

TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

# Einbeziehung von probabilistischen Prognosemodellen in der Earned Value Analysis im Projektmanagement

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

**Diplom-Ingenieur**

unter der Leitung von

Univ.Prof. Mag.rer.soc. oec. Dr. rer.soc.oec. Walter SCHWAIGER, MBA

Institut für Managementwissenschaften (E330),

Bereich: Finanzwirtschaft und Controlling

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

durch

Thomas Willach

0325986

(E740 Diplomstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau)

A-3433 Königstetten, Kogelgasse 2

Königstetten, am 19. Jänner 2014

---

Thomas Willach

Meinen Eltern gewidmet



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiter an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Königstetten, am 19. Jänner 2014

---

Thomas Willach

## Danksagung

Ich möchte mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Managementwissenschaften – Fachbereich Finanzwirtschaft und Controlling an der Technischen Universität Wien unter der Leitung von Herrn Univ. Prof. Mag. Dr. Walter Schwaiger herzlichst bedanken. Einen großen Teil meines Studiums habe ich an diesem Institut absolviert und konnte mich auf diesem Gebiet bestens vertiefen.

Mein größter Dank gilt Herrn Univ. Prof. Mag. Dr. Walter Schwaiger für die hervorragende Betreuung und der Hilfestellung in vielen Arbeitsgesprächen bei der Durchführung dieser Diplomarbeit.

Ganz besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei meinen Eltern bedanken, die mir trotz schwerer Schicksalsschläge meine Ausbildung und damit das Studium ermöglicht haben. Bei meinem Vater und meinem Bruder möchte ich mich besonders bedanken, die mir bis heute stets unterstützend und motivierend zur Seite stehen.

Abschließend danke ich auch allen Freunden und Studienkollegen, mit denen ich während meiner Zeit als Student viele schöne Stunden innerhalb und außerhalb der Universität verbracht habe.

Königstetten, am 19. Jänner 2014

Thomas Willach

## Kurzfassung

Die Einbeziehung der Unsicherheiten in Projekten ist erforderlich bei Planungs- und Prognosemethoden, um rechtzeitig herauszufinden ob die Erreichung der Projektziele sichergestellt werden kann und entsprechende Entscheidungen unter Risiko treffen zu können. Die Projektmanagement-Technik der Earned Value Analysis wurde mit der Norm DIN 69901-3:2009-01 standardisiert und als Methode des Projektcontrollings zur integrierten Betrachtung von Kosten, Zeit und Leistung beschrieben. Bei der Earned Value Analysis können Prognosen für die erwarteten Gesamtkosten und den Fertigstellungszeitpunkt berechnet werden. Die Prognose-Unsicherheit kann in der traditionellen Earned Value Analysis aber nicht einbezogen werden. Unsicherheiten und Risiken können in der traditionellen Projektplanung nicht nachvollziehbar berücksichtigt werden, da die Ergebnisse punktuelle Werte liefern, welche eine Sicherheit der Aussagen vortäuschen, aber trotzdem unsicher sind. Als Lösungsansatz wird ein probabilistischer Modellansatz mit Entscheidungsbaummodellen vorgeschlagen, dabei soll die Zeit-Dimension als stochastischer Prozess „Dauer“ modelliert werden. Die Kosten werden über einen ressourcenbasierten Ansatz als Kostenfunktion aus der Dauer abgeleitet. Die probabilistischen Prognosemodelle für Dauer und Kosten zur Fertigstellung liefern Werteverteilungen, welche in die Kenngrößen der Earned Value Analyse übergeleitet werden können. Dann werden Risikomaße für die probabilistischen Modellerweiterung zur Earned Value Analysis abgeleitet und hinsichtlich ihres Nutzens für das Projektcontrolling diskutiert. Im fünften Kapitel wird ein Ausblick auf Erweiterungsmöglichkeiten zur Modellverfeinerung des probabilistischen Prognosemodells angegeben.

## **Abstract**

The inclusion of uncertainties in projects is required in planning and forecasting methods to timely find out whether the achievement of project objectives can be ensured and to be able to make appropriate decisions under risk. The earned value analysis as a project management technique has been standardized with the standard DIN 69901-3:2009-01 and described as a method of project control for the integrated consideration of cost, time and performance. In the Earned Value Analysis forecasts for the expected total cost and the completion time can be calculated. The uncertainty in forecasts cannot be included in the traditional Earned Value Analysis. In the traditional project planning the uncertainties and risks cannot be considered understandable, as the results provide localized values, which simulate a security of the statements, but they are still uncertain. As solution a probabilistic model approach with decision tree models is proposed, while the time dimension will be modeled as stochastic process "duration". The costs are derived through a resource-based approach as a cost function from the duration. The probabilistic forecast models for duration and costs to complete deliver value distributions, which can be transferred to the characteristics of the earned value analysis. Then risk measures for the probabilistic model extension to Earned Value Analysis are derived and discussed in terms of its usefulness for project controlling. In the fifth chapter, an outlook is given on possibilities for extending the model refinement of the probabilistic forecast model.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	I
Inhaltsverzeichnis .....	II
Einleitung.....	1
1. Überblick zur Projektplanung.....	4
1.1. Grundlagen der Projektplanung.....	5
1.1.1. Zielgrößen .....	6
1.1.2. Projektphasen.....	7
1.2. Aufgabenplanung (Leistungsplanung) .....	8
1.2.1. Projektdefinition zum Beispielprojekt.....	8
1.2.2. Strukturierung der Aufgaben.....	9
1.3. Ablauf- und Terminplanung.....	11
1.3.1. Vorgangsliste, Anordnungsbeziehungen und Ablaufplan.....	11
1.3.2. Ermittlung der Vorgangsdauern und Aufwandsschätzung.....	13
1.3.3. Zeitanalyse: Planung der Fristen und Termine: .....	15
1.3.4. Grenzen der traditionellen Zeitanalyse bei Mehrpunktschätzung.....	20
1.4. Ressourcen- und Kostenplanung .....	22
1.4.1. Ressourceneinsatz.....	22
1.4.2. Kategorien der Kostenplanung .....	25
1.4.3. Globale Kostenschätzverfahren .....	25
1.4.4. Analytische Kostenplanung.....	26
1.4.5. Berechnungsformeln zur analytischen Kostenplanung .....	29
1.5. Einbeziehung der Unsicherheit in der Projektplanung.....	33
1.5.1. Unsicherheit und Risikomanagement in Projekten .....	33
1.5.2. Netzplantechnik im Projektmanagement .....	35
2. Integriertes Projektcontrolling mit der Earned Value Analysis .....	37
2.1. Grundlagen des Projektcontrolling.....	37
2.1.1. Integriertes Projektcontrolling.....	38
2.1.2. Erfassung des Leistungsfortschritts (Fertigstellungsgrad) .....	39
2.1.3. Terminerfassung.....	40
2.1.4. Ressourcen- und Ist-Kostenerfassung.....	41
2.2. Projektsteuerung mit korrektiven Maßnahmen oder durch Planänderung .....	42
2.3. Einführung in die Earned Value Analysis(EVA) .....	43
2.3.1. Basisgrößen der Earned Value Analysis .....	45
2.3.1.1. Plankosten.....	45
2.3.1.2. Ist-Kosten zum Stichtag.....	45
2.3.1.3. Earned Value .....	45
2.3.2. Fertigstellungsgrad-Berechnung.....	46
2.3.2.1. Ansatz für komplett abgeschlossene Phasen.....	47
2.3.2.2. rechnerischer Plan-Fertigstellungsgrad laufender Perioden .....	48
2.3.3. Vorgehensschritte der Earned Value Analysis .....	49
2.3.3.1. Plankosten über der Zeitachse auftragen .....	49

2.3.3.2.	Projektfortschrittsdaten erfassen .....	50
2.3.3.3.	Leistungs-Abweichungen berechnen.....	52
2.3.3.4.	Kenngößen zur Statusbeurteilung und Prognose.....	55
2.3.4.	Konsequenzanalyse (Prognose) .....	57
2.4.	Grenzen und Erweiterungsmöglichkeit der Earned Value Analysis .....	60
3.	Probabilistisches Prognosemodell .....	61
3.1.	Probabilistische Prognose der Projektdauer.....	62
3.1.1.	Der Zustand als neue Betrachtungsdimension .....	62
3.1.2.	Trinomialmodell als stochastischer Prozess „Dauer“ .....	65
3.1.3.	Übergangswahrscheinlichkeiten .....	68
3.1.4.	Probabilistische Prognose der Pfaddauern im Beispielprojekt.....	70
3.1.5.	Erwartungswert im stochastischen Prozess Dauer .....	74
3.1.1.	Begriffsvergleich zur Earned Value Analysis .....	77
3.2.	Informationsenthüllung im Zeitablauf.....	78
3.2.1.	Bedingte Hochrechnung der Projektdauern .....	79
3.2.2.	Erwartungswerte bei bedingter Hochrechnung der Projektdauer .....	80
3.3.	Pfadweiser Ansatz für die Projektkosten.....	83
3.3.1.	Kostenfunktion für Dauern anstatt Ausbringungsmengen .....	83
3.3.2.	Kostenfunktion für ein Arbeitspaket .....	84
3.3.3.	Kostenfunktion für eine Projektphase .....	86
3.3.4.	Pfadweise Projektkosten bei stochastischer Dauer .....	87
3.3.5.	Erwartungswert der Projektkosten .....	89
3.3.6.	Bedingte Hochrechnung der Projektkosten .....	90
3.3.7.	Begriffsvergleich zur Earned Value Analysis .....	93
3.4.	Das probabilistischen Prognosemodell zur Earned Value Analysis .....	93
4.	Risikomaße für das Projektcontrolling .....	97
4.1.	Risikobegriff .....	97
4.1.1.	Grundtypen von Risiko.....	97
4.1.2.	Berechnung von Risikomaßen.....	98
4.1.3.	Risikosteuerung .....	100
4.2.	Risikomaß der Zeiterwartung (time to complete at Risk) .....	101
4.3.	Risikomaß der Kostenerwartung (Estimate Cost at Completion at Risk) .....	102
4.4.	Nutzung der Risikomaße EACaR und TCaR in der Earned Value Analysis .....	103
5.	Modellverfeinerungen – Ein Ausblick.....	105
5.1.	Integration kritischer Netzplan-Pfade .....	105
5.2.	Integration von Abbruchrisiko im Prognosemodell.....	110
5.3.	Integration von Rücksprung-Schleifen .....	112
5.4.	Integration von Einzelrisiken (Prognosetool) .....	113
Schlussbetrachtungen.....		122
Traditionelle Projektplanung .....		122
Integriertes Projektcontrolling und Earned Value Analysis.....		123
Probabilistisches Prognosemodell .....		123
Nutzung der probabilistischen Prognose beim integrierten Projektcontrolling mit der Earned Value Analysis .....		124
Abbildungen.....		126
Tabellen.....		128



---

Literatur ..... 130

# Einleitung

## Motivation

Die Berechnung der Dauer und der Kosten von Projekten ist immer mit Unsicherheiten behaftet und führt häufig zum Scheitern von Projekten und damit zu wirtschaftlichem Schaden.

Die Ergebnisse der Studie<sup>1</sup> „Milliardenverluste für die deutsche Wirtschaft“ zeigten, dass die wichtigsten Ursachen für das Scheitern von Projekten unklar definierte Projektziele sowie unrealistische Zeitvorgaben sind. International durchgeführte Studien<sup>2</sup> und Literatur<sup>3,4</sup> belegen Ursachen für das Scheitern von Projekten und zeigen das immense Schadenspotential für die Wirtschaft.

Dauer und der Kosten für die zu erbringenden Leistungen eines Projekts werden zu Projektbeginn bei der Planung und später auch beim Projektcontrolling laufend neu berechnet um Prognosen zu erhalten. Die Einbeziehung der Unsicherheiten im Projekt ist erforderlich bei Planungs- und Prognosemethoden, um rechtzeitig herauszufinden ob die Erreichung der Projektziele sichergestellt werden kann und entsprechende Entscheidungen unter Risiko treffen zu können.

## Problemstellung

Im Projektmanagement wurde die Earned Value Analysis mit der Norm DIN 69901-3:2009 standardisiert und als Methode des Projektcontrollings für integrierte Betrachtung von Kosten, Zeit und Leistung beschrieben. Die Earned Value Analysis wird für eine bestimmte Aufgabe (z. B. Projekt, Teilprojekt, Arbeitspaket) zu einem bestimmten Zeitpunkt während des Projektes ermittelt. Es können Prognosen für die erwarteten Gesamtkosten und den Fertigstellungszeitpunkt abgeleitet werden. Mit der traditionellen Earned Value Analyse kann die Prognose-Unsicherheit nicht einbezogen werden. Unsicherheiten und Risiken können in der traditionellen Projektplanung nicht nachvollziehbar berücksichtigt werden, da die Ergebnisse

---

<sup>1</sup> (AssureConsultingGmbH, 2007)

<sup>2</sup> (standishgroup, 2009)

<sup>3</sup> (Völl, 2010) S. 2

<sup>4</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 62, S. 93

punktueller Werte liefern, die eine Sicherheit der Aussagen vortäuschen, aber trotzdem unsicher sind.

In der Earned Value Analysis wird als Prognose für Dauern und Kosten mit einzelnen Werten gerechnet. Unbekannt bleibt die Wahrscheinlichkeit dieser Erwartungswerte. Die bekannten deterministischen und stochastischen Netzplantechniken liefern nur einzelne Werte. Transparenter als in der Netzplantechnik kann die Unsicherheit mit pfadweise probabilistischen Prognosemodellen durch Entscheidungsbäume modelliert werden. Damit könnte die Earned Value Analysis mit einem pfadweise probabilistischen Prognosemodell erweitert werden.

### Erwartetes Resultat

Das erwartete Resultat ist die Einbeziehung von probabilistischen Prognosemodellen in der Earned Value Analysis durch stochastische Prozesse.

Es wird ein pfadweise probabilistischer Modellansatz mit Entscheidungsbaummodellen vorgeschlagen. Dabei soll die Zeit-Dimension als stochastischer Prozeß „Dauer“ modelliert werden. Die Kosten sollen über einen ressourcenbasierten Ansatz als Kostenfunktion pfadweise aus der Dauer abgeleitet werden. Für Hochrechnungen der Projektdauer zu bestimmten Zeitpunkten werden die bis dahin aufgelaufenen Istwerte in die pfadweise Betrachtung einbezogen. Das probabilistische Prognosemodell für die Dauer und die pfadweise betrachteten Kosten zur Fertigstellung liefern anstatt einzelner Werte, auf Zustände bedingte Werteverteilungen, die in die Kenngrößen der Earned Value Analysis übergeleitet werden. Aus den Werteverteilungen werden geeignete Risikomaße zur probabilistischen Modellerweiterung der Earned Value Analysis abgeleitet und hinsichtlich statistischer Risikosteuerung diskutiert.

### Verwendete Methoden

- Projektmanagement
- Fertigstellungswert-Analyse(Earned Value Analysis)
- probabilistische Modellierung mit Entscheidungsbäumen
- Value at Risk-Risikomaße

## Aufbau der Arbeit

Das erste Kapitel beschreibt die Grundbegriffe im Projektmanagement hinsichtlich Planung von Leistungen, Terminen sowie Ressourcen und Kosten.

Das Kapitel zwei beschreibt die traditionelle und in der DIN 69901-3:2009 standardisierte Projektcontrolling-Methode der Fertigstellungswert-Analyse (Earned Value Analysis) als integrierte Betrachtung von Leistung, Zeit und Kosten im Projektmanagement-Kontext.

Im dritten Kapitel werden probabilistische Prognosemodelle für Dauer und Kosten zur Fertigstellung angegeben und die daraus resultierenden Werteverteilungen in die Kenngrößen der Earned Value Analysis übergeleitet.

Im vierten Kapitel werden Risikomaße für die probabilistischen Modellerweiterung zur Earned Value Analysis abgeleitet und hinsichtlich ihres Nutzens für das Projektcontrolling diskutiert.

Im fünften Kapitel wird ein Ausblick auf Erweiterungsmöglichkeiten zur Modellverfeinerung des probabilistischen Prognosemodells angegeben.

# 1. Überblick zur Projektplanung

Patzak & Rattay<sup>5</sup> beschreiben Projekte als komplexe, zeitlich begrenzte Vorhaben, die unter anderem durch die Einmaligkeit der Bedingungen gekennzeichnet sind und dass sich die daraus resultierende mangelnde Erfahrung als Unsicherheit niederschlägt. Projektmanagement ist nach DIN 69901-5:2009-01 die „Gesamtheit von Führungsaufgaben, -organisation, -techniken und -mitteln für die Initiierung, Definition, Planung, Steuerung und den Abschluss von Projekten.“<sup>6</sup>

Obwohl in der Literatur keine einheitliche Definition für Projektmanagement existiert, wird unter diesem Begriff häufig die Planung, Kontrolle und Steuerung der einzelnen Projektaktivitäten in Bezug auf Zeit, Kosten und Ressourcenbereitstellung verstanden<sup>7</sup>.

Das Projektmanagement lässt sich in allgemein gültige Managementfunktionen unterteilen und wird in systemorientierter Weise als komplexe Ganzheit gesehen.<sup>8</sup> Projektmanagement wird nicht als Sammlung von Methoden aufgefasst, sondern als eine spezifische Erscheinungsform von Management und wird damit innerhalb der Managementansätze positioniert.<sup>9</sup>

Auf Unternehmensebene bringt der Einsatz von Projektmanagement folgende Vorteile mit sich<sup>10</sup>:

- Klare Prioritätensetzung (Projektportfolio-Management)
- Moderne Ansätze der Personal- und Führungskräfteentwicklung
- Motivation durch „neue“ Karrierechancen und Teamorientierung
- Verantwortungsübernahme durch Teams
- Effizienter Ressourceneinsatz durch maximale Nutzung von Knowhow und Verfügbarkeiten

---

<sup>5</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 18

<sup>6</sup> (DIN 69901-3:2009-01 Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 3: Methoden, 2009)

<sup>7</sup> (Völl, 2010) S. 16

<sup>8</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 22

<sup>9</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 29

<sup>10</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 28

## 1.1. Grundlagen der Projektplanung

Pläne sind die geistige Vorwegnahme zukünftigen Handelns. Da die Zukunft jedoch ihrer nichtlinearen, dynamischen Entwicklung wegen nie mit Sicherheit vorhersagbar ist (stochastische Prozesse), können Pläne letztlich nie "stimmen" und nie hundertprozentig eingehalten werden. Diese Erkenntnisse erfordern jedoch eine spezielle Sichtweise bzw. ein geändertes Verständnis vom Wesen eines Plans. Pläne sind Instrumente zum

- Klarlegen von Zielen nach denen gehandelt werden kann
- Feststellen von immer auftretenden Abweichungen
- Entscheiden von optimalen Steuerungsmaßnahmen<sup>11</sup>

Das integrierte Projektcontrolling von Leistung, Zeit und Kosten mit der Earned Value Analyse kann nur mit zuvor geplanten Projektzielgrößen durchgeführt werden, da ohne Planung können keine Abweichungen festgestellt werden können. Pläne dienen der möglichst guten Annäherung an sich ändernde Ziele durch permanente Regelung des Prozesses. Je unsicherer ein Prozess ist, desto wertvoller ist das Entwickeln eines Plans. Abweichungen vom Plan sind keine Schicksalsschläge, sondern selbstverständlich auftretende, äußerst wertvolle Informationen über den tatsächlichen Prozess. Pläne sind keine Festlegung, wie die Zukunft sein wird, sondern wie die Zukunft nach heutigem Wissen sein soll.<sup>11</sup> Gerade bei großer Unklarheit wie auch extremer Knappheit von Zeit und Einsatzmitteln einschließlich Finanzmitteln ist eine genaue Planung am wirksamsten und wirtschaftlich gerechtfertigt. Planen heißt ein Modell der Zukunft festlegen. Die Zukunft zu gestalten ist damit ein kreativer Prozess, welcher Phantasie, Vorstellungsvermögen, Fach- und Methodenwissen und viel Erfahrung benötigt.<sup>12</sup>

---

<sup>11</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 147

<sup>12</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 148

### 1.1.1. Zielgrößen

Die Projektplanung im engeren Sinn bezieht sich grundsätzlich auf drei Zielgrößen Leistung (Menge, Qualität), Termine und Ressourcen (Kosten, Finanzmittel).

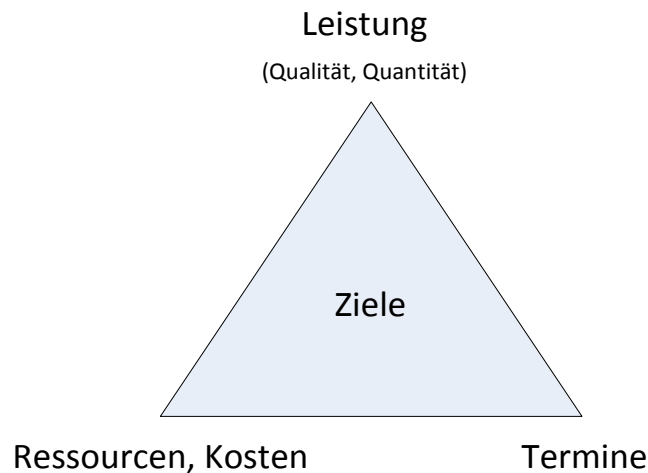


Abbildung 1: Die drei Planungsgrößen eines Projekts („magisches Dreieck“)<sup>13</sup>

In der Projektplanung werden zuerst die erforderlichen Leistungen (Qualität, Quantität) von den Projektzielen abgeleitet. Erst danach können Dauern abgeschätzt werden. Erst wenn bekannt ist welche Leistungen in welcher Zeit erbracht werden müssen, kann man den notwendigen Aufwand an Ressourcen (Personal, Material, Technologie, Finanzmittel) abschätzen und damit die Kosten (der Ressourceneinsätze) planen. Das „magische Dreieck“ des Projektmanagements wird bei der Planung im Urzeitersinn durchlaufen. Die drei Planungsgrößen sind voneinander abhängig, sodass die Änderung einer Größe auch Einfluss auf die Anderen hat. Wenn beispielsweise der Termin fixiert wurde, dann macht eine Budgetkürzung eine Leistungsminderung notwendig. Diese Annahmen sind jedoch nur sinnvoll anwendbar wenn von einer realistischen Planung ausgegangen werden kann.<sup>14</sup>

Die Earned Value Analysis berücksichtigt die drei Planungsgrößen integriert in einer gemeinsamen Betrachtung. Die Planungsgröße Leistung wird in der Earned Value Analysis als aktuelle vorhandener oder auch als geplanter Fertigstellungsgrad (percentage complete) verwendet. Die Termine werden entweder Projektdauer zum aktuellen Stichtag oder als geplante Projektdauer mit

<sup>13</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 1

<sup>14</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 148

dem Fertigstellungsgrad in Beziehung gesetzt. Die Planungsgröße Kosten wird in der Earned Value Analysis jeweils mit Bezug auf die Leistung zu bestimmten Zeitpunkten (aktueller Stichtag oder Projektende) berücksichtigt als aufgelaufene Ist-Kosten, als kumulierte Plankosten oder als Sollkosten (Earned Value).

### 1.1.2. Projektphasen

Projektmanagement weist in seinem Ablauf typische Managementphasen auf. Ein prozessorientiertes Phasenmodell für Projekte, das in dieser Form für alle Projekte Gültigkeit hat, besteht aus einer Projektstartphase, verschiedenen Ausführungs- sowie Koordinations- und Änderungsphasen und einer Projektabschlussphase.<sup>15</sup>

Die Projektstartphase ist ein Projektabschnitt, der von der Erteilung des Projektauftrages bis zum Beginn der ersten Ausführungsphase reicht, wobei die notwendigen Strukturen und Voraussetzungen für die involvierten Systeme geschaffen werden und der Schwerpunkt auf dem In-Gang-Setzen liegt.<sup>16</sup> Die Ausführungsphasen umfassen die inhaltliche Bearbeitung der Aufgabenstellung des Projektes und die erforderlichen Planungs- und Durchführungsaufgaben, die vom Management wahrgenommen werden und häufig gibt es auch mehrere Ausführungsphasen, welche durch Koordinationsphasen verknüpft sind, wobei das Schwergewicht der Ausführungsphase auf der Differenzierung (Zerlegung und Verteilung) liegt.<sup>17</sup> Den Koordinations- und Änderungsphasen gebührt besondere Aufmerksamkeit, da diese Phasenübergänge darstellen, da im Laufe einer Koordinationsphase eine inhaltliche Phase abgeschlossen wird und die darin erzielten Ergebnisse als Rahmenbedingungen für die nächste inhaltliche Phase transferiert werden, wobei die Zusammenführung von Zwischenergebnissen sowie die Behandlung von Abweichungen und Änderungen ebenfalls in diese Phase fallen.<sup>18</sup> In der Projektabschlussphase werden eine geregelte Beendigung des Projektes und die Entlastung der Verantwortlichen herbeigeführt. Die Phasen des Projektes werden durch Ereignisse (Meilensteine) gestartet und beendet, wobei diese Meilensteine determinierte Ereignisse mit einem bestimmten

---

<sup>15</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 25

<sup>16</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 26

<sup>17</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 26

<sup>18</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 26



Leistungsfortschritt sind, die extern vorgegeben werden oder intern selbst definiert werden.<sup>19</sup>

## 1.2. Aufgabenplanung (Leistungsplanung)

Im Zentrum jedes Projekts steht die Durchführung der erforderlichen Aufgaben, also die Erbringung von Leistungen. Es geht primär um die Frage: „Was ist alles zu tun?“ Erst darauf aufbauend sind die Leistungen hinsichtlich der Termine (Zeit) und des Aufwandes (Ressourcen, Kosten) zu bewerten. Termine und Kosten besitzen also immer nur zu einer Leistung eine Bedeutung.<sup>20</sup> Die geplanten Aufgaben sind auch eine wesentliche Voraussetzung für die Earned Value Analysis, da ohne Leistungsplanung keine Beziehung zwischen Leistung, Terminen und Kosten hergestellt werden kann.

### 1.2.1. Projektdefinition zum Beispielprojekt

Im Beispielprojekt soll ein fabrikneuer Lastwagen mit einem speziell dafür entwickelten Aufbau für Feuerwehreinsatz ausgerüstet werden. Das abgebildete Projektdefinitionsblatt enthält die wichtigsten Fakten zum Projekt.



Abbildung 2: Feuerwehrfahrzeug im Beispielprojekt<sup>21</sup>

<sup>19</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 27

<sup>20</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 150

<sup>21</sup> [www.mantruckandbus.com](http://www.mantruckandbus.com) (2012)

Tabelle 1: Projektdefinitionsblatt<sup>22</sup>

Projektdefinitionsblatt/Projektantrag/Projektauftrag		Datum: 17. März
<u>Projektname:</u>	Feuerwehr-Fahrzeugbau	<u>Nr.:</u> P100001
<u>Start-Ereignis:</u>	Anlieferung neuer Lastwagen ohne Aufbau	<u>Start-Termin:</u> 08.04.
<u>End-Ereignis:</u>	Lieferung LKW mit Feuerwehr-Aufbau	<u>End-Termin:</u> 01.07.
<u>Auftraggeber:</u>	Vertriebsleiter einer LKW-Hersteller-Firma	
<u>Projektauftraggeber(intern):</u>	Geschäftsführer der Fahrzeug-Aufbau-Firma	
<u>Projektleiter:</u>	Leiter der Produktentwicklung der Fahrzeug-Aufbau-Firma	
<u>Kosten, Ressourcen:</u>	Kostenrahmen 200.000 Euro	
<u>Ausgangssituation, Problemstellung, Vorgeschichte:</u>	Die Fahrzeug-Aufbau-Hersteller-Firma ist darauf spezialisiert fabrikneue Nutzfahrzeuge (Lastkraftwagen, Kleintransporter oder Geländewagen) für spezielle Einsatzzwecke auszustatten. Der Auftraggeber hat diese Arbeiten am 15.März beim Fahrzeug-Aufbau-Unternehmen mit der Terminvorgabe 1.Juli beauftragt. Der fabrikneue Lastwagen ohne Aufbau soll am 5. April beigeestellt werden.	
<u>Projektziele:</u>	Entwicklung, Herstellung, Termingerechte Fertigstellung und Lieferung des Lastwagens mit Feuerwehr-Ausstattung, Seilwinde und Bergekrane unter Einhaltung der Spezifikation der LKW-Hersteller-Firma und Verwendung bereits bestehender Sortimentsteile.	
<u>Nicht-Ziele:</u>	Keine Produktentwicklung bezüglich des verwendeten Lastkraftwagens, keine zusätzlichen Leistungen zur Spezifikation, keine neuen Teile ins Sortiment aufnehmen, da Qualifizierungsmaßnahmen für Neuteile den zeitlichen Rahmen des Projektes übersteigen würden.	
<u>Projekthinhalte</u> (Hauptaufgaben, inhaltliche Komponenten):	1. Entwicklungsarbeiten für die Fahrzeug-Aufbau-Baugruppen, 2. Beschaffung der Materialien, 3. Produktion von Bauteilen im Haus, sowie Endmontage und Lieferung	
<u>Kritische Erfolgsfaktoren:</u>	Nur Sortimentsteile verwenden, Ressourcenverfügbarkeit sicherstellen	
<u>Projektorganisation:</u>	Projektleiter ist der Entwicklungsleiter, im Projektteam sind Vertreter der Abteilungen technische Kundenbetreuung, Konstruktion, Einkauf, Produktion und Montage.	

### 1.2.2. Strukturierung der Aufgaben

Die Strukturierung ist ein wesentlicher Schritt vor der Projektplanung, diese leitet sich aus den Zielen im Projekt ab und ist als Methode innerhalb des Projektmanagements genormt<sup>23</sup>. Projekte sind komplexe Vorhaben, die Komplexität ist eine Systemeigenschaft, die bestimmt wird durch die Anzahl und Unterschiedlichkeit der Komponenten sowie Art und Dichte ihrer Vernetzung im System wie auch mit der Umwelt. Dabei ist die Dynamik als Veränderung von Systeminhalten und Vernetzung über der Zeit mit zu berücksichtigen.

Das Strukturieren, das heißt Untergliedern einer komplexen Ganzheit, ist ein induktiver, kreativer Prozeß. Es gibt immer mehrere brauchbare Lösungen, die optimale Lösung hinsichtlich Gliederungstiefe und -Logik kann nicht generell angegeben werden. Im Projektmanagement werden die Aufgaben als Projektphasen und Arbeitspakete mit dem Projektstrukturplan festgehalten.<sup>24</sup>

<sup>22</sup> Eigene Darstellung

<sup>23</sup> DIN 69901-3 Projektmanagementsysteme Teil 3: Methoden(2009)

<sup>24</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 151

Viele Unternehmen haben für ähnliche Projekte standardisierte Projektpläne, welche auf Basis eines Phasenmodells aufgebaut sind und den jeweiligen Projektanforderungen angepaßt werden können. Die folgende Abbildung zeigt den Projektstrukturplan für das Beispielprojekt „Feuerwehr-Fahrzeugbau“ mit Phasen und Arbeitspaketen (inklusive Details). Diese Definition der Arbeitspakete ist nicht die einzig richtige, die Aufgabengliederung in einem komplexen Projekt und ihre Darstellung als Projektstrukturplan stellt den zentralen Schritt der Projektplanung und damit des gesamten Projektmanagements dar.<sup>25</sup>

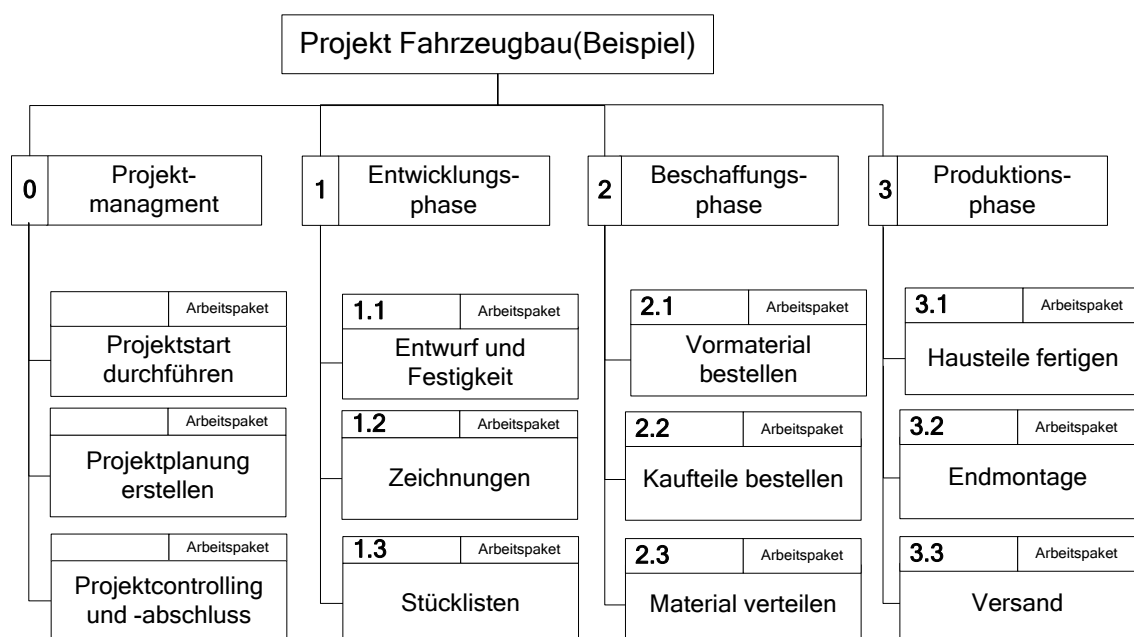


Abbildung 3: Projektstrukturplan zum Fahrzeugbau

Diese Darstellung entspricht einem dreistufigen Projektstrukturplan in dem die Arbeitspakete jeder Projektphase grob nach dem zeitlichen Ablauf phasenorientiert gegliedert werden. Die Aufgaben des Projektmanagements werden in einer eigenen Phase links im Projektstrukturplan eingegliedert, wobei die Projektmanagement-Arbeitspakete sich zeitlich über den ganzen Projektablauf verteilt erstrecken können.<sup>26</sup>

In der Earned Value Analysis sowie beim Projektcontrolling wird die Projektstruktur indirekt zur Feststellung des Fertigstellungsgrades verwendet. In

<sup>25</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 152

<sup>26</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 152

den folgenden Beispielen werden nur die Arbeitspakete der Phasen 1 bis 3 betrachtet.

### 1.3. Ablauf- und Terminplanung

Patzak & Rattay<sup>27</sup> geben eine Beschreibung der Vorgehensweise in der Ablauf und Terminplanung in sechs Schritten.

- Ermittlung der Vorgangsliste
- Ermittlung der Anordnungsbeziehungen
- Erstellung des Ablaufplans(Ablauflogik)
- Ermittlung der Vorgangsdauern und Aufwandsschätzung
- Zeitanalyse: Planung der Fristen und Termine
- Optimierung der Terminplans

Nach der Leistungsplanung ist die Terminplanung ist eine wesentliche Voraussetzung zur Erstellung der Earned Value Analysis. Sämtliche Zeitplan-Angaben in der Earned Value Analysis sind von der Ablauf- und Terminplanung für die auszuführenden Leistungen abhängig.

#### 1.3.1. Vorgangsliste, Anordnungsbeziehungen und Ablaufplan

Durch den Projektstrukturplan sind die erforderlichen Aktivitäten dargestellt und die Reihenfolge kann geplant werden. Um aus der Projektstruktur eine Ablaufreihenfolge abzuleiten, werden die Anordnungsbeziehungen als technologisch notwendige Reihenfolge durch die Angabe des jeweiligen Vorgängers zwischen den Arbeitspaketen festgelegt.

Im Beispiel werden als Anordnungsbeziehungen nur Ende-Anfang-Folgen verwendet. Die Vorgangsliste enthält alle Arbeitspakete aus dem Projektstrukturplan.

Der Begriff der technologisch notwendigen Reihenfolge wird durch das Beispiel deutlich. So ist es technologisch notwendig dass die Stücklisten (1.3) fertig sind bevor das Vormaterial (2.1) und Kaufteile (2.2) beschafft werden können. Daher

---

<sup>27</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 186

haben die Arbeitspakete 2.1 und 2.2 als Vorgänger das Arbeitspaket 1.3 in der Vorgangsliste eingetragen.

Wenn diese Reihenfolge nicht technologisch notwendig muß keine Anordnungsbeziehungen zwischen den betreffenden Arbeitspaketen als Einschränkung angegeben werden.

Phase Vorgang	Vorgänger
<b>1. Entwicklung</b>	
1.1 Entwurf und Festigkeit	-
1.2 Zeichnungen	1.1
1.3 Stücklisten	1.2
<b>2. Beschaffung</b>	
2.1 Vormaterial	1.3
2.2 Kaufteile	1.3
<b>3. Produktion</b>	
3.1 Hausteile	2.1
3.2 Endmontage	2.2, 3.1
3.3 Versand(Lieferung)	3.2

Tabelle 2: Vorgangsliste mit Ablauflogik

In einem Vorgangsknoten-Netzplan kann die Reihenfolge der Arbeitspakete grafisch dargestellt werden. Dabei gibt es aufgrund der Ablauflogik sequentielle(gerade Linie) und parallele(schräge Linien) Vorgänge. Um einen Terminplan zu erhalten, müssen die einzelnen Zeitdauern entsprechend der Ablaufreihenfolge zusammengesetzt werden.

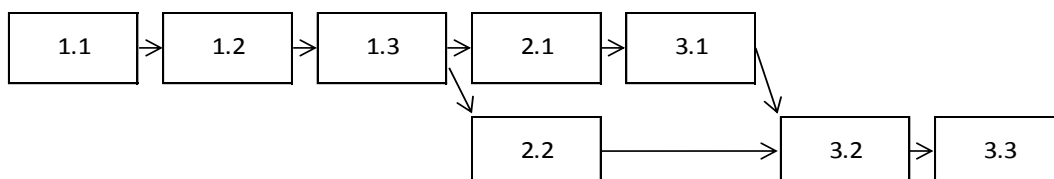


Abbildung 4: Vorgangsknoten-Netzplan zum Beispielprojekt

Ein grafischen Ablaufpläne Balkenplan (ohne gezeichnete Anordnungsbeziehungen) und vernetzter Balkenplan (mit gezeichneten Anordnungsbeziehungen) sind hier noch nicht möglich, da noch keine Dauern für die Arbeitspakete bekannt sind.

### 1.3.2. Ermittlung der Vorgangsdauern und Aufwandsschätzung

Die Durchführungsdauer als Zeitspanne zwischen Anfang und Ende eines Vorganges wird in der Zeitanalyse des Projektplanes benötigt und kann auf mehrere Arten ermittelt werden.<sup>28</sup>

- Durchführungsdauer ist vertraglich oder organisatorisch vorgegeben und muss durch geeigneten Ressourceneinsatz eingehalten werden.
- Die Dauer wird aus Erfahrungen direkt geschätzt.
- Die Dauer wird direkt über das Mengengerüst ermittelt.
- Die Dauer wird indirekt über die Schätzung des Aufwands ermittelt.

$$\text{Durchführungsdauer} = \frac{\text{Einsatzmittelaufwand}}{\text{Anzahl Einsatzmittel} \cdot \text{Verfügbarkeit}}$$

Die Vorgangsdauer basiert auf der Überlegung einer „Durchlaufzeit“ und wird in der Einheit der Terminplanung (Wochen, Tage) und nicht in der Einheit der Aufwandserfassung (Personentage, Personenstunden) ermittelt.<sup>29</sup> Patzak & Rattay<sup>29</sup> nennen zur Aufwandsschätzung die Vergleichsmethode, die Parametermethode und die Kennzahlenmethode.

