

**Zuverlässigkeitsprognosemodelle im Bereich der  
mobilen Telekommunikation**



Dem Fachbereich D der Abteilung Sicherheitstechnik der

**Bergischen Universität Wuppertal**

zur Erlangung des akademischen Grades

– Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) –

vorgelegte Dissertation

von

Diplom-Ingenieur Andreas Braasch

aus

Kassel

Gutachter:

Univ. -Prof. Dr.-Ing. habil. Arno Meyna

Univ. -Prof. Dr.-Ing. Stefan Bracke

Tag der mündlichen Prüfung:

20.06.2011

D468

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20110707-105136-5

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20110707-105136-5>]

Für meine Familie

## **Danksagung**

Während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet für Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik an der Bergischen Universität Wuppertal entstand die vorliegende Arbeit.

Als erstes möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Arno Meyna für die letzten Jahre bedanken. Neben seiner fachlichen Kompetenz bei der Betreuung meiner Tätigkeit habe ich vor allem seinen persönlichen und respektvollen Umgang mit seinen Mitarbeitern zu schätzen gelernt.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Bracke für die Übernahme des Koreferats bedanken.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Kollegen des Fachgebiets Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik, die über die Jahre zu guten Freunden geworden sind. Unter solch freundschaftlichen Umständen ist das Arbeiten eine wahre Freude. Herausstellen möchte ich die besondere Unterstützung von Herr Dr.-Ing. Dirk Althaus für die fachlichen Diskussionen und Herrn M.Sc. Fabian Plinke für die eine oder andere Hilfestellung im Bereich der Programmierung.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Hans Joachim Hübner bedanken, der maßgeblich zum Gelingen mehrerer Forschungsprojekte beigetragen hat.

Mein größter Dank jedoch gilt meiner Familie, die mich über all die Jahre unterstützt hat. Euch soll diese Arbeit gewidmet werden.

Ganz besonders möchte ich meine Eltern Almut und Dr. Dietrich Braasch herausheben, die mir meinen bisherigen Lebensweg ermöglicht haben und immer bestrebt sind, mich in meinen Vorhaben zu bestärken.

## **Kurzfassung**

Von technischen Geräten wird in der heutigen Zeit erwartet, dass sie fehlerfrei und zuverlässig ihre Aufgabe erfüllen. Ausfälle, besonders wenn sie während der Garantiezeit auftreten, ziehen für den Hersteller des Produktes erhebliche Kosten nach sich und führen zur Unzufriedenheit des Kunden. Da es keine absolut zuverlässigen Produkte geben wird, müssen die Hersteller Maßnahmen treffen, um auftretende Fehler schnell und kundenfreundlich zu bearbeiten.

Zuverlässigkeitsprognosemodelle, welche in der Automobilindustrie schon seit den 1990er Jahren erfolgreich angewendet werden und ihren wichtigen Beitrag bei der Beantwortung von qualitäts- und zuverlässigkeitsrelevanten Fragestellungen liefern, bieten die Möglichkeit, das zukünftige Ausfallverhalten vorherzusagen, um so erforderliche Reparaturkapazitäten oder Ersatzgeräte besser vorausplanen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit werden erstmals auf den Bereich der mobilen Telekommunikation modifizierte Prognosemodelle entwickelt, um Handlungshilfen bei der Ersatzteilbevorratung zu geben. Dabei erfolgt eine Unterteilung der Untersuchungen in den Bereich der automobilen Telekommunikation sowie den der Mobiltelefone.

Alle vorgestellten Untersuchungen basieren auf realen Felddaten, welche anonymisiert in die durchgeführten Analysen einfließen. Mit Hilfe dieser Daten soll gezeigt werden, dass die vorgestellten Ansätze praxistauglich sind.

**Abstract**

Nowadays technical devices are expected to operate faultless and reliable. Failures especially when occurring during the warranty period result in extensive costs for the manufacturer and displease the customer. As there are no absolute reliable products, measures have to be taken by the manufacturer to deal with occurring failures quick and customer-friendly.

Reliability prognosis models proved to be suitable in practice in the automotive industries since the 1990s to answer quality and reliability issues and to provide an opportunity of predicting the future failure behaviour. Using this information facilitates a more accurate prediction of required repair capacities or replacements. In this paper modified reliability prognosis models concerning the needs of the mobile industry are developed for the first time to provide assistance when predicting serial or end of life replacements. Thereby the research is divided in the two sectors of the automotive telecommunication and the mobile phones.

The research presented in this paper is based on real field failure data which is taken anonymously for the analysis. By means of this data the given approaches will be pointed out to be suitable in practice.

## Résumé

De nos jours, on attend des appareils techniques qu'ils accomplissent leurs tâches avec fiabilité et sans erreurs. Les défaillances, surtout si elles se produisent pendant le temps de garantie, engendrent des coûts élevés pour le fabricant du produit et contrarient le client. Comme il n'y aura jamais de produit absolument fiable, les fabricants doivent prendre des mesures pour traiter les erreurs rapidement et être proche du client.

Des formules de pronostics de la fiabilité, déjà utilisées avec succès depuis les années 1990 dans l'industrie automobile, apportent une contribution importante dans la réponse aux questions pertinentes dans les domaines de la qualité et de la fiabilité. Ces formules donnent la possibilité de prédire le comportement des défaillances, de façon à mieux pouvoir planifier les capacités de réparation ou les appareils de rechange nécessaires. Dans le cadre de cet ouvrage, des modèles de pronostics adaptés au domaine de la télécommunication mobile seront développés pour la première fois, pour apporter une aide lors de l'approvisionnement en pièces de rechange. Une subdivision des recherches dans le domaine de la télécommunication automobile ainsi que dans celui des téléphones portables sera alors réalisée.

Toutes les recherches présentées sont basées sur des données terrain réelles, qui sont pris en compte dans les recherches de façon anonyme. Avec l'aide de ces données, nous montrerons que les approches présentées sont adaptées à la pratique.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>III</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand der Forschung</b> .....	<b>5</b>
<b>3 Die mobile Telekommunikation</b> .....	<b>7</b>
3.1 Automobile Telekommunikation .....	8
3.1.1 Allgemeines .....	8
3.1.2 Telematikeinheiten und Komfortfreisprecheinrichtungen .....	9
3.2 Mobiltelefone.....	16
3.2.1 Allgemeines .....	16
3.2.2 Supply-Chain-Management .....	21
3.2.3 Probleme im Bereich Supply-Chain-Management .....	23
3.2.4 Datenstruktur und –quantität.....	29
3.2.5 Bisherige Ansätze und Problemstellung .....	31
<b>4 Zuverlässigkeitsprognosemodelle in der automobilen Telekommunikation</b> .....	<b>36</b>
4.1 Standardprognosemodell.....	36
4.2 Zuverlässigkeitsprognosen für Softwarefehler .....	45
4.3 Anwendung von Zuverlässigkeitsprognosemodellen im operativen Geschäft .....	55
4.4 Zuverlässigkeitsprognosemodell unter Berücksichtigung des Kundenverhaltens bei Komfortelektronik .....	60
<b>5 Zuverlässigkeitsprognosen im Bereich Mobiltelefone</b> .....	<b>62</b>
5.1 Vorüberlegungen und Datenaufbereitung .....	65
5.2 Berücksichtigung der Anwarter .....	66
5.3 Einfluss von Verzugszeiten .....	69
5.4 Zuverlässigkeitsprognose .....	77
5.5 Verifizierung .....	89

---

5.6	Berechnung des Serienersatzbedarf und der Endbevorratung .....	101
5.7	Einsatzmöglichkeiten im Bereich Mobilfunk .....	109
<b>6</b>	<b>Automatisiertes Prognosetool .....</b>	<b>114</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>123</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>129</b>
<b>A</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>134</b>
A.1	Abkürzungsverzeichnis .....	134
A.2	Weitere Ergebnisse.....	135

## 1 Einleitung

Ein Leben ohne mobile Telekommunikation ist in der heutigen Zeit nicht mehr aus der Gesellschaft wegzudenken, obwohl die flächendeckende Erschließung im europäischen Raum erst seit ca. 20 Jahren vorhanden ist. Überraschend schnell haben sich Wirtschaft und Gesellschaft an die neuen Errungenschaften gewöhnt, sodass sich der elektronische Informationsaustausch zu einem wichtigen Pfeiler der Menschheit entwickelt hat. Neben der ursprünglichen Funktion der Sprachkommunikation bietet die mobile Telekommunikation der Gegenwart multiple Anwendungsmöglichkeiten, die unter anderem mobiles Internet, Navigation, Office-Anwendungen, Unterhaltungsmedien oder Sicherheitsanwendungen enthalten.

Um diese Anwendungsvielfalt für den Endkunden nutzbar zu machen, werden hohe technische Anforderungen an die Telekommunikationsgeräte gestellt. Die daraus resultierende Komplexität der betreffenden Systeme stellt die Hersteller vor erhebliche Herausforderungen, da bei steigendem Funktionsumfang die Entwicklungszeiten immer kürzer werden. Neben der Funktionalität des Produkts werden vom Endkunden auch hohe Erwartungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit gestellt. Der Hersteller kann sich folglich kein unzuverlässiges Produkt in seinem Portfolio leisten, da damit hohe Kosten im Bereich der Garantieansprüche entstehen. Neben diesen direkt messbaren Kosten kommen weiterhin nicht direkt messbare Kosten in Form des schlechten Rufs und der Kundenunzufriedenheit hinzu. Der einmal von einem Hersteller enttäuschte Kunde kann nur mit erheblichem Kostenaufwand dazu bewegt werden, erneut ein Produkt des gleichen Herstellers zu kaufen.

Die folgende Arbeit soll einen Brückenschlag zwischen der rein technisch-mathematischen Betrachtung der Zuverlässigkeit von mobilen Telekommunikationsgeräten und den weiteren Anwendungsmöglichkeiten bilden. Dabei wird der Fokus auf den Bereich der Ersatzteillogistik gelegt.

Den Stand der Forschung im Bereich der Zuverlässigkeitsanalyse sowie der Felddatenbeobachtung soll in Kapitel 2 vorgestellt werden, wobei auch die Entste-

---

hung der technischen Zuverlässigkeit kurz angesprochen wird. Besonders wird auf die bisherigen Ansätze im Bereich der Zuverlässigkeitsprognose von im Kraftfahrzeug verbauten Systemen und Komponenten eingegangen, da diese Ansätze als Grundlage für die hier vorliegende Arbeit dienen. Weiterhin werden Vorarbeiten im Bereich der Zuverlässigkeitsbetrachtung von Mobiltelefonen erwähnt. Dabei ist festzustellen, dass besonders die forschungsintensive Zuverlässigkeitstechnik in diesem Bereich selten in der Fachliteratur zu finden ist.

Die Mobile Telekommunikation wird in Kapitel 3 in die zwei Hauptbereiche „Automobile Telekommunikation“ und „Mobiltelefone“ unterteilt, wobei mit einer chronologischen Vorstellung der automobilen Telekommunikation begonnen wird. Zudem werden automobile Telekommunikationslösungen vorgestellt, die sich in Autotelefone und Freisprecheinrichtungen unterteilen lassen.

In den folgenden Abschnitten wird der Bereich der Mobiltelefone in Verbindung mit Supply-Chain-Management betrachtet. Dabei wird besonders auf die Schnelligkeit der Mobilfunkbranche mit den zugehörigen Schwierigkeiten eingegangen. Die Datenstruktur und -quantität sowie bisherige Ansätze in diesem Bereich werden vorgestellt.

Zuverlässigkeitsprognosemodelle für Telekommunikationsgeräte im Kraftfahrzeug werden in Kapitel 4 erläutert. Dabei wird zuerst das Standardprognosemodell, welches bereits seit mehreren Jahren bei namhaften Fahrzeugherstellern und deren Zulieferern im Einsatz ist, gezeigt. Weiterhin erfolgt die Einführung in eine wichtige Erweiterung des Standardprognosemodells: das Prognosemodell für dominierende oder epidemische Ausfallbilder (Teilpopulationsmodell).

Ein besonderer Anwendungsfall des Prognosemodells wird durch die Analyse von Softwarefehlern einer Telematikeinheit in Abschnitt 4.2 gezeigt. Dabei wird auf die Verknüpfung einer gewöhnlichen Garantiedatenbank mit einer erweiterten Datenbank eingegangen, welche softwarerelevante Informationen beinhaltet. Es soll gezeigt werden, dass auch Softwarefehler ein homogenes Ausfallverhalten aufweisen, welches mittels mathematischer Funktionen beschrieben werden kann.

---

Neben dieser praktischen Anwendung werden weitere Zuverlässigkeitsanalysen und deren direkter finanzieller Nutzen dargestellt. Der Bereich automobiler Telekommunikation wird durch die Vorstellung eines neuen Modells abgeschlossen, welches das Kundenverhalten in die Prognose der Endbevorratungsmenge einbezieht.

Eine Abwandlung des automobilen Zuverlässigkeitsprognosemodells auf die Besonderheiten der Mobiltelefone findet in Kapitel 5 statt. Dafür werden zuerst Vorüberlegungen angestellt, welche die Datenaufbereitung einschließen und die Unterschiede zur Automobilindustrie herausstellen. Weiterhin wird auf die besondere Problematik der Fehleranwärter eingegangen, da bisherige Ansätze nicht zielführend sind. Der Einfluss von Verzugszeiten, die durch Lagerung, Transport oder das Verhalten des Kunden entstehen, wird ebenfalls vorgestellt und anhand einiger Beispiele erläutert.

Es folgt die Durchführung einer Zuverlässigkeitsprognose für Mobiltelefone, welche exemplarisch für drei Produktionsmonate durchgeführt wird. Dabei soll herausgestellt werden, dass das Ausfallverhalten von Mobiltelefonen stochastischen Verteilungen folgt und somit theoretisch beschreibbar ist. Die Verifizierung des Ansatzes folgt in Abschnitt 5.5 und wird für zwei unterschiedliche Mobiltelefone durchgeführt, die in unterschiedlichen Verkaufsländern zum Einsatz kommen. Mit dieser Vorgehensweise soll gezeigt werden, dass der Ansatz allgemeingültig ist. Im Anschluss wird die Anwendung der berechneten Zuverlässigkeitskenngrößen bezüglich Serienersatzbedarf und Endbevorratung beschrieben und anhand eines Beispiels verdeutlicht. Weitere Anwendungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel die Berechnung von Garantiekosten oder das Aufdecken von Garantiebetrug, werden in Abschnitt 5.7 vorgestellt. Damit soll gezeigt werden, wie vielfältig die berechneten Zuverlässigkeitskenngrößen genutzt werden können.

Da die Zuverlässigkeitsprognosen bisher mit einer mathematischen Entwicklungsoftware durchgeführt wurden, die für den mathematisch nicht versierten Nutzer nur mit erheblicher Einarbeitung zu bedienen ist, wird in Kapitel 6 ein automatisiertes Prognosetool vorgestellt. Als Besonderheit weist dieses Tool einen geneti-

---

schen Algorithmus auf, der zur Parameterschätzung herangezogen wird. Anhand einiger Abbildungen wird die Bedienung und die programmierte Benutzeroberfläche erklärt.

In Kapitel 7 werden die durchgeführten Analysen zusammengefasst und rückblickend bewertet. Dabei wird auch herausgestellt, ob Zuverlässigkeitsprognosen eine Daseinberechtigung in der mobilen Telekommunikation haben. Zukünftige Forschungsvorhaben und Visionen im Bereich der Felddatenanalyse und Zuverlässigkeitsprognose sowie ein ausführliches Literaturverzeichnis mit den Veröffentlichungen des Autors (Kapitel 8) schließen den Hauptteil dieser Arbeit ab. Weitere Ergebnisse der durchgeführten Auswertungen sind im Anhang aufgeführt.

---

## 2 Stand der Forschung

Die ersten Überlegungen im Bereich der technischen Zuverlässigkeit gehen auf die 1940er Jahre zurück, in denen während des zweiten Weltkriegs der erste funktionstüchtige Marschflugkörper F 103, auch Vergeltungswaffe V1 bzw. V2 genannt, entwickelt und produziert wurde. Dabei konnte festgestellt werden, dass aufgrund der erheblich gestiegenen Komplexität bei diesen Fluggeräten nicht tolerierbare Ausfallhäufigkeiten auftraten. Folglich beschäftigten sich Forscher und Entwickler erstmals mit der wahrscheinlichkeitstheoretischen und statistischen Betrachtung dieser Systeme. Die Weiterentwicklungen der zuverlässigkeitstechnischen Theorie erfolgte u.a. bei der Entwicklung der ersten Atombombe (Manhattan Projekt) und dem Start ins Luft- und Raumfahrtzeitalter [Mey 03].

In den 1960er Jahren kamen im Bereich der Luftfahrtindustrie erstmalig heute gebräuchliche Methoden wie die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) sowie die Fehlerbaumanalyse (FBA) zum Einsatz. Später folgte der Einsatz im Bereich der Kerntechnik, um Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen von Kernkraftwerken zu erstellen. Auch die Erhebung von zuverlässigkeits- und sicherheitsrelevanten Daten, sowie deren Auswertung wurde vorangetrieben. Die Felddatenanalyse, welche mittlerweile ein fester Bestandteil der Sicherheits- und Zuverlässigkeitstechnik ist, wurde damals kontinuierlich weiterentwickelt.

Weitbekannte Veröffentlichungen im Bereich der Felddatenanalyse, welche für die hier dargestellte Arbeit von großer Bedeutung sind, folgten u.a. in [Kal 80] und [ANS 94].

Die über die Jahre gewonnenen Erfahrungen im Bereich der Sicherheits- und Zuverlässigkeitstechnik wurden sukzessive auch im Bereich der Automobilindustrie eingesetzt, um der steigenden Komplexität und der zunehmenden Einführung von Elektronik und Software gerecht zu werden. Neben der Veröffentlichung von [Bir 90], der sich mit der Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme befasste, wurde in [Pau 98] ein Modell entwickelt, welches anhand zensierter Daten aus der Garantiezeit eine Zuverlässigkeitsprognose über einen größeren Zeitraum erlaubt. Durch Analysen von Steuergeräten, Generatoren und Aktuatoren wurde die Anwendbarkeit und somit die Daseinsberechtigung für das Modell bewiesen.

Zu Beginn der Untersuchungen von automobilen Telekommunikationssystemen im Jahr 2004, welche durch das Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführt wurden, konnten weltweit keine Veröffentlichungen im Bereich der Zuverlässigkeit solcher Systeme gefunden werden. Begründen lässt sich dies durch die erhebliche Konkurrenz zwischen den einzelnen Anbietern und dass Ergebnisse oder Ansätze im Bereich des Zuverlässigkeits- und Qualitätsmanagements als Firmengeheimnisse gelten. Ein Vorsprung durch innovative Verfahren in den genannten Disziplinen ist mitunter genau so wichtig, wie die Entwicklung moderner Kommunikationseinheiten, welche vom Kunden gut angenommen werden. Daher erfolgte, in Zusammenarbeit mit einem namhaften Zulieferer, eine Anwendung und Weiterentwicklung des bereits an der Universität Wuppertal entwickelten Zuverlässigkeitsprognosemodells, wobei auch auf Erweiterungen nach [MMe 03a] zurückgegriffen wurde. Während dieser Untersuchungen kamen neue Fragestellungen, z.B. der Einfluss des Kunden auf den Abverkauf von Ersatzgeräten, auf, welche in den Jahren 2004 bis 2007 anhand mehrerer Untersuchungen gelöst wurden.

Noch schwieriger gestaltet sich die Suche nach vorhandener Literatur bei der Zuverlässigkeitsprognose von Mobiltelefonen, obwohl schon im Jahr 1995 eine Veröffentlichung zum Zuverlässigkeitswachstum sowie zum „Strife Testing“ (Ansatz zur Bestimmung der Systemzuverlässigkeit) zu finden ist. Der Fokus liegt hier jedoch nicht auf der Zuverlässigkeitsbestimmung mittels Felddaten sondern auf der Einführung von speziellen Vorserientests, um schon vor dem Start der Serienproduktion Aussagen über die Zuverlässigkeit treffen zu können [Per 95]. In [Pet 01] aus dem Jahr 2001 wird gezeigt, wie wichtig der schnelle Informationsfluss bei Feldfehlerdaten im Bereich der Elektronik ist. Je früher aussagekräftige Feldfehlerdaten vorhanden sind, desto schneller können Maßnahmen zur Beseitigung möglicher Schwachstellen ergriffen werden. Dieser Ansatz ist besonders im schnelllebigen Geschäft der Mobilfunkindustrie von großer Bedeutung.

Erst im Jahr 2003 beschäftigt sich Petkova [Pet 03] von der technischen Universität Eindhoven mit der Auswertung von Feldrückläufern im Bereich der Konsumgüterindustrie unter besonderer Berücksichtigung von Mobiltelefonen. Dabei wird

nicht nur die erforderliche Logistik zur schnellen Bearbeitung von Feldfehlerdaten aufgegriffen, sondern auch Lösungsansätze zur Verarbeitung von statistischen Daten genannt, die aus Feldfehlerdaten gewonnen werden. Weiterhin werden bekannte Problemstellungen, z.B. die große Produktvielfalt bei den Mobiltelefonherstellern, kurze Entwicklungszeiten und die steigende Komplexität der neuen Mobiltelefongenerationen erörtert.

Allgemein zeigt sich, dass im Bereich der Zuverlässigkeitsprognose von mobilen Telekommunikationsgeräten weltweit wenig Veröffentlichungen zu finden sind. Wie bereits erwähnt, liegt dies an der zögerlichen Einstellung der Unternehmen ihre Erfahrungen auf Symposien oder Tagungen zu präsentieren. Im Hinblick auf die erhebliche Konkurrenz, die kurzen Entwicklungszeiten und den harten Preiskampf ist diese Einstellung verständlich.

### **3 Die mobile Telekommunikation**

Zuverlässigkeitsprognosemodelle werden am Lehrstuhl für Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik der Bergischen Universität Wuppertal schon seit den 1990er Jahren erfolgreich eingesetzt. Dabei beschränkte sich die Anwendung meist auf Komponenten und Baugruppen im Kraftfahrzeug, welche durch den Nutzer nicht direkt bedient werden. Als Beispiele lassen sich unter anderem Steuergeräte für Bremssysteme oder Generatoren im Nutzfahrzeugbereich nennen. Im Gegensatz zu Systemen der mobilen Telekommunikation verrichten solche Fahrzeugkomponenten im Verborgenen ihren technischen Dienst und sind für den Nutzer somit unsichtbar. Telekommunikationssysteme hingegen werden in vielen Funktionen direkt vom Nutzer beansprucht, sei es in der automobilen Telekommunikation das Einlegen des Mobiltelefons in eine besondere Lade- und Kommunikationsschale (Cradle) oder im Bereich der Mobiltelefone der manuelle Gebrauch des Telefons. Dieser starke Einfluss des Nutzers auf die zu untersuchenden Mobilfunkgeräte stellt eine große Herausforderung an die Prognose des zukünftigen Feldausfallverhaltens dar.

Die folgenden Abschnitte sollen daher die Besonderheiten der mobilen Telekommunikation darstellen. Wichtig hierbei ist die Unterteilung in die Bereiche der „Automobilen Telekommunikation“ und den der „Mobiltelefone“.

### 3.1 Automobile Telekommunikation

In den folgenden Abschnitten soll die Entwicklung und Verbreitung von automobilen Kommunikationseinrichtungen und deren technischen Besonderheiten vorgestellt werden.

#### 3.1.1 Allgemeines

Um einen kleinen Einblick in die historische Entwicklung der automobilen Telekommunikation zu geben, sind in der folgenden Abbildung 3-1 die Mobilfunknetzgenerationen seit Einführung der automobilen Telekommunikation abgebildet.

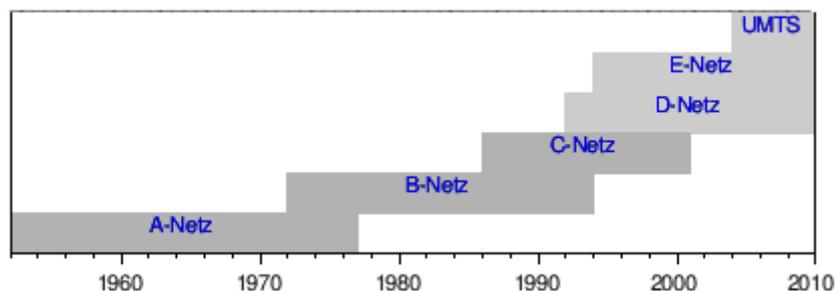


Abbildung 3-1: Historie der Mobilfunknetze [web 1]

Die automobilen Telekommunikation begann Anfang der 1950er Jahre mit der Einführung des A-Netzes. Es handelte sich dabei um regionale Netze, die keine Möglichkeit der Selbstwahl boten. Wollte ein Nutzer einen Anruf tätigen, musste er sich vermitteln lassen. Circa 11.000 Kunden nutzen das A-Netz, welches bis 1977 in Betrieb war.

Erst mit der Einführung des B-Netzes im Jahr 1972 wurde die Selbstwahlmöglichkeit eingeführt. Allerdings musste der Standort des Anzurufenden bekannt sein, um die zugehörige Vorwahl der Region wählen zu können. Bis zu 27.000 Kunden nutzten das B-Netz, welche auch mit der Schwierigkeit leben mussten, dass sich das Gespräch nach Verlassen einer Funkzelle beendete und danach wieder

aufgebaut werden musste. Erst im Jahr 1994 wurde der Betrieb des B-Netzes eingestellt.

1985 erfolgte die Einführung des C-Netzes, das erstmalig eine deutschlandweite Erreichbarkeit unter derselben Rufnummer ermöglichte. Weiterhin war das Empfangen und Versenden von Fax-Nachrichten eine Neuheit. Circa vier Jahre nach Einführung wurden die ersten Handapparate auf den Markt gebracht, welche die Vorläufer der heutigen Handys darstellen. Mit über 10.000 DM Anschaffungspreis und für heutige Standards unpraktischen Abmessungen waren diese Geräte hauptsächlich für Geschäftskunden und den Einbau in KFZ gedacht. Es ist zu bemerken, dass Mobilfunkgeräte der A bis C Generationen ein Gewicht von über 10kg aufweisen konnten. Bis ins Jahr 2000 war das C-Netz in Betrieb und stellte die Erreichbarkeit von bis zu 750.000 Kunden sicher.

1992 wurden mit der Einführung der heutigen D- und E-Netze die Grundlagen für die digitale Übertragung gelegt. Die rasch ansteigenden Kundenzahlen und die rasante Entwicklung im Bereich der Mobiltelefone bewirkten eine Entwicklung weg vom reinen Autotelefon hin zur komplexen Telematikeinheit in Oberklassefahrzeugen oder zu Komfortfreisprecheinrichtungen. Begünstigt wurde diese Entwicklung durch die Einführung des Hochgeschwindigkeitsnetzes UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) im Jahr 2004.

Eine Studie des Bundesverbandes Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. stellte fest, dass im Jahr 2008 bereits 16,8 Millionen UMTS Anschlüsse bei ca. 107 Millionen bestehenden Mobilfunkanschlüssen vorhanden waren. Im Jahr 2009 wurde mit mehr als 22 Millionen UMTS Anschlüssen gerechnet. Es zeigt sich, dass sich die Hochgeschwindigkeitsanschlüsse stetig auf dem Markt etablieren [Bit 09].

### **3.1.2 Telematikeinheiten und Komfortfreisprecheinrichtungen**

Wie bereits erwähnt, gibt es zwei Arten von automobilen Telekommunikationsgeräten. Zum einen Autotelefone, welche über eine eigene SIM-Karte (Subscriber Identity Module) verfügen und somit als eigenständige Telefone genutzt werden können, zum anderen die sogenannten Freisprecheinrichtungen, welche immer in Verbindung mit einem angemeldeten Mobiltelefon stehen müssen und lediglich

Funktionserweiterungen bieten. Beide Mobilfunklösungen haben sich in den letzten Jahren parallel weiterentwickelt und bieten heutzutage umfangreiche Kommunikationsmöglichkeiten, weit über das eigentliche Telefonieren hinaus.

Die folgende Abbildung 3-2 zeigt den Grad der Technisierung im Bereich der automobilen Telekommunikation. Interessant ist, dass nach Einführung hochkomplexer Telematikeinheiten Ende der 1990er Jahre ein Rückschritt im Bereich der Funktionalität erfolgte. Heute weit verbreitete Funktionen, wie der automatische Notruf, wurden wieder aus dem Programm genommen, weil der Kunde zu dieser Zeit die verfügbaren Funktionen nicht für notwendig hielt. Erst mit Einführung von sogenannten Handsfree-Produkten wurde der Grad der Technisierung wieder erhöht [NOK 07a].

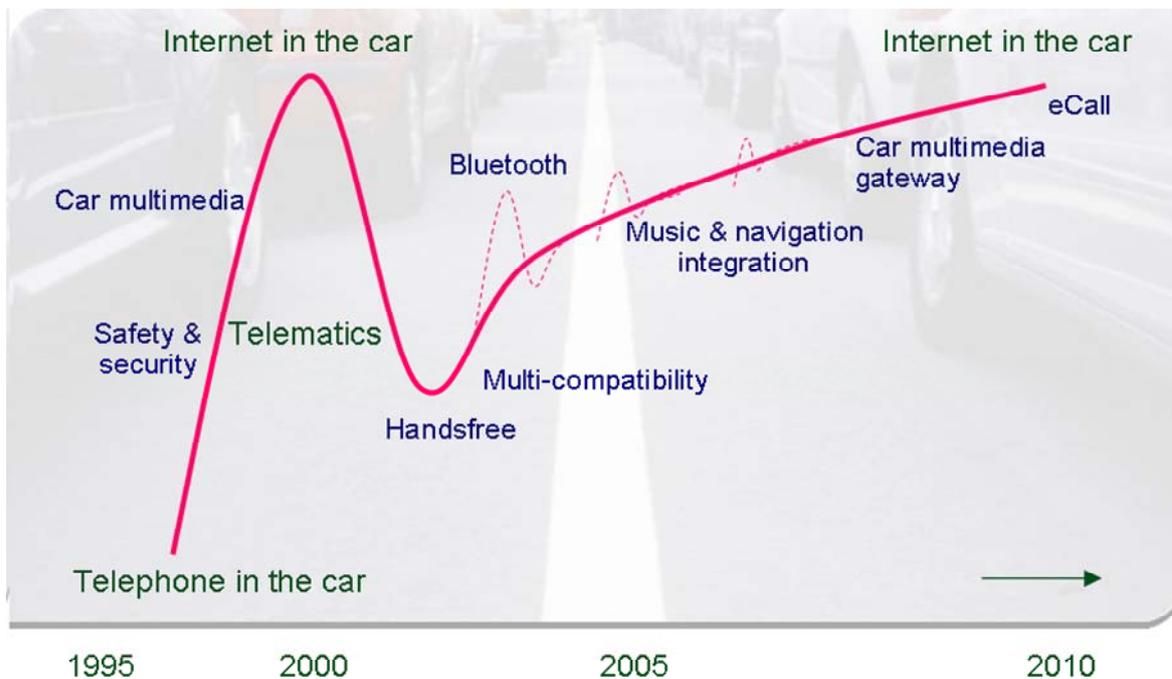


Abbildung 3-2: Grad der Technisierung in der automobilen Telekommunikation [NOK 07a]

### Autotelefone

Autotelefone sind bereits seit Anfang der 1950er Jahre mit Einführung des A-Netzes verfügbar. Aufgrund ihres Preises und Gewichts wurden sie jedoch bis in die späten 1980er Jahre kaum von Privatpersonen genutzt. Ihre Funktion beschränkte sich dabei auf das eigentliche Telefonieren. Erst mit Einführung des C-

Netzes, gefolgt vom D/E-Netz und des Hochgeschwindigkeitsnetzes UMTS, wurden die Funktionen erweitert.

Autotelefone wurden ab Ende der 1990er Jahre im Verbund mit anderen Elektronikgeräten im Fahrzeug zu Info- und Entertainmentsystemen ausgebaut und entwickelten sich zu komplexen Telematikeinheiten. Der Begriff der Telematik setzt sich dabei aus den Wörtern Telekommunikation und Informatik zusammen. Neben der Funktion des Telefonierens kamen zusätzliche Funktionen wie SMS (Short Message Service), Fax, mobiles Internet und Navigation hinzu. Weiterhin wurden in einigen Modellen automatische Notrufsysteme eingebaut, welche über Beschleunigungssensoren und die Signale des Airbagsteuergeräts einen Unfall automatisch erkennen, die aktuelle Position ermitteln und einen Notruf selbstständig absetzen können. Diese Systeme wurden aufgrund ihres hohen Preises jedoch nur in Fahrzeugen der oberen Mittelklasse sowie der Oberklasse eingebaut.

Die nachfolgende Abbildung 3-3 zeigt eine Telematikeinheit, welche in Modellen des OEM Opel/Vauxhall verbaut wurde.



**Abbildung 3-3: Telematikeinheit Opel/Vauxhall**

Als Einbauort der Telematikeinheit dient ein gewöhnlicher DIN-Schacht im Armaturenbrett. In der Mitte der Verblendung ist der Notruflautsprecher zu erkennen, welcher im Falle eines Unfalls die Kommunikation mit der Notrufzentrale ermöglicht. In das rechts daneben liegende Kartenfach wird die SIM-Karte eingeschoben.

Die oben abgebildete Telematikeinheit wird weiterhin durch eine zentrale Steuereinheit, Head Unit (HU) genannt, und die Display Unit (DU) ergänzt. Über die Head Unit, welche sich verdeckt eingebaut unter dem Armaturenbrett befindet, können sämtliche Funktionen der Telematikeinheit abgerufen werden. So können z.B. Einträge ins Telefonbuch erfolgen oder SMS geschrieben werden. Die Head Unit wird nicht ausschließlich zur Bedienung der Telematikeinheit verwendet. Es können auch weitere Komponenten, wie z.B. das Autoradio, damit bedient werden. Die Display Unit, mit deren Hilfe SMS-Texte oder Telefonbucheinträge angezeigt werden können, wird ebenfalls von anderen Komponenten genutzt. So können neben Anzeigen des Bordcomputers auch Frequenzinformationen der Radioeinheit oder Titelinformationen des CD-Spielers angezeigt werden.

Der Vorteil von Autotelefonen ist vor allem die hohe Sende- und Empfangsleistung, welche deutlich über denen von Mobiltelefonen mit Freisprecheinrichtung liegt. Weiterhin ermöglichen sie, durch Einbindung in fahrzeuginterne Kommunikationsnetzwerke (Bus-Systeme), die komplexe Vernetzung von Informations-, Navigations- und Unterhaltungsgeräten. Dabei sorgt die speziell für diesen Fahrzeugtyp entwickelte Technik für eine störungsfreie Nutzung.

Ein Nachteil der Autotelefone ist unter anderem die Notwendigkeit einer zweiten SIM-Karte, welche entweder mit einer neuen Nummer versehen oder als Zweitkarte auf den gleichen Mobilanschluss gemeldet werden muss. Beide Varianten haben den Nachteil, dass Informationen zwischen Autotelefon und Mobiltelefon des Nutzers permanent synchronisiert werden müssen, um beide Geräte auf dem aktuellen Stand zu halten [NOK 05].

Dieser Nachteil wird durch die Einführung des SIM-Access-Profile (SAP), auch Remote-SIM-Access-Profile (rSAP) genannt, vermieden. Dabei greift das Autotelefon via Bluetooth auf das Mobiltelefon des Nutzers zu, sobald dieser sein Fahrzeug betritt. Die auf dem Mobiltelefon vorhandenen Zugangsdaten der SIM-Karte

werden daraufhin auf das Autotelefon mit GSM-Einheit (Global System for Mobile Communication) übertragen, welches eine eigene Sende- und Empfangseinrichtung besitzt. Das Mobiltelefon kann sich für diesen Vorgang im Stand-By-Modus befinden, wodurch der Energieverbrauch deutlich gesenkt wird und somit lange Akkulaufzeiten möglich sind. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Sende- und Empfangsleistung des Autotelefons mit außen liegender Antenne. Dadurch wird die Sprachqualität, vor allem in Gebieten mit schlechter Netzabdeckung und bei hohen Geschwindigkeiten, deutlich verbessert. Nachteil der SAP ist die Bindung an das verbaute GSM-Modul, welches die Nutzung des UMTS Netzes nicht unterstützt. Schnelle Datendienste sind daher nicht verfügbar. Weiterhin ist anzumerken, dass nicht alle auf dem Markt verfügbaren Mobiltelefone SAP-fähig sind und zwischen den Herstellern große Unterschiede bei der Anzahl angebotener Geräte herrschen. Während einige Hersteller nahezu alle angebotenen Mobiltelefone mit dieser Technologie ausstatten, sind bei anderen Herstellern nur wenige und z.T. teure Geräte verfügbar.

### **Freisprecheinrichtungen**

Freisprecheinrichtungen für den automobilen Gebrauch werden in zwei große Gruppen unterteilt. Zum einen gibt es die Plug-and-Play Geräte, welche unabhängig vom Fahrzeugtyp funktionieren und schon für wenig Geld (einfache drahtgebundene Version) zur Verfügung stehen. Zum anderen gibt es Festeinbaulösungen, welche meist für einen bestimmten Fahrzeugtyp konzipiert und daher deutlich teurer sind. Da sich diese Arbeit mit der Untersuchung von Handset-Integration-Produkten, also komplexen Freisprecheinrichtungen beschäftigt, wird auf Plug-and-Play Lösungen nicht weiter eingegangen.

Handset-Integration-Produkte (HIP) sind seit den 1990er Jahren auf dem automobilen Kommunikationsmarkt zu finden. Sie sollten eine Alternative zu den bereits verbreiteten Autotelefonen bieten, ohne jedoch eine weitere SIM-Karte zu benötigen. Dies hatte unter anderem den Vorteil, dass der Kunde nur ein Telefon nutzen musste und in diesem immer alle erforderlichen Daten enthalten waren. Ein Abgleich zwischen Mobil- und Autotelefon konnte daher entfallen. Als weiteren Vorteil erwies sich, dass mehrere Nutzer das HIP unabhängig voneinander nutzen

konnten, ohne die SIM-Karten zu tauschen. Daher erfreuten sich HIPs besonders bei Flottenfahrzeugen mit wechselnden Benutzern hoher Beliebtheit.

Anfangs wurden HIPs für einen speziellen Mobilfontyp und einen bestimmten Fahrzeugtyp hergestellt. So wurde zum Beispiel das in [Bra 05a] untersuchte HIP für die Mercedes E-Klasse konzipiert und konnte nur mit den NOKIA Mobiltelefonen NOKIA 6210 und NOKIA 6310 genutzt werden. Dadurch ergab sich das Problem, dass viele Kunden, die sich eine gebrauchte E-Klasse kauften, auch das entsprechende Mobiltelefon erwerben mussten, um die Funktionen des HIP weiter nutzen zu können. Da die genannten Mobiltelefone nur über einen kurzen Zeitraum produziert wurden (vgl. Abschnitt 3.2), war die Beschaffung von gut erhaltenen Mobiltelefonen für den Nutzer schwierig. Es stellte sich daher für den Kunden bei einem Ausfall des HIP die Frage, ob er auf eigene Kosten ein HIP reparieren lässt, welches die volle Funktionalität nur mit einem veraltetem Mobiltelefon bietet. Der Einfluss des Kundenverhaltens auf den Abverkauf von HIPs nach der Garantiezeit wurde durch diesen Sachverhalt zu einem erheblichen Faktor bei der Bestimmung der Endbevorratungsmenge (vgl. Abschnitt 1.1). Die Beschränkung auf bestimmte Mobilfontypen wurde neben der Verwendung von spezieller Software auch durch den Einbau von Cradles (Halterungen) hervorgerufen. In diesen Halterungen konnte das Telefon mit dem HIP kommunizieren und wurde gleichzeitig geladen. Weiterhin konnte die Empfangsqualität durch die Verwendung von Außenantennen verbessert werden.

Die Benutzerfreundlichkeit verbesserte sich durch die Einführung von Handsfree-Geräten, welche mit dem Übertragungsstandard Bluetooth die drahtlose Kommunikation zwischen Mobiltelefon und HIP herstellten. Zudem wurde es möglich, verschiedene Mobilfontypen an das gleiche HIP anzuschließen. Manche Hersteller sahen sogar die Verwendung von firmenfremden Mobiltelefonen, z.B. die Verwendung eines Sony Ericsson Telefons auf einem NOKIA HIP, vor. Dadurch konnten HIPs auch weiterverwendet werden, wenn der Nutzer das Mobiltelefon wechseln wollte. Nachteilig waren jedoch die fehlende Stromversorgung sowie die Kommunikation über die im Mobiltelefon verbaute Antenne. Einige Fahrzeughersteller bieten daher extra Halterungen an, um die Akkuladung sowie die Verwendung einer Außenantenne zu ermöglichen.

Im Vergleich zu Autotelefonen stehen moderne Freisprecheinrichtungen technisch gesehen auf dem gleichen Entwicklungsstand. Auch mit ihnen ist eine komfortable Nutzung vielfältiger Kommunikationsmöglichkeiten gegeben.

In Abbildung 3-4 ist eine Handset-Integration-Lösung von Ford zu sehen. Die schwarze Box, rechts im Bild, ist die verdeckt eingebaute Steuereinheit. Über Tasten am Lenkrad bzw. auf der Mittelkonsole kann der Nutzer seine Bedienwünsche eingeben. Die Darstellung der Informationen erfolgt auf einem Farbdisplay, welches sowohl vom Fahrer-, als auch vom Beifahrerplatz gut ablesbar ist. Die Kommunikation zwischen Mobiltelefon und Steuereinheit erfolgt mittels Bluetooth. Es kann jedoch auch eine Halterung für das Mobiltelefon eingebaut werden, um die Stromversorgung sicherzustellen und eine bessere Kommunikation mittels Außenantenne zu gewährleisten.



**Abbildung 3-4: Handset-Integration-Lösung von Ford [NOK 07a]**

Handset Integration Produkte werden von mehreren Herstellern weltweit angeboten und sind für nahezu jeden Fahrzeugtyp verfügbar.

Die in den letzten Jahren gesunkenen Preise für Autotelefone und Freisprecheinrichtungen in Verbindung mit einem weit verbreiteten Verbot der Nutzung von Mobiltelefonen ohne Freisprecheinrichtung beim Autofahren haben zu einem stark gestiegenen Absatz von Mobilfunklösungen in der Automobilindustrie geführt. Erstaunlich ist jedoch, dass trotz vielfältiger Angebote im Jahr 2009 immer noch ca. 418.000 Anzeigen mit einem Bußgeldvolumen von ca. 16.720.000 € wegen unerlaubter Telefonnutzung am Steuer laut Kraftfahrt-Bundesamt registriert

wurden. Im Vergleich zum Jahr 2008 ist das ein Rückgang um 15.000 Verstöße [KBA 10].

## **3.2 Mobiltelefone**

Das Zuverlässigkeitsprognosemodell, welches in Kapitel 4 vorgestellt wird, wurde ursprünglich für den Bereich der Automobil- und Automobilzulieferindustrie entwickelt. Der Einsatz im Bereich der Mobiltelefone stellt somit eine neue Herausforderung dar, da Besonderheiten der im Gegensatz zur Automobilindustrie schnelllebigen Mobilfunkindustrie berücksichtigt werden müssen. Die folgenden Abschnitte sollen daher einen Einblick geben und die Unterschiede zur Automobilindustrie herausstellen. Weiterhin werden Strategien vorgestellt, mit denen zum Zeitpunkt des Projektstarts die Kalkulation von Ersatzgeräten durchgeführt werden können.

### **3.2.1 Allgemeines**

Mobiltelefone haben sich in den letzten zwei Jahrzehnten vom unhandlichen Telefon, welches hauptsächlich von Geschäftsleuten genutzt wurde, zum multimedialen Alleskönner im Hosentaschenformat für ein breit aufgestelltes Kundenklientel entwickelt. Dies wird durch die Abbildung 3-5 verdeutlicht, welche die Evolution von Mobiltelefonen der letzten 30 Jahre darstellt und neben der Entwicklung zum kompakten Alleskönner auch die Fortschritte in Handhabbarkeit und Design aufzeigt. Besonders hervorzuheben ist, dass das Verhältnis zwischen Mobiltelefongröße und Display stetig abnimmt. Dies wird u.a. durch den zwischenzeitlich anbieterübergreifenden Einsatz von berührungsempfindlichen Displays hervorgerufen.



Abbildung 3-5: Evolution von Mobiltelefonen [web 2]

Schon im Jahr 2006 besaß in Deutschland jeder Einwohner rechnerisch 1,04 Mobilfunkverträge, Tendenz steigend. Damit liegt Deutschland weltweit auf einem Spitzenplatz betreffend den Grad der Marktsättigung im Land. Allgemein stellt der europäische Raum aufgrund seiner technischen Infrastruktur einen interessanten Markt für Anbieter von Mobilfunktelefonen dar. Nicht zu vernachlässigen sind aber

auch die Märkte in Südamerika und Asien, welche hohe Wachstumsraten aufweisen und daher für die OEM interessant sind. Schon im Jahr 2007 wurden mehr als 3 Mrd. Mobiltelefone weltweit genutzt. Das entsprach in etwa 50% der Weltbevölkerung [Bit 07]. Abbildung 3-6 zeigt vergleichend die Anzahl der Mobilfunkanschlüsse bezogen auf 100 Einwohner.

