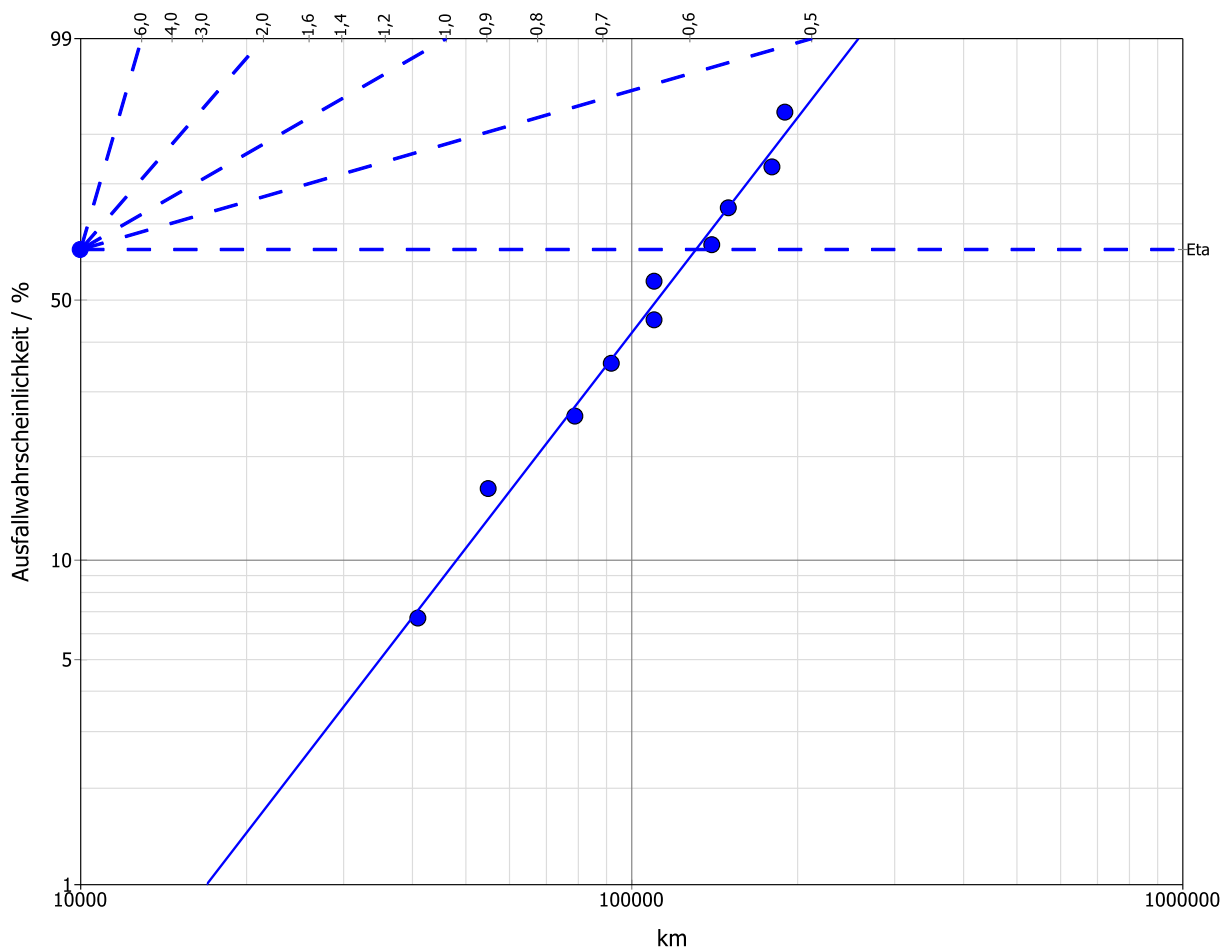


Abb. 16: Weibullnetz mit zehn Datenpunkten; $b = 2,25$ und $T = 130784 \text{ km}$



9.3 Interpretation der Ausfallsteilheit b

Die Badewannenkurve (Kapitel 9) ergibt sich i. Allg. durch Überlagerung von drei typischen Ausfallarten und wird daher in folgende Bereiche unterteilt:

- Bereich fallender Ausfallrate: Frühausfälle ($b < 1$)
- Bereich konstanter Ausfallrate: Zufallsausfälle ($b = 1$)
- Bereich steigender Ausfallrate: Verschleißausfälle ($b > 1$)

Durch die Weibull-Verteilung lassen sich alle drei Ausfallarten separat beschreiben.

Übertragen auf die Lebensdauer eines Menschen entsprechen die genannten Ausfallarten etwa den Lebensphasen Kindheit (plötzlicher Säuglingstod, Tod durch Kinderkrankheiten), Erwerbsalter (Unfälle in Beruf und Freizeit, tödliche Erkrankungen, Operationen), Ruhestand (Altersschwäche, erhöhte Unfallgefahr).

$b = 1$	Konstante Ausfallrate, d. h., das Ausfallverhalten verändert sich nicht mit der Zeit. Beispiel: Zufallsausfälle von elektronischen Bauteilen. Die Weibull-Verteilung mit $b = 1$ ist identisch mit der Exponentialverteilung. In diesem Bereich der „Zufallsausfälle“ ist die Ausfallwahrscheinlichkeit unabhängig von der Vorgeschichte des Produkts. Innerhalb gleich großer Zeitabschnitte fällt stets der gleiche Anteil der am Anfang jedes Zeitabschnitts noch intakten Produkte aus.
$b < 1$	Abnehmende Ausfallrate, z. B. in der Einlaufphase eines Produkts. Ein Ausfallverhalten mit $b < 1$ bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall bei Beanspruchungsbeginn hoch ist und mit der Zeit abnimmt („Kinderkrankheiten“ eines Produkts). Der häufig benutzte Begriff „Frühausfälle“ kann aber irreführend sein und sollte im Kontext von Felddaten nicht verwendet werden.
$b > 1$	Zunehmende Ausfallrate z. B. Ausfälle durch Verschleiß, Materialermüdung Im Bereich der Verschleißausfälle nimmt die Ausfallwahrscheinlichkeit stetig zu, d. h., es wird immer wahrscheinlicher, dass ein bis dahin noch intaktes Produkt innerhalb des folgenden Zeitabschnitts ausfällt.

Spezialfälle:

$b = 2$	Linear zunehmende Ausfallrate Für $b = 2$ ist die Weibull-Verteilung identisch mit der Rayleigh-Verteilung (ähnlich auch einer Lognormalverteilung). Beschreibt z. B. mechanische Verschleißprozesse in einem Getriebe.
$b \approx 3,6$	Für $b \approx 3,60235$ wird die Schiefe der Weibull-Verteilung verschwindend klein. Ihre Dichtefunktion ähnelt dann derjenigen der Normalverteilung (Glockenkurve) ist aber nur für $x \geq 0$ definiert.



9.5 Dreiparametrische Weibull-Verteilung

9.5.1 Technische Bedeutung der ausfallfreien Zeit

Einige technische Produkte besitzen unvermeidlich eine begrenzte Lebensdauer, weil ein Teil oder mehrere Teile des Produkts mechanisch abgetragen werden, z. B. Autoreifen, Bremsbeläge und –scheiben, Kupplungen, Schleifer (Potentiometer), Bürsten in Elektromotoren und Generatoren. In manchen Fällen ist es möglich, aus dem Verschleiß, der nach einer vorgegebenen Testzeit oder nach einer bestimmten km-Zahl gemessen wird, und dem bekannten „Materialvorrat“ auf die Lebensdauer zu schließen. Diese Hochrechnung setzt allerdings voraus, dass die Gesetzmäßigkeit nach der der Verschleiß erfolgt (z. B. linear), zumindest näherungsweise bekannt ist.

Bei einigen Ausfallmechanismen muss also erst eine bestimmte Zeit t_0 vergehen, bis sich ein Ausfall aufgrund dieser Ursache ereignen kann. Neben den aufgeführten Beispielen des abrasiven Verschleißes sind hier auch zu nennen:

- Korrosion aufgrund elektrochemischer Vorgänge
- Risswachstum und Ermüdungsbrüche bei zyklischer Biegebeanspruchung.
- Lötstellenzerrüttung durch Temperaturwechsel mit der Folge eines Wackelkontakts oder völligen Ausfalls eines elektronischen Bauteils. Dabei entstehen feine Risse, die schließlich bis zum Bruch der Lötstelle führen können.

Selbstverständlich versucht man, Ausfälle aufgrund solcher bekannter Ausfallmechanismen durch konstruktive Auslegung oder geeignete Wartungsmaßnahmen zu vermeiden. Daher tauchen sie bei der Auswertung von Felddaten eher selten auf.

9.5.2 Mathematische Berücksichtigung der ausfallfreien Zeit

Als Modell zur statistischen Beschreibung, der in 11.3.1 beispielhaft aufgelisteten Phänomene, dient die dreiparametrische Weibull-Verteilung.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad \text{Ausfall-Wahrscheinlichkeitsfunktion}$$

$$f(t) = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad \text{Ausfalldichtefunktion}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \quad \text{Ausfallrate}$$

Bei der Darstellung der Urwerte im Weibull-Netz ergibt sich im Falle $t_0 > 0$ eine zur X-Achse hin gekrümmte Kurve.

Sofern die Modellannahme richtig ist, führt eine Transformation der Form $t^* = t - t_0$ im Weibull-Netz zu einer Punktefolge, die durch eine Gerade approximierbar ist. Anhand dieser Geraden lassen sich die interessierenden Kenngrößen bestimmen.



9.5.3 Anmerkungen zum Parameter b bei Berücksichtigung von t_0

Aufgrund der in Abschnitt 9.2 genannten Transformation werden Weibull-verteilte Daten im Weibull-Netz als Gerade dargestellt.

Die Addition einer ausfallfreien Zeit t_0 würde bei linearer Skalierung der Zeitachse die Gerade um den Betrag t_0 nach rechts verschieben. Wegen der logarithmischen Skalierung werden aber Datenpunkte umso weniger nach rechts verschoben, je weiter sie bereits rechts liegen (große Werte von t). Daher bewirkt die Transformation $t^* = t + t_0$ die Krümmung der Geraden zu einer konvexen Kurve.

Bei der Auswertung von Daten mit ausfallfreier Zeit t_0 haben wir die umgekehrte Situation. Bei Behandlung der Daten mit der 2-parametrischen Weibull-Verteilung ergibt sich eine Punktefolge, die erst oberhalb (rechts) von t_0 beginnt. Wenn die Auswerte-Software an diese Punktefolge rein formal eine Gerade anpasst, so hat diese i. Allg. eine große Steigung entsprechend einem b -Wert von 6, 7 oder mehr.

Erst durch Subtraktion der ausfallfreien Zeit t_0 verschwindet die Krümmung und es wird in der Regel ein wesentlich kleinerer b -Wert ermittelt. Was bedeutet es nun, wenn b dann im Bereich von ungefähr 1 oder darunter liegt? Offensichtlich ist es in diesem Fall nicht sinnvoll, von Zufallsausfallverhalten und erst recht nicht von Frühausfallverhalten zu sprechen.

9.6 Ermittlung der Verteilungsparameter

9.6.1 Methode der kleinsten Quadrate

Aus der Verteilungsfunktion $F(t, b, T)$ ergibt sich durch zweifaches Logarithmieren

$$\ln(-\ln(1 - F(t_i))) = b \cdot \ln(t_i) - b \cdot \ln(T)$$

und Auftragung der Größe $\ln(-\ln(1 - F(t_i)))$ gegen $\ln(t_i)$ eine Gerade der Form

$$y = g(x) = a + b \cdot x$$

mit Steigung b und Achsenabschnitt $a = -b \cdot \ln(T)$.

Mit Hilfe der Kleinstquadratmethode können die Steigung b und der Achsenabschnitt a relativ leicht berechnet werden. Dazu gibt es zwei Ansätze (s. [Sachs])

Regression von Y auf X

Bei der Regression von Y auf X wird die Summe der quadrierten senkrechten Abstände minimiert.

Dann ist die Steigung b_{yx} :

$$b_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \quad \text{mit} \quad y_i = \ln(-\ln(1 - F(t_i))) \quad \text{und} \quad x_i = \ln(t_i)$$

und der Achsenabschnitt a_{yx} :



$$a_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b_{yx} \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{und wegen } a_{yx} = -\ln(T) \quad \text{schließlich} \quad T = T_{yx} = \exp(-a_{yx}).$$

Regression von X auf Y

Bei Regression von X auf Y wird die Summe der quadrierten waagrechten Abstände minimiert. Dann ist die Steigung b_{xy} :

$$b_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}} \quad \text{mit } y_i = \ln(-\ln(1 - F(t_i))) \quad \text{und} \quad x_i = \ln(t_i)$$

und der Achsenabschnitt a_{xy} :

$$a_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - b_{xy} \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

Durch Umstellung der obigen Gleichung $y = a + b \cdot x$ ergibt sich

$$x = h(y) = \frac{1}{b} \cdot y - \frac{1}{b} \cdot a = b^* \cdot y - \frac{1}{b} \cdot (-b \cdot \ln(T)) = b^* \cdot y + \ln(T).$$

Die Steigung b^* ist daher $b^* = \frac{1}{b_{xy}}$ und $T^* = T_{xy} = \exp(a_{xy})$.