Die Vergleichsmethode (Schätzung) basiert auf spezifischen projektrelevanten Erfahrungen sowie dem Vorstellungsvermögen der Schätzer, wobei dafür eine gut strukturierte Dokumentation abgeschlossener Projekte von großer Bedeutung ist. Es geht dabei um eine subjektive Analogiebildung von Einzelschätzern oder Expertengruppen, wobei Gruppenurteile meist höhere Aussagesicherheit besitzen.<sup>30</sup>

---

<sup>28</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S.189

<sup>29</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S.191

<sup>30</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S.190

Die Parametermethode (algorithmische Verfahren) basiert auf der Wahl eines oder mehrerer quantitativer aufwandsrelevanter Größen, die direkt (als Parameter) oder auch indirekt (als Indikator) eine starke Korrelation zum Arbeitsaufwand besitzen. Eine Regressionsrechnung zwischen Parameterwert und den sich ergebenden Aufwänden, angenähert durch eine lineare Beziehung oder eine Kurve erlaubt Schätzungen für neue, vergleichbare Vorgänge. Dabei erweist sich die grafische Technik der Approximation als ausreichend genau. Die Basis für diese Methode ist eine Sammlung historischer Daten für die gewählten Parameter. Für unterschiedliche Projektarten (Bauprojekte, Produktentwicklung, Softwareentwicklung) wurden spezielle Methoden entwickelt, in der Softwareentwicklung sind das die Schätzmethode COCOMO (Constructive Cost Model) oder die Function-Point-Methode.<sup>31</sup>

Die Kennzahlenmethode (Berechnung mittels Richtwerten) basiert auf der Verwendung branchenüblicher, langjährig bewährter, klassifizierter Werte von Kennzahlen in Form von Leistungseinheiten. Beispiele für solche generellen Richtwerte für die situative Aufwandsschätzung sind etwa der Aufwand in Arbeitsstunden pro m<sup>2</sup> Fläche oder pro m<sup>3</sup> umbauter Raum.<sup>32</sup> Für das Beispielprojekt werden Vorgangsdauern in Arbeitstagen von Mitgliedern des Projektteams geschätzt (Vergleichsmethode) und in der Vorgangsliste vermerkt.

Tabelle 3: Vorgangsliste mit Vorgangsdauern

Phase	Vorgang	Vorgänger	Dauer (Arbeitstage)
1. Entwicklung			
1.1	Entwurf und Festigkeit	-	5
1.2	Zeichnungen	1.1	5
1.3	Stücklisten	1.2	2
2. Beschaffung			
2.1	Vormaterial	1.3	10
2.2	Kaufteile	1.3	30
3. Produktion			
3.1	Hausteile	2.1	10
3.2	Endmontage	2.2, 3.1	10
3.3	Versand	3.2	4

<sup>31</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S.191

<sup>32</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S.191

### 1.3.3. Zeitanalyse: Planung der Fristen und Termine:

Patzak & Rattay<sup>33</sup> unterscheiden Terminplanung nach Kalenderdaten von der Fristenplanung zur Ermittlung der Projektdauer und beschreiben Rechenregeln für die Durchrechnung eines Vorgangsknoten-Netzplans mit ausschließlich Normalfolgen. Um die Zeitpunkte von Beginn und Ende der Vorgänge und den Zeitpuffer dazwischen zu berechnen, werden mit der kritischen Pfad-Methode (CPM) in einem Vorgangsknoten-Netzplan eine Vorwärts- und eine Rückwärtsrechnung durchgeführt.

Ein Vorgangsknoten in einem Vorgangsknoten-Netzplan enthält folgende Variablen.

PSPNr	Nummerierung im Projektstrukturplan
<i>D</i>	Dauer
<i>FAZ</i>	frühester Anfangszeitpunkt
<i>SAZ</i>	spätester Anfangszeitpunkt
<i>FEZ</i>	frühester Endzeitpunkt
<i>SEZ</i>	spätester Endzeitpunkt
<i>GP</i>	Gesamtpuffer
<i>i</i>	Vorgang
<i>j</i>	Nachfolger in der Vorwärtsrechnung
<i>k</i>	Vorläufer in der Rückwärtsrechnung

Die früheste Lage, also die frühesten Anfangs- und Endzeitpunkte werden mit der Dauer  $D_i$  aus der Vorgangsliste schrittweise entlang des Netzplans berechnet (Vorwärtsrechnung oder Vorwärtsterminisierung). Zu Beginn setzt man als Startwert für den frühesten Anfangszeitpunkt den Zeitpunkt an dem das Projekt startet, hier  $FAZ_{Start} = 0$ . Zur Berechnung des frühesten Endzeitpunkts  $FEZ_i$  für einen beliebigen Vorgang  $i$  wird dessen Dauer  $D_i$  zum frühesten Anfangszeitpunkt  $FAZ_i$  addiert. Der früheste Anfangszeitpunkt  $FAZ_j$  aller Nachfolger-Vorgänge  $j$  ist das Maximum  $Max(FEZ_i)$  der frühesten Endzeitpunkte aller Vorläufer  $i$ .

Vorwärtsrechnung(früheste Lage)<sup>34</sup>:

---

<sup>33</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004)

<sup>34</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004)



- 1. Start  $FAZ_{Start} = 0$
- 2. Ende Vorgang i  $FEZ_i = FAZ_i + D_i$
- 3. Nachfolger j  $FAZ_j = \text{Max}(FEZ_i \text{ aller Vorläufer } i \text{ von } j)$

Formel 1: Vorwärtsrechnung der kritischen Pfad Methode

Die Vorwärtsrechnung für das Beispiel-Projekt „Feuerwehr-Fahrzeugbau“ besteht aus folgenden Rechengängen.

Tabelle 4: Vorwärtsrechnung im Beispielprojekt "Feuerwehr-Fahrzeugbau"

Vorgang 1.1 „Entwicklung: Entwurf und Festigkeit“	
Frühester Anfangszeitpunkt	$FAZ_{Start} = FAZ_{1.1} = 0$
Frühester Endzeitpunkt	$FEZ_{1.1} = FAZ_{1.1} + D_{1.1} = 0 + 5 = 5$
Vorgang 1.2 „Entwicklung: Zeichnungen“ (Nachfolger von 1.1)	
Frühester Anfangszeitpunkt	$FAZ_{1.2} = \text{Max}(FEZ_{1.1}) = FEZ_{1.1} = 5$
Frühester Endzeitpunkt	$FEZ_{1.2} = FAZ_{1.2} + D_{1.2} = 5 + 5 = 10$
Vorgang 1.3 „Entwicklung: Stücklisten“ (Nachfolger von 1.2)	
Frühester Anfangszeitpunkt	$FAZ_{1.3} = \text{Max}(FEZ_{1.2}) = FEZ_{1.2} = 10$
Frühester Endzeitpunkt	$FEZ_{1.3} = FAZ_{1.3} + D_{1.3} = 10 + 2 = 12$
Vorgang 2.1 „Beschaffung: Vormaterial“ (Nachfolger von 1.3)	
Frühester Anfangszeitpunkt	$FAZ_{2.1} = \text{Max}(FEZ_{1.3}) = FEZ_{1.3} = 12$
Frühester Endzeitpunkt	$FEZ_{2.1} = FAZ_{2.1} + D_{2.1} = 12 + 10 = 22$
Vorgang 2.2 „Beschaffung: Kaufteile“ (Nachfolger von 1.3)	
Frühester Anfangszeitpunkt	$FAZ_{2.2} = \text{Max}(FEZ_{1.3}) = FEZ_{1.3} = 12$
Frühester Endzeitpunkt	$FEZ_{2.2} = FAZ_{2.2} + D_{2.2} = 12 + 30 = 42$
Vorgang 3.1 „Produktion: Hausteile“ (Nachfolger von 2.1)	
Frühester Anfangszeitpunkt	$FAZ_{3.1} = \text{Max}(FEZ_{2.1}) = FEZ_{2.1} = 22$
Frühester Endzeitpunkt	$FEZ_{3.1} = FAZ_{3.1} + D_{3.1} = 22 + 10 = 32$
Vorgang 3.2 „Produktion: Endmontage“ (Nachfolger von 3.1 und 2.2)	
Frühester Anfangszeitpunkt	$FAZ_{3.2} = \text{Max}(FEZ_{3.1}, FEZ_{2.2}) = \text{Max}(32, 42) = 42$
Frühester Endzeitpunkt	$FEZ_{3.2} = FAZ_{3.2} + D_{3.2} = 42 + 10 = 52$
Vorgang 3.3 „Produktion: Versand“ (Nachfolger von 3.2)	
Frühester Anfangszeitpunkt	$FAZ_{3.3} = \text{Max}(FAZ_{3.2}) = FAZ_{3.2} = 52$
Frühester Endzeitpunkt	$FEZ_{3.3} = FAZ_{3.3} + D_{3.3} = 52 + 4 = 56$

Im Netzplan wird für jeden Vorgangsknoten i der berechnete früheste Anfangszeitpunkt  $FAZ_i$ , die Dauer  $D_i$  und der früheste Endzeitpunkt  $FEZ_i$  eingetragen. Die Werte sind in jedem Knoten wie in der Abbildung unten dargestellt angeordnet. Für jeden Vorgang i hat man die frühesten Anfangs- und Endzeitpunkte nun berechnet. In der frühesten Lage dauert das Beispiel-Projekt „Fahrzeug“ nun 56 Arbeitstage. Zur Einhaltung dieser Dauer benötigt man aber

auch die Informationen über Zeitbereiche in denen begonnen und beendet werden muß. Diese Zeit-Puffer ergeben sich aus der Differenz von frühesten und spätesten Anfangs- und Endzeitpunkten der Vorgänge.

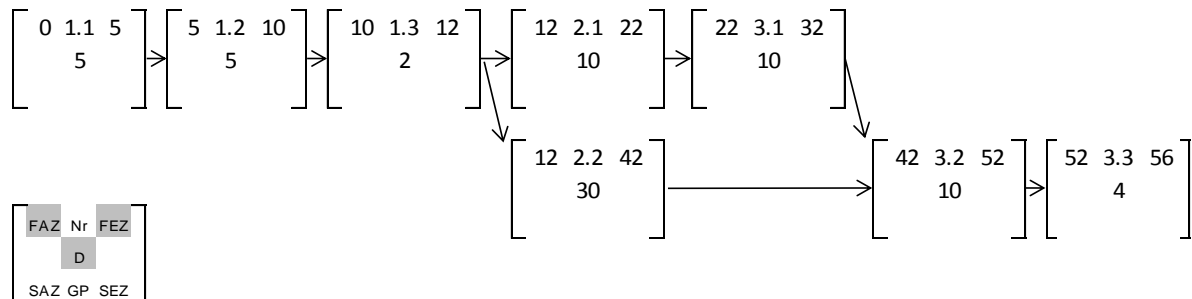


Abbildung 5: Netzplan der Vorwärtsrechnung im Beispielprojekt

Die späteste Lage, also die spätesten End- und Anfangszeitpunkte werden vom letzten Knoten aus schrittweise rückwärts bis zum ersten Knoten im Netzplan berechnet (Rückwärtsrechnung oder Rückwärtsterminisierung).

Mit dem aus der Vorwärtsrechnung stammenden frühesten Endzeitpunkt  $FEZ_{Ende}$  am letzten Knoten wird die Rückwärtsrechnung durch Gleichsetzen mit dem spätesten Endzeitpunkt  $SEZ_{Ende}$  begonnen. Der späteste Anfangszeitpunkt  $SAZ_j$  von Vorgang j ist der späteste Endzeitpunkt  $SEZ_j$  abzüglich der Vorgangsdauer  $D_j$ , also die Differenz  $SEZ_j - D_j$ . Der späteste Endzeitpunkt  $SEZ_k$  des Vorläufer-Vorgangs k ist das Minimum  $SEZ_k = \text{Min}(SAZ_j)$  aller Nachfolger j.

Rückwärtsrechnung(späteste Lage)<sup>35</sup>:

1. Ende  $FEZ_{Ende} = SEZ_{Ende}$
2. Anfang Vorgang j  $SAZ_j = SEZ_j - D_j$
3. Ende Vorläufer k  $SEZ_k = \text{Min}(SAZ_j \text{ aller Nachfolger von } k)$

Formel 2: Rückwärtsrechnung der kritischen Pfad Methode

Bei richtiger Rechnung muß  $SAZ \geq FAZ$  und  $SEZ \geq FEZ$ , sowie  $SAZ - FAZ = SEZ - FEZ$  sein und die letztgenannte Differenz heißt gesamte Pufferzeit, kurz Gesamtpuffer GP. Die Rückwärtsrechnung für das Beispiel-Projekt „Feuerwehr-Fahrzeugbau“ besteht aus folgenden Rechengängen.

<sup>35</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004)

Tabelle 5: Rückwärtsrechnung im Beispielprojekt

Vorgang 3.3 „Produktion: Versand“ (letzter Knoten)	
spätester Endzeitpunkt	$SEZ_{3.3} = FEZ_{Ende} = FEZ_{3.3} = 56$
spätester Anfangszeitpunkt	$SAZ_{3.3} = SEZ_{3.3} - D_{3.3} = 56 - 4 = 52$
Gesamtpuffer	$GP_{3.3} = SAZ_{3.3} - FAZ_{3.3} = 52 - 52 = 0$
oder	$GP_{3.3} = SEZ_{3.3} - FEZ_{3.3} = 56 - 56 = 0$
Der Vorgang 3.3 liegt wegen $GP_{3.3} = 0$ am kritischen Pfad.	
Vorgang 3.2 „Produktion: Endmontage“ (Vorläufer von 3.3)	
spätester Endzeitpunkt	$SEZ_{3.2} = \min(SAZ_{3.3}) = SAZ_{3.3} = 52$
spätester Anfangszeitpunkt	$SAZ_{3.2} = SEZ_{3.2} - D_{3.2} = 52 - 10 = 42$
Gesamtpuffer	$GP_{3.2} = SAZ_{3.2} - FAZ_{3.2} = 42 - 42 = 0$
Vorgang 3.2 liegt wegen $GP_{3.2} = 0$ ebenfalls am kritischen Pfad.	
Vorgang 3.1 „Produktion: Hausteile“ (Vorläufer von 3.2)	
spätester Endzeitpunkt	$SEZ_{3.1} = \min(SAZ_{3.2}) = SAZ_{3.2} = 42$
spätester Anfangszeitpunkt	$SAZ_{3.1} = SEZ_{3.1} - D_{3.1} = 42 - 10 = 32$
Gesamtpuffer	$GP_{3.1} = SAZ_{3.1} - FAZ_{3.1} = 32 - 22 = 10$
oder	$GP_{3.1} = SEZ_{3.1} - FEZ_{3.1} = 42 - 32 = 10$
Vorgang 3.1 ist wegen Gesamtpuffer $GP_{3.1} > 0$ terminlich unkritisch.	
Vorgang 2.1 „Beschaffung: Vormaterial“ (Vorläufer von 3.1)	
spätester Endzeitpunkt	$SEZ_{2.1} = \min(SAZ_{3.1}) = SAZ_{3.1} = 32$
spätester Anfangszeitpunkt	$SAZ_{2.1} = SEZ_{2.1} - D_{2.1} = 32 - 10 = 22$
Gesamtpuffer	$GP_{2.1} = SAZ_{2.1} - FAZ_{2.1} = 22 - 12 = 10$
Vorgang 2.1 ist wegen Gesamtpuffer $GP_{2.1} > 0$ terminlich unkritisch.	
Vorgang 2.2 „Beschaffung: Kaufteile“ (Vorläufer von 3.2)	
spätester Endzeitpunkt	$SEZ_{2.2} = \min(SAZ_{3.2}) = SAZ_{3.2} = 42$
spätester Anfangszeitpunkt	$SAZ_{2.1} = SEZ_{2.1} - D_{2.1} = 42 - 10 = 32$
Gesamtpuffer	$GP_{2.1} = SAZ_{2.1} - FAZ_{2.1} = 32 - 12 = 20$
Vorgang 2.1 ist wegen $GP_{3.1} > 0$ als Spielraum terminlich unkritisch.	
Vorgang 1.3 „Entwicklung: Stücklisten“ (Vorläufer von 2.1 und 2.2)	
spätester Endzeitpunkt	$SEZ_{1.3} = \min(SAZ_{2.1}, SAZ_{2.2})$ $= \min(12, 22) = 12$
spätester Anfangszeitpunkt	$SAZ_{1.3} = SEZ_{1.3} - D_{1.3} = 12 - 2 = 10$
Gesamtpuffer	$GP_{1.3} = SAZ_{1.3} - FAZ_{1.3} = 10 - 10 = 0$
Vorgang 1.3 liegt wegen $GP_{1.3} = 0$ am kritischen Pfad.	
Vorgang 1.2 „Entwicklung: Zeichnungen“ (Vorläufer von 1.3)	
spätester Endzeitpunkt	$SEZ_{1.2} = \min(SAZ_{1.3}) = 10$
spätester Anfangszeitpunkt	$SAZ_{1.2} = SEZ_{1.2} - D_{1.2} = 10 - 5 = 5$
Gesamtpuffer	$GP_{1.2} = SAZ_{1.2} - FAZ_{1.2} = 5 - 5 = 0$
Vorgang 1.2 liegt wegen $GP_{1.2} = 0$ am kritischen Pfad.	
Vorgang 1.1 „Entwicklung: Entwurf und Festigkeit“ (Vorläufer von 1.2)	
spätester Endzeitpunkt	$SEZ_{1.1} = \min(SAZ_{1.1}) = 5$
spätester Anfangszeitpunkt	$SAZ_{1.1} = SEZ_{1.1} - D_{1.1} = 5 - 5 = 0$
Gesamtpuffer	$GP_{1.1} = SAZ_{1.1} - FAZ_{1.1} = 0 - 0 = 0$
Vorgang 1.1 liegt wegen $GP_{1.1} = 0$ am kritischen Pfad.	

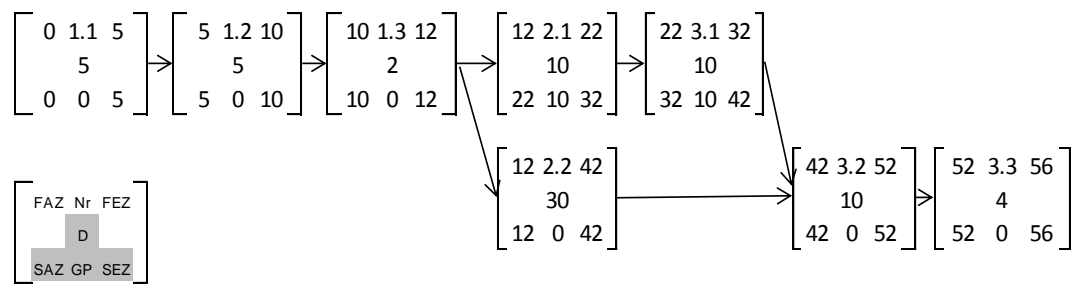


Abbildung 6: Netzplan zur Rückwärtsrechnung im Beispielprojekt

Durch die Rückwärtsrechnung kann der Netzplan vervollständigt werden und man erkennt die kritischen Vorgänge sofort, da deren Gesamtpuffer GP=0 ist. Zur übersichtlichen grafischen Darstellung der Informationen in der Vorgangsliste eignet sich auch ein vernetzter Balkenplan. Die Zeitdauern werden über einen Kalender in Datumsangaben übersetzt um die arbeitsfreien Tage zu berücksichtigen und Terminangaben zu erhalten. Die terminkritischen Aktivitäten (ohne Zeit-Puffer) können in der Software MS Projekt berechnet werden (Option: „kritische Vorgänge anzeigen“) und die Balken werden rot ausgefüllt.

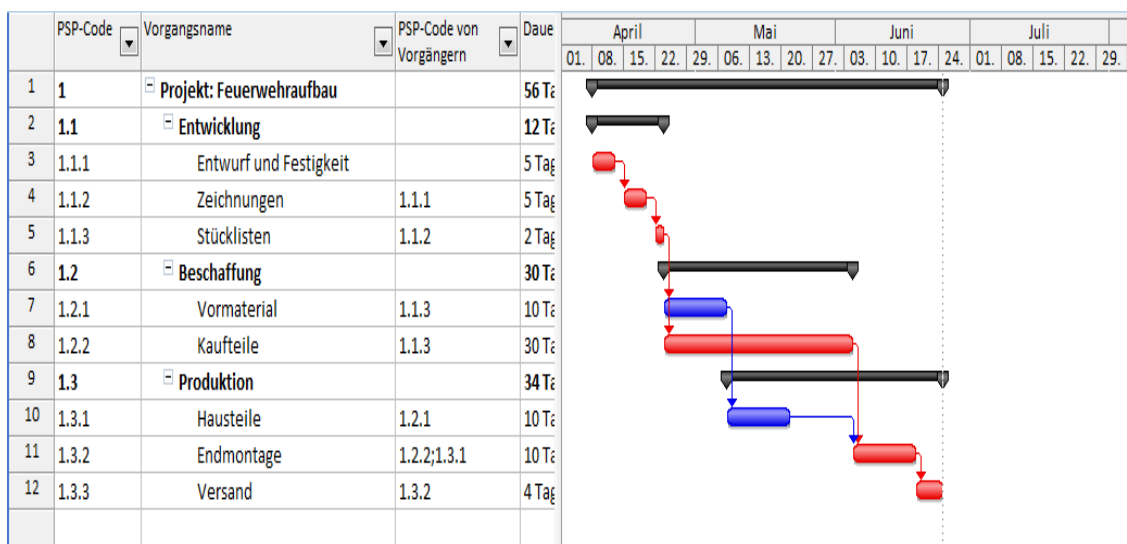


Abbildung 7: Vernetzter Balkenplan im Beispielprojekt

Die Zeitanalyse liefert die Plandauern der Arbeitspakete und Phasen im Projekt, die in der Earned Value Analysis mit den Leistungen und Kosten in Beziehung gesetzt werden. Die Plandauer (planned duration) wird in der Earned Value Analysis in der Prognose für die erwartete Projektdauer (projection at completion) berücksichtigt.

### 1.3.4. Grenzen der traditionellen Zeitanalyse bei Mehrpunktschätzung

Aufgrund der ersten traditionellen Zeitanalyse im Beispiel kann der Liefertermin eingehalten werden kann, wenn keine Abweichungen von den realistischen Schätzwerten eintreten. Daher ist eine weitere Abschätzung der terminlichen Lage mit anderen Schätzwerten notwendig. Diese Mehrpunktschätzung ergibt die optimistisch, realistisch und pessimistisch erwartete Dauer.

Tabelle 6: Mehrpunktschätzung der Dauern im Projektbeispiel

Phase / Arbeitspaket	Vorgänger	1.Schätzung realistisch	2. Schätzung		
			optimist.	pessimist.	
Entwicklung					
1.1 Entwurf+Festigkeit		5	3	7	kritisch
1.2 Zeichnungen	1.1	5	4	8	kritisch
1.3 Stücklisten	1.2	2	2	5	kritisch
Beschaffung					
2.1 Vormaterial	1.3	10	5	15	
2.2 Kaufteile	1.3	30	25	40	kritisch
Produktion					
3.1 Hausteile	2.1	10	8	12	
3.2 Endmontage	2.2, 3.1	10	8	20	kritisch
3.3 Versand	3.2	4	3	5	kritisch

Zur Vereinfachung der Zeitanalyse auf Basis der Mehrpunktschätzung können die kritischen Dauern je Projektphase durch Addition der kritischen Dauern zusammengefaßt werden. Es ergeben sich drei mögliche Varianten, welche als optimistische, realistische oder pessimistische Planung gesehen werden kann.

Tabelle 7: Varianten der kritische Dauern im Projektbeispiel

Kritische Dauer der Phasen	optimist.	realist.	pessimist.
Entwicklung	9	12	20
Beschaffung	25	30	40
Produktion	11	14	25
Projekt-Dauer	45	56	85

Das Projektteam erkennt aus dieser zweiten Zeitanalyse sofort das Risiko der Terminüberschreitung falls die pessimistische Planungsvariante zutreffen sollte. Interessant wird die terminliche Auswirkung falls nicht für alle Arbeitspakete die kürzest mögliche Dauer eingehalten werden kann und Kombinationen aus optimistisch, realistisch und pessimistisch geschätzten Zuständen eintreffen.

Für jede Phase kann sich unabhängig von Vorläufer oder Nachfolger einer der drei Zustände realisieren. In den traditionellen Planungsmethoden werden keine Fallunterscheidungen berücksichtigt. Für jede Variante aus der Kombination möglicher Zustände muß ein Netzplan neu berechnet werden. Die Netzpläne müßten somit sehr oft durchgerechnet werden um die verschiedenen Entwicklungen zu erhalten. Die drei Projektphasen mit je drei möglichen kritischen Dauern ergeben  $3 \cdot 3 \cdot 3 = 3^3 = 27$  mögliche Varianten.

Alternativ zu vielen Durchrechnungen der traditionellen Zeitanalyse bietet sich als Lösung dieses Problems das Entscheidungsbaummodell für die verschiedenen Schätzwerte an. Für das Beispielprojekt könnte damit kompakt alle 27 Möglichkeiten dargestellt werden. Diese Lösung wird als probabilistisches Prognosemodell (Kapitel 3) eingeführt und weiter erläutert.

## 1.4. Ressourcen- und Kostenplanung

Die Ressourcen- und Kostenplanung liefert die Mengen der benötigten Ressourcen und die dafür geplanten Kosten. In der Earned Value Analysis wird die Kostenplanung über die Plan-Gesamtkosten des Projekts (Budget at completion) einbezogen. Das Verhältnis der zeitlich auflaufenden Plan-Kosten zu den Plan-Gesamtkosten liefert den Plan-Fertigstellungsgrad und integriert damit die Leistung, Termin und Kosten in einer Betrachtung. Mit der Leistungs-, Termin und Kostenplanung sind die Planungsgrößen für die Earned Value Analyse komplett vorhanden.

### 1.4.1. Ressourceneinsatz

Es kann nichts vollbracht werden, ohne Ressourcen materieller oder immaterieller Art bei der Durchführung einzusetzen oder zu verbrauchen. Ressourcen, auch Einsatzmittel genannt, werden im Zuge der Leistungserbringung gebraucht oder verbraucht. Da im Zuge einer komplexen Leistungserstellung unüberschaubar viele unterschiedliche Ressourcen zum Einsatz kommen, etwa von Personen unterschiedlicher Qualifikation über diverse Materialien bis zu den einzelnen Werkzeugen, muss sich der Projektleiter bei der Auswahl der tatsächlich zu verplanenden Ressourcen sehr einschränken, um den Aufwand bei der Planung und Erfassbarkeit der Daten beherrschbar zu halten.<sup>36</sup>

Bei der Einsatzoptimierung wird man sich aus diesem Grund auf einzelne wenige Engpassressourcen beschränken, die durch hohe Kosten und beschränkte Verfügbarkeit charakterisiert sind. Einsatzmittel oder Ressourcen sind Mittel, die zur Durchführung von Vorhaben benötigt werden. Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft einige Ressourcenarten, wobei in einmalig und wiederholt verwendbare Ressourcen unterteilt werden kann.<sup>37</sup>

---

<sup>36</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 204

<sup>37</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 204

Tabelle 8: Ressourcenarten

<b>einmalig verwendbare Ressourcen</b> (Verbrauchsgüter)	<b>wiederholt verwendbare Ressourcen</b> (Gebrauchsgüter, Kapazitäten)
Einsatzstoffe, Material	Betriebsstätten
Energie	Personen, untergliedert nach Qualifikation
Finanzmittel	Betriebsmittel
Projektrelevantes Wissen (Daten)	personenunabhängiges Wissen (Verfahren)

Ziel der Einsatzmittelplanung oder auch Ressourcenplanung ist die Planung und Darstellung des Bedarfs an Einsatzmitteln im Zeitablauf. Dabei werden die erforderlichen Einsatzmittel den Vorgängen oder Arbeitspaketen zugeordnet. Besonders die Gebrauchsgüter, die zu nutzenden Leistungspotentiale darstellen (Personen, Betriebsmittel, Betriebsstätten) und Bestandteile der Projektorganisation werden einer weiteren, detaillierten Betrachtung unterzogen.<sup>38</sup>

Für ein ganzes Projekt, für jedes Arbeitspaket oder für jeden Vorgang stellen sich in der Einsatzmittelplanung die folgenden Fragen.<sup>39</sup>

- Welche Einsatzmittel sind bei wirtschaftlicher Technologiewahl erforderlich?
- Wie viele Einheiten dieses Einsatzmittel werden benötigt?
- Wann werden diese Einsatzmittel benötigt?
- Wo kommen diese Einsatzmittel zum Einsatz?

Die einzelnen Schritte der Einsatzmittelplanung sind<sup>40</sup>

- Bedarfsermittlung je Engpaßressource
- Ermittlung und Darstellung des Einsatzmittelprofils (Einsatzmittelganglinie)
- Verfügbarkeitsanalyse: Ermittlung von Unter- und Überdeckungen

<sup>38</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 205

<sup>39</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 206

<sup>40</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 206



Der Einsatzmittelbedarf für eine bestimmte Ressource in einem Vorgang ergibt sich aus dem geschätzten Aufwand in Personen- oder Maschinenstunden der notwendig ist um die in der Terminplanung festgelegte, zur Verfügung stehende Vorgangsdauer einhalten.<sup>41</sup>

Der Einsatzmittelplan für das Beispielprojekt als Bedarfsliste für alle betrachteten Einsatzmittel enthält die Menge der Ressourcen entsprechend der Projektstruktur.

Tabelle 9: Einsatzmittelplan für das Beispielprojekt

<b>Einsatzmittelplan</b>		auf die Vorgangsdauern bezogen							
Projektstruktur	PSP-Nr	0: Start	1.1: Entwurf+ Festigkeit	1.2: Zeichnungen	1.3: Stücklisten	2.1, 2.2, 3.1: Vormaterial & Kaufteile beschaffen, Hausteile fertigen	3.2: Endmontage	3.3: Versand	
Vorgangsname									
Personal (Anzahl während Vorgangsdauer)		Kosten/Tag							
A	Projektmanagement	800	1,0	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	
B	Engineering	640	2,0	0,5	4,0				
C	Beschaffung	560		0,1	0,1	0,1			
D	Produktion	560		0,1	0,1	1,0	5,0		
E	externe Berater	1200	0,1	0,1					
<b>Material</b>									
	Produktionsmaterial					80000			
<b>Technologie - Nutzung</b>		Kosten/Tag							
A	Infrastruktur Teilefertigung	1000				1			
B	Infrastruktur Prototypenbau	1000							
D	Infrastruktur Serienmontage	5000							
C	Infrastruktur Versuchsanlagen	1000					1		
E	Infrastruktur Externer Dienstleistung	1000							
<b>Technologie - Investitionskosten (fixe Kosten)</b>									
A	Infrastruktur Teilefertigung						10.000 €		
B	Infrastruktur Prototypenbau						10.000 €		
D	Infrastruktur Serienmontage								
C	Infrastruktur Versuchsanlagen								
E	Infrastruktur Externer Dienstleistungen								

<b>Vorgangsdauern</b>									
kritische Dauern aus Schätzung	Text	0: Start	1.1: Entwurf+ Festigkeit	1.2: Zeichnungen	1.3: Stücklisten	2.1, 2.2, 3.1: Vormaterial & Kaufteile beschaffen, Hausteile fertigen	3.2: Endmontage	3.3: Versand	
Dauer pessimistisch	Dp		7	8	5	40	20	5	
Dauer Häufig	Dh	0	5	5	2	30	10	4	
Dauer optimal	Do		3	4	2	25	8	3	

<sup>41</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 206

Der Einsatzmittelplan soll die Vorgangsdauern berücksichtigen, daher wird der Aufwand für das Beispielprojekt nicht direkt in Personen- oder Maschinenstunden eingetragen, sondern als Anzahl der benötigten Ressourcen während der Vorgangsdauer. Das bedeutet beim Personaleinsatz die Anzahl der Personen und bei der Technologienutzung die Anzahl der Fertigungsstätten oder Bauplätze während der Vorgangsdauer. Beim Material und den Investitionen wurden aber bereits die fixen Kosten eingetragen.

Auf die beiden weiteren Schritte der Ressourcen- oder Einsatzmittelplanung, die Ermittlung Einsatzmittelprofils (Einsatzmittelganglinie) und die Verfügbarkeitsanalyse (Ermittlung von Unter- und Überdeckungen) wird hier nicht näher eingegangen.

#### 1.4.2. Kategorien der Kostenplanung

Unter dem Begriff Kostenplanungsmethoden werden verschiedene Ansätze subsumiert. Im Wesentlichen kann man dabei zwei Kategorien, nämlich sogenannte globale Kostenschätzverfahren und die analytischen Kostenermittlungsverfahren, unterscheiden. Von den globalen Kostenschätzverfahren sollte man die Methoden der analytischen Kostenermittlung insofern unterscheiden, als Letztere von den einzelnen Arbeitspaketen eines Projekts ausgehen. Der Projektleiter ermittelt gemeinsam mit den Arbeitspaketverantwortlichen die Kosten je Arbeitspaket und aggregiert diese zu den Gesamtprojektkosten.<sup>42</sup>

#### 1.4.3. Globale Kostenschätzverfahren

Bei den globalen Kostenschätzverfahren werden die Projektkosten anhand geeigneter Kennzahlen in der Gesamtheit geschätzt. All diesen Kostenschätzmethoden ist daher gemeinsam, dass sie keine detaillierte Kalkulation einzelner Arbeitspakete als Basis für die Gesamtkosten, sondern eine einzelne Kenngröße für die Gesamtheit des Projektes einsetzen. Derartige Kennzahlen sind in verschiedenen Branchen und Projektarten aus jahrelanger Erfahrung entstanden. Bei Bauprojekten wird zum Beispiel die Kennzahl „Kosten je

---

<sup>42</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 215

m<sup>3</sup> umbauter Raum“ verwendet. Bei Stahlmontageprojekten dient der Parameter „Tonne Stahl“, der montiert werden soll, als erste Maßgröße für die Kosten. Diese bei geringer Planungstiefe ermittelten Projektkosten sind die Basis für die Projektentscheidung<sup>43</sup>. Die Vorteile der Kostenschätzverfahren liegen in den rasch zu ermittelnden Gesamtkosten. Das Risiko, dass aufgrund der globalen Schätzung für das gesamte Projekt und des Ignorierens von projektspezifischen Randbedingungen die Schätzung wesentlich von den tatsächlichen Kosten abweicht, ist allerdings hoch. Die Kostenschätzverfahren kann man zwar als Möglichkeit sehen, in früheren Projektphasen einen ersten Richtwert zu erhalten, allerdings sollte diese Methoden nicht das alleinige Instrument zur Kostenplanung sein.

Das Ergebnis aus einem ersten Kostenschätzverfahren darf nicht als Zielgröße für das Projekt aufgefasst werden, auf die später Abweichungen als Fehler des Projektleiters bezogen werden können. Abweichungen im Kostencontrolling sollten auf eine detaillierte ermittelte Kostenplanung bezogen werden. Um mit diesem Mißverständnis richtig umgehen zu können empfiehlt sich der Einsatz von Kostenschätzungsvarianten in frühen Phasen des Projekts. Durch die Schätzung einer optimistischen, einer realistischen und einer pessimistischen Variante entsteht eine Bandbreite, innerhalb welcher auch detaillierte und spätere Projektkalkulationen liegen sollten. Dadurch wird allen Beteiligten von Beginn an vermittelt, dass mit komplexen Projekten, für die eine rasche und einfache Kostenschätzung nötig war, gewisse Unsicherheiten verbunden sind. Die bei der Erstkostenschätzung entstandene Bandbreite sollte sich in den nächsten Phasen durch den Einsatz detaillierter Kostenplanungsmethoden und durch Informationszuwachs, der im Projekt entsteht, die Unsicherheit laufend verringern.<sup>44</sup>

#### 1.4.4. Analytische Kostenplanung

Das analytische Verfahren der Kostenplanung basiert auf einem strukturierten Modell, wobei die Kosten in Abhängigkeit von ihren verursachungsgerechten Kostentreibern betrachtet werden. Ein solches Modell ist das generische 3-

---

<sup>43</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 215

<sup>44</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 216

Ressourcen-Modell, wobei der Blick stets auf die Material-, Personal- und Technologie-Ressource gerichtet ist. Bei deterministischen Produktionsfunktionen steht die Ausbringung in funktionaler Beziehung zu den Ressourcen-Einsätzen.<sup>45</sup>

Die analytische Kostenplanung für ein Arbeitspaket einer Projektstruktur verwendet eine Plankostenfunktion welche die Faktormengen und Faktorpreise der verschiedenen Ressourcen mit einer Einsatzdauer hochrechnet.

In diesem Kapitel wird nur die traditionelle Vorgehensweise bei der Projektkostenplanung kurz erklärt und die Kostenplanung zum Beispielprojekt gezeigt.

Die Projektkosten werden dem Projekt zugeordnet, indem man die definierten Einsatzmittel mit Verrechnungssätzen bewertet sowie die einsatzmittelunabhängigen Kostenarten definiert und den Arbeitspaketen zuordnet.<sup>46</sup>

Mit der Kostenplanung werden folgende Ziele verfolgt:

- Mit Hilfe der Projektkostenplanung wird ein entsprechender Preis für das zu verkaufende Projekt, sofern es sich dabei um eine Auftragsabwicklung handelt, kalkuliert. Bei internen Projekten dient die Kostenplanung dazu, ein Projektbudget zu beantragen oder die Grundlage für eine Wirtschaftlichkeitsrechnung (Kosten-Nutzen-Analyse, Investitionsrechnung) zu erhalten.<sup>47</sup>
- Die Projektkostenplanung dient weiter dazu, mit Hilfe von Plankosten die Basis für das begleitende Controlling zur Verfügung zu stellen. Diese geplanten Werte werden periodisch oder zu bestimmten Meilensteinen mit den bis zum jeweiligen Stichtag angefallenen aktuellen Kosten vergleichen, um aus den erkannten Abweichungen Maßnahmen für das weitere Projekt abzuleiten.<sup>48</sup>

---

<sup>45</sup> (Schwaiger, Vorlesungsskript Controlling unter Unsicherheit - Draft Version, 2009) Vorlesungsskript Controlling unter Unsicherheit S. 59

<sup>46</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 217

<sup>47</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 217

<sup>48</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 217

Bei der analytischen Kostenplanung sind mehrere Vorgehensschritte durchzuführen.<sup>49</sup>

- Arbeitspaketgliederung prüfen
- Kostenarten ermitteln und bewerten
- Zuordnung der Kostenarten zu Arbeitspaketen
- Zusammenfassung aller Kosten (Projektkalkulation)
- Verteilung des Kostenanfalls über die Projektdauer

Die Arbeitspaketgliederung des Projekts ist auf Brauchbarkeit für die Kostenplanung zu prüfen, da eine systematische und vollständige Aufgabengliederung (Projektstrukturplan) die Voraussetzung dafür ist.<sup>50</sup>

Die Ermittlung und Bewertung der im Projekt eingesetzten Kostenarten ergibt eine Kostenartengliederung und die Bewertungssätze je verwendeter Einheit. Die Kosten werden nach Primärgruppen, orientiert an den Ressourcen wie Personal, Material, Technologie gegliedert.<sup>51</sup> Die Zuordnung der Kostenarten zu (Gruppen von) Arbeitspaketen, dient der mengenmäßigen Zuordnung zu einzelnen Arbeitspaketen. Den Arbeitspaketen werden die so genannten direkten Kosten (Einzelkosten) zugeordnet. Alle Kosten, die aufgrund des zu hohen Erhebungsaufwands oder der Unmöglichkeit der Zurechnung zu einem Arbeitspaket oder Projekt nicht als direkte Kosten zuordenbar sind, werden als Gemeinkosten bezeichnet.<sup>52</sup>

Zu den Gemeinkosten werden allgemein gezählt:

- Anteilige Personalkosten des Managements
- Anteilige Kosten der Firmeninfrastruktur (Büromiete, Energie, Fuhrpark, Lager etc.)
- Finanzierungskosten

Gemeinkosten werden entweder der Gesamtsumme der direkten Kosten (als Prozentsatz, der sich aus allen Aktivitäten des Unternehmens ergibt) aufgeschlagen oder sind bereits in den Kostensatz für die Kostenart einkalkuliert.