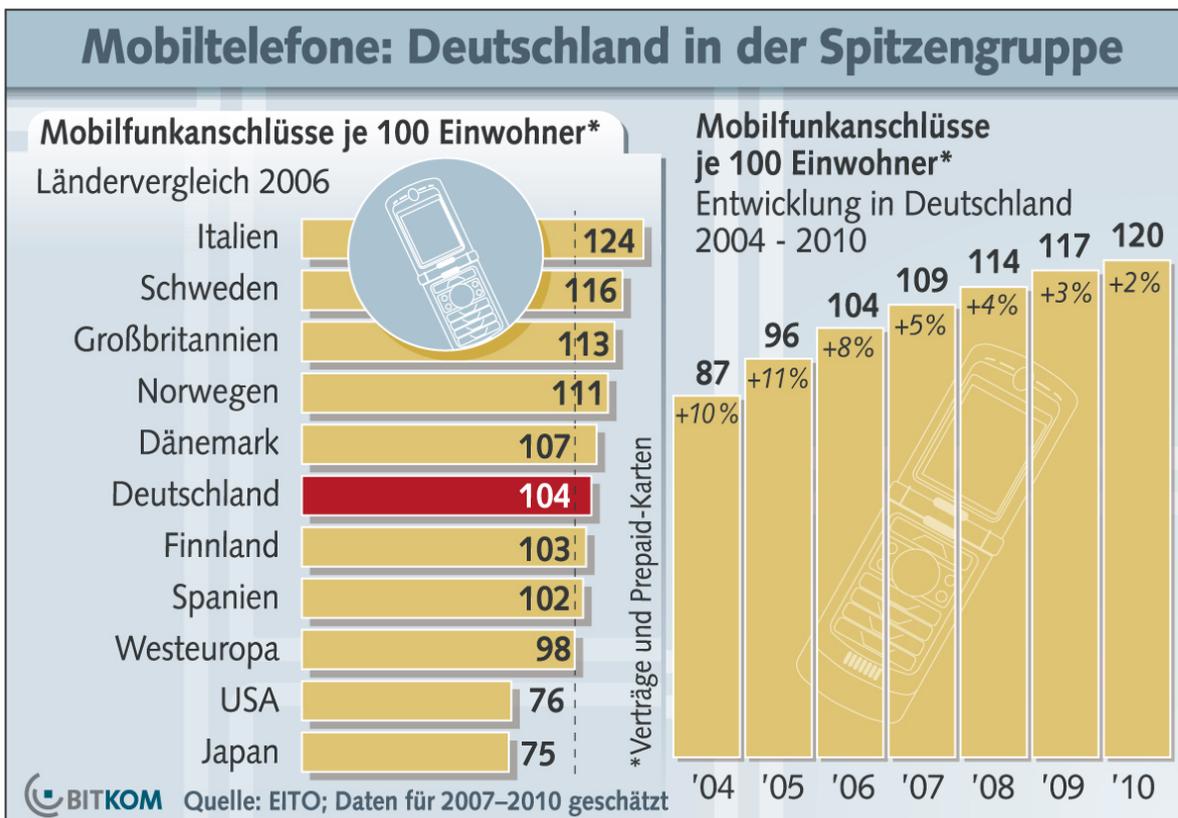


Abbildung 3-6: Verbreitung von Mobiltelefonen in Europa, Japan und USA [web 3]

Stand in den späten 80er Jahren des letzten Jahrhunderts die sprachliche Kommunikation im Vordergrund, so hat sich der heutige Anwendungsbereich von Mobilfunkgeräten stark erweitert. Folglich werden Mobiltelefone immer mehr zu tragbaren Minicomputern, die E-Mails versenden, mobilen Zugang zum Internet bieten, Termine verwalten oder als Ersatz für Digitalkameras dienen. Besonders die Entwicklung zum Massenmedium und die Verwendung durch junge Nutzer haben das Einsatzspektrum stark geprägt. Auch die flächendeckende Netzabdeckung im Bereich der 3. Mobilfunkgeneration (UMTS) stellt einen weiteren Meilenstein bezüglich der Multimedianeutzung von Mobiltelefonen dar. Eine von der Firma

Bitkom veröffentlichte Studie zeigt in Abbildung 3-7 Ergebnisse zur erweiterten Nutzung der heutigen Mobiltelefone.

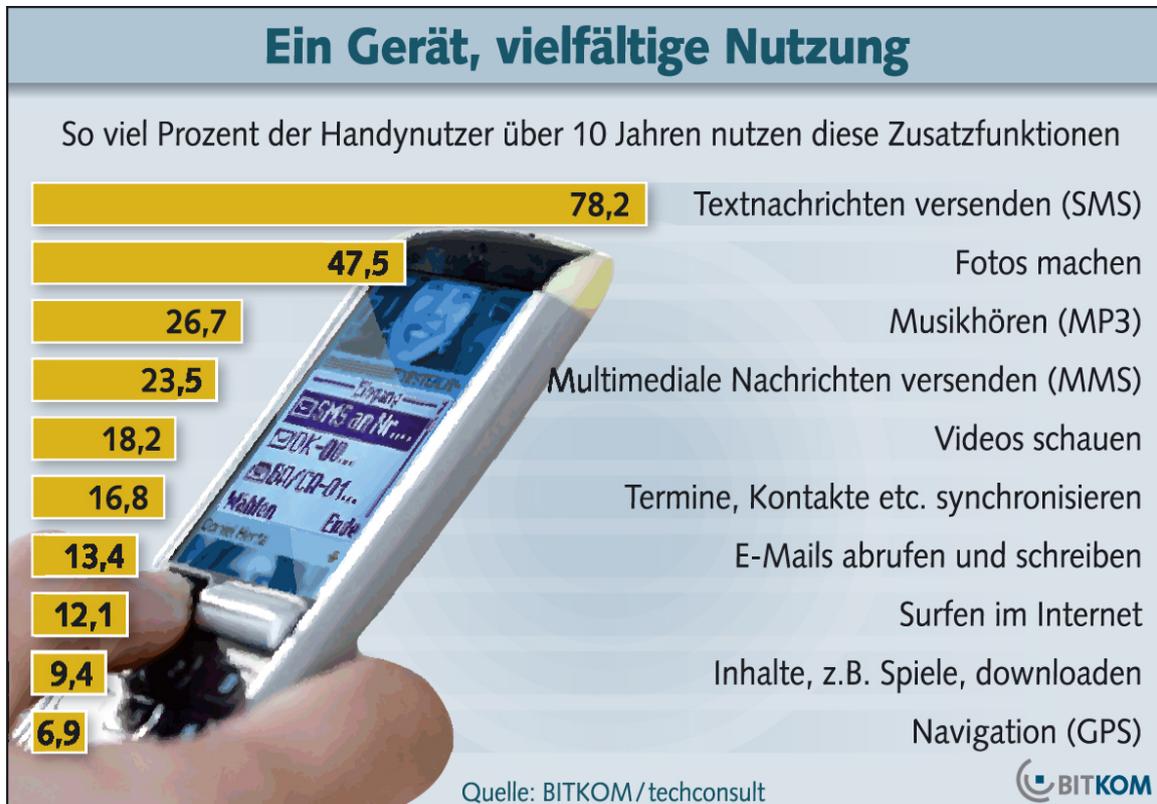


Abbildung 3-7: Nutzung des Mobiltelefons in Deutschland im Jahr 2009 [web 4]

Folglich steigt die Komplexität der Mobiltelefone aus technischer Hinsicht immer weiter an, was zu enormen Herausforderungen führt, da Entwicklungs- und Produktionszeiträume hingegen in den letzten Jahren weiter verkürzt wurden.

Im Gegensatz zur Automobilindustrie, welche mit einer großen Anzahl an OEM aufwarten kann, teilen sich im Bereich der Mobilfunktechnologie nur eine handvoll OEM den Markt. Dabei haben die beiden größten Anbieter Nokia und Samsung einen Marktanteil von über 50%. Abbildung 3-8 verdeutlicht diese Marktbeherrschung [Gar 09].

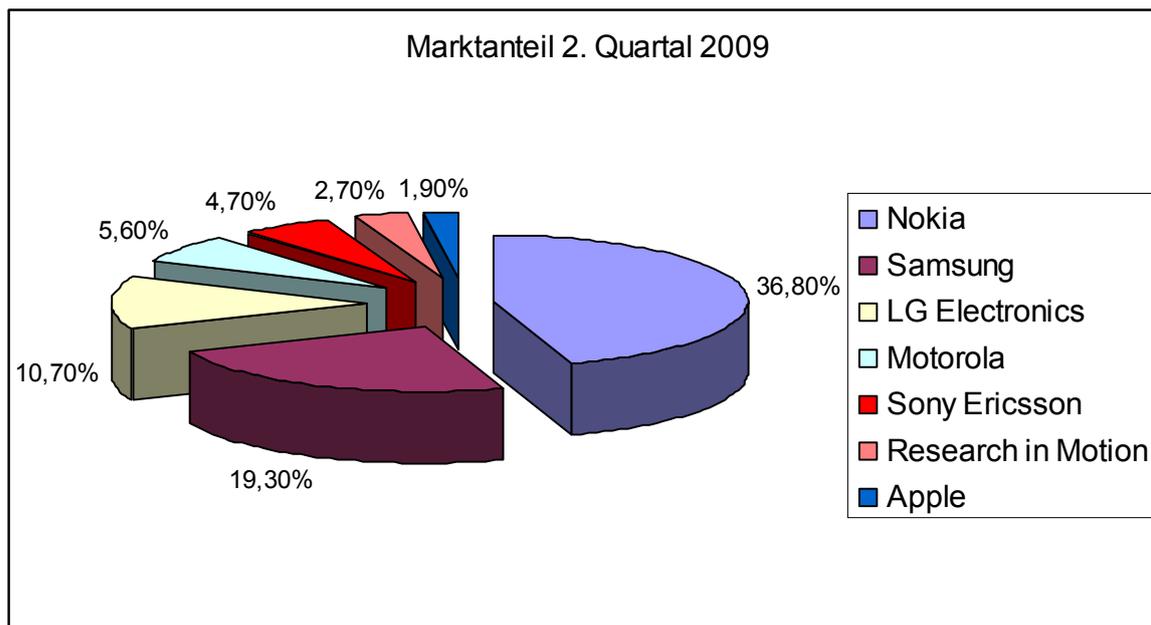


Abbildung 3-8: Marktanteile Mobilfunkhersteller 2. Quartal 2009 [Gar 09]

Weiterhin ist die Produktpalette bei den führenden Mobiltelefonherstellern nahezu unüberschaubar. 50 bis 60 verschiedene Modelle pro Hersteller und Verkaufsland stellen keine Seltenheit dar. Dieser Umstand stellt die Verantwortlichen im Bereich des Supply Chain Managements der entsprechenden Anbieter für Mobilfunktelefone vor große Herausforderungen, wie in Abschnitt 3.2.3 näher erläutert wird.

Die Komplexität von heutigen Mobiltelefonen lässt sich gut anhand der nachfolgenden Abbildung 3-9 verdeutlichen, welche den schematischen Aufbau aller Komponenten und ihre Einbindung ins System zeigt. Dabei ist zu sagen, dass es sich um ein Beispiel eines hochkomplexen Mobiltelefons handelt, welches u.a. Funktionen wie Navigation (Global Positioning System), mobiles Fernsehen (Digital Video Broadcasting) und drahtloses Netzwerk (Wireless Local Area Network) ermöglicht. Der schnelle technische Fortschritt wird in den nächsten Jahren jedoch dazu führen, dass heutige Anwendungen, welche hochpreisigen Geräten vorbehalten sind, auch in Mobiltelefonen des mittleren Preissegments zu finden sein werden. Grundlegende Elemente wie Prozessor, Speicher (Memory), Energiemanagement, Antenneneinheit (Radio Frequency) oder Audiomangement finden sich jedoch in jedem Mobiltelefon.

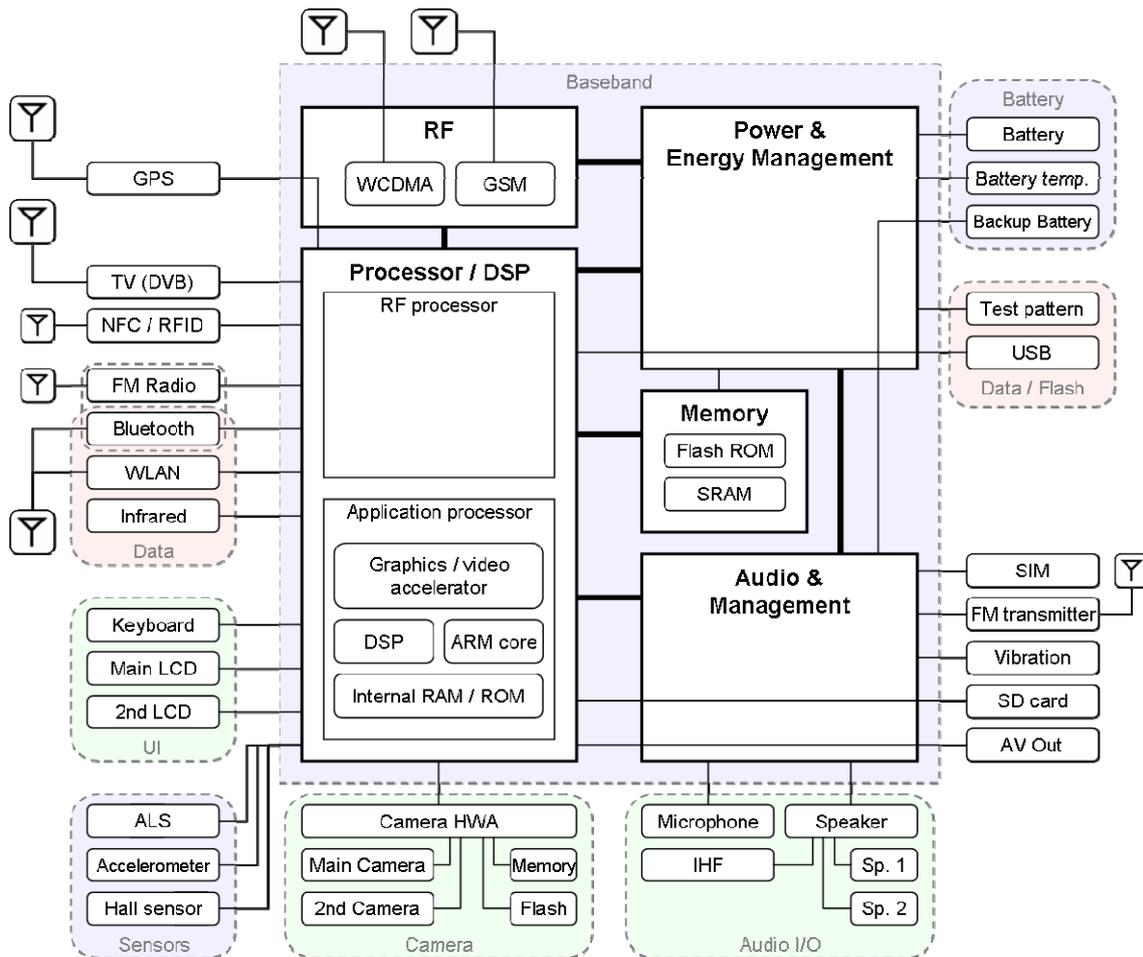


Abbildung 3-9: Schematischer Aufbau eines Mobiltelefons [web 5]

### 3.2.2 Supply-Chain-Management

Supply-Chain-Management (SCM) kann als der Oberbegriff für die systematische und unternehmensübergreifende Vernetzung von Lieferanten, Produzenten, Mobilfunkanbietern (Providern) und Kunden angesehen werden. Herausragende Eigenschaft dieser Lieferkette (englisch: supply chain) ist, dass neben firmeninternen Prozessen auch Prozesse bei Zulieferern, Distributoren und weiteren Vertragspartnern zu berücksichtigen sind. Dabei werden Prozesse der gesamten Wertschöpfungskette analysiert und ggf. verändert, um eine kontinuierliche Verbesserung der Planung und Steuerung dieser Prozesse zu erhalten. Die einzelnen Akteure in der Wertschöpfungskette stehen dabei miteinander in Kontakt. Mit dem vorangegangenen Akteur und dem nachfolgenden Akteur ist die Unternehmung durch drei Ströme verbunden:

- den Güterstrom,
- den Geldstrom und
- den Informationsstrom.

Es gilt, diese drei Ströme im Griff zu haben und zu lenken. Dies sicherzustellen, ist ein Anliegen des Supply-Chain-Managements [Wer 08]. Die nachfolgende Abbildung 3-10 zeigt einen vereinfachten Aufbau einer Supply Chain für den Warenstrom vom Zulieferer (1 bis 4) über den OEM (Fabrik 1 und 2) und den Mobilfunkprovider (Lager 1 und 2) bis zum Endkunden.

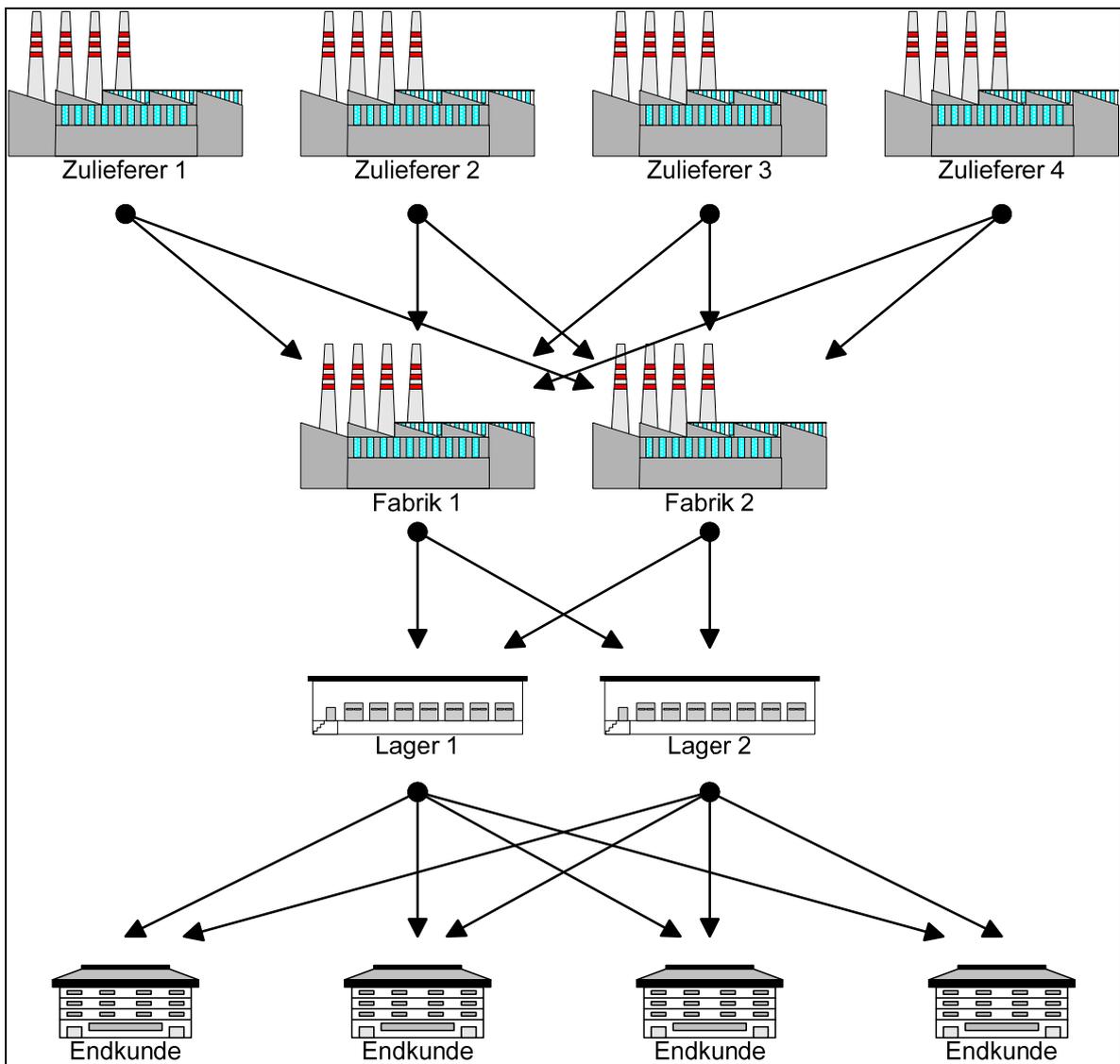


Abbildung 3-10: Aufbau einer Supply Chain

Während sich Supply-Chain-Management bereits in den 1980er Jahren in Amerika verbreitete, fand eine systematische Einführung dieses Optimierungsansatzes in Deutschland erst in den 1990er Jahren statt. Oftmals wird SCM als Synonym für Logistik verwendet. Dies ist aus heutiger Sicht jedoch nicht richtig, da die Logistik ein Teil des SCM bildet.

Bezogen auf den Bereich des Herstellers von Mobilfunktelefonen gliedert sich die Supply Chain in mehrere Bereiche:

- Zulieferindustrie und ggf. Produktion (extern),
- Beschaffung, Produktion, Distribution (interne Lieferkette),
- Kunden.

Als Besonderheit kommt bei der Produktion von Mobilfunkgeräten hinzu, dass manche OEM keine eigenen oder nur wenige Produktionsstätten besitzen und daher Produktionsmöglichkeiten von externen Dienstleistern in Anspruch nehmen. Diese Besonderheit hat auf den Begriff des Supply-Chain-Managements jedoch keinen Einfluss, da für die logistische Wertschöpfungskette unerheblich ist, ob die beteiligten Organisationseinheiten zu unterschiedlichen Unternehmen gehören. Es kann jedoch sein, dass sich die Prozessoptimierung dadurch komplexer gestaltet, weil Informationsflüsse erschwert werden.

### **3.2.3 Probleme im Bereich Supply-Chain-Management**

Nachdem in Abschnitt 3.2.2 kurz auf den Begriff des Supply-Chain-Managements eingegangen wurde, sollen in diesem Abschnitt die Besonderheiten und Probleme beim Supply-Chain-Management im Mobilfunkbereich erläutert werden. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf den Teilbereich der Ersatzteilbevorratung und -distribution gelegt.

Der Teilbereich Ersatzteilbevorratung und -distribution deckt hier die vollständige Ersatzteilbevorratung für die Verkaufsregion (Sales Region) CEEMEA ab. CEE-MEA steht dabei für „Central Eastern, Europe, Middle East and Africa“ und ist unter Logistikern eine gebräuchliche Abkürzung für diese Verkaufsregion. Weitere Regionen sind „Western Europe“, „Asia Pacific“, „Northern America“ und „Middle

and Southern America“. Jede dieser aufgeführten Verkaufsregionen hat eine zentrale Abteilung, welche die Versorgung der zugehörigen Market Units (MU) koordiniert und entsprechende Tools und Verfahren für Prozesse vorgibt. Eine Market Unit kann sowohl ein einzelnes Land als auch ein Zusammenschluss mehrerer kleiner Länder sein, falls deren Einwohnerzahl für eine eigenständige Market Unit aus logistischer Sicht zu klein wäre. So werden üblicherweise die skandinavischen Staaten Dänemark, Schweden, Norwegen und Finnland zur MU „Nordics“ zusammengefasst.

Eine Market Unit ist meist einer eigenständigen Abteilung, welche die Kalkulation von Ersatzgeräten und Ersatzteilen für ihren Bereich eigenständig durchführt, untergeordnet. Dabei hält die Abteilung ständigen Kontakt zur übergeordneten Abteilung der Sales Region.

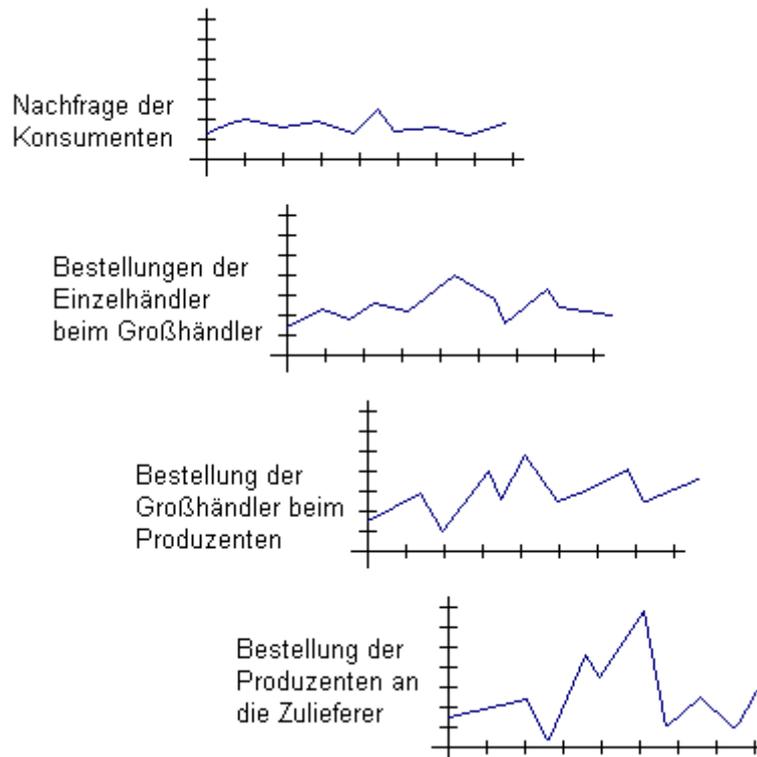
Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 erwähnt wurde, haben die großen Hersteller von Mobilfunktelefonen oftmals mehr als 50 verschiedene Modelle in einem Land auf dem Markt, für die ein Service angeboten werden muss. Dabei kann es sich sowohl um einfache Auskünfte bei Bedienungsproblemen handeln, welche von speziellen Call-Centern abgearbeitet werden, als auch technische Probleme betreffen, welche von Reparatur-Centern gelöst werden müssen. Eine weitere Herausforderung stellt die Gegebenheit dar, dass neben den aktuell im Verkaufsportfolio aufgeführten Mobiltelefonen auch ein Service für ältere Modelle angeboten werden muss (Garantiezeit). Die sich im Service befindliche Anzahl an Modellen wird dadurch noch weiter erhöht. Die nachfolgende einfache Rechnung soll zeigen, welche Herausforderung die Produktvielfalt in den einzelnen Market Units für den verantwortlichen Supply-Chain-Manager mit sich bringt.

Für das Beispiel wird davon ausgegangen, dass der zuständige Supply-Chain-Manager eine Unterregion von CEEMEA betreut. Dazu zählen in seinem Bereich elf Market Units, in denen jeweils 50 verschiedene Mobilfunkmodelle auf dem Markt sind. Zudem sind pro Market Unit im Schnitt 5 Mobilfunkprovider vertreten, welche jeweils eine eigene Software benötigen und ggf. auch unterschiedliche Hardware (Branding) nutzen. Der Supply-Chain-Manager hat folglich eine Anzahl von 2.750 Variationsmöglichkeiten, die er mit Hilfe seiner Mitarbeiter betreuen muss. Weiterhin muss noch zwischen den unterschiedlichen Bearbeitungsvorgän-

gen unterschieden werden. Zum einen müssen Reparaturkapazitäten und Ersatzteile abgeschätzt werden. Zum anderen ist eine ausreichend große Anzahl an Ersatzgeräten erforderlich, um Totalausfälle oder nicht reparable Geräte zeitnah zu ersetzen. Es ist offensichtlich, dass eine manuelle Abarbeitung aller Bevorrattungsvorgänge zu einem nicht überschaubaren Arbeitsumfang und dadurch zu inakzeptablen Kosten führen würde.

Ein Ansatz, um diese Bearbeitungsvorgänge zu vereinfachen, ist die Einrichtung eines ausreichend großen lokalen Lagers in jeder MU, welches alle erforderlichen Ersatzgeräte und Ersatzteile für einen bestimmten Zeitraum vorrätig hält. Die zuständigen Supply-Chain-Manager einer jeden MU bestimmen eigenständig ihren Bedarf und bestellen die zugehörigen Reparaturkapazitäten und Ersatzgeräte. Der dezentrale Aufbau ermöglicht schnelles Handeln und eine genaue Kenntnis des eigenen Marktes. Besonders regionale und lokale Gegebenheiten (z.B. Feiertage, Fahrverbote für LKW, Gewerkschaften) machen es notwendig, die Prozesse im SCM auf die einzelnen Länder abzustimmen.

Die dezentrale Bearbeitung hat allerdings auch einige Probleme. Aufgrund der eigenständigen Bevorrattung und der Bildung von Sicherheitslagerbeständen wird erhebliches Kapital in Form von Ersatzgeräten gebunden, welche zudem Lagerhaltungskosten in großem Umfang mit sich bringen und das Kostenrisiko durch Obsoleszenz alter Geräte steigern. Außerdem wird der unter Logistikern gefürchtete Peitscheneffekt, auch Bullwhip-Effekt genannt, ggf. verstärkt, je mehr Zwischenebenen in der Lieferkette auftreten. Unter dem Bullwhip-Effekt verstehen Logistiker Abstimmungsprobleme bei mehrstufigen Lieferketten. Dabei werden durch Schwankungen in der Produktions- und Logistikplanung Bedarfsspitzen erzeugt, welche sich durch die Zunahme von Logistikstufen verstärken. Je steiler die Bedarfsspitzen sind, desto größer werden die Probleme für den Logistiker. Abbildung 3-11 zeigt den Einfluss des Bullwhip-Effekts auf die Logistikstufen.



**Abbildung 3-11: Peitscheneffekt oder Bullwhip-Effekt [web 6]**

Im Bereich der Reparaturkapazitäten müssen bei externen Dienstleistern große Kapazitäten bestellt werden, um auch im Fall von nicht erwarteten technischen Problemen (epidemische Fehlerbilder) keine unzumutbaren Wartezeiten für den Kunden entstehen zu lassen. Auch hierdurch entstehen unnötige Kosten.

Wird hingegen die Reparatur und Ersatzteilversorgung zentral gesteuert, ist die räumliche Nähe der Supply-Chain-Manager zur entsprechenden MU nicht gegeben. Die lokalen Gegebenheiten, Besonderheiten mit Behörden und der Kultur, sowie die Bindung zu externen Partnern der Supply-Chain können in der Regel nicht in einem vergleichbaren Maße zu einer lokalen Supply-Chain-Gruppe berücksichtigt werden.

Abbildung 3-12 stellt den Prozess dar, welcher bei der Reklamation eines Kunden üblich ist. Dabei ist der erste Ansprechpartner für den Kunden ein Service-Center, zum Beispiel das Verkaufsgeschäft eines Mobilfunkproviders. Dieses Center nimmt das defekte Gerät entgegen, lässt sich eine erste Problembeschreibung geben und sendet das Gerät an einen lokalen Reparaturservice. Dieser kann kleinere Reparaturen bzw. das Aufspielen neuer Software durchführen. Kann der

Fehler dadurch nicht behoben werden, wird das defekte Gerät an ein Reparaturzentrum weitergeleitet, welches nicht auf lokaler Ebene agiert. Diese Reparaturzentren haben neben der Durchführung von umfangreicheren und damit kostenintensiveren Reparaturen auch die Berechtigung, ein defektes Gerät als nicht mehr reparabel einzustufen und zu verschrotten. Ist die Verschrottung nicht abzuwenden, erhält der Kunde ein Ersatzgerät, welches vom lokalen Kundenservice personalisiert und zurückgesendet wird. Ist eine Reparatur möglich, wird das Gerät nach der Reparatur zum lokalen Kundenservice in die weitere Bearbeitung gegeben, um dort wieder personalisiert zu werden.

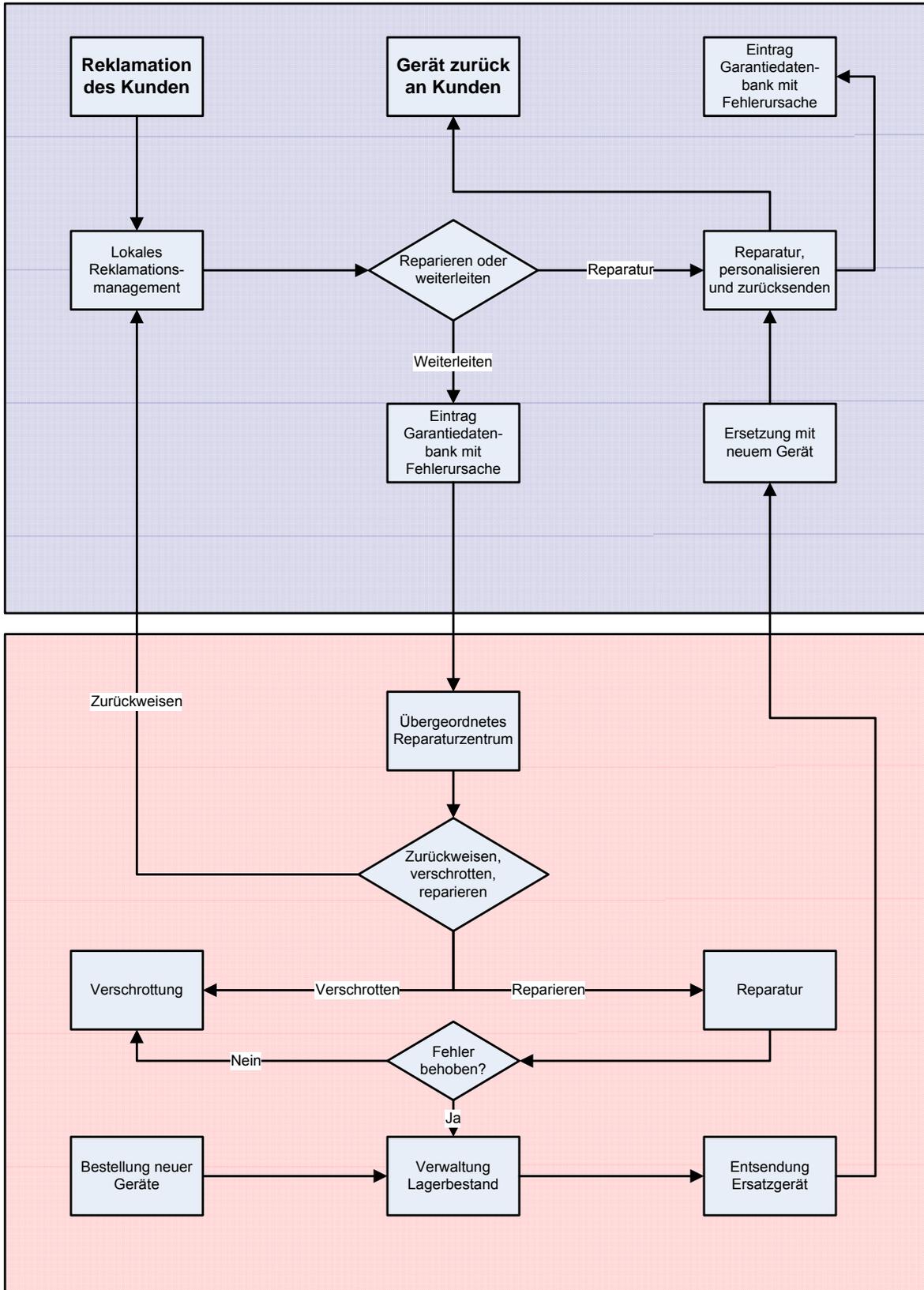


Abbildung 3-12: Prozessdarstellung Kundenreklamation

Aufgrund des komplexen Zusammenspiels mehrerer, teils externer Abteilungen bei der Bearbeitung einer Kundenreklamation ist es offensichtlich, wie wichtig eine verlässliche und genaue Prognose im Bereich der Reparaturkapazitäten, der Lagerung von Ersatzgeräten und der Bevorratung von Ersatzkomponenten ist.

### **3.2.4 Datenstruktur und –quantität**

Um eine aussagekräftige Zuverlässigkeitsprognose mit anschließender Vorhersage des Serienersatzbedarfs oder der Endbevorratungsmenge durchzuführen, bedarf es umfangreicher Daten, welche in der Regel bei den Firmen in Form von elektronischen Datenbanken vorhanden sind.

Zuerst sind allgemeine Informationen und Vorüberlegungen notwendig, die den Untersuchungsgegenstand abgrenzen. Dies kann im Groben auf Plattformebene weltweit geschehen und weiter auf die Komponentenebene heruntergebrochen werden. Geografisch kann eine feinere Gliederung in Sales Regions, Market Units oder Verkaufsländer durchgeführt werden. Da gewöhnlich der Bedarf für ein Mobilfunkmodell prognostiziert werden muss, wird in dieser Arbeit die Unterteilung auf Modellebene und Verkaufsregion gewählt. Um eine feinere Gliederung zu erhalten, wird zudem eine Prognose, bezogen auf einzelne Market Units, durchgeführt.

Wie in Kapitel 4 erläutert wird, basiert das Wuppertaler Zuverlässigkeitsprognosemodell auf Garantiedaten, welche je nach Verkaufsland und Mobilfunkgerät zwischen ein und zwei Jahren erfasst werden. Dadurch ergibt sich eine umfassende Datenbank, die neben den üblichen Informationen, wie Produktionsdatum, Verkaufsdatum, Ausfalldatum, Reparaturdatum und Seriennummer noch ca. 40 weitere Informationen pro Datensatz enthält. So werden z.B. der Ausfallgrund und die abgeleitete Reparaturmaßnahme bis auf Bauteilebene bzw. der Kompletttausch des Gesamtgeräts erfasst.

Aufgrund der teils hohen Verkaufszahlen (mehrere 10.000 Geräte pro Monat und Market Unit) stehen auch in den Garantiedatenbanken innerhalb weniger Monate ausreichend Daten zur Verfügung, um aussagekräftige Prognosen durchzuführen. Diese sind zum einen erforderlich, um Reparaturkapazitäten zu prognostizieren, wenn Ausfallbilder analysiert werden, welche zu einer Reparatur oder zum Kom-

ponententausch führen. Zum anderen können sogenannte „Scrap-Geräte“, das sind Geräte, welche verschrottet werden müssen, zuverlässigkeitstechnisch begutachtet werden, um einen Bedarf an Komplettgeräten zu berechnen. Die genaue Aufbereitung der Garantiedaten wird in Abschnitt 5.1 näher beschrieben. Wie bereits erwähnt, stehen schon nach wenigen Monaten Daten in großem Umfang zur Verfügung. Bei Mobilfunkgeräten mit hohen Verkaufszahlen und langen Lieferzeiträumen ergeben sich daher Garantiedatenbanken, welche weltweit mehrere Millionen Einträge enthalten. Um nicht den Eindruck entstehen zu lassen, Mobilfunkgeräte seien unzuverlässig, muss erwähnt werden, dass pro Garantiefall mehrere Einträge in der Datenbank vorliegen können. Jede Aktion in einem Servicecenter wird als eigenständiger Datensatz abgelegt. Wird z.B. bei einem Garantiefall das Display getauscht, ein Bauteil auf der Platine neu fixiert und die Software erneuert, so enthält die Datenbank drei Einträge. Durch das Abspeichern der zugehörigen Seriennummer, auch IMEI (International Mobile Equipment Identity) genannt, können Mehrfacheinträge zusammengefasst werden, wenn es darum geht, absolute Rücklaufzahlen pro Gerät zu bestimmen.

Die für die Bestimmung des Ausfallverhaltens wichtigen Daten sind nahezu vollständig in der Garantiedatenbank verfügbar. Probleme gibt es nur in einigen Market Units, welche das Verkaufsdatum an den Endkunden, auch Prove of Purchase (POP) genannt, nicht ablegen. Hierdurch kann der Verzugszeitraum vom Produktionsdatum zum Verkaufsdatum nicht bestimmt werden, welcher in der Realität jedoch mehrere Wochen betragen kann (Vgl. Abschnitt 5.3).

Neben den Garantiedaten sind weitere Informationen wichtig, um eine Prognose des Gerätebedarfs durchführen zu können. Unter anderem müssen die Verkaufszahlen der betrachteten Monate, sowie die zukünftig erwarteten Verkaufszahlen der nächsten Monate bekannt sein. Auch diese Daten sind in elektronischer Form in den Firmen verfügbar.

Die bisherige Verarbeitung der verfügbaren Daten und die daraus resultierende Problemstellung wird nachfolgend in Abschnitt 3.2.5 erläutert.

### 3.2.5 Bisherige Ansätze und Problemstellung

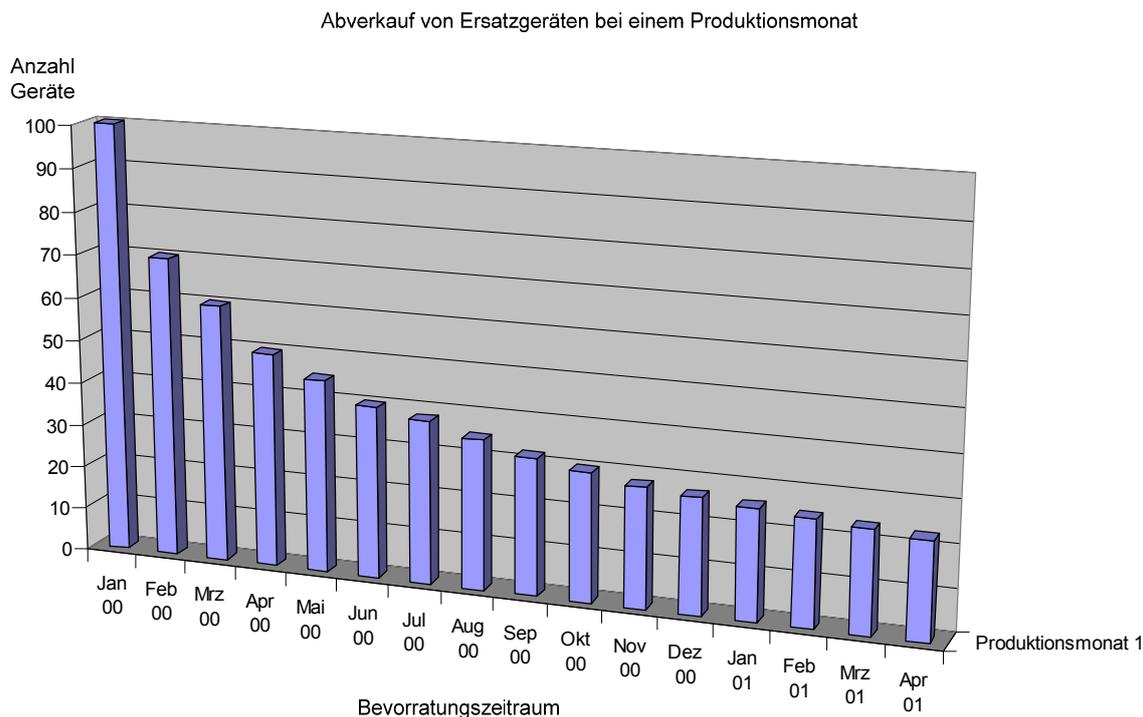
Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 erwähnt, gibt es im Bereich des Supply-Chain-Managements erhebliche Herausforderungen, um Bedarfsmengen für Reparaturkapazitäten, Ersatzgeräte oder Ersatzkomponenten zu bestimmen.

Ein gängiger Ansatz, welcher in vielen Firmen genutzt wird, basiert darauf, die Stückzahlen von Ersatzgeräten der letzten Monate zu betrachten und so einen Bedarf für die kommenden Monate zu bestimmen. Ist bekannt, dass das Ausfallverhalten der entsprechenden Komponente exponentiell verteilt ist und somit eine konstante Ausfallrate besitzt, kann dieser Ansatz für den Serienersatzbedarf zum Ziel führen. Sobald das Ausfallverhalten jedoch eine gewisse Systematik aufweist, kann dieser Ansatz jedoch nur für sehr grobe Aussagen genutzt werden.

Das für elektronische Geräte und Komponenten typische Frühausfallverhalten, welches auch für Mobilfunkgeräte vermutet wird, fordert daher weitergehende Ansätze, um die Bedarfsmengen zu kalkulieren.

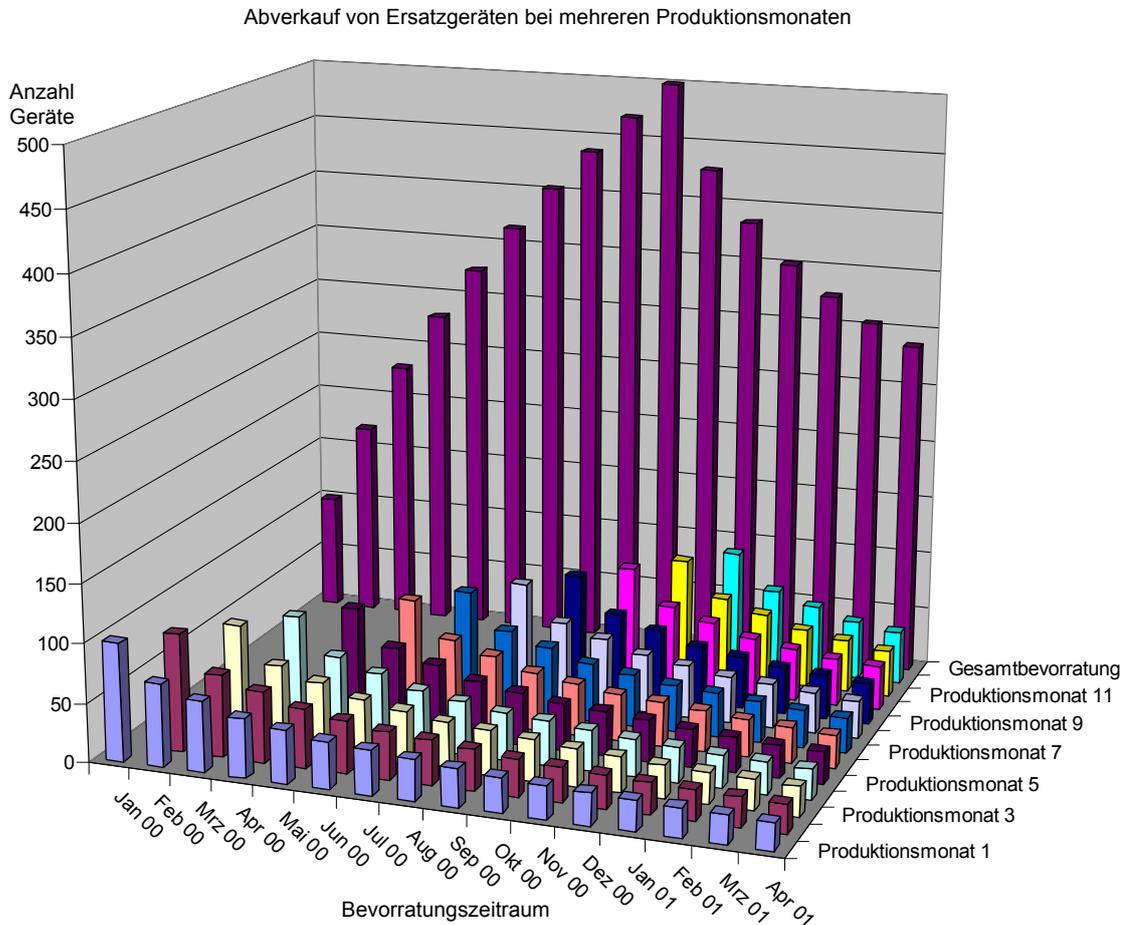
Es sei für alle hier aufgeführten Beispiele erwähnt, dass diese Bedingungen selten in der Praxis eintreten, da Variationen in der Serienbelieferung und im Ausfallverhalten im Regelfall auftreten. Zur Verdeutlichung des Einflusses des Ausfallverhaltens sind jedoch gleichbleibende Bedingungen erforderlich.