Die Gerade $g(x)$ verläuft tendenziell flacher als $h(x)$, d. h. $b \leq b^*$.

9.6.2 Median-Ranks-Methode

Im Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibullverteilung wird die Größe $Y = \ln(-\ln(1 - F(t_i)))$ gegen $X = \ln(t_i)$ aufgetragen. Während die Ausfallzeiten t_i und damit die Positionen auf der X-Achse bekannt sind, stellt sich die Frage, wie die zugehörigen Y-Werte ermittelt werden können.

Die Formel für Y enthält die Ausfallwahrscheinlichkeiten $F(t_i)$ des i-ten Ausfalls. Die beste Schätzung für die entsprechenden Summenhäufigkeiten H_i , die dem ersten, zweiten, ..., n-ten Ausfall zugeordnet werden können, stellen die sogenannten „median ranks“ dar. Sie lassen sich anhand der Binomialverteilung berechnen, durch Lösung der Gleichung:

$$\sum_{i=1}^n \binom{n}{i} \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i} = 50 \% \quad \text{mit } i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Üblicherweise genügt es, die Benardsche Näherung zu verwenden: $H_i = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}$

Den Median-Ranks-Ansatz kann man sich folgendermaßen erklären.

Wir betrachten eine hypothetische, große Grundgesamtheit von z. B. 1000 Teilen (allgemein n Teile), und die zugehörigen Ausfallzeiten t. Bringen wir die Zeiten in eine aufsteigende Reihenfolge, so können wir diese von 1 bis 1000 durchnummerieren.

Einer Zeit t_i entspricht also die Position i in der Reihe. Wir können aber ebenso gut angeben, dass dieser Position der Anteil $\frac{i}{1000} \cdot 100\%$ der Grundgesamtheit entspricht. Beispielsweise sind dann 20 % der t_i -Werte kleiner als t_{200} .



Wir können die Situation veranschaulichen, indem wir die Prozentzahlen 0,1 %, 0,2 %, ..., 100 % auf einzelne Kugeln schreiben und diese in eine Lostrommel geben.

Ziehen wir nun sehr oft Stichproben vom Umfang 10 und ordnen diese jeweils der Größe nach, so ergibt sich für den ersten Wert eine Verteilung von Prozentzahlen mit einem Median bei 6,7 %. Die Verteilung des größten Werts hat einen Median von 93,3 %. Auf diese Weise erhält man also zu jedem Rang i eine Prozentzahl.

Die Vorgehensweise setzt voraus, dass nach jeder Ziehung die 10 Kugeln wieder in die Lostrommel zurückgelegt werden.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H_i	6,7 %	16,2 %	25,9 %	35,5 %	45,2 %	54,8 %	64,5 %	74,1 %	83,8 %	93,3 %

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Prozentzahl x im Ziehungsergebnis an der Stelle i steht, entspricht der kombinierten Wahrscheinlichkeit, dass

- an den Stellen $1, 2, \dots, i - 1$ Zahlen kleiner x stehen,
- an der Stelle i die Zahl x steht, und
- an den Stellen $i + 1, i + 2, \dots, 10$ Zahlen größer x stehen.

Sie ist durch die Binomialverteilung gegeben. Durch Aufsummieren ergibt sich schließlich die Wahrscheinlichkeit, dass an der Stelle i eine Zahl $\leq x$ steht. Dies entspricht der oben angegebenen Formel, mit $H_i = p$.

ANMERKUNG 1: Das vorstehende Beispiel erklärt den mathematischen Hintergrund für den Fall $n = 10$, ist aber auf beliebige n übertragbar.

ANMERKUNG 2: In gleicher Weise kann man die besten Schätzer für die erste, zweite, ..., sechste Lottozahl berechnen. Das sind die Zahlen 5, 13, 21, 28, 36 und 44. Es ist allerdings nicht möglich, damit die Gewinnchancen im Lotto zu erhöhen. Die Zahl 5 bedeutet lediglich, dass die kleinste Zahl bei einer Ziehung mit gleicher Wahrscheinlichkeit von 50 % kleiner-gleich oder größer als 5 ist.

ANMERKUNG 3: Die Bezeichnung „median ranks“ wird häufig mit „Medianränge“ übersetzt. Diese Übersetzung könnte so missverstanden werden, dass es um die Ränge von Medianen geht und erscheint in Anbetracht der obigen Erklärung wenig plausibel. Verständlich wird die Bezeichnung „median ranks“ nur dann, wenn man die Prozentzahlen als „Ranggrößen“ interpretiert. Der Median (50 %-Wert) bezieht sich dann jeweils auf die Verteilung dieser Ranggrößen. Ein „median rank“ ist also eher als „medianer Rang“ oder „mittlerer Rang“ zu verstehen.



9.6.3 Rangregression

In der klassischen Statistik heißt die lineare Regression, bei der die Summe der quadrierten senkrechten Abstände minimiert wird, Regression von Y auf X, so wie es im oberen Teil von Abschnitt 9.6.1 beschrieben ist. Dabei wird vorausgesetzt, dass es sich bei X und Y um unabhängige Variable handelt und der Zusammenhang zwischen einem erklärenden, nichtzufälligen Merkmal X und einem Zielmerkmal Y durch eine Funktion der Form $Y = a + b \cdot X + \epsilon$ beschreibbar ist. Insbesondere bei geplanten Versuchen wird X auf die gewünschten Werte x_i eingestellt und die zugehörigen y_i werden gemessen.

Auch Weibull++ unterscheidet bzgl. der Rangregression die beiden in 10.5.1 beschriebenen Ansätze und empfiehlt die Regression in Richtung der Achse, auf welcher die „unsicheren“ Werte dargestellt werden.

Im Allg. läuft ein Prüfstandstest bis zum Ausfall aller n getesteten Teile. Würde man den Test mehrfach mit n neuen Teilen wiederholen, so ergäben sich für die Zeit bis zum ersten Ausfall stets unterschiedliche Werte. Dem ersten Ausfall mit Rang 1 wird aber stets dieselbe Summenhäufigkeit H_1 zugeordnet. Dasselbe gilt für die weiteren Ränge i und zugehörigen H_i . Die „Unsicherheit“ besteht also in den Werten auf der X-Achse, d. h., X ist eine Zufallsgröße. Weibull++ empfiehlt in diesem Fall die Minimierung der waagrechten Abstände der Punkte von der Geraden, bezeichnet dies aber als Rangregression auf X (RRX).

Auch die Software Minitab betrachtet die auf der X-Achse aufgetragenen Lebensdauerdaten als Zufallsergebnisse und minimiert bei Auswahl von „Least Squares Estimation: failure time(X) on rank(Y)“ die waagrechten Abstände der Punkte von der Geraden.

ANMERKUNG: Es ist unklar, warum die Notation in der Software Weibull++ von der üblichen Notation der klassischen Statistik abweicht. Die mit Weibull++ und Minitab erhaltenen Ergebnisse sind identisch.

Als ein Vorteil der Rangregression ist zu erwähnen, dass sie in Form des Korrelationskoeffizienten ein Maß dafür angeben kann, wie gut die angepasste Gerade die Punktefolge beschreibt, wie gut also das Modell zu den beobachteten Daten passt.

Bei der Auswertung von Felddaten hat man es in der Regel mit vergleichsweise wenigen Ausfällen aber einer großen Zahl noch intakter Produkte zu tun. Für die Auswertung solcher Daten ist der Maximum-Likelihood-Methode der Vorzug zu geben (s. MLE in Abschnitt 9.6.5).

9.6.4 Ermittlung der Weibull-Parameter in EXCEL

Gemäß 11.4.1 ergibt die Auftragung der Größe $y_i = \ln(-\ln(1 - F(t_i)))$ gegen $x_i = \ln(t_i)$ eine Gerade mit Steigung b und Achsenabschnitt $a = -b \cdot \ln(T)$.

Steigung und Achsenabschnitt können in EXCEL leicht auf folgende Weise berechnet werden (hier für die Regression Y auf X angegeben):

$$b = \text{STEIGUNG}(Y_Werte; X_Werte)$$

$$T = \text{EXP}(-\text{ACHSENABSCHNITT}(Y_Werte; X_Werte)/b)$$



9.6.5 Maximum-Likelihood-Methode

Die Maximum Likelihood Schätzung (Maximum Likelihood Estimation MLE) ist ein universelles numerisches Verfahren zur Bestimmung von Schätzwerten für die Parameter einer Verteilung. Bei Anwendung des Verfahrens auf die Weibull-Verteilung werden b und T derart bestimmt, dass die Wahrscheinlichkeit, gerade die gefundenen Messwerte t_i zu beobachten, maximal wird.

Diese Wahrscheinlichkeit wird durch die sogenannte Likelihoodfunktion L beschrieben. Die bestmögliche Schätzung für b und T sind diejenigen Parameterwerte, bei denen L ein Maximum annimmt. Ihnen entspricht die bestmögliche Ausgleichsgerade zu den Punkten im Weibull-Netz.

Details dazu sind z. B. in [Heft 13] und [VDA 3.2] zu finden.

Zusätzlich kann mit Hilfe dieser Methode beispielsweise ein 95%-Vertrauensbereich bestimmt werden. Die Grenzlinien dieses Vertrauensbereichs werden als gekrümmte Linien oberhalb bzw. unterhalb der Ausgleichsgeraden im Weibull-Netz dargestellt.

ANMERKUNG 1: Dieser Ansatz erfordert im Unterschied zur Regressionsmethode keine Ausfallwahrscheinlichkeiten und ist deswegen unabhängig von der Rangverteilung.

ANMERKUNG 2: Die Gleichung $\frac{\partial \ln(L)}{\partial b} = 0$ ist nicht analytisch lösbar. Die Lösung b kann aber näherungsweise z. B. mit Hilfe des Newton-Verfahrens ermittelt werden. Bei bekanntem b ergibt sich T dann aus folgendem Ausdruck:

$$T = \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i^b \right)^{1/b} \quad (\text{s. auch [DIN 61649]})$$

ANMERKUNG 3: Die ML-Schätzungen für b und T reagieren empfindlich auf Ausreißer.

9.7 Vertrauensbereiche

Unter dem Begriff Vertrauensbereich versteht man i. Allg. ein aus Stichprobenwerten berechnetes Intervall, das den wahren aber unbekannten Parameter einer Verteilung mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit, der Vertrauenswahrscheinlichkeit, überdeckt. Als Vertrauenswahrscheinlichkeit wird z. B. 95% gewählt. Diese Wahrscheinlichkeit besagt, dass bei häufiger berechneter Anwendung dieses Verfahrens die berechneten Vertrauensbereiche in etwa 95% der Fälle den Parameter überdecken, und ihn in nur 5% der Fälle nicht erfassen.

Im Zusammenhang mit dem Weibullnetz ist der Vertrauensbereich ein durch gekrümmte Linien, die Vertrauensgrenzen, oberhalb und unterhalb der berechneten Ausgleichsgerade begrenzter zweidimensionaler Bereich. Alle in diesem Bereich denkbaren Geraden entsprechen Weibullverteilungen, bei deren Gültigkeit sich rein zufällig die tatsächlich beobachteten Punkte ergeben können. Ein Beispiel zeigt die Abb. 18.

In [VDA 3.2] sind Verfahren bzw. Formeln angegeben, mit deren Hilfe Vertrauensbereiche für die Parameter b und T der Weibullverteilung, sowie für B_{10} -Lebensdauern (allgemein B_q -Lebensdauern) berechnet werden können (s. auch [Sachs]).

Auch mit Hilfe der Likelihoodfunktion L können Vertrauensgrenzen für die Darstellung im Weibullnetz ermittelt werden (Abschnitt 9.6.5).



9.8 Exponentialverteilung

Die Exponentialverteilung ist ein Verteilungsmodell zur Beschreibung von Zufallsausfällen, das beispielsweise bei elektronischen Komponenten häufig zugrundegelegt werden kann.

Diese Verteilung ergibt sich als Spezialfall der Weibull-Verteilung mit Formparameter $b = 1$. Ihre Verteilungsfunktion ist $F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$. Darin ist λ die (konstante) Ausfallrate.

Die Exponentialverteilung hat sich hervorragend bewährt zur Beschreibung radioaktiver Zerfälle. Die Gültigkeit des Zerfallsgesetzes ist in unzähligen physikalischen Experimenten immer wieder bestätigt worden.

Im Zusammenhang mit Lebensdaueruntersuchungen kann die Exponentialverteilung dagegen nur in einem begrenzten Zeitraum Gültigkeit haben („Boden der Badewannenkurve“), da jedes technische Erzeugnis nach genügend langer Zeit durch Verschleiß, Alterung, Ermüdung ausfallen wird (die Ausfallrate λ wird dann zeitabhängig).