---

<sup>49</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 217

<sup>50</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 217

<sup>51</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 217

<sup>52</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 219

Zum Beispiel können die Gemeinkosten zu den Stundensätzen (interne Verrechnungssätze) des Personals zugeordnet werden und beinhalten daher bereits auch die Gemeinkosten der Abteilung oder des Unternehmens.<sup>53</sup> Bei der Zusammenfassung aller Kosten werden den direkten Kosten über die Gemeinkosten hinaus noch Reserven für etwaige im Projekt inkludierte Risiken einkalkuliert. Durch Hinzuzählung der anteiligen Gemeinkosten ermittelt man die Selbstkosten des Projekts. Bei externen Auftragsabwicklungen wird den nun ermittelten Selbstkosten der kalkulatorische Gewinn hinzugerechnet. Dies ist eine Basis für den angebotenen Preis bei externen Auftragsabwicklungen.<sup>54</sup> Die Verteilung des Kostenanfalls über die Projektdauer auf Basis Terminplanung liefert den zeitlichen Verlauf der Kosten (Kostenganglinie) für das integrierte Projektcontrolling (siehe Kapitel 2) einerseits und andererseits für einen Finanzplan.<sup>55</sup>

#### 1.4.5. Berechnungsformeln zur analytischen Kostenplanung

Die Berechnungsformeln für Kostenfunktionen zur analytischen Kostenplanung für Unternehmen, wie im Vorlesungsskript Controlling unter Unsicherheit angegeben<sup>56</sup> kann man die auch auf die Gegebenheiten in der Projektplanung anpassen.

Die Projektkosten werden dem Projekt zugeordnet, indem man die definierten Einsatzmittel mit Verrechnungssätzen bewertet sowie die einsatzmittelunabhängigen Kostenarten definiert und den Arbeitspaketen zuordnet.<sup>57</sup>

Für ein Arbeitspaket  $m$  in der Projektphase  $n$  bestehen die Kosten für die verwendete Ressource  $r = P, M, T$  (Personal, Material, Technologie) aus fixen und variablen Einsatzkosten.

$$K_{n,m,r} = K_{n,m,r,fix} + K_{n,m,r,var}$$

---

<sup>53</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 219

<sup>54</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 220

<sup>55</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 225

<sup>56</sup> (Schwaiger, Vorlesungsskript Controlling unter Unsicherheit - Draft Version, 2009) Vorlesungsskript Controlling unter Unsicherheit – Kapitel Plankostenrechnung S. 56 ff

<sup>57</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 217

Die variablen Kosten von Einsatzdauer , Auslastung und Verrechnungssatz abhängig. Für die Einsatzdauer der Ressourcen wird vereinfachend die ganze Dauer  $D_{n,m}$  des Arbeitspakets angenommen.

$$K_{n,m,r,var} = D_{n,m} \cdot k_{n,m,var,r}$$

Für die Ressource r im Arbeitspaket m in der Phase n besteht der variable Kostensatz  $k_{n,m,r,var}$  aus dem Produkt von Verrechnungssatz je Zeiteinheit und der verwendeten Einsatzmenge. Betriebswirtschaftlich ausgedrückt wird ein Einsatzpreis q in Geldeinheiten je Zeiteinheit (Tagessatz in Euro/Tag) mit einer Kapazitäts-Auslastung a (der eingesetzten Ressource an einem Tag) multipliziert.

$$k_{n,m,r,var} = q_{n,m,r} \cdot a_{n,m,r}$$

Der variable Kostensatz wird damit in Geldeinheiten pro Zeiteinheit angegeben und berücksichtigt auch die Menge oder Kapazitäts-Auslastung der eingesetzten Ressource.

Die variablen Kosten sind das Produkt der Dauer, des Verrechnungssatzes sowie der Kapazitäts-Auslastung.

$$K_{n,m,r,var} = D_{n,m} \cdot q_{n,m,r} \cdot a_{n,m,r}$$

Die Kostenfunktion für ein Arbeitspaket ist die Summe der fixen und variablen Kosten der eingesetzten Ressourcen.

$$K_m = \sum_{r=M,P,T} [K_{n,m,r,fix} + D_{n,m} \cdot q_{n,m,r} \cdot a_{n,m,r}]$$

$$K_m = \sum_{r=M,P,T} [K_{n,m,r,fix} + K_{n,m,r,var}]$$

Für eine ganze Projektphase n werden die Kosten der darin liegenden Arbeitspakete m aufsummiert.

$$K_n = \sum_{m=1}^M K_m$$

Falls eine Kostenberechnung grob auf Phasenebene ausreicht, lautet die Kostenfunktion so wie beim Arbeitspaket, aber ohne den Index m mit zu nehmen.

$$K_n = \sum_{r=Mat,Pers,Tech} [K_{n,r,fix} + D_n \cdot q_{n,r} \cdot a_{n,r}]$$

Die Projektkosten K sind die Summe der vorher definierten Phasen-Kosten in den Projektphasen von n=0 bis n=N.

$$K = \sum_{n=1}^N K_n$$

$$= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{r=M,P,T} [K_{n,m,r,fix} + D_{n,m} \cdot q_{n,m,r} \cdot a_{n,m,r}]$$

Mit

n	Projektphase n=1 bis N
m	Arbeitspakete m=1 bis M in der Projektphase n
r	Ressource r=P, M, T (Personal, Material, Technologie)
$K_{n,m,r,fix}$	Fixkosten
$K_{n,m,r,var}$	variable Kosten
$k_{n,m,r,var}$	variabler Kostensatz
$q_{n,m}$	Verrechnungssatz
$a_{n,m}$	Kapazitäts-Auslastung
$D_{n,m}$	Dauer



Die analytische Kostenplanung im Beispielprojekt verwendet eine Plankostenfunktion welche die Faktormengen und Faktorpreise der verschiedenen Ressourcen mit der Einsatzdauer der Arbeitspakete hochrechnet.

Die Faktormengen der Ressourcen je betrachteter Arbeitspaketgruppe und die Faktorpreise (Kostensätze) sind im Einsatzmittelplan (vorherige Abbildung) enthalten.

Tabelle 10: ressourcenbasierte analytische Kostenplanung im Beispielprojekt

Kostenplanung								
Ressourcenbasierte von der Dauer (deterministisch) abhängige Kosten								
Projektstruktur		0 Start	1.1 Entwurf- Festigkeit	1.2 Zeichnungen	1.3 Stücklisten	2.1, 2.2, 3.1 Vormaterial & Kaufteile beschaffen, Hausteile	3.2 Endmontage	
Technologie	Ktech[Dp]	-	-	-	-	40.000	40.000	-
(intern und externe Infrastruktur; Knowhow)	Ktech[Dh]	-	-	-	-	30.000	30.000	-
	Ktech[Do]	-	-	-	-	25.000	28.000	-
Personal	Kpers[Dp]	-	15.400	7.616	15.360	34.240	64.000	2.000
(intern und aus externer Dienstleistung)	Kpers[Dh]	-	11.000	4.760	6.144	25.680	32.000	1.600
	Kpers[Do]	-	6.600	3.808	6.144	21.400	25.600	1.200
Material	Kmat	-	-	-	-	80.000	-	-
(eigene Beschaffung und Materialkosten bei externer DL)								
Kosten	K[Dp]	-	15.400	7.616	15.360	154.240	104.000	2.000
	K[Dh]	-	11.000	4.760	6.144	135.680	62.000	1.600
	K[Do]	-	6.600	3.808	6.144	126.400	53.600	1.200

Vorgangsdauern								
kritische Dauern aus Schätzung	Text	0 Start	1.1 Entwurf- Festigkeit	1.2 Zeichnungen	1.3 Stücklisten	2.1, 2.2, 3.1 Vormaterial & Kaufteile beschaffen, Hausteile fertigen	3.2 Endmontage	3.3 Versand
Dauer pessimistisch	Dp		7	8	5	40	20	5
Dauer Häufig	Dh	0	5	5	2	30	10	4
Dauer optimal	Do		3	4	2	25	8	3

Die vorherige Abbildung zeigt die Kostenplanung für das Beispielprojekt, mit ressourcenbasierten von der Dauer (deterministisch) abhängigen Kosten.

Da die Vorgangsdauern im Beispielprojekt bereits für die Varianten optimistische, realistische und pessimistische Planung vorliegen, können die Kosten ebenfalls für diese Varianten berechnet werden.

Das Projektstrukturelement 2.1, 2.2, 3.1 enthält nur die Dauer des Arbeitspaketes 2.2 da nur die kritischen Vorgangsdauern auf die Gesamtdauer Einfluss haben. Für die Ressourceneinsätze und die Kostenplanung müssen aber alle Arbeitspakete

während der Dauer berücksichtigt werden. Im Projektbeispiel bedeutet das eine nicht exakte Ressourcen- und Kostenplanung, da die Arbeitspakete 2.1, 2.2, 3.1 über die Vorgangsdauer von 2.2 kalkuliert werden, obwohl 2.1 und 3.1 nicht so lange wie 2.2 dauern.

## 1.5. Einbeziehung der Unsicherheit in der Projektplanung

### 1.5.1. Unsicherheit und Risikomanagement in Projekten

Nach einer Begriffsdefinition bei Patzak & Rattay<sup>58</sup> ist Risiko eine Eigenschaft einer zukünftigen Situation, erfasst als Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines nicht erwünschten Ereignisses, welches mit dem im Eintrittsfall zu erwartenden Schaden bewertet wird. Das Risikomanagement in Projekten befasst sich mit dem Phänomen der Unsicherheit des Erreichens gesteckter Ziele in Projekten und ist eine Methodik, deren Anwendung den Erfolg von Projekten durch gezieltes Auseinandersetzen mit ihren Unsicherheiten gewährleisten soll. Im klassischen Projektmanagement werden Projektrisiken, wenn überhaupt, nur indirekt berücksichtigt, indem man für Abweichungen von Projektzielen in der Projektplanung Sicherheitszuschläge einrechnet. Das Projektrisikomanagement dient der Analyse und Gestaltung der Projektrisiken. Diese Aufgabe ist heute eine integrierte Teildisziplin des Projektmanagements. Mithilfe des Projektrisikomanagements werden Projektrisiken pro aktiv berücksichtigt, d.h. es wird auf Risiken planend und steuernd eingegangen. Dies geschieht als Risikomanagement-Prozess in Form eines geschlossenen Regelkreises, an dessen Beginn die Risikoanalyse mit der Identifizierung und Bewertung von Risiken steht. In der Startphase dient die Risikoanalyse hauptsächlich als Grundlage für die Projektentscheidungen aus Sicht des gesamten Projektrisikos. Es sind noch keine detaillierten Analysen realisierbar. In dieser Vorphase besteht das Risikomanagement aus dem Managen der Rahmenbedingungen des Projekts. In der Projektausführungsphase ist die Risikoanalyse wesentlich aufwendiger, da hier Strategien und operative Maßnahmen für ein optimales Gestalten der

---

<sup>58</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004), S.42

Projektrisiken entwickelt werden sollen und durch stufenweise Auseinandersetzung mit den Projektrisiken die Sicherheit des Projekterfolges schrittweise erhöht werden soll. Das Projektrisiko-Controlling zeigt auf, ob die für das Projekt wesentlichen Risiken erkannt und richtig bewertet werden und ob sich die gewählten risikopolitischen Maßnahmen als geeignet erwiesen haben. Aus der Sicht des Risikomanagements ist diese Arbeit im Bereich der Risikoanalyse während der Ausführungsphase angesiedelt, wobei speziell die Bewertung von Risikoauswirkungen auf das gesamte Projekt interessant ist.<sup>59</sup>

In der Literatur wird detailliert auf Methoden und Techniken der Risikoplanung in Projektausführungsphasen eingegangen.<sup>60</sup>

Die folgende Abbildung verdeutlicht den Zusammenhang der Aufgaben im Risikomanagement mit den Phasen eines Projekts.

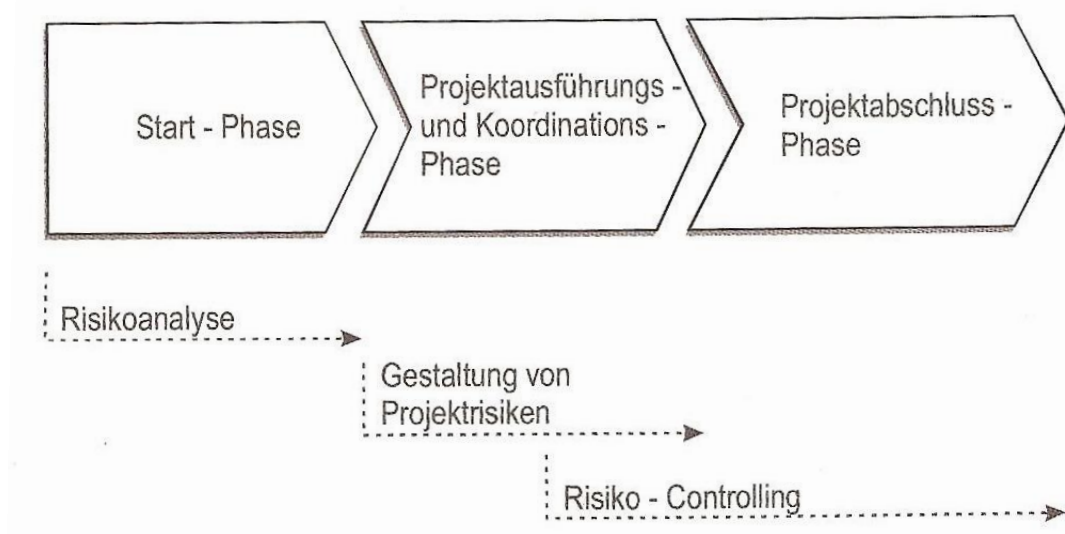


Abbildung 8: Zusammenhang Risikomanagementaufgaben mit Projektphasen<sup>61</sup>

<sup>59</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) Kap. 1.3. Risikomanagement in Projekten

<sup>60</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) Kap. 3.2.8 Risikoplanung

<sup>61</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 46

### 1.5.2. Netzplantechnik im Projektmanagement

In dieser Arbeit wird ein Entscheidungsbaummodell verwendet um die Unsicherheit von Projektvorgängen pfadweise mit Wahrscheinlichkeitsangaben zu modellieren. Das Entscheidungsbaummodell wird in dieser Arbeit als Ergänzung zur traditionellen Projektplanung und zur Hochrechnung von Zeit- und Kostenprognosen auf Basis der Earned Value Analysis betrachtet und stellt keinen Widerspruch zu bekannten Verfahren der Netzplantechnik dar.

Die Netzplantechnik ist grundsätzlich ein Sammelbegriff.<sup>62</sup> Also solcher fasst sie "alle Verfahren zur Beschreibung, Planung, Steuerung, Überwachung, von Projektabläufen auf der Grundlage von Netzplanmodellen" zusammen.<sup>63</sup> Ursprünglich haben sich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts allerdings mehrere Ausprägungen zunächst parallel und zum Teil unabhängig voneinander entwickelt. Man unterscheidet bei diesen Techniken zwischen solchen, die deterministische Projektabläufe vorsehen, bei denen also alle Vorgänge ausgeführt werden und solchen, die von stochastischen Strukturen ausgehen.<sup>64</sup>

Bei deterministischen Netzplänen ist charakteristisch, dass zur Schätzung der Vorgangsdauern eine Einzeitschätzung verwendet wird. Das Unsicherheitsproblem wird bei vielen Verfahren der Netzplantechnik nicht berücksichtigt, gearbeitet wird dann mit einem Zeitwert für jeden Vorgang.<sup>65</sup>

Bei den stochastischen Netzen gibt es zwei Abstufungen, wie Unsicherheiten im Projekt ausgedrückt werden. So berücksichtigt die Program Evaluation And Review Technique (PERT) deterministische Vorgänge, aber stochastische Bewertungen.<sup>66</sup> Dies bedeutet, dass alle Vorgänge in deterministischer Reihenfolge eintreten, aber berücksichtigt wird, dass die Einhaltung von Terminen nicht eindeutig zu planen ist. Das PERT-Verfahren wurde im Auftrag des Special Projects Office(SPO) der U.S. Navy im Rahmen der Entwicklung und des Baus der Polaris-Rakete entwickelt. Da

---

<sup>62</sup> (Budde & Brouns , 2010) Netzplantechnik im Projektmanagement, Kap. 4.3

<sup>63</sup> (Runzheimer & Barković, 2009) Netzplantechnik (NPT) als wichtiges Instrument des Projektmanagements, S. 266

<sup>64</sup> (Pitsch, WS 1996/97) Netzplantechnik: Der STEO-Netzplan, S. 1

<sup>65</sup> (Runzheimer & Barković, 2009) Netzplantechnik (NPT) als wichtiges Instrument des Projektmanagements, S. 279

<sup>66</sup> (Pitsch, WS 1996/97)Netzplantechnik: Der STEO-Netzplan, S. 2

es sich hier um eine Neuentwicklung handelte, mussten Unsicherheiten bezüglich des Abschlusses von Teilarbeiten einkalkuliert werden.<sup>67</sup>

Dagegen sieht die Graphical Evaluation And Review Technique (GERT) vor, dass zusätzlich zur Unsicherheit über Eintrittszeitpunkte bestimmter Ereignisse, eventuell Pfade nur unter bestimmten Bedingungen überhaupt, oder mehrmals durchlaufen werden. Letzteres wird leicht deutlich, wenn man ein Forschungsprojekt betrachtet, bei dem iterativ vorgegangen wird oder Entwicklungszweige verworfen werden.<sup>68</sup>

Zuletzt beschriebene Netzpläne nennt man auch Entscheidungsnetzpläne und es ist mit verschiedenen "Projektausgängen" zu rechnen".<sup>69</sup> Es gibt Weiterentwicklungen der GERT, wie "Stochastic Exclusive-Or GERT"(STEO), das die hohe Komplexität von GERT reduziert und so algorithmische Auswertungen ermöglicht, wohingegen bei GERT selbst häufig Simulationen durchzuführen sind.<sup>70</sup>

---

<sup>67</sup> (Weaver, 2008) A Brief History of Scheduling - Back to the Future, S. 6

<sup>68</sup> (Pitsch, WS 1996/97) Netzplantechnik: Der STEO-Netzplan S. 2

<sup>69</sup> (Runzheimer & Barković, 2009) Netzplantechnik (NPT) als wichtiges Instrument des Projektmanagements, S. 270

<sup>70</sup> (Pitsch, WS 1996/97) Netzplantechnik: Der STEO-Netzplan, S. 6

## 2. Integriertes Projektcontrolling mit der Earned Value Analysis

### 2.1. Grundlagen des Projektcontrolling

Projektcontrolling lässt sich einerseits funktionell andererseits institutionell beschreiben. Funktionell umfasst das Projektcontrolling all jene Aufgaben und Tätigkeiten (Funktionen) die zum Controlling eines Projektes erforderlich sind. Das institutionelle Projektcontrolling umfasst jene Personen oder Stellen, die als Projektcontroller betitelt sind, samt den dazugehörigen Tätigkeiten.<sup>71</sup>

Projektcontrolling wird verstanden als kybernetischen Prozess aus den Komponenten Projektplanung, Projektdurchführung, Projektsteuerung und Projektüberwachung besteht, er stellt die Aufgaben, das Vorgehen und die Instrumente des Projektcontrollings in einem Regelkreismodell (Abbildung 9: Projektcontrolling-Regelkreis) dar.<sup>72,73</sup> Mit den Instrumenten des Projektcontrollings wird die Koordination und Überwachung der Projektpläne und Projektmanagement-Standards, das rechtzeitige Erkennen von Abweichungen und die Entwicklung und Umsetzung adäquater Steuerungsmaßnahmen ermöglicht.<sup>74</sup> Nach DIN 69901-5:2009-01 ist Projektcontrolling die „Sicherstellung des Erreichens aller Projektziele durch Ist-Datenerfassung, Soll-Ist-Vergleich, Analyse der Abweichungen, Bewertung der Abweichungen gegebenenfalls mit Korrekturvorschlägen, Maßnahmenplanung, Steuerung der Durchführung von Maßnahmen“.<sup>75</sup> Das Projektcontrolling erfolgt zu bestimmten Stichtagen, die am Beginn des Projekts vereinbart wurden oder zu bestimmten Anlässen.<sup>76</sup> Für den Projektleiter ist vor allem die Aktualität der erhobenen Ist-Daten von Bedeutung, da bei Abweichungen rasch und effizient gegengesteuert werden muss.<sup>77</sup>

---

<sup>71</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 316

<sup>72</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 319

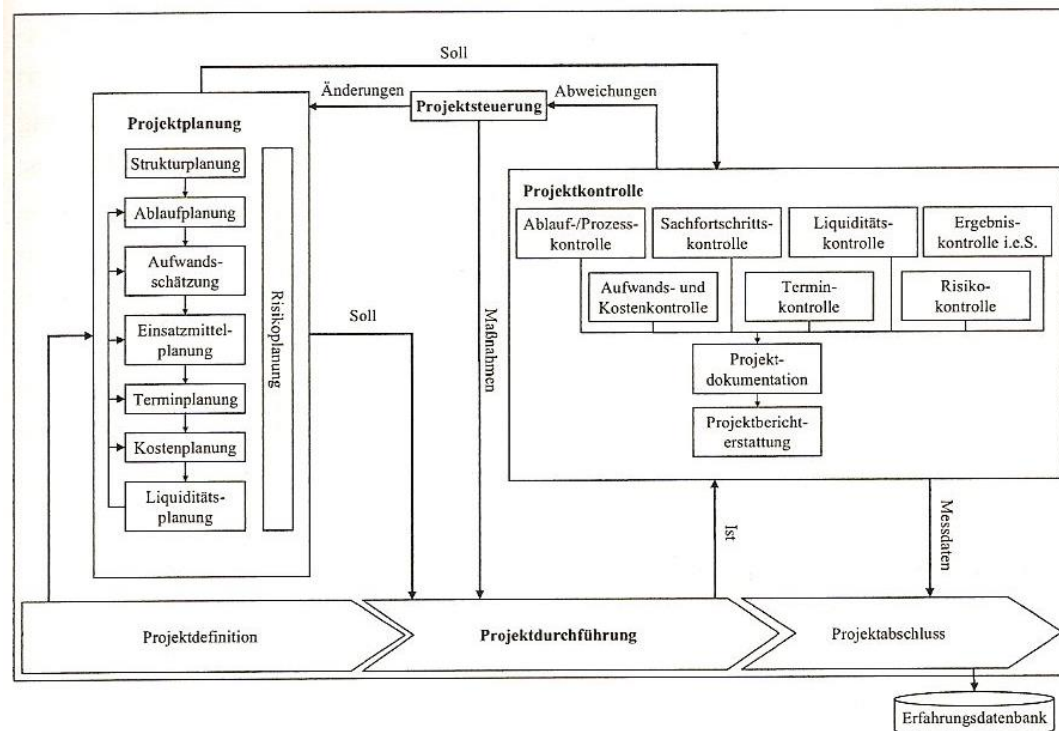
<sup>73</sup> (Völl, 2010) S. 37

<sup>74</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 319

<sup>75</sup> (DIN69901-5:2009-01 Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe, 2009) S. 12

<sup>76</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 320

<sup>77</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 322

Abbildung 9: Projektcontrolling-Regelkreis<sup>78</sup>

Projektcontrolling ist letztlich erforderlich wegen des nicht vorhersehbaren Auftretens von Zieländerungen, Störgrößen, Planungsfehlern oder Schätzabweichungen. Bei der Zerlegung des Projekts in der Planungsphase wurde darauf geachtet, dass planbare und kontrollierbare Arbeitspakete entstehen.<sup>79</sup>

Die zum Stichtag aktuellen Ist-Daten werden gesammelt, überprüft und dokumentiert. Die zu erhebenden Ist-Daten einzelner Arbeitspakete umfassen die Leistung als Menge (Leistungsfortschritt bzw. Fertigstellungsgrad) und Qualität (Abnahmeergebnisse) sowie Termine (Start, Ende oder Restdauer), Ressourceneinsatz, Ist-Kosten und Restkosten.<sup>80</sup>

### 2.1.1. Integriertes Projektcontrolling

Da ein Projekt durch das Zieldreieck aus Leistung, Termine und Ressourcenverbrauch bzw. Kosten erfasst wird, liefert auch nur die Erfassung der aktuellen Abweichungen aller drei Größen eine ganzheitliche Aussage über den Status eines laufenden Projekts. Bei allen Zielgrößen werden Abweichungen als

<sup>78</sup> (Völl, 2010) S. 37

<sup>79</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 321

<sup>80</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 322

Über- oder Unterschreitung auftreten. Steuerungsmaßnahmen werden gesetzt wenn diese Abweichungen größer als eine bestimmte Toleranzbreite sind. Erst eine integrierte Betrachtung in Form der Erfassung von Leistungen in der Zeit zu angefallenen Kosten liefert die Basis für ganzheitliche Entscheidungen im Projektmanagement.<sup>81</sup>

Die Earned Value Analysis ist eine Methode um integriertes Projektcontrolling betreiben zu können.

Der Zweck des integrierten Projektcontrollings ist es,<sup>82</sup>

- ein Bild des tatsächlich erbrachten Leistung zu einem Stichtag zu liefern,
- der Leistung zu einem Stichtag die entsprechenden Kosten zuzuordnen,
- Planabweichungen festzustellen und zukünftige Probleme aufzuzeigen,
- kostenoptimale Steuerungsmaßnahmen herzuleiten
- Änderungen der Projektziele aufzuzeigen,
- Gesamtprognosen des Projektes zu liefern.

Zum Beispiel ist es unklar, ob ein Projekt gut läuft, wenn bei der Projektverfolgung festgestellt wird, dass zwar die geforderte Qualität zur geplanten Zeit voll erbracht wurde, aber die letztgültige Zusammenstellung der angefallenen Projektkosten acht Wochen alt ist. Ein weiteres Beispiel für nicht ganzheitliche Betrachtung ist es die Termine und Kosten nicht auf eine entsprechende Ist-Leistung zu beziehen.<sup>83</sup> In einem solchen Fall läuft ein Projekt nur scheinbar erfolgreich, wenn die Formalziele Termin und Kosten eingehalten oder sogar unterschritten werden, jedoch die Qualität den Anforderungen nicht entspricht und mit hoher Wahrscheinlichkeit nach Projektabschluss zu Gewährleistungsforderungen, Nacharbeit und Verärgerung führt.<sup>84</sup>

### 2.1.2. Erfassung des Leistungsfortschritts (Fertigstellungsgrad)

Der Fertigstellungsgrad (en: percent complete) ist das Verhältnis der zu einem Stichtag erbrachten Leistung zur Gesamtleistung, z. B. eines Arbeitspaketes oder

---

<sup>81</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 337

<sup>82</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 338

<sup>83</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 337

<sup>84</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 337



eines Projekts.<sup>85</sup> Der Fertigstellungsgrad wird in Prozent der Gesamtleistung angegeben und bei der Erfassung machen jene Arbeitspakete Probleme, die zum Stichtag zwar begonnen, aber noch nicht beendet sind. Hierfür muss mittels Maßgrößen oder Indikatoren eine Fortschrittmessung vorgenommen werden. Je Zeitpunkt sind geplanter und tatsächlicher Fortschrittsgrad zu unterscheiden. Folgende Methoden zur Fortschrittmessung sind verwendbar<sup>86</sup>:

- Mengen-Proportionalität (Messung anhand einer quantitativen Größe wie Laufmeter, Fläche, Raummaße oder Masse):
- 0/50/100%-Methode
- Meilensteine im Arbeitspaket (Statusschritt-Methode)
- Schätzung der Restleistung

Zur Verfolgung und Verbesserung der Prozessqualität wird diese laufend in diversen Projektteam-Sitzungen und anderen Einrichtungen des formalen und informellen Informationsaustausches verfolgt.<sup>87</sup>

Die Qualität kann zu bestimmten Meilensteinen durch die Erreichung von im Qualitätsplan (Pflichtenheft, Produktspezifikation, Ergebnisdokumentation etc.) definierten Qualitätskriterien erfasst und gemessen werden.<sup>88</sup>

### 2.1.3. Terminerfassung

Die Messung des Leistungsfortschritts und die Beurteilung der Termsituation sollten in ihrer Detaillierung der Projektgröße und -Art entsprechen. In jedem Fall soll der entstehende Nutzen durch das rechtzeitige Erkennen von Abweichungen dem Aufwand für die Datenerhebung und -Aufbereitung in einem ausgewogenen Verhältnis gegenüberstehen. So wird es bei Projekten mit kurzer Laufzeit oder wenn andere Aspekte als die Termine (etwa Akzeptanz, Qualität) im Vordergrund stehen, ausreichen, den Leistungs- und Terminfortschritt anhand weniger, aber leicht messbarer Meilensteine zu überwachen.<sup>89</sup>

---

<sup>85</sup> (DIN69901-5:2009-01 Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe, 2009) S. 8

<sup>86</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 323

<sup>87</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 324

<sup>88</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 330

<sup>89</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 326

Dagegen ist eine detaillierte Verfolgung der Termine dann anzuraten, wenn der Erfolg des Projekts sehr stark vom Einhalten der Fertigstellungstermine abhängt und zum Beispiel pönalisiert (unter Strafe gestellt bei Überschreitung) ist.<sup>90</sup>

Bei der Abfrage der Ist-Terminsituation kann nach der Restdauer der in Arbeit befindlichen Vorgänge oder dem wahrscheinlichen Ende gefragt werden. Erfahrungsgemäß geben die Arbeitspaketverantwortlichen beim voraussichtlichen Endtermin einen optimistischen Wunschtermin an, bei der Restdauer aber eher realistische Informationen.<sup>91</sup>

#### 2.1.4. Ressourcen- und Ist-Kostenerfassung

Um Kostenabweichungen rechtzeitig erkennen und geeignete Steuerungsmaßnahmen einleiten zu können, ist es notwendig, die Ist-Kosten zeitlich begleitend zur Projektdurchführung zu erheben. Die parallele Ist-Kostenerfassung setzt voraus, dass die Ermittlung und Zusammenfassung der Istkosten den in der Kostenplanung verwendeten Strukturen entspricht.<sup>92</sup>

Die Ist-Kostenerfassung kann erfolgen aufgrund von<sup>93</sup>

- Stundenaufschreibungen
- Reiseabrechnungen
- Eingangsrechnungen für Material, Subauftragnehmerleistungen etc.
- Zwischenabrechnungen (Teilzahlungen)
- Lieferscheine etc.

sowie insbesondere bei länger dauernden extern vergebenen Arbeitspaketen mittels so genannter disponierter Kosten.

Dabei stellen die erfassten Kosten

- einerseits Ist-Kosten zu Ist-Preisen bei vorliegender Abrechnung und
- andererseits Ist-Kosten zu Planpreisen (z.B. bei Lieferscheinen, noch nicht abgerechneten Fremdleistungen etc.) dar.<sup>94</sup>

---

<sup>90</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 326

<sup>91</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 326

<sup>92</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 326

<sup>93</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 326

<sup>94</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 326

## 2.2. Projektsteuerung mit korrektiven Maßnahmen oder durch Planänderung

Im Rahmen Projektsteuerung werden die Parameter Leistung (Quantität, Qualität), Termine und Kosten betrachtet.<sup>95</sup> Im Prinzip gibt es folgende Möglichkeiten für Steuerungsmaßnahmen: Heranführen des Ist an Plan durch korrektive Maßnahmen oder Anpassung des Plan an das Ist durch Planänderung.<sup>96</sup>

Die zu wählenden Steuerungsmaßnahmen werden in Abhängigkeit vom Grad der Auswirkung auf die Projektziele gewählt, wobei zwischen den Parametern Leistung, Zeit und Kosten zu unterscheiden ist.<sup>97</sup> Es sind zu unterscheiden: Maßnahmen der Kapazitätserhöhung, Effizienzsteigerung, Produktivitätserhöhung bzw. Technologiewechsel und Leistungsverringerung.<sup>98</sup>

Tabelle 11: Liste der Steuerungsmaßnahmen für Zielabweichungen<sup>99</sup>

Leistung zur gering	Zeit überschritten	Kosten überschritten	Umfeldbeziehungen bzw. Teamarbeit gestört
höherer Ressourceneinsatz	Kürzung der Dauer am kritischen Weg	Kosten überwälzen, Claims platzieren	Projektmarketing verstärken
- Überstunden, weitere Arbeitsschichten, Wochenendarbeit	- Zeitabstände kürzen, Überlappungen vorsehen bzw. vergrößern	Vergabe von Teilleistungen an Subauftragnehmer, die kostengünstiger sind	Beziehungspflege intensivieren
- Leistungsanreizsysteme, Prämien, Motivation, Teamentwicklung	- Abhängigkeiten eliminieren durch Einsatz von Hilfsmitteln, Vorrichtungen, Zusätze	Qualität auf das unbedingt nötige beschränken, Leistungsreduktion, Sparen bei Dokumentation	Spielregeln entwickeln und vereinbaren
- Verbesserung der Kontrolle - Abbau von Belastungen außerhalb des Projekts, Umschichtung im Projekt	- Splitten von Vorgängen, Umordnen, Ausnützen von belegungslücken bei den Kapazitäten - Rationalisierungspotentiale ausschöpfen - Austausch der Mitarbeiter, des Projektmanagement-Teams, Änderung der Projektorganisation	Nutzung günstigerer Varianten (Technologie, Zeit), dabei ist allerdings zu beachten dass diese Maßnahmen kurzfristig eher zu Verlängerung führen, weil Rüstzeiten, Umgewöhnung et. Eintritt; mittelfristig werden sie allerdings zu einer Verbesserung führen	Identifikationsmaßnahmen entwickeln
	höherer Ressourceneinsatz	Verrechnungssätze des Angebots beibehalten, aber billigere Arbeitskräfte einsetzen	
	Zukauf weiter Ressourcen	Geräte, Vorrichtungen mehrfach verwenden, aber dem Projekt voll anrechnen (Miete, Kauf)	
	Veränderung von Abhängigkeiten oder Parallelarbeiten		
	nicht zwingende Leistungen minimieren oder weglassen	Termine hinausschieben, Dauern kostengünstig ausdehnen	

<sup>95</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 319

<sup>96</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 342

<sup>97</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 343

<sup>98</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 343

<sup>99</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 342 und S. 343

### 2.3. Einführung in die Earned Value Analysis(EVA)

Eine Methode die in grafischer Weise alle drei Zielgrößen zugleich berücksichtigt, ist die Earned Value Analysis (EVA). Dabei werden die geplante sowie die tatsächlich erbrachte Leistung in Kosten ausgedrückt und bezogen auf die Zeit erfasst. Diese Methode des integrierten Projektcontrollings ist in den USA unter dem Namen Earned Value Analysis bzw. in standardisierter Form als Cost/Schedule Control System Criteria (C/SCSC) beannt. Im deutschen Sprachraum entspricht sie exakt der Fertigstellungswert-Analyse<sup>100</sup> und wird auch Fertigstellungswertmethode, Leistungswertanalyse oder Arbeitswertanalyse bezeichnet.

<sup>101</sup> Die Earned Value Analysis oder Leistungswertanalyse beschreibt ein Messverfahren, mit dem man den tatsächlich erzielten Fortschritt in Relation zum geplanten Ziel ermitteln und bewerten kann. Der Leistungswert (EV) ist ein Maß für die geleistete Arbeit und beantwortet die Frage: "Was hat der Kunde bekommen und was hat er dafür bezahlt?"<sup>102</sup> Die erste Verwendung in der industriellen Produktion kann bis in das späte 19. Jahrhundert zurückverfolgt werden.<sup>103</sup> Die Earned-Value-Analyse wurde im US Verteidigungsministerium um 1967 eingeführt und ist seither in den USA die bevorzugte Controllingmethode bei Projekten im öffentlichen Bereich, wurde jedoch in der Privatindustrie weniger stark verwendet. Um die Nutzung der Methode im privaten Sektor zu fördern hat die US Regierung 1996 entscheiden die C/SCSC Methode zu verwerfen und zum flexibleren Earned Value Project Management zu wechseln.<sup>104</sup> Die Earned Value Analysis ist durch die deutsche Norm DIN69901-3:2009-01 standardisiert und gibt die wichtigsten internationalen Abkürzungen und Kennzahlen zur Methode an.<sup>105</sup> Die Earned Value Analyse basiert auf den drei Kostengrößen Plankosten, Istkosten und Sollkosten (Fertigstellungswert bzw. Earned Value).<sup>106</sup> Die Earned Value Analysis wird für eine bestimmte Aufgabe (z. B. Projekt, Teilprojekt, Arbeitspaket) zu einem bestimmten Zeitpunkt (Stichtag) ermittelt. Zur Berechnung sind die Plan-

---

<sup>100</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 338

<sup>101</sup> (Earned\_Value\_Analysis, 2014)

<sup>102</sup> (Earned\_Value\_Analysis, 2014)

<sup>103</sup> (Fleming, 2000)

<sup>104</sup> (Anbari, 2003)

<sup>105</sup> (DIN69901-3:2009-01 Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 3: Methoden, 2009) S. 6

<sup>106</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 338

und Istwerte sowie, wenn vorhanden, die geschätzten Restaufwände notwendig. Aus der EVA können Prognosen für die erwarteten Gesamtkosten und den Fertigstellungszeitpunkt des Projekts abgeleitet werden. Des Weiteren verfügt die EVA über eine Reihe von projektrelevanten Kennzahlen wie Cost Performance Index (CPI) oder Schedule Performance Index (SPI), die auch als Indikator für ein Frühwarnsystem genutzt werden können.<sup>107</sup> Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird die Earned Value Analysis erklärt und für das Beispielprojekt werden die Berechnungen gezeigt. Die wichtigsten internationalen Abkürzungen und Kennzahlen zur Earned Value Analysis sind in der DIN69901-3:2009-01 in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 12: Die wichtigsten internationalen Abkürzungen und Kennzahlen zur Earned Value Analysis (Auszug aus DIN 69901-3:2009-01 - Tabelle 2)

Acronym	Name (Calculation) <sup>a</sup>	Name (Berechnungsformel) <sup>a</sup>	Abkürzung
BAC	Budget at Completion	Plan-Gesamtkosten (bei Fertigstellung)	PGK
DD	Data Date = <i>Time now</i> = As-of Date	Stichtag	ST
PC PCT	<i>Percent(age) Complete</i> Process Degree	Fertigstellungsgrad (zum Stichtag)	FGR
		Plan Fertigstellungsgrad (zum Stichtag)	FGR <sub>Plan</sub>
PV BCWS	Planned Value <i>Budget Cost of Work Scheduled</i>	Plan-Kosten (zum Stichtag) PGK × FGR <sub>Plan</sub> =	PK
AC ACWP	Actual Cost <i>Actual Cost of Work Performed</i>	Ist-Kosten (zum Stichtag)	IK
EV BCWP	Earned Value = BAC × PC = <i>Budget Cost of Work Performed</i>	Fertigstellungswert (zum Stichtag) PGK × FGR =	FW
API	Actual Performance Index = ACWP / BCWS = AC / PV	Kostenplan-Kennzahl IK / PK =	KK
CPI	Cost Performance Index = BCWP / ACWP = EV / AC	Kosten-Entwicklungsindex FW / IK =	KEI
SPI	Schedule Performance Index = BCWP / BCWS = EV / PV	Termin-Entwicklungsindex FW / PK =	TEI
CV	Cost Variance = BCWP - ACWP = EV - AC	Kostenabweichung = <i>Soll/Ist-Vergleich</i> FW - IK =	KA
CV%	Cost Variance Percentage = CV / BCWP × 100 = CV / EV × 100	Prozentuale Kostenabweichung KA / FW × 100 =	KA%
SV	Schedule Variance = BCWP - BCWS = EV - PV	Planabweichung = <i>Soll/Plan Vergleich</i> FW - PK =	PA
SV%	Schedule Variance Percentage = SV / BCWS × 100 = SV / PV × 100	Prozentuale Planabweichung PA / PK × 100 =	PA%
EAC	Estimated Cost at Completion (Kosten) = BAC / CPI	Erwartete Gesamtkosten (bei Fertigstellung) (Lineare Prognose) <sub>1</sub> PGK × IK / FW = (Additive Prognose) <sub>2</sub> IK + PGK - FW = (Ursprungsplan) <sub>3</sub> PGK =	EGK <sub>1</sub> EGK <sub>2</sub> EGK <sub>3</sub>
PAC	Projection at Completion (Zeit) = Planned Duration / SPI = ((BAC / SPI) - BAC) / (Durchschnitt BCWS / Zeiteinheit)	Prognose für Fertigstellung ((PGK / TEI) - PGK) / (Durchschnitt PK/ Zeiteinheit)	= PF
VAC	Variance at Completion = BAC - EAC	Gesamtkostenabweichung PGK - EGK =	GKA
VAC%	Variance at Completion Percentage = VAC / BAC × 100	Prozentuale Gesamtkostenabweichung GKA / PGK × 100 =	GKA%

<sup>a</sup> Bei mehreren Möglichkeiten sind die gebräuchlicheren Abkürzungen kursiv geschrieben.