In der nachfolgenden Abbildung 3-13 wird ein theoretischer Abverkauf von Geräten für den Serienersatzbedarf aufgezeigt, welche einem Frühausfallverhalten unterliegen. Es ist deutlich zu sehen, dass der sinkende Abverkauf in den ersten sechs Monaten einen sinkenden, monatlichen Bedarf nach sich zieht. Danach gehen die Abverkäufe langsam in den konstanten Bereich über. Das vereinfachte Beispiel verdeutlicht, dass eine Berechnung des Bedarfs über die Betrachtung der Vormonate, wie oben beschrieben, keine guten Ergebnisse liefert, da der Bedarf bis zum Erreichen der stochastisch auftretenden Ausfälle überschätzt wird. Soll ein längerer Zeitraum für den zu berechnenden Bedarf betrachtet werden, so könnte nach einigen Jahren ein monatlich steigender Bedarf aufgrund auftretenden Spätausfallverhaltens entstehen. Da Mobilfunkgeräte, im Gegensatz zu Komponenten im Automobilbereich, nicht für lange Zeiträume bevorratet werden, kann dieser Aspekt jedoch außer Acht gelassen werden.



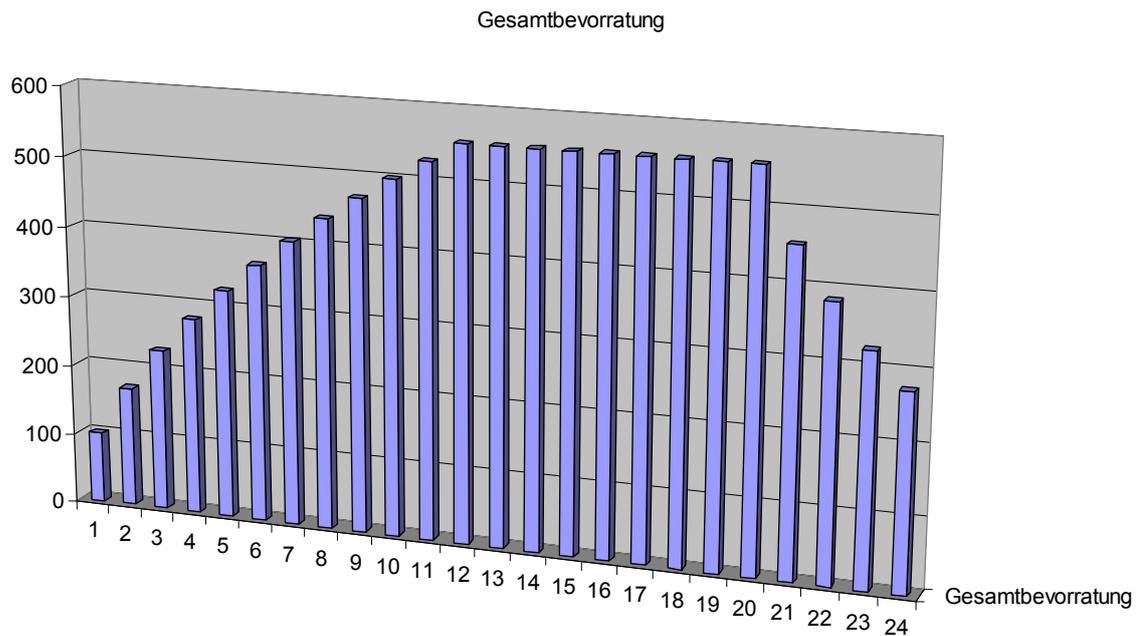
**Abbildung 3-13: Abverkauf von Ersatzgeräten bei einem Produktionsmonat**

Das vereinfachte Beispiel wird zunehmend komplexer, wenn mehrere Produktionsmonate in die Berechnung einfließen. Für ein zweites Beispiel werden zwölf Produktionsmonate angenommen. Sowohl die Produktionsmengen als auch das Ausfallverhalten ist über die Produktionsmonate gleich. Der Betrachtungszeitraum beginnt mit dem ersten Monat des Ersatzbedarfs im Januar 2000 und erstreckt sich bis April 2001. Dabei kommt bis Dezember 2000 monatlich jeweils ein neuer Produktionsmonat hinzu, der bevorratet werden muss. Es zeigt sich in Abbildung 3-14, dass der gesamte Abverkauf aufgrund des erheblichen Frühausfallverhaltens der hinzukommenden Produktionsmonate bis Oktober 2000 erheblich zunimmt. Danach sinkt der Bedarf wieder ab, da sich die sinkende Ausfallrate der Produktionsmonate immer stärker auswirkt und keine neuen Produktionsmonate mit Frühausfällen hinzugezählt werden müssen. Es ist daher erforderlich, das Ausfallverhalten der einzelnen Produktionsmonate zu bestimmen, den daraus resultierenden Serienersatzbedarf jedes Einzelmonats mit Hilfe der Ausfallwahrscheinlichkeit zu ermitteln und diese Vorgehensweise für alle Produktionsmonate durchzuführen.



**Abbildung 3-14: Abverkauf von Ersatzgeräten bei mehreren Produktionsmonaten**

Werden weitere Produktionsmonate untersucht, so ergibt sich unter den gegebenen Bedingungen ein langsames Ansteigen der Gesamtbevorrattungsmenge, wie in der nachfolgenden Abbildung 3-15 zu sehen ist. Erst nachdem keine neuen Produktionsmonate hinzukommen, nimmt der Bedarf deutlich ab. Ein Einpendeln des Bedarfs ist dann erreicht, wenn die ersten Produktionsmonate nach Erreichen einer Frist nicht mehr bevorratet werden müssen (z.B. nach Erreichen der Garantiezeit). Das oben beschriebene Beispiel wird in Abbildung 3-15 auf 20 Produktionsmonate erweitert. Zudem wird davon ausgegangen, dass eine Garantiezeit von zwölf Monaten vereinbart ist.

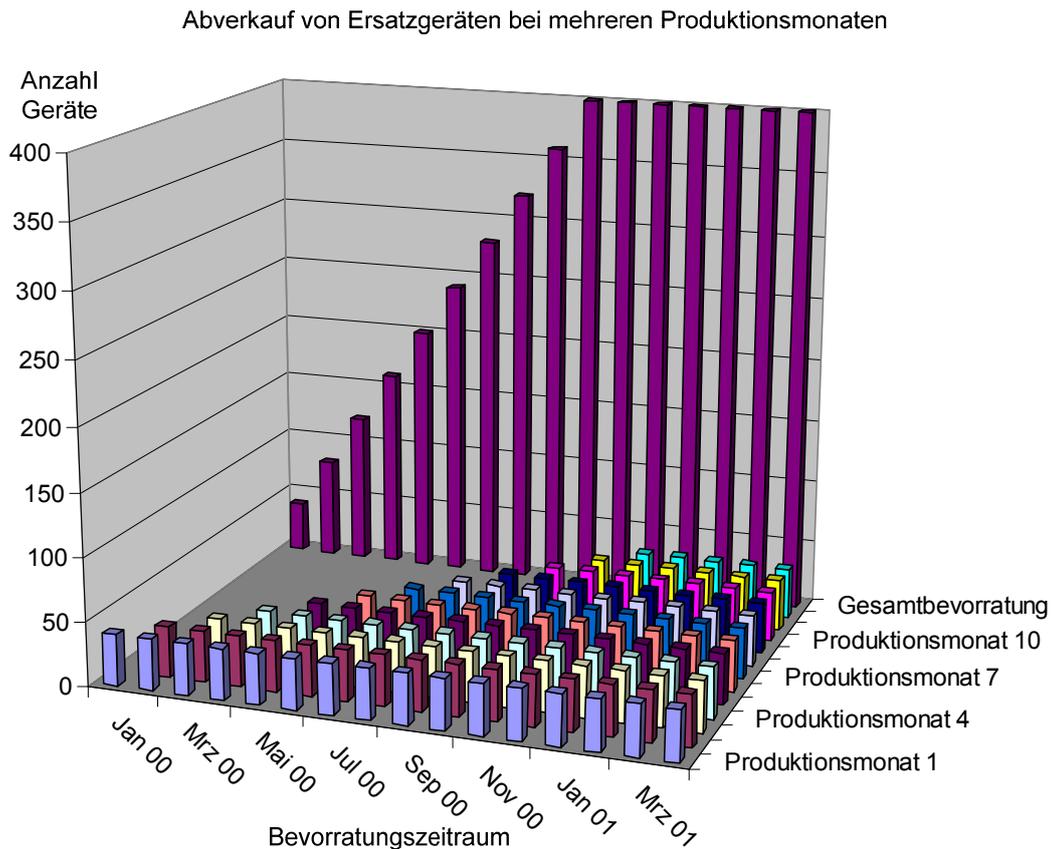


**Abbildung 3-15: Erweiterung auf 20 Produktionsmonate**

Das Einpendeln des Bedarfs ab dem zwölften Monat des Bevorratungszeitraums ist häufig auch in der Realität zu sehen. In der Regel wird ein leichtes Variieren des Abverkaufs aufgrund schwankender Produktionsmengen und eines abweichenden Ausfallverhaltens zwischen den Monaten vorhanden sein.

Der anfängliche Anstieg flacht sich immer stärker ab, je größer der Einfluss des Frühausfallverhaltens ist, sodass ein fließender Übergang in den konstanten Bedarf entsteht.

Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 3-16 den ansteigenden Bedarf bei konstantem Ausfallverhalten. Es ist deutlich zu sehen, dass der Bedarf linear bis zum Maximum ansteigt und dann, wie beim Frühausfallverhalten, konstant bleibt. Kommen keine weiteren Produktionsmonate hinzu, nimmt der Bedarf nach der entsprechenden Zeit wieder linear ab.



**Abbildung 3-16: Abverkauf von Ersatzgeräten bei mehreren Produktionsmonaten und konstanter Ausfallrate**

Die Beispiele verdeutlichen, dass für eine Prognose des Serienersatzbedarfs oder der Endbevorratungsmenge das Ausfallverhalten bekannt sein muss. Dies kann durch die Auswertung von Garantiedaten mittels eines Zuverlässigkeitsprognosemodells erreicht werden, welches in Kapitel 5 vorgestellt wird.

## **4 Zuverlässigkeitsprognosemodelle in der automobilen Telekommunikation**

In den folgenden Abschnitten werden das „Urprognosemodell“ aus dem Jahr 1998 sowie zugehörige Erweiterungen, die während mehrerer Untersuchungen in den letzten Jahren am Lehrstuhl für Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik durchgeführt wurden, veranschaulicht. Dabei werden spezielle Gegebenheiten im Bereich der automobilen Kommunikation erläutert. Weiterhin werden Beispiele von Zuverlässigkeitsprognosen bei Autotelefonen und Freisprecheinrichtungen gegeben, welche in den letzten Jahren erstellt wurden.

### **4.1 Standardprognosemodell**

Wie bereits erwähnt, ist es von großer Bedeutung, Vorhersagen über das Ausfallverhalten technischer Systeme, Baugruppen und Komponenten treffen zu können. Dabei haben Vorhersagen, die auf Datenbanken, Prüfdaten oder Testergebnissen basieren, oftmals den Nachteil, dass sie die spezifische Belastung im Feld nicht oder nur unzureichend wiedergeben. Besser eignen sich daher Felddaten, die während der Garantiezeit meist vollständig vorliegen. Diese Daten werden bei den OEM oder Zulieferern in Datenbanken abgelegt und stehen für Analysen zur Verfügung.

Das in den 1990er Jahren von der Robert Bosch GmbH und dem Lehrstuhl für Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik entwickelte Prognosemodell ermöglicht die Berechnung von Zuverlässigkeitskenngrößen, auch über den Zeitraum der gewährten Garantie hinaus und wurde seit dieser Zeit in zahlreichen Untersuchungen angewandt. Vorteile des Modells sind die Betrachtung der spezifischen Belastung im Feld durch Einbeziehung der Fahrleistung und die vielfältige Anwendbarkeit, die somit Prognosen für nahezu alle Varianten von Systemen, Baugruppen und Komponenten bietet. Beispielhaft können Projekte im Bereich von elektronischen Steuergeräten, Telematikeinheiten, Sensoren und sogar Generatoren genannt werden, welche jeweils unterschiedliche Ausfallverhalten aufweisen (vgl. [Pau 98], [Alt 03], [Bra 05a]).

Um eine Prognose für das Feldausfallverhaltens durchzuführen, sind folgende Mindestinformationen notwendig:

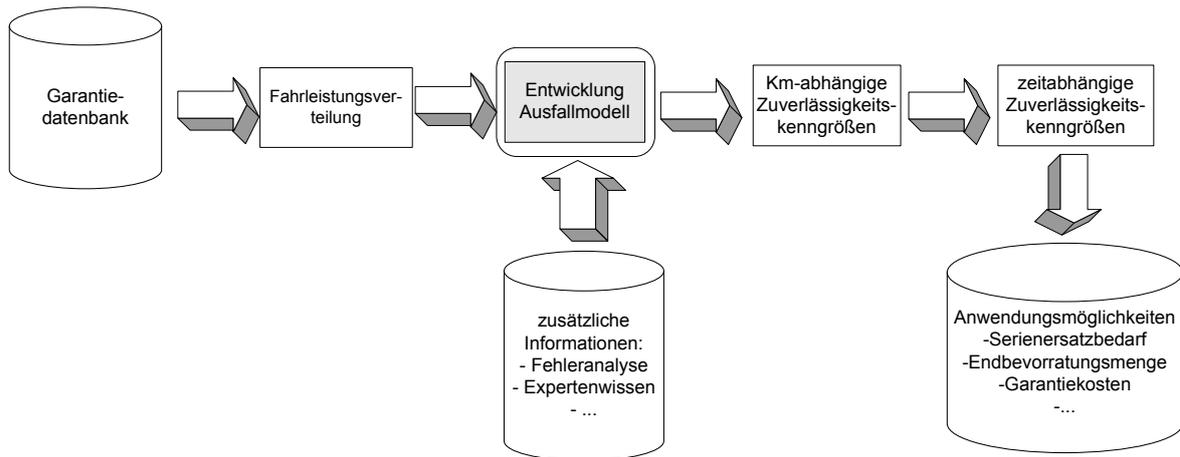
- Produktionsdatum,
- Zulassungsdatum,
- Ausfalldatum,
- Teilmarktfaktor,
- Rücklaufquote,
- Fahrleistung und
- Produktionsmengen nach Monat oder Jahr.

Weiterhin ist es denkbar, zusätzliche Informationen einzubeziehen, um die Prognose präziser zu gestalten und den Grad der Detaillierung zu erhöhen. Zusatzinformationen sind u.a.:

- Qualitätsstand/Entwicklungsstand des Bauteils,
- Qualitätsstand der Software,
- Erfassung des Ausfalls (Meldeverzug),
- Informationen über epidemische Ausfallbilder (Expertenwissen) und
- Faktor des Kundentauschverhaltens.

Je nach Anwendungsgebiet und Ziel der Prognose können auch weitere Einflussfaktoren einbezogen und das Modell erweitert werden.

Der Ablauf einer Standardzuverlässigkeitsprognose ist in Abbildung 4-1 zu sehen [MMe 03a].



**Abbildung 4-1: Ablauf einer Zuverlässigkeitsprognose im automobilen Bereich [MMe 03a]**

Wie in Abbildung 4-1 dargestellt, beginnt jede Zuverlässigkeitsprognose mit der Beschaffung und Aufbereitung der erforderlichen Daten. Da in diesem Schritt der Zuverlässigkeitsprognose das Fundament für alle weiteren Bearbeitungsschritte gelegt wird, muss die Aufbereitung der Daten mit großer Sorgfalt durchgeführt werden.

Die Garantiedaten enthalten meist das Produktionsdatum, das Zulassungsdatum und das Ausfalldatum des zu untersuchenden Produkts, sodass die Zeit im Feld bestimmt werden kann (z.B. in Tagen). Wird nun die Zeit im Feld als einzige Belastungsgröße des Produkts herangezogen, so kann nicht betrachtet werden, dass Fahrzeuge einer unterschiedlichen Nutzung unterliegen und die jährlichen Fahrleistungen stark schwanken. Fahrleistungen von wenigen Tkm (Tausend Kilometer) im Jahr bis 100 Tkm sind in Fahrleistungsdatenbanken keine Seltenheit und zeigen die erheblichen Unterschiede des Nutzungsverhaltens auf. Als besseres Maß für die Belastung im Feld hat sich daher die Fahrleistung erwiesen, welche in der Regel in den Garantiedatenbanken abgelegt wird. Da ein Produkt im Fahrzeug meist nur in Gebrauch ist, wenn der Wagen fährt, kann die Fahrleistung als Substitut für die Betriebszeit verwendet werden, welche in der Regel nicht verfügbar ist. Dieser Ansatz wurde in mehreren Untersuchungen verifiziert, bei denen neben der Fahrleistung auch die Betriebszeit einer Komponente ermittelt werden konnte. Die Werte für die Zuverlässigkeitskenngrößen, zum einen ermittelt über die Fahrleistung, zum anderen über die Betriebszeit, wiesen keine signifikanten

ten Abweichungen auf, sodass die Substitution mittels Fahrleistung als praktikabel gilt.

Aufgrund der Gegebenheit, dass bei einem Nutzerwechsel sowohl Viel- als auch Gelegenheitsfahrer den Wagen fahren, kann die Fahrleistung über die Jahre als konstant angenommen werden. Daher gilt für die Zufallsvariable der Fahrleistung  $S_G$  bezogen auf die Garantiezeit:

$$S_G = \frac{S \cdot t_G}{t_0},$$

wobei  $S$  die Zufallsvariable der Fahrleistung für die Betriebsdauer,  $t_G$  die Garantiezeit und  $t_0$  die Zeit im Feld sind. Die so ermittelten spezifischen Fahrleistungen für eine Population werden in einem weiteren Schritt als relative Summenhäufigkeit gelistet und nachfolgend durch eine theoretische Verteilungsfunktion angepasst. Als praktikabel hat sich hierbei die Lognormalverteilung  $LN(\mu, \sigma^2)$  erwiesen, deren Parameter  $\mu$  und  $\sigma^2$  mittels der Maximum-Likelihood-Methode geschätzt werden.

Für die Verteilungsfunktion der Lognormalverteilung mit der Zufallsgröße  $\ln t$  ist durch

$$F(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^t \frac{1}{\tau} \cdot e^{-\frac{(\ln \tau - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} d\tau = \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right) \quad \text{für alle } t \geq 0, \mu \in \mathbb{R}, \sigma > 0$$

gegeben.

Mit den nachfolgenden Gleichungen lassen sich die Parameter  $\mu$  und  $\sigma^2$  der Lognormalverteilung schätzen (siehe u.a. [Mey 10]):

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i \text{ und}$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln t_i - \hat{\mu})^2 = \frac{n-1}{n} s^2.$$

In einigen Fällen ist auch eine Anpassung der empirischen Daten durch eine Weibull-Verteilung von Vorteil [Bra 05].

Durch die Einbeziehung der Fahrleistung als Maß für die Beanspruchung wird die Berücksichtigung der spezifischen Feldbelastung als ein wichtiger Punkt für die Zuverlässigkeitsprognose erreicht. Problematisch ist jedoch, dass die Felddaten in der Regel nur während der Garantiezeit vollständig und gut dokumentiert vorliegen. Nach Erreichen der Garantiezeit entsteht somit eine Informationslücke, die es zu schließen gilt. Zudem entsteht das Problem, dass die Garantiedaten zeitensiert sind und im mathematischen Modell berücksichtigt werden müssen. Es kann nämlich der Fall auftreten, dass Vielfahrer während der Garantiezeit Ausfälle bei einer hohen km-Fahrleistung haben. Wenigfahrer erreichen während der Garantiezeit diese hohe Fahrleistung nicht. Es kann jedoch sein, dass diese Fahrzeuge zu einem späteren Zeitpunkt, d.h. nach der Garantiezeit einen Ausfall bei hoher Fahrleistung haben werden, welcher bei Vielfahrern schon in der Garantiezeit aufgetreten ist. Diese noch zu erwartenden Ausfälle gilt es mit entsprechenden Anwärtermodellen zu prognostizieren. Das hier verwendete Verfahren nach Pauli [Pau 98] hat sich in zahlreichen Projekten als praktikabel erwiesen, um die Problematik der sogenannten Anwärter zu lösen. Das ebenfalls bekannte iterative Verfahren nach Eckel [Eck 77] findet in anderen Modellen Anwendung und wurde mit dem Verfahren nach Pauli in [Fri 00] verglichen. Da das Verfahren nach Eckel nur eine Anwärterkorrektur über einige Stützstellen liefert, wird die Methode nach Pauli bevorzugt.

Die korrigierten Ausfälle  $n_k(s)$  zu gegebener Wegstrecke  $s$  werden hierbei aus der Beziehung

$$n_k(s) = \frac{n_g(s)}{1 - L_G(s)},$$

mit  $n_g(s)$  tatsächlich aufgetretenen Ausfällen und  $L_G(s)$  als Wert der Fahrleistungsverteilung zur Wegstrecke  $s$  ermittelt.

Die so korrigierten Ausfälle zur Wegstrecke  $s$  werden als kumulierte relative Summenhäufigkeit gelistet und als empirische Funktion abgebildet. Die nachfol-

gende Gleichung zeigt die empirische korrigierte Summenhäufigkeit  $\tilde{F}_k(s)$  bezogen auf die Grundgesamtheit  $n_0$ :

$$\tilde{F}_k(s) = \frac{n_k(s)}{n_0} = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{\zeta \leq s} n_k(\zeta) = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{\zeta \leq s} \frac{n_g(\zeta)}{1 - L_G(\zeta)}.$$

Wenngleich die Methode nach Pauli leicht anzuwenden ist, so birgt sie auch Gefahren Z.B. wenn die theoretische Fahrleistung stark von den empirischen Werten abweicht. Dies kann der Fall sein, wenn hauptsächlich Fehlermechanismen auftreten, die zum größten Teil die Gruppe der Vielfahrer betrifft. Da die Fahrleistungsverteilung auf Daten der Garantiedatenbank aufbaut, kann es so zu Verzerrungen kommen, welche einen erheblichen Einfluss auf die Ermittlung der Fahrleistungsverteilung und somit auf die Anwörterkorrektur haben. In [Bra 08] wird eine Fallstudie vorgestellt, die verschiedene Parametervariationen und ihre Auswirkungen auf das Prognosemodell beschreiben.

Um eine Verfälschung der Anwörterkorrektur zu vermeiden, kann es daher hilfreich sein, Fahrleistungsparameter von unabhängigen Fahrleistungsdaten zu ermitteln, um Einflüsse von Fehlermechanismen zu vermeiden. Die sich im Aufbau befindliche Fahrleistungsdatenbank des Fachgebiets Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik der Bergischen Universität Wuppertal kann für solche Problemfälle eine gute Alternative bieten, da sie bereits zum heutigen Zeitpunkt nahezu 5 Mio. Datensätze aller auf dem deutschen Markt befindlichen Kfz enthält.

Nach Korrektur der relativen Summenhäufigkeit wird mit geeigneten Parameterschätzverfahren eine theoretische Funktion angepasst. Im zuverlässigkeitstechnischen Bereich hat sich die Weibull-Verteilung  $W(\alpha, \beta)$  als geeignet erwiesen, da sie aufgrund ihrer Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  neben stochastisch auftretenden Ausfällen (konstante Ausfallrate) sowohl Früh- als auch Spätausfallverhalten abbilden kann.

Eine stetige, nicht negative Zufallsgröße ist Weibull-verteilt mit den Parametern  $\alpha > 0$  und  $\beta > 0$ , wenn diese durch

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\alpha \cdot t^\beta} & \text{für } t \geq 0 \\ 0 & \text{für } t < 0 \end{cases}$$

gegeben ist.

Frühausfälle können beschrieben werden, wenn die Ausfallsteilheit  $\beta$  im Intervall  $0 < \beta < 1$  liegt. Ist die Ausfallsteilheit  $\beta = 1$ , so entspricht die Weibull-Verteilung der Exponentialverteilung, wobei  $\alpha = \lambda$  die konstante Ausfallrate darstellt.

Liegt die Ausfallsteilheit  $\beta$  im Bereich  $\beta > 1$ , so lassen sich verschleißbedingte Ausfälle darstellen. Am häufigsten wurden in der Praxis  $\beta$  – Werte im Bereich  $0,25 < \beta < 5$  ermittelt.

Als Parameterschätzverfahren bietet sich die Methode der kleinsten Quadrate an. Dabei wird versucht, mit Hilfe der Regressionsanalyse eine Abhängigkeit zwischen den Variablen  $X$  und  $Y$  zu beschreiben. Ein Höchstmaß an Übereinstimmung ist dann erreicht, wenn die Summe der quadratischen Abweichung SSE (sum of squared errors) minimal wird.

Für die Schätzer  $\hat{\alpha}$  und  $\hat{\beta}$  der Weibull-Verteilung ergibt sich:

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

und

$$\hat{\alpha} = e^{-\bar{y} - \hat{\beta} \bar{x}}.$$

Neben diesem Schätzverfahren ergeben auch evolutionäre Parameterschätzverfahren, wie sie Anwendung im automatisierten Prognosetool finden, gute Schätzwerte [Hau 08].

Die Beantwortung sicherheits- und zuverlässigkeitstechnischer Fragen richtet sich meist auf zeitliche Abschnitte aus. D.h. es wird gefragt, wie viele Komponenten bis zum Jahr  $X$  ausfallen werden. Da die zuvor ermittelte theoretische Funktion einen

km-abhängigen Bezug hat, muss eine Umrechnung auf zeitabhängige Zuverlässigkeitskenngrößen durchgeführt werden. Dazu wird die Dichtefunktion der km-abhängigen Ausfallverteilung mit der Verteilungsfunktion der Fahrleistung in eine zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeit umgerechnet. Das hierbei entstehende Integral muss numerisch gelöst werden. Die zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeit  $F(t)$  ist dann über

$$F(t) = \int_0^{\infty} f_k(s) \cdot \left( 1 - L_G \left( \frac{s \cdot t_G}{t} \right) \right) ds$$

gegeben.

Dabei ist  $f_k(s)$  die Dichtefunktion der korrigierten km-abhängigen Ausfallwahrscheinlichkeit.

Die Parameter der theoretischen Verteilungsfunktion werden mit Hilfe der bereits vorgestellten Parameterschätzverfahren ermittelt und geben jetzt Auskunft über das Ausfallverhalten der untersuchten Komponente.

Weitere Zuverlässigkeitskenngrößen können durch einfache Umrechnung ineinander überführt werden und bilden die Grundlage für alle weiteren Anwendungsmöglichkeiten. Als besonders wichtige Zuverlässigkeitskenngröße sei die Ausfallrate zu nennen, da sie als bedingte Wahrscheinlichkeit das Ausfallverhalten eines technischen Systems oder Bauteils gut beschreibt. Besonders unter Anwendung der Weibull-Verteilung sowie der Interpretation der Ausfallsteilheit  $\beta$  können so die Bereiche Frühausfälle, stochastisch auftretende Ausfälle und Verschleißausfälle unterschieden werden.

### **Zuverlässigkeitsprognosemodell für dominierende Ausfallbilder**

Das Standardprognosemodell setzt voraus, dass kein dominierendes Ausfallbild in der betrachteten Grundgesamtheit vorliegt. Die Datenstruktur kann daher als homogen betrachtet werden. Dies ist in der Realität nicht bei allen Komponenten und Baugruppen der Fall. So treten immer wieder „epidemische“ Fehler auf, die meist auf Fertigungsfehlern oder fehlerhaft eingekauften Bauteilen basieren. Diese „epidemischen“ Fehler können das Ausfallverhalten der gesamten Grundgesamtheit dominieren, was zu einem grenzwertigen Verlauf der kumulierten relativen

Summenhäufigkeit führt. Selbst mit der bereits angesprochenen Anwärterprognose können die relativen Summenhäufigkeiten nicht derart korrigiert werden, dass eine empirische Ausfallwahrscheinlichkeit entsteht, welche durch eine theoretische Ausfallverteilung angepasst werden kann. Dies lässt durch die Eigenschaft erklären, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit bekanntlich für eine beliebig große Zeit  $t$  gegen 1 strebt. Der grenzwertige Verlauf der durch epidemische Fehler beeinflussten empirischen Ausfallwahrscheinlichkeit kann daher nicht optimal angepasst werden.

Als Lösung kann der in [MMe 03] vorgestellte Ansatz des „Teilpopulationsmodells“ dienen, welcher die zweiparametrische Weibull-Verteilung durch einen weiteren Parameter  $w$  erweitert. Durch diesen Parameter wird der Verlauf der theoretischen Ausfallwahrscheinlichkeit eingegrenzt und somit eine bessere Anpassung an grenzwertige Verläufe der empirischen Ausfallwahrscheinlichkeit erreicht.

Dabei wird davon ausgegangen, dass nur ein Teil  $w$  der Gesamtpopulation einen bestimmten Fehler hat und während des Beobachtungszeitraums ausfallen kann. Die anderen Geräte  $(1-w)$  können nicht ausfallen und werden nicht weiter betrachtet. Da die Anwendung eines Teilpopulationsmodells durch die Nichtbeachtung der restlichen Fehler erhebliche Fehlerquellen bietet, muss der Ansatz vorher genau überdacht werden. Teilpopulationen können durch Entwicklungs- und Softwarefehler entstehen, wenn z.B. fehlerhafte oder falsche Komponenten in den Steuergeräten verbaut bzw. ungeeignete Softwareversionen aufgespielt werden.

Im Folgenden werden in Tabelle 4-1 die Zuverlässigkeitskenngrößen des Teilpopulationsmodells vorgestellt. Der Index  $T$  gibt dabei die von der Teilpopulation betroffenen Größen an.

Tabelle 4-1: Gleichungen für das Teilpopulationsmodell

Kenngröße	Gleichung
Überlebenswahrscheinlichkeit	$R(s) = (1 - w) + w \cdot R_T(s)$
Ausfallwahrscheinlichkeit	$F(s) = w \cdot F_T(s)$
Ausfalldichte	$f(s) = w \cdot f_T(s)$
Ausfallrate	$h(s) = \frac{w \cdot f_T(s)}{(1 - w) + w \cdot R_T(s)}$

Der zusätzliche Parameter  $w$ , wird durch Ablesen des höchsten Wertes der relativen Summenhäufigkeit bestimmt. Der Ablauf zur Bestimmung der km-abhängigen Zuverlässigkeitskenngrößen erfolgt analog zum Standardprognosemodell, jedoch müssen jetzt drei Parameter geschätzt werden:

- Parameter  $\alpha$  der Weibull-Verteilung,
- Parameter  $\beta$  der Weibull-Verteilung und
- Parameter  $w$  für die Teilpopulation.

In den nachfolgend durchgeführten Zuverlässigkeitsprognosen der automobilen Telekommunikation kommt das Teilpopulationsmodell zur Anwendung, wenn Teilpopulationen aufgrund von fehlerhaften Zulieferteilen auftreten.

## 4.2 Zuverlässigkeitsprognosen für Softwarefehler

Neben der Anwendung des Zuverlässigkeitsprognosemodells bei der Untersuchung von mechanischen, mechatronischen und elektronischen Systemen und Komponenten wurde erstmals eine Untersuchung von softwarebedingten Ausfällen durchgeführt. Ein Grund dafür war, dass eine nicht unerhebliche Anzahl von Telematikeinheiten (bis zu 90% der Rückläufer) in den Werkstätten der OEM ausgebaut und an den Zulieferer zurückgesendet wurden, ohne dass ein negativer

Befund bei der anschließenden Begutachtung im Analyselabor vorlag. Da eine Nullfehlerquote von bis zu 90% bei beanstandeten Teilen als unwahrscheinlich angenommen werden konnte, mussten Maßnahmen getroffen werden, um die hohe Quote zu reduzieren bzw. sie zu begründen [Bra 05b].

Durch die genaue Analyse der zugesendeten Telematikeinheiten mittels visueller Begutachtung, automatisierter Bestromungs- und Funktionstests konnten mechanische oder elektronische Fehlerquellen eindeutig identifiziert werden. Einziger Schwachpunkt der bis dahin genutzten Datenbank war das Fehlen von Informationen über softwarebedingte Ausfälle. Es wurde daraufhin beschlossen, Telematikeinheiten der neuen Generation mit einem besonderen Datenlogger auszustatten, der bis zu 500 Attribute, bezogen auf den Status der Telematikeinheit, liefert. Unter anderem kann die Temperatur, Bestromung, aber auch der Zustand der Software, ungeplantes Rebooten und andere softwarerelevante Zustände erfasst werden. Dadurch ist es möglich, Fehler zu detektieren, die durch Einflüsse entstehen, in welchen die Software auf ungünstige Randbedingungen trifft und ggf. daraufhin fehlerhaft arbeitet. Die Daten werden im Steuergerät abgelegt und können im Analyselabor des Zulieferers ausgelesen werden.

Das erste Telematiksystem, welches mit diesem neuen Datenlogger ausgestattet wurde, war ein System mit Bluetooth-Applikation für das angeschlossene Mobiltelefon und wurde in großen Stückzahlen als sogenanntes „Cross car line product“ (Produkt für die ganze Produktpalette des OEM) für einen namhaften OEM gefertigt. Neuartig an dieser Telematikeinheit war die Bluetooth-Kommunikation, welche auch die Nutzung von Mobiltelefonen fremder Hersteller erlaubte. Dieser Kommunikationsweg via Bluetooth stellte sich als eine erhebliche Fehlerquelle heraus, die eindeutig als softwarebezogen gewertet werden konnte [Bra 07a].

Durch eine Verknüpfung der bisherigen Garantiedatenbank mit der Softwarefehlerdatenbank ist es seitdem möglich, eine große Anzahl von ehemals Nullfehlergeräten als mit Softwarefehlern belastet zu ermitteln. Dabei ist eine Zusammenführung der beiden Datenbanken aufgrund gleicher Seriennummern unproblematisch. Die folgende Abbildung 4-2 zeigt den Aufbau der erweiterten Garantiedatenbank.

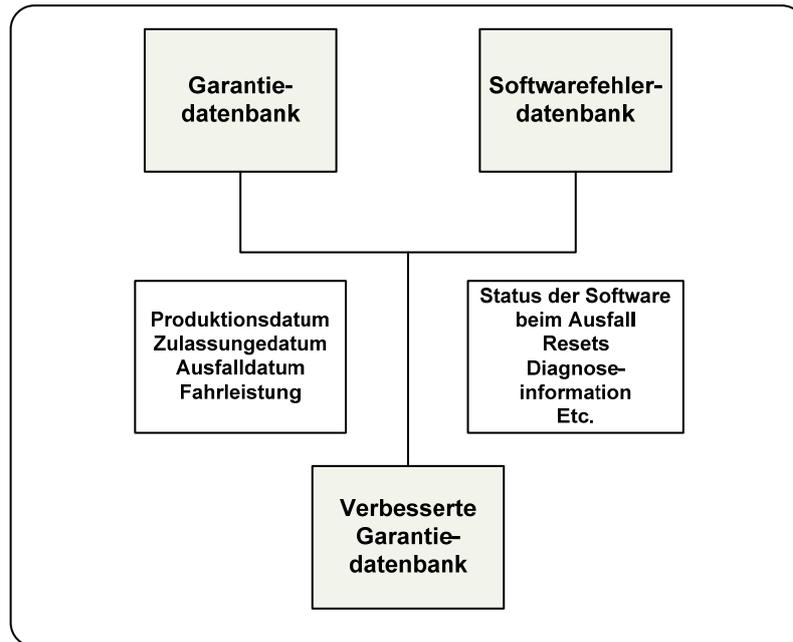


Abbildung 4-2: Erweiterte Garantiedatenbank

Im ersten Projekt nach Einführung der erweiterten Datenbank wurde der schon erwähnte Bluetooth-Fehler analysiert. Dazu wurde nach dem in Abschnitt 4.1 vorgestellten Prognosemodell vorgegangen.

Aufgrund des Umstandes, dass bei einem Nutzerwechsel sowohl Viel- als auch Gelegenheitsfahrer den Wagen fahren und es sich bei den Geräten um „Cross car line“ Produkte handelte, konnte die Fahrleistung über die Jahre als konstant angenommen werden.

Die empirischen Daten wurden daraufhin durch eine theoretische Verteilungsfunktion, in diesem Fall eine Weibull-Verteilung, angepasst und die zugehörigen Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  der Weibull-Verteilung mittels Methode der kleinsten Quadrate geschätzt. Aufgrund der nachfolgend beschriebenen Besonderheit der hohen Fahrleistung, war eine Anpassung mit Hilfe der Lognormal-Verteilung nicht mit zufriedenstellenden Ergebnissen möglich. Wie in Abbildung 4-3 bei der zweijährigen Fahrleistung  $L_G(s)$  zu sehen ist, führen 50% der Fahrer mehr als 50 Tkm in zwei Jahren. Diese hohe Fahrleistung ist damit zu begründen, dass es sich bei den untersuchten Fahrzeugen hauptsächlich um Dieselfahrzeuge in der Mittel- und oberen Mittelklasse handelte, welche als Flottenfahrzeuge in Firmen eingesetzt wurden. Bei einer mittleren Anzahl von 200 Arbeitstagen pro Jahr und einer

mittleren jährlichen Fahrleistung von ca. 25 Tkm entspräche dies einer täglichen Fahrleistung von 125 km. Selbst eine jährliche Fahrleistung von 75 Tkm, was einer täglichen Fahrleistung von 375 km entspräche, ist für viele Fahrzeugführer im Außendienst keine Seltenheit.

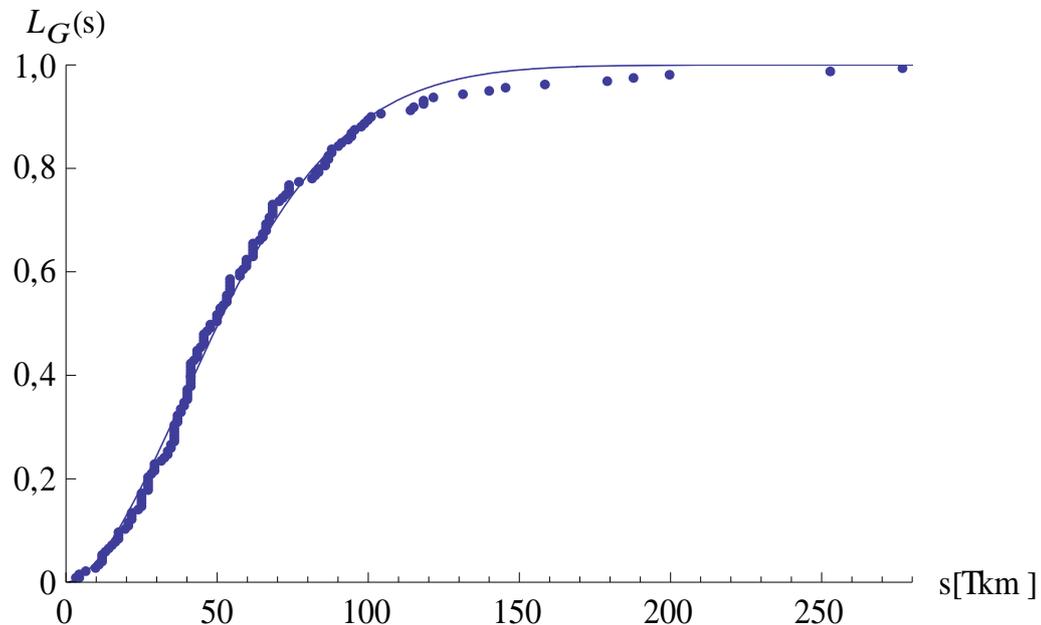


Abbildung 4-3: Fahrleistungsverteilung für Bluetooth Fehler

In einem zweiten Schritt erfolgte die Aufteilung der Ausfälle in km-Klassen der Klassenbreite 5 [Tkm]. Die grafische Auswertung (siehe Abbildung 4-4) wurde als Balkendiagramm dargestellt und lässt bei erster Betrachtung bereits ein systematisches Ausfallverhalten erkennen. Auffällig ist, dass nahezu alle aufgetretenen Ausfälle im Bereich bis 50 Tkm liegen. Bei einer mittleren jährlichen Fahrleistung von 25 Tkm, wie sie bereits ermittelt wurde, lässt sich ein deutliches Fröhhausfallverhalten vermuten.

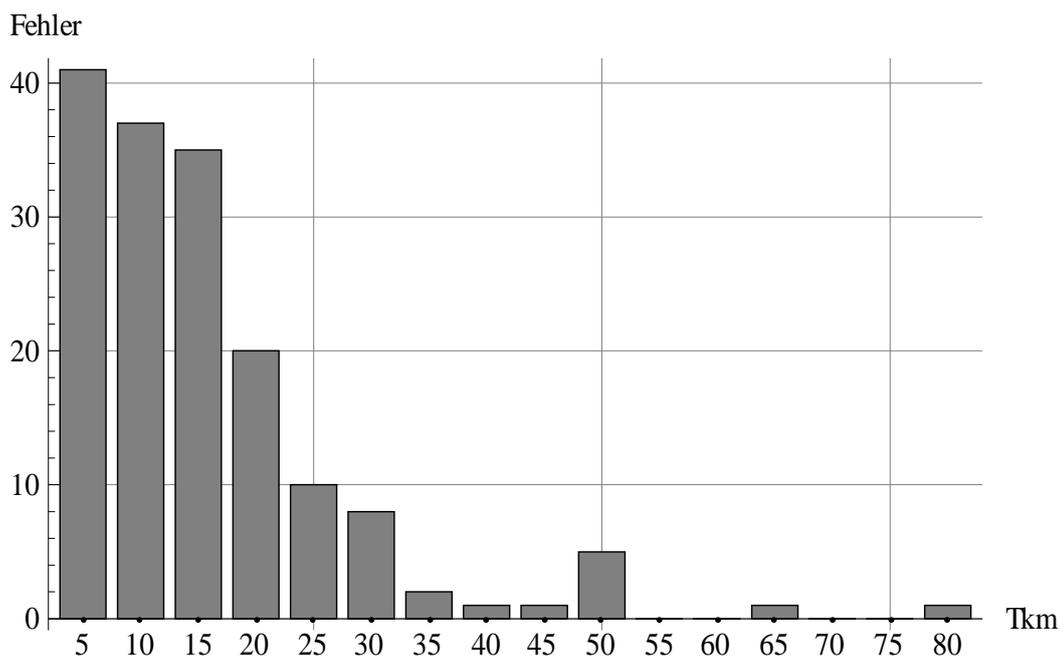
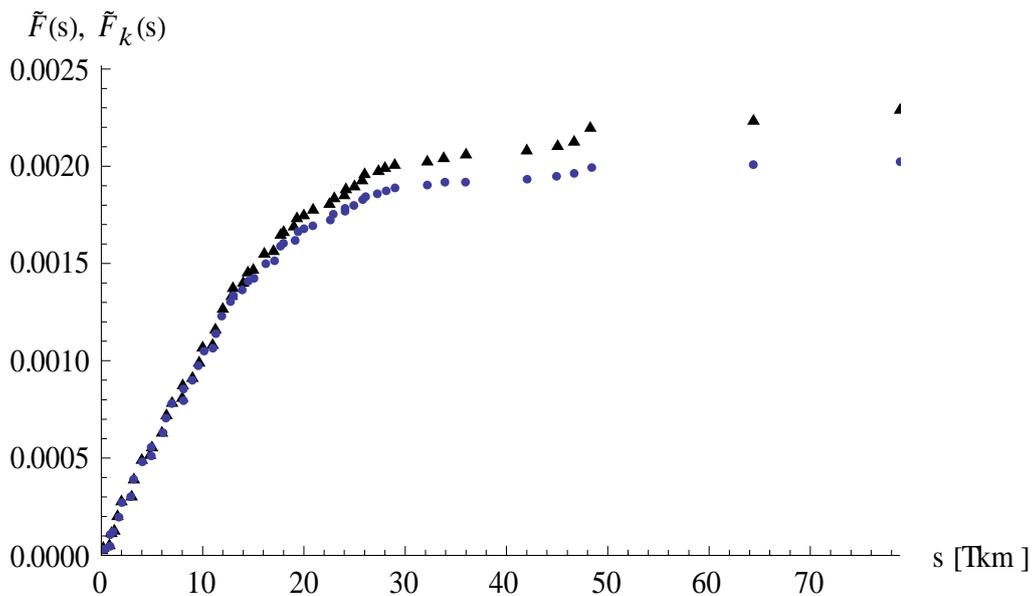


Abbildung 4-4: Balkendiagramm Ausfälle je 5 Tkm

Danach wurden die relativen und korrigierten relativen Summenhäufigkeiten bestimmt. Dabei wurden die Anwörter nach der Pauli-Methode ermittelt. Die so korrigierten Ausfälle bei Wegstrecke  $s$  wurden als kumulierte relative Summenhäufigkeit gelistet und als empirische Funktion abgebildet.

Wie in Abbildung 4-5 zu sehen ist, hatte die Anwörterkorrektur aufgrund der relativ geringen Fehleranzahl bei hoher Fahrleistung und der allgemein hohen Fahrleistung der Einzelfahrzeuge nur einen geringen Einfluss. Erst ab ca. 20 Tkm zeigte sich eine signifikante Abweichung zwischen der relativen und der korrigierten relativen Summenhäufigkeit.



**Abbildung 4-5: Relative (Punkte) und korrigierte relative (Dreiecke) Summenhäufigkeit (empirisch)**

Wie in der Abbildung 4-5 zu sehen ist, steigt die relative Summenhäufigkeit bis zum Erreichen der 30 Tkm Marke stark an. Danach geht die empirische Ausfallwahrscheinlichkeit in einen grenzwertigen Verlauf über. Dieser grenzwertige Verlauf konnte nur mittels Teilpopulationsmodell angepasst werden.