Bei der Auswertung eines Datensatzes im Weibull-Netz wird sich praktisch nie exakt der Wert $b = 1$ ergeben. Für praktische Anwendungen kann nach [VDA 3.2] im Falle $0,5 \leq b \leq 1,2$ von „Zufallsausfällen“ ausgegangen werden.



10 Auswertungen auf Basis der Weibull-Verteilung

10.1 Beispiel eines abgeschlossenen Tests

Betrachten wir einen abgeschlossenen Test, bei dem 30 Fahrzeuge einem Dauerlauf unterzogen wurden, bis sie jeweils aufgrund desselben Fehlermechanismus ausgefallen sind.

Nach 28 Ausfällen wird der Test abgebrochen. In diesem Fall geht es nicht darum, vorherzusagen, wann das nächste Fahrzeug ausfallen wird, sondern um die Ermittlung eines statistischen Lebensdauermodells bezüglich des betrachteten Ausfallmechanismus.

Hier die erhobenen Daten als Vielfache von 1000 km, in aufsteigender Reihenfolge. Die Zahlen sind Spaltenweise von oben nach unten und von links nach rechts zu lesen.

14	17	23	27	30	35	45
15	22	25	30	31	38	48
16	23	27	30	34	38	52
16	23	27	30	35	41	53

Mit Hilfe der folgenden Näherungsformel kann zu jedem i-ten Ausfall die zugehörige relative Summenhäufigkeit H_i berechnet werden.

i	km	H_i / %
1	14000	2,5
2	15000	6,0
3	16000	9,5
...	...	...

$$H_i = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \cdot 100 \% \quad \text{mit } n = 28$$

Alternativ dazu sind auch andere Näherungsformeln für H_i üblich.

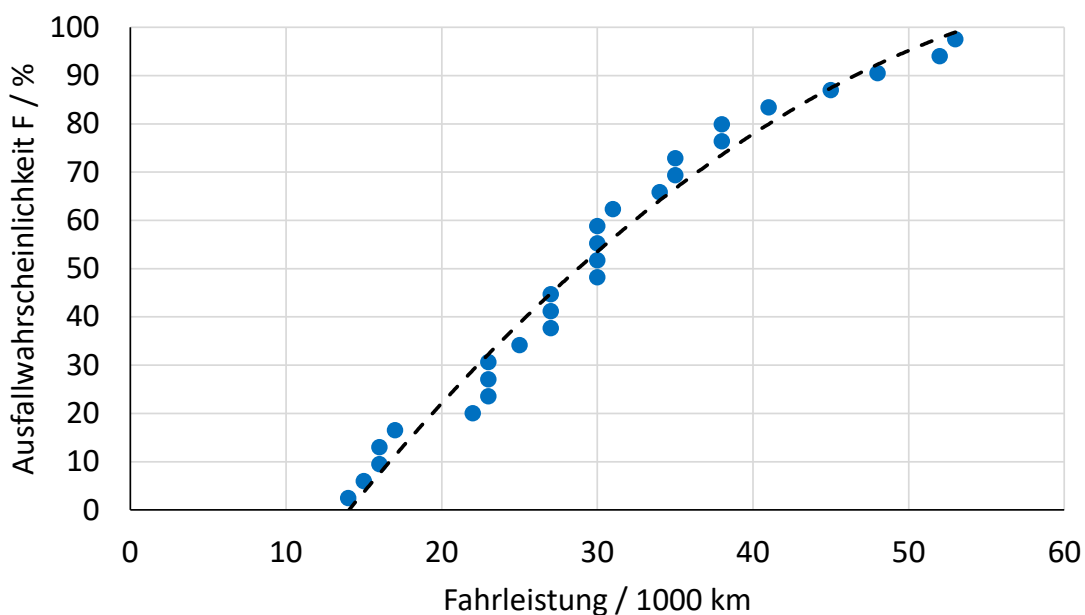


Abb. 17: Ermittlung einer angemessenen Wahrscheinlichkeitsverteilung $F(t)$ zu den gegebenen Ausfalldaten.



Da beide Achsen linear skaliert sind, zeigt die Punktefolge in Abb. 17 einen gekrümmten Verlauf. Bei Auftragung von $\ln(-\ln(1 - F(t_i)))$ gegen $\ln(t_i)$ ergibt sich gemäß dem Abschnitt 9.2 eine Gerade mit Steigung b und Achsenabschnitt $a = -b \cdot \ln(T)$.

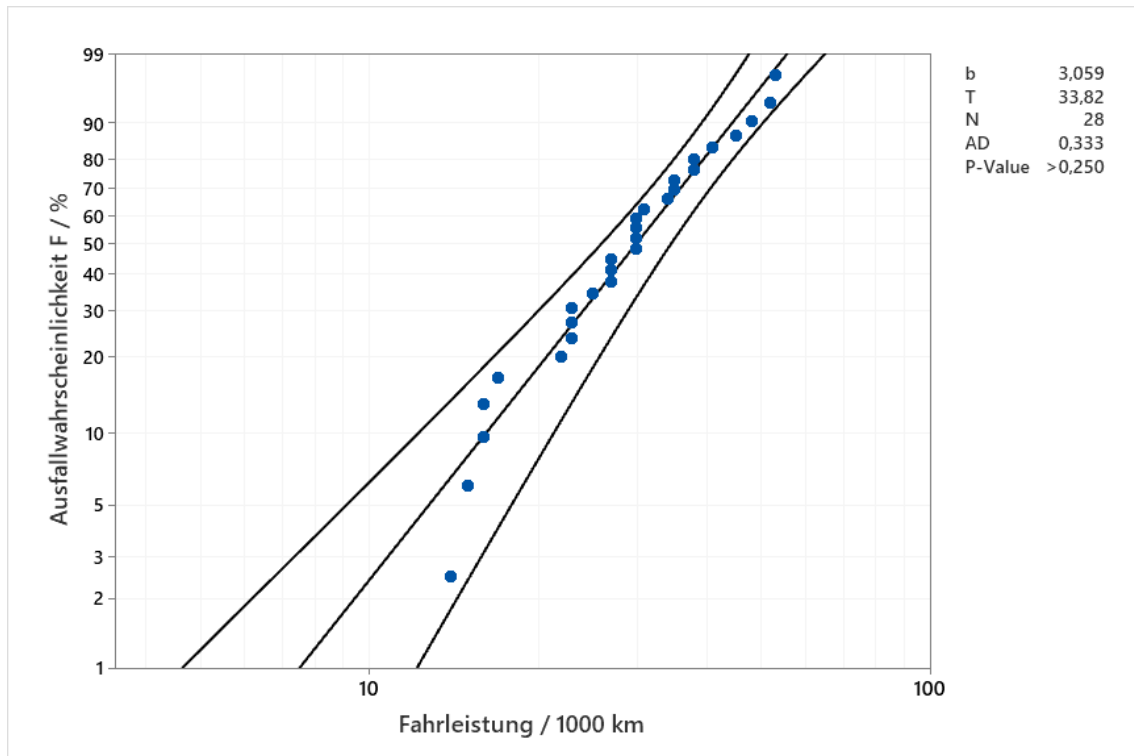


Abb. 18: Weibull-Diagramm der Beispieldaten. Hier ist die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ über der logarithmierten Lebensdauer $\ln(t)$ aufgetragen. Im vorliegenden Fall ist das Lebensdauermerkmal die Fahrleistung bis zum Ausfall.

Die Ausfallsteilheit b und die charakteristische Lebensdauer T werden bei Verwendung der einschlägigen Statistikprogramme im Diagramm angezeigt. Sie können aber auch leicht mit Hilfe der Formeln in Abschnitt 9.6.1 berechnet werden.

Im vorliegenden Fall erhält man $b = 3,1$ und $T = 34 Tkm$.



10.2 Datenquellen

Im Beispiel des Abschnitts 10.1 geht es um einen vollständigen Datensatz zu einem abgeschlossenen Test. Das Ziel dabei ist im Wesentlichen, das Testergebnis technisch zu bewerten. In Unterschied dazu ist das Ziel der Felddatenauswertung insbesondere, in einer frühen Phase, in der Ausfälle beobachtet werden, eine Vorhersage des weiteren Feldgeschehens zu treffen.

Wir haben es also mit den Ausfalldaten zu einem Zeitpunkt zu tun, an dem bis dahin nur ein Teil der Grundgesamtheit ausgefallen ist. Die Nummer des letzten Ausfalls ist also nicht identisch mit dem n in Abschnitt 10.1. Es liegt stattdessen nahe, für n die Anzahl der produzierten Teile zu wählen. Aber auch dabei würde man einen Fehler machen, weil nicht alle produzierten Teile auch verkauft sind und sich im Feld befinden.

Im Allgemeinen liegen also Informationen über die ausgefallenen Teile vor, aber es gibt keine Informationen über die noch in Betrieb befindlichen Teile.

Für eine tragfähige Modellierung des Feldgeschehens werden bei Fahrzeugen in der Regel mindestens die

- monatlichen Produktionszahlen,
- die Fahrleistungsverteilung (Verteilung der Betriebsstunden) der Grundgesamtheit
- und eine Abschätzung der Verzugszeiten (delay of sales, reporting delay)

benötigt. S. auch Kapitel 2.4.

Die Bezugsmenge n beeinflusst das Auswerteergebnis signifikant und ihre richtige Ermittlung ist keine leichte Aufgabe.

Bei der Berechnung müssen ggf. weitere Aspekte berücksichtigt werden:

- Zum Zeitpunkt der Auswertung hat erst ein Teil der Grundgesamtheit höhere Betriebszeiten erreicht.
- Spielt ggf. ein Teilmarktfaktor eine Rolle?
- Ist die Beschränkung auf einen bestimmten Fertigungszeitraum sinnvoll?

Bei Fahrzeugen ist eine typbezogene Betrachtung empfehlenswert. Das gilt auch, wenn mehrere gleiche Teile pro Fahrzeug verbaut sind. Nur der erste Ausfall eines Fahrzeugs wird ausgewertet. Da die Datenerfassung in der Regel monatlich erfolgt, sollte eine Weibull-Analyse ebenfalls auf dieser Basis aktualisiert werden. Es ist nicht sinnvoll, innerhalb eines Monats mehrere Aktualisierungen vorzunehmen.



10.3 Sudden-death-Methode für Felddausfälle

Die Sudden-Death-Methode ist eine Prüfzeit verkürzende Methode zur Untersuchung des Ausfallverhaltens im Rahmen von Prüfstandsversuchen (s. [VDA 3.1], [Heft 13]). Dabei werden die Prüfobjekte in Gruppen eingeteilt. Jede Gruppe wird bis zum ersten Ausfall geprüft.

Diese Methode ist nach [VDA 3.1] auf Felddausfälle übertragbar. Dabei werden die gemeldeten Ausfälle als jeweils erste Ausfälle innerhalb künstlich gebildeter Gruppen von „Prüfobjekten“ betrachtet. Bei dieser künstlichen Gruppenbildung werden die gemeldeten n_f Ausfälle gleichmäßig auf die Gesamtfertigungsmenge n des entsprechenden Bezugszeitraums verteilt. Jede Gruppe (Teilmenge) besteht aus etwa $k = \frac{n - n_f}{n_f + 1} + 1$ Erzeugnissen. Die $k - 1$ Erzeugnisse einer Gruppe, die nicht ausgefallen sind, werden wie "herausgenommene Einheiten" (suspended units) behandelt.

Beispiel:

PD: 10/98

Anzahl der Ausfälle: $n_f = 24$ Fertigungsmenge: $n = 7902$

Teilmenge $k = \frac{n - n_f}{n_f + 1} + 1 = \frac{7902 - 24}{24 + 1} + 1 \approx 316$

Ausfall Nr.	km bis zum Ausfall
1	500
2	600
3	900
4	930
5	1000
6	1500

Ausfall Nr.	km bis zum Ausfall
7	1800
8	2900
9	3000
10	3050
11	3300
12	4000

Ausfall Nr.	km bis zum Ausfall
13	4100
14	4500
15	5000
16	5100
17	6000
18	6900

Ausfall Nr.	km bis zum Ausfall
19	9800
20	10400
21	11500
22	12000
23	14000
24	20000

Im vorliegenden Fall gehören also zu jeder ausgefallenen Einheit 315 Einheiten, die bis zur entsprechenden km-Zahl nicht ausgefallen sind.

Speziell auf die Auswertung von Lebensdauerdaten ausgerichtete Programme, erlauben neben der Eingabe der ausgefallenen auch die der nicht ausgefallenen Einheiten und eine direkte Auswertung solcher gruppierter Daten mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode (s. [VDA 3.1], [Heft 13]).

Die Abbildung 19 zeigt das Ergebnis einer solchen Auswertung mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode.