<sup>107</sup> (DIN69901-3:2009-01 Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 3: Methoden, 2009) S. 6

### 2.3.1. Basisgrößen der Earned Value Analysis

Die Methode der Earned Value Analyse basiert auf den Kostengrößen Plan-, Ist-, und Sollkosten. Die Plankosten sind die geplanten Kosten für die (dem Terminplan entsprechende) Planleistung. Die Ist-Kosten sind die Kosten für die tatsächlich erbrachte Istleistung. Die Sollkosten sind die geplanten Kosten für die tatsächlich erbrachte Istleistung und werden auch Fertigstellungswert, Leistungswert oder Earned Value genannt.<sup>108</sup>

#### 2.3.1.1. Plankosten

Die kumulierten Plankosten PK (Plan Value PV) sind die geplanten Kosten für die (zum Stichtag) dem Terminplan entsprechende Planleistung. Man kann sich die Plankosten auch als den Wert einer Plankostenfunktion ausgewertet an der Stelle der Planleistung zum Stichtag ST denken, somit den Plankosten der Planleistung. Für die Planleistung in der Plankostenfunktion kann man den geplanten Fertigstellungsgrad  $FGR_{ST}^{PLAN}$  einsetzen.

$$PK_{ST}^{kum} = PGK \cdot FGR_{ST}^{PLAN}$$

#### 2.3.1.2. Ist-Kosten zum Stichtag

Die kumulierten Ist-Kosten  $IK_{ST}^{kum}$  sind die tatsächlich aufgelaufenen Kosten für die erbrachte Ist-Leistung bis zum Stichtag ST. Die erbrachte Ist-Leistung entspricht dem tatsächlichen Fertigstellungsgrad der bereits fertiggestellten und abgenommenen Phasen, wobei der Stichtag dann die Ist-Dauer ist.

#### 2.3.1.3. Earned Value

Der Earned Value oder Leistungswert ist gemäß Begriffserklärung in DIN69901-5:2009-01 der Wert, der sich bei der Abwicklung des Projekts zu einem bestimmten Stichtag ergibt und für Vorgänge, Arbeitspakete oder ein Projekt

---

<sup>108</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 338

ermittelt werden kann.<sup>109</sup> Der Name Earned Value Analysis wurde von diesem Begriff abgeleitet.

Der Earned Value wird auch Leistungswert, Fertigstellungswert oder Sollkosten SK genannt und man kann sich darunter den verdienten Wert der tatsächlich erbrachten Leistung vorstellen. Verglichen mit den Plankosten sind die Sollkosten der Wert einer Plankostenfunktion an der Stelle der Ist-Leistung, somit die Plankosten für die Ist-Leistung zum Stichtag. Für die Ist-Leistung kann man den tatsächlichen Fertigstellungsgrad  $FGR_{ST}^{IST}$  in die Plankostenfunktion einsetzen.

$$EV_{ST} = PGK \cdot FGR_{ST}^{IST}$$

Alle drei Größen können zu beliebigen Stichtagen betrachtet werden, um ein laufendes Projektcontrolling zu ermöglichen. Eine ausschließliche Erfassung zum Projektende käme einer reinen Projektrevision oder Nachkalkulation gleich.<sup>110</sup>

### 2.3.2. Fertigstellungsgrad-Berechnung

Der Fertigstellungsgrad (en: percent complete) an einem Stichtag ist wie oben erwähnt das Verhältnis der erbrachten Leistung zur Gesamtleistung. Fertigstellungsgrad wird in Prozent der Gesamtleistung angegeben.<sup>111</sup> Im Projektbeispiel wird der Fertigstellungsgrad als Verhältnis der kumulierten Plankosten zu den Plan-Gesamtkosten angegeben.

$$FGR = \frac{PK^{kum}}{PGK}$$

Zu unterscheiden ist der geplante Fertigstellungsgrad  $FGR_n^{PLAN}$  für eine Phase n zur Plandauer vom tatsächlichen Fertigstellungsgrad  $FGR_{ST}^{IST}$  zum Stichtag St. Beide beziehen sich auf komplett abgeschlossene und qualitätskonforme Phasen.

---

<sup>109</sup> (DIN69901-5:2009-01 Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe, 2009) S. 8

<sup>110</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 338ff

<sup>111</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagment, 4. Auflage, 2004) S. 322

### 2.3.2.1. Ansatz für komplett abgeschlossene Phasen

Der Planfertigstellungsgrad  $FGR_n^{PLAN}$  zur Plandauer für jede Phase n im Projekt ist der prozentuelle Anteil der kumulierten Plankosten PK an den Plan-Gesamtkosten PGK.

$$FGR_n^{PLAN} = \frac{PK_n^{kum}}{PGK}$$

Tabelle 13: Plan-Fertigstellungsgrad zur Plandauer je Projektphase

Stufe (Phase)	n=	0	1	2	3	4	5	6
Phase, Arbeitspaket oder Meilenstein		0	1.1	1.2	1.3	2.1, 2.2, 3.1	3.2	3.3
Benennung		Start	Entwurf+ Festigkeit	Zeichnungen	Stücklisten	Vormaterial & Kaufteile beschaffen,	Endmontage	Versand
Planungsparameter (p=pessimistisch, r=realistisch, o=optimistisch)		r	r	r	r	r	r	r
Plandauer	PD	0	5	5	2	30	10	4
Plandauer kumuliert	PD <sub>acc</sub>	0	5	10	12	42	52	56
Plankosten (zur Plandauer)	PK	0	11.000	4.760	6.144	135.680	62.000	1.600
Plankosten kumuliert	PK kum	0	11.000	15.760	21.904	157.584	219.584	221.184
Plan-Gesamtkosten	PGK							221.184
Plan Fertigstellungsgrad (zur Plandauer)	$FGR_n^{PLAN} (PD_{acc}) = PK / PGK$	0,0%	5,0%	7,1%	9,9%	71,2%	99,3%	100,0%

Der tatsächlichen Fertigstellungsgrad  $FGR_{ST}^{IST}$  zu einem Stichtag wird durch die bereits fertiggestellte und abgenommene (qualitätskonforme) Phasen n des Projektes charakterisiert.

Für die Phase n zum Stichtag ST ist der tatsächliche Fertigstellungsgrad  $FGR_{ST}^{IST}$  der prozentuelle Anteil der kumulierten Plankosten  $PK_n^{kum}$  von der Plan-Gesamtkosten PGK.

$FGR_{ST}^{IST} = FGR_n^{IST} = \frac{PK_n^{kum}}{PGK}$  wenn das Projekt nicht in der geplanten Phase liegt, dann muss mit den kumulierten Plankosten  $PK_n^{kum}$  der tatsächlich abgeschlossenen Phase n gerechnet werden. Der tatsächliche und der geplante Fertigstellungsgrad für sind nur dann identisch ( $FGR_n^{IST} = FGR_n^{PLAN}$ ) wenn das Projekt zum Stichtag ST tatsächlich auch in der geplanten Phase läuft.

Im Projektbeispiel ist zum Stichtag St=20 bereits die Phase n=3 abgeschlossen, das Projekt läuft in der geplanten Phase, somit ist der tatsächliche Fertigstellungsgrad

$$FGR_{ST=20}^{IST} = FGR_{n=3}^{IST} = \frac{PK_{n=3}^{kum}}{PGK} = \frac{21904 \text{ Euro}}{221184 \text{ Euro}} = 0,099 = 9,9\%$$



### 2.3.2.2. rechnerischer Plan-Fertigstellungsgrad laufender Perioden<sup>112</sup>

Im Beispielprojekt ist geplant Phase n=3 nach der Plandauer  $PD_3=12$  Tage und Phase n=4 nach  $PD_4=40$  Tagen abzuschließen. Zum Stichtag  $ST=20$  ist Phase n=3 tatsächlich fertig. Als abgenommen und qualitätskonform gilt  $FGR_{ST=20}^{IST} = 9,9\%$ , will man nun aber den eigentlich geplanten Fertigstellungsgrad  $FGR_{ST}^{PLAN}$  an einem beliebigen Stichtag ST in einer laufenden Periode (Phase n) wissen, dann ist das nicht mehr so einfach zu berechnen. Da ein Stichtag zwischen zwei Phasenabschlüssen liegen kann und auch die bereits laufende Phase schon einen Fortschritt haben muss interpoliert werden. Es muss eine Interpolation für Stichtage die zwischen zwei kumulierte Plandauern liegen gemacht werden um den korrekten Planfertigstellungsgrad zu erhalten.

Den zum Stichtag ST geplanten Fertigstellungsgrad  $FGR_{ST}^{PLAN}$  kann man aus dem Fertigstellungsgrad zur Plandauer der bereits abgeschlossenen Phase n und dem zusätzlichen Fertigstellungsgrad der aktuell laufenden Phase berechnen.

$$FGR_{ST}^{PLAN} = FGR_n^{PLAN} + FGR_{ST,n+1}^{aktuell\ laufend}$$

Durch Interpolation mit der Fertigstellungsgrade für n+1 und n bezüglich der Plandauern kann der Fertigstellungsgrad  $FGR_{ST,n+1}^{aktuell\ laufend}$  der aktuell laufenden Phase n+1 ermittelt werden.

$$FGR_{ST,n+1}^{aktuell\ laufend} = (ST - PD_n^{kum}) \cdot \frac{FGR_{n+1}^{PLAN} - FGR_n^{PLAN}}{PD_{n+1}^{kum} - PD_n^{kum}}$$

Wobei die beim rechnen verwendete Phase n vom Stichtag abhängt und  $PD_n^{kum} \leq ST < PD_{n+1}^{kum}$  gelten muss.

---

<sup>112</sup> Der rechnerische Plan-Fertigstellungsgrad einer laufenden Periode wird nur im Beispielprojekt berechnet um den Unterschied zum Ansatz für qualitätskonform abgeschlossene Phasen darzustellen.

Im Beispielprojekt sind aktuell 20 Arbeitstage vergangen, an diesem Stichtag  $ST=20$  wurde die Phase  $n=3$  abgeschlossen, somit wurde folgender Plan-Fertigstellungsgrad erreicht.

$$FGR_{n=3}^{PLAN} = \frac{PK_{n=3}^{kum}}{PGK} = \frac{21.904 \text{ €}}{221.184 \text{ €}} = 9,9\%$$

Die aktuell laufende Phase  $n+1=4$  wird folgenden Plan-Fertigstellungsgrad erreichen.

$$FGR_{n+1=4}^{PLAN} = \frac{PK_{n+1=4}^{kum}}{PGK} = \frac{157.584 \text{ €}}{221.184 \text{ €}} = 71,2\%$$

Der geplante Fertigstellungsgrad  $FGR_{ST}^{PLAN}$  zum Stichtag  $St=20$  der aktuell laufenden Phase  $n+1=4$  beträgt 16,4%.

$$FGR_{ST, n+1}^{aktuell\ laufend} = (20 - 12) \cdot \frac{71,2\% - 9,9\%}{42 - 12} = 16,4\%$$

Der geplante Fertigstellungsgrad  $FGR_{ST}^{PLAN}$  des Projekts zum Stichtag  $St=20$  beträgt somit 26,4%.

$$FGR_{ST=20}^{PLAN} = 9,9\% + 16,4\% = 26,4\%$$

Für den Tag 20 wäre also statt 9,9% aber rein rechnerisch (linear interpoliert) bereits 26,4% Fertigstellung geplant.

### 2.3.3. Vorgehensschritte der Earned Value Analysis

#### 2.3.3.1. Plankosten über der Zeitachse auftragen

Man trägt die kumulierten Plankosten über der Zeitachse auf. Es ergibt sich dabei eine (je nach Zeitintervall) mehr oder minder grobe Stufenkurve beginnend bei 0% (Projektstart) bis 100% (geplantes Projektende) der Kosten. Da jedes Projekt (mehr oder minder ausgeprägt) eine Anlaufphase und eine Auslaufphase besitzt, wird sich die Plankosten-Summenkurve praktisch als S-förmig ergeben.<sup>113</sup> Für das

<sup>113</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 339

Beispielprojekt werden die kumulierten Plankosten als Stufenkurve bei der zugehörigen Plandauer und die geplanten Gesamtkosten (Budget at Completion) für „realistische Planung“ in der folgenden Abbildung dargestellt.

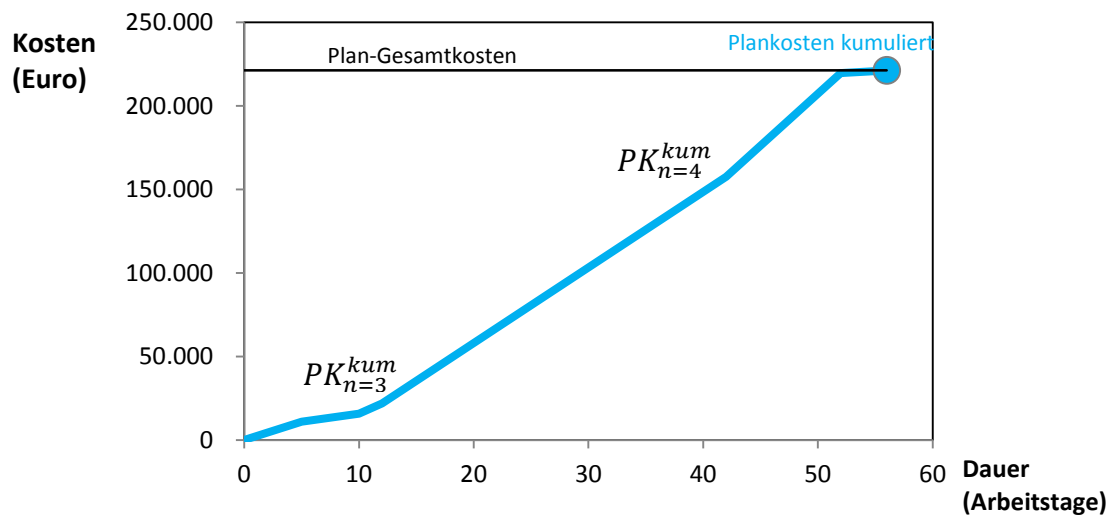


Abbildung 10: S-Kurve (Plankosten, Budget at Completion) zum Beispielprojekt

### 2.3.3.2. Projektfortschrittsdaten erfassen

Zum gewählten Stichtag ST werden Projektfortschritt, Ist-Kosten IK und Sollkosten SK erfasst. Die Ist-Kosten IK sind alle bisher vom Projekt verursachten Kosten, das heißt die tatsächlich erfassten ergänzt um die noch nicht erfassten, aber zuzuordnenden Kostenanteile (disponierte Kosten). Im Projektbeispiel wird nach der Ist-Kostenerfassung auch der tatsächliche Fertigstellungsgrad berechnet.<sup>114</sup>

Tabelle 14: tatsächlicher Projektfortschritt im Beispielprojekt

tatsächliche Projektfortschritt	n=	0	1	2	3			
IST-Dauer (kumuliert)	$D_n^{IST\ kum}$	0	7	15	20	0	0	0
IST-Kosten (kumuliert)	$IK (= IK_n^{kum} = IK_{ST}^{kum})$	-	14.000	25.000	30.000	-	-	-
IST-Fertigstellungsgrad (zum Stichtag)	$FGR^{ST} (ST) = PK_n / PGK$ (nach Abschluss der Phase n vorh.)		5,0%	7,1%	9,9%			

Die Sollkosten SK sind die Plankosten der bisher erbrachten und tatsächlich abgenommenen (das heißt qualitätskonformen) Arbeitspakete. Dieser Leistung

<sup>114</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 340

wird der jeweils entsprechende Plankostenwert zugeordnet. Damit erhält man die Sollkosten (Earned Value), die auch Fertigstellungswert genannt werden.<sup>115</sup>

Tabelle 15: Berechnung der Earned Value Analysis im Beispielprojekt

Fertigstellungswertanalyse (Earned-Value-Analysis)								
Daten zur Phase								
Stufe (Phase)	n=	0	1	2	3	4	5	6
Phase, Arbeitspaket oder Meilenstein		0	1.1	1.2	1.3	2.1, 2.2, 3.1	3.2	3.3
Benennung		Start	Entwurf+ Festigkeit	Zeichnungen	Stücklisten	Vormaterialial & Kaufteile beschaffen,	Endmontage	Versand
Plandauer	PD	0	5	5	2	30	10	4
Plandauer kumuliert	PD <sub>acc</sub>	0	5	10	12	42	52	56
Plankosten (zur Plandauer)	PK	0	11.000	4.760	6.144	135.680	62.000	1.600
Plankosten kumuliert	PK <sub>kum</sub>	0	11.000	15.760	21.904	157.584	219.584	221.184
Plan-Gesamtkosten	PGK							221.184
Plan Fertigstellungsgrad (zur Plandauer)	$FGR^{PLAN}(PD_{acc}) = PK / PGK$	0,0%	5,0%	7,1%	9,9%	71,2%	99,3%	100,0%
tatsächliche Projektfortschritt								
IST -Dauer	D	0	7	15	20	0	0	0
IST-Kosten	IK	-	14.000	25.000	30.000	-	-	-
Fertigstellungsgrad (zum Stichtag)	$FGR^{ST}(ST) = PK_n / PGK$ (nach Abschluss der Phase n vorh.)		5,0%	7,1%	9,9%			
Daten zum Stichtag des Phasenabschluss								
Stichtag	ST	0	7	15	20	42	52	56
rechnerische Plan Fertigstellungsgrad (zum Stichtag)	$FGR^{PLAN}(ST) = FGR^{PLAN}(PD_{acc}=ST)$ (muss zum Stichtag lt. Plan vorhanden sein)	0,0%	5,8%	16,0%	26,3%	71,2%	99,3%	100,0%
Plankosten (zum Stichtag)	$PK_{ST} = PGK \cdot FGR^{PLAN}$		12.904	35.472	58.085			
EARNED VALUE (budgeted cost of work performed) bzw. Fertigstellungswert (Sollkosten)	$EV = PGK \cdot FGR$		11.000	15.760	21.904			

Die Werte Ist-Kosten und Fertigstellungswert (Earned Value) werden im Diagramm eingetragen, sodass sich mit den an früheren Stichtagen erhobenen Werten jeweils ein Verlauf, ein Trend für die Ist-Kosten und die Sollkosten ergibt.<sup>116</sup>

<sup>115</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 340

<sup>116</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 340

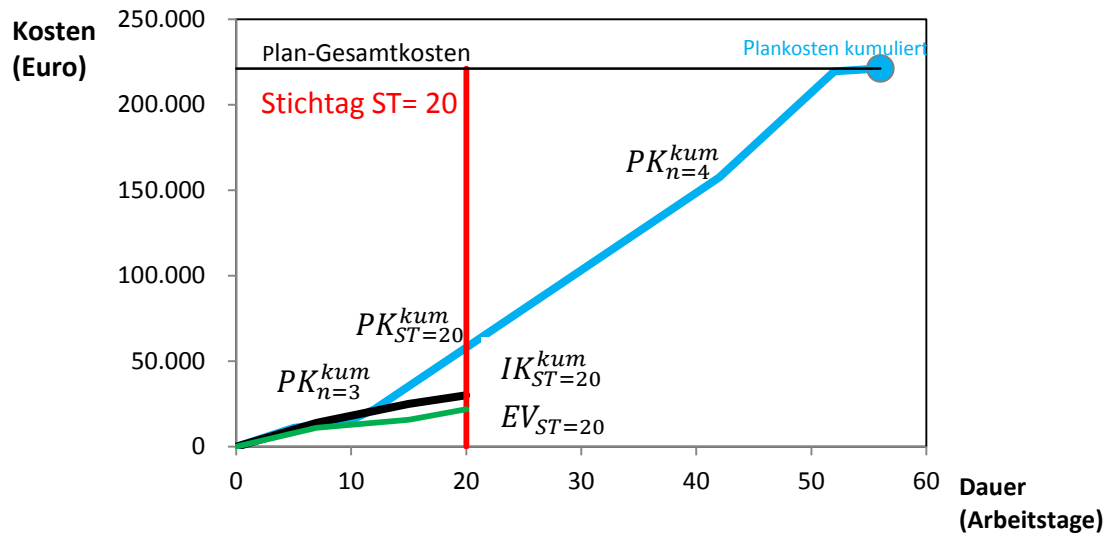


Abbildung 11: Earned Value, Ist-Kosten und Plankosten zum Stichtag

### 2.3.3.3. Leistungs-Abweichungen berechnen

Folgende Abweichungen sind in der Earned-Value-Analysis bekannt.

- Kostenabweichung der Leistung KA (cost variance)
- Planabweichung der Leistung PA (schedule variance)
- Terminabweichung TA (time variance)

Die Kostenabweichung der Leistung KA (Cost Variance) ist die Differenz  $KA_{ST}$  der Sollkosten und der Ist-Kosten zum Stichtag, wobei mit kumulierten Kostenwerten gerechnet wird.<sup>117</sup>

$$\text{Kostenabweichung} = \text{Earned Value} - \text{Istkosten}$$

$$KA_{ST} = EV_{ST} - IK_{ST}^{kum}$$

$$\text{prozentuale Kostenabweichung } KA\% = \frac{KA_{ST}}{PK_{ST}^{kum}} = \frac{(EV_{ST} - IK_{ST}^{kum})}{PK_{ST}^{kum}}$$

Eine negative Kostenabweichung entspricht einer Kostenüberschreitung zum Stichtag.<sup>118</sup>

<sup>117</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 340

<sup>118</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 340

Leistungsabweichung oder Planabweichung der Leistung PA (Schedule Variance) ist die Differenz<sup>119</sup> von Sollkosten und Plankosten zum Stichtag, wobei wieder mit kumulierten Kostenwerten gerechnet wird.

$$\begin{aligned} \text{Planabweichung} &= \text{Earned Value} - \text{Plankosten} \\ PA_{ST} &= EV_{ST} - PK_{ST}^{kum} \\ \text{prozentuale Kostenabweichung } PA\% &= \frac{PA_{ST}}{PK_{ST}^{kum}} = \frac{(EV_{ST}^{kum} - PK_{ST}^{kum})}{PK_{ST}^{kum}} \end{aligned}$$

Eine negative Planabweichung entspricht einer Leistungsunterschreitung zum Stichtag. Die Leistungsabweichung wird als eine Veränderung des geplanten Leistungsfortschritts mittels der Größe „Kosten“ erfasst.<sup>120</sup>

Die Terminabweichung  $TA_{ST}$  ist die Differenz auf der Zeitachse zwischen dem Stichtag ST und jenem Schnittpunkt auf der Plankostenkurve, der besagt, wann die heutige Istleistung laut Plan erbracht hätte werden soll.<sup>121</sup>

Die Terminabweichung (time variance) wurde nicht wie die vorher genannten Abweichungen in die DIN69901-3:2009-01 aufgenommen. Bekannt sind die Terminabweichung als Differenz (vgl. Patzak & Rattay<sup>122</sup>) oder die Umrechnung der Planabweichung auf Zeiteinheiten mit einer Plankostenrate (planned value rate vgl. Anbari<sup>123</sup>). Im Beispielprojekt wurde die Terminabweichung analog Patzak & Rattay<sup>124</sup> als Kosten- oder Planabweichung aus der Differenz der kumulierten Plandauer und der tatsächlich kumulierten Ist-Dauer berechnet.

$$\text{Terminabweichung } TA_{ST} = PD_n^{kum} - D_n^{IST\ kum}$$

Zum Stichtag  $ST=20$  wurde die Phase  $n=3$  mit der Dauer  $D_3^{IST\ kum}=20$  Arbeitstage abgeschlossen, da die kumulierte Plandauer  $PD_3^{kum}=12$  Arbeitstage ist, ergibt sich die Terminabweichung  $TA_{20} = PD_3^{kum} - D_3^{IST\ kum} = 12 - 20 = -8$  Arbeitstage.

<sup>119</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 340

<sup>120</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 340

<sup>121</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 340

<sup>122</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 340

<sup>123</sup> (Anbari, 2003) S. 3

<sup>124</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 340

Die negative Terminabweichung von  $TA_{20} = -8$  Arbeitstage bedeutet dass das Projekt aktuell 8 Arbeitstage hinter dem Plan zurück liegt.

In der Earned-Value-Analyse im Beispielprojekt zum Stichtag  $ST=20$  wurde eine Kostenabweichung  $KA = -8096$  Euro, eine Planabweichung der Leistung  $PA = -36181$  Euro und eine Terminabweichung  $TA = -8$  Arbeitstage berechnet. Das folgende Diagramm verdeutlicht die Abweichungen  $KA$ ,  $PA$  und  $TA$ .

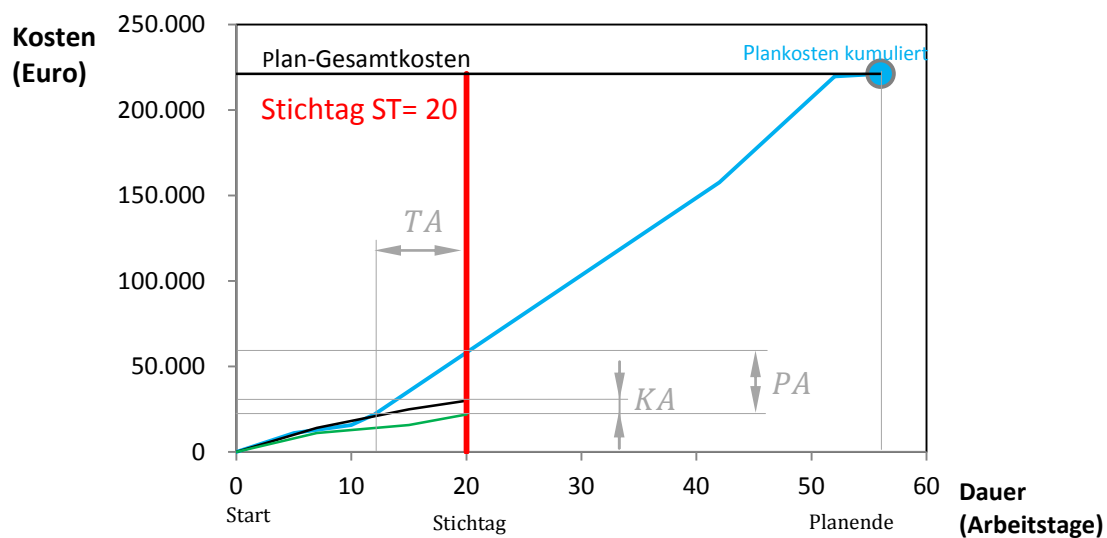


Abbildung 12: Abweichungen  $KA$ ,  $PA$  und  $TA$  zum Stichtag im Beispielprojekt

Anbari<sup>125</sup> gibt eine andere Berechnung für die Terminabweichung an, die nicht exakt der vorherigen Berechnung entspricht. Die time variance ist das Verhältnis aus schedule variance (hier  $PA$ ) und der plan value rate.

$$TV = \frac{SV}{PV \text{ Rate}}$$

Die Plankostenrate pro Arbeitstag (plan value rate) ist das Verhältnis des budget at completion (PGK) zur planned duration (Plandauer) und dient zur Umrechnung der schedule variance von Geldeinheiten in die bei der time variance verwendeten Zeiteinheiten.

$$PV \text{ Rate} = \frac{BAC}{PD}$$

<sup>125</sup> (Anbari, 2003) S. 3

Setzt man die Werte des Beispielprojektes ein ergibt sich konzeptbedingt ein anderer Wert als zuvor.

$$PV \text{ Rate} = \frac{BAC}{PD} = \frac{221184 \text{ Euro}}{56 \text{ Arbeitstage}} = 3949,7 \text{ Euro pro Arbeitstag}$$

$$TV = \frac{SV}{PV \text{ Rate}} = \frac{-36181 \text{ Euro}}{3949,7 \text{ Euro pro Arbeitstag}} = -9,16 \text{ Arbeitstage}$$

Die Berechnung der Terminabweichung mit der Plankostenrate pro Arbeitstag analog Anbari wird hier allerdings nicht weiter verwendet.

Die Terminabweichung als Differenz der Plandauer zum Stichtag analog Patzak & Rattay ist im praktischen Projektalltag besser anwendbar als die Umrechnung über durchschnittliche Plankostenraten pro Arbeitstag.<sup>126</sup>

#### 2.3.3.4. Kenngrößen zur Statusbeurteilung und Prognose

Die drei vorher eingeführten Kostenwerte, die sich als Kurven vom Projektstart bis zum Stichtag darstellen, wenn alle früher liegenden Stichtage durch einen Linienzug verbunden werden, lassen sich die unterschiedlichen Kenngrößen zur Statusbeurteilung und Prognose herleiten.<sup>127</sup>

- Kosten-Plankennzahl (Actual Performance Index)

$$KK_{ST} = API_{ST} = \frac{\text{kumulierte Istkosten}}{\text{kumulierte Plankosten}} = \frac{IK}{PK} = \frac{IK_{ST}^{kum}}{PK_{ST}^{kum}}$$

- Kosten-Entwicklungsindex (Cost Performance Index)

$$KEI_{ST} = CPI_{ST} = \frac{\text{Earned Value}}{\text{kumulierte Istkosten}} = \frac{FW}{IK} = \frac{EV_{ST}}{IK_{ST}^{kum}}$$

- Termin-Entwicklungsindex (Schedule Performance Index)

$$TEI_{ST} = SPI_{ST} = \frac{\text{Earned Value}}{\text{kumulierte Plankosten}} = \frac{EV_{ST}}{PK_{ST}^{kum}}$$

Diese Kennzahlen sind entweder auf Kosten oder auf Termine bezogen. Diese Größen werden durch Multiplikation von CPI mit SPI zum Critical Ratio bzw. zum

<sup>126</sup> Eigene Interpretation aufgrund der Durchrechnung mit Beispielwerten.

<sup>127</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 340



Cost Schedule Index verbunden und als Indikator für die Projekt-Gesundheit verwendet.<sup>128</sup>

- Critical Ratio  $CR_{ST} = CSI_{ST} = CPI_{ST} \cdot SPI_{ST}$

Für die drei fertigen Phasen im Beispielprojekt wurden folgende Werte errechnet. Wobei in der Berechnungstabelle nur die deutschsprachige Notation angegeben wurde.

Tabelle 16: Kenngrößen zur Statusbeurteilung in der Earned Value Analysis

Kostenplan-Kennzahl	KK = IK / PK <sub>ST</sub>	1,08	0,70	0,52
Kosten-Entwicklungsindex	KEI = EV / IK	0,79	0,63	0,73
Termin-Entwicklungsindex	TEI = EV / PK <sub>ST</sub>	0,85	0,44	0,38
Critical Ratio	CR=KEI · TEI	0,67	0,28	0,28

Anbari<sup>129</sup> stellt diese Kennzahlen grafisch in einem Target Performance Chart dar und ordnet den Index-Werte in die Bereiche „Super Stars“, „Good“, „Caution“ oder „Poor“ ein, damit lässt sich sofort ein Status erkennen.

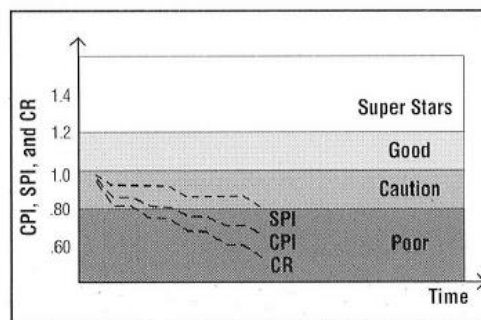


Abbildung 13: Target Performance Chart<sup>130</sup>

Obwohl das Target Performance Chart nicht genormt ist<sup>131</sup>, kann es zusätzlich zur grafischen Earned Value Analyse hilfreich sein um die Projekt-Gesundheit<sup>132</sup> schnell ablesen zu können. Die Vorhersage zum Projektende kann nun auf Basis dieser Kenngrößen erfolgen, wobei die Beurteilung der historischen Entwicklung mit einfließen sollte. Die Analyse liefert gesamtheitliche Aussagen zum Stand des Projekts betreffend Termin- und Kostensituation. Gezielte Steuerungsmaßnahmen können erst nach einer Prognose auf das Projektende ausgewählt werden.<sup>133</sup>

<sup>128</sup> (Anbari, 2003) S. 15

<sup>129</sup> (Anbari, 2003) S. 16

<sup>130</sup> (Anbari, 2003) S. 16

<sup>131</sup> DIN69901-3:2009-01

<sup>132</sup> Bei (Anbari, 2003) wird der Begriff Projekt-Gesundheit bezüglich Critical Ratio verwendet.

<sup>133</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 340 und S. 341

### 2.3.4. Konsequenzanalyse (Prognose)

Die sichtbar gewordenen Abweichungen sind hinsichtlich ihrer Ursachen sowie der Konsequenzen auf das Gesamtprojekt als Prognose zum Projektende zu analysieren. Es wird ein voraussichtlicher Projektendtermin (projection at completion) und voraussichtliche Gesamtkosten bei Fertigstellung (Estimated Cost at Completion) berechnet.<sup>134</sup>

Für die Kosten-Prognose auf das Projektende sind in der Earned Value Analysis unterschiedliche Ansätze bekannt, die lineare und die additive Prognose. Die dritte Möglichkeit ist die Prognose durch den Ursprungsplan.

Wann welcher Prognose-Ansatz anwendbar ist hängt von den Ursachen der Abweichungen ab. Wird vorausgesetzt, dass das Projekt in gleicher Weise weiterläuft, dass die festgestellten Abweichungen nicht bloß von einem Arbeitspaket verursacht wurden und dass dies auch so bis zum Projektende weitergehen wird, so ist die Prognose für die geschätzten Gesamtkosten SGK (erwartete Gesamtkosten EGK) über die Plan-Gesamtkosten multipliziert mit dem Verhältnis von Istkosten zu Earned Value anzuwenden. Es liegt eine lineare Prognose auf die Kosten zum Projektende vor, die auch Estimated Cost at Completion (EAC) genannt wird.<sup>135</sup>

$$EGK_{1,ST} = PGK \cdot \frac{IK_{ST}^{Kum}}{EV_{ST}}$$

Setzt man die Earned Value Formel  $EV_{ST} = PGK \cdot FGR_{ST}^{IST}$  ein, dann kürzt sich die lineare Prognose der erwarteten Gesamtkosten zum Quotienten der Istkosten durch den Ist-Fertigstellungsgrad zum Stichtag.

$$EGK_{1,ST} = PGK \cdot \frac{IK_{ST}^{Kum}}{EV_{ST}} = \cancel{PGK} \cdot \frac{IK_{ST}^{Kum}}{\cancel{PGK} \cdot FGR_{ST}^{IST}} = \frac{IK_{ST}^{Kum}}{FGR_{ST}^{IST}}$$

Wird hingegen festgestellt, dass die vorliegende Abweichung von einem klar identifizierten und analysierten Problem-Arbeitspaket stammt, ansonsten das Projekt zeit- und kostennah läuft und dies auch so weitergehen wird, so ist die additive Prognose anzusetzen. Die additive Prognose ist als ein Resterwartungswert plus die kumulierten realisierten Istkosten zu verstehen.

<sup>134</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 341

<sup>135</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 341

Die additive Prognose lautet Plangesamtkosten plus Istkosten abzüglich Earned Value.<sup>136</sup>

$$EGK_{2,ST} = PGK_{ST} + (IK_{ST}^{Kum} - EV_{ST})$$

Für die drei fertigen Phasen im Beispielprojekt wurden folgende Prognosen errechnet. Wobei in der Berechnungstabelle nur die deutschsprachige Notation angegeben wurde.

Tabelle 17: Kosten-Prognose der Earned Value Analysis zum Beispielprojekt

Erwartete Gesamtkosten (bei Fertigstellung EGK)			
EGK (Lineare Prognose) <sup>1</sup> $EGK_1 = PGK \cdot IK/EV$	281.507	350.863	302.936
EGK (Additive Prognose) <sup>2</sup> $EGK_2 = IK + PGK - EV$	224.184	230.424	229.280

Die Zeit-Prognose bei Fertigstellung (Projection at Completion PAC) wird mit der Division der Projekt Plandauer durch den Termin-Entwicklungsindex berechnet.

Prognose bei Fertigstellung

$$PAC = PF_{ST} = \frac{PD_{Ende}^{Kum}}{TEI_{ST}}$$

Diese in der Norm DIN69901-3:2009-01 angegebene Formel wird hier der Vollständigkeit halber angegeben. In der Literatur<sup>137</sup> werden unterschiedliche Zeit-Prognosen angegeben. Im Beispielprojekt wurde PF für die drei fertigen Phasen ausgerechnet.

Tabelle 18: Zeit-Prognose der Earned Value Analysis zum Beispielprojekt

Prognose bei Fertigstellung (Zeit)	$PF = PD/TEI = PD / (EV/PK) = ((PGK / TEI) - PGK) / (\text{Durchschnitt PK} / \text{Zeiteinheit})$	66	126	149
------------------------------------	--	----	-----	-----

<sup>136</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 341

<sup>137</sup> (Anbari, 2003) gibt eine time estimate at completion an, die im Unterschied zur linear hochgerechneten projection at completion eher additiven Charakter hat. (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) geben keine Formel zur Zeit-Prognose an.

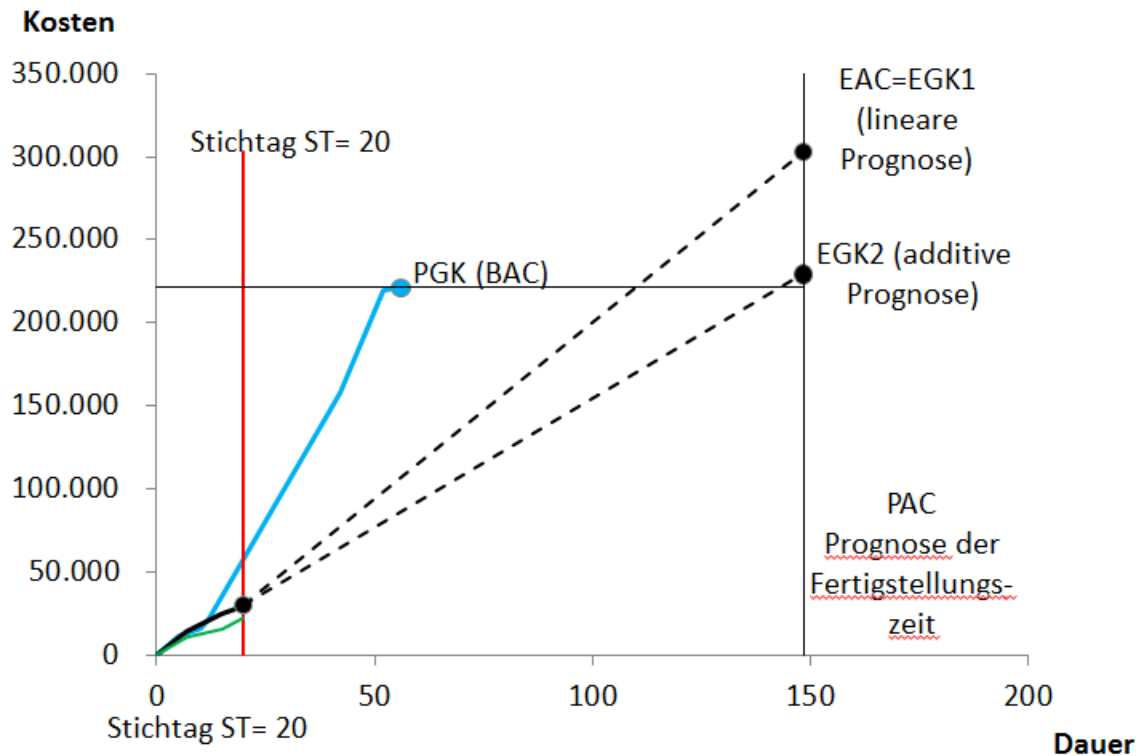


Abbildung 14: Earned Value Analysis mit linearer-, additiver Prognose

Im Diagramm zur Earned Value Analysis des Beispielprojektes sind die verschiedenen Prognosen strichliert ausgehend vom tatsächlichen Istwert dargestellt. Man erkennt sofort unterschiedliche Erwartungen bei additiver und linearer Prognose. Beide Kosten-Prognosen wurden im Diagramm auf die Zeit-Prognose bezogen. Diese Prognose der Fertigstellungszeit liegt weit nach dem Plan. Zu jedem Stichtag können diese Prognosen anders lauten, da immer die aktuellen Stichtagswerte berücksichtigt werden. Die später eingeführte probabilistische Prognose bezieht ebenfalls aktuelle Daten mit ein, aber verändert ihre Werte im Zeitablauf nicht so rasch wie die lineare und additive Prognose.