Als Begründung für die Anwendung des Teilpopulationsmodells wurde das Fehlerbild Bluetooth Fehler genannt. Es konnte eine gute Anpassung der km-abhängigen empirischen Ausfallwahrscheinlichkeit, wie in Abbildung 4-6 zu sehen ist, erzielt werden.

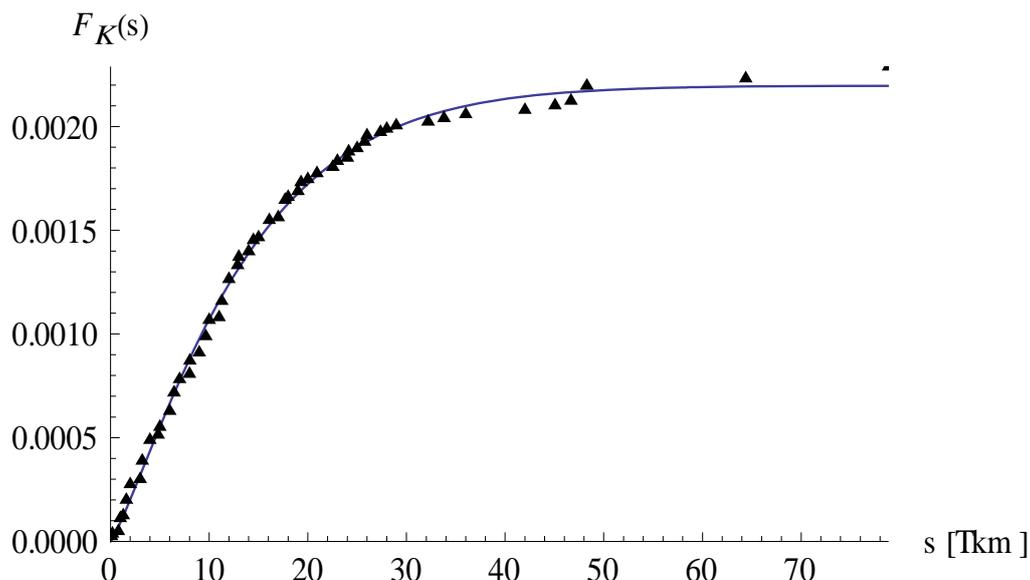


Abbildung 4-6: Empirische und theoretische Ausfallwahrscheinlichkeit

Wichtig bei der Verwendung eines Teilpopulationsmodells ist dabei jedoch, dass die Interpretation der Weibull-Verteilung mit den Parametern  $\alpha$  und  $\beta$  nicht mehr nach den genannten Kriterien durchgeführt werden kann. Dies begründet sich durch die Verwendung des zusätzlichen Parameters, der die Verteilungsfunktion in ihrem Verlauf maßgeblich beeinflusst. In der Praxis sind daher bei durch Frühausfall behafteten Komponenten höhere  $\beta$ -Werte zu beobachten als eigentlich erwartet werden könnte.

Wie in Abbildung 4-6 bereits optisch zu erkennen ist, gibt die theoretische Funktion die Approximation der empirischen Ausfalldaten gut wieder. Bestätigt wird dies durch den in Abbildung 4-7 dargestellten Q-Q-Plot, welcher die Abweichungen der empirischen Werte von der optimalen Ausgleichsgerade mit der Steigung 1 aufzeigt. Da die Streuung der empirischen Punkte um die Ausgleichsgerade sehr gering ausfällt, ist die gute Anpassung bewiesen.

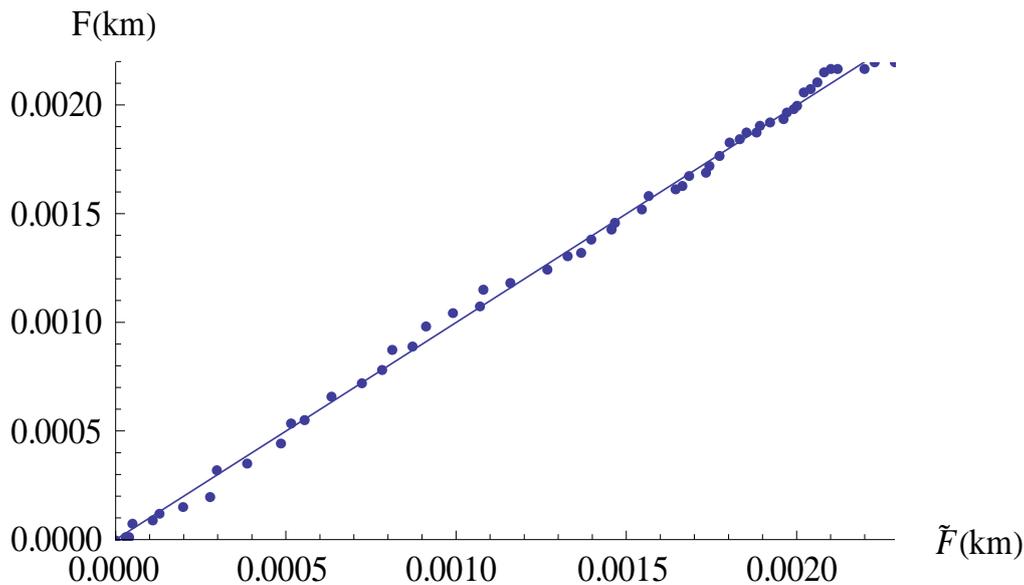


Abbildung 4-7: Q-Q-Plot

Neben der grafischen Bewertung mittels Q-Q-Plot bestätigt ein Bestimmtheitsmaß von 99,94% die gute Übereinstimmung. Dabei ist das Bestimmtheitsmaß  $B$  bekanntlich über das Verhältnis der quadrierten Korrelationskoeffizienten

$$B_{Y,X} = \frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} = \frac{S_{\tilde{Y}}^2}{S_Y^2}$$

gegeben.

Je näher  $B_{Y,X}$  am Wert 1 liegt, desto höher ist die Güte der Anpassung. Bei  $B_{Y,X} = 1$  liegt vollständige Korrelation vor. Das Merkmal  $Y$  wird also vollständig durch das Merkmal  $X$  beschrieben [Har 98].

Nach der Bestimmung der km-abhängigen Zuverlässigkeitskenngrößen wurde, analog zum Standardprognosemodell, eine Berechnung der zeitabhängigen Zuverlässigkeitskenngrößen vorgenommen. Aufgrund der Verwendung eines Teilpopulationsmodells mussten drei Parameter für die um den Parameter  $w$  erweiterte Weibull-Verteilung geschätzt werden. Abbildung 4-8 zeigt die zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeit für das Fehlerbild „Bluetooth“.

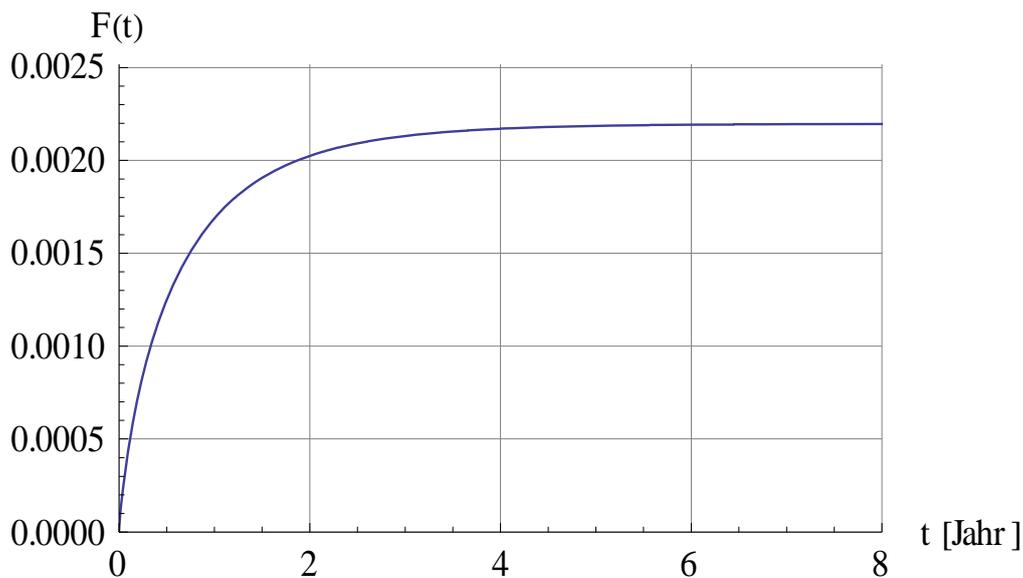


Abbildung 4-8: Zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeit

Durch diese Auswertung wird verdeutlicht, dass der Softwarefehler Bluetooth ein Frühausfallverhalten hervorruft. Dies wurde sowohl durch die grafische, als auch durch die mathematische Auswertung bestätigt. Der bestimmte Wert von  $\beta > 0,8$  für die Ausfallsteilheit  $\beta$  bestätigte das vermutete Frühausfallverhalten.

Des Weiteren musste berücksichtigt werden, dass die Verwendung eines Teilpopulationsmodells die Werte für die Ausfallsteilheit verfälschen. Eine Interpretation gemäß der wohlbekannten „Badewannenkurve“ und den Kriterien  $\beta$  größer oder kleiner 1 ist daher nicht mehr möglich. Besonders der Verlauf der zeitabhängigen Ausfallrate  $h(t)$  zeigte deutlich den Einfluss des Frühausfallverhaltens, wie in Abbildung 4-9 zu sehen ist.

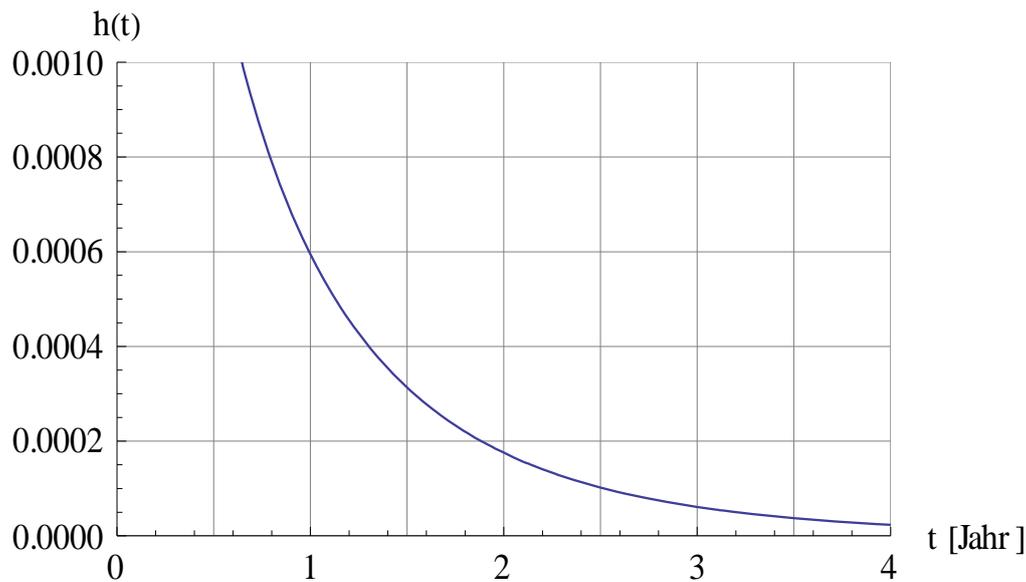


Abbildung 4-9: Zeitabhängige Ausfallrate

Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden neben der Kalkulation von Rücklaufgeräten auch zur Optimierung von Teststrategien verwendet. Aufgrund der vielen Ausfälle bei geringen Fahrleistungen wurde beschlossen, ein größeres Augenmerk auf die Anfangsphase von Testläufen zu legen. Damit wird verdeutlicht, dass Zuverlässigkeitsprognosen auch eine Daseinsberechtigung bei der Test- und Prüfplanung haben, um Testkapazitäten effizienter einzusetzen.

Neben der Einsparung im Bereich des Serienersatzbedarfs und der Endbevorratung können somit auch im wichtigen Feld der Test- und Prüfplanung erhebliche Kosten eingespart werden.

### 4.3 Anwendung von Zuverlässigkeitsprognosemodellen im operativen Geschäft

Seit dem Jahr 2004 wurden vom Autor eine große Anzahl Zuverlässigkeitsprognosen im Bereich der automobilen Telekommunikation durchgeführt. Dabei konnten vier Gerätetypen, welche zum Teil bei Automobilherstellern über die komplette Produktpalette verbaut wurden, untersucht werden. Einen Überblick über die Prognoseergebnisse sowie deren Nutzen für die Unternehmen soll nachfolgend dargestellt werden.

Da es sich z.T. um Geräte handelt, die sich immer noch im Feldeinsatz befinden, werden die Produktnamen durch eine Nummerierung ersetzt.

**Produkt 1** wurde in den Jahren 2000 bis 2004 mit einer Stückzahl von 54.079 Geräten an ein namhaftes amerikanisches Automobilunternehmen verkauft. Es handelt sich hierbei um ein Autotelefon, welches schon zur damaligen Zeit Komfortfunktionen wie Freisprechen oder Sicherheitsfunktionen wie den automatischen Notruf bot (vgl. Abschnitt 3.1.2). Zum Ende der Serienproduktion wurde zuerst eine grobe Abschätzung der Endbevorratungsmenge anhand von Erfahrungswerten während der Serienproduktion erstellt. Diese Abschätzung ergab eine Endbevorratungsmenge von 4.000 Geräten, welche beim Zulieferer zusätzlich produziert und im Anschluss auch gelagert werden sollten.

Zu Beginn der Untersuchung wurden 599 Einträge in der Garantiedatenbank ermittelt, von denen jedoch 120 Einträge aufgrund von fehlenden oder unplausiblen Daten nicht in die Prognose einfließen konnten. Die verbliebenen 479 Feldausfälle wurden mit Hilfe des Zuverlässigkeitsprognosemodells untersucht. Dabei konnten die empirischen Ausfalldaten, welche zu einer kumulierten relativen Summenhäufigkeit gelistet wurden, mittels einer zweiparametrischen Weibull-Verteilung angepasst werden. Für die Parameter der Weibull-Verteilung ergaben sich  $\alpha = 0,0057 a^{-\beta}$  und  $\beta = 0,868$ , wobei [a] für die Einheit Jahr steht. Die daraus resultierenden Zuverlässigkeitskenngrößen wurden verwendet, um die Endbevorratungsmenge zu berechnen [Pau 98]. In einer „worst case“ Abschätzung wurde ein Bedarf, basierend auf der Zuverlässigkeitsprognose, von lediglich 1.400

Geräten ermittelt. Bei durchschnittlich angenommenen Produktionskosten von 251€ je Autotelefon konnten 652.600€ eingespart werden. Unter Berücksichtigung der weiteren Garantiekosten, wie zum Beispiel Lagerhaltung, Transport oder Werkstattaufenthalt, fällt die Kosteneinsparung noch deutlicher aus. Da die Garantiedaten bereits beim Zulieferer durch eine entsprechende Garantiedatenbank erfasst wurden, mussten, außer der Einführung des Prognosemodells, keine weiteren technischen oder organisatorischen Maßnahmen getroffen werden.

Beim **zweiten Produkt** wurde ein Handset-Integration-Produkt (HIP) untersucht, welches in den Jahren 2000 bis 2004 für einen großen deutschen Automobilhersteller produziert wurde (vgl. Abschnitt 3.1.2). In den fünf Jahren Serienbelieferung wurden 614.409 Geräte an den Kunden ausgeliefert und in Fahrzeugen der gehobenen Mittelklasse für den deutschen Markt verbaut. Die Gegebenheit, dass nur der deutsche Markt als Grundgesamtheit der Produktionsmenge herangezogen wurde, begründet sich durch den Testmarkt Deutschland, aus welchem der Zulieferer seine Fehlergeräte zurückgeschickt erhielt.

Da eine Gesamtanalyse aller defekten Geräte weltweit mit hohen Kosten verbunden wäre, verfahren die meisten OEM und Zulieferer nach dieser Vorgehensweise.

Nachdem der OEM im hier vorgestellten Projekt zuerst eine Nachlieferfrist von 10 Jahren durchsetzen wollte, konnten sich OEM und Zulieferer nach Verhandlungen auf 4 Jahre Bevorratungszeitraum einigen. Wie im nachfolgenden Abschnitt 4.4 erwähnt, ist es für Komfortelektronik, welche an ein spezielles Mobiltelefon gebunden ist, nicht üblich, dass der Kunde nach 10 Jahren noch auf eigene Kosten die mobile Kommunikationseinheit tauschen lässt, wenn das zugehörige Mobiltelefon eventuell gar nicht mehr funktionstüchtig ist.

Nach Abklärung des Endbevorratungszeitraums wurde das Zuverlässigkeitsprognosemodell angewandt, um die aufgetretenen Garantiedaten auszuwerten. Dabei wurden die Garantiedaten in unterschiedliche Entwicklungsstände (Software- und Hardwarestände) des HIPs unterteilt, um die verschiedenen Entwicklungsstände nicht zu vermischen. Da der neueste Entwicklungsstand abwärtskompatibel zu allen vorangegangenen war, wurden nur Geräte des letzten Entwicklungsstands

bevorratet. Mit einer Grundgesamtheit von 79.550 Geräten und 104 aufgetretenen Garantiefällen wurde die Zuverlässigkeitsprognose für den letzten Entwicklungsstand durchgeführt. Die empirischen Daten der kumulierten relativen Summenhäufigkeit konnten mittels zweiparametrischer Weibull-Verteilung nahezu optimal angepasst werden. Dabei ergab sich ein sehr deutliches Frühausfallverhalten mit den Weibull-Parametern  $\alpha = 0,0032a^{-\beta}$  und  $\beta = 0,480$ . Für die Güte der Anpassung wurde ein Bestimmtheitsmaß von 99,30% ermittelt.

Mit einer „worst-case“ Berechnung der Endbevorratungsmenge für alle Entwicklungsstände wurde ein Bedarf von ca. 20.000 Ersatzgeräten berechnet, welcher als Grundlage für die tatsächliche Bevorratung herangezogen wurde. Da ursprünglich 30.000 Geräte als Endbevorratung vorgesehen waren, konnten durch diese konservative Schätzung ca. 369.000€ Produktionskosten eingespart werden. Wie schon bei Produkt 1 erwähnt, waren die gesamten Kosteneinsparungen bezüglich der Garantiekosten deutlich höher.

**Produkt 3** wurde als Nachfolgeneration für Produkt 2 im dritten Quartal 2001 eingeführt und bis Ende 2005 in Serie gefertigt. Dabei wurden über die Jahre neun Entwicklungsstände erarbeitet, wobei die neueste Generation abwärtskompatibel zu den Vorgängergenerationen ist. Kunde war, wie schon erwähnt, ein großer deutscher OEM, der dieses Produkt in einem Fahrzeug der Oberklasse verbaute. Wie bei Produkt 2 erläutert, wurden vom OEM nur aus dem deutschen Testmarkt fehlerhafte Geräte zurückgeschickt. Damit ergaben sich auf dem deutschen Markt als Grundgesamtheit 473.000 produzierte Geräte in der Serienzeit mit 3.505 aufgetretenen Fehlern.

In einem ersten Versuch wurde eine zweiparametrische Weibull-Verteilung an die empirischen Ausfalldaten angepasst. Da die zugehörige empirische Ausfallwahrscheinlichkeit jedoch einen grenzwertigen Verlauf aufwies, konnten die empirischen Daten nur unzureichend angepasst werden. Aus diesem Grund wurde das in Abschnitt 4.1 vorgestellte Teilpopulationsmodell verwendet, da ein epidemischer Fehler in den Garantiedaten gefunden wurde. Nach Anwendung der um den Parameter „w“ erweiterten Weibull-Verteilung, konnten die empirischen Ausfallda-

ten zufriedenstellend angepasst werden. Es ergaben sich folgende Parameter der theoretischen Verteilungsfunktion:  $\alpha = 0,9611a^{-\beta}$ ,  $\beta = 0,768$  und  $w = 0,115$ .

Für die Endbevorratungsmenge ergab sich bei konservativer Schätzung ein Bedarf von 6.689 Ersatzgeräten. Da noch Bauteile für 10.000 Geräte beim Zulieferer auf Lager waren, wurde beschlossen, 10.000 Ersatzgeräte zu bauen. Bezogen auf die ursprünglich 30.000 Geräte, die bevorratet werden sollten, konnten Produktionskosten von 1.049.000€ eingespart werden.

Das letzte, in diesem Abschnitt vorgestellte Produkt, wurde in den Jahren 2002 bis 2005 für einen weiteren großen deutschen Automobilhersteller produziert. Hierbei handelte es sich um ein Handset-Integration-Produkt, welches „cross-car“, also für mehrere Modelltypen, hergestellt wurde. Insgesamt wurden 24.171 Geräte an den Fahrzeughersteller geliefert, welche für Fahrzeuge aus dem deutschen Testmarkt bestimmt waren. Von den sechs verbauten Entwicklungsständen war der neueste abwärtskompatibel zu den vorherigen, sodass eine zuverlässigkeitstechnische Betrachtung für den letzten Entwicklungsstand durchgeführt wurde. Bei einer Grundgesamtheit von 9.391 Geräten der letzten Generation wurden 43 Feldausfälle registriert und in die Zuverlässigkeitsprognose aufgenommen. Die Anpassung der empirischen Ausfalldaten wurde mittels einer zweiparametrischen Weibull-Verteilung durchgeführt. Für den Lageparameter sowie die Ausfallsteilheit ergaben sich  $\alpha = 0,00048a^{-\beta}$  und  $\beta = 0,7313$ . Die theoretische Ausfallwahrscheinlichkeit wurde durch ein Bestimmtheitsmaß von 99,58% sehr gut approximiert.

Die ursprünglich angedachte Endbevorratungsmenge von ca. 3.000 Geräten konnte aufgrund der Zuverlässigkeitsprognose deutlich unterschritten werden. Da noch 1.740 Geräte beim Zulieferer und einem Produktionsdienstleister vorhanden waren, mussten keine weiteren Geräte bevorratet werden. Nach Betrachtung der reinen Produktionskosten, konnten selbst bei diesem kleinen Projekt noch 101.000€ eingespart werden.

In Tabelle 4-2 sind abschließend die für die Endbevorratung relevanten Daten der Einzelprojekte aufgeführt.

**Tabelle 4-2: Projektübersicht Zuverlässigkeitsprognose automotive**

	Liefermenge	Endbevorratung aus Erfahrung	Endbevorratung mit Prognose	Kosteneinsparung in €
Produkt 1	54.079	4.000	1.400	652.600
Produkt 2	614.409	30.000	20.000	369.000
Produkt 3	473.000	30.000	10.000	1.049.000
Produkt 4	24.171	2.891	0	101.000

Die kurz vorgestellten Projekte haben gezeigt, dass allein durch die konsequente Auswertung von erfassten Ausfalldaten und die Nutzung des Zuverlässigkeitsprognosemodells, Produktionskosten in Millionenhöhe eingespart werden können. Die Kosteneinsparung in den vier Projekten beträgt mehr als 2.000.000€. Wird davon ausgegangen, dass die gesamten Garantiekosten um den Faktor fünf höher sein können als die Produktionskosten, kann eine Gesamteinsparung von nahezu 10.000.000€ für die hier vorgestellten vier Projekte angenommen werden. Dabei muss beachtet werden, dass es sich bei allen durchgeführten Prognosen um sehr konservative Abschätzungen handelt. Die Erfahrung mit den Abverkaufszahlen der letzten Jahre hat gezeigt, dass die tatsächliche Anzahl an Ersatzgeräten zum Teil deutlich unter den prognostizierten Endbevorratungsmengen liegt. Da das Risiko einer kostenintensiven Nachproduktion ausgeschlossen sein sollte, ist die konservative Bevorratungsschätzung jedoch zu bevorzugen.

#### **4.4 Zuverlässigkeitsprognosemodell unter Berücksichtigung des Kundenverhaltens bei Komfortelektronik**

Eine besondere Erweiterung des Standardprognosemodells ist erforderlich, wenn neben dem technischen Ausfallverhalten, auch das Kundenverhalten bei der Prognose von Ersatzgeräten berücksichtigt werden muss. Dieser Sachverhalt lässt sich durch das folgende Beispiel verdeutlichen:

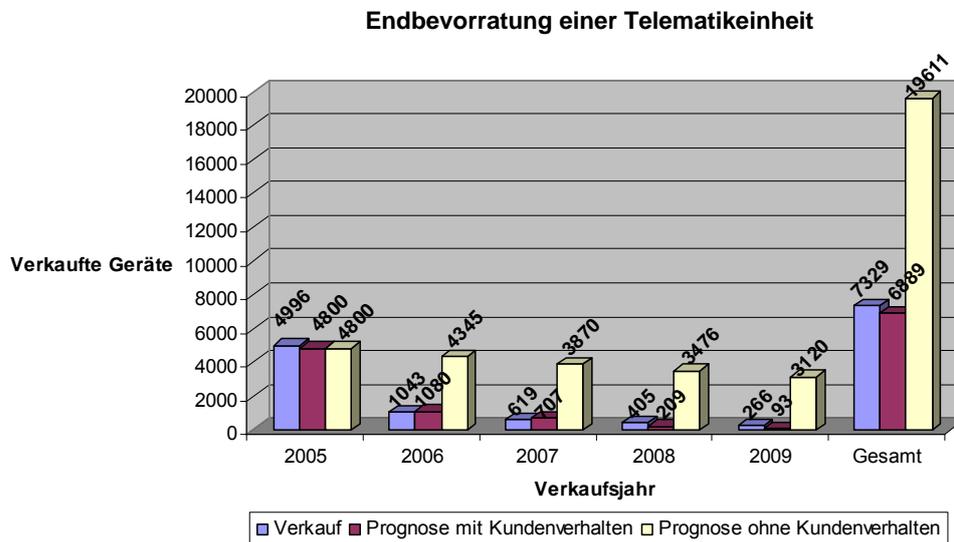
Eine Kunde fährt einen 10 Jahre alten Wagen, der neben den üblichen elektronischen Steuergeräten auch mit einer Telematikeinheit ausgestattet ist. Das Motorsteuergerät versagt und der Wagen lässt sich nicht mehr starten. Möchte der Kunde den Wagen weiter nutzen, ist er gezwungen, das Motorsteuergerät in einer Werkstatt tauschen zu lassen.

Versagt hingegen seine Telematikeinheit, so hat dieser Ausfall nur eine Auswirkung auf den Bedienkomfort beim Fahren. Weiterhin ist es fraglich, ob der Kunde bei einer 10 Jahre alten Telematikeinheit noch ein passendes Mobilfunktelefon besitzt, um diese überhaupt nutzen zu können. Es ist daher anzunehmen, dass nur wenige Kunden bei einem Ausfall des Systems zu einer Werkstatt fahren, um die Telematikeinheit dort tauschen zu lassen.

Bei mehreren Untersuchungen im Bereich der Komfortelektronik zeigte sich, dass das reale Ausfallverhalten mit dem prognostizierten Ausfallverhalten innerhalb der ersten Jahre, besonders während der Garantiezeit, sehr gute Übereinstimmungen bietet. Je länger die Garantiezeit zurück liegt, desto größer werden die Abweichungen zwischen prognostiziertem und realem Ausfallverhalten von Komfortelektronik. Grund hierfür ist der oben erwähnte Sachverhalt des Kundentauschverhaltens.

Wird das Kundentauschverhalten nicht bei der Prognose von Ersatzgeräten berücksichtigt, kann es zu großen Überschätzungen kommen, welche erhebliche Kosten nach sich ziehen. Wie in Abbildung 4-10 zu sehen ist, hat das Kundenverhalten, bezogen auf den Austausch fehlerhafter Telematikeinheiten nach der Garantiezeit im Bereich der Komfortelektronik, einen erheblichen Einfluss auf die Kalkulation der Endbevorratungsmenge. Wird ein konservativer Wert von ca. 250€ Produktions- und Lagerkosten einer Telematikeinheit angesetzt, können durch die

genaue Prognose des Ersatzteilbedarfs in 3 Jahren ca. 650.000€ eingespart werden [Bra 07b].



**Abbildung 4-10: Endbevorratungsmenge in Abhängigkeit des Kundenausfallverhaltens bei Komfortelektronik**

Die großen Abweichungen von ca. 48% im Verkaufsjahr 2008 und 69% im Jahr 2009 lassen sich durch die Anforderungen eines zentralen Ersatzteilzentrums des OEM erklären. Mit einer Prognosegenauigkeit von über 90% bei einem Prognosehorizont von fünf Jahren stellt die durchgeführte Analyse einen herausragenden Wert im Bereich der Ersatzteilbevorratung dar.

Obwohl die Umsetzung der Erweiterung des Zuverlässigkeitsprognosemodells problemlos möglich ist, bleibt zu erwähnen, dass solche Einschränkungen des Endbevorratungsbedarfs mit großer Vorsicht angewendet werden sollten. Unter anderem ist die Berechnung des Faktors auf einige Produkte beschränkt und kann nicht auf andere Produkte, welche z.B. ein abweichendes Kundenklientel bedienen, übertragen werden. Selbst ein baugleiches Produkt, welches unter verschiedenen Namen an unterschiedliche OEM verkauft wird und jeweils ein ähnliches Ausfallverhalten aufweist, kann aufgrund der differierenden Nutzung und des Einflusses der Kundenklientel eine abweichende Wirkung des Kundentauschverhaltens aufweisen.

Um Funktionen des Kundentauschverhaltens für unterschiedliche Baugruppen, Komponenten und Systeme von verschiedenen Herstellern aufzustellen, wären umfangreiche Auswertungen von Zuverlässigkeitsprognosen und tatsächlichen Abverkaufszahlen notwendig, welche in kurzen Zeitabständen durchgeführt werden müssten. Weiterhin müsste für jeden Einzelfall geprüft werden, ob das zu bevorratende Produkt in seinen Spezifikationen denen des bereits untersuchten Produkts entspricht. Weichen diese Spezifikationen ab, so ist die Verwendung einer Funktion für das Kundentauschverhalten sehr risikoreich.

## 5 Zuverlässigkeitsprognosen im Bereich Mobiltelefone

Das in Kapitel 4 vorgestellte Zuverlässigkeitsprognosemodell, welches ursprünglich für die Automobilindustrie entwickelt wurde, dient auch als Grundlage für die Anwendung von Zuverlässigkeitsprognosen im Mobilfunkbereich. Jedoch ergeben sich einige Herausforderungen, die neue Ansätze im Vergleich zur Automobilindustrie erforderlich machen.

Bei Mobilfunkgeräten ist nicht bekannt, welche Parameter für die Belastung im Feld ausschlaggebend sind. In der Automobilindustrie hat sich aufgrund jahrelanger Forschung herausgestellt, dass sich die Belastung im Feld durch die Fahrleistung darstellen lässt (vgl. Abschnitt 4.1). Die reine Kalenderzeit ist aufgrund des Umstandes, dass Komponenten nur genutzt werden, wenn das Fahrzeug fährt, keine geeignete Bezugsgröße für die Belastung.

Forschungen bezüglich der Belastung von Mobilfunkgeräten standen zum Zeitpunkt der Durchführung des Projekts nicht zur Verfügung. Folglich müssen Annahmen getroffen werden, welche Bezugsgrößen für die Belastung eines Mobilfunkgerätes ausschlaggebend sind.

Denkbar wären folgende, messbare Größen:

- Zeit des Telefonierens,
- Ladezyklen,
- Zeit der Verbindung zu einer Sendestation.

Trotz intensiver Bemühungen ist es jedoch nicht möglich, die oben genannten Größen bei einem Mobiltelefon zu erfassen, da der finanzielle Aufwand für die Firmen zu groß wäre. Sowohl bei der Generierung der Daten, als auch bei deren Speicherung und Auswertung würden erhebliche Kosten entstehen, welche nicht im Verhältnis zu den Einsparungen im Bereich des Supply-Chain-Managements stehen. Daher wird als Bezugsgröße die Kalenderzeit herangezogen. Begründen lässt sich dies auch dadurch, dass ein Mobiltelefon im eingeschalteten Zustand dauerndem Kontakt zu einem oder mehreren Sendemasten steht und somit ständig Daten empfängt. Umfragen unter Studenten, Freunden und Arbeitskollegen ergaben, dass die meisten Nutzer ihr Mobilfunkgerät 24h am Tag angeschaltet lassen.

Eine weitere Abweichung zum automobilen Prognosemodell stellt das Fehlen typischer Anwärterverfahren dar. Aufgrund der fehlenden Umrechnung von Kalenderzeit auf gefahrene Strecke können Methoden nach Eckel oder Pauli nicht verwendet werden. Auch andere Verfahren, wie z.B. die Maximum-Likelihood-Methode für zensierte Ausfalldaten, können keinen zufriedenstellenden Ansatz bieten, um zukünftige Ausfälle zu berücksichtigen.

Weiterhin stellt die globale Produktion ein erhebliches Problem bei der zuverlässigkeitstechnischen Bewertung dar, da Mobiltelefone an unterschiedlichen Standorten gebaut werden und daher häufig ein unterschiedliches Ausfallverhalten aufweisen. Es kann also vorkommen, dass die für eine MU bestellten Geräte im Monat März aus Produktionsstätte A und im Monat April aus Produktionsstätte B kommen. Der Ansatz aus der Automobilbranche, alle Produktionsmonate zusammen zu untersuchen und im späteren Verlauf eine Bevorratungsmenge für ein ganzes Jahr zu bestimmen, ist im Bereich der Mobilfunktelefone nicht anwendbar. Eine Einzelprognose für jeden Produktionsmonat kann sowohl die angesprochene Anwärterproblematik, als auch das unterschiedliche Ausfallverhalten der Produktionsmonate berücksichtigen. Die Prognose wird dadurch genauer und kann Qualitätsprobleme in einzelnen Chargen aufdecken.

Ein weiteres Problem stellen die zum Teil kurzen Produktionszeiträume dar. Oftmals werden neue Geräte nur noch über 6 bis 12 Monate gebaut. Die dadurch entstehende Produktvielfalt sowie die Gegebenheit, dass aufgrund der Verzugs-

zeiten erst mit einigen Monaten Verzögerung die ersten Garantiefälle auftreten, stellen für den Ansatz der Zuverlässigkeitsprognose erhebliche Probleme dar. Wenn davon ausgegangen wird, dass ca. 3 Monate vor Beendigung der Serienproduktion bereits der Endbevorratungsbedarf kalkuliert werden muss, ist es offensichtlich, dass gerade bei kurzen Produktionszeiträumen Probleme vorprogrammiert sind. Es kann beispielsweise bei einem sechsmonatigen Produktionszeitraum, einem typischen mittleren Verzug zwischen Produktion und Verkauf an den Endkunden von 60 Tagen und einer mittleren Meldeverzögerung von 10 Tagen dazu kommen, dass zum Zeitpunkt der Berechnung der Endbevorratungsmenge keine oder nur unzureichende Datensätze vorhanden sind.

Als weiteres Problem lässt sich nennen, dass es Market Units gibt, in denen die Servicepartner der Reparaturzentren bei der Eintragung in die Garantiedatenbank häufig Einträge auslassen, obwohl diese für eine Zuverlässigkeitsprognose wichtig sind. Im Besonderen trifft dies auf die Eingabe des Verkaufsdatums an den Endkunden zu. Da es, wie bereits vorhergehend beschrieben, zu Verzugszeiten kommen kann, ist die Betrachtung zwischen Produktionsdatum und Ausfalldatum nicht geeignet, um die Zeit im Feld zu beschreiben. Wird zum Beispiel „vergessen“, das Verkaufsdatum zu erfassen, kann dieser Datensatz für die Prognose nicht mehr verwendet werden. So kann es beispielsweise vorkommen, dass in einer MU ein mittlerer Zulassungsverzug von 50 Tagen vorliegt. Der Verzugszeitraum kann aufgrund von Streuungen zwischen einem und mehreren hundert Tagen liegen. Ist das Zulassungsdatum nicht bekannt und tritt ein Ausfall ein, kann der genaue Zeitraum im Feld des zu untersuchenden Geräts nicht präzise festgelegt werden. Eine Zuverlässigkeitsprognose ist aufgrund der Unsicherheiten nicht mehr möglich.

In den meisten Market Units liegt die Quote der Erfassung des Verkaufsdatums bei über 90%. Es gibt jedoch einige Market Units, in denen nur 5% bis 20% der Feldausfalldaten erfasst und kommuniziert werden. Dadurch geht eine große Menge an auswertbaren Daten verloren, wodurch besonders bei Produkten mit kurzem Produktionszeitraum erhebliche Problemen auftreten.

Die genannten speziellen Probleme im Bereich der Mobilfunkindustrie werden in den folgenden Abschnitten durch das Zuverlässigkeitsprognosemodell berücksichtigt. Dabei beziehen sich alle Ergebnisse und Grafiken auf Berechnungen, welche auf realen Garantiedaten basieren. Zur Anonymisierung werden jedoch die Verkaufsländer sowie die Typenbezeichnungen der Geräte nicht genannt.

Wie auch im automobilen Bereich basiert das Prognosemodell auf Feldfehlerdaten, welche im Regelfall während der Garantiezeit gesammelt werden. In der Verkaufsregion CEEMEA muss dabei beachtet werden, dass je nach Land, andere Garantiebedingungen bestehen. Die gesetzliche Gewährleistungsfrist beträgt bei den meisten Ländern, die für dieses Projekt einbezogen wurden, 24 Monate. Die Garantie, welche der Hersteller freiwillig gewährt, kann von 12 bis 36 Monaten reichen. Es zeigt sich, dass vor der Durchführung einer Analyse erhebliche Vorüberlegungen sowie Maßnahmen im Bereich der Datenaufbereitung erforderlich sind. Im folgenden Abschnitt 5.1 werden die erforderlichen Maßnahmen vorgestellt.

## 5.1 Vorüberlegungen und Datenaufbereitung

Wie bei jedem Projekt in der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik, stellt die Datenaufbereitung einen erheblichen Teil des Gesamtprojekts dar. Besonders aufgrund der vielfältigen Herausforderungen des hier beschriebenen Projekts, ist eine gewissenhafte Vorarbeit unerlässlich.

Im ersten Schritt wird die Zuverlässigkeitsprognose abgegrenzt. D.h. es muss festgelegt werden, welches Ziel die Prognose verfolgt, um die Daten entsprechend bereitzustellen und aufzubereiten. Es wird unterschieden nach:

- Berechnung Endbevorratungsmenge,
- Berechnung Serienersatzbedarf,
- Berechnung Reparaturaufkommen,
- Berechnung Ersatzteilbedarf und
- Abschätzung Garantiekosten.

Ist das Ziel der Prognose festgelegt, muss entschieden werden, auf welcher Ebene die Prognose durchgeführt werden soll. Dabei sind folgende Unterscheidungen möglich:

- Globale Ebene,
- Verkaufsregion (Sales Region),
- Market Unit Ebene,
- Länder Ebene und
- Mobilfunkprovider.

Weiterhin muss bestimmt werden, ob ein einzelner Gerätetyp, eine Geräteplattform oder nach einer noch gröberen Einteilung (High-End-Geräte, Low-End-Geräte) untersucht werden soll.

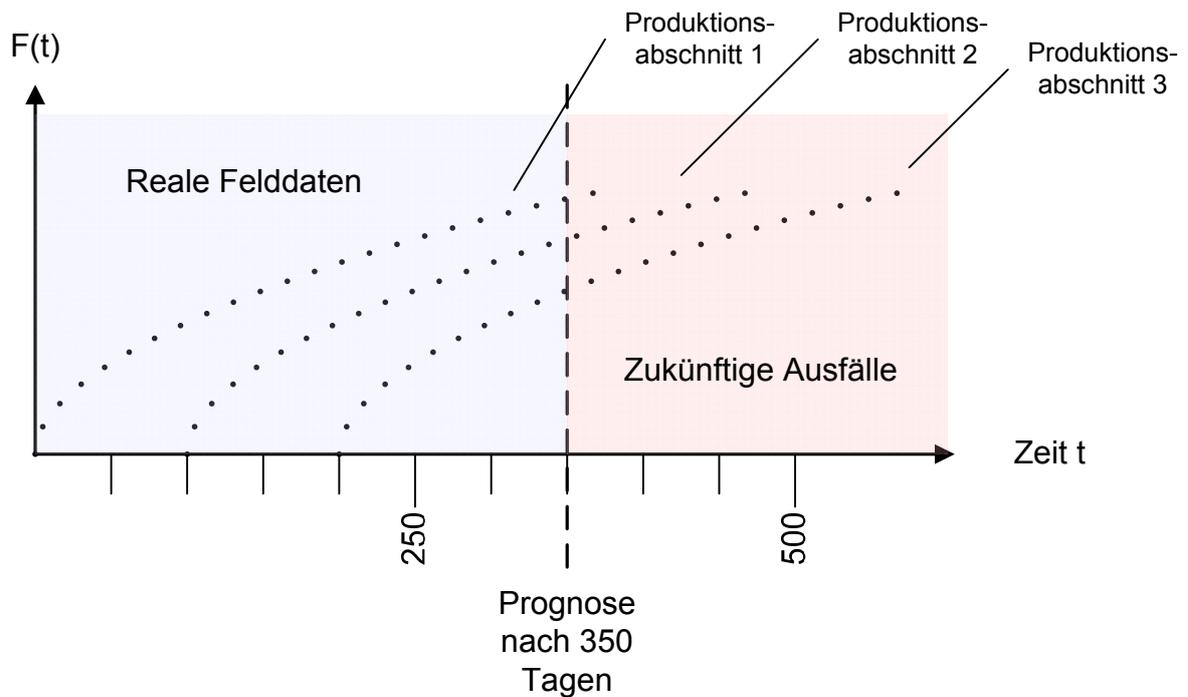
Im zweiten Schritt werden die vorhandenen Daten für die Prognose aufbereitet. Dabei kann zum Beispiel eine Vorabfilterung sinnvoll sein, um Rechenkapazitäten zu schonen und überflüssige Daten aus den Datensätzen zu entfernen. Wie bereits erwähnt, können bei Mobilfunkgeräten, welche über einen langen Zeitraum in großen Stückzahlen produziert werden, mehrere Millionen Einträge in den Garantiedatenbanken vorliegen. Weiterhin kann es erforderlich sein, bestimmte Einträge in den Datenbanken zu formatieren, um sie in der späteren Prognose besser verarbeiten zu können.

## 5.2 Berücksichtigung der Anwarter

Anwarter oder auch Fehleraspiranten sind bekannte Herausforderungen, wenn im Bereich der Sicherheits- und Zuverlässigkeitstechnik mit zensierten Daten gearbeitet wird. Dabei stellt sich das Problem, dass es zukünftige Ausfälle geben wird, die mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit auftreten werden, welche jedoch aufgrund der Zensierung nicht in der Garantiedatenbank auftreten. Da auch im Mobilfunkbereich nur Daten für einen begrenzten Zeitraum vorliegen (z.B. Garantiezeit), besteht eine Rechtszensierung, welche mit geeigneten Methoden berücksichtigt werden muss. Wie bereits am Anfang des Kapitels als spezielle Herausforderung erwähnt, kann eine direkte Umsetzung des bereits bestehenden

Prognosemodells mit Modellierung der Anwärter, aufgrund der fehlenden Umrechnung, in eine andere Belastungsgröße nicht durchgeführt werden.

Anhand der folgenden Abbildung 5-1 wird die Entstehung von Anwärtern mit der Kalenderzeit als Belastungsgröße erklärt.



**Abbildung 5-1: Zeitabhängige Anwärterproblematik**

Im oben abgebildeten Beispiel wird ein Gerät untersucht, welches in 3 Produktionsabschnitten hergestellt wird. Der erste Produktionsabschnitt wird mit Beginn der Serienproduktion abverkauft, der zweite Abschnitt startet 100 Tage später und der dritte Abschnitt wird erst 200 Tage nach Beginn der Serienproduktion auf den Markt gebracht. Alle drei Produktionsabschnitte weisen dasselbe Ausfallverhalten auf. 350 Tage nach Beginn der Serienproduktion wird eine Zuverlässigkeitsprognose durchgeführt, um den Endbevorratungsbedarf zu ermitteln. Werden nun alle drei Produktionsabschnitte gemeinsam betrachtet, ergibt sich das Problem, dass nur aus dem ersten Abschnitt Geräte die Möglichkeit haben, bis zum Untersuchungszeitpunkt von 1 bis 350 Tagen im Feld auszufallen. Geräte aus den anderen Produktionsabschnitten werden nur bis zum Zeitpunkt 250 Tage bzw. 150 Tage erfasst. Auch wenn diese Geräte den Zeitpunkt 350 Tage erreichen, können

sie einen Ausfall produzieren, der jedoch ohne Anwarterkorrektur unberücksichtigt bleibt.

Werden die Produktionsabschnitte bei der Zuverlässigkeitsprognose zusammengefasst und die Anwarter nicht berücksichtigt, so wird das reale Ausfallverhalten, besonders späte Ausfälle, unterschätzt. Dabei steigt der Grad der Unterschätzung mit der Verringerung des Abstands vom Untersuchungszeitpunkt zum Produktionsabschnitt an. Die folgende Abbildung 5-2 zeigt qualitativ die Auswirkung der Zensierung auf die empirischen Daten. Auf eine Bemaßung der Achsen wird bewusst verzichtet, da das Beispiel allgemeingültig ist und in allen durchgeführten Untersuchungen auftrat.