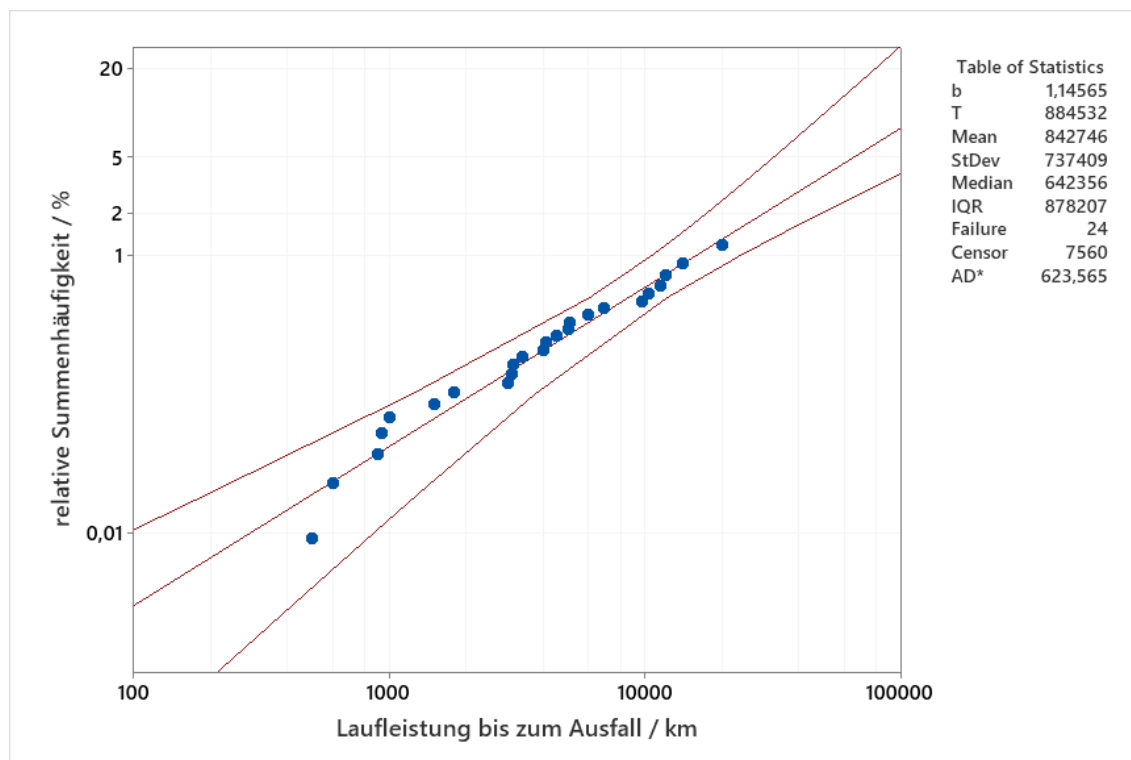


Abb. 19: Ergebnis der Auswertung mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode, inkl. der Vertrauensgrenzen zum Niveau 95 %

Gerundete Ergebnisse:

b	T	B ₁	B ₅	B ₁₀
1,15	885 Tkm	26 Tkm	66 Tkm	124 Tkm

ANMERKUNG: Bei dieser Methode wird vorausgesetzt, dass alle "herausgenommenen" Erzeugnisse einer Gruppe dieselbe Laufleistung haben wie das Ausgefallene. Da alle Gruppen gleich groß sind (hier $k = 316$), wird also z. B. angenommen, dass genauso viele Teile 4 Tkm gelaufen sind wie 20 Tkm. Die Jahres-km-Verteilung (vgl. Kapitel 8) wird also vernachlässigt.

Bei Mischverteilung ergibt sich keine Gerade mit konstantem b , sondern eine Kurve. Das grafische Verfahren nach [VDA 3.1] ist dann nicht anwendbar.

Wie die Grafik zeigt, liegen die relativen Summenhäufigkeiten im Bereich unterhalb von 1 %. Eine Extrapolation, um z. B. T zu ermitteln, entspricht einer Verlängerung der Geraden weit über diesen Bereich hinaus. Unabhängig davon, ob diese Ermittlung grafisch oder numerisch erfolgt, ist damit eine große Unsicherheit verbunden.



[VDA 3.1] beschreibt ein grafisches Verfahren zur Auswertung solcher Daten im Weibull-Netz. Dazu werden die zu den 28 Ausfällen gehörenden Punkte ohne Berücksichtigung der nicht ausgefallenen Einheiten ins Weibullnetz eingezeichnet. Die entsprechende Ausgleichsgerade repräsentiert diese "ersten Ausfälle".

Zu dieser Geraden gehört der Wert $B_{50} = T \cdot (\ln(2))^{\frac{1}{b}}$.

Dem ersten Ausfall einer Gruppe von $k = 316$ Einheiten wird auf der Y-Achse die Summenhäufigkeit $H_1 = \frac{1-0,3}{316+0,4} \cdot 100 \% \approx 0,221 \%$ zugeordnet und auf der X-Achse der Median B_{50} der ersten Ausfälle.

Durch Parallelverschiebung dieser "Gerade der ersten Ausfälle" durch den Punkt $(H_1; B_{50})$ ergibt sich schließlich die gesuchte Gerade zur Weibull-Verteilung der Grundgesamtheit.

Die charakteristische Lebensdauer kann mit Hilfe der Formel für t_q aus Abschnitt 9.1 berechnet werden: $T = t_q \cdot \left[-\ln\left(1 - \frac{q}{100}\right) \right]^{-\frac{1}{b}}$ mit $q = H_1$



10.4 Auswertungsmöglichkeit bei konstanter Ausfallrate

Im vorangegangenen Beispiel mit Daten aus 10/98 ergibt sich für den Formparameter der Wert $b = 1,1$. Da der Vertrauensbereich für b den Wert 1 einschließt, wird für die folgenden Überlegungen vorausgesetzt, dass ein Zufallsausfallverhalten vorliegt ($b = 1$), die Ausfälle somit unabhängig von der Laufleistung sind. Analoge Auswertungen zu weiteren Fertigungsmonaten rechtfertigen diese Annahme.

Die Differenz von Kaufdatum und Beanstandungsdatum entspricht der "Betriebszeit" eines Fahrzeugs (natürlich ist in diesem Zusammenhang kein 24h-Betrieb pro Tag gemeint). Mit dem gegebenen km-Stand kann man dann die mittlere Fahrleistung dieses Fahrzeugs pro Jahr ausrechnen. Dabei können sich sehr große hochgerechnete Jahres-km-Zahlen (weit über 100 Tkm) ergeben, die unrealistisch erscheinen. Da der Median wesentlich unempfindlicher in Bezug auf solche Ausreißer ist als der Mittelwert, sollte vorzugsweise mit dem Median gerechnet werden.

Bei dem Datensatz, der dem Abschnitt 10.3 zu Grunde liegt, ist der Median der Jahres-km-Verteilung ungefähr 20100 km/Jahr. Division durch zwölf ergibt einen Schätzwert für die mittlere monatliche Fahrleistung, im Beispiel ungefähr 1675 km/Monat.

Für jedes Produktionsdatum ab Juli 1997 wurde das Alter in Monaten bis zum September 1999 bestimmt, z. B. 9/99 - 7/97 = 26 Monate. Ein Fahrzeug aus PD 7/97 ist also bis 9/99 ungefähr $26 \cdot 1675 \text{ km} = 43550 \text{ km}$ gefahren. Durch Multiplikation der Produktionsmenge (PM) dieses Monats mit dieser km-Zahl ergibt sich die Gesamt-km-Zahl, die alle in 7/97 gefertigten Fahrzeuge bis 9/99 gefahren sind.

Diese Rechnung wurde für jedes PD durchgeführt und so die Gesamt-km-Zahl aller gefertigten Teile bestimmt (vgl. folgende Tabelle).

Wenn man berücksichtigt, dass zwischen PD und Kaufdatum etwa 1 Monat vergeht, so ist die jeweilige Betriebszeit der Teile einen Monat kürzer. Die Rechnung wurde daher zusätzlich mit dem um einen Monat verminderten Alter durchgeführt.

Rechnung für jedes PD und Summation der Gesamt-km-Zahl aller gefertigten Ez, z. B.:

PD	PM Stk.	Alter in M.	$PM \cdot \text{Alter} \cdot 1675$	$PM \cdot (\text{Alter} - 1) \cdot 1675$
...	...	...	...	...
1/99	13.190	8	$1,8 \cdot 10^8 \text{ km}$	$1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$
2/99	12.903	7	$1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$	$1,3 \cdot 10^8 \text{ km}$
3/99	21.576	6	$2,2 \cdot 10^8 \text{ km}$	$1,8 \cdot 10^8 \text{ km}$
...	...	...	...	...
8/99	15.343	1	$2,8 \cdot 10^7 \text{ km}$	0 km
			$\Sigma \quad 1,94 \cdot 10^9 \text{ km}$	$\Sigma \quad 1,61 \cdot 10^9 \text{ km}$

Ergebnis: $1,94 \cdot 10^9 \text{ km}$ Seit 5/98 gab es 102 Ausfälle.

$$\text{Ausfallrate: } \lambda = \frac{102 \text{ Ausfälle}}{1,94 \cdot 10^9 \text{ km}} \approx \frac{53 \text{ ppm}}{1000 \text{ km}}$$

Unter Berücksichtigung des Lagerversatzes ist die Betriebszeit einen Monat kürzer, das Alter also um einen Monat niedriger. Ausfallrate: $\lambda = \frac{102 \text{ Ausfälle}}{1,61 \cdot 10^9 \text{ km}} = \frac{63 \text{ ppm}}{1000 \text{ km}}$



10.5 Auswertung mit Hilfe der Fahrleistungsverteilung

Voraussetzungen:

- Alle Ausfälle sind bekannt, kein Teilmarkt.
- Der betrachtete Zeitraum sollte so weit zurückliegen, dass für sämtliche Fahrzeuge eine etwa gleiche große Einsatzdauer vorliegt.
- Die Fahrstreckenverteilung ist bekannt (Wahrscheinlichkeitsnetz oder Histogramm).

Zunächst wird eine geeignete Klasseneinteilung bzgl. der Fahrstrecken gewählt.

Die gemeldeten Ausfälle werden den einzelnen Klassen zugeordnet. Außerdem wird anhand der Fahrstreckenverteilung ermittelt, wie viele nicht ausgefallenen Teile auf die einzelnen Klassen entfallen. Zu jeder Fahrstreckenklasse ist also die Anzahl der ausgefallenen und der nicht ausgefallenen Teile bekannt.

In [VDA 3.1] ist ein Beispiel dargestellt, das unter Verwendung mittlerer Ordnungszahlen nach dem Johnson-Verfahren ausgewertet wird. Mit einer geeigneten Software ist jedoch ebenso gut eine Auswertung nach der Maximum-Likelihood-Methode möglich.

Die Voraussetzung, dass die Fahrzeuge eine etwa gleich große Einsatzdauer haben, ist bei Auswertungen innerhalb des Gewährleistungszeitraums nicht erfüllt. Im folgenden Kapitel werden Alternativen für diesen Fall aufgezeigt.

10.6 Zusammenfassung von Daten

Das in Abschnitt 10.3 dargestellte Verfahren setzt voraus, dass die Fahrzeuge etwa gleich lange in Betrieb waren. Eine Auswertung ist also nur für jeweils einen bestimmten Monat möglich, in dem die Fahrzeuge gefertigt (PD) bzw. zugelassen wurden.

Da die meist wenigen Ausfälle in der Regel aber an Fahrzeugen unterschiedlichen Alters auftreten, ist die Datenbasis für eine Auswertung sehr klein, wenn man nur einen einzelnen Monat betrachtet.

Um alle Ausfälle von Fahrzeugen aus mehreren Produktions-/Zulassungsmonaten gemeinsam auswerten zu können, ist es notwendig, die Verteilung der km-Leistungen aller Fahrzeuge der betrachteten Grundgesamtheit bis zum Auswertezeitpunkt zu bestimmen.

Es sei für die folgenden Überlegungen angenommen, dass die Jahresfahrleistung $L_{12}(x)$ bekannt ist (vgl. Abschnitt 7). Ist $L_{12}(x)$ eine Lognormalverteilung mit geometrischem Mittelwert $\bar{x}_g$ und Streufaktor ε , so sind die logarithmierten Fahrleistungen $z = \ln(x)$ normalverteilt. Wir bezeichnen die zugehörige Normalverteilung mit $F_{12}(\bar{z}_{12}; s_{12})$. Sie hat also den Mittelwert $\bar{z}_{12}$ und die Standardabweichung s_{12} .

Die Verteilung $F_j(s)$ nach j Monaten Betriebszeit hat dann den Mittelwert

$$\mu_j = \mu_{12} + \ln\left(\frac{j}{12}\right).$$



Zur Fahrleistungsverteilung nach 6 Monaten gehört also der Mittelwert

$$\mu_6 = \mu_{12} + \ln\left(\frac{6}{12}\right) = \mu_{12} - 0,693.$$

Der Mittelwert verschiebt sich also um den Wert $-0,693$ nach links.