## 2.4. Grenzen und Erweiterungsmöglichkeit der Earned Value Analysis

In der Earned Value Analysis werden nur Einzelwerte berechnet ohne deren Wahrscheinlichkeiten zu kennen, damit kann die stets vorhandene Unsicherheit nicht berücksichtigt werden.

Wenn die Unsicherheit mit einem pfadweise probabilistischen Prognosemodell modelliert wird, kann die Earned Value Analysis mit einem pfadweise probabilistischen Prognosemodell erweitert werden. Damit könnte die Prognose für die Dauer und die pfadweise betrachteten Kosten zur Fertigstellung anstatt einzelner Werte, pfadweise bedingte Werteverteilungen liefern. Damit könnte die Earned Value Analysis um Risikobewertungen mit einer pfadweise bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung erweitert werden.

### 3. Probabilistisches Prognosemodell

Mit einem probabilistischen Modellansatz können Unsicherheiten in einem Projekt dadurch berücksichtigt werden, dass Risikofaktoren mit deren Wahrscheinlichkeiten und Auswirkungen auf die Fertigstellung eines Projektes einbezogen werden. Die traditionelle Projektplanung und die Earned Value Analysis lassen Fallunterscheidungen nur begrenzt zu und können dabei keine Wahrscheinlichkeiten berücksichtigen. Es könnten höchstens einige wenige Varianten – zum Beispiel besonders markante Zustände wie optimistisch, realistisch oder pessimistisch – für das ganze Projekt durchgerechnet werden. Die Berücksichtigung aller Kombinationen verschiedener Schätzungen würde sehr viele Durchrechnungen erfordern. Um diese Grenzen der traditionellen Terminplanung zu durchbrechen, wäre ein anderer Modellansatz, welcher verschiedene Fälle als Möglichkeiten in das Planungskonzept einbindet, erforderlich. Das traditionelle deterministische Berechnungsmodell der Projektplanung wird durch einen probabilistischen Modellansatz risikobasiert und unter Unsicherheit neu betrachtet. Es werden jeweils mehrere Möglichkeiten mit bestimmter Wahrscheinlichkeit modelliert. Damit schafft man eine zusätzliche Dimension in der Betrachtung des betreffenden Modellrahmens. In der traditionellen Projektplanung werden zuerst Leistungen, dann Termine und erst dann Ressourcen und Kosten geplant. In diesem Ansatz wird diese Reihenfolge eingehalten, daher werden zuerst mögliche Dauern und erst dann die Kosten des Projekts prognostiziert.

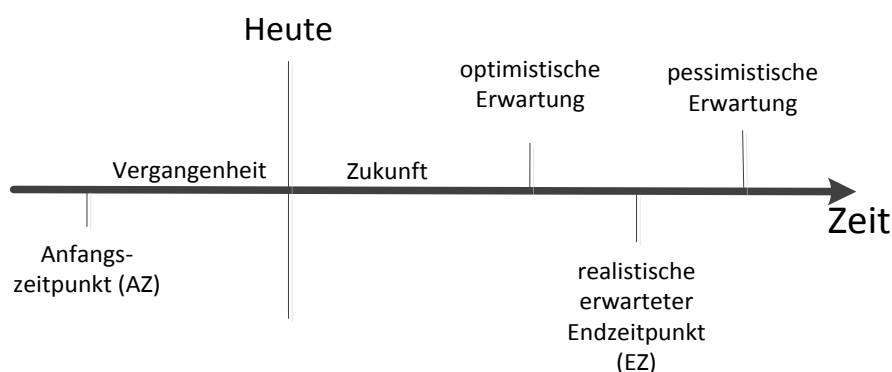


Abbildung 15: Projekt Ereignisse am Zeitstrahl

Bei realisierbaren Zuständen von Projektaktivitäten geht es um die Erwartungshaltung für die Zukunft. Aufgrund dieser Erwartungshaltung wird bei der Planung, Kontrolle und Lenkung auf verschiedene Zustände für die Fertigstellung eingegangen. Für ein einzelnes Arbeitspaket können verschiedene Möglichkeiten erwartet werden, wie es abgeschlossen wird bzw. wie es beendet wird.

### 3.1. Probabilistische Prognose der Projektdauer

Sobald in einem Projekt Risikofaktoren identifiziert und bewertet wurden, müssen diese in der Planung berücksichtigt werden. In der traditionellen Projektplanung können Auswirkungen von Risiken nicht unter Wahrscheinlichkeit einbezogen werden. Für die Zukunft erwartete Abweichungen können in der traditionellen Terminberechnung nur durch Sicherheitsreserven berücksichtigt werden.<sup>138</sup>

#### 3.1.1. Der Zustand als neue Betrachtungsdimension

Der Begriff Zustand steht hier für Ereignisse im Projektablauf. Die vorherige Abbildung zeigt bereits vergangene und zukünftig mögliche Ereignisse bei der Bearbeitung eines Arbeitspakets. In der traditionellen Terminplanung von Projekten existieren die Betrachtungsdimensionen Projekt-Dauer und Projekt-Fortschritt. In folgender Abbildung stellt der Punkt „Projekt-Fertigstellung“ die Plandauer bei Erreichen der 100%-Fertigstellung dar.

---

<sup>138</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004), Kapitel 1.3 Risikomanagement im Projekt

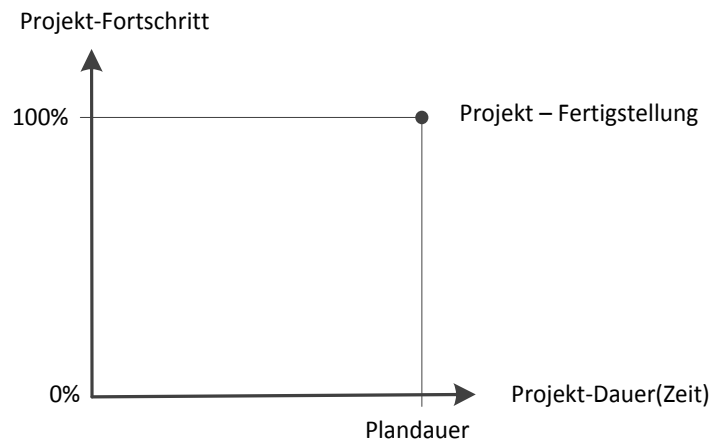


Abbildung 16: Betrachtungsdimensionen traditioneller Terminplanung

Wenn aufgrund der Unsicherheit auch andere Plandauern möglich sind, kann man auch mehrere Punkte im „Dauer-Fortschritts“-Diagramm angeben. Die Information über den Zustand welcher sich hinter jeder möglichen Dauer verbirgt kann in der Abbildung nicht sinnvoll dargestellt werden. Mit dem probabilistischen Modellansatz wird eine zusätzliche Dimension eingeführt. Für die erwarteten Eigenschaften zukünftiger Ereignisse, wie etwa die erwartete Zeitdauer bis zur Fertigstellung eines Projektes, können verschiedene Zustände mit bestimmter Wahrscheinlichkeit angenommen werden.

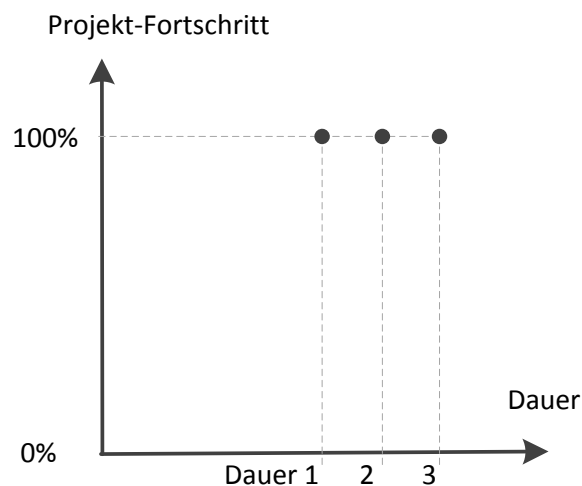


Abbildung 17. Mehrpunkt-Schätzung bei traditioneller Terminplanung

Bei der traditionellen Terminplanung werden Anfangs- und Endzeitpunkte in frühester und spätester Lage sowie Zeitpuffer betrachtet. Bei der Projektkontrolle



unterscheidet man Vorgänge welche nicht begonnen, in Bearbeitung oder bereits fertiggestellt sind. Jede dieser Möglichkeiten kann man auch als Zustand bezeichnen. Im probabilistischen Modellansatz werden verschiedene mögliche Zustände mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten für ein zukünftiges Ereignis betrachtet. Es werden mehrere zukünftig realisierbare Termine bzw. Dauern, unterschiedlicher Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Szenarien erwartet.

Diese Zustände sind die zusätzliche Betrachtungsdimension im probabilistischen Modellansatz des Projektcontrollings. Die folgende Abbildung zeigt links oben die traditionell betrachteten Dimensionen „Projekt-Fortschritt“ und „Projekt-Dauer“ als Diagramm.

Die neu eingeführte Dimension „Zustand“ wird in der Ebene zwischen den Achsen Dauer und Projekt-Fortschritt als ein oder mehrere Punkte dargestellt. Die Dimension „Zustand“ hat hier eine Koordinatenachse welche aus der Zeichnungsebene heraus zeigt. Dieses aus drei Achsen bestehende Koordinatensystem kann man nun in verschiedenen Ansichten betrachten. Die Abbildung rechts oben zeigt die Ansicht links oben nun um die Achse „Fortschritt“ so gedreht, dass die Achse „Dauer“ in die Zeichnungsebene hinein zeigt und die Dimension „Zustand“ nun als Koordinatenachse nach rechts zeigend sichtbar wird. Für ein zu 100% fertig gestelltes Projekt werden verschiedene mögliche Dauern erwartet. Diese Dauern entsprechen den Zuständen S1, S2 und S3.

Die Darstellung im Bild links unten zeigt die Ansicht links oben nun um die Achse „Dauer“ so gedreht, dass die Achse „Fortschritt“ aus der Zeichnungsebene herauszeigt und die Dimension „Zustand“ nun als Koordinatenachse nach unten zeigend sichtbar wird.

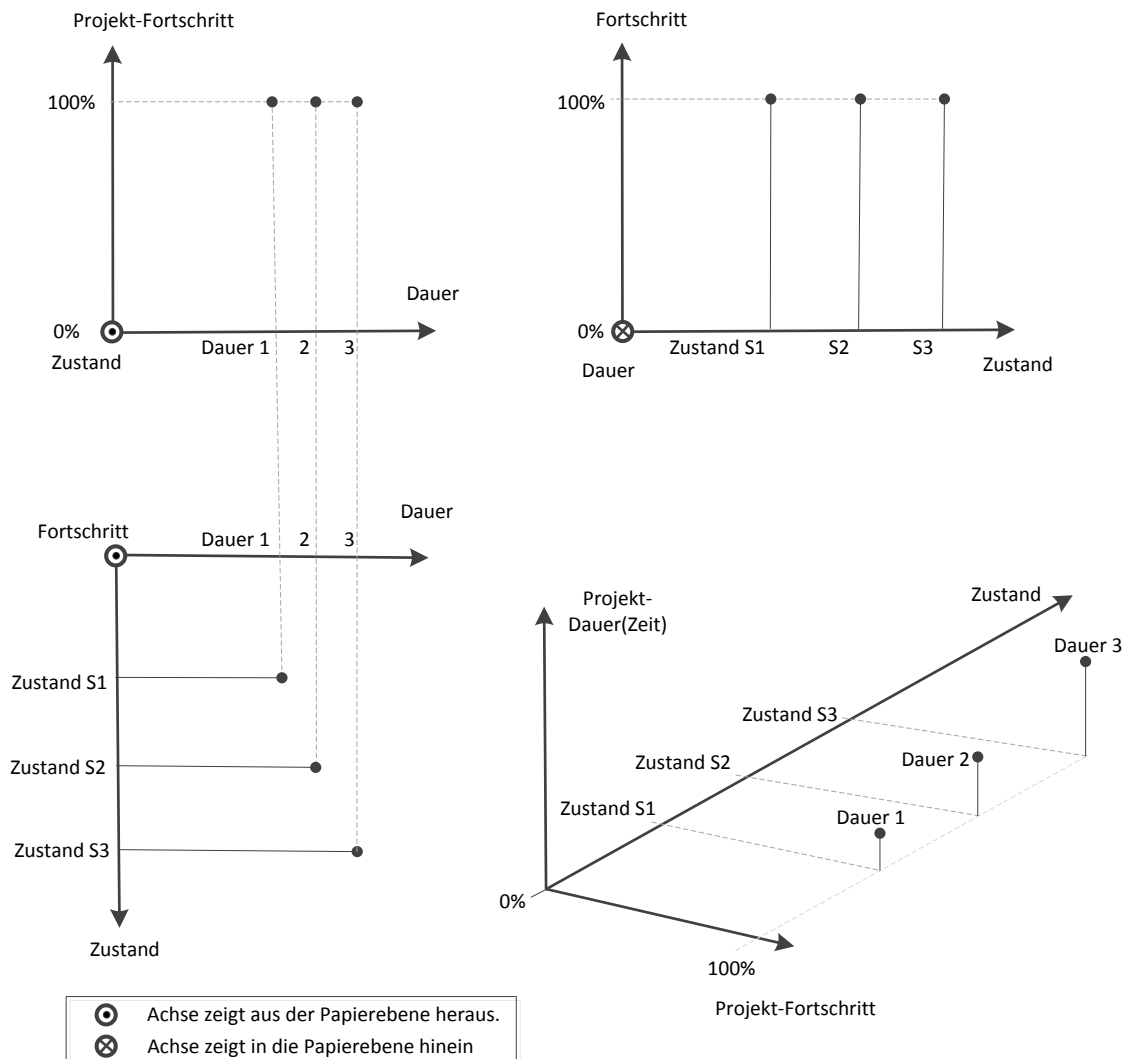


Abbildung 18: Betrachtungsdimensionen im probabilistischen Modellansatz

In der Abbildung sind unten rechts alle drei Dimensionen als dreidimensionales Achsenkreuz dargestellt. Im Achsenkreuz mit den drei Zuständen für die drei Dauern kann man sich einen Entscheidungsbaum vorstellen.

### 3.1.2. Trinomialmodell als stochastischer Prozess „Dauer“

Verzweigt ein Entscheidungsbaum ausgehend vom Anfangszustand „Start“ zu drei jeweils möglichen Endzuständen S1, S2 oder S3, man spricht von einem Trinomialmodell. Der unsichere Parameter „Vorgangsdauer“ kann als stochastischer Prozess betrachtet werden. Die stochastischen Dauern sind

Zeitdauern welche bei Fertigstellung eines Arbeitspaketes unter bestimmter Wahrscheinlichkeit realisieren werden. <sup>139, 140</sup>

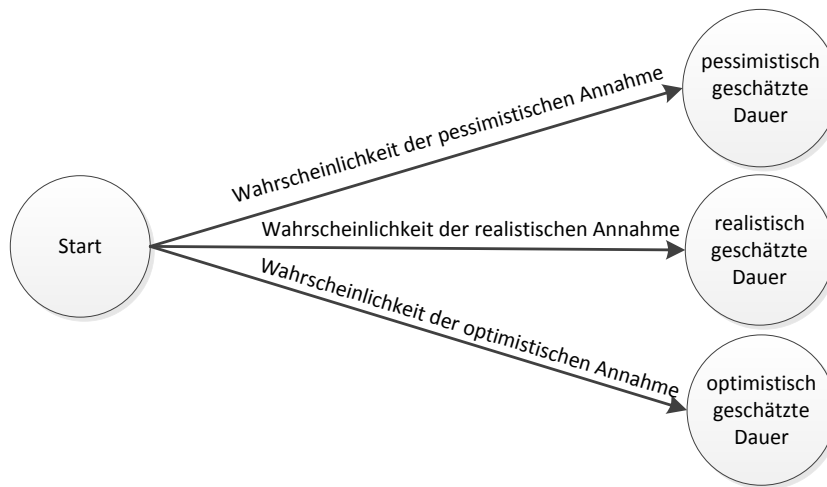


Abbildung 19: Trinomialmodell: Dauer-Schätzwerte einer Projektphase

Jede probabilistisch erwartete Dauer stellt einen möglichen zukünftigen Zustand dar und besitzt eine Eintritts-Wahrscheinlichkeit. Wobei hier die statistische oder subjektivistische Auffassung der Wahrscheinlichkeit (Probabilität) verwendet wird. Bei der statistischen Wahrscheinlichkeitsauffassung ist ein Verhältnis von günstigen zu möglichen Ereignissen nach dem Häufigkeitsprinzip berechenbar.

Bei der Angabe einer subjektivistischen Wahrscheinlichkeit handelt es sich um eine reine Einschätzung. Wobei man die Wahrscheinlichkeit auf einem abgeschlossenen Intervall von 0 bis 1 angegeben werden kann.

Hier sei eine idealisierte Annahme getroffen dass die Projektphasen nach einem linearen Prozess der Reihe nach ablaufen. Wenn Phasen der Reihe nach fertiggestellt werden, geht das Projektgeschehen daher von einer auf die nächste Phase über. Im diesem probabilistischen Zustandsmodell werden diese Veränderungen als Übergänge zwischen Zuständen betrachten. Für jede Phase kann man die Möglichkeiten der Übergänge in die nachfolgende Phase beschreiben, bei probabilistischer Betrachtung werden Übergänge mit deren Wahrscheinlichkeiten (Probabilität) beschrieben. Die Terminerwartungen in diesem Modell beziehen sich auf die Fertigstellung einzelner Projektabschnitte, aufgrund von Schätzungen. Die Annahmen hinter diesen Schätzungen können

<sup>139</sup> Vgl. Schwaiger – Unterlagen zur LVA am IMW/TU Wien aus ERM Fundamentals, 2012

<sup>140</sup> Vgl. Schwaiger – Unterlagen zur LVA am IMW/TU Wien aus Controlling unter Unsicherheit, 2009

beispielsweise optimistisch, realistisch oder pessimistisch sein und jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit hinterlegt sein.

Für jede (Projekt-) Phase oder Stufe  $n$  existieren - aufgrund verschiedener Schätzannahmen - mehrere mögliche Zustände  $S_{n,k}$  die mit der Laufvariablen  $k = 1, 2, 3$  numeriert werden. Im Laufe des Projekts wird in jeder Phase  $n$  nur ein Zustand  $S_{n,k}$  realisiert, somit ergibt sich mathematisch betrachtet eine Folge  $(S_{0,k}, S_{1,k}, S_{2,k}, \dots, S_{n,k} \dots S_{T,k})$  von Zuständen welche einen Pfad  $\omega_i$  repräsentiert.

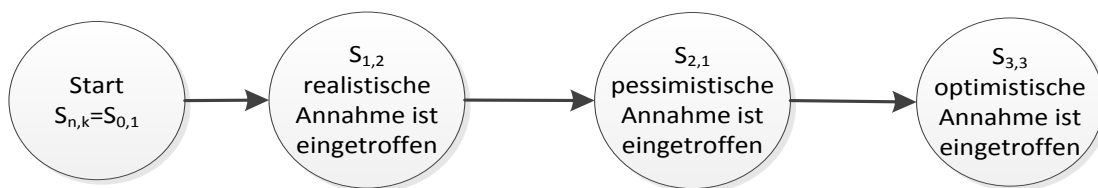


Abbildung 20: Folge realisierter Zustände als Pfad

Die Anzahl  $I$  der Pfade berechnet man durch Multiplikation jeder Anzahl der möglichen Zustände  $S_n$  jeder Stufe  $n$ .

$$I = S_0 \cdot S_1 \cdot \dots \cdot S_n \cdot \dots \cdot S_{N-1} \cdot S_N = \prod_{n=0}^N S_n$$

Die Pfade können als Folge  $i = \omega_1, \omega_2, \omega_3 \dots \omega_I$  angegeben werden.

Im Zustand  $S_{n,k}$  der Projekt-Phase  $n$  und des  $k$ -ten Schätzwertes wird die Dauer  $D_{n,k}$  mit einer Wahrscheinlichkeit  $P_{n,k}$  erwartet. Die Dauer des gesamten Projektes ist die Summe der Dauern  $D_{n,i}$  der aufeinander folgender Projektphasen von  $n=0$  bis  $n=N$  auf einem realisierten Pfad  $i$ .

$$\tilde{D}(i) = \sum_{n=0}^N D_{n,i} = D_{0,i} + \dots + D_{n,i} + \dots + D_{N,i}$$

Wobei das Tilde-Symbol  $\sim$  über der Variable auf die stochastische Größe hinweist.

Auf jedem Pfad  $\omega_i$  sind unterschiedliche Dauern des Projekts möglich.

Die Pfadwahrscheinlichkeit  $p_i$  ist das Produkt der Zustands-Wahrscheinlichkeiten  $p_{n,i}$  aufeinander folgender Projektphasen  $n=0$  bis  $n=N$  auf einem realisierten Pfad  $i$ .

$$p_i = \prod_{n=0}^N p_{n,i}$$



$P[s_{n,k}|s_{n-1,k}]$  für den Eintritt des möglichen Zustände  $s_{n,k}$  in der Stufe  $n$  mit der Bedingung dass in der vorhergehende Stufe  $n-1$  der Zustand  $s_{n-1,k}$  eingetreten ist. Diese bedingte Wahrscheinlichkeit kann man auch die Übergangs- oder Migrationswahrscheinlichkeit  $P[s_{n,k}|s_{n-1,k}]$  für den Übergang vom Zustand  $s_{n-1,k}$  in den Zustand  $s_{n,k}$  nennen. Da für den Übergang von Stufe  $n-1$  nach Stufe  $n$  mehrere Möglichkeiten existieren können, werden die Übergangswahrscheinlichkeiten mit einer Übergangsmatrix kompakt angeschrieben.

$$(P[s_{n,k}|s_{n-1,k}])_{n=2} = \begin{pmatrix} P[s_{n,k=1}|s_{n-1,k=1}] & P[s_{n,k=2}|s_{n-1,k=1}] & P[s_{n,k=3}|s_{n-1,k=1}] \\ P[s_{n,k=1}|s_{n-1,k=2}] & P[s_{n,k=2}|s_{n-1,k=2}] & P[s_{n,k=3}|s_{n-1,k=2}] \\ P[s_{n,k=1}|s_{n-1,k=3}] & P[s_{n,k=2}|s_{n-1,k=3}] & P[s_{n,k=3}|s_{n-1,k=3}] \end{pmatrix}$$

Die Elemente einer Zeile betreffen jeweils den gleichen Zustand vor einem Übergang. Die Elemente einer Spalte betreffen jeweils den gleichen Zustand nach dem Übergang.

Mit der Annahme dass die Zustände unabhängig von ihrem Vorgänger sind, reduziert sich die Matrix auf eine Zeile. Da es für Zustand  $s_{t,k}$  in Stufe  $t$  nicht wichtig ist in welchem Zustand  $s_{n-1,k}$  eine Stufe vorher war, sind die Übergangswahrscheinlichkeiten zum Zustand  $s_{n,k}$  daher gleich, unabhängig von welchem Zustand aus der Übergang erfolgt.

$$P[s_{n,k=1}|s_{n-1,k=1}] = P[s_{n,k=1}|s_{n-1,k=2}] = P[s_{n,k=1}|s_{n-1,k=3}]$$

Wenn diese Annahme gilt, braucht man nur mehr einzeilige Übergangsmatrizen angeben. Für jede Stufe  $n$  kann man eine eigene Übergangsmatrix anschreiben, wobei sich die Größe der Matrix aufgrund unterschiedlicher Zustände unterscheiden kann. Mit der oben getroffenen Annahme werden die Übergangsmatrizen aber einzeilig, aufgrund der Unabhängigkeit der Wahrscheinlichkeit zum Vorgängerzustand.

### 3.1.4. Probabilistische Prognose der Pfaddauern im Beispielprojekt

Der Folge erwarteter Zustände  $(s_{0,1}, s_{1,2}, s_{2,1}, s_{3,3})$  auf dem Pfad  $i=\omega_{12}$  im Entscheidungsbaum können die Zeitdauern aus dem Projekt-Beispiel(Fahrzeugaufbau) zugeordnet werden.

Wobei den Schätzungen für pessimistische, realistische und optimistische Annahmen jeweils  $k=1, k=2$  und  $k=3$  zugeordnet wird, damit sind die Dauern  $D_{0,1}=0, D_{1,2}=12, D_{2,1}= 40$  und  $D_{3,3}=11$ .

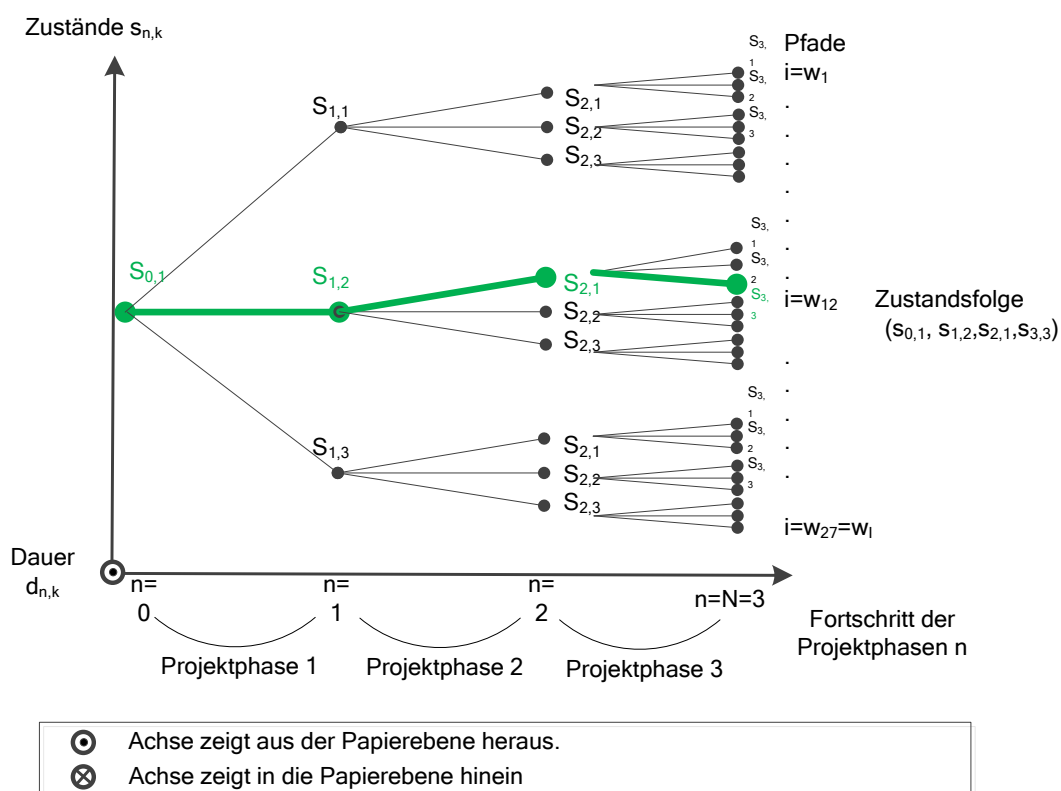


Abbildung 22: Realisierter Pfad im Entscheidungsbaum

$$\tilde{D}(i = \omega_{12}) = \sum_{n=0}^{N=3} D_{n,\omega_{12}}$$

$$\tilde{D}(i = \omega_{12}) = D_{0,\omega_{12}} + D_{1,\omega_{12}} + D_{2,\omega_{12}} + D_{3,\omega_{12}} =$$

$$= 0 + 12 + 40 + 11 =$$

$$= 63 \text{ AT}$$

Der Pfad 12 hat eine Projektdauer von 63 Arbeitstagen.

Die weitere Projektplanung für das Fahrzeugbau-Beispiel erfolgt mit dem probabilistischen Ansatz. Für die terminkritischen Aktivitäten (entlang des kritischen Weges) kann man die möglichen Abläufe als Entscheidungsbaum darstellen, wobei vereinfachend nur Entwicklung, Beschaffung und Produktion zusammengefaßt betrachtet werden.

Tabelle 19: Mehrpunktschätzung der Dauern für kritische Aktivitäten

Zustand	1	2	3
Entwicklung	9	12	20
Beschaffung	25	30	40
Produktion	11	14	25

Für jede der drei Projektphasen existieren drei Schätzwerte (min., real., max.), damit ergeben sich  $3^3=27$  Möglichkeiten wie lange das Projekt aus der jetzigen Sicht (vor Beginn) dauern könnte. Die vollständigen 27 Möglichkeiten kann man als Entscheidungsbaum übersichtlich darstellen.

Um im Entscheidungsbaum auch rechnen zu können muss auch bekannt sein mit welcher Wahrscheinlichkeit die Dauern erwartet werden.

Die folgende Abbildung zeigt die Dreipunktschätzung für optimistische, realistische und pessimistische Dauern sowie deren Wahrscheinlichkeit. Es wird die Annahme  $P_{\text{häufig}}= 50\%$ ,  $P_{\text{min}}= 25\%$  und  $P_{\text{max}}= 25\%$  getroffen.



Tabelle 20: Dreipunktschätzung für Dauern und Wahrscheinlichkeiten

**INPUT für die Berechnung der Prognose**

probabilistisches Prognosetool\_Projektphasen

Prognose berechnen

Start der Prognose bei 1

ENDE der Prognose bei 3

Projektstruktur

Phasenbeschreibung	Entwicklung	Beschaffung	Produktion	
Stufe t	0	1	2	3
realisierte IST-Dauer abgeschlossener Phasen				
Text				
Unabhängig Projekt-Abbruch-Risiko-WahrsAbbr	0,00	0,00	0,00	0,00
Anzahl der Schätzwerte	0	3	3	3

Schätzung der Dauern

Text				
Dmax		20	40	25
Dhäufig		12	30	14
Dmin		9	25	11
P1		0,25	0,25	0,25
P2		0,50	0,50	0,50
P3		0,25	0,25	0,25

Entscheidungsbaum und stochastische Zustände für die Projektdauer

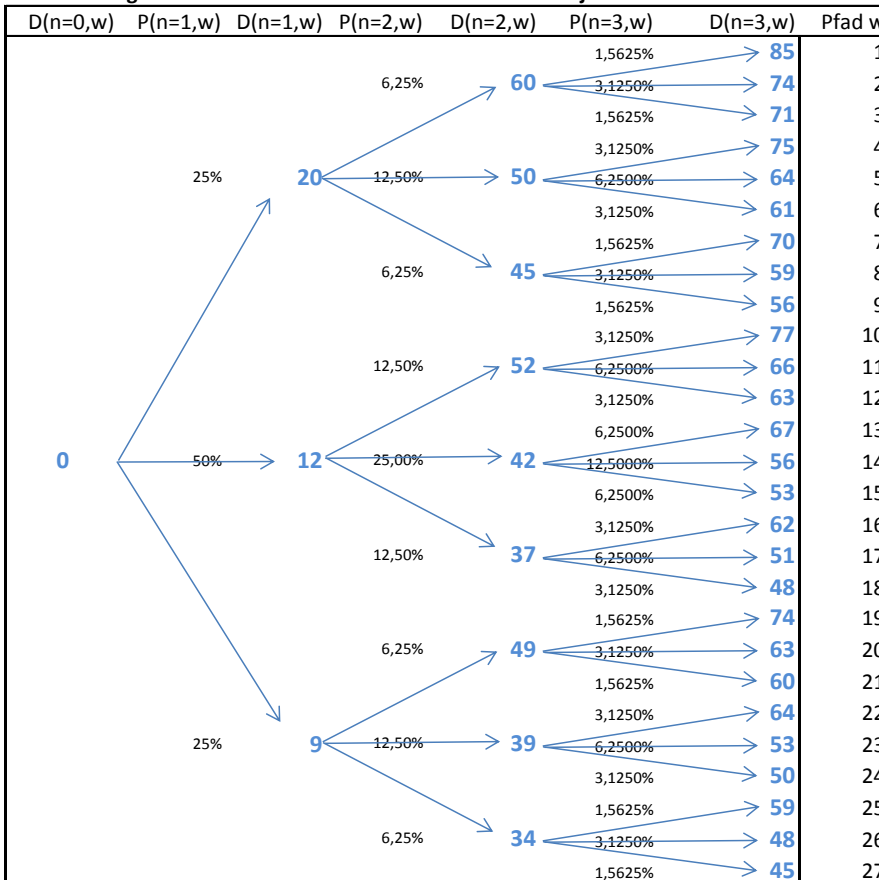


Abbildung 23: Entscheidungsbaum zum stoch. Trinomial-Prozess "Dauer"

Wie man im Entscheidungsbaum sieht kann nach dieser pfadweisen Betrachtung der Wunschtermin nicht mehr in jedem Fall eingehalten werden. Nur für Pfade mit Projektdauer  $\leq 60$  Arbeitstage kann der Wunschtermin noch eingehalten werden. Um die Gefahr(Risiko) einer Terminüberschreitung zu minimieren, also müssen für jede Phase Maßnahmen getroffen werden um diese in der minimalen Zeit fertigzustellen.

Tabelle 21: Termineinhaltung und Pfadbeschreibung im Entscheidungsbaum

Entscheidungsbaum und stochastische Zustände für die Projektdauer

Pfad w	D(n=0,w)	P(n=1,w)	D(n=1,w)	P(n=2,w)	D(n=2,w)	P(n=3,w)	D(n=3,w)	Pfadbeschreibung	
1						1,5625%	85	Überschreitung	S3,1 = Dist0 + Dmax1 + Dmax2 + Dmax3
2				6,25%	60	3,1250%	74	Überschreitung	S3,2 = Dist0 + Dmax1 + Dmax2 + Dhäufig3
3						1,5625%	71	Überschreitung	S3,3 = Dist0 + Dmax1 + Dmax2 + Dmin3
4						3,1250%	75	Überschreitung	S3,4 = Dist0 + Dmax1 + Dhäufig2 + Dmax3
5		25%	20	12,50%	50	6,2500%	64	Überschreitung	S3,5 = Dist0 + Dmax1 + Dhäufig2 + Dhäufig3
6						3,1250%	61	Überschreitung	S3,6 = Dist0 + Dmax1 + Dhäufig2 + Dmin3
7						1,5625%	70	Überschreitung	S3,7 = Dist0 + Dmax1 + Dmin2 + Dmax3
8				6,25%	45	3,1250%	59	Termin haltbar	S3,8 = Dist0 + Dmax1 + Dmin2 + Dhäufig3
9						1,5625%	56	Termin haltbar	S3,9 = Dist0 + Dmax1 + Dmin2 + Dmin3
10						3,1250%	77	Überschreitung	S3,10 = Dist0 + Dhäufig1 + Dmax2 + Dmax3
11				12,50%	52	6,2500%	66	Überschreitung	S3,11 = Dist0 + Dhäufig1 + Dmax2 + Dhäufig3
12						3,1250%	63	Überschreitung	S3,12 = Dist0 + Dhäufig1 + Dmax2 + Dmin3
13						6,2500%	67	Überschreitung	S3,13 = Dist0 + Dhäufig1 + Dhäufig2 + Dmax3
14		50%	12	25,00%	42	12,5000%	56	Termin haltbar	S3,14 = Dist0 + Dhäufig1 + Dhäufig2 + Dhäufig3
15						6,2500%	53	Termin haltbar	S3,15 = Dist0 + Dhäufig1 + Dhäufig2 + Dmin3
16						3,1250%	62	Überschreitung	S3,16 = Dist0 + Dhäufig1 + Dmin2 + Dmax3
17				12,50%	37	6,2500%	51	Überschreitung	S3,17 = Dist0 + Dhäufig1 + Dmin2 + Dhäufig3
18						3,1250%	48	Termin haltbar	S3,18 = Dist0 + Dhäufig1 + Dmin2 + Dmin3
19						1,5625%	74	Überschreitung	S3,19 = Dist0 + Dmin1 + Dmax2 + Dmax3
20				6,25%	49	3,1250%	63	Überschreitung	S3,20 = Dist0 + Dmin1 + Dmax2 + Dhäufig3
21						1,5625%	60	Termin haltbar	S3,21 = Dist0 + Dmin1 + Dmax2 + Dmin3
22						3,1250%	64	Überschreitung	S3,22 = Dist0 + Dmin1 + Dhäufig2 + Dmax3
23		25%	9	12,50%	39	6,2500%	53	Termin haltbar	S3,23 = Dist0 + Dmin1 + Dhäufig2 + Dhäufig3
24						3,1250%	50	Termin haltbar	S3,24 = Dist0 + Dmin1 + Dhäufig2 + Dmin3
25						1,5625%	59	Termin haltbar	S3,25 = Dist0 + Dmin1 + Dmin2 + Dmax3
26				6,25%	34	3,1250%	48	Termin haltbar	S3,26 = Dist0 + Dmin1 + Dmin2 + Dhäufig3
27						1,5625%	45	Termin haltbar	S3,27 = Dist0 + Dmin1 + Dmin2 + Dmin3

Die Wahrscheinlichkeit für die Termineinhaltung berechnet sich durch Addition der Pfadwahrscheinlichkeiten  $P(n = 3, \omega_i)$  aller Pfade welche eine Dauer kleiner oder gleich 60 Arbeitstage haben. Vor Beginn des Projektes gibt es wie man im Entscheidungsbaum sieht 11 von 27 Möglichkeiten um den Termin einzuhalten.

Tabelle 22: Wahrscheinlichkeit dass der Termin eingehalten

Pfad	P(n=3,w)	Pfadbeschreibung
8	3,1250%	S3,8 = t0: (Dist) + t=1: (Dmax) t=2: (Dmin) t=3: (Dhäufig)
9	1,5625%	S3,9 = t0: (Dist) + t=1: (Dmax) t=2: (Dmin) t=3: (Dmin)
14	12,5000%	S3,14 = t0: (Dist) + t=1: (Dhäufig) t=2: (Dhäufig) t=3: (Dhäufig)
15	6,2500%	S3,15 = t0: (Dist) + t=1: (Dhäufig) t=2: (Dhäufig) t=3: (Dmin)
18	3,1250%	S3,18 = t0: (Dist) + t=1: (Dhäufig) t=2: (Dmin) t=3: (Dmin)
23	1,5625%	S3,21 = t0: (Dist) + t=1: (Dmin) t=2: (Dmax) t=3: (Dmin)
24	6,2500%	S3,23 = t0: (Dist) + t=1: (Dmin) t=2: (Dhäufig) t=3: (Dhäufig)
25	3,1250%	S3,24 = t0: (Dist) + t=1: (Dmin) t=2: (Dhäufig) t=3: (Dmin)
26	1,5625%	S3,25 = t0: (Dist) + t=1: (Dmin) t=2: (Dmin) t=3: (Dmax)
27	3,1250%	S3,26 = t0: (Dist) + t=1: (Dmin) t=2: (Dmin) t=3: (Dhäufig)
	43,7500%	Termin haltbar

Die Wahrscheinlichkeit dass der Termin eingehalten wird ist hier aber nicht  $11/27 = 40,7\%$  sondern  $43,75\%$  da die Schätzwerte nicht gleichverteilt sind, also nicht die gleiche Pfadwahrscheinlichkeit angenommen wurde.