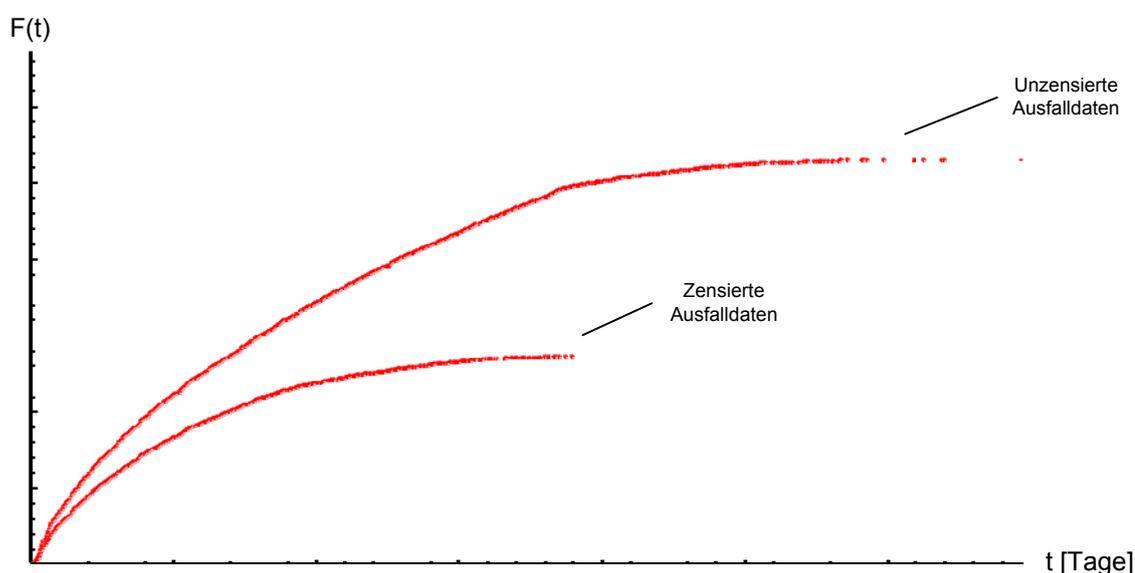


Abbildung 5-2: Einfluss der Anwarterproblematik (qualitativ)

Das in Abbildung 5-2 gezeigte Beispiel gilt für ein Mobilfunkgerät mit zweijähriger Garantiezeit. Werden aus dieser Garantiezeit alle Datensätze analysiert, ergibt sich die obere empirische Funktion, welche 5.306 Einzeldaten enthält. Die an diese empirische Funktion angepasste zweiparametrische Weibull-Verteilung wird durch  $\alpha = 0,000214 [\text{Tage}^{-\beta}]$  und  $\beta = 0,521$  charakterisiert. Die mittlere Zeit im Feld beträgt 162 Tage. Der späteste Ausfall tritt nach 694 Tagen auf.

Für die Untersuchung der Anwarterproblematik werden die Ausfalldaten zensiert, sodass für den Datensatz der unteren empirischen Funktion nur noch Ausfalldaten

bis maximal 380 Tage zur Verfügung stehen. Die Parameter  $\alpha = 0,000184$  [ $Tage^{-\beta}$ ] und  $\beta = 0,474$  der angepassten Weibull-Verteilung zeigen, dass die Ausfallsteilheiten keine erhebliche Abweichung aufweisen. Ausschlaggebend für den unterschiedlichen Verlauf sind die  $\alpha$ -Werte. Auch bei der mittleren Zeit im Feld wird durch einen Wert von 96 Tagen gegenüber 162 Tagen deutlich, wie sehr sich die Zensierung auf die Daten auswirkt.

Um die Anwärterproblematik zu umgehen, muss daher eine Unterteilung der Prognose in einzelne Produktionsmonate vorgenommen werden, um den Einfluss der Anwärter zu minimieren. Dadurch ist sichergestellt, dass alle verfügbaren Ausfälle eines Produktionsmonats unverzerrt analysiert werden und, bis auf Einflüsse der Verzugszeiten, keine Fehleranwärter vorkommen. Die Gültigkeit dieser Überlegung wird in Abschnitt 5.5 anhand mehrerer Beispiele verifiziert.

Nachteilig an diesem Ansatz ist, dass aufgrund der feingliedrigen Aufteilung der Garantiedaten nur wenige Ausfälle je Einzelmonat zur Verfügung stehen. Diese Problematik verschärft sich besonders bei Produktionsmonaten, welche nahe zum Analysedatum liegen (< 6 Monate) und hohe Verzugszeiten aufweisen. Der Einfluss der Verzugszeiten wird im nachfolgenden Abschnitt näher beschrieben.

### 5.3 Einfluss von Verzugszeiten

Die Berücksichtigung von Verzugszeiten in Zuverlässigkeitsprognosemodellen wurde erstmals in [MMe 03a] umfassend untersucht. Dabei wurde der Einfluss des Zulassungs- und Meldeverzugs bei der Durchführung von zeitnahen Prognosen betrachtet. Es stellte sich heraus, dass diese Verzugszeiten bei zeitnahen Prognosen, d.h. nicht alle hergestellten Komponenten haben die volle Garantiezeit im Feld erreicht, einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Ermittlung der Zuverlässigkeitskenngrößen und folglich auf alle weiteren Anwendungsmöglichkeiten haben. Daher wurde ein Modell entwickelt, welches sowohl den Zulassungsverzug, also den Zeitraum zwischen Produktion und Inverkehrbringen des Produkts, als auch den Meldeverzug berücksichtigt. So gilt unter anderem, dass die Garantiezeit einer Komponente erst mit dem Inverkehrbringen beginnt, jedoch der

Zeitraum zwischen Produktion und Verkauf des Produkts an den Endkunden mehrere Monate betragen kann.

Der Meldeverzug betrachtet hingegen den Zeitraum vom Ausfall des Produkts bzw. der ersten Kenntnisnahme im Ablauf der Garantiebearbeitung bis zum Aufnehmen des Garantiefalls in die Garantiedatenbank. Je nach Datenverarbeitung kann sich dieser Zeitraum von einigen Stunden bis zu mehreren Monate erstrecken. So ist unter anderem ein Nutzfahrzeughersteller bekannt, der nur alle 6 Monate Felddaten über Ausfälle an seine Zulieferer weiterleitet. Es ist in solchen Fällen offensichtlich, dass die in dieser Zeit anfallenden Garantiefälle, welche beim Zulieferer noch nicht bekannt sind, zu einem späteren Zeitpunkt große Auswirkungen haben. Die entstehende Informationslücke stellt den Zulieferer vor große Herausforderungen, wenn es darum geht, Ersatzgeräte zu bevorraten oder Reparaturkapazitäten vorzuhalten.

Der Zusammenhang zwischen den Verzugszeiten wird in der nachfolgenden Abbildung 5-3 erläutert.

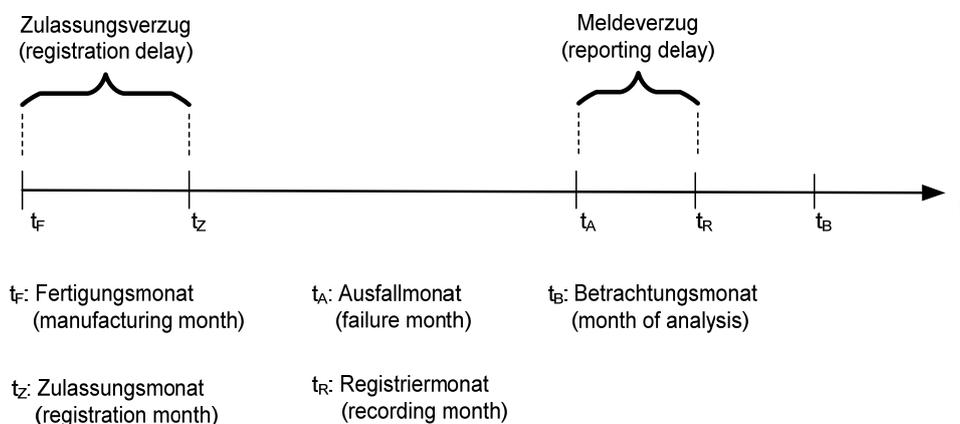


Abbildung 5-3: Zusammenhang der Verzugszeiten [MMe 03a]

Verzugszeiten sind meist auf organisatorische Einflüsse zurückzuführen. Hierzu zählen:

- Lagerzeiten,
- Transportzeiten,
- Kundenverhalten,
- festgelegte Abläufe bei der Informationsverarbeitung und
- festgelegte Abläufe bei der Bearbeitung von Garantiefällen.

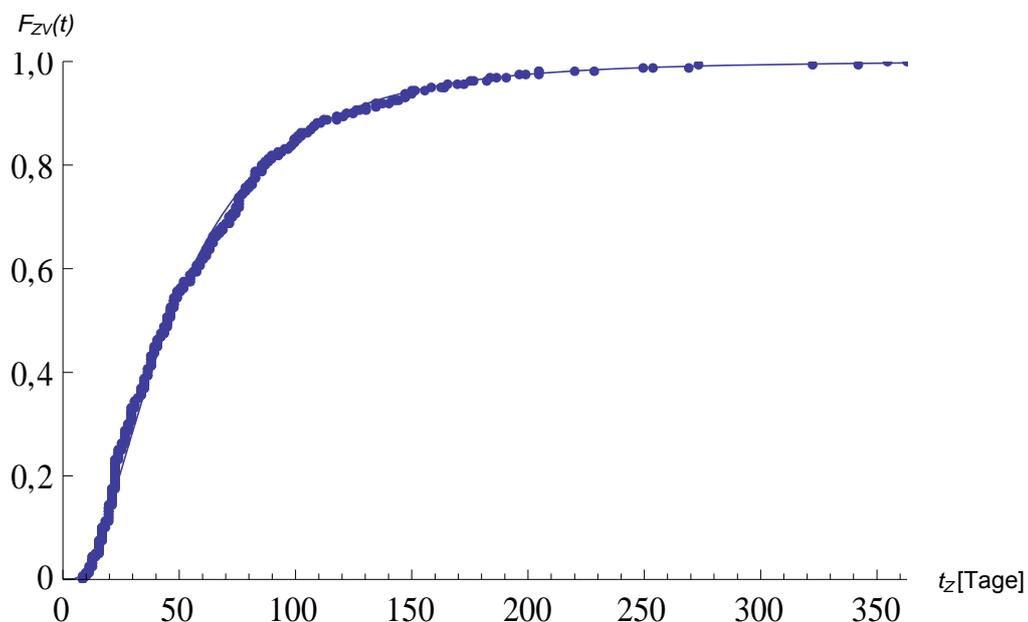
Der in Abbildung 5-3 aufgezeigte Zusammenhang der Verzugszeiten bezieht sich auf den automobilen Sektor. Es zeigt sich jedoch bei der Untersuchung von Mobiltelefonen, dass auch dort erhebliche Verzugszeiten auftreten können. Die Zeit von der Produktion bis zur ersten Nutzung des Endkunden kann mehrere Monate betragen. Hervorgerufen wird diese Zeitspanne durch erhebliche Transportwege (z.B. China-Europa) und den Umstand, dass Mobilfunkprovider für bestimmte Verkaufsaktionen (z.B. Weihnachten) große Mengen an Mobiltelefonen bestellen und diese dann erst später verkaufen.

Wie auch im Automobilbereich beginnt die Garantiezeit des produzierten Telefons erst mit dem Verkauf an den Endkunden. Diese Zeitspanne muss zwingend bei der Bestimmung des Serienersatzbedarfs und der Endbevorratung berücksichtigt werden. Zum einen verschieben sich die Bevorratungszeiträume durch die Verzugszeiten, zum anderen verursachen sie Fehler im mathematischen Modell, welche mittels spezieller Ansätze korrigiert werden müssen.

Zur Betrachtung des Zulassungsverzugs wird für jeden Garantiedatensatz der Zeitraum zwischen Produktions- und Verkaufsdatum untersucht. Um eine empirische Verteilungsfunktion für den Zulassungsverzug zu erhalten, werden die einzelnen Verzugszeiten [in Tagen] als kumulierte relative Summenhäufigkeit aufgetragen. Danach erfolgt eine Anpassung durch eine theoretische Verteilungsfunktion an die empirischen Daten. Im Automobilbereich hat sich die logarithmische Normalverteilung als geeignet erwiesen und wird daher auch für den Mobilfunkbereich angewendet. Als Parameterschätzverfahren hat sich die Maximum-

Likelihood-Methode bewährt, welche programmiertechnisch leicht umgesetzt werden kann und zudem gute Schätzwerte liefert. Nach Ermittlung der zugehörigen Parameter  $\mu$  und  $\sigma^2$  kann die theoretische Verteilungsfunktion erstellt werden. Als Bezugsgröße für die Parameter wird die Einheit [Tage] herangezogen. Durch Übereinanderlegen der empirischen und der theoretischen Funktion lässt sich bereits grafisch feststellen, ob eine gute Anpassung erfolgt ist.

Die nachfolgende Abbildung 5-4 zeigt den Zulassungsverzug  $F_{ZV}(t)$  für mehrere Mobiltelefone für ein Land im Mittelmeerraum. Die zugehörigen Werte können als Anhaltspunkt für die mittlere Zeit des Zulassungsverzugs für mehrere Gerätetypen und Produktionszeiträume dienen.

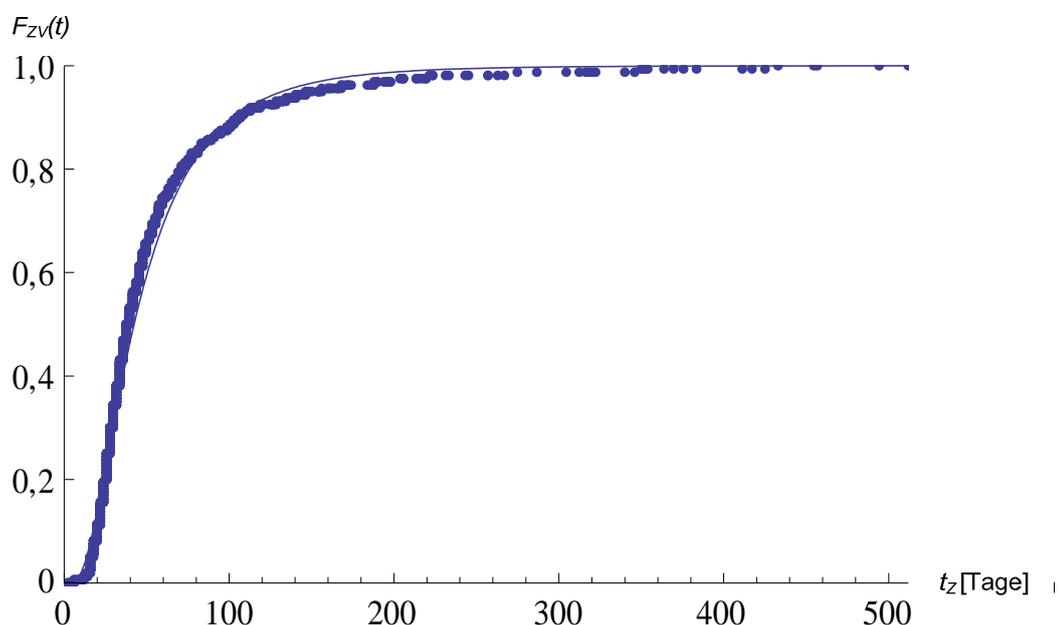


**Abbildung 5-4: Durchschnittlicher Zulassungsverzug eines Mobiltelefons für ein Land im Mittelmeerraum**

Es zeigt sich, dass die empirische Funktion durch die theoretische Verteilung nahezu optimal dargestellt werden kann. Die Auswertung der ermittelten Funktion ergibt, dass in diesem Beispiel nach 30 Tagen erst 30% der produzierten Geräte im Feld sind. Nach 60 Tagen sind es 65% und selbst nach 90 Tagen sind immer noch ca. 20% der produzierten Geräte nicht im Feldeinsatz. Erstaunlich ist, dass erst nach 4 Monaten die 90% Marke überschritten wird.

Die angepasste theoretische Lognormalverteilung weist in diesem Fall folgende Werte für die zugehörigen Parameter auf:  $\mu = 3,8244$  und  $\sigma = 0,7503$ . Der mittlere Zulassungsverzug beträgt ca. 60 Tage. Diese Werte stellen keine Extremwerte dar, sondern repräsentieren eher die Regel.

Ein Beispiel für einen geringen Zulassungsverzug, bezogen auf das bereits untersuchte Land im Mittelmeerraum liefert Abbildung 5-5. Es ist deutlich zu sehen, dass die Verteilungsfunktion bereits nach wenigen Tagen steil ansteigt. Gegenstand der Analyse ist ein Mobiltelefon der gehobenen Preiskategorie.

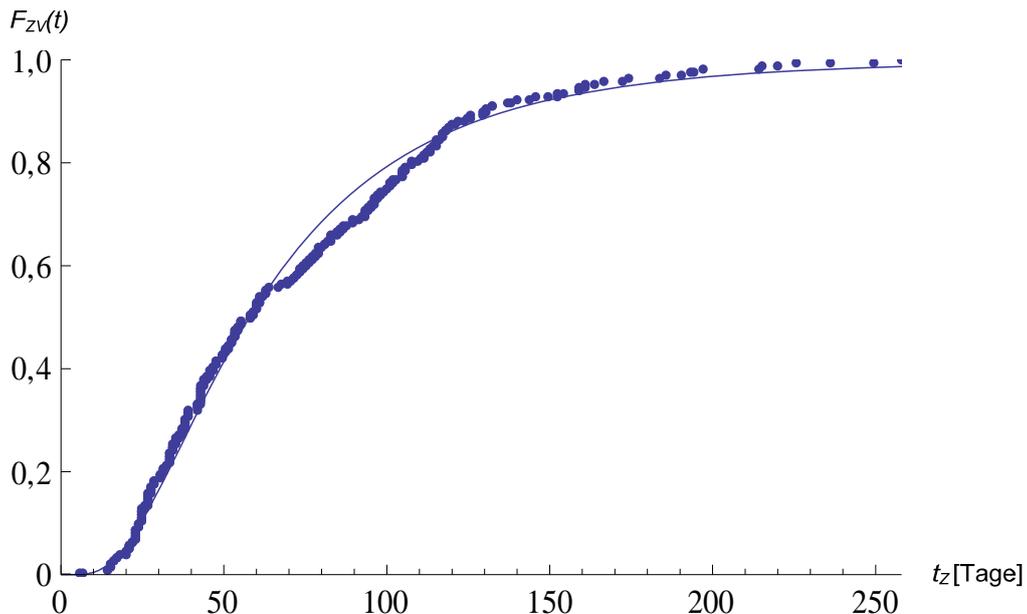


**Abbildung 5-5: Geringer Zulassungsverzug eines Mobiltelefons für ein Land im Mittelmeerraum**

Die angepasste theoretische Lognormalverteilung weist folgende Werte für die zugehörigen Parameter auf:  $\mu = 3,7461$  und  $\sigma = 0,6912$ . Der mittlere Zulassungsverzug beträgt ca. 50 Tage.

Auch das dritte Beispiel bezieht sich, um eine gute Vergleichbarkeit zu schaffen, auf das bereits untersuchte Land im Mittelmeerraum, wobei das analysierte Mobiltelefon im vorliegenden Fall aus einem niedrigen Preissegment stammt. Bereits die Parameter  $\mu = 4,0577$  und  $\sigma = 0,6711$  zeigen die Abweichung zu den

vorangehenden Beispielen. Dies wird durch die mittlere Verzugszeit von mehr als 70 Tagen bestätigt. Deutlicher wird der Unterschied bei der Betrachtung der Zulassungswerte bezogen auf 30 Tage. So sind nach 30 Tagen 16%, nach 60 Tagen 52%, nach 90 Tagen 74% und selbst nach 120 Tagen erst 86% der produzierten Telefone im Feldeinsatz.



**Abbildung 5-6: Hoher Zulassungsverzug eines Mobiltelefons für ein Land im Mittelmeerraum**

Die Gesamtanzahl der Mobiltelefone  $n_M(j)$ , die sich bis zu einem Monat  $j$  nach der Fertigung im Feld befinden, kann mit Hilfe der Verteilungsfunktion des Zulassungsverzugs bestimmt werden.

Es gilt:

$$n_M(j) = \sum_{i=1}^j n_F(i) \cdot F_{ZV}(j-i+1) \quad \text{für alle } i \leq j; \quad i, j \in \mathbb{N}$$

mit:

- $n_M(j)$ : Anzahl der bis zum Monat  $j$  in Betrieb befindlichen Telefone,
- $n_F(i)$ : Fertigungsanzahl im Monat  $i$ ,
- $F_{ZV}$ : Verteilung des Zulassungsverzugs,
- $j$ : Betrachtungsmonat und
- $i$ : Fertigungsmonat.

Es ist ersichtlich, dass der Einfluss des Zulassungsverzugs zunimmt, je näher das Produktionsdatum zum Analysedatum liegt, da der Wert der Verteilungsfunktion mit wachsender Zeit gegen eins und somit der Anteil der sich im Feld befindlichen Mobiltelefone zur Produktionsmenge gegen null strebt.

Auf das in Abbildung 5-6 gezeigte Beispiel bezogen würde dies bedeuten, dass bei einer Produktionsmenge  $n_M=100.000$  und einem Abstand des Betrachtungsmonats vom Produktionsmonat von  $j - i = 3$ , nur 74.000 Mobiltelefone als Grundgesamtheit in die Berechnung der relativen bzw. der korrigierten relativen Summenhäufigkeit einfließen. Dies hat zwar keinen Einfluss auf die Ausfallsteilheit  $\beta$ , jedoch erhöhen sich die Werte für den Parameter  $\alpha$  der Weibull-Verteilung aufgrund der verringerten Grundgesamtheit.

Im Gegensatz zum Zulassungsverzug, der, wie vorangehend gezeigt, einen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeitsprognose hat, spielt der Meldeverzug eine untergeordnete Rolle. Die Untersuchung mehrerer Mobiltelefone, unterteilt in verschiedene Länder der Sales Region CEEMEA, hat lediglich mittlere Zeiten für den Meldeverzug von 5 bis 10 Tagen ergeben. Dies lässt sich leicht dadurch begründen, dass externe Reparaturzentren erst Geld für ihre Arbeiten erhalten, wenn die Garantiedatensätze vollständig hochgeladen wurden. Um die Zeitspanne zwischen erbrachter Leistung und Bezahlung gering zu halten, werden daher in den meisten Fällen direkt nach der Reparatur die entsprechenden Daten bereitgestellt.

Da der Meldeverzug, wie bereits erläutert, nur einen geringen Einfluss hat, wird nachfolgend beispielhaft ein Mobiltelefon betrachtet, welches einen etwas höheren Meldeverzug aufweist. Der Verkaufsraum befindet sich in Osteuropa. Dies ist jedoch kein Kriterium für einen hohen Meldeverzug. Weiterhin soll mit diesem Beispiel gezeigt werden, dass sich bei entsprechender Datenlage auch diesen Mobilfontyp die Verzugszeit auswerten lässt und in die Prognose einfließen kann.

In Abbildung 5-7 sind die empirische und die theoretische Verteilungsfunktion  $F_M(t)$  für den Meldeverzug aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Meldeverzug, wie

auch der Zulassungsverzug, durch eine logarithmische Normalverteilung gut approximiert werden kann.

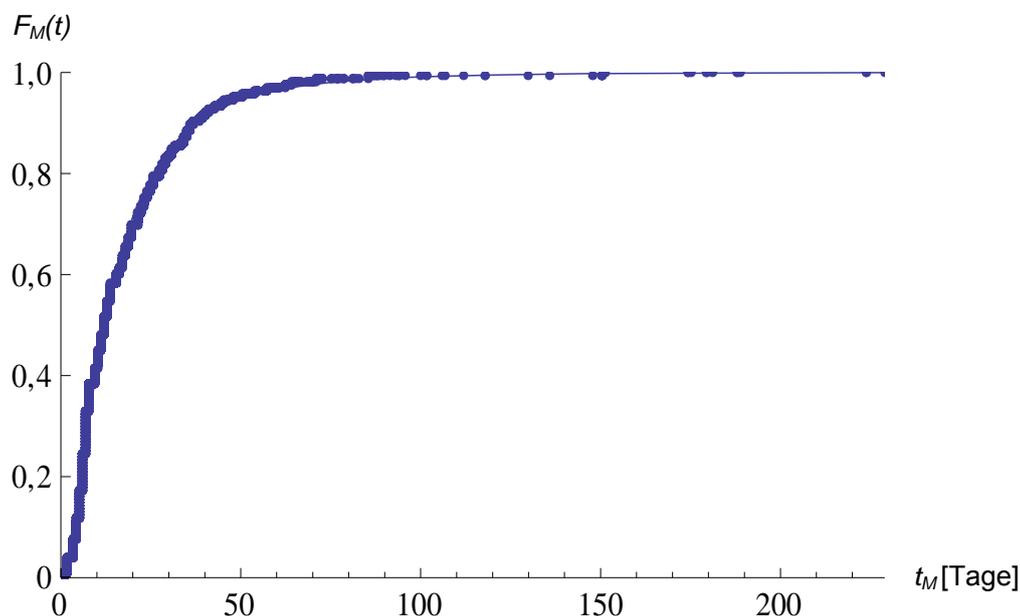


Abbildung 5-7: Hoher Meldeverzug für ein Mobiltelefon für ein Land im osteuropäischen Raum

Mit Hilfe der ermittelten Verteilungsfunktion für den Meldeverzug können nun die in der Garantiedatenbank zum Betrachtungspunkt  $t_B$  aufgetretenen Ausfälle korrigiert werden. Nach dieser Korrektur können die Gesamtausfälle für einen Ausfallmonat  $t_A$  und eine bestimmte Zeit im Feld  $t$  unter Berücksichtigung des Betrachtungsmonats  $t_B$  bestimmt werden.

Es folgt:

$$n_{t_A, t_B}(s) = \frac{n_{t_A}(t)}{F_M(t_B - t_A)},$$

mit:  $n_{t_A, t_B}(t)$  : korrigierte Ausfallhäufigkeit im Feld zu Zeit  $t$  für den Ausfallmonat  $t_A$  im Betrachtungsmonat  $t_B$ ,

$n_{t_A}(t)$  : erfasste Anzahl an Ausfällen im Feld zu Zeit  $t$  für den Ausfallmonat  $t_A$ ,

$F_M$ :	Verteilung des Meldeverzugs,
$t_B$ :	Betrachtungsmonat und
$t_A$ :	Ausfallmonat.

Die Gesamtanzahl der real aufgetretenen Ausfälle  $N_{\text{korr}}(t)$  ergibt sich dann durch Aufsummieren der korrigierten Ausfallhäufigkeiten  $n_{t_B, t_A}(t)$  über alle Ausfallmonate  $t_A$  für eine bestimmte Zeit im Feld  $t$  und ist gegeben durch:

$$N_{\text{korr}}(t) = \sum_{t_A} n_{t_A, t_B}(t) = \sum_{t_A} \frac{n_{t_A}(t)}{F_M(t_B - t_A)}.$$

## 5.4 Zuverlässigkeitsprognose

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten auf die mobilfunkspezifischen Besonderheiten bei der Zuverlässigkeitsprognose eingegangen wurde, soll in diesem Abschnitt der Ablauf exemplarisch vorgestellt werden.

Da es sich bei dem betrachteten Mobiltelefon um ein Gerät handelt, welches über einen sehr langen Zeitraum produziert wurde und wie zuvor erläutert pro Produktionsmonat eine eigenständige Prognose durchgeführt werden muss, werden zur besseren Übersicht nur die ersten drei Produktionsmonate exemplarisch analysiert. Neben den Schätzungen der Parameter werden die jeweiligen Ausfallwahrscheinlichkeiten und Ausfallraten berechnet und grafisch dargestellt. Weitere Ergebnisse von untersuchten Mobiltelefonen können dem Anhang A.2 entnommen werden.

Weiterhin ist zu beachten, dass das nachfolgend betrachtete Mobiltelefon ein sogenanntes „High-Volume-Gerät“ ist, welches selbst in der hier ausgesuchten Market Unit in hohen Stückzahlen verkauft wurde. Abverkaufszahlen von bis zu 100.000 Geräten pro Monat sind in größeren MUs keine Seltenheit. Die betrachtete MU befindet sich vornehmlich im Mittelmeerraum und reicht bis in die Region des Schwarzen Meeres. Dabei ist anzumerken, dass der Technisierungsgrad von Land zu Land unterschiedlich ist und sich von Industrienationen hin zu Schwellenländern erstreckt. Der Sättigungsgrad von Mobilfunkanschlüssen (vgl. Abschnitt

3.2), sowie die Verbreitung einzelner Gerätetypen ist daher von Land zu Land verschieden. Zum Zeitpunkt der Prognose (Jahr 2008) lebten in der betrachteten MU ca. 42,5 Mio. Einwohner, welche von zwölf Mobilfunk Providern versorgt wurden.

Ziel der Prognose ist die Bevorratung und Bereitstellung von Ersatzgeräten während (Serienersatzbedarf) und nach Ende (Endbevorratung) der Serienproduktion. Dabei werden nur Kompletogeräte betrachtet, welche verschrottet und gegen ein Neugerät getauscht werden (vgl. Abbildung 3-12). Reparatureinträge in der Datenbank werden folglich nicht berücksichtigt.

Nach diesen Vorüberlegungen kann mit der Aufbereitung der Daten begonnen werden, welche dem Vorgehen nach Abschnitt 5.1 folgt. Dafür werden die Ausfälle des entsprechenden Produktionsmonats aus der Gesamtdatenbank entnommen und bereinigt. Weiterhin wird die zugehörige Produktionsmenge ermittelt. Die einfließenden Daten sind in der nachfolgenden Tabelle 5-1 aufgeführt.

**Tabelle 5-1: Verwendete Daten**

Produktions- monat	Produktions- menge	Ausfälle gesamt	Ausfälle sortiert	% verwendbar
Juni 06	21.749	655	531	81,07
Juli 06	23.410	365	272	74,52
August 06	19.315	299	236	78,93
Gesamtmenge	64.474			

Wie Tabelle 5-1 zu entnehmen ist, können für die Zuverlässigkeitsprognose nicht alle in der Garantiedatenbank erfassten fehlerhaften Geräte verwendet werden. Dafür gibt es folgende Gründe:

- Unvollständiger Datensatz (z.B. fehlende Pflichteingaben),
- Unplausibler Datensatz (z.B. Ausfalldatum > Produktionsdatum),
- Falscher Datensatz (z.B. Gerät gehört zu anderer MU).

Diese Gründe führen dazu, dass in der betrachteten MU ca. 20% der vorliegenden Garantiedaten aussortiert werden müssen. Im Vergleich zu anderen MUs ist dies ein erwähnenswert niedriger Wert. Besonders der hohe Grad der Erfassung des Verkaufsdatums an den Endkunden ist für die untersuchte MU herauszustellen. Wie bereits in Abschnitt 3.2.3 angedeutet wurde, gibt es MUs, welche nur ca. 10% verwendbare Datensätze aufweisen.

### Monat Juni 2006

Nach der Aufbereitung der Daten wird für jeden Datensatz die Verzugszeit zwischen Produktion und Verkauf an den Endkunden ermittelt (vgl. Abschnitt 5.3). Dabei ergibt sich für den Produktionsmonat Juni 2006 ein mittlerer Zulassungsverzug von 54 Tagen. Die Anpassung der empirischen Daten erfolgt mittels Lognormalverteilung und den zugehörigen Parametern  $\mu = 3,5929$  und  $\sigma = 0,7855$ . Die zugehörigen Parameter der Lognormalverteilung können dabei wiederum mit der Maximum-Likelihood-Methode geschätzt werden.

Abbildung 5-8 zeigt den Zulassungsverzug für Produktionsmonat Juni 2006.

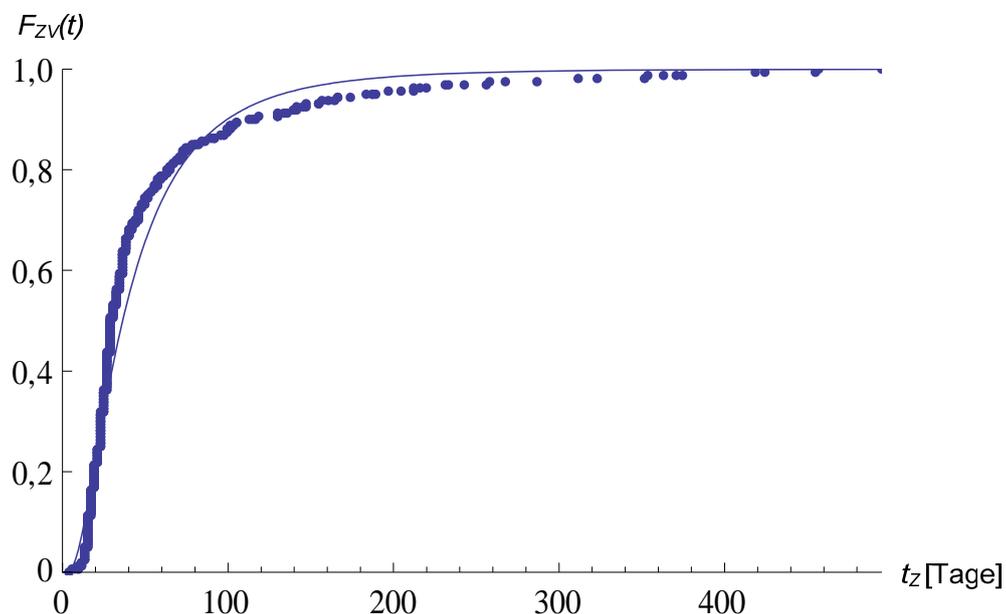


Abbildung 5-8: Zulassungsverzug Produktionsmonat Juni 2006

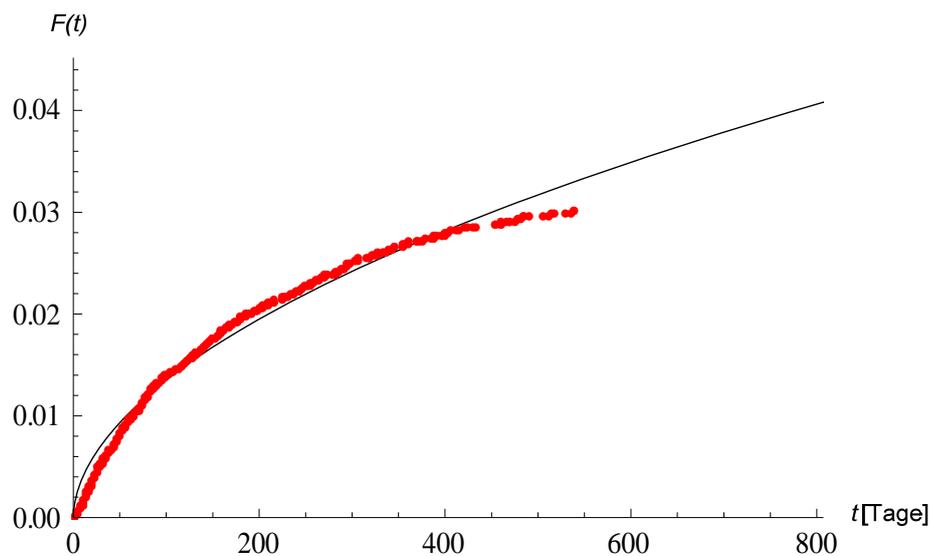
Wie schon in Abschnitt 5.2 dargestellt, treten auch bei diesem Mobiltelefon hohe Verzugszeiten auf. Dies hat zur Folge, dass zwei Monate nach Produktionsbeginn erst 74% der Geräte an den Endkunden verkauft sind.

Nach der Berechnung des Zulassungsverzugs wird die Zeit bis zum Ausfall des Mobiltelefons bestimmt. Dazu wird bei jedem Datensatz die Differenz zwischen Ausfalldatum und Zulassungsdatum (Verkaufsdatum) berechnet. Anschließend werden alle Datensätze, aufsteigend nach Tagen im Feld, sortiert. Diese sortierten Daten werden als kumulierte relative Summenhäufigkeit gelistet. Für die relative Summenhäufigkeit  $\tilde{F}(t)$  gilt:

$$\tilde{F}(t) = \frac{n(t)}{n_0} = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{\zeta < t} n(\zeta).$$

Dabei stellt  $n(t)$  die Anzahl der Ausfälle zum Zeitpunkt  $t$  und  $n_0$  die Grundgesamtheit dar.

Die so ermittelte empirische relative Summenhäufigkeit wird im nächsten Schritt durch eine theoretische Verteilung angepasst. Dafür hat sich unter anderem auch hier die Weibull-Verteilung als geeignet erwiesen, deren Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  mit der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt werden. Für die Auswertung des Produktionsmonats Juni 2006 ergeben sich die Parameter  $\alpha = 0,00114 d^{-\beta}$  und  $\beta = 0,537$ , wobei [d] für die Einheit Tage steht und im Folgenden als Parameter Verwendung findet. Daraus lässt sich schließen, dass das Mobiltelefon durch Frühausfälle gekennzeichnet ist (siehe Abbildung 5-9).



**Abbildung 5-9: Relative Summenhäufigkeit und angepasste theoretische Verteilungsfunktion für den Produktionsmonat Juni 2006**

Es zeigt sich, dass die theoretische Funktion den Verlauf der empirischen Daten gut approximiert. Dies wird durch ein berechnetes Bestimmtheitsmaß von  $B = 99,67\%$  bestätigt. Eine noch genauere Anpassung könnte die Anwendung eines Teilpopulationsmodells bieten. Da jedoch keine triftige Begründung für eine Teilpopulation gegeben werden kann, wird auf die Anwendung verzichtet, um systematische Fehler zu vermeiden. Weiterhin stellt die konservative Abschätzung eine gewisse Sicherheit dar, da in der anschließenden Nutzung der Zuverlässigkeitskenngrößen jeweils pessimistische Ergebnisse verwendet werden. Eine Unterschätzung des tatsächlichen Bedarfs, welche unzufriedene Kunden nach sich zieht, wird demnach vermieden.

Als weitere wichtige Zuverlässigkeitskenngröße wird die zeitabhängige Ausfallrate  $h(t)$  berechnet und als Funktion grafisch dargestellt. Dabei kann, aufgrund der verwendeten Weibull-Verteilung, eine Aussage über das zeitliche Ausfallverhalten getroffen werden. Der hier dargestellte Produktionsmonat Juni 2006 mit einer bereits errechneten Ausfallsteilheit von  $\beta = 0,537$  kennzeichnet eine stark sinkende Ausfallrate. Das bereits vermutete Frühausfallverhalten, welches bekanntlich typisch für elektronische Systeme ist, wird somit bestätigt (siehe Abbildung 5-10).

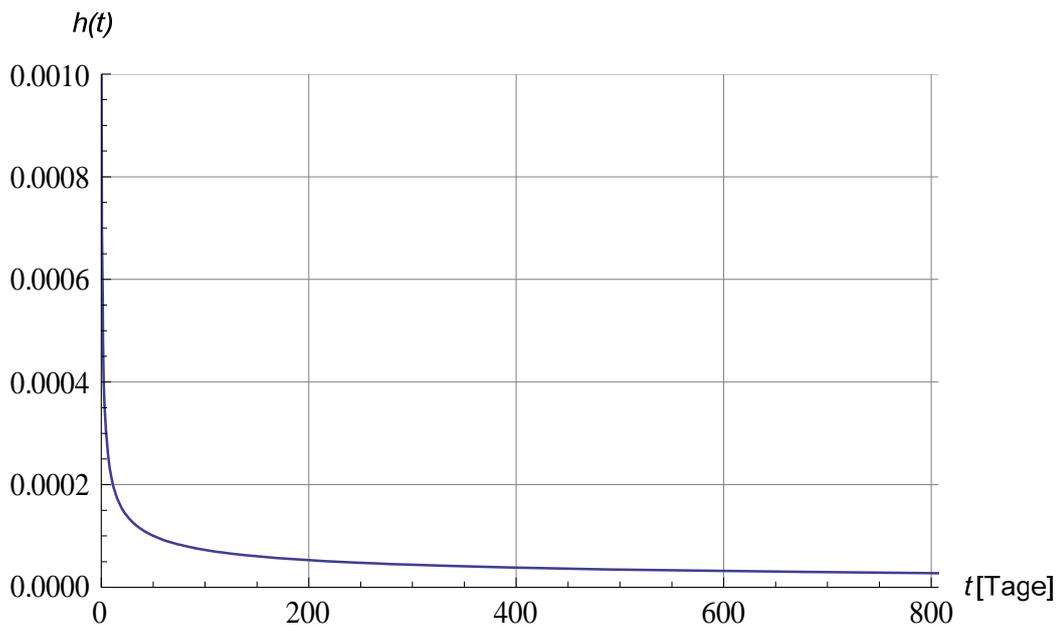


Abbildung 5-10: Ausfallrate für den Produktionsmonat Juni 2006

### Monat Juli 2006

Mit durchschnittlich 54 Tagen zeigt sich bei der Untersuchung des Zulassungsverzugs für den Produktionsmonat Juli 2006 ein erheblicher Einfluss. Im Vergleich zum Produktionsmonat Juni 2006 ist der mittlere Zulassungsverzug nahezu identisch. Werden jedoch die einzelnen Abverkaufsprozente monatlich betrachtet, so muss festgestellt werden, dass nur 67% der produzierten Geräte bis zum zweiten Monat abverkauft werden. Selbst drei Monate nach Produktionsdatum sind noch 15% der Geräte nicht bei den Endkunden angelangt.

Die zugehörigen Parameter der Lognormalverteilung sind durch  $\mu = 3,7885$  sowie  $\sigma = 0,7019$  gegeben. Abbildung 5-11 zeigt die empirische sowie die theoretische Verteilungsfunktion des Zulassungsverzugs.

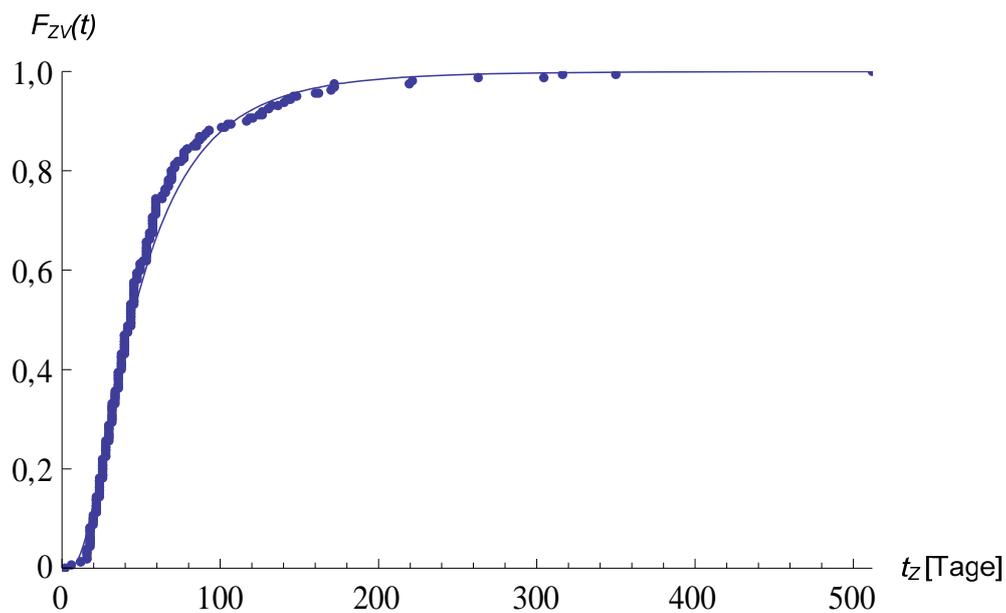
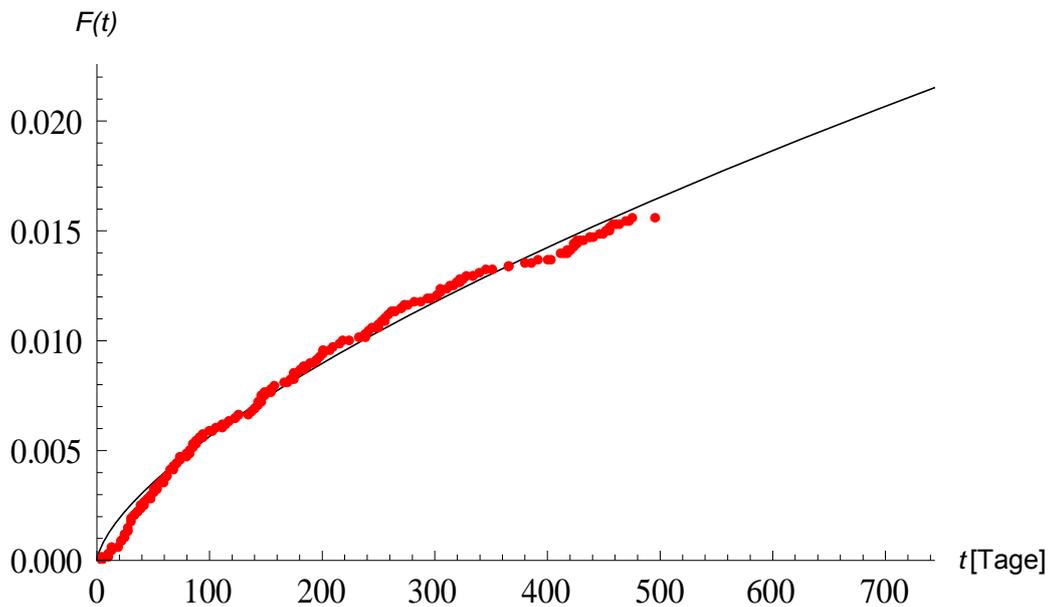


Abbildung 5-11: Zulassungsverzug Produktionsmonat Juli 2006

Wie schon für den ersten Produktionsmonat Juni durchgeführt, folgt im nächsten Schritt die Bestimmung der empirischen Ausfallwahrscheinlichkeit  $\tilde{F}(t)$ . Die empirischen Daten können durch eine zweiparametrische Weibull-Verteilung nahezu optimal angepasst werden.

Dies wurde durch ein Bestimmtheitsmaß von  $B=99,78\%$  bestätigt. Nach Anpassung einer theoretischen Verteilungsfunktion, ergibt sich Abbildung 5-12.



**Abbildung 5-12: Relative Summenhäufigkeit und angepasste theoretische Verteilungsfunktion für den Produktionsmonat Juli 2006**

Für die Auswertung des Produktionsmonats Juli 2006 lassen sich die Parameter der Weibull-Verteilung mit  $\alpha = 0,00026 d^{-\beta}$  und  $\beta = 0,671$  errechnen. Daraus lässt sich schließen, dass auch das Ausfallverhalten des Monats Juli frühausfallbehaftet ist.