Für die Standardabweichung gilt $s_j = s_{12}$.

Der vielleicht etwas überraschende Sachverhalt $s_j = s_{12}$ ist folgendermaßen zu erklären.

Wegen $\ln(a \cdot x_i) = \ln(a) + \ln(x_i)$ ist

$$\bar{z} = \overline{\ln(a \cdot x_i)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln(a \cdot x_i) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(a) + \ln(x_i)) = \bar{z} + \ln(a)$$

$$s(z) = s(\ln(a \cdot x)) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\ln(a \cdot x_i) - \bar{z}(\ln(a \cdot x)) \right)^2}$$

$$s(z) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\ln(a) + \ln(x_i) - \bar{z} - \ln(a) \right)^2}$$

$$s(z) = s(\ln(a \cdot x)) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\ln(a \cdot x_i) - \bar{z}(\ln(a \cdot x)) \right)^2}$$

$$s(z) = s(\ln(a \cdot x)) = s(\ln(x))$$

Die Standardabweichung ist dieselbe wie bei der Jahresfahrleistung.

Wegen dieser eindeutigen Abbildung kann die Anzahl der Fahrzeuge in den einzelnen km-Klassen über die Normalverteilung bestimmt werden.



10.7 Hochrechnungen innerhalb der Gewährleistungszeit

[Reichmann] beschreibt ein Verfahren zur näherungsweisen Berechnung zeitnaher Prognosen unter der Voraussetzung, dass der Weibullparameter b für das betrachtete Produkt bekannt ist. Dabei werden sowohl der Lagerversatz (Lagerzeit) als auch der Meldeverzug berücksichtigt. In der Diplomarbeit werden zwei Möglichkeiten dargestellt, die am Ende der Gewährleistungszeit zu erwartende Ausfallquote zu prognostizieren, durch Gewichtung der bekannten Ausfallzahlen oder durch Gewichtung der Fertigungsmengen. Die praktische Anwendung der Verfahren wird durch Darstellung entsprechender EXCEL-Tabellen erleichtert.

Ein einfaches Hochrechnungsmodell, welches die Verteilung der Jahresfahrleistung mit berücksichtigt, wird in [Pauli] beschrieben. Sofern also die Verteilung $L(s)$ der Jahresfahrleistung bekannt ist (vgl. 6.2), so kann zu jeder Laufleistung (Strecke) s , bei der sich ein Ausfall ereignet, der Anteil $1 - L(s)$ der Fahrzeuge aus der betrachteten Grundgesamtheit berechnet werden, welche diese Laufleistung noch nicht erreicht haben und noch ausfallen können. Der Kehrwert $\frac{1}{1-L(s)}$ dieses Anteils ist der Hochrechnungsfaktor, mit dem die gemeldete Zahl von Ausfällen bei der Laufleistung s multipliziert werden muss, um die korrigierte (hochgerechnete) Anzahl zu erhalten.

10.8 Weibull-Auswertung einer Treppentabelle

Quartals- beginn	Quartals- ende	Fertigungsmenge:	1163	1357	1439	2046	1357	1112	1943	1429	11846
		Fertigungsquartal:	1Q.2017	2Q.2017	3Q.2017	4Q.2017	1Q.2018	2Q.2018	3Q.2018	4Q.2018	Σ
0	1	Meldequartal 1	9	14	13	19	1	7	15	3	81
1	2	Meldequartal 2	21	42	47	43	28	16	37		234
2	3	Meldequartal 3	15	20	46	23	25	22			151
3	4	Meldequartal 4	18	20	17	21	18				94
4	5	Meldequartal 5	15	15	10	33					73
5	6	Meldequartal 6	7	6	22						35
6	7	Meldequartal 7	9	13							22
7	8	Meldequartal 8	6								6
Σ											696

Tab. 7: Treppentabelle, Stand: Ende 2017

Anhand der in der letzten Spalte aufsummierten Ausfälle und der Gesamtfertigungsmenge ist eine Auswertung im Rahmen des Weibull-Modells möglich.

Alle 81 Teile, die im 1. Quartal ausgefallen sind, waren also maximal 1 Quartal in Betrieb.

Unter Verwendung der Näherungsformel $F(t_i) = \frac{i-0,3}{n+0,4}$ mit $i = 1, 2, 3, \dots, 696$ und $n = 11846$

können die zugehörigen Funktionswerte der Weibull-Verteilung für die Ausfallzeiten t_i ermittelt werden.



Dabei sind die Ausfallzeiten zeilenweise identisch, d. h.

$$t_i = 1 \quad \text{für } i = 1, 2, 3, \dots, 81$$

$$t_i = 2 \quad \text{für } i = 82, 83, 84, \dots, 315$$

$$t_i = 3 \quad \text{für } i = 316, 317, 318, \dots, 466$$

...

$$t_i = 8 \quad \text{für } i = 691, 692, 693, \dots, 696$$

Im Weibull-Netz liegen die Markierungen für die Ausfälle in jedem Quartal daher jeweils senkrecht übereinander. Die Parameter der Weibull-Verteilung können z. B. anhand der Kleinstquadratmethode Abschnitt 9.6.1 ermittelt werden.

Es wird kein Unterschied gemacht zwischen verschiedenen Ausfallarten. Auch unterschiedliche Betriebsstundenzahlen oder Fahrleistungen werden hierbei außer Acht gelassen.

Eine konstruktive Änderung in einem Fertigungsquartal, z. B. zur Beseitigung einer Ausfallursache, bleibt bei der vorstehenden Auswertung unberücksichtigt. Es ist daher sinnvoll, nur solche Fertigungsquartale gemeinsam auszuwerten, die einem bestimmten Stand des Produkts entsprechen.

10.9 Weibull-Auswertung zu Isochronendiagrammen

Zeichnet man im Isochronendiagramm eine zur Zeitachse senkrechte Linie über einem Produktionsquartal, so entsprechen die Schnittpunkte der Senkrechten mit den Schichtlinien den kumulierten Ausfallhäufigkeiten $F(t_i)$ für die verschiedenen Einsatzzeiten t_i (MIS). Damit sind also gerade diejenigen Informationen gegeben, die zur Erstellung eines Weibull-Diagramms benötigt werden. Weil aber die Schichtlinien zu den größeren MIS-Werten immer früher enden, ist die Anzahl der Stützpunkte $[t_i; F(t_i)]$ für die jüngeren Produktionsquartale umso kleiner, je weiter rechts diese auf der Zeitachse liegen. [VDA 3.3]

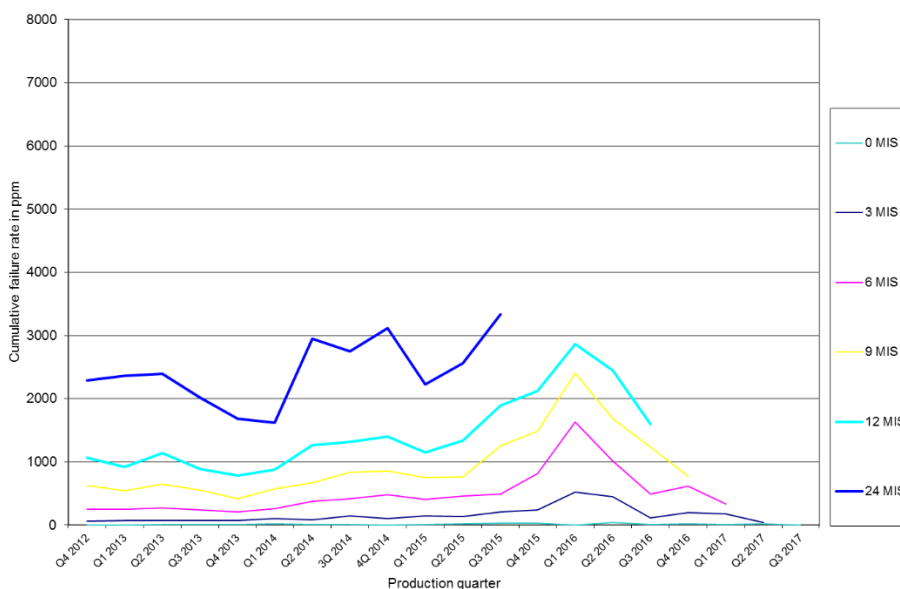


Abb. 20



10.10 Mischverteilung

Eine Mischverteilung von Ausfallzeiten entsteht, wenn Produkte zu einer Grundgesamtheit zusammengefasst werden, die unterschiedlichen Ausfallmechanismen unterliegen (z. B. wegen unterschiedlicher Fertigungsbedingungen oder Materialchargen). Dies bedeutet, dass beispielsweise die 1. Gruppe nur aufgrund Ursache A und die 2. Gruppe nur aufgrund Ursache B ausfällt. Im Weibullischen Modell entsprechen diesen beiden Ausfallmechanismen unterschiedliche Ausfallsteilheiten b_1 und b_2 und/oder unterschiedlichen charakteristischen Lebensdauern T_1 und T_2 .

Bei Auftragung einer solchen Mischverteilung im Weibull-Netz ergibt sich demzufolge i. Allg. keine Gerade, sondern meist eine von der Zeitachse weg gekrümmte Kurve. Sofern die Ausfallursache für jedes Teil festgestellt werden kann, ist es möglich, nach entsprechender Trennung der Daten beider Gruppen separate Weibullanalysen vorzunehmen.

Mischt man zwei Grundgesamtheiten vom Umfang n_1 bzw. n_2 deren Verteilungsfunktionen $F_1(t)$ bzw. $F_2(t)$ sind, so ergibt sich als Verteilungsfunktion der Mischung:

$$F(t) = \frac{n_1}{n} \cdot F_1(t) + \frac{n_2}{n} \cdot F_2(t) \quad \text{mit} \quad n = n_1 + n_2.$$

$$\text{Allgemein gilt } F(t) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^k n_i \cdot F_i(t) \quad \text{mit} \quad n = \sum_{i=1}^k n_i.$$

$$\text{Analog dazu ist } f(t) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^k n_i \cdot f_i(t).$$

Eine andere Situation liegt vor, wenn ein individuelles Erzeugnis aus unterschiedlichen Gründen ausfallen kann. Man spricht in diesem Fall von konkurrierenden Ausfallmechanismen.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ eines Teils ist dann gleich dem Produkt der Überlebenswahrscheinlichkeiten bzgl. der einzelnen k Ausfallursachen:

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_k(t).$$

Die Weibull-Analyse eines Datensatzes, dem nicht unterscheidbare konkurrierende Ausfallmechanismen zugrundeliegen, die also nicht durch Untersuchung der Teile unterscheidbar sind, ist nur mit Rechnerhilfe möglich.



10.11 Trennung verschiedener Ausfallmechanismen

Das folgende Weibull-Diagramm veranschaulicht Ausfälle an einer Fahrzeugkomponente ohne Berücksichtigung der Ausfallursachen (Fehlermechanismen). Es ist erkennbar, dass die Punktefolge deutlich von der Ausgleichsgeraden abweicht.

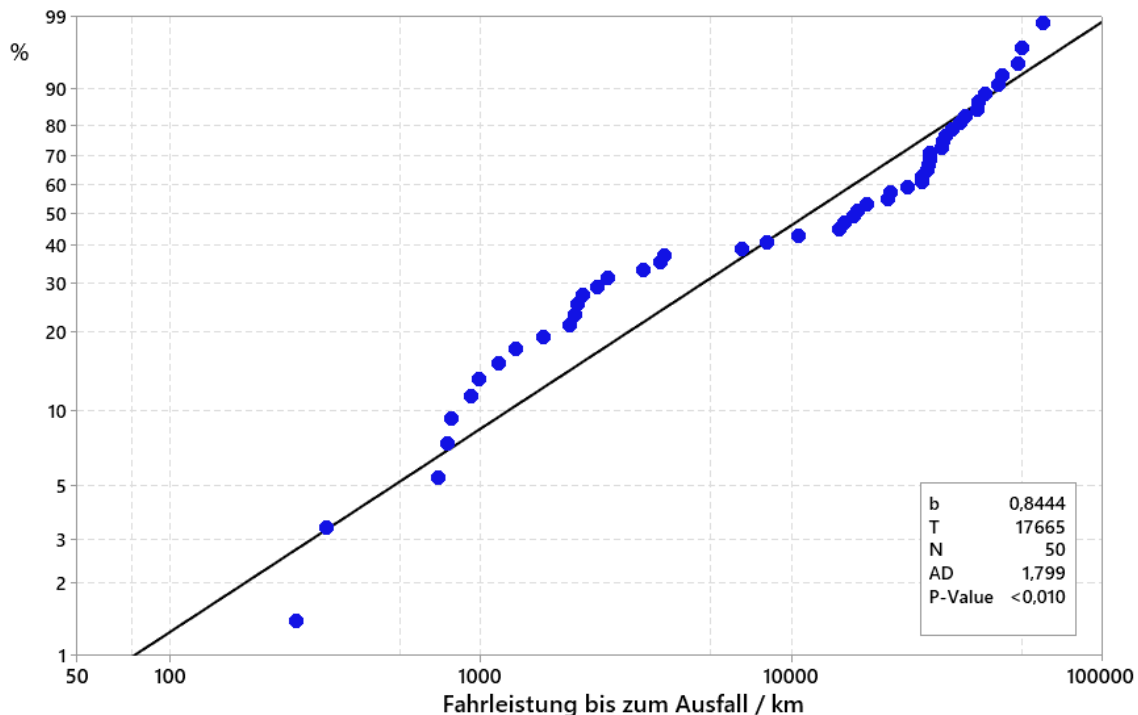


Abb. 21: Weibull-Diagramm von Felddaten ohne Berücksichtigung der Ausfallursache

Die Punkte scheinen erwartungsgemäß einer stückweise konvexen bzw. konkaven Kurve zu folgen, die sich von einer geraden Linie unterscheidet.