### 3.1.5. Erwartungswert im stochastischen Prozess Dauer

Der Erwartungswert im stochastischen Prozess Dauer ist die Summe der Pfaderwartungswerte, die durch Multiplizieren von Pfaddauer und Pfadwahrscheinlichkeit entstehen. Dabei ist die Pfaddauer die Summe der einzelnen Phasen-Dauern in einem Pfad und die Pfadwahrscheinlichkeit in jedem Pfad ist das Produkt der einzelnen Zustandswahrscheinlichkeiten.

$$\begin{aligned} \text{Pfaddauer} & D(i|s_0) = D_{0,i} + \dots + D_{N,i} = \sum_{n=0}^N D_{n,i} \\ \text{Pfadwahrscheinlichkeit} & p(i|s_0) = p_{0,i} \cdot p_{1,i} \cdot \dots \cdot p_{N,i} = \prod_{n=0}^N p_{n,i} \end{aligned}$$

Der Dauer-Erwartungswert kann damit detailliert angegeben werden. Wobei die Tilde  $\sim$  über der Variable der Hinweis auf eine stochastische Größe ist.

$$\begin{aligned} E \left[ \sum_{n=0}^{N=3} \tilde{D}_n | s_0 \right] &= D(\omega_1 | s_0) \cdot p(\omega_1 | s_0) + D(\omega_2 | s_0) \cdot p(\omega_2 | s_0) + \dots + D(i | s_0) \cdot p(i | s_0) \\ &+ \dots D(\omega_l | s_0) \cdot p(\omega_l | s_0) = \\ &= \sum_{i=\omega_1}^{\omega_l} [(D_{0,i} + \dots + D_{N,i}) \cdot (p_{0,i} \cdot p_{1,i} \cdot \dots \cdot p_{N,i})] \end{aligned}$$

Der Erwartungswert im stochastischen Prozess kann abgekürzt mit Summenformeln angeschrieben werden. Die Berechnung des Erwartungswerts erfolgt hier vom Start-Zustand  $s_0$  des stochastischen Prozesses bis zu den Zuständen in der letzten Phase N.

$$E \left[ \sum_{n=0}^{N=3} \tilde{D}_n | s_0 \right] = \sum_{i=\omega_1}^{\omega_l} \left[ \sum_{n=0}^{N=3} D_{n,i} \cdot \prod_{n=0}^N p_{n,i} \right] = \sum_{i=\omega_1}^{\omega_l} D(i | s_0) \cdot p(i | s_0)$$

Die erwartete Dauer des Projekts ist die Summe der Pfaderwartungswerte, die durch Multiplizieren von Pfaddauer und Pfadwahrscheinlichkeit entstehen.

Der erwartete Wert wird unter Verwendung des auf den Zustand  $s_0$ bedingten Erwartungsoperators  $E[. |s_0]$  abhängig von Pfadwerten und Wahrscheinlichkeiten berechnet.

Die Varianz wird unter Verwendung des auf den Zustand  $s_0$ bedingten Varianzoperators  $Var[. |s_0]$  berechnet.

$$Var \left[ \sum_{n=0}^{N=3} \tilde{D}_n |s_0 \right] = \sum_{i=\omega_1}^{\omega_1} \left[ \left( \sum_{n=0}^{N=3} D_{n,i} - E \left[ \sum_{n=0}^{N=3} \tilde{D}_n |s_0 \right] \right)^2 \cdot \prod_{n=0}^N p_{n,i} \right]$$

Die Quadratwurzel der Varianz ergibt die Standardabweichung (standard deviation).

$$StdDev \left[ \sum_{n=0}^{N=3} \tilde{D}_n |s_0 \right] = \left( Var \left[ \sum_{n=0}^{N=3} \tilde{D}_n |s_0 \right] \right)^{0.5}$$

Im Projektbeispiel wurden bereits für jeden Pfad des Entscheidungsbaums die Projektdauer-Dauer und die Wahrscheinlichkeit berechnet und man kann die obige Formel anwenden.

$$\begin{aligned} E \left[ \sum_{n=0}^{N=3} \tilde{D}_n |s_0 \right] &= D(\omega_1 |s_0) \cdot p(\omega_1 |s_0) + D(\omega_2 |s_0) \cdot p(\omega_2 |s_0) + \dots + D(i |s_0) \cdot p(i |s_0) \\ &+ \dots D(\omega_l |s_0) \cdot p(\omega_l |s_0) = \\ &= 85 \cdot 1,5625\% + \dots + D(i |s_0) \cdot p(i |s_0) + \dots 45 \cdot 1,5625\% = 60,50 \end{aligned}$$

Der Erwartungswert der Dauer bis zum Abschluss der Phase  $n=3$  ist 60,50 Arbeitstage. Für das Beispielprojekt wurde das selbst erstellte Excel-Prognosetool zu Berechnung verwendet. Das Prognosetool berechnet die Erwartungswerte für die vorherigen Projektphasen nach der gleichen Formel.

Tabelle 23: Dauer-Erwartungswerte und Standardabweichung im Beispielprojekt

Prognose der stochastischen Dauer (sowie abhängiger Kosten) des Produktentwicklungs-Projektes						
Stufe (Phase)	n=		0	1	2	3
Erwartungswert	$E[d^*] =$	$\Sigma w ( pw \cdot Dw )$		13,25	44,50	60,50
Standardabweichung der Dauer	$\sigma[d^*] =$			6	8	10

Neben dem Erwartungswert sind die Vertrauensgrenzen im Konfidenzintervall interessant um risikobehafteten Pfade erkennen zu können. Mit der Monte Carlo Analyse werden die Pfaddauern der Größe nach sortiert, die Pfadwahrscheinlichkeiten aufsummiert und dann die Vertrauensgrenzen für gewählte Konfidenzintervalle angezeigt.

Tabelle 24: Monte Carlo Analyse für Projektdauern

Monte Carlo Analyse der Dauern				
Pfad	Zustandsfolge	P(D <sup>-</sup> )	D	PKUM(D <sup>-</sup> )
1	S3,1 = Dist0 + Dmax1 + Dmax2 + Dmax3	0,015625000	85	1 P <= 1: Obergrenze des 1-Intervalls: D[ne=3, w=1]=85
10	S3,10 = Dist0 + Dhäufig1 + Dmax2 + Dmax3	0,031250000	77	0,984375 P <= 0,985: Obergrenze des 0,97-Intervalls: D[ne=3, w=10]=77
4	S3,4 = Dist0 + Dmax1 + Dhäufig2 + Dmax3	0,031250000	75	0,953125 P <= 0,975: Obergrenze des 0,95-Intervalls: D[ne=3, w=4]=75
2	S3,2 = Dist0 + Dmax1 + Dmax2 + Dhäufig3	0,031250000	74	0,921875 P <= 0,95: Obergrenze des 0,9-Intervalls: D[ne=3, w=2]=74
19	S3,19 = Dist0 + Dmin1 + Dmax2 + Dmax3	0,015625000	74	0,890625000 P <= 0,9: Obergrenze des 0,8-Intervalls: D[ne=3, w=19]=74
3	S3,3 = Dist0 + Dmax1 + Dmax2 + Dmin3	0,015625000	71	0,875
7	S3,7 = Dist0 + Dmax1 + Dmin2 + Dmax3	0,015625000	70	0,859375
13	S3,13 = Dist0 + Dhäufig1 + Dhäufig2 + Dmax3	0,062500000	67	0,84375 P <= 0,85: Obergrenze des 0,7-Intervalls: D[ne=3, w=13]=67
11	S3,11 = Dist0 + Dhäufig1 + Dmax2 + Dhäufig3	0,062500000	66	0,78125 P <= 0,8: Obergrenze des 0,6-Intervalls: D[ne=3, w=11]=66
5	S3,5 = Dist0 + Dmax1 + Dhäufig2 + Dhäufig3	0,062500000	64	0,71875 P <= 0,75: Obergrenze des 0,5-Intervalls: D[ne=3, w=5]=64
22	S3,22 = Dist0 + Dmin1 + Dhäufig2 + Dmax3	0,031250000	64	0,65625 P <= 0,7: Obergrenze des 0,4-Intervalls: D[ne=3, w=22]=64
12	S3,12 = Dist0 + Dhäufig1 + Dmax2 + Dmin3	0,031250000	63	0,625 P <= 0,65: Obergrenze des 0,3-Intervalls: D[ne=3, w=12]=63
20	S3,20 = Dist0 + Dmin1 + Dmax2 + Dhäufig3	0,031250000	63	0,59375 P <= 0,6: Obergrenze des 0,2-Intervalls: D[ne=3, w=20]=63
16	S3,16 = Dist0 + Dhäufig1 + Dmin2 + Dmax3	0,031250000	62	0,562500000
6	S3,6 = Dist0 + Dmax1 + Dhäufig2 + Dmin3	0,031250000	61	0,53125 P <= 0,55: Obergrenze des 0,1-Intervalls: D[ne=3, w=6]=61
21	S3,21 = Dist0 + Dmin1 + Dmax2 + Dmin3	0,015625000	60	0,500000000
8	S3,8 = Dist0 + Dmax1 + Dmin2 + Dhäufig3	0,031250000	59	0,484375
25	S3,25 = Dist0 + Dmin1 + Dmin2 + Dmax3	0,015625000	59	0,453125
9	S3,9 = Dist0 + Dmax1 + Dmin2 + Dmin3	0,015625000	56	0,4375 P <= 0,45: Untergrenze des 0,1-Intervalls: D[ne=3, w=9]=56
14	S3,14 = Dist0 + Dhäufig1 + Dhäufig2 + Dhäufig3	0,125000000	56	0,421875
15	S3,15 = Dist0 + Dhäufig1 + Dhäufig2 + Dmin3	0,062500000	53	0,296875 P <= 0,4: Untergrenze des 0,2-Intervalls: D[ne=3, w=15]=53
23	S3,23 = Dist0 + Dmin1 + Dhäufig2 + Dhäufig3	0,062500000	53	0,234375 P <= 0,25: Untergrenze des 0,5-Intervalls: D[ne=3, w=23]=53
17	S3,17 = Dist0 + Dhäufig1 + Dmin2 + Dhäufig3	0,062500000	51	0,171875 P <= 0,2: Untergrenze des 0,6-Intervalls: D[ne=3, w=17]=51
24	S3,24 = Dist0 + Dmin1 + Dhäufig2 + Dmin3	0,031250000	50	0,109375 P <= 0,15: Untergrenze des 0,7-Intervalls: D[ne=3, w=24]=50
18	S3,18 = Dist0 + Dhäufig1 + Dmin2 + Dmin3	0,031250000	48	0,078125 P <= 0,1: Untergrenze des 0,8-Intervalls: D[ne=3, w=18]=48
26	S3,26 = Dist0 + Dmin1 + Dmin2 + Dhäufig3	0,031250000	48	0,046875 P <= 0,05: Untergrenze des 0,9-Intervalls: D[ne=3, w=26]=48
27	S3,27 = Dist0 + Dmin1 + Dmin2 + Dmin3	0,015625000	45	0,015625 P <= 0,025: Untergrenze des 0,95-Intervalls: D[ne=3, w=27]=45

Das Excel-Prognosetool erstellt diese Monte Carlo Analyse automatisiert aus dem stochastischen Prozess und ermittelt neben dem Erwartungswert auch die Grenzpfade zum Konfidenzintervall in der Prognose.

Tabelle 25: Grenzpfade zum Konfidenzintervall in der Prognose

Konfidenzintervall	Grenzpfade der Prognose				
Obere Vertrauensgrenze	stochastische Dauer $d \sim [n, w]$				
Untere Vertrauensgrenze	determinist. Kosten $K[d \sim]$				
<b>100% Vertrauensbereich Obergrenze - <math>S3,1 = \text{Dist}0 + \text{Dmax}1 + \text{Dmax}2 + \text{Dmax}3</math></b>					
$P \leq 1: D[ne=3, w=1]=85$	$d \sim [n, w=1]$		20	60	85
<b>100% Vertrauensbereich Untergrenze - <math>S3,27 = \text{Dist}0 + \text{Dmin}1 + \text{Dmin}2 + \text{Dmin}3</math></b>					
$P \leq 0: D[ne=3, w=27]=45$	$d \sim [n, w=27]$		9	34	45
<b>99,9% Vertrauensbereich Obergrenze - <math>S3,10 = \text{Dist}0 + \text{Dhäufig}1 + \text{Dmax}2 + \text{Dmax}3</math></b>					
$P \leq 0,9995: D[ne=3, w=10]=77$	$d \sim [n, w=10]$		12	52	77
<b>99,9% Vertrauensbereich Untergrenze - <math>S3,27 = \text{Dist}0 + \text{Dmin}1 + \text{Dmin}2 + \text{Dmin}3</math></b>					
$P \leq 0,0005: D[ne=3, w=27]=45$	$d \sim [n, w=27]$		9	34	45
<b>97% Vertrauensbereich Obergrenze - <math>S3,10 = \text{Dist}0 + \text{Dhäufig}1 + \text{Dmax}2 + \text{Dmax}3</math></b>					
$P \leq 0,985: D[ne=3, w=10]=77$	$d \sim [n, w=10]$		12	52	77
<b>97% Vertrauensbereich Untergrenze - <math>S3,27 = \text{Dist}0 + \text{Dmin}1 + \text{Dmin}2 + \text{Dmin}3</math></b>					
$P \leq 0,015: D[ne=3, w=27]=45$	$d \sim [n, w=27]$		9	34	45
<b>95% Vertrauensbereich Obergrenze - <math>S3,4 = \text{Dist}0 + \text{Dmax}1 + \text{Dhäufig}2 + \text{Dmax}3</math></b>					
$P \leq 0,975: D[ne=3, w=4]=75$	$d \sim [n, w=4]$		20	50	75
<b>95% Vertrauensbereich Untergrenze - <math>S3,27 = \text{Dist}0 + \text{Dmin}1 + \text{Dmin}2 + \text{Dmin}3</math></b>					
$P \leq 0,025: D[ne=3, w=27]=45$	$d \sim [n, w=27]$		9	34	45

### 3.1.1. Begriffsvergleich zur Earned Value Analysis

Der Erwartungswert im stochastischen Prozess Dauer kann als probabilistische Prognose der Projektdauer mit dem Begriff Projection at completion (PAC) in der Earned Value Analysis verglichen werden. Beide Begriffe bedeuten eine Prognose auf den Fertigstellungszeitpunkt bzw. die Dauer des Projekts.

Die oberen und unteren Vertrauensgrenzen des stochastischen Prozesses Dauer lassen sich nicht direkt mit einem Begriff aus der Earned Value Analysis gleichsetzen, sondern könne als spezielle Extremwerte der Projection at completion (PAC) unter Annahme einer Wahrscheinlichkeit gesehen werden.

### 3.2. Informationsenthüllung im Zeitablauf

Befindet man sich in einem späteren Zeitpunkt sind steuernde Maßnahmen erforderlich, es sind aber nicht mehr alle Möglichkeiten verfügbar, da bereits Aktivitäten realisiert sind und offenbart wurde welche Pfade im Entscheidungsbaum noch begehbar sind. Dadurch erhält man die Information dass nur theoretisch nur noch Pfade möglich sind, die vom bereits realisierten Knoten ausgehen müssen. Es findet Informationsenthüllung im Zeitablauf statt, genauer die Modellierung der Informationsenthüllung über im Zeitablauf feiner werdende Wahrscheinlichkeitsräume.<sup>141</sup>

Wenn die erste Phase im Beispielprojekt abgeschlossen ist, bleiben noch zwei Phase mit je drei Schätzungen, also  $3^2=9$  Möglichkeiten übrig. Je nachdem wie lange die erste Phase gedauert hat, reduzieren sich die Möglichkeiten. Wenn später die erste Phase z.B. schon 20 Arbeitstage gedauert hat, bleiben nur noch die Pfade 1 bis 9 als Möglichkeit übrig. Im Entscheidungsbaum kann man jetzt nur mehr die oberen 9 Pfade steuernd beeinflussen, da die anderen Pfade jetzt ausgeschlossen sind.

Tabelle 26: Informationsenthüllung bis Phase n=1 im Beispielprojekt

Entscheidungsbaum und stochastische Zustände für die Projektdauer

Pfad w	D(n=0,w)	P(n=1,w)	D(n=1,w)	P(n=2,w)	D(n=2,w)	P(n=3,w)	D(n=3,w)	Pfadbeschreibung
1				6,25%	60	1,5625%	85	Überschreitung S3,1 = n0: (Dist) + n=1: (Dmax) n=2: (Dmax) n=3: (Dmax)
2						3,1250%	74	Überschreitung S3,2 = n0: (Dist) + n=1: (Dmax) n=2: (Dmax) n=3: (Dhäufig)
3						1,5625%	71	Überschreitung S3,3 = n0: (Dist) + n=1: (Dmax) n=2: (Dmax) n=3: (Dmin)
4						3,1250%	75	Überschreitung S3,4 = n0: (Dist) + n=1: (Dmax) n=2: (Dhäufig) n=3: (Dmax)
5				12,50%	50	6,2500%	64	Überschreitung S3,5 = n0: (Dist) + n=1: (Dmax) n=2: (Dhäufig) n=3: (Dhäufig)
6						3,1250%	61	Überschreitung S3,6 = n0: (Dist) + n=1: (Dmax) n=2: (Dhäufig) n=3: (Dmin)
7						1,5625%	70	Überschreitung S3,7 = n0: (Dist) + n=1: (Dmax) n=2: (Dmin) n=3: (Dmax)
8				6,25%	45	3,1250%	59	Termin haltbar S3,8 = n0: (Dist) + n=1: (Dmax) n=2: (Dmin) n=3: (Dhäufig)
9						1,5625%	56	Termin haltbar S3,9 = n0: (Dist) + n=1: (Dmax) n=2: (Dmin) n=3: (Dmin)
10						3,1250%	77	Überschreitung S3,10 = n0: (Dist) + n=1: (Dhäufig) n=2: (Dmax) n=3: (Dmax)
11				12,50%	52	6,2500%	66	Überschreitung S3,11 = n0: (Dist) + n=1: (Dhäufig) n=2: (Dmax) n=3: (Dhäufig)
12						3,1250%	63	Überschreitung S3,12 = n0: (Dist) + n=1: (Dhäufig) n=2: (Dmax) n=3: (Dmin)
13						6,2500%	67	Überschreitung S3,13 = n0: (Dist) + n=1: (Dhäufig) n=2: (Dhäufig) n=3: (Dmax)
14				25,00%	42	12,5000%	56	Termin haltbar S3,14 = n0: (Dist) + n=1: (Dhäufig) n=2: (Dhäufig) n=3: (Dhäufig)
15						6,2500%	53	Termin haltbar S3,15 = n0: (Dist) + n=1: (Dhäufig) n=2: (Dhäufig) n=3: (Dmin)
16						3,1250%	62	Überschreitung S3,16 = n0: (Dist) + n=1: (Dhäufig) n=2: (Dmin) n=3: (Dmax)
17				12,50%	37	6,2500%	51	Überschreitung S3,17 = n0: (Dist) + n=1: (Dhäufig) n=2: (Dmin) n=3: (Dhäufig)
18						3,1250%	48	Termin haltbar S3,18 = n0: (Dist) + n=1: (Dhäufig) n=2: (Dmin) n=3: (Dmin)
19						1,5625%	74	Überschreitung S3,19 = n0: (Dist) + n=1: (Dmin) n=2: (Dmax) n=3: (Dmax)
20				6,25%	49	3,1250%	63	Überschreitung S3,20 = n0: (Dist) + n=1: (Dmin) n=2: (Dmax) n=3: (Dhäufig)
21						1,5625%	60	Termin haltbar S3,21 = n0: (Dist) + n=1: (Dmin) n=2: (Dmax) n=3: (Dmin)
22						3,1250%	64	Überschreitung S3,22 = n0: (Dist) + n=1: (Dmin) n=2: (Dhäufig) n=3: (Dmax)
23				12,50%	39	6,2500%	53	Termin haltbar S3,23 = n0: (Dist) + n=1: (Dmin) n=2: (Dhäufig) n=3: (Dhäufig)
24						3,1250%	50	Termin haltbar S3,24 = n0: (Dist) + n=1: (Dmin) n=2: (Dhäufig) n=3: (Dmin)
25						1,5625%	59	Termin haltbar S3,25 = n0: (Dist) + n=1: (Dmin) n=2: (Dmin) n=3: (Dmax)
26				6,25%	34	3,1250%	48	Termin haltbar S3,26 = n0: (Dist) + n=1: (Dmin) n=2: (Dmin) n=3: (Dhäufig)
27						1,5625%	45	Termin haltbar S3,27 = n0: (Dist) + n=1: (Dmin) n=2: (Dmin) n=3: (Dmin)

Die kürzeste Dauer welche jetzt noch erwartet werden kann, ist 56 Arbeitstage(Pfad 9), dabei muss aber die Phase 2 „kritische Aktivitäten der Beschaffung“ in minimaler Dauer erledigt werden. Wenn man das Projekt also in

<sup>141</sup> (Schwaiger, Vorlesungsskript Controlling unter Unsicherheit - Draft Version, 2009) Vorlesungsskript Controlling unter Unsicherheit - Draft Version S.128

56 bis 70 Arbeitstagen abschließen will, so müssen alle Maßnahmen ergriffen werden um die „kritische“ Beschaffung bis zum 45. Arbeitstag abzuschließen. Sobald die Phase 2 erst bis zum Arbeitstag 50 (häufigste Dauer) oder 60 (max.) fertig wird, verlängert sich das Projekt auf eine Erwartung von 61 bis 75 Tage oder sogar 71 bis 85 Tage.

### 3.2.1. Bedingte Hochrechnung der Projektdauern

Durch die Berücksichtigung der bereits realisierten Dauern kann sich die Hochrechnung der Dauer gegenüber der ersten Prognose verändern. Die realisierten Zustände können zwar einem erwarteten Pfad zugeordnet werden, jedoch müssen erwartete und realisierte Dauer nicht genau sein. Wenn also eine Prognose zu einem späteren Zeitpunkt mit den zuvor berechneten Pfaden des Entscheidungsbaums gemacht werden soll, so muss der bereits zum Teil realisierte Pfad berücksichtigt werden. Es muss mit realisierten Dauern neu hochgerechnet werden.

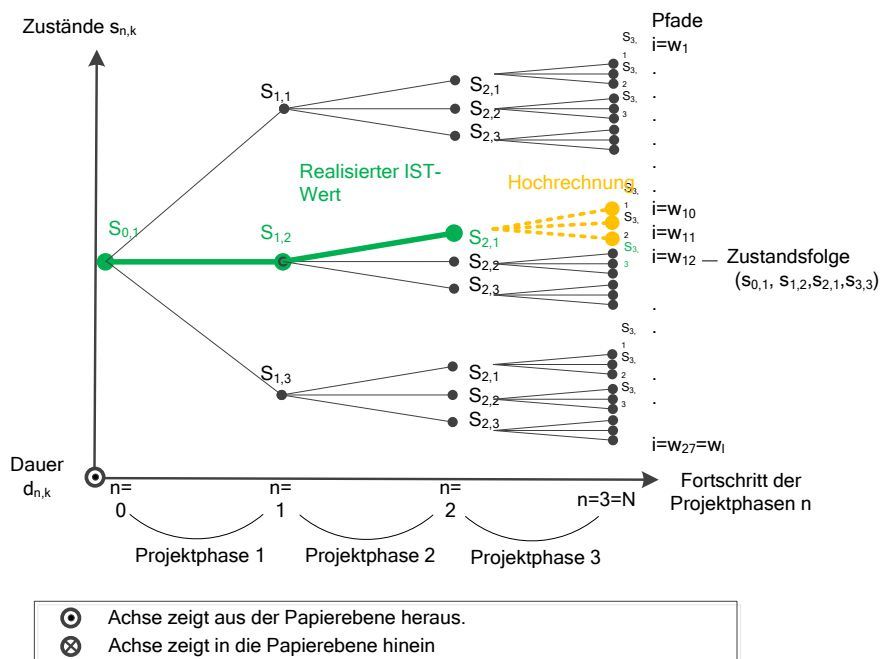


Abbildung 24: Realisierter Pfad im Entscheidungsbaum

Wenn bereits ein Projektfortschritt erreicht wurde, dann reduzieren sich die Möglichkeiten im Entscheidungsbaum, da nicht mehr alle Pfade zur Verfügung stehen. Wenn zum Beispiel bereits die Projektphase 2 mit dem realisierten



Zustand  $s_{2,1}$  abgeschlossen wurde, dann bleiben im vorliegenden Entscheidungsbaum nur noch drei zukünftige Möglichkeiten zur Realisierung in der Projektphase 3 übrig.

Eine Hochrechnung der Projektdauer auf das Projektende, also auf den Abschluss der Projektphase 3, nachdem Projektphase 2 bereits abgeschlossen wurde muss daher neben den Schätzwerten für die zukünftigen Zustände  $s_{3,1}$ ,  $s_{3,2}$ ,  $s_{3,3}$  auch die bereits realisierten Werte berücksichtigen. Bei der Hochrechnung auf die Projektdauer werden die realisierten Ist-Dauern für die Phasen 1 und 2 sowie die zu erwarteten Dauern für die Phase 3 summiert. Wobei aufgrund der realisierten Dauern nur noch die drei Pfade  $i = \omega_{10}, \omega_{11}, \omega_{12}$  übrig bleiben.

$$D(i|s_{2,1}) = D_1^{\text{IST}} + D_2^{\text{IST}} + \sum_{n=3}^3 D_{n,i} = D_1^{\text{IST}} + D_2^{\text{IST}} + D_{3,i}$$

Der Entscheidungsbaum zum Beispielprojekt nach Realisierung der Dauer  $D_1^{\text{IST}} = 14$  und  $D_2^{\text{IST}} = 41$  Arbeitstage auf den restlichen Pfaden die hochgerechneten Dauern  $D_{2,\omega_{10}} = 14 + 41 + 25 = 80$  oder  $D_{2,\omega_{11}} = 14 + 41 + 14 = 69$  oder  $D_{2,\omega_{12}} = 14 + 41 + 11 = 66$  mit den Pfadwahrscheinlichkeiten  $p_{2,\omega_{10}} = 0,25$  oder  $p_{2,\omega_{11}} = 0,5$  oder  $p_{2,\omega_{12}} = 0,25$ .

### 3.2.2. Erwartungswerte bei bedingter Hochrechnung der Projektdauer

Bereits realisierte Dauern werden analog der Erwartungswerte für die Erstprognose berechnet, allerdings werden wie bei der Pfaddauern-Hochrechnung auch Ist-Daten berücksichtigt und ab dem Zustand  $s_{2,1}$  wird die stochastische Prognose verwendet.

Die folgende Summe ist die erwartete Pfaddauer vom Zustand  $s_{2,1}$  aus bis zur letzten Phase N.

$$D(i|s_{2,1}) = D_1^{\text{IST}} + D_2^{\text{IST}} + D_{0,i} + \dots + D_{N,i}$$

Am Beispiel der vorherigen Abbildung wird für den Pfad  $i$  der Pfaderwartungswert vom Zustand  $s_{2,1}$  aus bis zur Phase  $N=3$  hochgerechnet.

$$D(i|s_{2,1}) = D_1^{\text{IST}} + D_2^{\text{IST}} + \sum_{n=3}^3 D_{n,i} = D_1^{\text{IST}} + D_2^{\text{IST}} + D_{3,i}$$

Der Erwartungswert berücksichtigt die realisierten Ist-Werte in jedem Pfad mit einer Pfadwahrscheinlichkeit 1 (100%) und vom Zustand  $s_{2,1}$  aus bis zur Phase  $N=3$  die Zustandswahrscheinlichkeiten wie im Entscheidungsbaum modelliert..

$$p(i|s_{2,1}) = 1 \cdot 1 \cdot p_{0,i} \cdot p_{1,i} \cdot \dots \cdot p_{N,i} = 1 \cdot 1 \cdot \prod_{n=3}^{N=3} p_{n,i} = \prod_{n=3}^{N=3} p_{n,i}$$

Die Berechnung des Erwartungswerts erfolgt hier vom Start-Zustand  $s_{2,1}$  des stochastischen Prozesses bis zu den Zuständen in der letzten Phase  $N$ .

$$\begin{aligned} E \left[ \sum_{n=3}^N \tilde{D}_n | s_{2,1} \right] &= D_1^{\text{IST}} + D_2^{\text{IST}} + D(\omega_{10} | s_{2,1}) \cdot p(\omega_{10} | s_{2,1}) + \\ &+ D(\omega_{11} | s_{2,1}) \cdot p(\omega_{11} | s_{2,1}) + D(\omega_{12} | s_{2,1}) \cdot p(\omega_{12} | s_{2,1}) \end{aligned}$$

Der Erwartungswert im stochastischen Prozess kann abgekürzt mit Summenformeln angeschrieben werden.

$$\begin{aligned} E \left[ \sum_{n=3}^N \tilde{D}_n | s_{2,1} \right] &= D_1^{\text{IST}} + D_2^{\text{IST}} + \sum_{i=\omega_{10}}^{\omega_{12}} \left[ \sum_{n=3}^{N=3} D_{n,i} \cdot \prod_{n=3}^N p_{n,i} \right] \\ &= D_1^{\text{IST}} + D_2^{\text{IST}} + \sum_{i=\omega_{10}}^{\omega_{12}} D(i|s_{2,1}) \cdot p(i|s_{2,1}) \end{aligned}$$

Die bereits realisierten Dauern  $D_1^{\text{IST}} + D_2^{\text{IST}}$  vom Start-Zustand  $s_0$  bis zum realisierten Zustand  $s_{2,1}$  werden im Erwartungswert berücksichtigt, indem die aufgelaufene Istwerte (accumulated actuals) und die Resterwartungswerte addiert werden.

Der erwartete Wert wird unter Verwendung des auf den Zustand  $s_{2,1}$  bedingten Erwartungsoperators  $E[\cdot | s_{2,1}]$  abhängig von Pfadwerten und Wahrscheinlichkeiten berechnet.

Die Varianz wird unter Verwendung des auf den Zustand  $s_{2,1}$  bedingten Varianzoperators  $Var[\cdot | s_{2,1}]$  berechnet.

$$Var \left[ \sum_{n=3}^{N=3} \tilde{D}_n | s_{2,1} \right] = \sum_{i=\omega_{10}}^{\omega_{12}} \left[ \left( \left( D_1^{IST} + D_2^{IST} + \sum_{n=3}^{N=3} D_{n,i} \right) - E \left[ \sum_{n=3}^{N=3} \tilde{D}_n | s_{2,1} \right] \right)^2 \cdot \prod_{n=3}^{N=3} p_{n,i} \right]$$

Die Quadratwurzel der Varianz ergibt die Standardabweichung (standard deviation).

$$StdDev \left[ \sum_{n=3}^{N=3} \tilde{D}_n | s_{2,1} \right] = \left( Var \left[ \sum_{n=3}^{N=3} \tilde{D}_n | s_{2,1} \right] \right)^{0.5}$$

Tabelle 27: Pfadbeschreibung bei Hochrechnung

Ergebnisse des stochastischen Prozess X(d~)								
Pfad w	Pfadbeschreibung	Abbruch	s(n=2,w)	s(n=3,w)	P(n=2,w)	P(n=3,w)	D_Ist(n=0 bis 2,w)	D(n=3,w)
1	S3,1 = Dist2 + Dmax3		0	1	1	0,25	55	80
2	S3,2 = Dist2 + Dhäufig3		0	2	1	0,5	55	69
3	S3,3 = Dist2 + Dmin3		0	3	1	0,25	55	66

Tabelle 28: Dauer-Erwartungswerte mit realisierten Ist-Dauern

Prognose der stochastischen Dauer (sowie abhängiger Kosten) des Produktentwicklungs-Projektes						
Stufe (Phase)	n=		0	1	2	3
Erwartungswert	E[d~] =	Σw ( pw . Dw )				71,00
Standardabweichung der Dauer	σ[d~] =					7

Auch bei der Hochrechnung mit realisierten Werte erstellt das Excel-Prognosetool diese Monte Carlo Analyse automatisiert aus dem stochastischen Prozess und ermittelt neben dem Erwartungswert auch die Grenzpfade zum Konfidenzintervall in der Prognose.

Tabelle 29: Monte Carlo Analyse für Projektdauern

Monte Carlo Analyse der Dauern					
Pfad	Zustandsfolge	P(D~)	D	K	PKUM(D~)
1	S3,1 = Dist2 + Dmax3	0,250000000	80	0	1 P <= 1: Obergrenze des 1-Intervalls: D[ne=3, w=1]=80
2	S3,2 = Dist2 + Dhäufig3	0,500000000	69	0	0,75 P <= 0,75: Obergrenze des 0,5-Intervalls: D[ne=3, w=2]=69
3	S3,3 = Dist2 + Dmin3	0,250000000	66	0	0,25 P <= 0,45: Untergrenze des 0,1-Intervalls: D[ne=3, w=3]=66

### 3.3. Pfadweiser Ansatz für die Projektkosten

Entsprechend der üblichen Vorgehensweise in der Projektplanung werden zuerst die Leistung (Qualität, Quantität), danach Dauern und Termine und dann die Ressourcen und Kosten geplant. Nach dem die Projektdauer als stochastische Größe modelliert wurde, kann mit Kostenfunktionen basierend auf einer analytischer Kostenplanung ein pfadweiser Ansatz für die Projektkosten entwickelt werden.

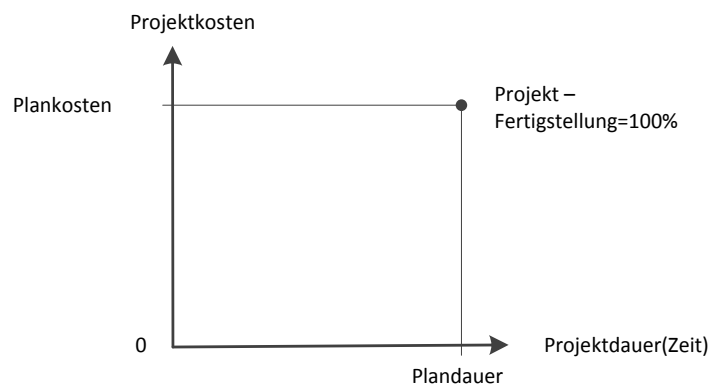


Abbildung 25: Projektkosten über der Projektdauer

#### 3.3.1. Kostenfunktion für Dauern anstatt Ausbringungsmengen

Das im Grundlagenkapitel beschriebene analytische Verfahren der Kostenplanung basiert auf einem strukturierten Modell, wobei die Kosten in Abhängigkeit von ihren verursachungsgerechten Kostentreibern betrachtet werden. Ein solches Modell ist das generische 3-Ressourcen-Modell, wobei der Blick stets auf die Material-, Personal- und Technologie-Ressource gerichtet ist. Bei pfadweisen Produktionsfunktionen steht die Ausbringung in funktionaler Beziehung zu den Ressourcen-Einsätzen.<sup>142</sup>

Diese Ausbringung ist bei Produktionsfunktionen eine Mengenangabe für das zu produzierende Produkt. Da ein Projekt per Definition ein einmaliges Unternehmen ist kann die Ausbringung maximal eins (100%) erreichen und es ist über den Fertigstellungsgrad FGR gut skalierbar. Der Fertigstellungsgrad wird auf die Leistung bezogen und als Verhältnis der kumulierten Plankosten zu den Plan-

<sup>142</sup> (Schwaiger, Vorlesungsskript Controlling unter Unsicherheit - Draft Version, 2009) Vorlesungsskript Controlling unter Unsicherheit S. 59

Gesamtkosten berechnet. Von den Kosten kann aber nicht direkt auf die Dauer geschlossen werden, das funktioniert in der traditionellen Projektplanung nur umgekehrt über analytische Kostenfunktionen die mit der Einsatzdauer anstatt der Ausbringung rechnet.

Die Projektkosten werden dem Projekt zugeordnet, indem man die definierten Einsatzmittel mit Verrechnungssätzen bewertet sowie die einsatzmittelunabhängigen Kostenarten definiert und den Arbeitspaketen zuordnet.<sup>143</sup>

### 3.3.2. Kostenfunktion für ein Arbeitspaket

Bei der Berechnung der Projektkosten müssen die Kosten der kleinsten Betrachtungs-Elemente in einem Projekt summiert werden. Die folgenden Aussagen gelten für die kleinsten Element der Betrachtung, die im Projektalltag meist durch die Arbeitspakete repräsentiert werden. Falls eine grobe Kostenbetrachtung auf Phasen-Ebene ausreicht, somit das kleinste Element durch die Phase repräsentiert wird, dann kann man die Kostenfunktionen natürlich direkt für die Phasen aufstellen.

Die einzelnen Kosten für ein Arbeitspaket  $m$  in einer Projekt-Phase  $n$  auf einen bestimmen Pfad  $i$  entstehen in diesem deterministischen Ansatz für die Projektkosten aus analytischen Kostenfunktionen, die direkt von Dauer und Ressourceneinsatz abhängen. Wobei die von der Dauer abhängigen Kosten  $K[D(i)]$  auch vom zugehörigen Ressourceneinsatz abhängig sind und das 3-Ressourcen-Modell (Personal, Material, Technologie) verwendet wird. Jede Ressource kann Fixkosten, sowie variable von Einsatzdauer, Auslastung und Verrechnungssatz abhängige Kosten verursachen.

Für ein Arbeitspaket  $m$  in der Projektphase  $n$  bestehen die Kosten für die verwendete Ressource  $r = P, M, T$  (Personal, Material, Technologie) aus fixen und variablen Einsatzkosten.

$$K_{n,m,r} = K_{n,m,r,fix} + K_{n,m,r,var}$$

---

<sup>143</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 217

Es existieren natürlich Anwendungsfälle in denen Ressourcen entweder nur fixe oder nur variable Kosten verursachen. Die Fixkosten für eine Ressource müssen dabei nicht immer vorkommen, zum Beispiel verursacht die einmalige Anschaffung einer Produktionsanlage (Ressource  $r=T$  für Technologie) reine Fixkosten für das Projekt.

$$K_{n,m,T} = K_{n,m,T,fix}$$

Rein variable Kosten können zum Beispiel die Personalkosten sein, diese haben keine fixen Kostenanteile.

$$K_{n,m,P} = K_{n,m,P,var}$$

Die variablen Kosten sind in diesem pfadweisen Ansatz von Einsatzdauer, Auslastung und Verrechnungssatz abhängig. Für die Einsatzdauer der Ressourcen wird vereinfachend die ganze Dauer des Arbeitspakets angenommen.

$$K_{n,m,r,var} = D(i)_{n,m} \cdot k_{n,m,var,r}$$

Diese angenommene Dauer wird aus dem probabilistischen Prognosemodell übernommen und ist daher vom Pfad  $i$  stochastisch abhängig. In der Kostenfunktion wird die stochastische Dauer  $D(i)_{n,m}$  verwendet.

Für die Ressource  $r$  im Arbeitspaket  $m$  in der Phase  $n$  besteht der variable Kostensatz  $k_{n,m,r,var}$  aus dem Produkt von Verrechnungssatz je Zeiteinheit und der verwendeten Einsatzmenge. Betriebswirtschaftlich ausgedrückt wird ein Einsatzpreis  $q$  in Geldeinheiten je Zeiteinheit (Tagessatz in Euro/Tag) mit einer Kapazitäts-Auslastung  $a$  (der eingesetzten Ressource an einem Tag) multipliziert.

$$k_{n,m,r,var} = q_{n,m,r} \cdot a_{n,m,r}$$

Der variable Kostensatz wird damit in Geldeinheiten pro Zeiteinheit angegeben und berücksichtigt auch die Menge oder Kapazitäts-Auslastung der eingesetzten Ressource.

Die variablen Kosten sind das Produkt der stochastischen Dauer, des Verrechnungssatzes sowie der Kapazitäts-Auslastung.

$$K_{n,m,r,var} = D(i)_{n,m} \cdot q_{n,m,r} \cdot a_{n,m,r}$$

Die Kostenfunktion für ein Arbeitspaket ist die Summe der fixen und variablen Kosten der eingesetzten Ressourcen.

$$K_m(D(i)_m) = \sum_{r=Mat,Pers,Tech} [K_{n,m,r,fix} + D(i)_{n,m} \cdot q_{n,m,r} \cdot a_{n,m,r}]$$

$$K_m(D(i)_m) = \sum_{r=Mat,Pers,Tech} [K_{n,m,r,fix} + K_{n,m,r,var}]$$

### 3.3.3. Kostenfunktion für eine Projektphase

Für eine ganze Projektphase  $n$  werden die Kosten der darin liegenden Arbeitspakete  $m$  aufsummiert.

$$\begin{aligned} K_n(D(i)_n) &= \sum_{m=1}^M K_m(D(i)_m) = \\ &= \sum_{m=1}^M \sum_{r=Mat,Pers,Tech} [K_{n,m,r,fix} + D(i)_{n,m} \cdot q_{n,m,r} \cdot a_{n,m,r}] \end{aligned}$$

Falls eine Kostenberechnung grob auf Phasenebene ausreicht, lautet die Kostenfunktion so wie beim Arbeitspaket, aber ohne den Index  $m$  mit zu nehmen.

$$K_n(D(i)_n) = \sum_{r=Mat,Pers,Tech} [K_{n,r,fix} + D(i)_n \cdot q_{n,r} \cdot a_{n,r}]$$

### 3.3.4. Pfadweise Projektkosten bei stochastischer Dauer

Die deterministische Prognose der Projektkosten ist abhängig von der Dauer und den eingesetzten Ressourcen in jeder Projektphase. Folgende Abbildung zeigt grafisch überlagert in einem Diagramm die stochastische Projektdauer in jedem Pfad und die davon abhängigen Projektkosten, nach dem probabilistischen Prognosemodell. Wobei vereinfacht nur drei Zustände zur 100%igen Fertigstellung eines Projektes dargestellt sind.