Folglich zeigt sich für die Ausfallrate ein deutlich abnehmender Verlauf über die Zeit. Bereits nach ca. 100 Tagen geht die Ausfallrate in einen nahezu konstanten Bereich über (vgl. Abbildung 5-13). Im Vergleich zum ersten Produktionsmonat ist anzumerken, dass die Ausfallrate deutlich niedriger ist. Im Gegenzug steigt der Wert für die Ausfallsteilheit  $\beta$  leicht an, liegt aber weiterhin, wie bereits erwähnt, deutlich im Bereich des Frühausfallverhaltens.

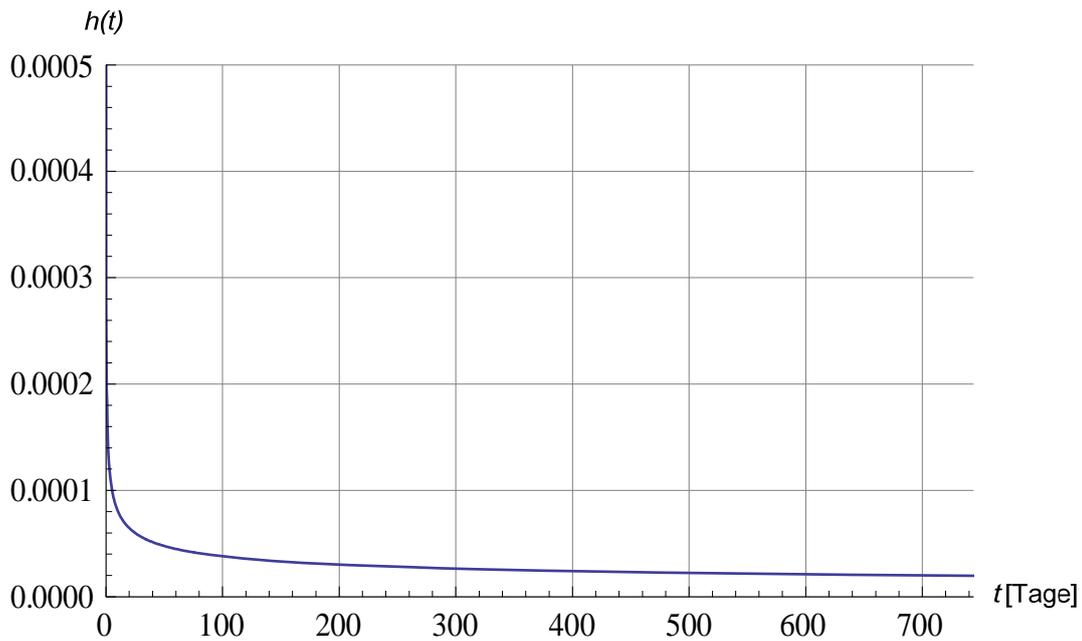


Abbildung 5-13: Ausfallrate für den Produktionsmonat Juli 2006

### Monat August 2006

Auch der zuletzt vorgestellte Produktionsmonat August 2006 weist einen erheblichen Zulassungsverzug auf, wobei der durchschnittliche Verzug mit 66 Tagen nochmals deutlich höher liegt, als bei den vorangegangenen Produktionsmonaten. Dies hat zur Folge, dass einen Monat nach Produktionsbeginn 21%, nach zwei Monaten 59% und nach drei Monaten erst 80% der produzierten Geräte an den Endkunden verkauft werden.

Die zugehörigen Parameter der Lognormalverteilung sind nunmehr durch  $\mu = 3,9411$  sowie  $\sigma = 0,6758$  gegeben. Abbildung 5-14 zeigt, dass mit ansteigendem  $\mu$  und kleiner werdendem  $\sigma$  die Verteilungsfunktion einen flacheren Verlauf annimmt. Im Falle des Produktionsmonats August erklärt sich somit der große Anteil noch nicht verkaufter Mobiltelefone mehrere Wochen/Monaten nach Produktionsdatum.

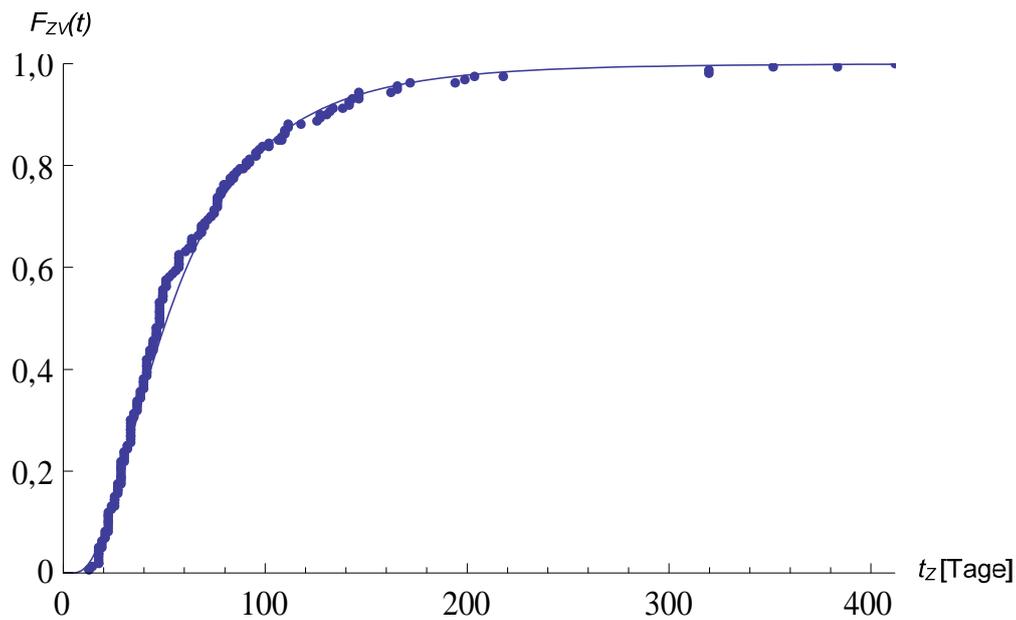
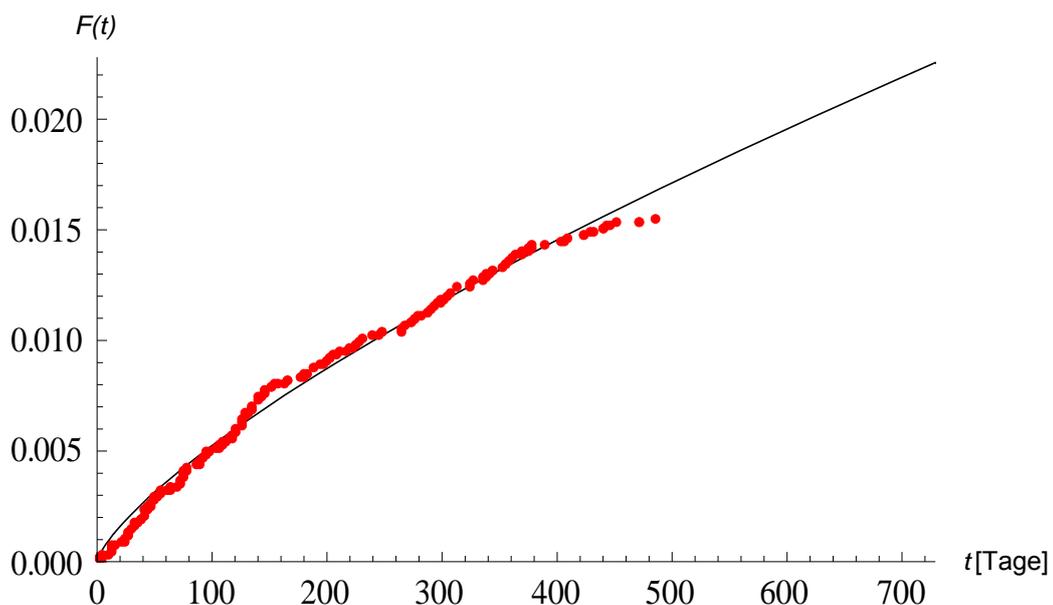


Abbildung 5-14: Zulassungsverzug Produktionsmonat August 2006

Im Vergleich zum Produktionsmonat Juni ergibt die Auswertung der Weibull-Parameter, dass die Ausfallsteilheit mit  $\beta = 0,739$  weiter ansteigt. Im Gegenzug verringert sich der Wert von  $\alpha = 0,00026 d^{-\beta}$ . Das Ausfallverhalten wechselt folglich mit zunehmendem Abstand zum Serienstart von einem deutlichen Früh-ausfallverhalten hin zu einem Ausfallverhalten mit stochastisch auftretenden Fehlern. Begründen lässt sich dies durch Verbesserungen an Hardware und Software, welche kontinuierlich durchgeführt werden. Besonders in den ersten Produktionsmonaten haben diese Verbesserungen einen erheblichen Einfluss auf das Ausfallverhalten, da das noch „unreife“ Produkt durch jede Verbesserung zuverlässiger wird. Gleichzeitig bedeutet eine Verringerung des  $\alpha$ -Wertes eine allgemeine Steigerung der Zuverlässigkeit. Dieser Wechsel des Ausfallverhaltens über mehrere Produktionsmonate hinweg macht auch deutlich, wie wichtig eine auf Produktionsmonate unterteilte Untersuchung im Bereich der Mobiltelefone ist. Würden alle Produktionsmonate zusammengefasst, so könnten neben der bereits angesprochenen Anwärterproblematik auch Unsicherheiten durch das Vermischen von Felddausfalldaten auftreten, welche die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsprognose verfälschen. Bei der weiteren Betrachtung von Produktionsmonaten, welche

mehrere Monate nach Serienstart liegen, stellen sich häufig  $\beta$ -Werte ein, welche zwischen 0,9 und 1,1 liegen. Das heißt, die Ausfallrate ist durch einen nahezu konstanten Verlauf gekennzeichnet.

Die grafische Darstellung des Ausfallverhaltens für den Produktionsmonat August 2006 zeigt in Abbildung 5-15.



**Abbildung 5-15: Relative Summenhäufigkeit und angepasste theoretische Verteilungsfunktion für den Produktionsmonat August 2006**

Wie schon in den vorhergehend durchgeführten Prognosen ist auch für den Monat August eine gute Anpassungsgüte gegeben, welche durch ein Bestimmtheitsmaß von  $B=99,79\%$  bestätigt wurde.

Da die Ausfallsteilheit mit  $\beta = 0,739$  noch deutlich im Bereich der Frühausfälle liegt, weist auch die Ausfallrate des Produktionsmonats August einen sinkenden Verlauf auf. Im Vergleich zu den vorhergehenden Monaten zeigt sich jedoch, dass der Verlauf in einem deutlich kleineren Wertebereich liegt (vgl. Abbildung 5-16).

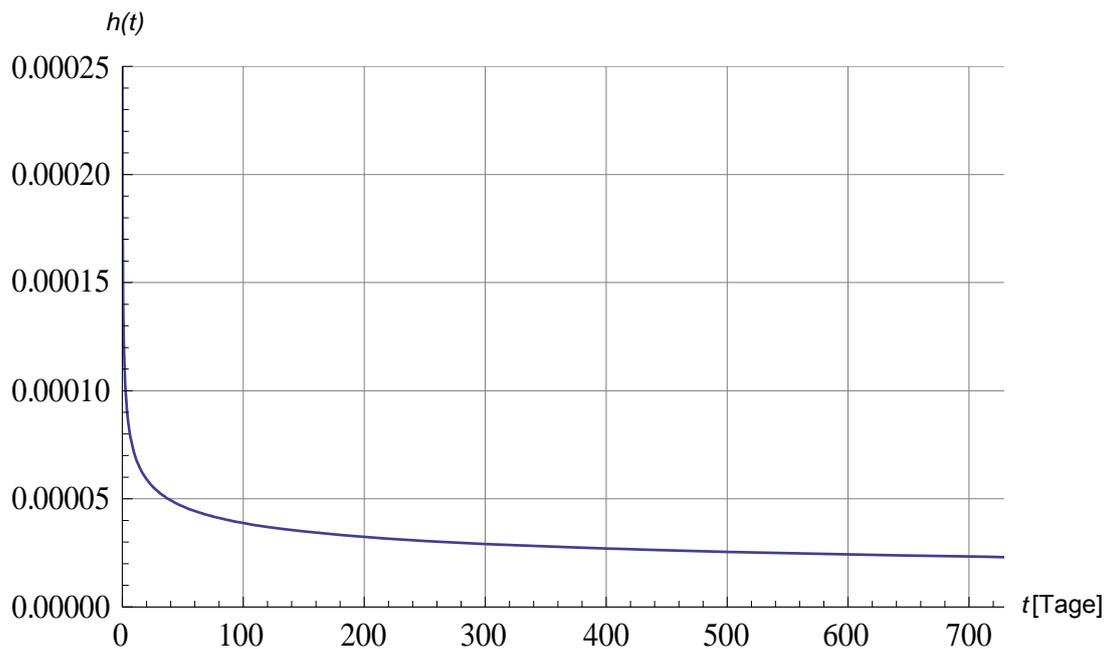


Abbildung 5-16: Ausfallrate für den Produktionsmonat August 2006

Wie bereits erwähnt, kommt es bei der Betrachtung von einzelnen Produktionsmonaten zu einer systematischen Veränderung der Parameter der Weibull-Verteilung. Ohne den Einfluss von epidemischen Ausfällen, z.B. aufgrund fehlerhafter Bauteile eines Zulieferers oder falsch eingestellter Lötöfen, wechselt das Ausfallverhalten von einem deutlichen Frühausfallverhalten hin zum Auftreten von stochastischen Ausfällen. Gleichzeitig nimmt die Ausfallhäufigkeit ab, was sich durch den Parameter  $\alpha$  bestätigen lässt. In der nachfolgenden Gegenüberstellung der Ausfallwahrscheinlichkeiten (Tabelle 5-2) aller drei Produktionsmonate kann diese Erkenntnis verifiziert werden. Dabei sind die Ausfallwahrscheinlichkeiten, in 3-Monatsschritten, für jeden betrachteten Produktionsmonat aufgeführt.

Tabelle 5-2: Gegenüberstellung der Ausfallwahrscheinlichkeiten

		Produktionsmonate		
		Juni 2006	Juli 2006	August 2006
Ausfallwahrscheinlichkeit nach x Monaten	3 Monate	0,0128	0,0053	0,0049
	6 Monate	0,0184	0,0084	0,0081
	9 Monate	0,0229	0,01	0,0110
	12 Monate	0,0267	0,0133	0,0134
	15 Monate	0,0300	0,0154	0,0158
	18 Monate	0,0330	0,0174	0,0181
	21 Monate	0,0358	0,0193	0,0203
	24 Monate	0,0384	0,0211	0,0223

Um zu zeigen, dass das Modell nicht nur für die ausgewählten Produktionsmonate des vorangegangenen Beispiels anwendbar ist, wird im folgenden Abschnitt eine Verifizierung anhand von weiteren Ausfalldaten durchgeführt. Zudem sind im Anhang 0 mehrere Auswertungen unterschiedlicher Mobiltelefone tabellarisch aufgeführt.

## 5.5 Verifizierung

Der Ablauf eines Zuverlässigkeitsprognosemodells im Bereich der Mobiltelefone wurde in Abschnitt 5.4 ausführlich beschrieben. Auch wurde anhand von drei Produktionsmonaten gezeigt, dass sich das empirische Ausfallverhalten von im Feldeinsatz befindlichen Mobiltelefonen durch theoretische Verteilungsfunktionen anpassen lässt. Der exemplarische Beweis für die allgemeingültige Anwendbarkeit des Prognosemodells soll in diesem Abschnitt anhand von zwei weiteren Mobiltefontypen durchgeführt werden. Dabei dienen jeweils drei Produktionsmonate als Betrachtungsgrundlage. „Gerät 1“ ist ein Mobiltelefon der niedrigeren Preiskategorie, welches nahezu weltweit eingesetzt wird. Die Feldausfalldaten entstammen einer Verkaufsregion, welche den zentral- und osteuropäischen Raum abdeckt. Über einen Produktionszeitraum von zehn Monaten wurden in dieser Region ca.

650.000 Geräte an den Endkunden ausgeliefert. Für die gesamte Sales Region CEEMEA ist eine Gesamtlieferanzahl von über 1,5 Mio. Geräten erfasst.

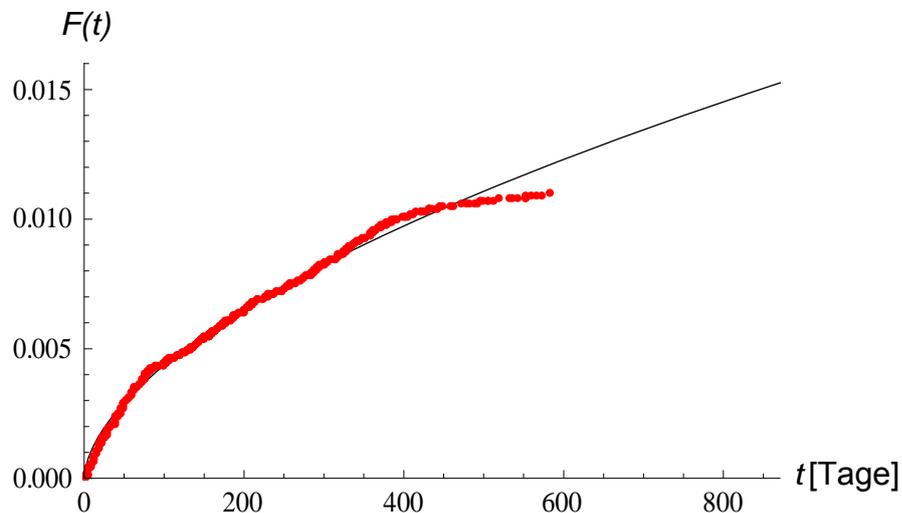
Das zweite Mobiltelefon („Gerät 2“) entstammt der höheren Preiskategorie, welches aufgrund seiner zuverlässigen und einfachen Handhabung über einen sehr langen Zeitraum (26 Monate) ausgeliefert wurde. Auch dieses Gerät wird nahezu weltweit eingesetzt, wobei für die Verifizierung nur Felddausfalldaten aus einem nordeuropäischen Land verwendet werden. Über den gesamten Produktionszeitraum wurden in diesem Land ca. 450.000 Geräte verkauft.

In Schritt 1 wird, analog zu Abschnitt 5.4, eine Zuverlässigkeitsprognose mit allen, bis zum Zeitpunkt der Prognose zur Verfügung stehenden Daten, durchgeführt. Die berechneten Parameter, die Güte der Anpassung sowie die in der Prognose verarbeiteten Daten werden in einer Übersicht gelistet. Bezogen auf das „Gerät 1“, werden außerdem die Ersatzgeräte für einen zeitlich definierten Endbevorratungszeitraum berechnet.

Danach erfolgt in Schritt 2 eine Zensierung der erhobenen Felddaten. Es wird folglich ein Prognosedatum simuliert, welches weit vor dem Zeitraum der eigentlichen Endbevorratung liegt. Dadurch verringert sich sowohl die Anzahl der verwertbaren Datensätze, als auch die maximal mögliche Zeit im Feld der Einzelkomponente. Die so zensierten Datensätze werden erneut mit Hilfe des Zuverlässigkeitsprognosemodells untersucht. Im optimalen Fall sollten beim Vergleich der Prognoseergebnisse sowohl nahezu identische Parameter der Verteilungsfunktionen als auch ähnliche Größenordnungen im Bereich der Endbevorratungsmengen vorliegen. Der Beweis für die allgemeine Anwendbarkeit des Prognosemodells lässt sich somit durch den Vergleich der zensierten und unzensierten Felddausfalldaten führen.

Wie bereits erwähnt, wurden drei Produktionsmonate des Mobilfunkgeräts 1 betrachtet. Dabei stellt der Monat Juli 2005 mit ca. 56.000 produzierten Geräten den ersten Produktionsmonat dar. Zum Zeitpunkt der Analyse liegen Ausfalldaten aus einem 600 Tage weit reichenden Garantiezeitraum vor, welche mit Hilfe des Zuverlässigkeitsprognosemodells analysiert werden. Dabei ergibt sich die nachfolgende Abbildung 5-17, welche die empirische relative Summenhäufigkeit (rote

Punkte) sowie die daran angepasste theoretische Verteilungsfunktion in Form einer Weibull-Verteilung (schwarze Funktion) zeigt.



**Abbildung 5-17: Empirische relative Summenhäufigkeit und theoretische Ausfallwahrscheinlichkeit für Produktionsmonat Juli 2005 (unzensierte Daten), Gerät 1**

Es zeigt sich, dass das reale Ausfallverhalten zufriedenstellend durch eine zweiparametrische Weibull-Verteilung dargestellt werden kann. Dies bestätigt ein Bestimmtheitsmaß von 99,86%. Erst im letzten Bereich der empirischen Daten (>400 Tage) kommt es zu einer erheblichen Abflachung des empirischen Ausfallverhaltens, welche durch die theoretische Funktion nicht optimal angepasst werden kann. Dies lässt sich dadurch erklären, dass gerade bei Geräten, welche nach erheblicher Zeit im Feld ausfallen, der Einfluss des Zulassungs- und Meldeverzugs eine große Rolle spielt. Das Ausfallverhalten wird daher im Bereich >400 Tage etwas überschätzt und führt zu einer gewollten Worst-case- Abschätzung. Typisch für einen frühen Produktionsmonat ist weiterhin das Frühausfallverhalten, welches durch ein  $\beta = 0,581$  bestätigt wird. Für den Parameter  $\alpha$  ergibt sich ein Wert von  $\alpha = 0,0003d^{-\beta}$ . Bei 614 aufgetretenen Fehlern beträgt die mittlere Zeit im Feld bis zum Ausfall 181 Tage.

Unter Berücksichtigung der oben ermittelten Parameter ergibt sich für den Betrachtungszeitraum eine Bevorratungsmenge von 612 Ersatzgeräten. Abbildung 5-18 zeigt den Q-Q-Plot für den ersten untersuchten Produktionsmonat.

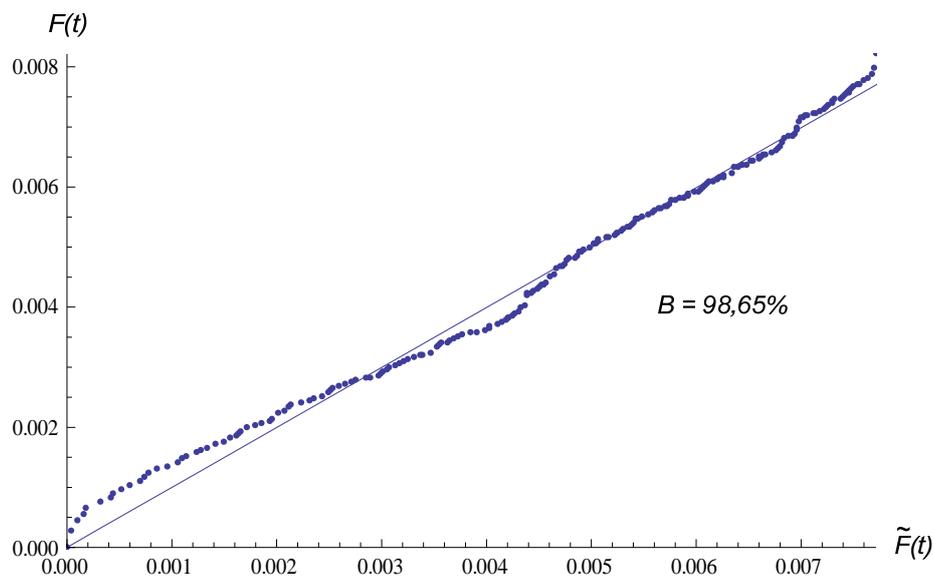
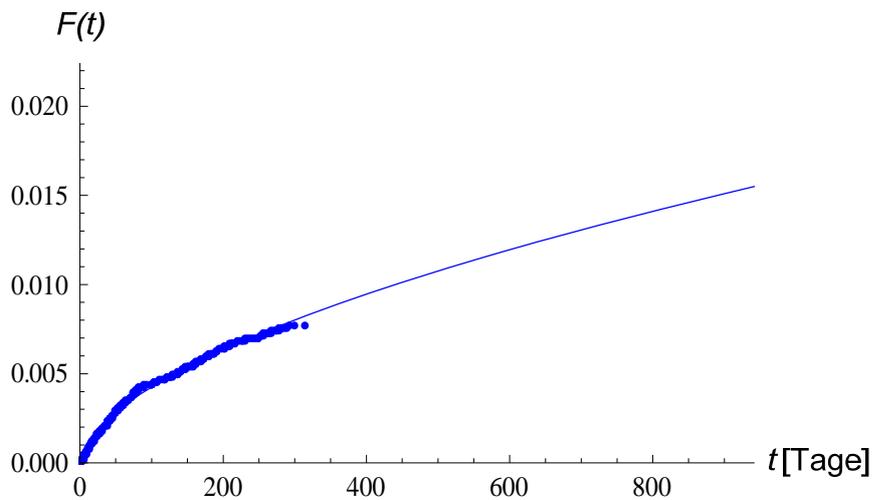


Abbildung 5-18: Q-Q-Plot für Produktionsmonat Juli 2005, Gerät 1

Nach Untersuchung der verfügbaren Garantiedaten, wird nun die Anzahl der Datensätze zensiert. Dabei wird eine Typ-I-Zensierung, d.h. eine Zensierung nach einer bestimmten Zeit, durchgeführt. Hierzu werden alle nach dem 01.06.2006 aufgetretenen Ausfälle aus der Berechnung ausgeschlossen. Die Anzahl der ausgefallenen Geräte verringert sich dadurch von 614 auf 432 Geräte. Auch die durchschnittliche Zeit im Feldeinsatz bis zum Ausfall ist mit 104 Tagen erheblich geringer als bei der Betrachtung der unzensierten Daten.

Bei der zuverlässigkeitstechnischen Untersuchung der zensierten Ausfalldaten fällt jedoch auf, dass die Zensierung nur einen geringen Einfluss auf die zugehörigen Parameter und folglich auch auf die Zuverlässigkeitskenngrößen hat. So verändert sich die Ausfallsteilheit der Weibull-Verteilung nur äußerst gering von  $\beta = 0,581$  auf  $\beta = 0,580$  und auch der Parameter  $\alpha$  verändert seinen Wert kaum. Er ist für die zensierten Daten mit  $\alpha = 0,000295 d^{-\beta}$  gegeben. Auch die Bevorratungsmenge verändert sich lediglich von 612 auf 594 Geräte. Dies entspricht einer Prognosegenauigkeit von 97%.

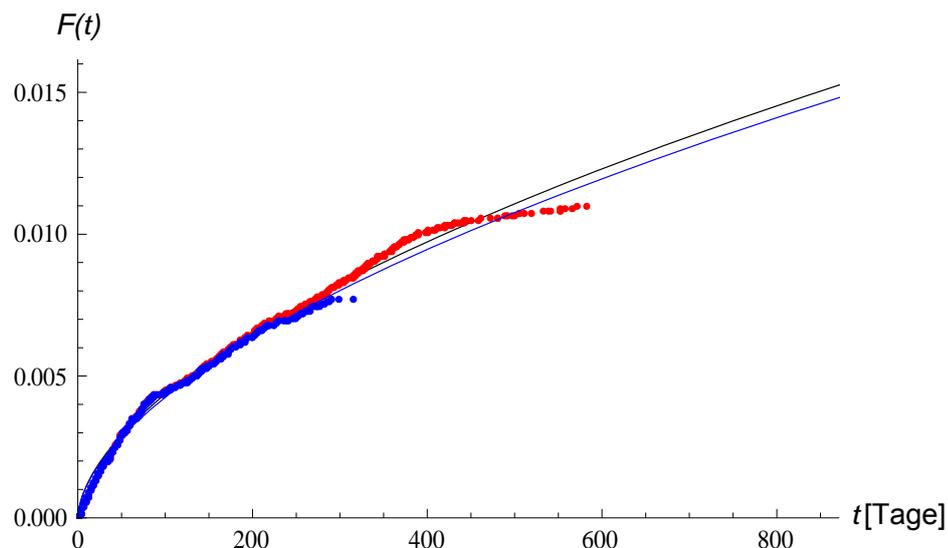
Wie in Abbildung 5-19 zu sehen ist, lassen sich auch die zensierten relativen Summenhäufigkeiten (blaue Punkte) durch eine zweiparametrische Weibull-Verteilung (blaue Funktion) approximieren.



**Abbildung 5-19: Empirische relative Summenhäufigkeit und theoretische Ausfallwahrscheinlichkeit für Produktionsmonat Juli 2005 (zensierte Daten)**

Ein Bestimmtheitsmaß von 99,84% zeigt erneut die gute Anpassung der empirischen Daten durch die theoretische Verteilung.

Die nachfolgende Abbildung 5-20 zeigt, zusammengefasst in einer Grafik, die empirische Summenhäufigkeit sowie die zugehörige theoretische Verteilungsfunktion für die unzensierten und die zensierten Ausfalldaten.



**Abbildung 5-20: Übersicht zensierte und unzensierte Ausfalldaten mit theoretischer Ausfallwahrscheinlichkeit für Produktionsmonat Juli 2005**

Wie schon bei der Betrachtung der Parameter, unterscheiden sich die theoretischen Verteilungsfunktionen, welche als Grundlage für die weiteren Anwendungsmöglichkeiten des Prognosemodells dienen, kaum voneinander. Sollte sich dieser Sachverhalt auch in den weiteren Beispielen bestätigen, kann das erarbeitete Prognosemodell als praktikabel angenommen werden.

Der Vergleich zwischen unzensierten und zensierten Ergebnissen ist in der nachfolgenden Tabelle 5-3 aufgelistet.

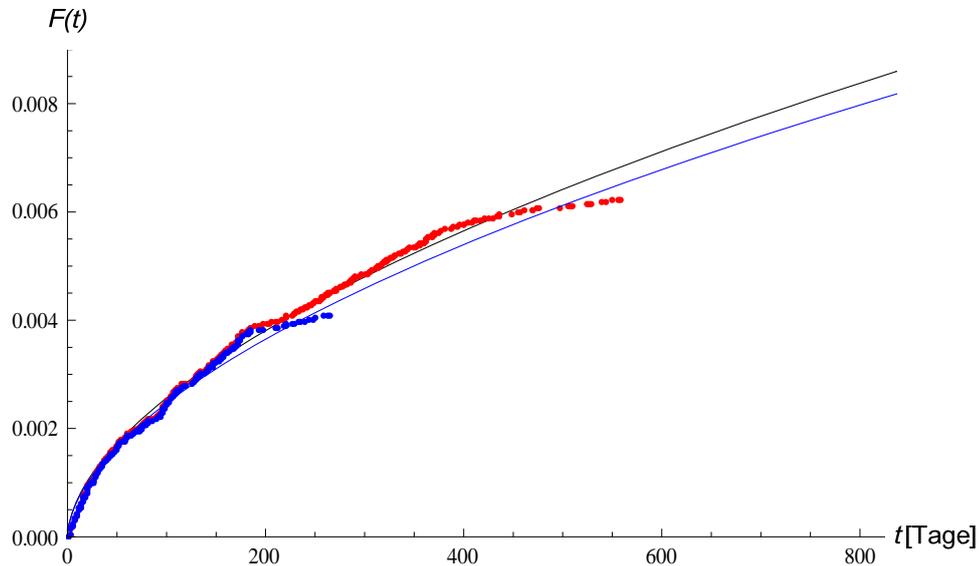
**Tabelle 5-3: Übersicht Produktionsmonat Juli 2005, „Gerät 1“**

	Produktionsmonat Juli 2005 (Gerät 1)	
	unzensiert	zensiert
Aufgetretene Fehler	614	432
Mittlere Zeit im Feld	~181 Tage	~104 Tage
Weibull-Parameter $\alpha$	0,0003	0,00295
Weibull-Parameter $\beta$	0,581	0,580
Bestimmtheitsmaß	99,86%	99,84%
Bevorratungsmenge	612	594

Im Produktionsmonat August 2005 wurden ca. 73.000 Mobiltelefone des „Gerätes 1“ produziert und an die Händler ausgeliefert. Davon liegen zum Zeitpunkt der Prognose mit unzensierten Daten 455 erfasste Geräte in der Garantiedatenbank vor. Die mittlere Zeit im Feld bis zum Ausfall beträgt 173 Tage. Wie schon für den Produktionsmonat Juli 2005 werden die Ausfalldaten mittels des Zuverlässigkeitsprognosemodells untersucht. Es ergibt sich ein deutliches Frühausfallverhalten, bestätigt durch eine Ausfallsteilheit  $\beta = 0,570$ . Im Vergleich zum Vormonat sinkt der Wert  $\alpha = 0,00019d^{-\beta}$  leicht. Unter Verwendung der ermittelten Zuverlässigkeitskenngrößen ergibt sich für den Bevorratungszeitraum eine geschätzte Ersatzgeräteanzahl von 443 Geräten.

Im zweiten Schritt werden die Ausfalldaten erneut zeitlich zensiert und zuverlässigkeitstechnisch untersucht. Die Parameter der Weibull-Verteilung sind dann durch  $\alpha = 0,00018d^{-\beta}$  und  $\beta = 0,565$  gegeben. Im Vergleich zu den unzensierten

Daten ergeben sich folglich nur geringe Abweichungen. Dies zeigt sich deutlich in der nachfolgenden Abbildung 5-21.



**Abbildung 5-21: Übersicht zensierte und unzensierte Ausfalldaten mit theoretischer Ausfallwahrscheinlichkeit für Produktionsmonat August 2005; „Gerät 1“**

Die empirischen Ausfalldaten können sowohl für den unzensierten, als auch für den zensierten Fall durch eine zweiparametrische Weibull-Verteilung angepasst werden. Dabei fällt auf, dass die theoretischen Funktionen (blaue und schwarze Funktion) nur geringe Abweichungen in ihrem Verlauf aufweisen. Auch beim Vergleich der Bevorratungsmengen ergibt sich mit 421 Geräten bei der zensierten Untersuchung zu 443 Geräten bei vollständigen Garantiedaten nur eine Abweichung von ca. 5%. Somit ist für den Produktionsmonat August 2005 die Anwendbarkeit des Modells bewiesen. Zur besseren Übersicht zeigt die nachfolgende Tabelle 5-4 alle ermittelten Parameter.

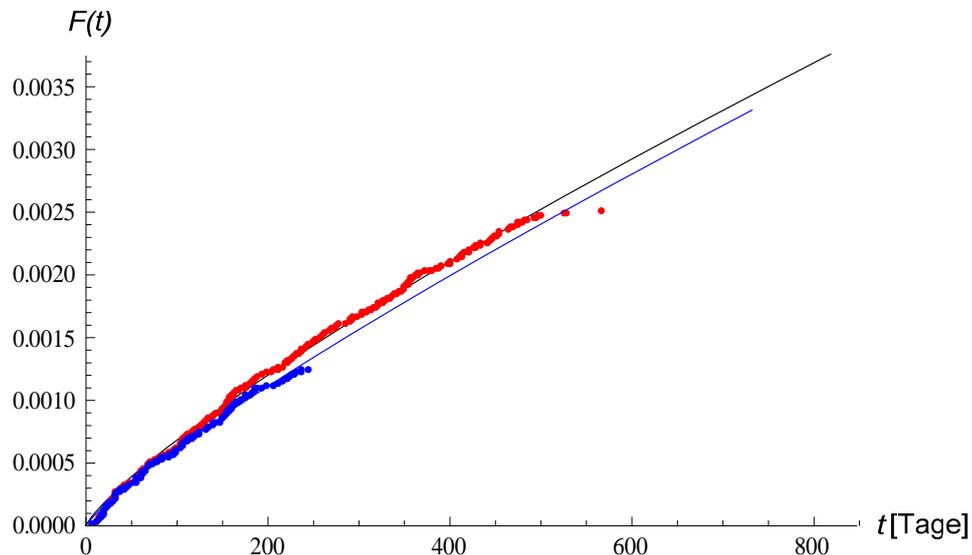
Tabelle 5-4: Übersicht Produktionsmonat August 2005, „Gerät 1“

	Produktionsmonat August 2005 (Gerät 1)	
	unzensiert	zensiert
Aufgetretene Fehler	455	302
Mittlere Zeit im Feld	~173 Tage	~91 Tage
Weibull-Parameter $\alpha$	0,00019	0,00018
Weibull-Parameter $\beta$	0,570	0,565
Bestimmtheitsmaß	99,87%	99,46%
Bevorratungsmenge	443	421

Im letzten, hier untersuchten, Produktionsmonat September 2005 von „Gerät 1“ wurden 127.273 Mobiltelefone hergestellt und an den Endkunden verkauft. Bei der zuverlässigkeitstechnischen Untersuchung der unzensierten Daten können 319 Datensätze für die Prognose genutzt werden, welche im Schnitt 223 Tage bis zum Ausfall in Betrieb waren. Als Parameter für die Weibull-Verteilung ergeben sich  $\alpha = 0,000016d^{-\beta}$  und  $\beta = 0,810$ . Es zeigt sich im Vergleich zu den vorangegangenen Produktionsmonaten, dass das Ausfallverhalten vom deutlichen Frühausfallverhalten hin zum zufallsbedingten Auftreten von Fehlern hin wechselt. Zeitgleich sinkt der Wert für  $\alpha$ . Diese Veränderung im Ausfallverhalten wird bereits in Abschnitt 5.4 beschrieben und lässt sich durch die Weiterentwicklung der Geräte (neue Entwicklungsstände) erklären. Durch neue Softwareupdates oder Verbesserungen bei der Hardware kann so das Ausfallverhalten zugunsten der Zuverlässigkeit verbessert werden. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 99,93% zeigt sich erneut die gute Anpassung der theoretischen Verteilungsfunktion an die empirischen Ausfalldaten.

Nach Zensierung der Ausfalldaten stehen noch 159 Ausfalldaten mit einer mittleren Zeit im Feld von 106 Tagen zur Verfügung. Obwohl damit nur die Hälfte der ursprünglich untersuchten Daten in die Prognose einfließen, sind die Parameter der Weibull-Verteilung mit  $\alpha = 0,000013d^{-\beta}$  und  $\beta = 0,842$  sehr ähnlich. Die Anpassung an die zensierten Daten erfolgt problemlos mittels Weibull-Verteilung und erreicht ein Bestimmtheitsmaß von 99,87%.

Abbildung 5-22 zeigt die empirischen Daten und die daran angepassten theoretischen Funktionen. Beide theoretischen Funktionen weisen einen ähnlichen Verlauf auf.



**Abbildung 5-22: : Übersicht zensierte und unzensierte Ausfalldaten mit theoretischer Ausfallwahrscheinlichkeit für Produktionsmonat September 2005**

Eine Übersicht aller wichtigen Parameter für den Produktionsmonat September 2005 liefert die folgende Tabelle 5-5.

**Tabelle 5-5: Übersicht Produktionsmonat September 2005 des Mobiltelefons 1**

	Produktionsmonat September 2005 (Gerät 1)	
	unzensiert	zensiert
Aufgetretene Fehler	319	159
Mittlere Zeit im Feld	~223 Tage	~106 Tage
Parameter $\alpha$	0,000016	0,000013
Parameter $\beta$	0,810	0,842
Bestimmtheitsmaß	99,93%	99,87%
Bevorratungsmenge	344	333

Es zeigt sich, dass alle untersuchten Produktionsmonate des preisgünstigen Mobiltelefons durch das Zuverlässigkeitsprognosemodell untersucht werden

können und das Modell eine gute Abschätzung, auch mit zensierten Garantiedaten, liefern kann. Durch das künstliche Versetzen des Analysezeitpunkts in die Vergangenheit kann so verifiziert werden, ob die berechneten Bevorratungsmengen, basierend auf den zensierten Daten, die gleichen Ergebnisse liefern wie die unzensierten Gesamtdaten. Mit Abweichungen von maximal 5% erreicht das Modell ein zufriedenstellendes Ergebnis.

Um auszuschließen, dass die durchgeführte Verifizierung mit dem Mobiltelefon der niedrigen Preiskategorie nur zufällig gute Ergebnisse liefert, wird im Folgenden das zweite Mobiltelefon („Gerät 2“) untersucht, welches einer höheren Preiskategorie angehört. Die Ergebnisse werden in Tabellenform dargestellt, da bereits für das erste Mobiltelefon in diesem Abschnitt eine detaillierte Auswertung, auch in visueller Form, vorliegt. Wie bereits bei der ersten Verifizierung werden die aufgenommenen Ausfalldaten zeitlich zensiert und mit dem Zuverlässigkeitsprognosemodell untersucht. Danach werden alle in der Garantiedatenbank enthaltenen Daten zuverlässigkeitstechnisch betrachtet, um eventuelle Abweichungen zu den Zuverlässigkeitskenngrößen der zensierten Daten festzustellen.

Für den Produktionsmonat Mai 2005, in dem ca. 18.500 Geräte produziert wurden, werden 922 Garantiefälle mit einer durchschnittlichen Zeit im Feld von 175,76 Tagen in der Datenbank erfasst und zuverlässigkeitstechnisch ausgewertet. Dabei stellt sich, wie bereits in vorhergehenden Untersuchungen, ein deutliches Frühausfallverhalten dar, welches durch eine Ausfallsteilheit  $\beta = 0,615$  bestätigt wird. Der Lageparameter  $\alpha = 0,001164d^{-\beta}$  ist relativ hoch, lässt sich aber dadurch erklären, dass es sich beim Monat Mai um den ersten Produktionsmonat handelt. Wie bereits in Abschnitt 5.4 erwähnt, hat sich in mehreren Untersuchungen herausgestellt, dass die Ausfallsteilheit  $\beta$  in den ersten Produktionsmonaten durch ein deutliches Frühausfallverhalten geprägt ist. Zudem ergeben sich hohe Werte für den Lageparameter  $\alpha$ . Einhergehend mit hard- und softwarespezifischen Verbesserungen, welche in den ersten Monaten nach Produktionsstart erfolgen, steigt die Zuverlässigkeit der Geräte an, wodurch der Lageparameter  $\alpha$  abnimmt, die Ausfallsteilheit  $\beta$  jedoch ansteigt und zum Teil in den Bereich der zufallsbedingten Ausfälle reicht. Die Anpassung der empirischen Ausfalldaten

erfolgt mittels Weibull-Verteilung problemlos und erreicht ein Bestimmtheitsmaß von 99,77%.

Nach Zensierung der Daten stehen noch 810 Datensätze zur Verfügung, wobei die mittlere Zeit im Feld auf 140,99 Tage abnimmt. Wie der Tabelle 5-6 zu entnehmen ist, variieren die ermittelten Parameter der angepassten Weibull-Verteilung geringfügig. Dies liegt an der etwas heterogenen Grundgesamtheit des Produktionsmonats Mai 2005, welche mehrere Subpopulationen von Massenfehlern aufweist. Obwohl diese Besonderheit auftritt, können die empirischen Daten mit einer Übereinstimmung von 99,58% durch die theoretische Funktion dargestellt werden.

**Tabelle 5-6: Übersicht Produktionsmonat Mai 2005, „Gerät 2“**

	Produktionsmonat Mai 2005 (Gerät 2)	
	unzensiert	zensiert
Aufgetretene Fehler	922	810
Mittlere Zeit im Feld	~176 Tage	~141 Tage
Weibull-Parameter $\alpha$	0,001164	0,000837
Weibull-Parameter $\beta$	0,615	0,679
Bestimmtheitsmaß	99,77%	99,58%

Im zweiten Produktionsmonat wurden bereits mehr als 31.000 Mobiltelefone für das zugrunde gelegte nordeuropäische Land hergestellt, wovon 1.026 Geräte als fehlerhaft in der Garantiedatenbank aufgenommen wurden. Eine Auswertung hinsichtlich der mittleren Zeit im Feld ergibt 213,83 Tage. Im Vergleich zum ersten Produktionsmonat sind die Geräte des zweiten Produktionsmonats folglich im Schnitt 38 Tage länger im Feld bis ein Ausfall auftritt. Für die Ausfallsteilheit der Weibull-Verteilung ergibt sich ein Wert von  $\beta = 0,843$ . Gleichzeitig verringert sich der Lageparameter  $\alpha$ , wie der Tabelle 5-7 zu entnehmen ist. Ein Bestimmtheitsmaß von 99,91% zeigt eine nahezu perfekte Anpassung der empirischen Ausfalldaten durch die theoretische Funktion.

Die mittlere Zeit im Feld verringert sich nach der Zensierung der Daten auf 155,20 Tage. Trotzdem bleiben die Weibull-Parameter nahezu konstant. Auch die zen-

sierten Daten können durch eine zweiparametrische Weibull-Verteilung nahezu optimal angepasst werden. Die Übereinstimmung zwischen empirischer und theoretischer Funktion beträgt dabei 99,89%.

**Tabelle 5-7: Übersicht Produktionsmonat Juni 2005, „Gerät 2“**

	Produktionsmonat Juni 2005 (Gerät 2)	
	unzensiert	zensiert
Aufgetretene Fehler	1026	777
Mittlere Zeit im Feld	~214 Tage	~155 Tage
Weibull-Parameter $\alpha$	0,000187	0,000154
Weibull-Parameter $\beta$	0,843	0,878
Bestimmtheitsmaß	99,91%	99,89%

Der letzte hier untersuchte Produktionsmonat ist der Monat Juli 2005, in dem die Produktionsmenge auf 42.040 Geräte ansteigt. Interessant ist dabei, dass trotz ansteigender Produktionsmenge, weniger defekte Geräte im Vergleich zu den vorangegangenen Produktionsmonaten in der Garantiedatenbank aufgenommen werden. Wird die gesamte Produktionsmenge betrachtet, so sind 655 Geräte ausgefallen, welche eine mittlere Zeit im Feld von 216,46 Tagen aufweisen. Dies ist eine erneute Steigerung zu den bereits untersuchten Produktionsmonaten. Anhand der Weibull-Parameter kann dies auch mathematisch bestätigt werden, da die Ausfallsteilheit mit einem Wert von  $\beta = 0,880$  nur leicht ansteigt, jedoch der Lageparameter  $\alpha$  einen Wert von  $\alpha = 0,000071d^{-\beta}$  annimmt. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 99,92% zeigt sich eine sehr gute Anpassung der empirischen Daten durch die angewandte Weibull-Verteilung.