Es handelt sich um eine Mischverteilung (s. Abschnitt 10.10) der Form:

$$F(t) = \frac{20}{50} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_1}\right)^{b_1}} \right) + \frac{30}{50} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_2}\right)^{b_2}} \right)$$

Eine sorgfältige Untersuchung der Teile zeigte, dass sie aufgrund zweier unterschiedlicher Ausfallmechanismen versagten. Die Verteilung der Lebensdauer eines Bauteils oder Produkts folgt nur dann der Weibull-Verteilung, wenn es nur einen Mechanismus gibt, der die Lebensdauer bestimmt. Daher ist es notwendig, für jeden Ausfallmechanismus ein separates Weibull-Diagramm zu erstellen. Das Ergebnis ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Es ergeben sich weit auseinanderliegende Geraden mit deutlich unterschiedlichen Geradensteigungen (Ausfallsteilheiten) und charakteristischen Lebensdauern.



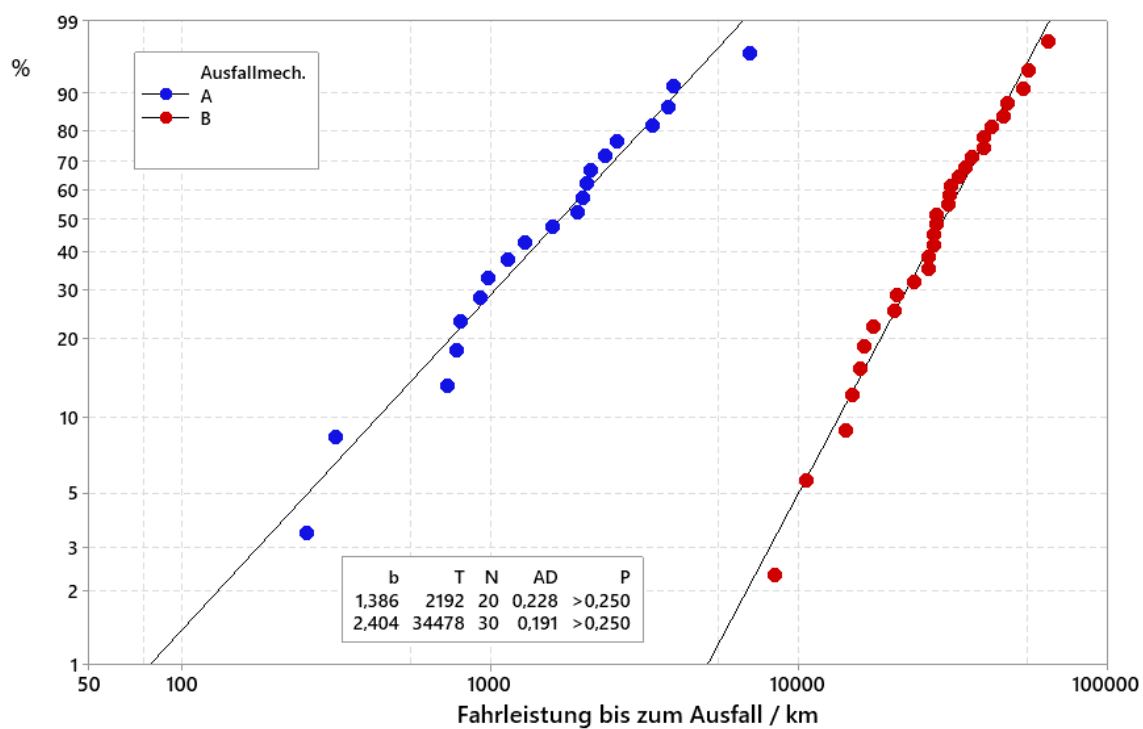


Abb. 22: Weibull-Diagramm derselben Felddaten nach Trennung bzgl. der Fehlermechanismen A und B.



11 Fehlerquellen

11.1 Betroffener Anteil q

Bisher wurde stillschweigend angenommen, dass nach genügend langer Zeit alle Produkte aufgrund des betrachteten Fehlers ausgefallen sein werden. Da aber die Fehlerursache meist nur in einem bestimmten Zeitintervall oder z. B. an einer bestimmten Produktionslinie wirksam war, ist in der Realität nur ein gewisser Anteil q der Grundgesamtheit betroffen. Die Summenhäufigkeit $F(t)$ erreicht dann nicht den Grenzwert 100 %, sondern nähert sich gemäß dem Produkt $q \cdot F(t)$ dem Wert q .

11.2 Unsicherheit in der Wahl des Modells

Die Zukunft lässt sich nicht vorausberechnen. Insbesondere für die ausfallfreie Zeit und den betroffenen Anteil q gilt: Die beobachteten Daten zu einem frühen Zeitpunkt lassen verschiedene Interpretationen zu. Man muss versuchen, durch weiteres Kontextwissen die Möglichkeiten der Modellwahl weiter einzugrenzen.

Jede Dateneingabe ist eine potentielle Fehlerquelle. Aber unter der Voraussetzung, dass Ausfallmeldungen und Fertigungsmengen vollständig und richtig registriert werden, gibt es zwei wesentliche Fehlerquellen:

- unzureichende Kenntnis der Vorgänge im Feld (Teilmarktfaktor, Laufleistungsverteilung, Verzugszeiten) und
- falsche Wahl des Modells (t_0 , q) aufgrund falscher Vorstellungen über den Ausfallmechanismus.

12 Simulation von Felddaten

Interpretiert man mit einem Zufallszahlengenerator erzeugte, im Intervall $[0, 1]$ gleichverteilte Zufallszahlen als Werte der relativen Summenhäufigkeit $F(t)$ und setzt diese in die Gleichung $t = T \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right]^{\frac{1}{b}} + t_0$ ein, so ergeben sich Weibull-verteilte Ausfallzeiten t , wobei b , T und t_0 die Parameter der 3-parametrischen Weibull-Verteilung sind.

Anmerkung: Steht b in Zelle A4 und T in Zelle A2, so lautet die EXCEL-Funktion:

*=A\$2*POTENZ(LN(1/(1 - ZUFALLSZAHL())));1/A\$4)*

Hat man anhand vorliegender realer Felddaten die Werte der Parameter b und T (ggf. auch t_0) abgeschätzt, so kann man mit Hilfe einer solchen Simulation untersuchen, ob sich die beobachteten Felddaten und Darstellungen im Weibull-Netz reproduzieren lassen.

Dabei müssen außerdem z. B. die Fahrleistungsverteilung, der Meldeverzug und der betroffene Anteil berücksichtigt werden.



13 Begriffe und Abkürzungen

13.1 Symbole und Akronyme

b	Parameter der Weibull-Verteilung, Ausfallsteilheit
CS	Control Sampling; Entnahme einer Kontroll-Stichprobe
FLRA	First Level Risk Analysis
LoRA	Levels of Risk Analysis
LP	Linear Prediction, lineare Vorhersage
LT	Life Time (Test)
LT-Tool	Tool to calculate step 3 from a life time test
EQ	Erfassungsquartal (engl.: Reporting Quarter RQ)
GDPR	General Data Protection Regulation
GWA	Global Warranty Analyzer
MIS	Months in Service, Einsatzzeit in Monaten
PD	Produktionsdatum (Datum der Herstellung, Fertigungsdatum)
PF	Hochrechnungsfaktor (Prognosefaktor, engl.: Projection Factor)
PM	Produktionsmenge (produzierte Stückzahl; engl.: Production Volume PV)
ppb	parts per billion (Teile pro Milliarde)
ppm	parts per million
PQ	Produktionsquartal (Quartal der Herstellung, Fertigungsquartal)
PTiS	Part Time in Service

13.2 Begriffe und Definitionen

0-km-/0-h-Ausfall (engl. 0-km-/0-h failure)

Unter 0-km-Ausfällen versteht man i. Allg. Ausfälle von Produkten, die vor Auslieferung an die Endkunden auftreten (z. B. beim Erstausrüster; auch Nachprüfware und Lagerausfälle). Dies gilt sinngemäß auch für Produkte, bei denen die Betriebszeit von Interesse ist (0-h-Ausfälle). Die exakte Definition und Abgrenzung gegenüber Feldausfällen kann bereichs- und produktspezifisch unterschiedlich sein.



8D-Methode (engl.: 8D method)

8D ist eine Methode zur Problemlösung durch ein Team, das dabei acht notwendige Schritte oder Disziplinen bearbeitet. Am Anfang ist es wichtig, das Problem, also die Abweichung vom gewünschten Zustand, genau zu beschreiben. In den folgenden Schritten geht es darum, kurzfristig Abhilfe zu schaffen und sorgfältig die Ursachen festzustellen. Schließlich werden längerfristig wirksame und vorbeugende Maßnahmen durchgeführt, damit dasselbe Problem in Zukunft nicht mehr auftreten kann.

Aktivierungsmechanismus (engl.: activation mechanism)

Physikalische, chemische, mechanische, situative Prozesse oder Voraussetzungen, die notwendig sind, damit ein Fehler zustande kommt. Typischerweise hat jeder Schritt während der Ausbreitung der Abweichung einen spezifischen Aktivierungsmechanismus.

Alterungsausfälle (engl.: aging failures, wear-out failures)

Mit Alterung ist hier im weitesten Sinne eine Veränderung des Gefüges, der Zusammensetzung oder der Eigenschaften durch einen natürlichen zeitabhängigen Vorgang gemeint.

Alterungsausfälle sind im Rahmen der Weibull-Theorie durch eine Ausfallsteilheit $b > 1$ charakterisiert. Beispiele für technische Alterungsvorgänge:

- Transportvorgänge: Diffusion, Verdampfung, Whiskerbildung, Bildung von Ablagerungen, Materialwanderung unter dem Einfluss elektrischer Felder
- Chemische Reaktionen: Oxidation, Sulfidbildung, Polymerisation, Korrosion
- Physikalische und strukturelle Veränderungen: Rissausbreitung, Bruch, plastische Verformung, Materialermüdung, Kriechen, Lösen von Klebeverbindungen, Verschweißen, Rekristallisation
- Verschleiß: mechanischer Abtrag

Ausfall (engl.: failure)

Ausfall bedeutet i. Allg. das Versagen einer bei Beanspruchungsbeginn fehlerfreien Betrachtungseinheit (Produkt) während eines Zeitabschnitts bestimmter Beanspruchung. Ein Ausfall kann völliges Versagen (keine Funktion; Folge z. B. Liegenbleiben des Fahrzeugs, e.: hard failure) oder eine unzulässige Abweichung (aufgrund zeitlicher Drift) von einem spezifizierten Sollwert oder einem Wertebereich (auch Kennlinie) bedeuten (z. B. fehlerhafte Lambda-Regelung ohne spürbare Leistungseinbuße, e.: soft failure).

Ausfallquote (engl.: failure quota)

Anzahl der Ausfälle in einem Zeitintervall bezogen auf den Anfangsbestand und die Größe des Zeitintervalls



Beanspruchung (engl.: stress)

Gesamtheit oder Teilgesamtheit der Einwirkungen, denen die Einheit ausgesetzt ist, wird oder ausgesetzt sein kann. [DIN 40041]

Lokale Auswirkungen der Belastungen im Designelement im Hinblick auf den betrachteten Schädigungs-/Versagensmechanismus (z. B. induzierte Spannung, Temperaturverteilung oder Massenumsatz bei einer chemischen Reaktion).

Beanspruchungsdauer (engl.: operating time)

Die Beanspruchungsdauer ist jene Dauer, während der ein Schädigungsmechanismus wirkt (Vorgänge, die zu einer allmählichen Veränderung der Eigenschaften einer Einheit aufgrund von Belastungen führen). Sie besteht allgemein aus Anteilen der Betriebs- und Stillstandsdauer, denn die muss nicht mit der Beanspruchungsdauer übereinstimmen: Beispielsweise stehen auch bei stillgelegten Fahrzeugen bestimmte elektronische Komponenten unter Spannung, bzw. sind einer Korrosion ausgesetzt. [VDA 3.2]

Belastung (engl.: load)

Summe der von außen an einem Erzeugnis angreifenden mechanischen, chemischen, thermisch und elektromagnetisch induzierten Lasten.