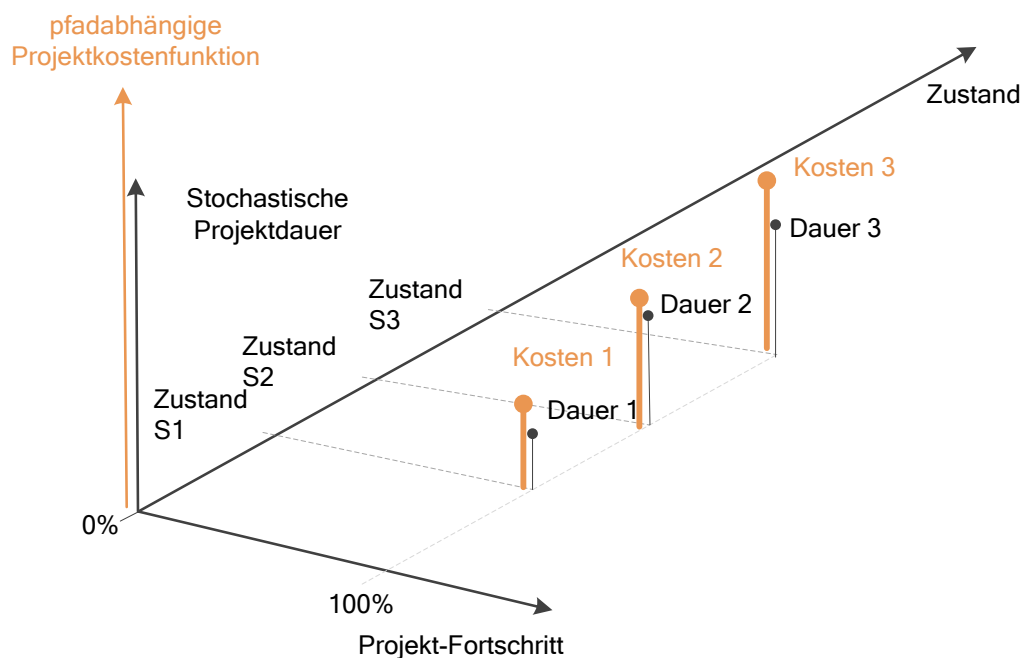


Abbildung 26: Projektkostenfunktion im probabilistische Modellansatz

Die Projektkosten  $K[D(i)]$  für einen Pfad  $i = \omega_1, \omega_2 \dots \omega_I$  sind die Summe der vorher definierten Phasen-Kosten in den Projektphasen von  $n=0$  bis  $n=N$ .

$$K[D(i)] = \sum_{n=0}^N K_n (D(i)_{n,m}) =$$

$$= \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M \sum_{r=Mat, Pers, Tech} [K_{n,m,r,fix} + (D(i)_{n,m} \cdot a_{n,m,r}) \cdot q_{n,m,r}]$$



Mit

$n$	Projektphase $n=1$ bis $N$
$m$	Arbeitspakete $m=1$ bis $M$ in der Projektphase $n$
$r$	Ressource $r=P, M, T$ (Personal, Material, Technologie)
$K_{n,m,r,fix}$	Fixkosten
$K_{n,m,r,var}$	variable Kosten
$k_{n,m,r,var}$	variabler Kostensatz
$q_{n,m,i}$	Verrechnungssatz
$a_{n,m,i}$	Kapazitäts-Auslastung
$D(i)_{n,m}$	Dauer
$i$	Pfad $i = \omega_1, \omega_2 \dots \omega_I$ im Entscheidungsbaum
$I$	Anzahl der Pfade im Entscheidungsbaum

Falls eine grobe Berechnung der Projektkosten auf Phasenebene ausreicht, lautet die Kostenfunktion so wie beim Arbeitspaket, aber ohne den Index  $m$  mit zu nehmen.

$$K[D(i)] = \sum_{n=0}^N \sum_{r=Mat,Pers,Tech} [K_{n,r,fix} + (D(i)_n \cdot a_{n,r}) \cdot q_{n,r}]$$

### 3.3.5. Erwartungswert der Projektkosten

Der Kosten-Erwartungswert ist die Summe der Kosten-Pfaderwartungswerte, die durch Multiplizieren von Pfadkosten und Pfadwahrscheinlichkeit entstehen.

Der Pfaderwartungswert der Kosten vom Start-Zustand  $s_0$  aus bis zur Phase  $n$  ist die Summe der Kosten am Pfad  $i$ .

$$K_n(D_{n,i}|s_0) = \sum_{n=0}^N D_{n,i}$$

Die Pfadwahrscheinlichkeit in jedem Pfad ist das Produkt der einzelnen Zustandswahrscheinlichkeiten.

$$p(i|s_0) = p_{0,i} \cdot p_{1,i} \cdot \dots \cdot p_{N,i} = \prod_{n=0}^N p_{n,i}$$

Der Berechnung des Kosten-Erwartungswerts kann mit den Pfaderwartungswerten detaillierter angegeben werden. Wobei die Tilde  $\sim$  über der Variable der Hinweis auf eine stochastische Größe ist.

$$\begin{aligned} E \left[ \sum_{n=0}^{N=3} K_n(\tilde{D}_n | s_0) \right] &= \sum_{i=\omega_1}^{\omega_1} [(K_0(D_{0,i}) + \dots + K_N(D_{N,i})) \cdot (p_{0,i} \cdot p_{1,i} \cdot \dots \cdot p_{N,i})] \\ &= \sum_{i=\omega_1}^{\omega_1} K_n(D_{n,i} | s_0) \cdot p(i|s_0) \end{aligned}$$

Der Erwartungswert im stochastischen Prozess kann mit Summenformeln abgekürzt angeschrieben werden.

Die Berechnung des Erwartungswerts erfolgt hier vom Start-Zustand  $s_0$  des stochastischen Prozesses bis zu den Zuständen in der letzten Phase  $N$ .

Der erwartete Wert wird unter Verwendung des auf den Zustand  $s_0$  bedingten Erwartungsoperators  $E[\cdot | s_0]$  abhängig von Pfadwerten und Wahrscheinlichkeiten berechnet.

Die Varianz wird unter Verwendung des auf den Zustand  $s_0$  bedingten Varianzoperators  $Var[\cdot | s_0]$  berechnet.

$$\text{Var} \left[ \sum_{n=0}^{N=3} K_n(\tilde{D}_n | s_0) \right] = \sum_{i=\omega_1}^{\omega_1} \left[ \left( \sum_{n=0}^{N=3} K_n(D_{n,i} | s_0) - E \left[ \sum_{n=0}^{N=3} K_n(\tilde{D}_n | s_0) \right] \right)^2 \cdot \prod_{n=0}^N p_{n,i} \right]$$

Die Quadratwurzel der Varianz ergibt die Standardabweichung (standard deviation).

$$\text{StdDev} \left[ \sum_{n=0}^{N=3} K_n(\tilde{D}_n | s_0) \right] = \left( \text{Var} \left[ \sum_{n=0}^{N=3} K_n(\tilde{D}_n | s_0) \right] \right)^{0.5}$$

### 3.3.6. Bedingte Hochrechnung der Projektkosten

Bereits realisierte Kosten werden analog der Erwartungswerte für die Erstprognose berechnet, allerdings werden dann auch Ist-Daten berücksichtigt.

Das Projekt im Hochrechnungsbeispiel aus Kapitel 3.2 ist bis Phase 2 abgeschlossen. Für die Istkosten bis Phase 2 und anschließender Hochrechnung von Zustand  $s_{2,1}$  bis  $s_{3,1}$ ,  $s_{3,2}$  oder  $s_{3,3}$  erhält man für die Pfade  $i = \omega_{10}, \omega_{11}, \omega_{12}$  die folgende Erwartungswertformel.

$$E \left[ \sum_{n=0}^{N=3} K_n(\tilde{D}_n | s_{2,1}) \right] = K_1^{\text{IST}} + K_2^{\text{IST}} + \sum_{i=\omega_{10}}^{\omega_{12}} K_n(D_{n,i} | s_{2,1}) \cdot p(i | s_{2,1})$$

Der erwartete Wert wird unter Verwendung des auf den Zustand  $s_{2,1}$  bedingten Erwartungsoperators  $E[\cdot | s_{2,1}]$  abhängig von Pfadwerten und Wahrscheinlichkeiten berechnet.

Die bereits realisierten Kosten  $K_1^{\text{IST}} + K_2^{\text{IST}}$  vom Start-Zustand  $s_0$  bis zum realisierten Zustand  $s_{2,1}$  werden im Erwartungswert berücksichtigt, indem die aufgelaufene Istwerte (accumulated actuals) und die Resterwartungswerte addiert werden.

Die Varianz wird unter Verwendung des auf den Zustand  $s_0$  bedingten Varianzoperators  $\text{Var}[\cdot | s_{2,1}]$  berechnet.

$$\text{Var} \left[ \sum_{n=3}^{N=3} K_n(\tilde{D}_n | s_{2,1}) \right] =$$

$$= \sum_{i=\omega_{10}}^{\omega_{12}} \left[ \left( \left( K_1^{\text{IST}} + K_2^{\text{IST}} + \sum_{n=3}^{N=3} K_n(D_{n,i}|s_0) \right) - E \left[ \sum_{n=3}^{N=3} K_n(\tilde{D}_n|s_{2,1}) \right] \right)^2 \cdot \prod_{n=3}^{N=3} p_{n,i} \right]$$

Die Quadratwurzel der Varianz ergibt die Standardabweichung (standard deviation).

$$\text{StdDev} \left[ \sum_{n=0}^{N=3} \tilde{D}_n | s_{2,1} \right] = \left( \text{Var} \left[ \sum_{n=0}^{N=3} \tilde{D}_n | s_{2,1} \right] \right)^{0.5}$$

Erwartungswert, Varianz und Standardabweichung sind für das Produktentwicklungs-Projekt-Beispiel in der übernächsten Tabelle 32 berechnet. Neben Erwartungswert, Varianz und Standardabweichung sind die Vertrauensgrenzen im Konfidenzintervall interessant um risikobehafteten Pfade erkennen zu können. Mit der Monte Carlo Analyse werden die Daten der Größe nach sortiert, die Pfadwahrscheinlichkeiten aufsummiert und dann die Vertrauensgrenzen für gewählte Konfidenzintervalle angezeigt. Im Beispielprojekt werden die Vertrauensgrenzen der Kosten durch Monte Carlo Analyse ermittelt. Dabei werden die stochastische Dauern sortiert, die Pfadwahrscheinlichkeiten aufsummiert und die Pfad-Kosten als Grenze angegeben. Folgende Abbildung zeigt die Monte Carlo Analyse des teilweise fertigen Projekts (Phasen n=0 bis n=3 sind erledigt).



### 3.3.7. Begriffsvergleich zur Earned Value Analysis

Der Erwartungswert im pfadweisen Ansatz der Projektkosten kann als pfadweise Prognose der Projektkosten mit dem Begriff der Estimated Cost at completion (EAC) in der Earned Value Analysis verglichen werden. Genau betrachtet ist aber eher die additive Prognose der erwarteten Gesamtkosten und nicht die eigentlich mit in der englischen Bedeutung von EAC gemeinte lineare Prognoseberechnung.

Die oberen und untern Vertrauensgrenzen des lassen sich nicht direkt mit einem Begriff aus der Earned Value Analysis gleichsetzen, sondern könne als spezielle Extremwerte der Estimated Cost at completion (EAC) unter Annahme einer Wahrscheinlichkeit gesehen werden.

## 3.4. Das probabilistischen Prognosemodell zur Earned Value Analysis

Bei der probabilistischen Prognose werden zuerst die Dauern stochastisch modelliert und darauf aufbauend werden die Kosten pfadweise abgeleitet. Damit ist die Vorgehensweise gleich wie bei der traditionellen Projektplanung, wo im „magischen“ Dreieck der Projekt-Planungsgrößen zuerst Leistungen, dann Termine und erst dann Ressourcen bzw. Kosten nacheinander betrachtet werden.

Im Anschluss an die traditionelle Projektplanung folgt das Projektcontrolling, wobei zur integrierten Betrachtung von Leistung, Zeit und Kosten die Earned Value Analysis angewendet wird um zu bestimmten Stichtagen verschiedene Projektkenngößen und Prognosen (lineare, additive, Ursprungsplan)<sup>144</sup> zu berechnen.

Das probabilistische Prognosemodell kann in der Earned Value Analysis genutzt werden, um für Kosten und Dauer des Projekts bessere Prognosen unter Einbeziehung der Unsicherheit zu erstellen.

Die folgende Abbildung macht die pfadweise Modellierung und die unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten deutlich. Die folgende Tabelle stellt die vergleichbaren Begriffe der Earned Value Analysis und des probabilistischen Prognosemodell gegenüber.

---

<sup>144</sup> (DIN69901-3:2009-01 Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 3: Methoden, 2009)

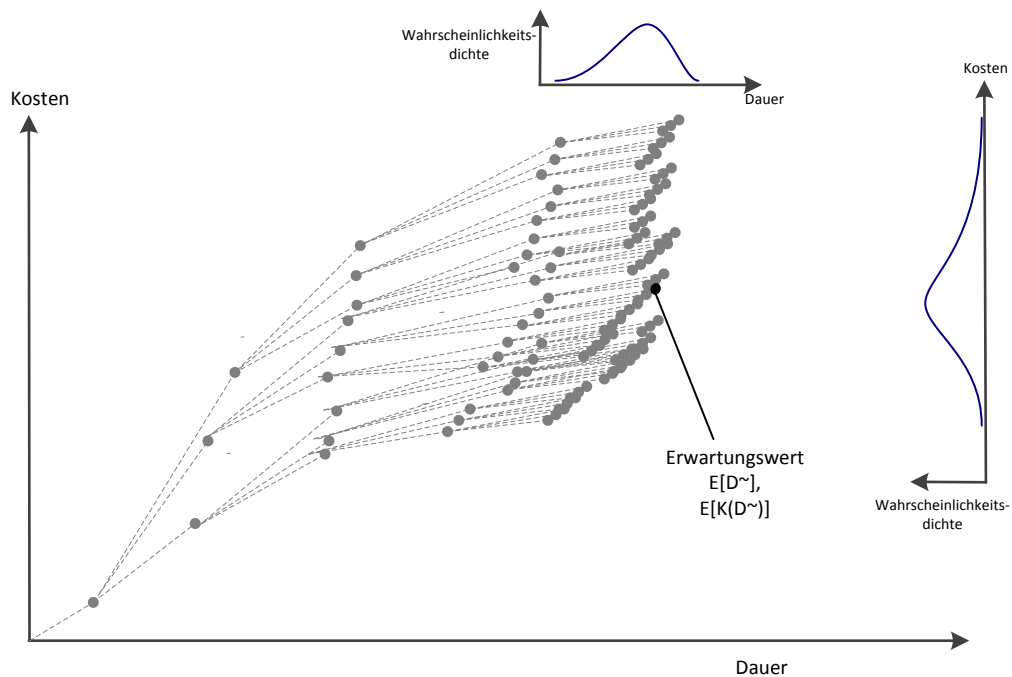


Abbildung 27: Skizze der probabilistischen Pfade in der Kosten-Dauer-Ebene (qualitativ)

Tabelle 32: Gegenüberstellung von Earned Value Analysis und probabilistisches Prognosemodell

Earned Value Analysis	probabilistisches Prognosemodell
Zeit-Prognose bei Fertigstellung (Projection at Completion PAC)  $PAC = PF_{ST} = \frac{PD_{Ende}^{Kum}}{TEI_{ST}}$	Erwartungswert im stochastischen Prozess Dauer  $E \left[ \sum_{n=0}^{N=3} \tilde{D}_n   s_0 \right] = \sum_{i=\omega_1}^{\omega_1} \left[ \sum_{n=0}^{N=3} D_{n,i} \cdot \prod_{n=0}^N p_{n,i} \right]$
Spezielle Extremwerte von Projection at completion (PAC) unter Annahme bestimmter Wahrscheinlichkeit.	Die oberen und unteren Vertrauensgrenzen des stochastischen Prozesses Dauer unter Annahme bestimmter Wahrscheinlichkeit.
erwartete Gesamtkosten EGK  1) lineare Prognose auf das Projektende (Estimated Cost at Completion EAC)  $EGK_{1,ST} = PGK \cdot \frac{IK_{ST}^{Kum}}{FW_{ST}}$  2) additive Prognose  $EGK_{2,ST} = PGK_{ST} + (IK_{ST}^{Kum} - FW_{ST})$	Erwartungswert der Projektkosten  $E \left[ \sum_{n=0}^{N=3} K_n(\tilde{D}_n   s_0) \right] = \sum_{i=\omega_1}^{\omega_1} \left[ \sum_{n=0}^{N=3} K_n(D_{n,i}   s_0) \cdot \prod_{n=0}^N p_{n,i} \right]$
Spezielle Extremwerte der Estimated Cost at completion (EAC) unter Annahme bestimmter Wahrscheinlichkeit.	Die oberen und unteren Vertrauensgrenzen der pfadweise verteilten Projektkosten unter Annahme bestimmter Wahrscheinlichkeit.

Die in der vorherigen Abbildung zusätzlich skizzierten Wahrscheinlichkeitsdichte-Verteilungen sind für die Werte der Dauer und die Werte der Kosten auswertbar.

Die bekannten Prognosen bei der Earned Value Analysis verlieren dadurch nicht ihre Gültigkeit und sind für schnelle Hochrechnungen rascher verfügbar als die Aufstellung, Prognose und Auswertung mit dem vorliegenden Prognosemodell.

Der Vorteil der probabilistischen Prognose liegt aber darin, mehr Information zu erhalten, da vom Projektstart bis zum –Ende ein Entscheidungsbaum modelliert wurde erhält man für jede Projektphase eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für Dauer und Kosten. Damit kann man Risikofaktoren so in die Prognosewerte einbeziehen, dass diese transparent sind. Die punktuelle Prognose wird abgelöst von Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Dauer und Kosten. Es sind Prognose entstanden, die die Dimensionen Dauer, Kosten und Pfadwahrscheinlichkeit zu jeder Projektphase und jedem Pfad festlegen. Diese beobachtbaren Risikofaktoren kann man über Risikomaße auswerten und besonders kritische Prognose-Punkte auf ihrem Pfad bis zur Ursache zurück verfolgen. Diese Vorschau macht es somit möglich für jedes Szenario (Pfad) Ursachen für Abweichungen zu identifizieren um gezielte Steuerungsmaßnahmen einzuleiten.

Die Abbildung macht den Unterschied zwischen probabilistische Prognose mit transparenten Pfadangaben und der linearen-, additiven- Prognose deutlich.

Die lineare- und die additive Prognose werden aufgrund der Ist-Kosten für jeden Stichtag neu berechnet, daher können sich die Prognosen schlagartig verändern.





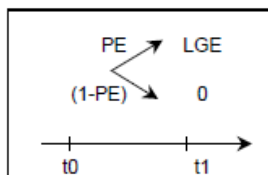
## 4. Risikomaße für das Projektcontrolling

### 4.1. Risikobegriff

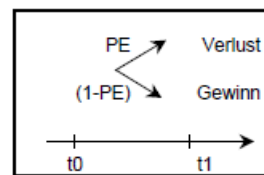
Risiko ist eine zweidimensionale Größe bestehend aus einem potentiellen zukünftigen Ereignis mit negativer Auswirkung und der Wahrscheinlichkeit mit der das Ereignis eintreten kann.<sup>145</sup> Risiko wird in zwei unterschiedlichen Grundtypen eingeteilt:

#### 4.1.1. Grundtypen von Risiko

Reine Risiken sind als Verluste ohne Gewinnmöglichkeit rein schadensverursachend, z.B. Kreditrisiken, operationale Risiken (Ausfall- und Unfallrisiko in der Versicherungsmathematik). Im Reinen Risiko-Modell kann das Verlustpotential (=Loss Given Event = LGE) mit der Verlustwahrscheinlichkeit (= Probability of Event = PE) eintreten und mit der Gegenwahrscheinlichkeit ( $1 - PE$ ) passiert nichts.<sup>146</sup>



reines Risiko



spekulatives Risiko

Abbildung 29: Risiko-Grundtypen<sup>147</sup>

Spekulative Risiken tragen neben Verlust- auch Gewinnmöglichkeiten in sich, z.B. Markt-, Geschäfts- und Währungsrisiko (Finanzmathematik). Im Spekultativen Risiko-Modell kann das Verlustpotenzial (LGE) mit der Verlustwahrscheinlichkeit (PE) eintreten und mit der Gegenwahrscheinlichkeit ( $1 - PE$ ) tritt ein Gewinn ein.<sup>148</sup>

<sup>145</sup> (Schwaiger, Vorlesungsfolien - Controlling von Geschäfts- und operativen Risiken, 2010) S. 40

<sup>146</sup> (Schwaiger, Vorlesungsfolien - Controlling von Geschäfts- und operativen Risiken, 2010) S. 42

<sup>147</sup> (Schwaiger, Vorlesungsfolien - Controlling von Geschäfts- und operativen Risiken, 2010) S. 41

<sup>148</sup> (Schwaiger, Vorlesungsfolien - Controlling von Geschäfts- und operativen Risiken, 2010) S. 42

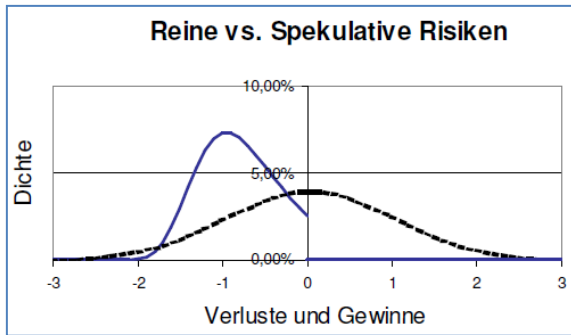


Abbildung 30: : Dichtefunktion: Reine vs. Spekulative Risiken<sup>149</sup>

Bei reinen Risiken hat die Verteilung aufgrund der reinen Verluste im negativen Wertebereich die höchste Dichte. Da keine Gewinne möglich sind ist die Dichte im positiven Bereich ( $\geq 0$ ) gleich Null. Bei spekulativen Risiken besitzt die Verteilung sowohl im positiven als auch im negativen Wertebereich eine Dichte.

Bekannte Risikokategorien und Verlustpotentiale sind in der Abbildung dargestellt.

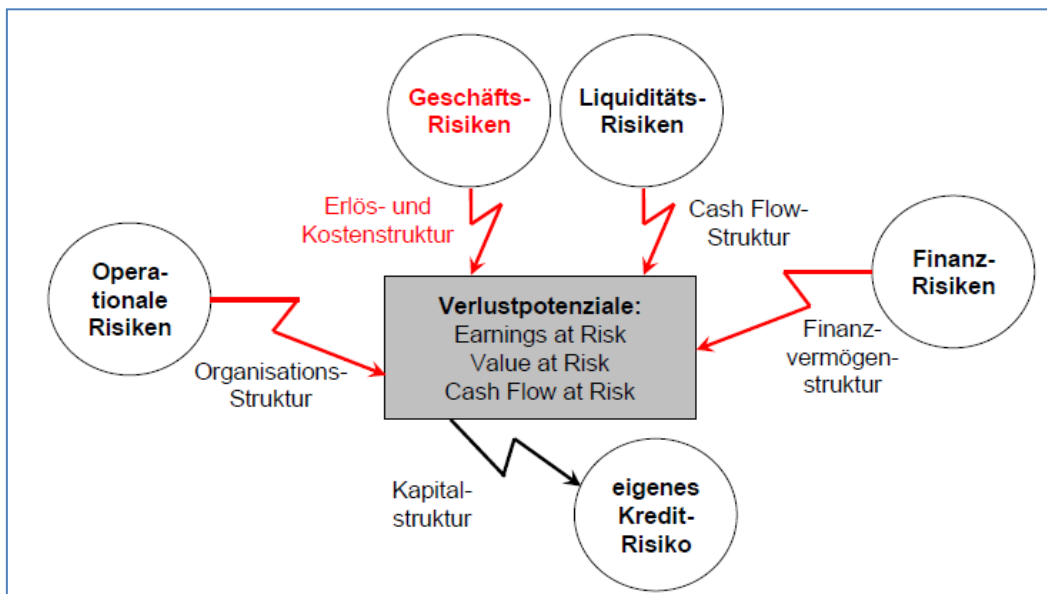


Abbildung 31: Geschäftsrisiken<sup>150</sup>

#### 4.1.2. Berechnung von Risikomaßen

Die Berechnung von Risikomaßen ist eine Teilaufgabe der Risikoquantifizierung. Die Risikoquantifizierung ist die Bewertung von Risiken durch Beschreibung mittels

<sup>149</sup> (Lederer, Vorlesungsfolien - Markt- und Kreditrisiko-Controlling, 2010) S. 12

<sup>150</sup> (Schwaiger, Vorlesungsfolien - Controlling von Geschäfts- und operativen Risiken, 2010) S. 101

einer geeigneten Dichte- oder Verteilungsfunktion (oder historischen Daten) über die Wirkung des Risikos und die Zuordnung von Risikomaßen. Ziel der Quantifizierung ist es zunächst, die identifizierten Risiken quantitativ durch geeignete Verteilungsfunktionen (Wahrscheinlichkeitsverteilungen) zu beschreiben.

Der Value at Risk (VaR) wird berechnet als der absolute Wertverlust einer im Unternehmen definierten Risiko-Position, der mit einer zuvor definierten Wahrscheinlichkeit (Konfidenzniveau) innerhalb eines fest bestimmten Zeitraums (Halteperiode) nicht überschritten wird. Für die Berechnung des Value at Risk müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein:<sup>151, 152</sup>

- Die Risiken müssen in Einzelkategorien zerlegt und mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit versehen werden
- die Abhängigkeiten zwischen den Risiken sollten bekannt sein
- die Risiko-Eigenschaften (siehe oben) müssen im Zeitablauf einigermaßen stabil und prognostizierbar sein
- es muss eine gesicherte Datenbasis vorhanden sein.

Berechnung des Value at Risk mit zwei verschiedenen Ansätze:

Analytischer Ansatz: das Modell wird auf der Grundlage von bekannten Zusammenhängen und Beziehungen zwischen den einzelnen Variablen gebildet.

Simulationsansatz: anhand der Simulation verschiedener Zustandsentwicklungen.

Die **Historische Simulation** bedient sich dabei vergangenheitsbezogener Daten. Hierbei wird unterstellt, dass alle Risiko-Faktoren aus der Vergangenheit auch in Zukunft den Wert der Risiko-Position in gleicher Weise beeinflussen werden. Die **Monte Carlo Methode** basiert nicht auf Vergangenheitswerten, sondern auf einer stochastischen Variation der unterschiedlichen Modellparameter. Im Rahmen dieses stochastischen Ansatzes werden neben den einzelnen Risiko-Positionen und ihren Einflussfaktoren auch die Korrelationen zu anderen Risiko-Positionen berücksichtigt.<sup>153</sup>

---

<sup>151</sup> (Leippold, 08/1998)

<sup>152</sup> (Operational Value at Risk – Ein Ansatz für das Management von Operationellen Risiken, 01/2003)

<sup>153</sup> (Leippold, 08/1998)

Zur Risiko-Messung wird im unternehmensweiten Risikomanagement in der Ereignis-Identifikation das potentielle Risiko-Ereignis bestimmt und hinsichtlich seines Potentials analysiert. Die Vorgehensweise erinnert an die Störgrößen-Aufschaltung in der Regelungstechnik, wo die Störgröße direkt gemessen wird. Im Risikomanagement wird die Störgröße als **Risikofaktor** bezeichnet. Die ungünstige Veränderung des Risikofaktors ist das Risiko- Ereignis, welches in Kombination mit der Exposition das Risiko ergibt.<sup>154</sup>

Die Risiko-Messung kann mit einem beobachtbaren Risikofaktor durchgeführt werden, dann kann dessen Wahrscheinlichkeitsverteilung (Dichtefunktion) z.B. statistisch mit der Momente-Methode (Stichprobenschätzer) kalibriert werden.<sup>155</sup>

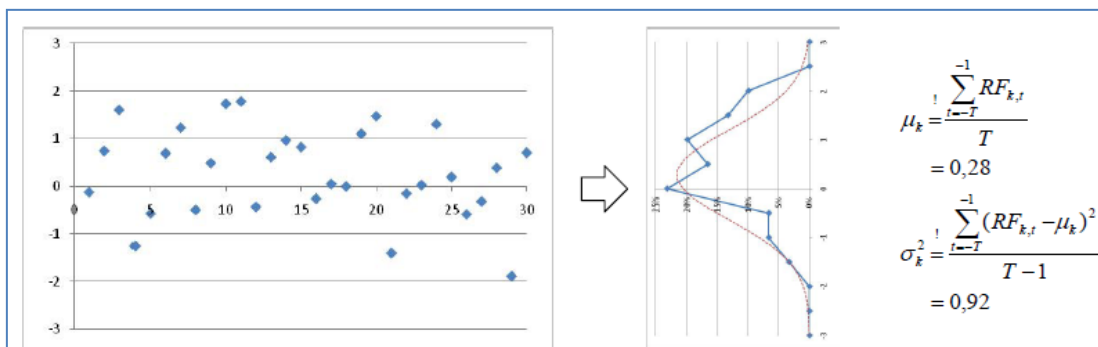


Abbildung 32: Statistische Kalibrierung eines Risikofaktors<sup>156</sup>

### 4.1.3. Risikosteuerung

„In der ERM-Komponente *Risikosteuerung* erfolgt die Steuerung des Risikos in Abhängigkeit von der Risikohöhe. Konzeptionell wird dabei das Verlustpotenzial (*LGE*) und die Verlustwahrscheinlichkeit (*PE*) jeweils in hoch und nieder eingeteilt, sodass sich 4 mögliche Risikokategorien ergeben, welche mit den 4 Steuerungskategorien Übernahme-, Verringerungs-, Übertragungs- und Vermeidungsstrategie in Beziehung stehen.“

Tabelle 33: Risikobewältigungs-Matrix<sup>157</sup>

		Probability of Event (PE)	
		Low	High
Loss Given Event (LGE)	Low	LL/LP-Risk Übernahme	LL/HP-Risk Verringerung
	High	HL/LP-Risk Übertragung	HL/HP-Risk Vermeidung

<sup>154</sup> (Schwaiger, Vorlesungsfolien - Controlling von Geschäfts- und operativen Risiken, 2010) S. 66

<sup>155</sup> (Schwaiger, Vorlesungsfolien - Controlling von Geschäfts- und operativen Risiken, 2010) S. 67

<sup>156</sup> (Schwaiger, Vorlesungsfolien - Controlling von Geschäfts- und operativen Risiken, 2010) S. 67

<sup>157</sup> (Schwaiger, Vorlesungsfolien - Controlling von Geschäfts- und operativen Risiken, 2010) S. 71

### 4.2. Risikomaß der Zeiterwartung (time to complete at Risk)

Das Risikomaß Time to complete at Risk kann an der Obergrenze des Konfidenzintervalls mit dem Niveau  $1 - \alpha$  an der Stelle der kumulierten Wahrscheinlichkeit  $P^{kum} = 1 - \frac{\alpha}{2}$  der Verteilung der Zeiterwartung abgelesen werden.

$$TCaR(1 - \alpha) = TCaR\left(P^{kum} = 1 - \frac{\alpha}{2}\right)$$

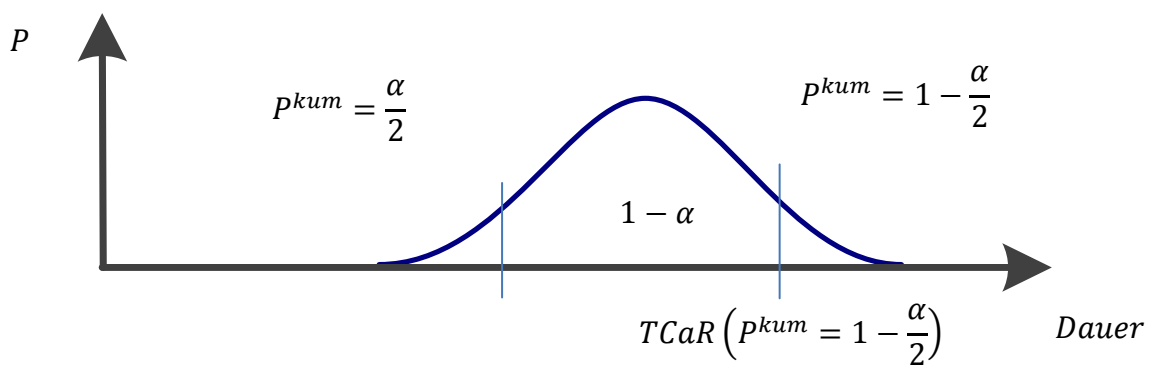


Abbildung 33: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zeiterwartung (qualitativ)

Für den beobachtbaren Risikofaktor „Projektdauer“, der aus dem probabilistischen Prognosemodell entsteht, können die Risikomaße aus der Monte Carlo Analyse für das Beispielprojekt abgelesen werden.

Tabelle 34: Monte Carlo Analyse für Projektdauern (Prognose Phase 4 bis 6)

Monte Carlo Analyse der Dauern				
Pfad	Zustandsfolge	P(D <sup>-</sup> )	D	PKUM(D <sup>-</sup> )
1	S6,1 = Dist3 + Dp4 + Dp5 + Dp6	0,015625000	85	1 P <= 1: Obergrenze des 1-Intervalls: D[ne=6, w=1]=85
2	S6,2 = Dist3 + Dp4 + Dp5 + Dh6	0,031250000	84	0,984375 P <= 0,985: Obergrenze des 0,97-Intervalls: D[ne=6, w=2]=84
3	S6,3 = Dist3 + Dp4 + Dp5 + Do6	0,015625000	83	0,953125000
4	S6,4 = Dist3 + Dp4 + Dh5 + Dp6	0,031250000	75	0,9375 P <= 0,95: Obergrenze des 0,9-Intervalls: D[ne=6, w=4]=75
10	S6,10 = Dist3 + Dh4 + Dp5 + Dp6	0,031250000	75	0,90625
5	S6,5 = Dist3 + Dp4 + Dh5 + Dh6	0,062500000	74	0,875000000 P <= 0,9: Obergrenze des 0,8-Intervalls: D[ne=6, w=5]=74
11	S6,11 = Dist3 + Dh4 + Dp5 + Dh6	0,062500000	74	0,8125 P <= 0,85: Obergrenze des 0,7-Intervalls: D[ne=6, w=11]=74
6	S6,6 = Dist3 + Dp4 + Dh5 + Do6	0,031250000	73	0,75 P <= 0,75: Obergrenze des 0,5-Intervalls: D[ne=6, w=6]=73
7	S6,7 = Dist3 + Dp4 + Do5 + Dp6	0,015625000	73	0,71875
12	S6,12 = Dist3 + Dh4 + Dp5 + Do6	0,031250000	73	0,703125000
8	S6,8 = Dist3 + Dp4 + Do5 + Dh6	0,031250000	72	0,671875 P <= 0,7: Obergrenze des 0,4-Intervalls: D[ne=6, w=8]=72
9	S6,9 = Dist3 + Dp4 + Do5 + Do6	0,015625000	71	0,640625 P <= 0,65: Obergrenze des 0,3-Intervalls: D[ne=6, w=9]=71
19	S6,19 = Dist3 + Do4 + Dp5 + Dp6	0,015625000	70	0,625
20	S6,20 = Dist3 + Do4 + Dp5 + Dh6	0,031250000	69	0,609375
21	S6,21 = Dist3 + Do4 + Dp5 + Do6	0,015625000	68	0,578125 P <= 0,6: Obergrenze des 0,2-Intervalls: D[ne=6, w=21]=68
13	S6,13 = Dist3 + Dh4 + Dh5 + Dp6	0,062500000	65	0,5625
14	S6,14 = Dist3 + Dh4 + Dh5 + Dh6	0,125000000	64	0,5 P <= 0,55: Obergrenze des 0,1-Intervalls: D[ne=6, w=14]=64
15	S6,15 = Dist3 + Dh4 + Dh5 + Do6	0,062500000	63	0,375 P <= 0,45: Untergrenze des 0,1-Intervalls: D[ne=6, w=15]=63
16	S6,16 = Dist3 + Dh4 + Do5 + Dp6	0,031250000	63	0,3125 P <= 0,35: Untergrenze des 0,3-Intervalls: D[ne=6, w=16]=63
17	S6,17 = Dist3 + Dh4 + Do5 + Dh6	0,062500000	62	0,281250000 P <= 0,3: Untergrenze des 0,4-Intervalls: D[ne=6, w=17]=62
18	S6,18 = Dist3 + Dh4 + Do5 + Do6	0,031250000	61	0,21875 P <= 0,25: Untergrenze des 0,5-Intervalls: D[ne=6, w=18]=61
22	S6,22 = Dist3 + Do4 + Dh5 + Dp6	0,031250000	60	0,1875 P <= 0,2: Untergrenze des 0,6-Intervalls: D[ne=6, w=22]=60
23	S6,23 = Dist3 + Do4 + Dh5 + Dh6	0,062500000	59	0,15625
24	S6,24 = Dist3 + Do4 + Dh5 + Do6	0,031250000	58	0,09375 P <= 0,15: Untergrenze des 0,7-Intervalls: D[ne=6, w=24]=58
25	S6,25 = Dist3 + Do4 + Do5 + Dp6	0,015625000	58	0,062500000
26	S6,26 = Dist3 + Do4 + Do5 + Dh6	0,031250000	57	0,046875 P <= 0,05: Untergrenze des 0,9-Intervalls: D[ne=6, w=26]=57
27	S6,27 = Dist3 + Do4 + Do5 + Do6	0,015625000	56	0,015625 P <= 0,015: Untergrenze des 0,97-Intervalls: D[ne=6, w=27]=56

Als Time to complete at Risk (TCaR) für das Konfidenzniveau  $1 - \alpha = 90\%$  kann man aus dem Beispiel der Monte Carlo Analyse die Obergrenze des 0,9-Intervalls mit der Projektdauer von 75 Arbeitstagen herauslesen.

$$TCaR(1 - \alpha) = TCaR(90\%) = 75 \text{ Arbeitstage}$$

Die Time to Complete at Risk für das Konfidenzniveau von  $1 - \alpha = 97\%$  ist nach der Monte Carlo Analyse im Prognosetool mit 84 Arbeitstagen bereits näher am Maximum von 85.

### 4.3. Risikomaß der Kostenerwartung (Estimate Cost at Completion at Risk)

Das Risikomaß Estimated Cost at Completion at Risk kann an der Obergrenze des Konfidenzintervalls mit dem Niveau  $1 - \alpha$  an der Stelle der kumulierten Wahrscheinlichkeit  $P^{kum} = 1 - \frac{\alpha}{2}$  der Verteilung der Kostenerwartung abgelesen werden.

$$EACaR(1 - \alpha) = EACaR\left(P^{kum} = 1 - \frac{\alpha}{2}\right)$$

Für den beobachtbaren Risikofaktor „Projektkosten“, der im Prognosemodell modelliert wurde, können die Risikomaße aus der Monte Carlo Analyse für das Beispielprojekt abgelesen werden.