Nach Zensierung der Garantiedaten stehen noch 448 Datensätze zur Verfügung, um eine zuverlässigkeitstechnische Betrachtung durchzuführen. Dabei verringert sich die mittlere Zeit im Feld deutlich von 216,46 auf 142,60 Tage. Dadurch erreicht der Lageparameter einen Wert von  $\alpha = 0,000059d^{-\beta}$ , der somit um ca. 17% vom Lageparameter der unzensierten Untersuchung abweicht. Weiterhin steigt die Ausfallsteilheit auf den Wert  $\beta = 0,913$  an. Trotz dieser Abweichung

können die empirischen Daten mit einer Übereinstimmung von 99,88% angepasst werden. Die Übersicht des letzten Produktionsmonats ist in Tabelle 5-8 gegeben.

**Tabelle 5-8: Übersicht Produktionsmonat Juli 2005, „Gerät 2“**

	Produktionsmonat Juli 2005 (Gerät 2)	
	unzensiert	zensiert
Aufgetretene Fehler	655	448
Mittlere Zeit im Feld	~216 Tage	~143 Tage
Weibull-Parameter $\alpha$	0,000071	0,000059
Weibull-Parameter $\beta$	0,880	0,913
Bestimmtheitsmaß	99,92%	99,88%

Durch die vorangegangenen Untersuchungen sollte gezeigt werden, dass die Herangehensweise des Aufteilens der Garantiedaten nach Produktionsmonaten, um die Anwärterproblematik zu vermeiden, ein praktikabler Ansatz im Bereich der mobilen Telekommunikation ist. Bei allen untersuchten Produktionsmonaten, welche sowohl unzensiert, als auch zensiert zuverlässigkeitstechnisch betrachtet wurden, ergeben die Parameter der theoretisch angepassten Funktionen nahezu identische Ergebnisse. Kleine Abweichungen sind zwar zu erkennen, jedoch wirken sie sich nicht erheblich auf die eigentliche Zuverlässigkeitsprognose aus. Besonders im Hinblick auf die Prognosezeiträume, welche im Bereich der Mobiltelefone selten einen größeren Zeitraum als fünf Jahre umfassen, bewirken kleine Abweichungen bei der Ausfallwahrscheinlichkeit nur geringe Abweichungen bei der weiteren Beantwortung qualitätsrelevanter Fragestellungen.

## 5.6 Berechnung des Serienersatzbedarf und der Endbevorratung

Die Hauptmotivation für die Anwendung von Zuverlässigkeitsprognosemodellen im Bereich der mobilen Telekommunikation begründet sich durch qualitätsrelevante und wirtschaftliche Fragestellungen, wie zum Beispiel die Berechnung von Ersatzgeräten für den Serienbedarf und die Endbevorratung.

Unter Serienersatzbedarf werden im Folgenden Ersatzgeräte bezeichnet, welche zusätzlich zur geplanten Produktionsmenge hergestellt werden müssen, um ausgefallene Geräte, welche irreparabel sind, aus dem Feldeinsatz zu ersetzen. Dabei wird, im Gegensatz zur Endbevorratung, das entsprechende Produkt noch in Serie gefertigt. Die Berechnung des Serienersatzbedarfs ist somit ein Hilfsmittel zur Steuerung von Ressourcen, welche für diese Garantiefälle bereitgestellt werden müssen. Neben erweiterten Produktionskapazitäten, welche mit eingeplant werden können, ermöglicht die Berechnung des Serienersatzbedarfs auch eine Prognose der Garantiekosten. Weitere Nutzungsmöglichkeiten werden in Abschnitt 5.7 erläutert.

Da während dieser Arbeit keine konkreten Fragestellungen hinsichtlich des Serienersatzbedarfs gestellt wurden, erfolgt die mathematische Vorgehensweise nur theoretisch. Eine Umsetzung mittels geeigneter Programme (Mathematica, MatLab, usw.) ist jedoch ohne großen Aufwand möglich.

Zur Berechnung des Serienersatzbedarfs und der Endbevorratungsmenge wird die Ausfallwahrscheinlichkeit  $F_i(t)$  sowie die Produktionsmenge  $n(i)$  des entsprechenden Produktionsmonats  $i$  benötigt. Weiterhin muss der Zeitpunkt für das Ende des Bevorratungszeitraums bekannt sein. In der Regel stellt das Ende der Garantiezeit auch das Ende des Bevorratungszeitraums dar. Viele Hersteller rechnen noch einen „Zeitzuschlag“ von drei bis vier Monaten hinzu. Damit wird der Einfluss der Verzugszeiten berücksichtigt, welche eine Verschiebung des gesamten Bevorratungszeitraums bewirken können. So muss zum Beispiel beachtet werden, dass die Garantiezeit erst mit Verkauf des Gerätes an den Endnutzer beginnt. Wird davon ausgegangen, dass die Verzugszeiten mehrere Monate betragen können, so ist eine Erweiterung des Bevorratungszeitraums sehr sinnvoll. Das Ende des Bevorratungszeitraums wird im Folgenden mit  $t_E$  bezeichnet. Eine Einbeziehung von Bestandsanteilen, wie sie in der Automobilindustrie Verwendung finden [VDA 96], ist nicht vorgesehen.

Für die im Feldeinsatz zu erwartenden Ausfälle des  $i$ -ten Produktionsmonats im  $j$ -ten Monat des Serienersatzbedarfs ( $0 < i \leq j$ ) mit der für diesen Monat spezifischen Lebensdauer  $T$  folgt

$$M_{j,i} = n(i) \cdot P(j-i < T \leq j-i+1) = n(i) \cdot [F(j-i+1) - F(j-i)],$$

wobei  $F(t)$  die zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeit des Geräts darstellt.

Werden die Ausfälle über alle möglichen Monate des  $i$ -ten Produktionsmonats bis zum Ende der Serienproduktion berechnet, so ergeben sich die zu erwartenden Ausfälle des  $i$ -ten Produktionsmonats. Unter Anwendung der vorstehenden Gleichung folgt:

$$M_i = \sum_{j=i}^{t_p} n(i) \cdot P(j-i < T \leq j-i+1) = n(i) \cdot \sum_{j=i}^{t_p} [F(j-i+1) - F(j-i)]$$

mit  $t_p$ : Endtermin der Produktionsmöglichkeit ( $0 < t_E \leq t_p$ ).

Der gesamte Serienersatzbedarf  $M_S$  für alle Produktionsmonate und den gesamten Bevorratungszeitraum ergibt sich über das Aufsummieren der einzelnen Produktionsmonate:

$$M_S = \sum_{i=1}^{t_E} n(i) \cdot \sum_{j=i}^{t_p} [F(j-i+1) - F(j-i)].$$

Von größerer Bedeutung für das hier vorgestellte Projekt ist jedoch die Berechnung der Endbevorratungsmenge  $M_E$ . Da im Gegensatz zum Serienersatzbedarf keine Möglichkeit mehr besteht, Ersatzgeräte zu produzieren, muss bereits vor dem Ende der Serienfertigung eine Abschätzung für den zukünftigen Bedarf vorgenommen werden.

Wird die Endbevorratungsmenge zu hoch angesetzt, müssen die überschüssigen Geräte nach Ende des Bevorratungszeitraums verschrottet werden, da sie obsolet geworden sind. Es muss dabei beachtet werden, dass Mobiltelefone nach der zweijährigen Bevorratungszeit „Elektronikschratt von Vorgestern“ sind. Es wird

folglich Kapital in Form von produzierten und eingelagerten Ersatzgeräten gebunden, welche danach nur verschrottet werden.

Auch eine zu niedrig angesetzte Endbevorratungsmenge führt zu großen Problemen, da nach einem gewissen Zeitraum keine Ersatzgeräte mehr geliefert werden können. Da der Hersteller jedoch verpflichtet ist, während der gesetzlichen Gewährleistung sowie seiner freiwillig gewährten Garantiezeit Ersatz zu liefern, können Strafzahlungen an seine Kunden (z.B. Mobilfunkprovider) drohen. Weiterhin kann eine Unverfügbarkeit von Ersatzgeräten zur Kundenunzufriedenheit führen, wenn der Endnutzer kein ihm angebotenes Nachfolgegerät als Ersatz akzeptieren möchte. Grund hierfür kann z.B. das Vorhandensein von Zubehör für das ausgefallene Mobiltelefon sein, welches mit dem angebotenen Ersatzgerät nicht kompatibel ist. Eine Einigung in solchen Fällen kann mit einem erheblichen Arbeitsaufwand und hohen Kosten verbunden sein.

Folglich ist eine genaue Prognose der zu erwartenden Ausfälle während der Garantiezeit von großem Nutzen.

Wie schon bei der Berechnung des Serienersatzbedarfs wird für die Kalkulation der Ersatzgeräte die Fertigungsmenge  $n(i)$  des Produktionsmonats sowie die zugehörige Ausfallwahrscheinlichkeit  $F_i(t)$  herangezogen.

Ist  $t_E$  der Endtermin der Serienproduktion und  $t_N$  das zeitliche Ende der Nachlieferfrist, so folgt für die Endbevorratungsmenge  $M_E$ :

$$M_E = \sum_{i=1}^{t_E} n(i) \cdot \sum_{j=t_p+1}^{t_N} [F(j-i+1) - F(j-i)].$$

Als Gesamtersatzbedarf ist die Summe aus Serienersatzbedarf und Endbevorratungsmenge definiert. Die Kosten für Produktion, Lagerung, Distribution und Verwaltung dieser Ersatzgeräte sind in den Garantiekosten enthalten. Eine frühzeitige Prognose des Gesamtersatzbedarfs ermöglicht daher eine garantiebezugene Kostenkalkulation für das betreffende Mobiltelefon.

Das folgende Beispiel verdeutlicht den Ablauf einer Endbevorratungsanalyse eines hochpreisigen Mobiltelefons, welches in den Jahren 2006 und 2007 für ein

Land im Mittelmeerraum produziert wurde. Dabei wurden die Produktionsmonate Juni 2006 bis April 2007 untersucht, für die ab Januar 2008 eine Endbevorratung stattfinden soll. Alle erforderlichen Daten und Ergebnisse sind in Tabelle 5-9 aufgeführt. Die Produktionsmengen für die einzelnen Monate reichen von 7.400 Geräten im Juni 2006 bis 24.097 Geräten im September 2006, wobei in den 11 Monaten insgesamt über 180.000 Geräte produziert und an den Endkunden geliefert wurden. Von diesen Geräten fallen bis zum Zeitpunkt der Untersuchung 2.124 Geräte aus und werden in der Garantiedatenbank abgelegt. Aufgrund von fehlenden oder unplausiblen Einträgen, wie z.B. fehlendes Verkaufsdatum an den Endkunden, müssen 113 Datensätze aussortiert werden, sodass zur eigentlichen Prognose insgesamt 2.011 Datensätze zur Verfügung stehen. Dies entspricht einer Quote von über 94% und stellt einen Spitzenwert im Vergleich zu anderen Verkaufsregionen dar. Weitere Gründe für unplausible Daten und Probleme bei der Datenstruktur sind in Abschnitt 3.2 und den zugehörigen Unterabschnitten aufgeführt.

Nach Bereinigung der Garantiedaten werden diese mit Hilfe des Zuverlässigkeitsprognosemodells untersucht und die so entsprechenden Weibull-Parameter der zweiparametrischen theoretischen Verteilung ermittelt. Über die Formel der Endbevorratung ergeben sich die zukünftigen Ausfälle in den einzelnen Monaten des Bevorratungszeitraums.

Auffallend bei dem hier betrachteten Mobiltelefon ist, dass in den ersten Monaten kein deutliches Frühausfallverhalten zu beobachten ist. Der bei den meisten Untersuchungen auftretende Wechsel vom Frühausfallverhalten hin zum stochastischen Auftreten von Fehlern findet hier kaum statt. Sehr deutlich fällt hingegen die Abnahme des Lageparameters  $\alpha$  aus, was für eine deutliche qualitätsrelevante Verbesserung des Mobiltelefons steht. Zwischen den Monaten Juni 2006 und April 2007 liegt, wie in der folgenden Tabelle 5-9 zu entnehmen, ein Faktor 110 bezüglich des Lageparameters. Kleinere Schwankungen zwischen den einzelnen Produktionsmonaten können durch Änderungen in der Produktion, Qualitätsveränderungen von Zulieferteilen oder Belieferung durch unterschiedliche Herstellungsstandorte entstehen.



Die monatsbasierten Endbevorratungsmengen werden mit einem zeitlichen Verzug, welcher sich durch den Einfluss des Zulassungsverzugs ergibt, dargestellt. Dabei wird mit einer durchschnittlichen Verzugszeit von 3 Monaten gerechnet. Diese drei Monate werden auf den eigentlichen Bevorratungszeitraum aufgerechnet, um auch Kunden mit fehlerhaftem Gerät einen Ersatz bieten zu können, falls Ihr Gerät einen erheblichen Zulassungsverzug aufweist. Für das hier untersuchte Mobiltelefon ergeben sich die in Tabelle 5-10 aufgeführten Verzugszeiten.

**Tabelle 5-10: Verzugszeiten für das Beispiel Endbevorratung**

Produktions- monat	$\mu$	$\sigma$	30 Tage (in %)	60 Tage (in %)	90 Tage (in %)	120 Tage (in %)
Jun. 06	3,487	0,714	45	80	92	97
Jul. 06	3,789	0,652	28	68	86	94
Aug. 06	3,886	0,663	23	62	82	91
Sep. 06	3,965	0,593	17	59	82	92
Okt. 06	3,910	0,536	17	63	86	95
Nov. 06	3,927	0,498	15	63	87	96
Dez. 06	3,635	0,429	29	86	98	100
Jan. 07	3,633	0,533	33	81	95	98
Feb. 07	3,736	0,450	23	79	96	99
Mrz. 07	3,509	0,432	40	91	99	100
Apr. 07	3,474	0,381	42	95	100	100

Nach Ermittlung der monatsbasierten Endbevorratungsmengen kann die Gesamtbevorratungsmenge durch Aufsummieren berechnet werden. Wie in diesem Beispiel zu sehen ist, müssen 2.219 Ersatzgeräte für den 12-monatigen Endbevorratungszeitraum zusätzlich produziert werden. Wird davon ausgegangen, dass viele Endnutzer zu jeder Vertragsverlängerung ein neues, vom Provider subventioniertes Mobiltelefon bestellen, sind Bevorratungszeiträume von mehreren Jahren oder Jahrzehnten, wie sie in der Automobilindustrie üblich sind, nicht notwendig.

Ausnahmen können hochkomplexe Smartphones bilden, welche in Form von Großkundenverträgen an Organisationen oder Firmen verkauft werden und dort für den täglichen Betriebsablauf benötigt werden.

Der hier gezeigte Ablauf für die Berechnung von Endbevorrattungsmengen wurde im Rahmen dieser Arbeit für neun Mobiltelefone aus drei verschiedenen Market Units durchgeführt. Dabei wurden ca. 3 Mio. Datensätze gesichtet, sortiert, plausibilisiert und anschließend zuverlässigkeitstechnisch begutachtet. Dabei stellte sich im Laufe der Untersuchungen heraus, dass der Arbeitsaufwand im Vergleich zu den bisherigen Methoden sehr hoch ausfällt. So muss zum Beispiel beachtet werden, dass für jeden Produktionsmonat eine Einzelprognose durchgeführt werden muss. Bei einem Mobiltelefon mit 24 Monaten Serienproduktion bedeutet dies 24 Einzelprognosen, welche zwar automatisiert durchgeführt werden können, jedoch immer noch der Begutachtung eines Experten bedürfen. Weiterhin fällt auf, dass bei Produkten, welche nur für wenige Monate in Serie hergestellt werden (manchmal nur 6 Monate), zum Analysezeitpunkt für die Endbevorrattung, welcher in der Regel drei bis vier Monate vor dem tatsächlichen Serienende liegt, kaum verwertbare Garantiedaten vorliegen. Dies liegt an dem schon angesprochenen Problem der Verzugszeiten, welches in Abschnitt 5.3 ausführlich dargestellt wurde.

Die Bestimmung von Endbevorrattungsmengen im Bereich der Mobilien Telekommunikation ist also grundsätzlich möglich, wenngleich sie mit einem hohen Zeitaufwand verbunden ist. Weiterhin kann die Güte der Vorhersage von folgenden Einflussfaktoren abhängig sein:

- Anzahl der Garantiedaten,
- Qualität der Garantiedaten,
- Homogenität der Garantiedaten,
- Verzugszeiten (abhängig von Gerätetyp, Land, Kultur, Provider, etc.),
- Dauer der Serienproduktion.

Weitere Einsatzmöglichkeiten, welche sich auf die im Prognosemodell errechneten Zuverlässigkeitskenngrößen beziehen, werden im nachfolgenden Abschnitt dargestellt.

## **5.7 Einsatzmöglichkeiten im Bereich Mobilfunk**

Um den hohen zeitlichen Aufwand für die Durchführung von Zuverlässigkeitsprognosen besser zu nutzen, können die berechneten Zuverlässigkeitskenngrößen, wie zum Beispiel die Ausfallwahrscheinlichkeit oder die Ausfallrate neben der Begutachtung der Zuverlässigkeit des Produkts auch dazu herangezogen werden, um Fragestellungen mit qualitätsrelevantem oder wirtschaftlichem Hintergrund zu beantworten. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sollen im Folgenden vorgestellt werden.

### **Berechnung von Garantie- oder Gewährleistungskosten**

Die in der heutigen Zeit gesetzlich vorgeschriebene Gewährleistung sowie die durch den Hersteller freiwillig gewährte Garantie spielen bei der Ressourcenplanung eine erhebliche Rolle. Während die Gewährleistung nur bei produktions- oder entwicklungsbedingten Mängeln durch den Hersteller greift, müssen in der Garantiezeit nahezu alle Mängel durch den Hersteller abgestellt werden (ausgenommen solche durch Falschbedienung, vorsätzliche Beschädigung oder Ähnliches). Die Bearbeitung der auftretenden Mängel kann bei einem unzuverlässigen Produkt zu sehr hohen Kosten führen, welche frühzeitig eingeplant werden müssen. Ist ein Produkt hingegen äußerst zuverlässig, kann der Hersteller überlegen, die freiwillige Garantiezeit zu verlängern. Damit erlangt er eventuell einen Vorsprung gegenüber seinen Konkurrenten, indem er diesen Mehrwert für den Kunden gut vermarktet. Zu sehen ist diese Strategie derzeit im Bereich der Automobilindustrie, wo manche Hersteller mittlerweile 7 Jahre Garantie auf Ihr Fahrzeug geben, während der Regelwert bei zwei Jahren liegt. Wie in [Pau 98] zu lesen ist, kann im Bereich der elektronischen Steuergeräte, welche in der Regel ein erhebliches Frühausfallverhalten aufweisen, eine Garantieverlängerung von zwei auf drei Jahre nur 0,03% bis 0,06% Mehrkosten mit sich bringen.

Eine Garantieverlängerung kann folglich für Komponenten, deren Ausfallverhalten aufgrund von Untersuchungen bekannt ist, durchgeführt werden, wenn der Marketingvorteil größer ist als die zusätzlich anfallenden Kosten.

Im Folgenden wird die Garantiezeit durch  $t_g$ , die zu erwartenden Garantiefälle durch  $n_a(t_g)$  und die Ausfallwahrscheinlichkeit bis zum Ende der Garantiezeit durch  $F(t_g)$  dargestellt. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Garantiekosten  $K(t_g)$  im Gegensatz zu den Herstellungskosten deutlich höher liegen können. Aufgrund von Lager-, Transport-, Werkstatt- und Verwaltungskosten können die gesamten Garantiekosten um das Fünffache höher liegen als die eigentlichen Herstellungskosten. Diese zusätzlichen Kosten werden durch den Korrekturfaktor  $k$  in die Rechnung einbezogen.

Für die allgemeine Berechnung der Garantiekosten  $K(t_g)$  folgt:

$$K(t_g) = k \cdot n_a(t_g) = k \cdot n_0 \cdot F(t_g).$$

Wird die Garantiezeit um den Faktor  $c$  ( $c > 1$ ) verlängert, so sind die Kosten für die erweiterte Garantiezeit durch

$$K(c \cdot t_g) = k \cdot n_a(c \cdot t_g) = k \cdot n_0 \cdot F(c \cdot t_g)$$

gegeben.

Für die Mehrkosten  $\Delta K$  der Verlängerung der Garantiezeit gilt:

$$\Delta K = K(c \cdot t_g) - K(t_g) = k \cdot n_0 \cdot [F(c \cdot t_g) - F(t_g)].$$

Unter Verwendung dieser einfachen Zusammenhänge können wertvolle Informationen an das Management weitergegeben werden, um eventuell bevorstehende Garantiezeitverlängerungen quantitativ zu beurteilen.

### **Garantiebetrug**

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist die Aufdeckung von Garantiebetrug, welcher im Bereich der Reparatur von Mobiltelefonen weit verbreitet ist. Da die meisten Hersteller von Mobiltelefonen keine oder nur sehr wenige Reparaturzentren haben, werden fehlerhafte Geräte von Vertragswerkstätten repariert. Dabei kommt es immer wieder vor, dass zusätzlich zu den eigentlichen Fehlern weitere Bauteile getauscht oder angeblich repariert werden. So kann es zum Beispiel sein, dass ein Mobiltelefon aufgrund eines Softwarefehlers Verbindungsprobleme hat. Die beauftragte Werkstatt nutzt nun als Abstellmaßnahme nicht nur das Flashen (Neuaufspielen) der Software, sondern tauscht noch weitere Bauteile aus und behauptet im Reparaturprotokoll, diese Bauteile seien ebenfalls fehlerhaft gewesen. Folglich kann die Werkstatt dem Hersteller höhere Reparaturkosten in Rechnung stellen. Aufgrund der Vielzahl an Vorgängen haben die Hersteller von Mobiltelefonen nur sehr wenige Möglichkeiten, einen solchen Garantiebetrug aufzudecken.

Die Berechnung von Zuverlässigkeitskenngrößen, basierend auf einem Zuverlässigkeitsprognosemodell, kann für diese Problematik ein Ansatz sein, wenn eigene Reparaturzentren oder Vertrauenswerkstätten vorhanden sind, deren Garantiefälle ausgewertet werden können. Die dort ermittelten Zuverlässigkeitskenngrößen können dann als Referenzwerte herangezogen werden, wenn der Verdacht eines weitreichenden Betrugs naheliegt. Dazu müssen die werkstattbezogenen Zuverlässigkeitskenngrößen für das entsprechende Mobiltelefon ebenfalls berechnet und anschließend mit den Referenzwerten verglichen werden. Liegt die verdächtige Werkstatt zum Beispiel mit der Ausfallwahrscheinlichkeit deutlich über der Referenzausfallwahrscheinlichkeit, so können weitere Maßnahmen eingeleitet werden. Allein das Vorhandensein dieser Möglichkeit und das Wissen der Werkstätten über die regelmäßigen Kontrollmaßnahmen könnten zu einem Rückgang der Betrugsfälle führen.

### **Berechnung von Reparaturkapazitäten und Call Center Auslastungen**

Bei der vorhergehenden Betrachtung des Garantiebetrugs wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Hersteller von Mobiltelefonen keine oder nur sehr wenige eigene Reparaturzentren besitzen. Vielmehr kaufen sie Kapazitäten von Werkstätten und großen Elektronikdienstleistern ein, um die anfallenden fehlerhaften Geräte zu reparieren. Von großer Bedeutung ist in diesem Fall die Vorhersage von anfallenden Reparaturen, um gegebenenfalls Reparaturkapazitäten zusätzlich aufzubauen oder zu verringern. Da einige Elektronikdienstleister für mehrere Mobiltelefonhersteller arbeiten und somit Ressourcen genau planen, können Engpässe bei der Bearbeitung von Garantiefällen zu einer erheblichen Kundenzufriedenheit führen. Ist jedoch die Gesamtmenge der sich im Feldeinsatz befindlichen Mobiltelefone innerhalb eines Landes, einer Market Unit oder einer Sales Region bekannt und können Aussagen über die Zuverlässigkeit des Produktes getroffen werden, ist eine genauere Kalkulation über den Auslastungsgrad der betroffenen Reparaturzentren möglich.

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung des Zuverlässigkeitsprognosemodells kann die Nutzung von Zuverlässigkeitskenngrößen bei der Prognose von Call Center Auslastungen sein. Auch dieser Service wird meistens von externen Firmen durchgeführt und muss von den Mobiltelefonherstellern geplant werden. Dabei müssen bei den Dienstleistern Kapazitäten gebucht werden, die dann exklusiv für die jeweiligen Produkte zur Verfügung stehen. Die Call Center geben dann telefonisch Informationen zu Produkten oder helfen bei kleineren technischen Problemen. Dies kann zum Beispiel das Einrichten von mobilem Internet auf dem Mobiltelefon oder die Synchronisation zwischen Telefon und PC des Nutzers sein. Die Berechnung der optimalen Auslastung hängt daher nicht nur von auftretenden Garantiefällen ab, sondern wird unter Anderem durch folgende Gegebenheiten beeinflusst:

- Aktuelle Produkte im Feld,
- technische Probleme mit externen Softwareherstellern,
- Marketingaktionen,
- Saisonalität (Vor-/ Nachweihnachtsgeschäft),
- Kultur des Landes,
- technische Neuerungen.

All diese Faktoren spielen bei der Auslastungsberechnung eine erhebliche Rolle und müssen daher berücksichtigt werden. Es ist offensichtlich, dass das offensive Werben für ein neues Mobiltelefon, welches sich ggf. durch neue technische Innovationen vom restlichen Markt abhebt und einen hohen Komplexitätsgrad besitzt, zu einem erhöhten Aufkommen von telefonischen Auskünften führt. Ist das Call Center Management in der Lage solche Einflüsse zu modellieren, können zu geringe oder überflüssige Kapazitäten vermieden werden.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Nutzungsmöglichkeiten sollen zeigen, dass die zuverlässigkeitstechnische Untersuchung von Mobiltelefonen einen erheblichen Mehrwert mit sich bringt. Trotz des Aufwands bei der Generierung, Sortierung, Plausibilisierung und mathematischen Auswertung der Garantiedaten ergeben sich neue Möglichkeiten, um die Planung von Kapazitäten im Bereich Produktion und Logistik zu verbessern. Dies kann zu deutlichen Kosteneinsparungen führen.

## 6 Automatisiertes Prognosetool

Das Wuppertaler Zuverlässigkeitsprognosemodell hat sich, wie bereits in mehreren Untersuchungen bewiesen, im automobilen Sektor zur Vorhersage von Zuverlässigkeitskenngrößen bewährt, wie u.a. in [Pau 98], [MMe 03] und [Bra 05] zu entnehmen ist. Bislang konnte jedoch nur ein auf der mathematischen Programmiersprache Mathematica basierendes Modell für derartige Vorhersagen genutzt werden. Die Programmiersprache Mathematica bietet dabei den großen Vorteil, das Modell sehr flexibel und ohne großen Zeitaufwand abzuändern. Dadurch ergeben sich für den mathematisch versierten Nutzer vielfältige Möglichkeiten. Der Nachteil einer solchen Flexibilität ist die Darstellung des Programms, welche freien Zugriff auf den Programmcode zulässt und daher im operativen Geschäft von Firmen ungeeignet ist. Mathematica ist als Programmiersprache nicht darauf ausgelegt, eine Office-ähnliche Bedieneroberfläche zu bieten. Beispielsweise ist der Programmcode offen zugänglich und dadurch sehr fehleranfällig, falls dort fälschlicherweise Leerzeichen oder andere Operatoren eingefügt werden.

Ziel war es daher, ein Prognosetool zu entwickeln, welches auch dem mathematisch nicht versierten Nutzer die Möglichkeit bietet, nach einer kurzen Schulung Zuverlässigkeitsprognosen selbst durchzuführen. Dazu wurde das mit Mathematica erstellte Modell in einen C-basierten Code überführt, um es daraufhin mit der Software Sybase zu einem vollwertigen „Stand-alone-Tool“ zu entwickeln.

Wie aus Abbildung 6-1 hervorgeht, basiert das Tool auf einer Benutzeroberfläche, welche die Auswahl jedes einzelnen Arbeitsschrittes ermöglicht. Startet der Nutzer ein neues Projekt, so öffnet sich das Arbeitsfenster „Optimization of data“, welches die Auswahl der gewünschten Garantiedatenbank, der zugehörigen Garantiezeit und der Begrenzung der größten Fahrleistung zulässt. Nach obiger Auswahl liest das Tool den Datensatz eigenständig ein und zeigt unter „Total rows“ die Anzahl der Datensätze an, welche für die Prognose zur Verfügung stehen; im hier dargestellten Beispiel 1600.

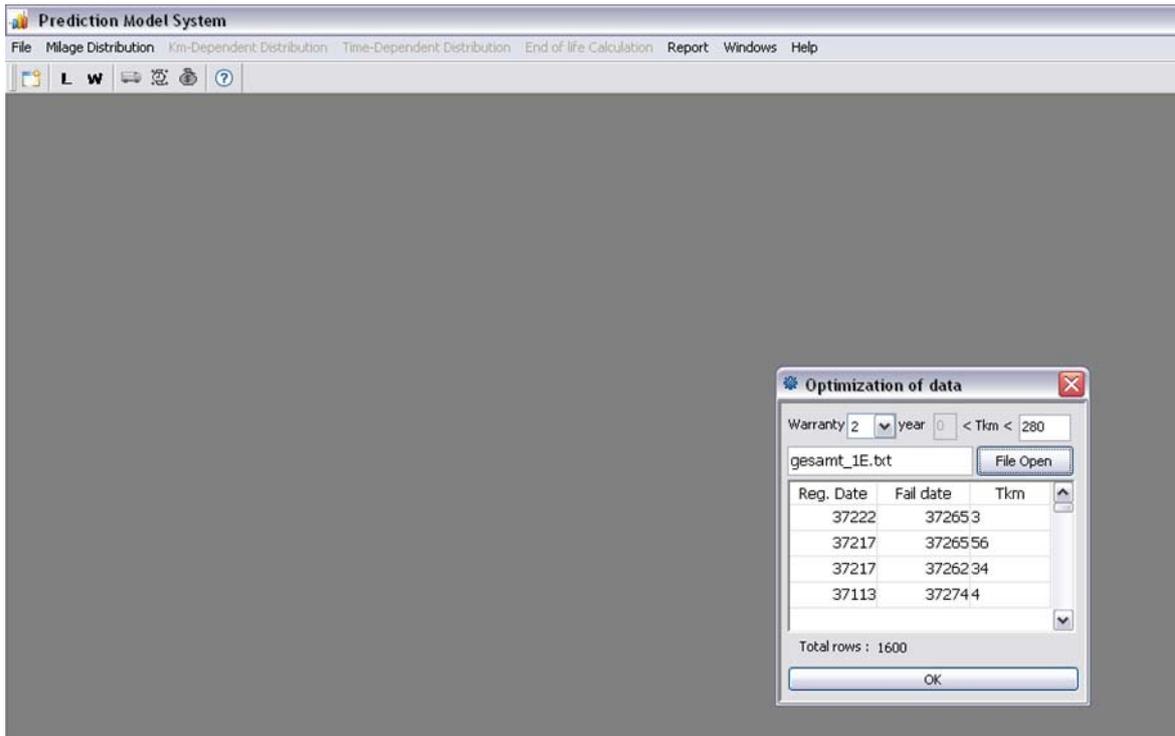


Abbildung 6-1: Benutzeroberfläche

Nach dem Einlesen der Daten hat der Nutzer die Möglichkeit, die Fahrleistungsverteilung sowohl durch eine Lognormal-, als auch durch eine Weibull-Verteilung darstellen zu lassen. Startet er das entsprechende Modul, so sortiert das Prognosetool die unplausiblen oder falschen Datensätze. Unter anderem werden Datensätze nicht berücksichtigt, bei denen das Ausfalldatum vor dem Produktionsdatum liegt oder deren Fahrleistung während der Garantiezeit die eingestellte Grenze überschreitet. Danach startet der eigentliche Analyseprozess zur Bestimmung der Fahrleistung, wobei der Nutzer die Möglichkeit hat, zwischen einer Weibull-Verteilung sowie einer Lognormalverteilung auszuwählen.

Wird eine Lognormalverteilung vorgegeben, so hat der Nutzer zwei Möglichkeiten, um die zugehörigen Parameter  $\mu$  und  $\sigma$  schätzen zu lassen. Zum einen über das Verfahren der Maximum-Likelihood-Methode, welche nach Starten der Kalkulation automatisch abläuft. Zum anderen bietet das Tool die Möglichkeit, eine optische Anpassung mittels grafischem Wizard durchzuführen. Dazu wird die theoretische Funktion mit den beiden Slidern für  $\mu$  und  $\sigma$  manuell so lange verändert, bis optisch eine gute Anpassung erreicht ist. Die Summe der Abweichungsquadrate

(SSE) für beide Methoden hilft bei der Auswahl des Parameterschätzverfahrens. Neben der Verteilungsfunktion (Cumulative density function, CDF) wird auch die Dichtefunktion (Probability density function, PDF) im Arbeitsfenster angezeigt. Um die Güte der Anpassung auch grafisch darzustellen, wird ein Q-Q-Plot sowie das zugehörige Bestimmtheitsmaß ausgegeben, welche die Abweichungen der theoretischen von den empirischen Werten darstellen. Zudem werden in der Tabelle „Results“ alle wichtigen Daten der ermittelten theoretischen Fahrleistungsverteilung und der Rohdaten zusammengefasst. Abbildung 6-2 zeigt das Arbeitsfenster für die Ermittlung der Fahrleistungsverteilung unter Verwendung einer Lognormalverteilung.

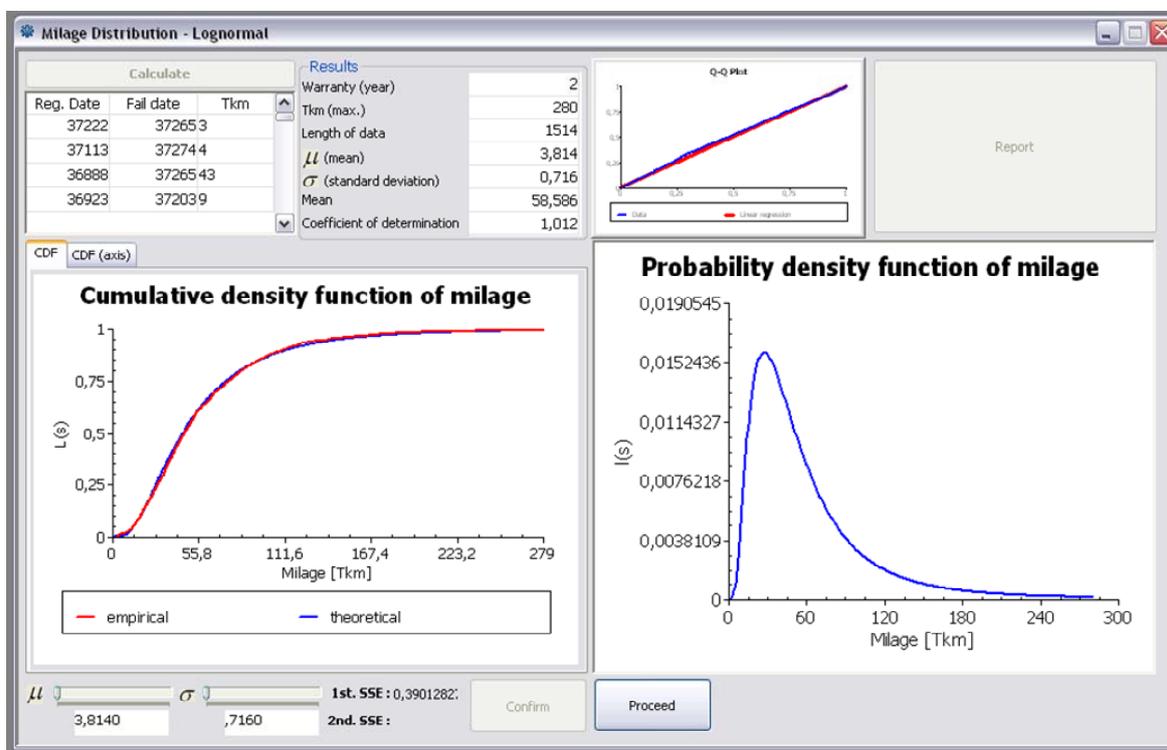


Abbildung 6-2: Bestimmung der Fahrleistungsverteilung mittels Lognormalverteilung

Wird anstelle der Lognormalverteilung eine Weibull-Verteilung ausgewählt, so ändert sich zum vorhergehend erklärten Ablauf die Parameterschätzung. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, eignet sich die Methode der kleinsten Quadrate zur Schätzung der Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  der zweiparametrischen Weibull-Verteilung. Dabei werden die Startwerte mit Hilfe der linearen Regression ermittelt. Neuartig

bei der Parameterschätzung des Prognosetools ist die Verwendung eines evolutionären Algorithmus [Hau 08]. Dabei werden, wie bei der Methode der kleinsten Quadrate, zuerst Startwerte unter Verwendung der linearen Regression ermittelt. Diese Startwerte werden daraufhin mit dem evolutionären Algorithmus optimiert. Die Methode basiert dabei auf einem iterativen Verfahren, welches Parameter-tupel zusammenstellt, die Abweichungsquadrate zur empirischen Funktion bestimmt und daraufhin weiter optimiert. Die Optimierung kann unter anderem durch Kombination, Mutation oder Selektion erfolgen.

Wie auch im Arbeitsfenster der Lognormalverteilung kann bei der Weibull-Verteilung eine grafische Anpassung mittels Wizard durchgeführt werden, falls die rechnerische Anpassung der empirischen Daten nicht zufriedenstellend ist. Eine Güte der Anpassung ist grafisch über den bereits erwähnten Q-Q-Plot sowie rechnerisch über das Bestimmtheitsmaß gegeben.

Die nachfolgende Abbildung 6-3 zeigt das Arbeitsfenster für die Fahrleistungsverteilung mittels Weibull-Verteilung.

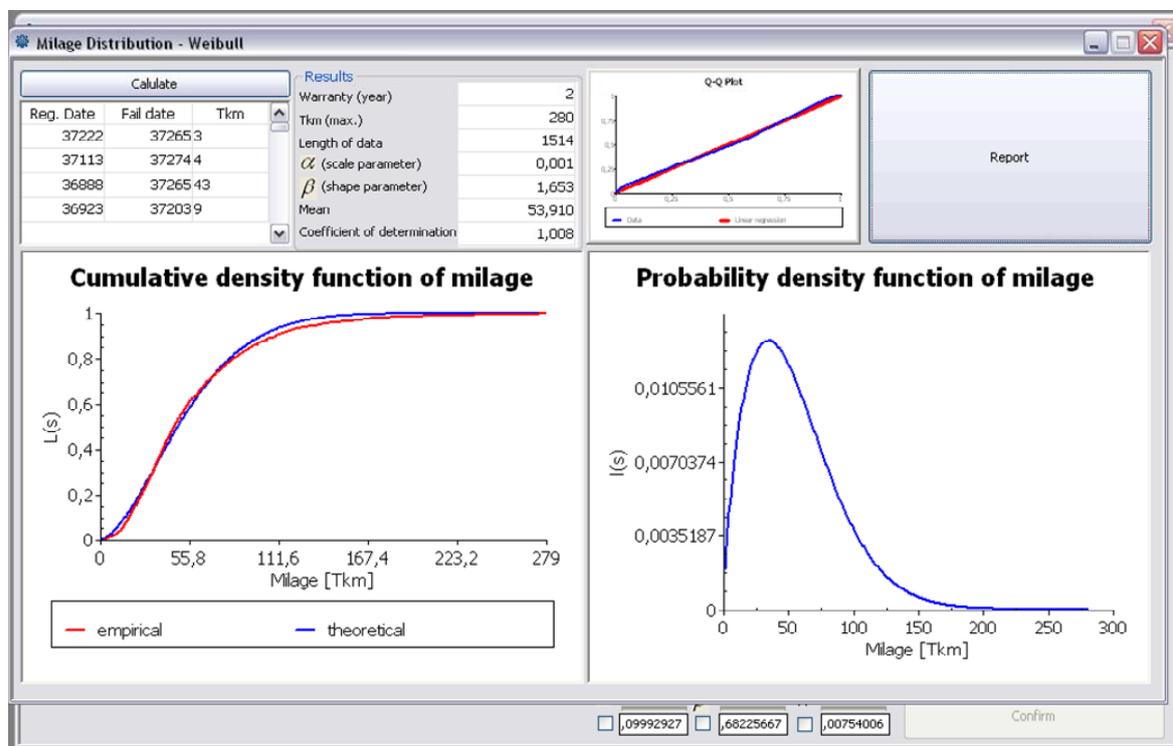


Abbildung 6-3: Bestimmung der Fahrleistungsverteilung mittels Weibull-Verteilung

Nach Bestimmung der Fahrleistungsverteilung können die km-abhängigen Zuverlässigkeitskenngrößen bestimmt werden. Dazu muss der Menüpunkt „Km-Dependent Distribution Function“ ausgewählt werden. Es öffnet sich das in Abbildung 6-4 gezeigte Arbeitsfenster, in welches zuerst die Gesamtproduktionsmenge für den betrachteten Produktionszeitraum und ein Korrekturfaktor eingetragen werden müssen. Der Korrekturfaktor betrachtet dabei das Verhältnis zwischen allen Ausfällen im Feld und Ausfällen, die zum Zulieferer zurückgeschickt, analysiert und in der Prognose verwendet werden können. Oft werden aus Kostengründen nur 10% bis 20% der ausgefallenen Geräte zurückgeschickt. Würden nur diese Geräte ohne Korrektur in die Prognose einfließen, könnte die Ausfallwahrscheinlichkeit erheblich unterschätzt werden. Nach Eintragung der erforderlichen Daten startet das Prognosetool die Berechnung der relativen sowie der korrigierten relativen Summenhäufigkeit. Weiterhin wird die korrigierte relative Summenhäufigkeit durch eine Weibull-Verteilung angepasst. Wie schon bei der Fahrleistungsverteilung ist auch bei diesem Schritt eine grafische Anpassung über Wizard möglich. Das Tool ermöglicht außerdem die Verwendung eines Teilpopulationsmodells, welches eine Erweiterung der Weibull-Verteilung erforderlich macht. Die Güte der Anpassung kann erneut durch das Ablesen des Q-Q-Plots bestimmt werden.

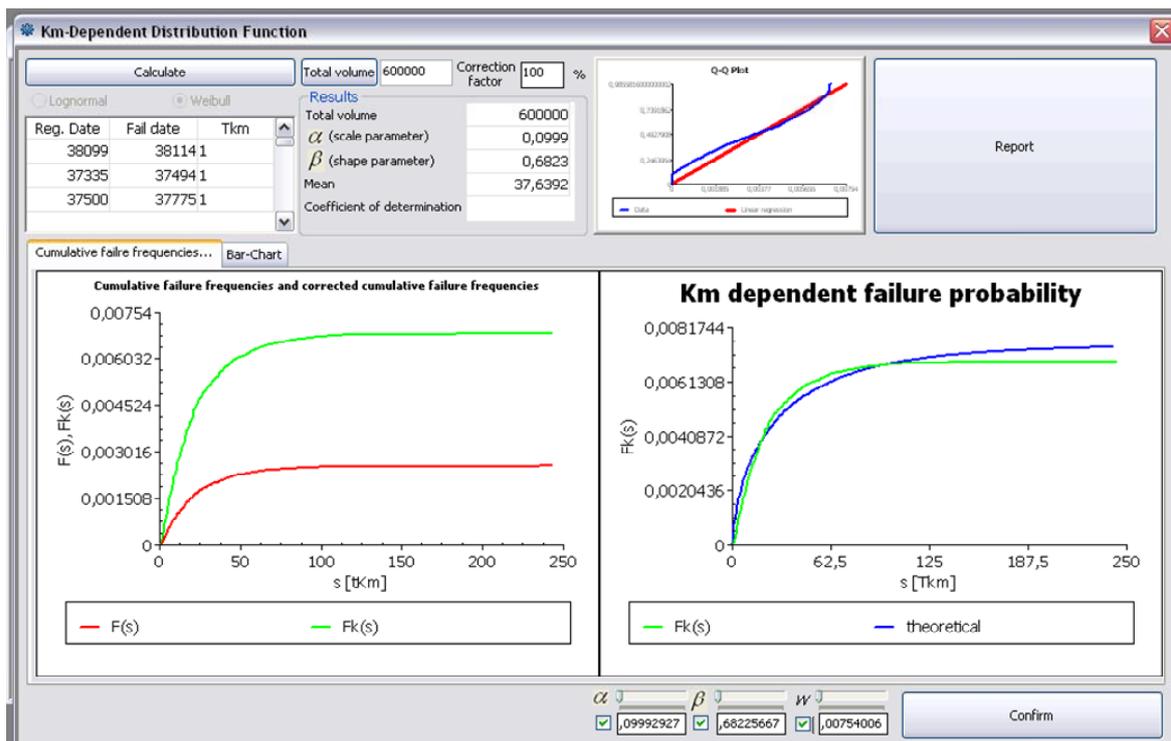


Abbildung 6-4: Bestimmung der km-abhängigen Ausfallwahrscheinlichkeit

Nach Festlegung der ermittelten Parameter kann der nächste Menüpunkt „Time-Dependent Distribution Function“ über die Benutzeroberfläche gestartet werden. Es öffnet sich das nachfolgend dargestellte Fenster zur Bestimmung der zeitabhängigen Zuverlässigkeitskenngrößen. Die Umrechnung aus den km-abhängigen Kenngrößen erfolgt analog zum Standardprognosemodell und kann sowohl auf Basis der Fahrleistungsverteilung mittels Lognormalverteilung, als auch auf Basis der Weibull-Verteilung durchgeführt werden. Nach der Berechnung werden die Punktwerte der Ausfallwahrscheinlichkeiten für die Zeitpunkte  $t = (1,2,3,\dots,15)$  Jahre ausgegeben. Zudem wird eine grafische Darstellung der zeitabhängigen Ausfallwahrscheinlichkeit, der zugehörigen Ausfallrate und der Ausfalldichte angezeigt.