Betriebsdauer (engl.: operating time)

Die Betriebsdauer ist jene Zeit, während der eine Einheit gemäß Verwendungszweck funktioniert. Während der Stillstandsdauer wird hingegen die Einheit nicht betrieben. [VDA 3.2]

Betriebszeitintervall, Betriebszeit (engl.: operating time)

Zeitintervall, während dessen eine Einheit in Betrieb ist

ANMERKUNG „Betriebszeit“ ist allgemein zu verstehen. Sie sollte in solchen Maßgrößen ausgedrückt werden, die der Betrachtungseinheit angemessen sind, also etwa Kalenderzeit, Betriebszyklen, zurückgelegte Entfernung usw. Dabei sollten die Maßeinheiten klar genannt werden.

[DIN 61649], [IEC 61649]

REDAKTIONELLE ANMERKUNG: Es ist erkennbar, dass diese Definition die Betriebszeit recht allgemein fasst. Während die Kalenderzeit wohl etwa der Beanspruchungsdauer nach [VDA 3.2] entspricht, handelt es sich bei der Anzahl von Betriebszyklen und der zurückgelegten Entfernung gemäß dem Verständnis von [VDA 3.2] um Betriebsdauern.

Betroffene Teile/Menge (engl.: affected parts / volume)

Gesamtheit aller Teile, die von der Technischen Grundursache betroffen sind. Sie müssen von anderen unterschieden werden, die z. B. im betrachteten Zeitintervall produziert wurden.



B-Lebensdauer (engl.: B-life)

Alter, bei dem ein gegebener Anteil der Einheiten ausgefallen ist

ANMERKUNG „B₁₀“-Lebensdauer ist das Alter, bei dem 10 % der Einheiten (z. B. Lager) ausgefallen sind. Manchmal wird dies auch mit dem L-(Lebensdauer-)Wert bezeichnet. Die B-Lebensdauer kann direkt aus dem Weibull-Diagramm ausgelesen oder genauer anhand der Weibull-Gleichung bestimmt werden. Das Alter, bei dem 50 % der Einheiten ausgefallen sind, B₅₀-Lebensdauer, ist der Median der Dauer bis zum Ausfall. [DIN 61649]

Clean date

Produktionsdatum, ab dem ein Fehler abgestellt ist und wieder fehlerfrei produziert wird

Einsatzzeit(engl.: time in service)

Zeitintervall (seit Inbetriebnahme), in dem das Produkt beim Endkunden im Gebrauch ist. Im Automotive-Bereich wird typischerweise die Größe MIS, Months in Service verwendet.

Erwartungswert (engl.: mean)

Integral des Produkts von x und der Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x)$ über der Zahlengeraden

ANMERKUNG: Der Erwartungswert einer kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsverteilung wird mit $E(X)$ bezeichnet und wie folgt berechnet: $E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) \cdot dx$

Der Erwartungswert einer diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilung wird mit $E(X)$ bezeichnet und wie folgt berechnet: $E(X) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p(x_i)$

in Anlehnung an [DIN ISO 3534-1]

Fehlerart (engl.: failure mode)

[AIAG FMEA] verwendet auch die Begriffe Fehlfunktion und Fehler. Art und Weise, auf die eine Komponente die beabsichtigte Funktion nicht erfüllen bzw. liefern könnte. Fehlerarten werden von Funktionen abgeleitet. Beispiele:

Funktionsverlust, -einschränkung, -unterbrechung, -schwankung, Überfunktion, unbeabsichtigte Funktion, ungleichmäßige Leistung, Verharren auf einem bestimmten Wert, falsche Richtung

in Anlehnung an [AIAG FMEA]



Feld (engl.: field)

Gesamtheit der natürlichen Umwelt, Situationen und Bedingungen während der Nutzungsphase bei den Endkunden. Insbesondere schließt dies die real auftretenden Einsatz-, Betriebs- und Umweltbedingungen mit ein, denen die betrachteten Produkte dabei unterliegen. Der Begriff „Feld“ kann im engeren Sinne auch auf die Gesamtheit aller Nutzer bezogen werden. Die Bedingungen „im Feld“ sind im Gegensatz zu künstlich erzeugten Laborbedingungen nicht wiederholbar.

ANMERKUNG: Der nur schwer zu definierende Begriff „Feld“ wurde vermutlich aus dem Bereich der empirischen Sozialwissenschaften übernommen. Die Sammlung soziologischer Daten erfolgt z. B. durch Befragung, Beobachtung oder experimentelle Untersuchungen. Daraus leiten sich Begriffe wie Feldbeobachtung und Feldforschung ab.

Felddaten (engl.: field data)

Als Felddaten bezeichnet man im vorliegenden Kontext die Gesamtheit aller Daten, die im Zusammenhang mit der Nutzung eines Produkts im Feld anfallen. Im engeren Sinne sind dies alle Daten, die mit Fehlern, Störungen, Mängeln und Ausfällen verbunden sind und zu Beanstandungen des Kunden führen. Im weiteren Sinne gehören dazu aber auch Informationen über die Nutzung wie Betriebszeiten, Fahrleistungen, Verbräuche, Belastungskollektive oder Kundenfeedback in Form von Bewertungen, Erfahrungen, Wünsche und Verbesserungsvorschläge.

Feldausfall (engl.: field failure)

Auswirkung, die für den Endkunden beobachtbar ist oder die er erfährt und die nicht dem beabsichtigten, erwarteten oder gewollten Verhalten des Produkts entspricht.

Feldbeanstandung (engl.: field complaint)

Beanstandung nach Übergabe des beanstandeten Produkts an die Händlerorganisation / den Endkunden (falls nicht mit dem Kunden abweichend festgelegt).

Feldaktion (engl.: field action; field campaign)

Oberbegriff für Rückruf und Service-/Kundendienst-Aktion.

Fix-as-fail

Fix-as-fail bedeutet, dass ein Produkt erst repariert oder ausgetauscht wird, wenn es seine Funktion nicht mehr erfüllt. Die gegenteilige Strategie wäre präventiver Art, d. h., ein Teil wird regelmäßig gewartet oder vor einem voraussichtlich Ausfall ausgetauscht: „change before fail“.

Gewährleistung (engl.: warranty)

Sachmängelhaftung (ehemals Gewährleistung) Pflicht des Herstellers und Verkäufers aus Vertrag oder Gesetz gegenüber seinem unmittelbaren Kunden, für Mängel des Produkts (Sachmängel) einzustehen.



Garantie (engl.: *guarantee*)

Garantie ist das selbständige Versprechen des Herstellers gegenüber dem jeweiligen Besitzer des Produkts, im Gegensatz zur Sachmängelhaftung also nicht nur gegenüber dem unmittelbaren Vertragspartner, für Fehler einzustehen. Der Umfang der Garantie wird vom Hersteller selbst bestimmt. Der Besitzer, nicht nur der Vertragspartner des Herstellers, hat damit auch einen direkten Anspruch gegenüber dem Hersteller.

GWA

RB-Abk. engl.: Global Warranty Analyzer

GWA ist ein Web-basiertes Tool zur Auswertung, Darstellung und zum Berichten von Felddaten.

IoT, Internet der Dinge (engl.: *Internet of Things*)

Eine globale Infrastruktur für die Informationsgesellschaft, die erweiterte Dienste ermöglicht, indem (physische und virtuelle) Dinge auf der Grundlage bestehender und sich entwickelnder interoperabler Informations- und Kommunikationstechnologien miteinander verbunden werden.

IQIS

RB-Abk.: Integrated Quality Improvement System (sinngemäß dt.: integriertes System zur Qualitätsverbesserung).

IQIS ist ein SAP-basiertes IT-System, das vornehmlich im BBM für die Bearbeitung externer (und auch interner) Beanstandungen mit der 8D-Methode verwendet wird.

Kulanz (engl.: *goodwill*)

Sach- oder Geldleistung, zu der rechtlich (durch Verträge, per Gesetz) keine Verpflichtung besteht.

Lastkollektiv (engl.: *load collective, load spectrum*)

Ein Lastkollektiv (Belastungskollektiv) ist eine klassierte Gesamtheit von Messdaten oder Zählwerten, welche die absoluten oder relativen Häufigkeiten von Belastungen angibt, denen ein Produkt im Betrieb unterliegt oder unterworfen wird. Ein Lastkollektiv wird in der Regel empirisch ermittelt, in dem durch geeignete Klassiermethoden festgestellt wird, wie häufig Beanspruchungen einer bestimmten Größe in der Beanspruchungs-Zeit-Funktion enthalten sind.

Letztlich lässt sich ein solches Lastkollektiv für ein Merkmal also als Häufigkeitsdiagramm oder Histogramm darstellen. Ein Lastkollektiv enthält daher keine Informationen mehr über die Reihenfolge der Belastungen. Die Reihenfolge kann allerdings einen Einfluss auf den Schädigungsverlauf haben.

Während es sich im realen Betrieb nie in identischer Weise wiederholt, ist es im Rahmen von Prüfstandsdauerläufen unter weitgehend reproduzierbaren Bedingungen wiederholbar.

[Heft 13] enthält ein Kapitel über „Quantitative Zuverlässigkeitsbewertung“ und Ausführungen zu Lastkollektiven.



Lebensdauer (engl.: lifetime)

Die Lebensdauer ist jene Dauer, in der eine Einheit ununterbrochen einem Schädigungsmechanismus bis zum Ausfall ausgesetzt werden kann. [VDA 3.2]

Betriebsdauer einer nicht instandzusetzenden Einheit vom Anwendungsbeginn bis zum Zeitpunkt des Ausfalls [DIN 40041]

REDAKTIONELLE ANMERKUNG: Im messtechnischen Sinn ist die Lebensdauer eine Größe, die einen Wert hat, der durch eine Zahl und eine Referenz ausgedrückt werden kann. Anstelle der Größe Zeit (Einsatzdauer, Betriebsstunden, -Monate, -Jahre) werden in der Praxis auch andere Größen verwendet, wie z. B. zurückgelegte Strecke (in km oder mls angegebene Fahrleistung), Anzahl von Lastwechseln, Biegebeanspruchungen, Betätigungen, Schaltvorgängen, Arbeitszyklen, Umdrehungen.

Es ist üblich, auch bei Verwendung einer dieser Alternativen grundsätzlich von Lebensdauern im Sinne von Zeiten zu sprechen, was beispielsweise im Zusammenhang mit den feststehenden Begriffen „charakteristische Lebensdauer“ oder B10-Lebensdauer praktisch unvermeidlich ist.

Meldeverzug (engl.: claim delay)

Zeitintervall zwischen Reparatur und der Meldung an den OEM bzw. Lieferanten

[VDA 3.3]

MTTF, mittlere Lebensdauer (engl.: mean lifetime)

MTTF steht für Mean Time To Failure und bezeichnet die mittlere Zeit (empirischer Mittelwert, Erwartungswert der Lebensdauer-Verteilung) zwischen der Inbetriebnahme und dem Ausfallzeitpunkt.

Nutzungsdauer (engl.: service life)

Die Nutzungsdauer gliedert sich in Betriebs- und Stillstandsdauer. Die Betriebsdauer ist jene Zeit, während der eine Einheit gemäß ihrem Verwendungszweck funktioniert. Während der Stillstandsdauer wird hingegen die Einheit nichtbetrieben. [VDA 3.2]

OEM

Abk. engl.: Original Equipment Manufacturer

Erstausrüster; meist gleichbedeutend mit Automobilhersteller



Ordinalmerkmal (engl.: ordinal characteristic)

Qualitatives Merkmal, für dessen Merkmalswerte eine Ordnungsbeziehung besteht.

[DIN 55350-12]

ANMERKUNG: Einem Ordinalmerkmal können Werte auf einer Ordinalskala zugeordnet werden.

BEISPIELE:

- *Das Merkmal Konfektionsgröße mit den Merkmalswerten XXS, XS, S, L, XL, XXL, ..., 7XL,*
- *Das Merkmal (europäische) Schuhgröße mit den Merkmalswerten 14, 15, 16, ..., 48, 49.*

Ein solches Merkmal ermöglicht eine Zuordnung und eine Unterscheidung z. B. gemäß der Relationen „kleiner“, „gleich“ oder „größer“ der Merkmalswerte.

Rang, Rangzahl (engl.: rank)

Die Werte eines Ordinalmerkmals unterliegen einer natürlichen Reihenfolge. Jeder Wert nimmt im Vergleich zu den anderen eine feste Position ein.

Im oben aufgeführten Beispiel der Konfektionsgrößen steht der Wert „XL“ an fünfter Stelle, sie hat den Rang 5. Man sagt auch, die Rangzahl ist fünf. Der zugehörige Wert XL heißt Rangwert oder Ranggröße (engl. order statistic).

Rayleigh-Verteilung (engl.: Rayleigh distribution)

Spezialfall der Weibull-Verteilung für $b = 2$

Reklamation (engl.: complaint)

Ausdruck der Unzufriedenheit, die gegenüber einer Organisation in Bezug auf deren Produkt oder Dienstleistung oder den Prozess zur Bearbeitung von Reklamationen selbst zum Ausdruck gebracht wird, wenn eine Reaktion bzw. Klärung explizit oder implizit erwartet wird. [ISO 9000]

Risiko (engl.: risk)

Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Schadens und seines Schadensausmaßes

[DIN EN ISO 12100]

Risikoanalyse (engl.: risk analysis)

Kombination aus Festlegung der Grenzen der Maschine, Identifizierung der Gefährdungen und Risikoeinschätzung [DIN EN ISO 12100]

Risikobewertung (engl.: risk evaluation)

auf der Risikoanalyse beruhende Beurteilung, ob die Ziele zur Risikominderung erreicht wurden

[DIN EN ISO 12100]



Risikobeurteilung (engl.: risk assessment)

Gesamtheit des Verfahrens, das eine Risikoanalyse und Risikobewertung umfasst

[DIN EN ISO 12100]

Rückruf (engl.: recall)

Als Rückruf bezeichnet man jede Maßnahme, die darauf abzielt, aktiv z. B. durch Anschreiben des Endverbrauchers oder öffentliche Information die Rückgabe eines dem Endverbraucher bereitgestellten Produkts zu erwirken.

ANMERKUNG: Der Rückruf kann auch darin bestehen, das Produkt ganz aus dem Verkehr zu ziehen, es auszu-tauschen, nachzubessern, zu reparieren oder zu sortieren. Häufig erfolgt ein Rückruf aus Sicherheits-oder recht-lichen Gründen und unter Einbeziehung der zuständigen Behörden.

Schädigungsmechanismus (engl.: damage mechanism)

Unter einem Schädigungsmechanismus versteht man Vorgänge, die aufgrund von Belastungen zu einer allmählichen Veränderung der Eigenschaften einer Einheit führen. [VDA 3.2]

Schwingspiel (engl. load cycle)

Ein Schwingspiel (Lastwechsel, Zyklus) beschreibt den Beanspruchungs-Zeit-Verlauf einer dyna-mischen Beanspruchung. Bei harmonischer (sinusförmiger) Schwingung entspricht es einer kom-pletten Schwingungsperiode. Bei nicht-harmonischen Schwingungen (im Bereich der Betriebsfes-tigkeit) werden Halb-Schwingspiele „von Spitze zu Spitze“ ermittelt und zu vollständigen Schwing-spielen kombiniert.

Service-/Kundendienst-Aktion (engl.: service/customer service action)

Jede Maßnahme, mit der eine Überprüfung oder Änderung am bereits an den Kunden ausgelie-ferten Produkt vorgenommen wird, ohne dass ein Rückruf / eine Rücknahme vorliegt.

ANMERKUNG: Service-/Kundendienst-Aktionen können sich auf die gesamte betroffene Popula-tion beziehen (z. B. Reparatur im Rahmen eines Wartungsintervalls) oder sich auf den beanstan-deteten Anteil beschränken („fix as fail“). Eine Service-/Kundendienst-Aktion erfolgt häufig im In-teresse der Kundenzufriedenheit.

Spanne; Schwingbreite der Last (engl. range)

Differenz zwischen zwei benachbarten Extremwerten einer Schwingung; vertikaler Abstand Spitze/Spitze nach DIN 50100; Differenz zwischen dem Maximum und Minimum eines Schwing-spiels

Teilmarkt (engl.: partial market)

Ein Teilmarkt ist ein Marktsegment (z. B. ein Land, eine Region), aus dem alle beanstandeten Pro-dukte von den Endverbrauchern über das Händlernetz der Erstausrüster vorgelegt werden.



Teilmarktfaktor (engl.: partial market factor)

Der Teilmarktfaktor ist eine Verhältniszahl kleiner eins, deren Kehrwert als Hochrechnungsfaktor dient, um von einem „beobachteten“ Teilmarkt auf den Gesamtmarkt zu schließen.

TRC, Technische Grundursache (engl.: technical root cause)

Das Zusammenwirken von verursachenden Bedingungen für das Problem/Grundproblem, welches durch logische (warum?) und funktionale (wie?) Zusammenhänge nachgewiesen ist.

Wahrscheinlichkeitsnetz (engl.: probability plot)

Das Wahrscheinlichkeitsnetz ist ein verteilungsspezifisches Diagramm, bei dem die y-Achse so gewählt ist, dass bei der Darstellung von Daten aus einer dem Netz zugrundeliegenden Verteilung eine Gerade entsteht. Damit kann ein gegebener Datensatz graphisch auf Verträglichkeit mit dem gewählten Verteilungsmodell geprüft werden. [Heft 3]

Zuverlässigkeit (engl.: reliability, dependability)

Fähigkeit zur Ausführung in der geforderten Art und zum geforderten Zeitpunkt [ISO 9000]

Zuverlässigkeit: ein zusammenfassender Ausdruck für zeitbezogene Qualitätsmerkmale einer Einheit. Zuverlässigkeit schließt Verfügbarkeit, Funktionsfähigkeit, Wiederherstellbarkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft mit ein. [IEC 60050-191]

Zuverlässigkeit ist die Erzeugniseigenschaft, eine geforderte Funktion im vorgegebenen Betriebsbereich über eine festgelegte Nutzungsdauer auszuführen. Die Nutzungsdauer gliedert sich in Betriebs- und Stillstandsdauer. [VDA 3.2]

Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderung zu erfüllen. [DIN 40041]



14 Literatur

- [CDQ 0907] CDQ 0907 Beanstandungsprozess
(Zentralanweisung, ausschließlich RB-intern verfügbar)
- [AIAG FMEA] AIAG & VDA FMEA-Handbuch, 2019
- [DIN 40041] DIN 40041 Zuverlässigkeit — Begriffe
- [DIN 45667] DIN 45667 Klassierverfahren
- [DIN 61649] DIN EN 61649 Weibull-Analyse (engl. Fassung: IEC 61649)
- [ISO 12100] DIN EN ISO, Sicherheit von Maschinen — Allgemeine Gestaltungsleitsätze — Risikobeurteilung und Risikominderung
- [ISO 9001] DIN EN ISO 9001:2015, Qualitätsmanagementsysteme — Anforderungen (ISO 9001:2015)
- [IATF 16949] Qualitätsmanagement-System-Standard der Automobilindustrie, IATF 16949
- Verband der Automobilindustrie VDA (Hrsg.): Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, Band 3: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten,
- [VDA 3.1] Teil 1: Zuverlässigkeitsmanagement,
- [VDA 3.2] Teil 2: Zuverlässigkeitsmethoden und -Hilfsmittel,
- [VDA 3.3] Teil 3: Case Studies im Zuverlässigkeitsregelkreis
- [VDA Feld] VDA-Band: Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette — Vermarktung und Kundenbetreuung — Schadteilanalyse Feld
- [VDA OtA] VDA-Band: Rückrufmanagement mittels Over-the-Air-Updates
- [VDA Rekl] VDA-Band: Standardisierter Reklamationsprozess



Schriftenreihe „Qualitätssicherung in der Bosch-Gruppe, Technische Statistik“,

[Heft 2] Heft Nr. 2, Diskrete Merkmale

[Heft 3] Heft Nr. 3, Auswerten von Messreihen

[Heft 12] Heft Nr. 12, Begriffe der Qualitätstechnik

[Heft 13] Heft Nr. 13, Methoden der Zuverlässigkeitsgestaltung, Verifizierung und Validierung

[Heft 16] Heft Nr. 16 Problemlösung

[Haibach] E. Haibach, Betriebsfestigkeit, Springer-Verlag, Berlin

[Hartung] J. Hartung, Statistik, Oldenbourg-Verlag

[Köhler] M. Köhler et. al., Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit, Springer-Verlag, Berlin

[Stockinger] K. Stockinger: Datenfluß aus dem Feld, in: Masing (Hrsg.), Handbuch Qualitätsmanagement, Hanser-Verlag München, 1994, S. 681ff

[Sachs] J. Hedderich, L. Sachs: Angewandte Statistik, Springer-Verlag

[Pfeifer] T. Pfeifer: Qualitätsmanagement, Hanser-Verlag, München, 1993, S. 294ff

[Pauli] B. Pauli: Eine neue Methode zur Bestimmung der kilometerabhängigen Lebensdauer-
verteilung von Kfz-Komponenten. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100 (1999) Heft 4

[Reichmann] A. Reichmann: Praktische Verfahren zur Zuverlässigkeitsbewertung von Kfz-Komponenten, Diplomarbeit, Gesamthochschule Wuppertal, Fachbereich Sicherheitstechnik, 2000

[Weibull] W. Weibull: Fatigue testing and the analysis of results, Pergamon Press, 1961

[Weibull] A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, J. Appl. Mech. 18, 1951, 293-297



15 Index

0

0-km-/0-h-Ausfall 68

8

8D-Methode 69

A

Aktivierungsmechanismus 69

Alterungsausfälle 69

Ausfall 69

-mechanismus 5, 65

-quote 41, 42, 69

-rate 42, 52, 59

B

Badewannenkurve 41

Beanspruchung 70

Beanspruchungsdauer 70

Beanstandung 32

Befundung 5

Belastung 70

Benardsche Näherung 48

Betriebs

-dauer 70

-zeit 70

betroffene Teile/Menge 70

betroffener Anteil 67

Binomialverteilung 48

B-Lebensdauer 71

C

Clean date 71

D

Daten

-basis 7

-qualität 7, 40

-quelle 7, 55

Datensicherheit 37

E

Einsatzzeit 71

Erwartungswert 43, 71, 74

Exponentialverteilung 52

F

Fahrleistungsverteilung 60

Fehler

-art 5, 71

-ort 5

Feld 72

-aktion 72

-ausfall 72

-beanstandung 72

-beobachtung 34

-daten 72

-test 38

fix-as-fail 72

Frühphase 33

Frühwarnsystem 4

G

Garantie 73

Gewährleistung 72

GWA, Global Warranty Analyzer 15, 73

H

Hochrechnung 29, 62

Hochrechnungsfaktor

Graphische Ermittlung 26

Rechnerische Ermittlung 26

I

Informationssammlung 30

IoT, Internet der Dinge 73

IQIS 16, 34, 73

Isochronen 13, 14, 63

Isochronendiagramm 26

J

Jährliche Fahrleistung 36

K

Klassiermethoden 38

Kleinstquadratmethode 47, 63

Korrosion 5, 46

Kulanz 73



L

Lastkollektiv 40, 73
 Lebens
 -dauer 74
 -zyklus 9
 Likelihood-Funktion 51
 Logistik 31
 Lognormalverteilung 36, 60

M

Maximum-Likelihood-Methode 50, 51, 56, 57
 median ranks 48, 49
 Meldeverzug 74
 MIS, Months in Service 15, 71
 Mischverteilung 64, 65
 Modellierung 4
 MTTF, mittlere Lebensdauer 43, 74

N

Näherungsformel 53
 Negativauswahl 36
 Nevada Chart 12
 Normen 4
 Nutzungsdauer 74

O

OEM 74
 Ordinalmerkmal 75

P

Problemlösung 5
 Produkt
 -alter 11
 -haftung 4
 Produktions
 -datum 11, 26
 -menge 30
 -monat 13
 -quartal 26
 Prognose 4, 6, 34
 PTiS, Part Time in Service 16

R

Rang 49, 75
 Rangregression 49, 50
 Rayleigh-Verteilung 75

Regression 47, 50
 Reklamation 5, 75
 Risiko 75
 -analyse 33, 75
 -beurteilung 76
 -bewertung 75
 Rückruf 76

S

Schädigungsmechanismus 5, 76
 Schadteilanalyse 5
 Schichtlinien 13, 63
 Schwingbreite 39
 Schwingspiel 76
 Service-/Kundendienst-Aktion 76
 Simulation 67
 Spanne 76
 success run 6
 Sudden-Death-Methode 56

T

Teilmarkt 76
 Teilmarktfaktor 10, 14, 15, 77
 Tier2-Lieferant 10
 TRC, Technische Grundursache 30, 77
 Treppentabelle 11, 62

U

Überlebenswahrscheinlichkeit 42

V

Verschleiß 46
 Vertrauensbereich 51
 Verzögerungszeit 32
 Verzugszeit 31

W

Wahrscheinlichkeitsnetz 44, 77
 Weibull
 -Netz 58
 -Verteilung 41
 W-Fragen 5

Z

Zählverfahren 38
 Zuverlässigkeit 77



Robert Bosch GmbH
C/QMM Tilsch
Wiener Straße 42-46
70469 Stuttgart
Germany
Tel.: +49 711 811 - 0
www.bosch.com





Robert Bosch GmbH

C/QMM Tilsch

Wiener Straße 42 - 46

70469 Stuttgart

Germany

Telefon +49 711 811 - 0

www.bosch.com