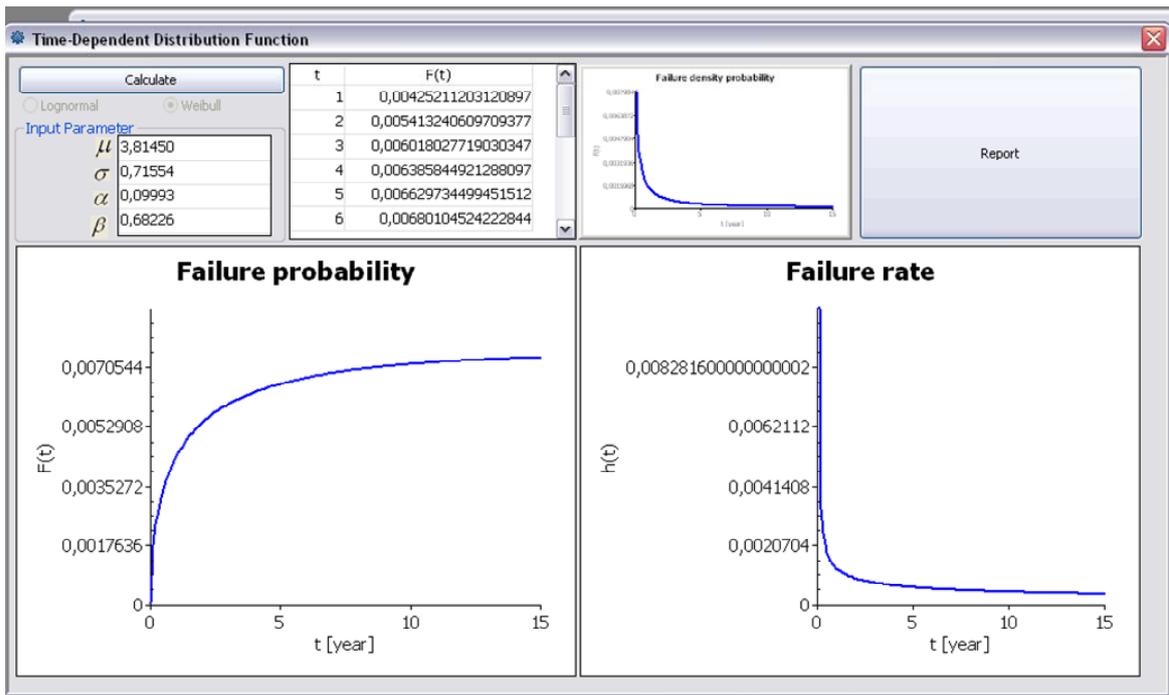


Abbildung 6-5: Bestimmung der zeitabhängigen Zuverlässigkeitskenngrößen

Die so berechneten Zuverlässigkeitskenngrößen werden im letzten Schritt für die Berechnung der Endbevorratungsmenge verwendet. Dazu muss das Arbeitsfenster „End of life – calculation“ geöffnet werden. Der Nutzer hat dort die Möglichkeit, die Produktionsmengen der einzelnen Produktionsjahre einzugeben. Weiterhin muss der Zeitraum angegeben werden, für welchen die Endbevorratung durchgeführt werden soll. Nach der Eingabe berechnet das Prognosetool automatisch den Bedarf für die einzelnen Produktionsjahre. Zudem wird der Gesamtbedarf ausgegeben.

Abbildung 6-6 zeigt das Arbeitsfenster „End of life – calculation“ mit dem errechneten Endbevorratungsbedarf des Beispiels.

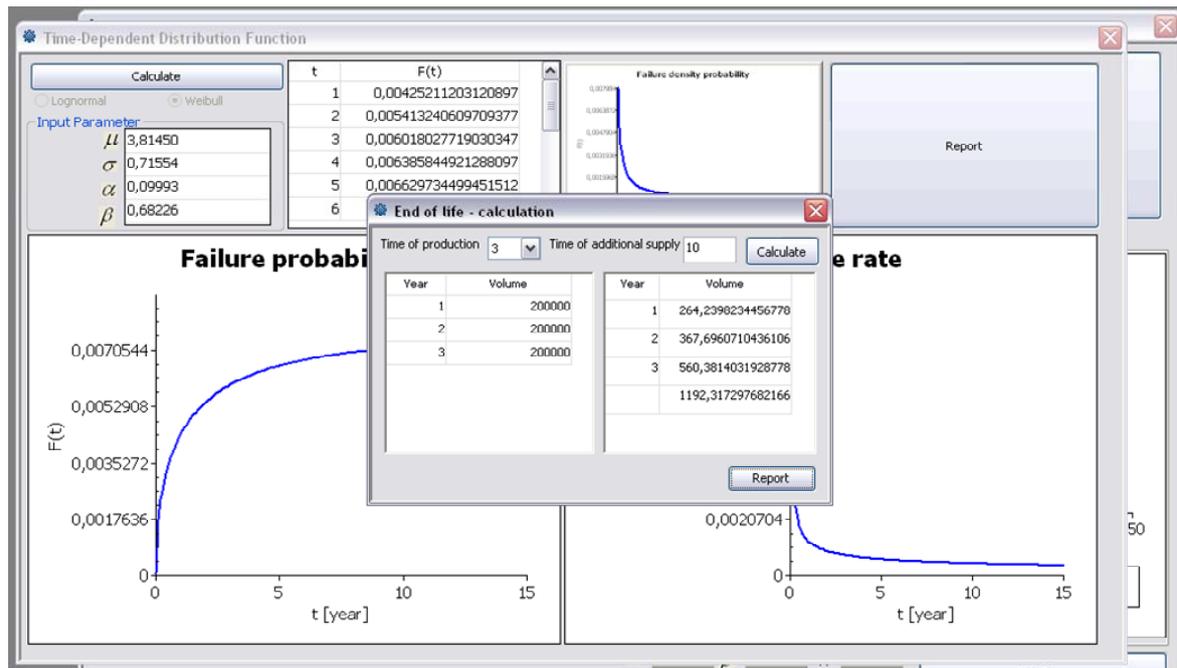


Abbildung 6-6: Berechnung der Endbevorratungsmenge

Das hier vorgestellte Prognosetool wird, begleitet von einigen Weiterentwicklungen, seit ca. zwei Jahren in der Praxis bei einem bedeutenden Automobilzulieferer angewendet, um im Feld befindliche Komponenten zuverlässigkeitstechnisch zu betrachten und diese Informationen für Fragestellungen bezüglich Endbevorratung und Garantiekosten zu verwenden. Dabei hat sich gezeigt, dass auch Mitarbeiter ohne ausgeprägte Mathematikkenntnisse kaum Probleme haben, das Tool zu bedienen und die entsprechende Vorarbeit bei der Datenaufbereitung durchzuführen. Bereits nach einem eintägigen Workshop und einer kurzen Einarbeitungszeit sind eigenständige Prognosen möglich. Problematisch kann jedoch sein, dass heterogene Ausfalldaten oder andere Besonderheiten auftreten, die nur von gut geschulten Mitarbeitern erkannt werden können. Eine Plausibilisierung der Ergebnisse durch Experten, welche sowohl das Prognosetool als auch das zu untersuchende Produkt kennen, ist daher immer anzuraten.

Neben dem Einsatz im automobilen Bereich wurde das Wuppertaler Prognosetool auch bei der zuverlässigkeitstechnischen Untersuchung von Mobiltelefonen eingesetzt. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die Datensortierung und -auswahl gelegt, um in Datenbanken gespeicherte Garantiedaten direkt einfließen

zu lassen. Die zeitaufwändige Sortierung der Daten konnte folglich direkt im Prognosetool durchgeführt werden. Notwendig war dieser Schritt aufgrund der zum Teil erheblichen Datenmengen, welche durch handelsübliche Office-Produkte, wie zum Beispiel Microsoft Excel, nicht mehr durchgeführt werden konnten. Nach der Sortierung und Validierung der Ausfalldaten wurden diese im Programm an das Rechenmodul übergeben, welches stark dem automobilen Rechenmodul ähnelt. Die weitere Bearbeitung der Ausfalldaten erfolgt analog zu Abschnitt 5.4.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die praktische Anwendung sowie Weiterentwicklung von Zuverlässigkeitsprognosemodellen, mit besonderer Berücksichtigung der spezifischen Gegebenheiten im Bereich der mobilen Telekommunikation, war die Motivation für die Erstellung dieser Arbeit. Dabei sollte besonders der praktische Aspekt im Vordergrund stehen, um nicht an den Herausforderungen der Praxis vorbei zu forschen.

Neben den bereits bestehenden Prognosemodellen im Bereich der Automobilindustrie, welche nur auf die Bedürfnisse der automobilen Telekommunikation abgestimmt werden mussten, stand die Weiterentwicklung der Modelle für eine Anwendbarkeit im operativen Geschäft der Mobiltelefone im Vordergrund.

Die Notwendigkeit neuer Untersuchungen wurde in Kapitel 2 angesprochen, da es zu Beginn dieser Arbeit nur wenige Veröffentlichungen im Bereich der mobilen Telekommunikation gab, die sich mit der Verknüpfung von Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit beschäftigen. So konnte nach intensiven Recherchen festgestellt werden, dass Zuverlässigkeitsuntersuchungen mit Hilfe eines Prognosemodells bisher noch nicht zur Anwendung kommen.

In Kapitel 3 wurde die mobile Telekommunikation mit ihren zwei Teilbereichen „Automobile Telekommunikation“ und „Mobiltelefone“ vorgestellt. Dabei sollte besonders die Wichtigkeit der mobilen Telekommunikation für unsere heutige Gesellschaft herausgestellt werden. Weiterhin wurde beschrieben, wie sich Telekommunikationseinrichtungen in den letzten 20 Jahren zu hochkomplexen Alleskönnern entwickelten, was erhebliche Ansprüche an Funktionalität und Zuverlässigkeit nach sich zog. Dies zeigte sich im Abschnitt 3.1.2, in welchem auf die Funktionalität von Autotelefonen und Freisprecheinrichtungen eingegangen wurde. Interessant war bei der Betrachtung der technologischen Entwicklung, dass bereits um das Jahr 2000 Funktionen wie automatischer Notruf oder Internet im Fahrzeug verfügbar waren, der Markt jedoch noch nicht reif für diesen hohen Grad der Technisierung war. Erst mehrere Jahre später wurden die bereits entwickelten Zusatzfunktionen wieder dem Kunden angeboten, sodass zum Beispiel im Jahr 2009 von der Europäischen Union angedacht wurde, den automatische

Notruf im Falle eines Unfalls als nützliche Sicherheitseinrichtung in Neuwagen verpflichtend zu fordern [web 7].

In Abschnitt 3.2 wurde der Bereich der Mobiltelefone vorgestellt. Dabei fiel auf, dass sich die technische Evolution der Mobiltelefone in den letzten 20 Jahren eminent schnell entwickelte und folglich in der heutigen Zeit multimediale Alleskönner im Hosentaschenformat zur Verfügung stehen. Wie schon bei der Vorstellung der Telematikeinheiten und Freisprecheinrichtungen, führte diese Entwicklung zu hochkomplexen Mobilfunklösungen. Im weiteren Verlauf wurden der Themenbereich Supply-Chain-Management sowie die in der Mobilfunkbranche auftretenden Herausforderungen erläutert. Insbesondere die kurzen Entwicklungszeiträume sowie die große Anzahl an gleichzeitig auf dem Markt befindlichen Mobiltelefontypen konnten als Problem dargestellt werden. Zudem wurde auf die vorhandene Datenstruktur sowie die zugehörige Quantität der Garantiedaten eingegangen, da diese für die Durchführung einer Zuverlässigkeitsprognose zwingend notwendig sind. Um eine Abgrenzung des angewendeten Modells zu geben, erfolgte eine Vorstellung der bisherigen Ansätze im Bereich des SCM. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass das Nichtbeachten des Ausfallverhaltens bei der Prognose von Ersatzteilmengen zu erheblichen Abweichungen führen kann, falls kein konstantes Ausfallverhalten vorliegt.

Die Anwendung des Zuverlässigkeitsprognosemodells im automobilen Bereich wurde in Kapitel 4 anhand einiger praktischer Beispiele gezeigt. Unter anderem erfolgte die Analyse eines speziellen Softwarefehlers, der bei einer Telematikeinheit auftrat. Dieser Fehler konnte erst mit Einführung eines speziellen Datenloggers, welcher den Zustand der Software zu bestimmten Betriebszuständen der Telematikeinheit überwachte, detektiert werden. Nach Auswertung der Daten zeigte sich, dass auch das Ausfallverhalten eines Softwarefehlers anhand des Prognosemodells analysiert werden konnte, sofern entsprechende Daten verfügbar waren.

Die Anwendung von Zuverlässigkeitsprognosemodellen im operativen Geschäft wurde in Abschnitt 4.3 dargestellt und mit Hilfe einiger praktischer Beispiele verdeutlicht. Dabei fiel besonders die wirtschaftliche Bedeutung auf, nachdem bereits vorhandene Ausfalldaten systematisch analysiert worden waren. Mehr als

2 Mio. Euro konnten alleine im Bereich der Produktionskosten aufgrund einer genau kalkulierten Endbevorratungsmenge eingespart werden. Wären die vermiedenen Gesamtgarantiekosten berechnet worden, so wären die erzielten Einsparungen deutlich höher ausgefallen. Mit der Vorstellung einer Erweiterung des bestehenden Modells um den Einfluss des Kundentauschverhaltens schließt das vierte Kapitel. Zudem wurde die kalkulierte Endbevorratungsmenge einer Telematikeinheit mit den realen Verkaufszahlen von 5 Jahren Nachlieferfrist verglichen. Es stellte sich heraus, dass das Wuppertaler Prognosemodell über diesen Zeitraum lediglich wenige Prozente Abweichung aufwies.

In Kapitel 5 wurde der Fokus von der Automobilindustrie auf die Branche der Mobiltelefone gewendet, wobei zuerst Vorüberlegungen zu den spezifischen Gegebenheiten sowie die durchgeführten Datenaufbereitungen dargestellt wurden. Es zeigte sich, dass erhebliche Unterschiede zur Automobilindustrie auftraten, welche eine Anpassung des Prognosemodells erforderlich machten. Besonders die Anwärterproblematik, welche bereits bekannt war, trat im Bereich der Mobiltelefone ebenfalls auf und musste mittels neuer Ansätze berücksichtigt werden. Da Verfahren wie die Anwärterprognose nach Pauli [Pau 98] nicht anwendbar waren, wurde eine neue Vorgehensweise gewählt, welche Einzelprognosen für jeden Produktionsmonat durchführt. Dieser Ansatz stellte sich als Ziel führend heraus.

Die ebenfalls aus der Automobilindustrie bekannte Herausforderung der Verzugszeiten musste auch im Bereich der Mobiltelefone betrachtet werden. Besonders der Einfluss des Zulassungsverzugs, also der Zeit zwischen Produktion und Inverkehrbringen des Geräts beim Endkunden, war in einigen Verkaufsregionen erheblich. Anhand eines Beispiels wurde verdeutlicht, dass Produktionsmonate vorkommen können, bei denen nach zwei Monaten erst 50% der Geräte im Feldeinsatz sind. Besonders bei Produktionsmonaten, die nur wenige Monate vor Durchführung der Zuverlässigkeitsprognose lagen, konnte der Zulassungsverzug dazu führen, dass keine oder zu wenige Ausfalldaten vorhanden waren und deshalb eine Prognose nicht möglich war.

In Abschnitt 5.4 wurde eine Zuverlässigkeitsprognose, basierend auf Garantiedaten eines Mobiltelefons, durchgeführt und anhand von drei Produktionsmonate

erklärt. Dabei stellte sich heraus, dass das empirische Ausfallverhalten in allen Beispielen durch stetige Funktionen dargestellt werden konnte. Zur Anwendung kam eine zweiparametrische Weibull-Verteilung, die in den Beispielen mit Bestimmtheitsmaßen von deutlich über 99,60% angepasst werden konnte. Um die Anwendbarkeit des Modells mit Hilfe von zwei weiteren Mobiltelefonmodellen zu verifizieren, erfolgte eine zusätzliche Untersuchung, in welcher die Ausfalldaten künstlich zensiert wurden, um einen frühen Analysezeitpunkt zu simulieren. Trotz dieser Zensierung lieferte das Modell ähnliche Parameterwerte zu der Prognose der unzensierten Daten.

Nach Vorstellung und Verifizierung des Modells wurden in den nachfolgenden Abschnitten 5.6 und 5.7 die weiteren Anwendungsmöglichkeiten des Prognosemodells erörtert. Neben der Berechnung möglicher Garantiekosten oder des Serienersatzbedarfs, wurde auch die Anwendung bei der Berechnung der Endbevorratungsmengen gezeigt und durch ein praktisches Beispiel verdeutlicht. Neben diesen drei meistgenutzten Anwendungsmöglichkeiten konnten noch zwei weitere wie die Aufdeckung von Garantiebetrug oder die Berechnung von Reparaturkapazitäten erläutert werden.

Eine benutzerfreundliche Umsetzung des Zuverlässigkeitsprognosemodells, welches auch fachfremden Nutzern die Anwendungsmöglichkeit im Bereich der Ersatzteilbedarfsplanung ermöglicht, wurde in Kapitel 6 vorgestellt. Hierbei wurden die mit der mathematischen Programmiersprache Mathematica entwickelten Algorithmen in ein eigenständiges Tool implementiert, welches eine vollwertige Benutzeroberfläche bietet. Der Ablauf einer Zuverlässigkeitsprognose folgt dabei dem beschriebenen Ablauf aus Abschnitt 4.1. Die Umsetzung wurde sowohl für das automobile als auch für das mobiltelefonbezogene Prognosemodell durchgeführt. Als Vorteil erwies sich die Gegebenheit, dass auch mathematisch unversierte Nutzer nun die Möglichkeit einer Prognoseanwendung haben. Als nachteilig stellte sich heraus, dass das Modell in sich nicht veränderbar ist und daher nur mit einem gewissen Aufwand an neue Gegebenheiten angepasst werden konnte.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Zuverlässigkeitsprognosen ihre Daseinsberechtigung im Bereich der mobilen Telekommunikation haben. Besonders

im automobilen Sektor wurde die Anwendbarkeit anhand mehrerer Untersuchungen bewiesen, wobei nachweisbar mehrere Millionen Euro hinsichtlich Bevorratungsstrategien eingespart werden konnten. Auch der Umstand, dass bereits vorhandenes Datenmaterial genutzt werden konnte und somit keine weiteren Kosten entstanden, spricht für die konsequente Nutzung von Prognosemodellen im automobilen Bereich. Eine Verwendung der ermittelten Zuverlässigkeitskenngrößen für die weiteren vorgestellten Anwendungsmöglichkeiten wäre wünschenswert, um einen noch größeren Nutzen aus den Zuverlässigkeitsprognosen zu ziehen.

Auch die Anwendbarkeit für die Betrachtung von Mobiltelefonen konnte bestätigt werden, obgleich in diesem Bereich Einschränkungen gemacht werden müssen. Zum einen ist die Produktvielfalt so erheblich, dass der Arbeitsaufwand einer Zuverlässigkeitsprognose für alle auf dem Markt befindlichen Geräte jeden Rahmen hinsichtlich Zeit und Mitarbeiterressourcen sprengen würde. Eine Zuverlässigkeitsprognose kann jedoch bei komplexen und hochpreisigen Mobiltelefonen angewendet werden, wenn diese über einen längeren Zeitraum produziert werden. Eine automatisierte Prognose stellte sich als nicht anwendbar heraus, da immer wieder Heterogenitäten in den Daten auftreten können, die von Experten begutachtet werden müssen.

In naher Zukunft wäre die Anwendbarkeit des Prognosemodells auf weitere elektronische Produkte im Konsumgüterbereich wünschenswert, um auch in diesen Bereichen vielfältig nutzbare Informationen über das Feldausfallverhalten zu erlangen. Denkbar ist zum Beispiel die Untersuchung von Geräten der Unterhaltungselektronik, welche in großen Stückzahlen auf den Markt gebracht werden und deren Zuverlässigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Garantiekosten hat.

Weiterhin ist eine intensive Implementierung von Bayes-Ansätzen in das Wuppertaler Prognosemodell angedacht, um bei fehlenden Ausfalldaten Informationen aus Vorgängerprodukten oder Tests zu erhalten. Besonders der von der Automo-

bilindustrie verfolgte Ansatz „proven in use“ kann durch die Verknüpfung von Zuverlässigkeitsprognosen und Bayes vorangebracht werden.

Erste Untersuchungen zur Anwendbarkeit bei wenigen Feldausfalldaten haben sich als sehr erfolgreich herausgestellt. Dabei wird zur Lösung der auftretenden Integrale ein Ansatz über die Monte-Carlo-Simulation gewählt, um auch komplexe Verteilungsfunktionen, wie zum Beispiel die Weibull-Verteilung, in den Bayes-Ansatz zu integrieren. Zu erwähnen ist auch, dass mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation sowohl das „apriori-Wissen“ als auch die Likelihood-Funktion gewichtet werden können, um die Relevanz der einfließenden Daten zu berücksichtigen.

---

## 8 Literaturverzeichnis

- [Alt 03] Althaus, D.: Zuverlässigkeitsprognosen für dauerbeanspruchte Komponenten in Nutzfahrzeugen. Diplomarbeit, Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik, Bergische Universität Wuppertal, 2003.
- [Alt 09a] Althaus, D.: Ein praxisorientierter empirischer Ansatz zur Bestimmung des Ausfallverhaltens konventioneller Bremssysteme in Personenkraftwagen. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2009.
- [Alt 09b] Althaus, D.; Meyna, A.; Braasch, A.: Zuverlässigkeitsprognosen mit unabhängigen Fahrleistungsdaten. VDI-Bericht 2065, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2009, ISBN 978-3-18-092065-8.
- [Ans 94] Ansell, J.I.; Phillips, M.J.: Practical Methods für Reliability Data Analysis. Clarendon Press, Oxford, 1994.
- [Bir 90] Birolini, A.: Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme: Theorie, Praxis, Management. Springer Verlag, 2. Auflage, Berlin, 1990.
- [Bit 07] Presseinformation EITO-Studie: Weltweit erstmals über 3 Milliarden Mobilfunkanschlüsse bis Jahresende. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V., Berlin, 2007.
- [Bit 09] Presseinformation: 16 Millionen UMTS Anschlüsse in Deutschland. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V., Berlin, 2009.

- 
- [Bra 05a] Braasch, A.: Berechnung von Endbevorratungsmengen in der Mobilfunkbranche basierend auf mathematischen Zuverlässigkeitsprognosemodellen. Studienarbeit, Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik, Bergische Universität Wuppertal, 2005.
- [Bra 05b] Braasch, A.: Anwendung mehrparametrischer Zuverlässigkeitsprognosemodelle in der Automobilindustrie. Diplomarbeit, Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik, Bergische Universität Wuppertal.
- [Bra 07a] Braasch, A.; Specht, M.; Meyna, A.; Hübner, H.-J.: An approach to analyze software failure behavior of automotive telecommunication systems. Tagungsband ESREL`07, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44786-7, 2007.
- [Bra 07b] Braasch, A.; Hübner, H.-J.: Analyse von Feldfehlerdaten und deren praktische Anwendung zur Bestimmung von Endbevorratungsmengen. 2. Fachtagung Qualität im Automobil, München, 03. - 04. Juli 2007.
- [Bra 08] Braasch A.; Althaus D.; Meyna A.: Influence of the mileage distribution on reliability prognosis models. Tagungsband ESREL`08, 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48513-5.
- [Bra 09] Braasch A.; Althaus D.; Meyna A.: Importance of regarding the field failure behaviour of automotive components. Tagungsband ESREL`09, 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-55509-8.
- [CoMa 72] Couture, G. J.; Martz, H.F.: Empirical Estimation in the Weibull Distribution. IEEE Transactions on Reliability, Vol R-21, No. 2, 1972

- 
- [Eck 77] Eckel, G.: Bestimmung des Anfangsverlaufs der Zuverlässigkeitsfunktion von Automobilteilen, Qualität und Zuverlässigkeit 22, 1977.
- [Fri 00] Fritz, A.; Krolo, A.; Bertsche, B.: Analysis of Warranty Data for the Prediction of the Early-Failure Behavior of Automotive Systems. Proceeding of ESREL 2000, Balkema Verlag, Rotterdam, 2000.
- [Gar 09] Gartner Inc., Statistische Erhebung von Handyverkäufen weltweit, Stamford, 2009.
- [Har 98] Hartung, J.: Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. R. Oldenbourg Verlag, München, 1998.
- [Hau 08] Hauschild, J.; Kazemina, A.; Braasch, A.: Reliability prediction for automotive components using Real-Parameter Genetic Algorithm. Tagungsband ESREL`08, 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48513-5.
- [Kal 80] Kalbfleisch, J.D.; Prentice, R.L.: The Statistical Analysis of Failure Time Data. John Wiley & Sons, New York, 1980
- [KBA 10] Statistiken des Kraftfahrt- Bundesamts, Abfrage 01.04.2010.
- [Mey 03] Meyna, A.; Pauli, B.: Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik: Quantitative Bewertungsverfahren. Carl Hanser Verlag, München, 2003.
- [Mey 10] Meyna, A.; Pauli, B.: Zuverlässigkeitstechnik: Quantitative Bewertungsverfahren. Carl Hanser Verlag, München, 2010.

- 
- [MMe 03a] Meyer, M.: Methoden zur Analyse von Garantiedaten für die Sicherheits- und Zuverlässigkeitsprognose von Komponenten und Baugruppen im Kraftfahrzeug. Dissertation Bergische Universität Wuppertal, 2003.
- [MMe 03b] Meyer, M.; Meyna, A.; Pauli, B.: Zuverlässigkeitsprognose für Kfz-Komponenten bei zeitnahen Garantiedaten. Automobiltechnische Zeitschrift, 105. Jahrgang. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden. 2003.
- [NOK 05] NOKIA-Interne Datenhandbücher
- [NOK 07a] Firmenpräsentation NOKIA Automotive, Stand 2007
- [NOK 07b] Report on the Bayes Method, Internal Report, NOKIA 2007
- [Pau 00] Pauli, B.; Meyna, A.: Reliability Prognoses for Vehicle Components with incomplete Data. ATZ Worldwide, Vol. 102, 2000.
- [Pau 98] Pauli, B.: Zuverlässigkeitsprognosen für elektronische Steuergeräte im Kraftfahrzeug. Dissertation Bergische Universität Wuppertal 1998, zugleich Shaker Verlag, Aachen, 1998.
- [Per 95] Perera, U.D.: Reliability of Mobile Phones. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1995.
- [Per 06] Perera, U.D.: Reliability Index – A Method to Predict Failure Rate and Monitor Maturity of Mobile Phones. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2006.

- 
- [Pet 01] Petkova, V.T.; Lu, Y.; Sander, P.C.; Brombacher, A.C.: Rapid field feedback to reliability information. Proceedings of ESREL 2001. Torino, Italy, 2001.
- [Pet 03] Petkova, V.: An Analysis of Field Feedback in Consumer Electronic Industry. Dissertation, Technische Universität Eindhoven, 2003.
- [Pli 10] Plinke, F.: Praktische Anwendung von Methoden zur Zuverlässigkeitsbewertung von regenerativen Bremssystemen. Masterarbeit, Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik, Bergische Universität Wuppertal, 2010.
- [VDA 96] Verband der Automobilindustrie e.V. (Hrsg.): Tatsachen und Zahlen aus der Kraftverkehrswirtschaft. 60. Folge, Frankfurt, 1996.
- [Wer 08] Werner, H.: Supply Chain Management. 3. Auflage. Gabeler Verlag, Wiesbaden, 2008.

#### Webadressen

- [web 1] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), Datum der Abfrage 18.01. 2010
- [web 2] [www.diginews.ch](http://www.diginews.ch), Datum der Abfrage 25.03.2010.
- [web 3] [www.bitcom.org](http://www.bitcom.org), Datum der Abfrage 25.03.2007.
- [web 4] [www.bitcom.org](http://www.bitcom.org), Datum der Abfrage 20.08.2009.
- [web 5] [www.nokiaport.de](http://www.nokiaport.de), Datum der Abfrage 20.02.2010.
- [web 6] [www.rolandjohn.net](http://www.rolandjohn.net), Datum der Abfrage 22.12.2009.
- [web 7] [www.auto-motor-sport.de](http://www.auto-motor-sport.de), Datum der Abfrage 27.08.2009.

## A Anhang

### A.1 Abkürzungsverzeichnis

BUS	Broadcast and Unknown Server
CAN	Controller Area Network
CEE	Central Eastern Europe
DIN	Deutsche Industrienorm
DM	Deutsche Mark
DU	Display Unit
EOL	End-Of-Life
FBA	Fehlerbaumanalyse
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
GSM	Global System for Mobile Communication
HIP	Handset-Integration-Product
HU	Head Unit
KBA	Kraftfahrt Bundesamt
KFZ	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
km	Kilometer
MCS	Monte-Carlo-Simulation
MEA	Middle East Asia
MU	Market Unit
OEM	Original Equipment Manufacturer
POP	Prove of Purchase
Q-Q-Plot	Quantil-Quantil-Plot
rSAP	Remote-SIM-Access-Profile
SAP	SIM-Access-Profile
SCM	Supply-Chain-Management
SIM	Subscriber-Identity-Module
SMS	Short Message Service
Tkm	Tausend Kilometer
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System

## A.2 Weitere Ergebnisse

Weitere Ergebnisse zu den durchgeführten Zuverlässigkeitsprognosen finden sich im nachfolgenden Abschnitt. Aufgrund der Vertraulichkeit der Daten, sind die Ergebnisse anonymisiert. Die Nummerierung der Mobiltelefone ergibt sich durch die chronologische Untersuchung in den letzten Jahren. Mobiltelefone, deren zuverlässigkeitstechnische Untersuchung aufgrund der Datenlage nicht möglich war, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht erwähnt.

Als Ausfallwahrscheinlichkeit wird in den Zuverlässigkeitsprognosen eine zweiparametrische Weibull-Verteilung mit den Parametern  $\alpha$  und  $\beta$  verwendet. In einigen Fällen wird eine dreiparametrische Weibull-Verteilung angepasst, da Teilpopulationen in den Garantiedaten vorkommen

### Auswertungen Feldausfälle

Das erste Mobiltelefon wird für eine nordeuropäische MU begutachtet. Es handelt sich um ein Gerät, welches nur in kleinen Stückzahlen und über einen kurzen Zeitraum produziert wurde. Die Ergebnisse der ersten Untersuchung finden sich in Tabelle A-1.

**Tabelle A-1: Ergebnisse Mobiltelefon 1 Nordeuropa**

Produktionsmonat	Produktionsmenge	Fehler real	Fehler bereinigt	$\alpha$ [ $d^{-\beta}$ ]	$\beta$	w	B [%]
Oktober 2005	18.413	125	125	0,00015	0,743	-	99,30
November 2005	18.000	122	122	0,00017	0,712	-	99,31
Dezember 2005	5.000	22	22	0,00007	0,858	-	99,05
Januar 2006	5.000	12	12	0,00002	0,988	-	98,37

Für die Produktionsmonate Dezember 2005 und Januar 2006 stehen nur wenige Datensätze für eine Prognose zur Verfügung, sodass die ermittelten Verteilungsparameter sowie die zugehörigen Zuverlässigkeitskenngrößen nur mit Einschränkungen für zuverlässigkeitstechnische Begutachtungen genutzt werden können. Untersuchungen in den letzten Jahren haben gezeigt, dass für eine valide Prognose mindestens 40 Datensätze untersucht werden sollten.

Mobiltelefon 2 wurde in großen Stückzahlen und über einen langen Zeitraum für eine osteuropäische MU hergestellt. Die Analyse der Garantiedaten beginnt mit dem Produktionsmonat Juni 2005 und endet mit April 2006 (Tabelle A-2). Um eine optimale Anpassung der empirischen Ausfalldaten zu erreichen, wird für einige Produktionsmonate das Teilpopulationsmodell angewendet. Dies muss bei der Interpretation der Weibull-Parameter berücksichtigt werden.

**Tabelle A-2: Ergebnisse Mobiltelefon 2 Osteuropa**

Produktionsmonat	Produktionsmenge	Fehler real	Fehler bereinigt	$\alpha$ [ $d^{-\beta}$ ]	$\beta$	w	B [%]
Juni 2005	31.532	338	311	0,01170	0,757	0,014	99,95
Juli 2005	55.998	614	607	0,00910	0,717	0,019	99,93
August 2005	127.273	455	455	0,00974	0,759	0,005	99,89
September 2005	127.000	319	315	0,00159	0,963	0,005	99,94
Oktober 2005	105.545	652	638	0,00374	0,663	0,031	99,96
November 2005	106.966	505	500	0,00406	0,804	0,012	99,94
Dezember 2005	78.895	429	340	0,00283	0,681	0,035	99,93
Januar 2006	67.834	285	228	0,00005	0,745	-	99,80
Februar 2006	90.713	628	498	0,00024	0,577	-	99,94
März 2006	112.461	211	153	0,00007	0,578	-	99,77
April 2006	-	-	-	-	-	-	-
Mai 2006	125.325	262	176	0,00005	0,605	-	99,86

Das dritte Mobiltelefon wird für drei verschiedene MUs untersucht, welche sich in Nord-, Ost- und Südeuropa befinden. In allen drei MUs wird mit der Produktion im Monat Juni 2006 begonnen. Produktionsende ist Dezember 2006, wobei sich bei der Untersuchung der Daten herausstellt, dass für viele Produktionsmonate nicht ausreichend Ausfalldaten zur Verfügung stehen und somit keine Zuverlässigkeitsprognose möglich ist. Als Ansatz können Parameterwerte, welche aus vorhergehenden Prognosen stammen, herangezogen werden.

Besonders auffällig bei Mobiltelefon 3 ist der hohe Anteil nicht verwertbarer Garantiedaten. Dieser liegt, je nach Produktionsmonat, bei mehr als 90%. Eine

bessere Datenlage würde eine Prognose für erheblich mehr Produktionsmonate sicherstellen.

Zu Beginn wird die südeuropäische MU begutachtet. Dabei wird der Produktionsmonat Juni 2006 in Verbindung mit Monat Juli 2006 untersucht, um die sehr geringe Produktionsmenge und die dadurch geringe Anzahl an Feldausfällen mit in die Prognose einfließen zu lassen (Tabelle A-3).

**Tabelle A-3: Ergebnisse Mobiltelefon 3 Südeuropa**

Produktionsmonat	Produktionsmenge	Fehler real	Fehler bereinigt	$\alpha$ [ $d^{-\beta}$ ]	$\beta$	w	B [%]
Juni 2006	700	-	-	-	-	-	-
Juli 2006	6.900	114	52	0,00013	0,827	-	99,78
August 2006	34.600	131	42	0,00005	0,785	-	99,70
September 2006	25.800	136	59	0,00006	0,821	-	99,59
Oktober 2006	22.288	285	91	0,00008	0,939	-	99,94
November 2006	30.529	268	80	0,00007	0,913	-	99,82
Dezember 2006	25.161	106	25	0,00008	0,875	-	99,63

Für die osteuropäische MU sind nur drei Produktionsmonate mit Ausfalldaten vorhanden. Die verwertbaren Ausfälle sind für alle drei Produktionsmonate sehr gering, sodass eine aussagekräftige Prognose nicht möglich ist. Eine zuverlässigkeitstechnische Auswertung der wenigen Felddaten findet sich in der nachfolgenden Tabelle A-4.

**Tabelle A-4: Ergebnisse Mobiltelefon 3 Osteuropa**

Produktionsmonat	Produktionsmenge	Fehler real	Fehler bereinigt	$\alpha$ [ $d^{-\beta}$ ]	$\beta$	w	B [%]
Juli 2006	17.920	298	23	0,00013	0,896	-	99,66
August 2006	51.080	292	20	0,00045	0,895	-	99,54
September 2006	41.100	256	8	0,00045	0,900	-	99,23

Für die nordeuropäische MU sind keine verwertbaren Feldausfalldaten vorhanden. Daher wird auf eine weitergehende Untersuchung verzichtet. Einen Überblick über die vorhandenen Daten liefert Tabelle A-5.

**Tabelle A-5: Ergebnisse Mobiltelefon 3 Nordeuropa**

Produktionsmonat	Produktionsmenge	Fehler real	Fehler bereinigt	$\alpha$ [ $d^{-\beta}$ ]	$\beta$	w	B [%]
Juni 2006	1.620	21	8	-	-	-	-
Juli 2006	18.460	20	5	-	-	-	-
August 2006	15.170	5	1	-	-	-	-
September 2006	3.350	4	0	-	-	-	-

Mobiltelefon 4 wird für die südeuropäische sowie die osteuropäische MU untersucht. Dabei fällt auf, dass dieses Gerät nur in sehr kleinen Stückzahlen für den südeuropäischen Raum produziert wurde (Tabelle A-6). Weiterhin ist bei der Untersuchung für die südeuropäische MU zu erwähnen, dass sehr wenige Fehler für die Prognose aussortiert werden müssen. Somit ist eine Prognose trotz weniger Rohdaten möglich.

**Tabelle A-6: Ergebnisse Mobiltelefon 4 Südeuropa**

Produktionsmonat	Produktionsmenge	Fehler real	Fehler bereinigt	$\alpha$ [ $d^{-\beta}$ ]	$\beta$	w	B [%]
Oktober 2006	6.500	55	54	0,00010	0,823	-	99,86
November 2006	6.505	35	33	0,00014	0,698	-	99,60
Dezember 2006	6.297	23	21	0,00005	0,840	-	99,58

Im Bereich der osteuropäischen MU wurden im Zeitraum September 2006 bis November 2007 mehr Geräte verkauft, sodass für fast alle Produktionsmonate eine Zuverlässigkeitsprognose möglich ist (Tabelle A-7). Nur für die Monate Oktober und Dezember 2006 sind keine ausreichenden Daten vorhanden. Eine Auswertung mittels Zuverlässigkeitsprognosemodell liefert keine verwertbaren Ergebnisse.

Auffällig bei der Auswertung der Garantiedaten ist die Inhomogenität der Garantiedaten bezogen auf die einzelnen Produktionsmonate. Ein Grund hierfür kann mit den zur Verfügung stehenden Informationen nicht gefunden werden. Weiterhin fällt auf, dass die Ausfallsteilheit  $\beta$  große Werte annimmt, welche für Elektronikgeräte sehr selten sind. Da nicht bekannt ist, warum die Garantiedaten solche

Besonderheiten aufweisen, sollten die Ergebnisse mit großer Vorsicht bei der weiteren Nutzung, zum Beispiel der Berechnung der Endbevorratungsmenge, verwendet werden.

**Tabelle A-7: Ergebnisse Mobiltelefon 4 Osteuropa**

Produktions- monat	Produkti- onsmenge	Fehler real	Fehler bereinigt	$\alpha$ [ $d^{-\beta}$ ]	$\beta$	w	B [%]
September 2006	10.000	100	22	0,000005	1,300		99,65
Oktober 2006	16.040	49	11	-	-	-	-
November 2006	18.090	116	44	0,00001	0,994	-	99,70
Dezember 2006	12.129	17	6	-	-	-	-
Januar 2007	11.560	132	42	0,000004	1,332	-	99,85
Februar 2007	15.140	48	29	0,0000005	1,882	-	99,72
März 2007	11.720	71	39	0,000003	1,323	-	99,78
April 2007	17.360	41	22	0,0000003	1,626	-	99,62
Mai 2007	15.140	80	42	0,000048	0,870	-	99,87
Juni 2007	15.700	72	39	0,000015	1,040	-	99,91
Juli 2007	18.450	58	51	0,000007	1,163	-	99,88
August 2007	13.840	54	51	0,000008	1,210	-	99,83
September 2007	13.450	85	85	0,000053	0,940	-	99,71
Oktober 2007	16.250	52	52	0,000014	1,120	-	99,63
November 2007	21.540	55	55	0,000016	1,081	-	99,58

Für das fünfte Mobiltelefon, das zuverlässigkeitstechnisch begutachtet wird, sollen erneut Ausfälle aus einer osteuropäischen MU (Tabelle A-8) untersucht werden. Als Grundlage dienen die Produktionsmonate Juli bis Oktober 2005, in denen 221738 Geräte produziert wurden. Die hohen Produktionszahlen in Verbindung mit den zugehörigen Ausfällen ermöglichen eine gute Anwendung des Zuverlässigkeitsprognosemodells, was durch die durchweg guten Werte des Bestimmtheitsmaßes bestätigt wird.

**Tabelle A-8: Ergebnisse Mobiltelefon 5 Osteuropa**

Produktionsmonat	Produktionsmenge	Fehler real	Fehler bereinigt	$\alpha$ [ $d^{-\beta}$ ]	$\beta$	w	B [%]
Juli 2005	40.829	333	333	0,000186	0,591	-	99,92
August 2005	37.811	529	529	0,000500	0,529	-	99,96
September 2005	47.788	646	646	0,000190	0,685	-	99,88
Oktober 2005	95.310	769	769	0,000083	0,738	-	98,85

Mobiltelefon 6 wurde über einen Zeitraum von 24 Monaten produziert und zuverlässigkeitstechnisch analysiert. Dafür werden 24 Einzelprognosen durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle A-9 aufgelistet sind. Die betrachtete MU befindet sich im Mittelmeerraum.

Tabelle A-9: Ergebnisse Mobiltelefon 6 Südeuropa

Produktions- monat	Produkti- onsmenge	Fehler real	Fehler bereinigt	$\alpha$ [ $d^{-\beta}$ ]	$\beta$	w	B [%]
Juni 2005	14.700	1.131	671	0,00250	0,520	-	99,87
Juli 2005	13.400	564	492	0,00168	0,490	-	99,90
August 2005	11.600	839	725	0,00130	0,620	-	99,88
September 2005	21.886	509	421	0,00059	0,560	-	99,95
Oktober 2005	14.424	529	407	0,00110	0,530	-	99,78
November 2005	9.281	694	553	0,00180	0,580	-	99,85
Dezember 2005	17.926	509	419	0,00065	0,590	-	99,69
Januar 2006	14.900	421	291	0,00032	0,660	-	99,90
Februar 2006	21.361	348	266	0,00019	0,700	-	99,76
März 2006	20.352	209	155	0,00021	0,600	-	99,68
April 2006	9.534	132	91	0,00009	0,800	-	99,59
Mai 2006	17.615	179	125	0,00016	0,640	-	99,91
Juni 2006	31.263	315	200	0,00011	0,650	-	99,82
Juli 2006	14.371	161	113	0,00016	0,650	-	99,94
August 2006	11.453	404	287	0,00027	0,750	-	99,90
September 2006	17.624	243	169	0,00012	0,730	-	99,97
Oktober 2006	24.314	460	314	0,00011	0,800	-	99,84
November 2006	35.559	625	368	0,00089	0,420	-	99,97
Dezember 2006	19.904	314	223	0,00024	0,670	-	99,77
Januar 2007	25.277	355	218	0,00004	0,920	-	99,91
Februar 2007	24.420	268	197	0,00006	0,850	-	99,88
März 2007	22.524	163	110	0,00002	0,940	-	99,79
April 2007	21.273	188	126	0,00008	0,790	-	99,85
Mai 2007	26.310	287	172	0,00003	0,997	-	99,92
Juni 2007	37.379	54	37	0,00005	0,875	-	99,60

Wie schon bei Mobiltelefon 5, zeigt die Untersuchung des sechsten Telefons, dass bei ausreichender Datenlage das Zuverlässigkeitsprognosemodell ohne Probleme durchgeführt werden kann. Besonders bei der Betrachtung des Bestimmtheitsmaßes wird deutlich, dass aufgrund der großen Anzahl an Feldfehlerdaten und deren Homogenität eine Anpassung der empirischen Ausfalldaten mit Hilfe einer theoretischen Verteilung ohne Probleme Möglich ist.

Auch das folgende Telefon 7 wurde in großen Stückzahlen und über einen längeren Zeitraum produziert, sodass ausreichend Daten für eine Untersuchung zur Verfügung stehen. Das Verkaufsland liegt in Südeuropa (Tabelle A-10).

**Tabelle A-10: Ergebnisse Mobiltelefon 7 Südeuropa**

Produktionsmonat	Produktionsmenge	Fehler real	Fehler bereinigt	$\alpha$ [ $d^{-\beta}$ ]	$\beta$	w	B [%]
Juni 2006	7.400	789	769	0,00130	0,702	-	99,97
Juli 2006	21.100	712	693	0,00020	0,801	-	99,89
August 2006	19.488	613	580	0,00024	0,777	-	99,95
September 2006	24.097	406	396	0,00015	0,750	-	99,86
Oktober 2006	17.589	170	159	0,00002	1,000	-	99,94
November 2006	14.265	303	286	0,00011	0,850	-	99,93
Dezember 2006	17.491	102	94	0,00005	0,800	-	99,98
Januar 2007	9.475	134	123	0,00013	0,774	-	99,88
Februar 2007	18.364	210	196	0,00008	0,816	-	99,89
März 2007	17.304	123	105	0,00009	0,743	-	99,87
April 2007	14.049	154	144	0,00002	1,050	-	99,94
Mai 2007	13.694	104	98	0,00008	0,793	-	99,90
Juni 2007	13.295	58	50	0,00003	0,881	-	99,86
Juli 2007	29.539	170	162	0,00003	0,923	-	99,93
August 2007	27.900	302	291	0,00009	0,881	-	99,97

Das zuletzt untersuchte Mobiltelefon wurde von Februar bis August 2007 für eine südeuropäische MU produziert und in erheblichen Stückzahlen verkauft.

**Tabelle A-11: Ergebnisse Mobiltelefon 8 Südeuropa**

Produktions- monat	Produkti- onsmenge	Fehler real	Fehler bereinigt	$\alpha$ [ $d^{-\beta}$ ]	$\beta$	w	B [%]
Februar 2007	166.899	926	424	0,00013	0,683	-	99,61
März 2007	103.454	330	166	0,00013	0,603	-	99,48
April 2007	90.855	194	107	0,00003	0,849	-	99,37
Mai 2007	103.835	166	100	0,00001	0,984	-	98,30
Juni 2007	89.924	115	61	0,00006	0,587	-	99,34
Juli 2007	84.658	70	28	0,00002	0,732	-	98,87
August 2007	81.033	62	27	0,00001	0,897	-	99,45