Tabelle 35: Monte Carlo Analyse für Projektkosten (Prognose Phase 4 bis 6)

Monte Carlo Analyse der Kosten						
Pfad	Zustandsfolge	P(D~)	D	K	PKUM(D~)	
1	S6,1 = Dist3 + Dp4 + Dp5 + Dp6	0,015625000	85	290240	1,000000	P <= 1: Obergrenze des 1-Intervalls
2	S6,2 = Dist3 + Dp4 + Dp5 + Dh6	0,031250000	84	289840	0,984375	P <= 0,985: Obergrenze des 0,97-Intervalls
3	S6,3 = Dist3 + Dp4 + Dp5 + Do6	0,015625000	83	289440	0,953125	
10	S6,10 = Dist3 + Dh4 + Dp5 + Dp6	0,031250000	75	271680	0,906250	P <= 0,95: Obergrenze des 0,9-Intervalls
11	S6,11 = Dist3 + Dh4 + Dp5 + Dh6	0,062500000	74	271280	0,812500	P <= 0,9: Obergrenze des 0,8-Intervalls
12	S6,12 = Dist3 + Dh4 + Dp5 + Do6	0,031250000	73	270880	0,703125	P <= 0,85: Obergrenze des 0,7-Intervalls
19	S6,19 = Dist3 + Do4 + Dp5 + Dp6	0,015625000	70	262400	0,625000	
20	S6,20 = Dist3 + Do4 + Dp5 + Dh6	0,031250000	69	262000	0,609375	
21	S6,21 = Dist3 + Do4 + Dp5 + Do6	0,015625000	68	261600	0,578125	
4	S6,4 = Dist3 + Dp4 + Dh5 + Dp6	0,031250000	75	248240	0,937500	
5	S6,5 = Dist3 + Dp4 + Dh5 + Dh6	0,062500000	74	247840	0,875000	
6	S6,6 = Dist3 + Dp4 + Dh5 + Do6	0,031250000	73	247440	0,750000	P <= 0,75: Obergrenze des 0,5-Intervalls
7	S6,7 = Dist3 + Dp4 + Do5 + Dp6	0,015625000	73	239840	0,718750	
8	S6,8 = Dist3 + Dp4 + Do5 + Dh6	0,031250000	72	239440	0,671875	P <= 0,7: Obergrenze des 0,4-Intervalls
9	S6,9 = Dist3 + Dp4 + Do5 + Do6	0,015625000	71	239040	0,640625	P <= 0,65: Obergrenze des 0,3-Intervalls
13	S6,13 = Dist3 + Dh4 + Dh5 + Dp6	0,062500000	65	229680	0,562500	P <= 0,6: Obergrenze des 0,2-Intervalls
14	S6,14 = Dist3 + Dh4 + Dh5 + Dh6	0,125000000	64	229280	0,500000	P <= 0,55: Obergrenze des 0,1-Intervalls
15	S6,15 = Dist3 + Dh4 + Dh5 + Do6	0,062500000	63	228880	0,375000	P <= 0,45: Untergrenze des 0,1-Intervalls
16	S6,16 = Dist3 + Dh4 + Do5 + Dp6	0,031250000	63	221280	0,312500	P <= 0,35: Untergrenze des 0,3-Intervalls
17	S6,17 = Dist3 + Dh4 + Do5 + Dh6	0,062500000	62	220880	0,281250	P <= 0,3: Untergrenze des 0,4-Intervalls
18	S6,18 = Dist3 + Dh4 + Do5 + Do6	0,031250000	61	220480	0,218750	P <= 0,25: Untergrenze des 0,5-Intervalls
22	S6,22 = Dist3 + Do4 + Dh5 + Dp6	0,031250000	60	220400	0,187500	P <= 0,2: Untergrenze des 0,6-Intervalls
23	S6,23 = Dist3 + Do4 + Dh5 + Dh6	0,062500000	59	220000	0,156250	
24	S6,24 = Dist3 + Do4 + Dh5 + Do6	0,031250000	58	219600	0,093750	P <= 0,15: Untergrenze des 0,7-Intervalls
25	S6,25 = Dist3 + Do4 + Do5 + Dp6	0,015625000	58	212000	0,062500	
26	S6,26 = Dist3 + Do4 + Do5 + Dh6	0,031250000	57	211600	0,046875	P <= 0,05: Untergrenze des 0,9-Intervalls
27	S6,27 = Dist3 + Do4 + Do5 + Do6	0,015625000	56	211200	0,015625	

Als Estimated Cost at Completion at Risk (EACaR) für das Konfidenzniveau  $1 - \alpha = 90\%$  kann man aus dem Beispiel der Monte Carlo Analyse der Projektkosten die Obergrenze des 0,9-Intervalls mit Projektdauer von 271.280 Geldeinheiten herauslesen.

$$EACaR(90\%) = 271.280 \text{ Geldeinheiten}$$

Die  $EACaR(97\%)$  ist nach der Monte Carlo Analyse für die Projektkosten mit 289.840 Geldeinheiten bereits näher am Maximum von 290.240 Geldeinheiten.

#### 4.4. Nutzung der Risikomaße EACaR und TCaR in der Earned Value Analysis

Im Projektcontrolling mit Earned Value Analysis können die zuvor eingeführten Risikomaße  $EACaR(\alpha)$  und  $TCaR(\alpha)$  gemeinsam genutzt werden um Prognose unter Wahrscheinlichkeit auszudrücken und grafisch sichtbar machen zu können.

Zur Veranschaulichung wurde zum Beispielprojekt noch einmal eine neue Prognose berechnet. Über sechs Stufen berechnet liefert das Prognosetool einen stochastischen Prozess für die Projektdauer mit 486 Pfaden. Damit erhält man viele Prognosewerte für die Projektkosten und Pfaddauern mit zugehörigen



Pfadwahrscheinlichkeiten zur grafischen Darstellung der Risikomaße  $EACaR(\alpha)$  und  $TCaR(\alpha)$  als Wertepaare.

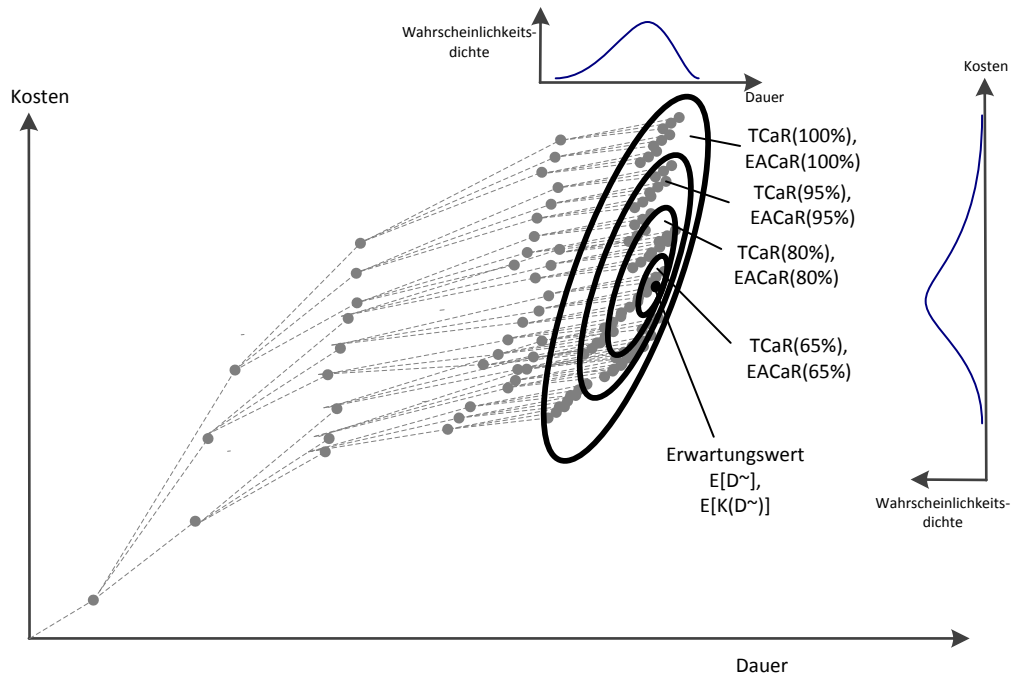


Abbildung 34: Bereiche der Risikomaße  $EACaR(\alpha)$  und  $TCaR(\alpha)$  für probabilistischen Pfade in der Kosten-Dauer-Ebene (qualitative Skizze)

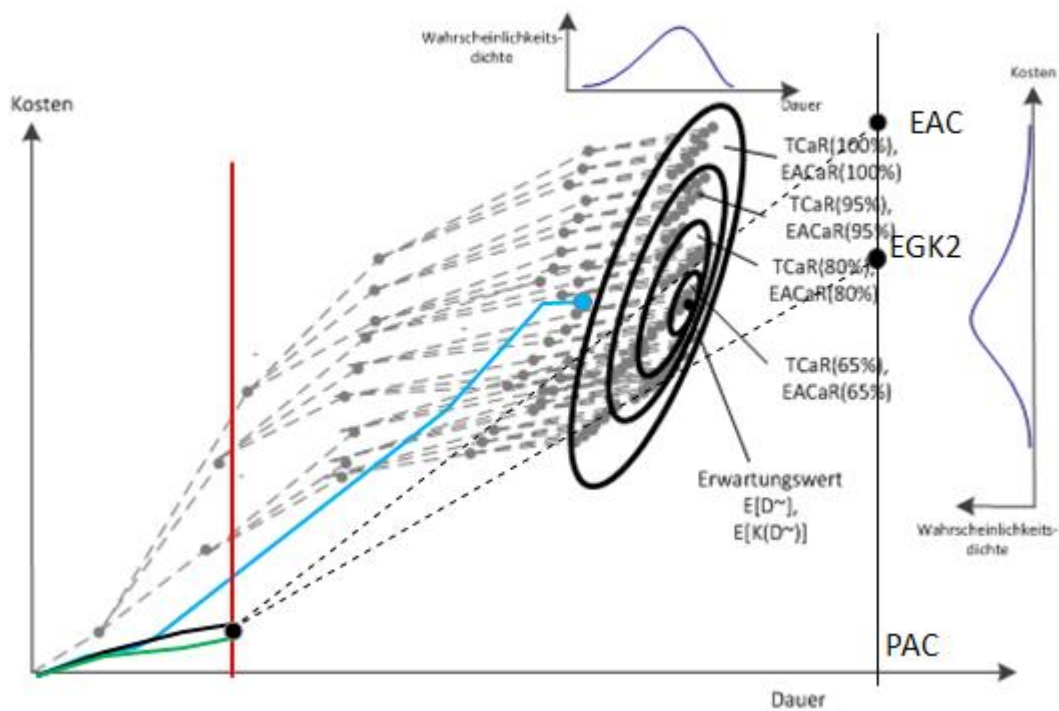


Abbildung 35: Earned Value Analysis, probabilistische Prognose und Risikomaße

## 5. Modellverfeinerungen – Ein Ausblick

### 5.1. Integration kritischer Netzplan-Pfade

Bisher wurden Dauer und Kosten des Projekts für am kritischen Weg rein sequentiell hintereinander laufende Vorgänge betrachtet. Die Unsicherheit der pessimistischen, realistischen und optimistischen Schätzwerte wurde dabei als Entscheidungsbaum für die sequentiellen Vorgänge berücksichtigt.

In der realen Projektwelt werden zuerst Phasen strukturiert (Startphase, Ausführungs-, Koordinations- und Änderungsphasen, Abschlussphase). Um die Phasen detaillierter und feiner zu strukturieren, geht die Betrachtung mit dem Projektstrukturplan von Phasen zu Arbeitspaketen über. Die Arbeitspakete selbst können wieder in Arbeitsschritte unterteilt werden, die ebenfalls bestimmten Prozessen folgen. In jeder Betrachtungsebene kann man die Vorgänge unterschiedlich anordnen. In der obersten Ebene laufen die Phasen hintereinander ab, es wird daher ein rein sequentieller Ablauf unterstellt, da jede Phase höchstens eine Nachfolgerphase besitzt. In der nächsten Ebene reicht die sequentielle Betrachtung nicht mehr aus, denn die Arbeitspakete können jeweils mehrere Vorgänger oder Nachfolger haben. Diese Ablauflogik kann mit einem Vorgangsknoten-Netzplan sehr übersichtlich dargestellt werden.

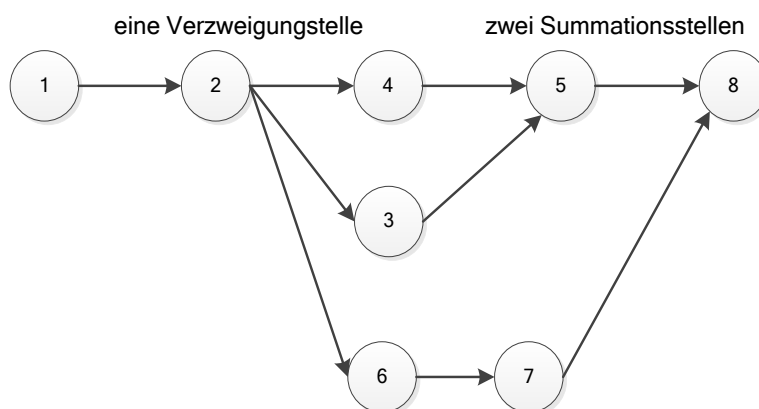


Abbildung 36: Vorgangsknoten-Netzplan

Der Netzplan hat eine Verzweigungsstelle wenn es mehr als einen Nachfolger zu einem Vorgang gibt und zwei Summationsstellen bei einem Vorgang mit mehr als einem Vorgänger.

Will man diesen Netzplan in den Entscheidungsbaum des probabilistischen Prognosemodells integrieren, dann bemerkt man dass die Verzweigungsstellen grafisch gut modelliert werden können. Durch die Verzweigungen entstehen neue mögliche Pfade, wie im Entscheidungsbaum erhöht sich die Pfadanzahl an jedem Knoten durch Multiplikation der Möglichkeiten. Eine Verzweigung mit zwei Nachfolgern beispielsweise verdoppelt die Pfadanzahl. Folgende Abbildung zeigt grafisch die Integration der Verzweigungsstellen des Netzplans im Entscheidungsbaum.

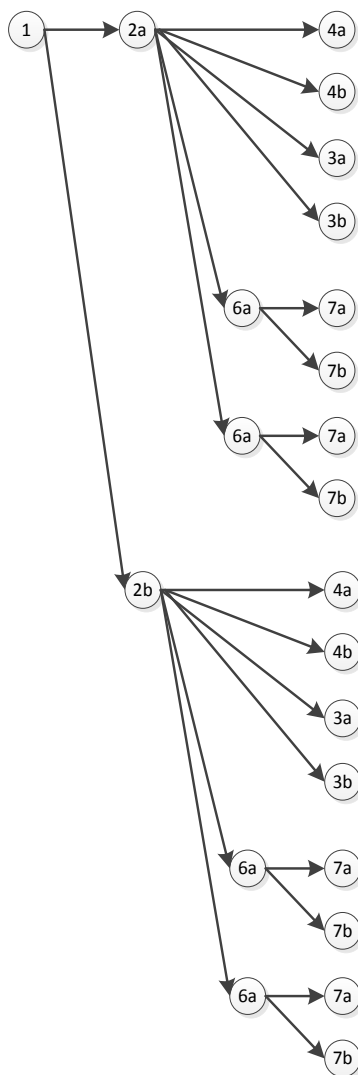


Abbildung 37: Netzplanintegration im Entscheidungsbaums durch Verzweigungsstellen

Der Entscheidungsbaum hat für die Vorgänge 2 bis 7 jeweils zwei mögliche Zustände a und b, die Vorgänge 1 und 8 haben nur einen möglichen Zustand.

Bei Summationsstellen müssen die eingehenden Pfade zusammengeführt werden, dabei steigt die Pfadanzahl aufgrund der neuen Kombination. Die Pfadanzahl erhöht sich an jeder Summationsstelle. Wenn zwei Vorgänger an einer Summationsstelle zusammentreffen, dann berechnet sich die neu entstehende Pfadanzahl durch multiplizieren der Pfadanzahlen der beiden Vorgänger. Folgende Abbildung zeigt grafisch die Integration der Verzweigungsstellen und der n des Netzplans im Entscheidungsbaum.

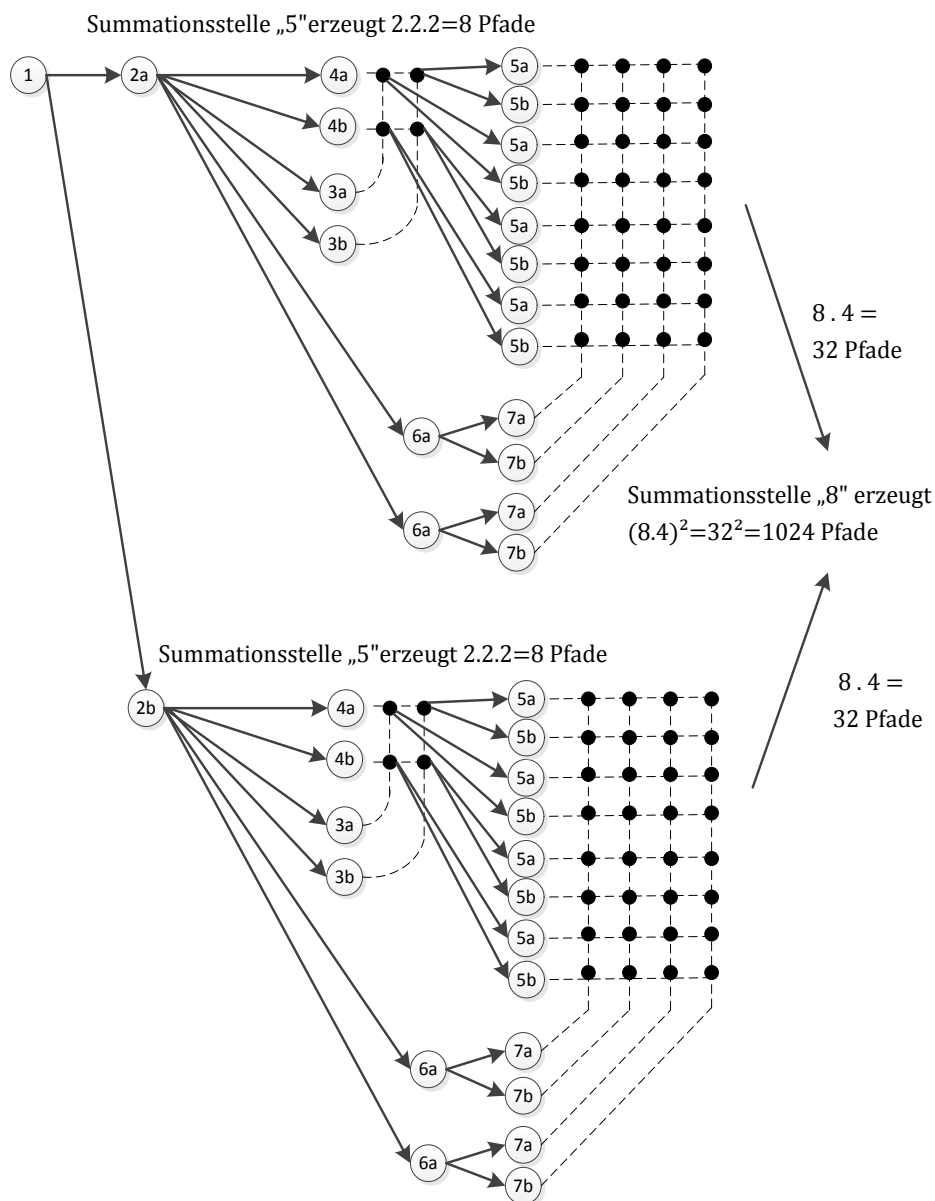


Abbildung 38: Netzplanintegration im Entscheidungsbaums durch Summationsstellen

Das ergibt in der grafischen Darstellung bereits das Problem dass nicht mehr alles gezeichnet werden kann. Sobald drei Vorgänger mit jeweils mehreren Möglichkeiten in einer Summationsstelle zusammentreffen, wird die Summationsstelle dreidimensional.

Eine mögliche Lösung des Problems ist die vereinfachende Reduzierung des Netzplans auf den kritischen Pfad mit der im Kapitel eins erklärten kritischen Pfad Methode.

Ein Vorschlag zur Auswahl relevanter Vorgänge für das Baummodell wären folgende Schritte.

1. Falls nicht vorhanden, einen (Vorgangsknoten)-Netzplan erstellen.
2. Zuordnung der realistischen und pessimistischen Schätzungen für Vorgangsdauern und Wahrscheinlichkeiten als Zustände.
3. Die Netzplan-Pfade als kritischen Weg für die realistischen Vorgangsdauern berechnen. Durch diese Vereinfachung entfällt hoher Rechenaufwand welcher durch Kombination von Zuständen und die Bestimmung aller Pfade. Aufgrund dieser hohen Anzahl an Pfaden wäre keine übersichtliche Baum-Darstellung für die Steuerung möglich.
4. Der so entstehende Entscheidungsbaum kann nun für stochastische Terminprognosen eingesetzt werden.

Die dabei definierten Zustände welche am kritischen Weg im Netzplan liegen, sind somit auch im Entscheidungsbaum vorhanden. Durch die Vereinfachung wird nur der kritische Weg der wahrscheinlichsten Vorgangsdauern als Netzplan-Pfad betrachtet. Für die Vorgänge auf diesem Netzplan-Pfad werden aber alle denkbaren Risiken als Zustände modelliert.

Tabelle 36: kritischer Netzplan-Pfad

kritischer Netzplan Pfad (ohne unkritische Knoten)		Start	1	2	4	5	8
Dauer pessimistisch	Dpessim		5	10	25	18	18
Dauer realistisch	Drealist		3	6	15	10	10
(Zeiteinheit beliebig)							
Wahrscheinlichkeit pessimistisch	Ppessim		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Wahrscheinlichkeit realistisch	Prealist		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

Der stochastische Prozess der Dauer am kritischen Netzplan-Pfad kann grafisch wieder als Entscheidungsbaum dargestellt werden. Bei der vereinfachend angenommenen Reduzierung wurde der kritische Pfad aus den realistischen Schätzwerten gewählt. Damit wurde die Netzplanlogik der Arbeitspakete so in den Entscheidungsbaum integriert, dass unkritische und damit überflüssige Pfade ausgeschlossen werden können.

Tabelle 37: Entscheidungsbaum der stoch. Dauer am kritischen Netzplan-Pfad

kritischer Netzplan Pfad (ohne unkritische Knoten)												
Dauer pessimistisch	Dpessim		5	10	25	18	18					
Dauer realistisch	Drealist		3	6	15	10	10					
(Zeiteinheit beliebig)												
Wahrscheinlichkeit pessimistisch	Ppessim		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3					
Wahrscheinlichkeit realistisch	Prealist		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7					
Entscheidungsbaum für stochastischen Prozess $X(d^*)$												
Pfad w	P(t=0,w)	D=0	P(t=1,w)	D(t=1,w)	P(t=2,w)	D(t=2,w)	P(t=4,w)	D(t=4,w)	P(t=5,w)	D(t=5,w)	P(t=8,w)	D(t=8,w)
1											0,00243	76
2											0,00567	68
3											0,00567	68
4											0,01323	60
5					0,09	15	0,027	40	0,0081	58	0,00243	76
6							0,063	30	0,0189	50	0,00567	68
7									0,0189	48	0,01323	58
8									0,0441	40	0,01323	58
9			0,3	5					0,03087	50	0,03087	50
10									0,0189	54	0,00567	72
11					0,21	11	0,063	36	0,01323	64	0,01323	64
12									0,0441	46	0,01323	64
13									0,0441	44	0,03087	54
14									0,1029	36	0,03087	54
15									0,03087	54	0,03087	54
16	1	0							0,07203	46	0,07203	46
17									0,00567	74	0,00567	74
18									0,0189	56	0,01323	66
19									0,01323	66	0,01323	66
20									0,0441	48	0,03087	58
21					0,21	13	0,063	38	0,0189	56	0,01323	66
22									0,0441	48	0,01323	66
23									0,03087	58	0,03087	58
24									0,0441	46	0,01323	64
25									0,1029	38	0,03087	56
26			0,7	3					0,03087	56	0,03087	56
27									0,07203	48	0,07203	48
28									0,01323	70	0,01323	70
29									0,03087	62	0,03087	62
30									0,03087	62	0,03087	62
31									0,07203	54	0,07203	54
32					0,49	9	0,147	34	0,1029	44	0,03087	60
									0,03087	60	0,03087	60
									0,07203	52	0,07203	52
									0,07203	52	0,07203	52
									0,2401	34	0,16807	44

## 5.2. Integration von Abbruchrisiko im Prognosemodell

Eine Modellierung von Abbruchrisiko im Entscheidungsbaum kann man anhand der Übergangsmatrix beschreiben. Unter der Annahme, dass die Zustände unabhängig von ihrem Vorgänger sind. Die Wahrscheinlichkeiten für optimistische, realistische und pessimistische Erwartung sind für alle Stufen  $t$  mit 0.25, 0.50 und 0.25 angenommen. Dann ist die Übergangsmatrix für jede Stufe  $t$  gleich, weil die Verzweigungen gleich aufgebaut sind.

$$\begin{aligned} (P[s_{n,k}|s_{n-1,k}])_n &= \begin{pmatrix} P[s_{n,k=1}|s_{n-1,k=1}] & P[s_{n,k=2}|s_{n-1,k=1}] & P[s_{n,k=3}|s_{n-1,k=1}] \\ P[s_{n,k=1}|s_{n-1,k=2}] & P[s_{n,k=2}|s_{n-1,k=2}] & P[s_{n,k=3}|s_{n-1,k=2}] \\ P[s_{n,k=1}|s_{n-1,k=3}] & P[s_{n,k=2}|s_{n-1,k=3}] & P[s_{n,k=3}|s_{n-1,k=3}] \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Die Summe der Migrationswahrscheinlichkeiten in einer Zeile muss immer dann gleich 1 sein. Unterschiedliche Matrizen können sich ergeben wenn unterschiedlich viele Zustände in den Stufen  $n$  existieren. Dies kann bei unterschiedlich vielen Schätzwerten der Fall sein. Eine weitere Besonderheit ergibt sich mit den Art der Zustände. Bisher wurden nur Zustände berücksichtigt welche Ereignisse bezüglich der Fertigstellungsdauer zum Ausdruck bringen.

Würde man zum Beispiel ein Ereignis „Projektabbruch“ als Entscheidungsmöglichkeit definieren, hätte diese Art von Zustand eine absorbierende Auswirkung im Entscheidungsbaum. Der Abbruch des Projektes wäre nicht auf eine einzige Stufe beschränkt, sondern würde alle weiteren Stufen im Entscheidungsbaum des Projektes betreffen. Wenn das Ereignis „Projektabbruch“ eintritt, dann befindet sich das Projekt in diesem bleibenden(absorbierenden)Zustand. Der Absorbierende Zustand nach dem Abbruch-Ereigniss hat eine Wahrscheinlichkeit von 1, da formal nur noch dieser Zustand möglich ist.

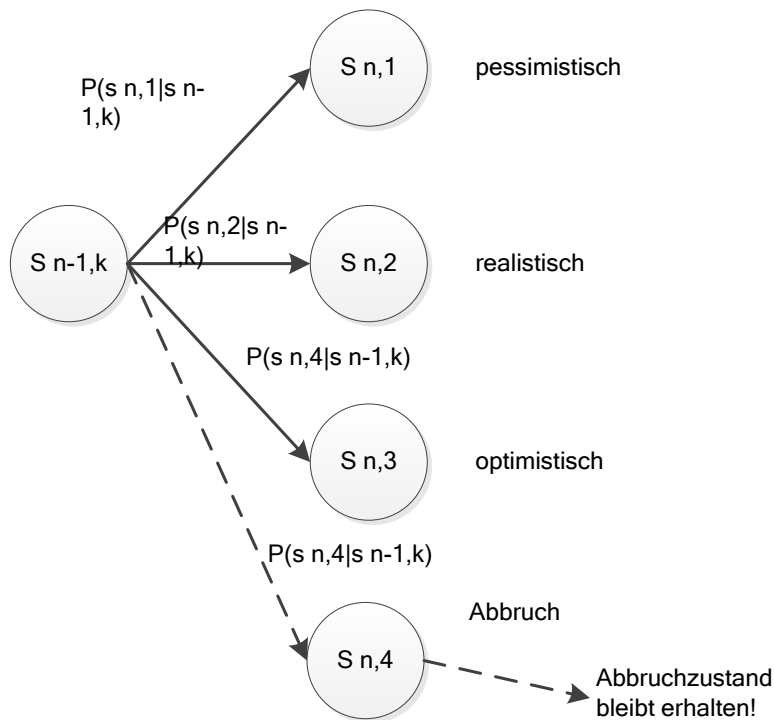


Abbildung 39: Entscheidungsbaum mit Abbruch-Möglichkeit

Die Übergangsmatrix in einem Entscheidungsbaum mit je drei Zuständen ( $k=1,2,3$ ) für die Dauer und einem Abbruch-Zustand ( $k=4$ ) in jeder Stufe hätte folgendes formales Aussehen.

$$\begin{pmatrix} P[S_{n,k=1}|S_{n-1,k=1}] & P[S_{n,k=2}|S_{n-1,k=1}] & P[S_{n,k=3}|S_{n-1,k=1}] & P[S_{n,k=4}|S_{n-1,k=1}] \\ P[S_{n,k=1}|S_{n-1,k=2}] & P[S_{n,k=2}|S_{n-1,k=2}] & P[S_{n,k=3}|S_{n-1,k=2}] & P[S_{n,k=4}|S_{n-1,k=2}] \\ P[S_{n,k=1}|S_{n-1,k=3}] & P[S_{n,k=2}|S_{n-1,k=3}] & P[S_{n,k=3}|S_{n-1,k=3}] & P[S_{n,k=4}|S_{n-1,k=3}] \\ P[S_{n,k=1}|S_{t-1,k=4}] & P[S_{n,k=2}|S_{n-1,k=4}] & P[S_{n,k=3}|S_{n-1,k=4}] & P[S_{n,k=4}|S_{n-1,k=4}] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Das Projektabbruchereignis wird hier als Beispiel zur Übergangsmatrix angegeben, im Modellansatz vorerst aber nicht einbezogen. In den späteren Ausführungen zur Modellanwendung(Anhang) wird der Abbruch allerdings als zusätzlicher Risikofaktor in den Berechnungen berücksichtigt.



### 5.3. Integration von Rücksprung-Schleifen

Ein weiteres Beispiel eines Zustands mit besonderem Charakter wäre möglicher Rücksprung zum Anfang einer Phase um zum Beispiel die Bearbeitung von neuem zu beginnen.

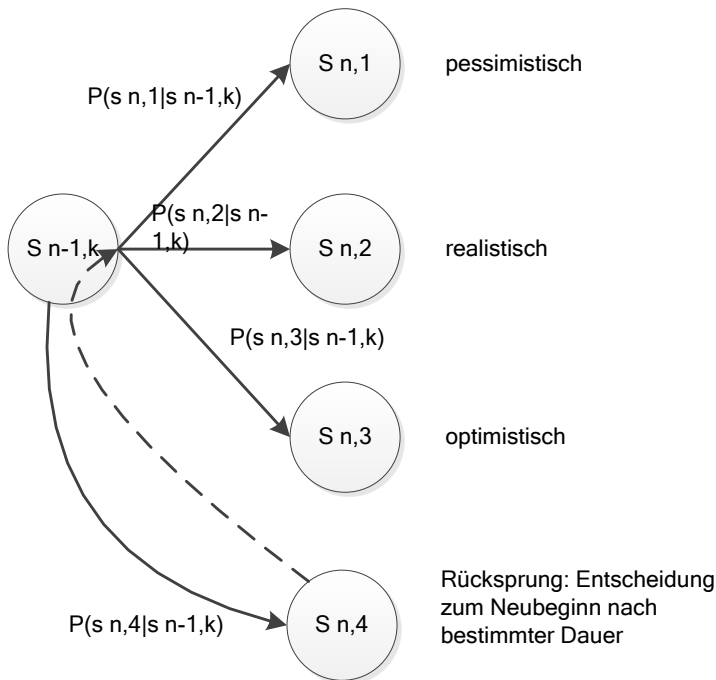


Abbildung 40: Entscheidungsbaum mit Rücksprung-Möglichkeit

Die Dauer nach der so ein Rücksprung eintreten würde, wäre unabhängig von den Schätzwerten, da es sich um eine übergeordnete Entscheidung aus dem Projektteam handeln würde. Durch einen Rücksprung entstehen im Entscheidungsbaum für Stufe  $n$  wieder alle erwarteten Möglichkeiten, wobei jetzt aber die bereits vergangene Dauer addiert werden muss.

Im diesen Beispiel ist der Entscheidungsbaum so modelliert dass nur einmal ein Rücksprung möglich ist. In die Übergangswahrscheinlichkeit von Rücksprung zu einem nochmaligen Rücksprung in derselben Phase ist daher Null.

$$\begin{pmatrix} 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0 \end{pmatrix}$$

Damit hat der Rücksprung nicht nur auf Wahrscheinlichkeiten eine Auswirkung, sondern erzeugt auch eine neue Terminalsituation welche nicht nur mit optimistischer, realistischer oder pessimistischer Schätzannahme zusammenhängt. Dieser Rücksprungzustand ist hier nur als Beispiel zur Übergangsmatrix angeführt und wird in der weiteren Arbeit nicht mehr verwendet. Anstatt eines „pauschalen“ Verzögerungsereignisses wie dem Rücksprung würden allerdings Einzelrisiken auf andere Weise in das Modell einbezogen.

#### 5.4. Integration von Einzelrisiken (Prognosetool)

In jeder Stufe (Projektphase oder einzelne Arbeitspakete) werden Dauern und identifizierte Risiken für genau diese Stufe individuell modelliert. Die Phasendauern können direkt geschätzt werden (Schätzverfahren) oder über detaillierte Schätzwerte mit traditioneller Projekt-Terminplanung ermittelt werden. Das Planungsverfahren muss aber mehrmals durchlaufen werden um die Mehrpunktschätzung zu erhalten. Die drei Schätzwerte optimistisch, realistisch (häufig) und pessimistisch bilden die erste Entscheidungsstufe (abhängige Risiken). Die bewerteten Einzelrisiken zur Projektphase werden als unabhängige Einzelrisiken als zusätzliche Stufen ausgeführt.

Der Entscheidungsbaum für die Zeit-Schätzungen und zwei voneinander unabhängigen Risiken A und B hat dann drei Stufen.

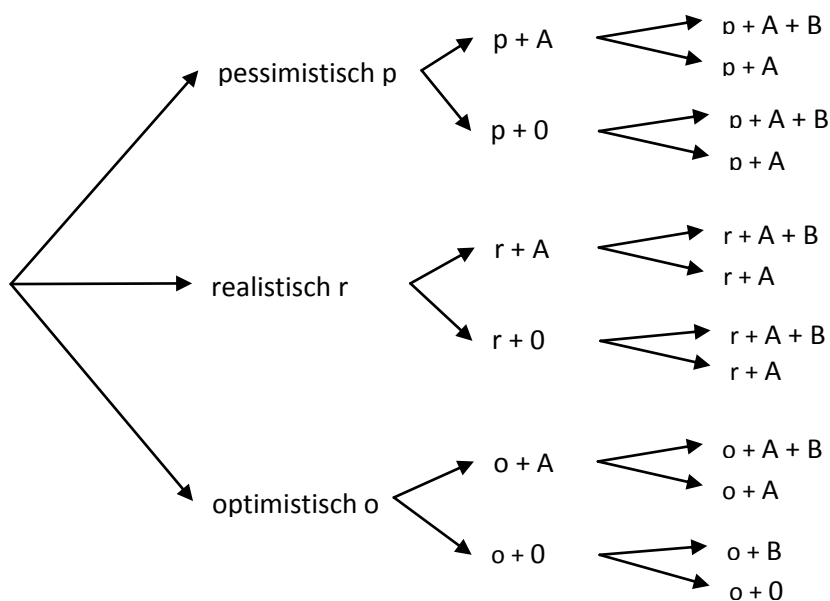


Abbildung 41: Subpfadmodell mit Dreipunktschätzungen und Einzelrisiken in einer Projektphase

In den Knoten des Entscheidungsbaums stehen die Zustände für die möglichen Schätz-Dauern mit der zeitlichen Auswirkung der Risikofaktoren A und B.

Die Anzahl der Pfade ergibt sich durch die Anzahl der Endknoten.

$3 \text{ Schätzwerte} * (2 \text{ Möglichkeiten})^2 \text{ Risiken} = 12 \text{ Pfade}$

Wenn mehrere Projektphasen mit Einzelrisiken als Entscheidungsbaum modelliert werden, entstehen schnell viele mögliche Pfade. Bei Berechnung von beispielsweise 4 Projektphasen mit Einzelrisiken zu einem stochastischen Prozess, würden  $12^4 = 20736$  Pfade entstehen. Jeder Pfad ist trotzdem nachvollziehbar und kann in weiteren Management-Aktivitäten als mögliche Realisation der Projektdauer und deren ursächlichen Ereignissen betrachtet werden. Solche Betrachtungen sind beispielsweise bei Simulationen welche Zufallszahlen verwenden nicht möglich. Für die Integration von Einzelrisiken in das probabilistische Prognosemodell wurde ein Zahlenbeispiel zur Veranschaulichung ausgearbeitet.

**Zahlenbeispiel Produktentwicklungs-Projekt:** Es handelt sich um ein exemplarisches Produktentwicklungs-Projekt das nach einem im Unternehmen standardisierten Produktentstehungsprozess abläuft. Folgende Abbildung zeigt als Input-Daten die Phasenbezeichnungen der Projektstruktur sowie die optimistische, realistische und pessimistische Dauer mit Wahrscheinlichkeiten je Phase.



Die Integration von Einzelrisiken in das probabilistische Prognosemodell beginnt mit der Risikoliste, die identifizierte und bewertete Risiken für jede Phase mit Auswirkung auf die Phasendauer und die Erhöhung der Kosten enthält.

Tabelle 40: Risikoliste (Prognosetool) für das Produktentwicklungs-Projekt

INPUT für die Berechnung der Prognose										
Risikoliste										zurück
Identifikation und Bewertung der unabhängigen Einzelrisiken je Phase										Bewertung
R-Nr	n	Projekt-Phase	Risiko-Beschreibung	Risikoklasse	Eintrittswkt	Termin-Auswirkung	Kosten-auswirkung	Technologie-kosten	Personalkosten	Materialkosten
R01	1	KF	Experten nicht sofort verfügbar	personelles	0,1	+20	+0			
R02	3	VF	Material-Lieferung für Prototyp verspätet sich	Beschaffungs	0,4	+5	-5000			-5000
R03	3	VF	technische Probleme bei Inbetriebnahme des Serien-Vorläufers	technisches	0,2	+2	+2500		+2000	+500
R04	3	VF	Kunde fordert zusätzliche Funktionseigenschaften (Konstruktion erforderlich)	technisches	0,2	+30	+5000		+5000	
R05	4	DS	neue Versuchsläufe erforderlich	technisches	0,1	+10	+40000	+5000	+10000	+25000
R06	4	DS	Konstruktions-Änderungen für Serien-Fahrzeug erforderlich	technisches	0,5	+3	+15000		+10000	+5000
R07	5	SF	Inbetriebnahme neuer Produktions-Ausrüstung verzögert sich	technisches	0,3	+3	+10000	+5000	+5000	
R08	6	MF	erste Feldschäden	technisches	0,3	+15	+200000		+100000	+100000

Die Unsicherheit aus der Dreipunktschätzung (pessimistisch, realistisch, optimistisch) und die Einzelrisiken wurden für jede Projektphase als Subpfadmodell wie in der nächsten Abbildung modelliert.

Tabelle 41: individuelle Subpfadwerte je Projektphase (Prognosetool)

Subpfadwerte in der Projektphase 3 - VF Vorläufer Freigabe																						
Subpfad	D	Pfadbeschreibung	p	d	P	D	Pfadbeschreibung	p	d	P	D	Pfadbeschreibung	p	d	P	D	K					
1	0	s3.1, 1=Dh3	1	15	1	15	s3.2, 1=Dh3+R02	0,40	5	0,40	20	s3.3, 1=Dh3+R02+R03	0,20	2	0,08	22	s3.4, 1=Dh3+R02+R03+R04	0,20	30	0,016	52	53740
2	0	s3.1, 2=Dh3	1	15	1	15	s3.2, 2=Dh3+R02	0,40	5	0,40	20	s3.3, 2=Dh3+R02+R03	0,20	2	0,08	22	s3.4, 2=Dh3+R02+R03+	0,80	0	0,064	22	48740
3	0	s3.1, 3=Dh3	1	15	1	15	s3.2, 3=Dh3+R02	0,40	5	0,40	20	s3.3, 3=Dh3+R02+	0,80	0	0,32	20	s3.4, 3=Dh3+R02++R04	0,20	30	0,064	50	51240
4	0	s3.1, 4=Dh3	1	15	1	15	s3.2, 4=Dh3+R02	0,40	5	0,40	20	s3.3, 4=Dh3+R02+	0,80	0	0,32	20	s3.4, 4=Dh3+R02++	0,80	0	0,256	20	46240
5	0	s3.1, 5=Dh3	1	15	1	15	s3.2, 5=Dh3+	0,60	0	0,60	15	s3.3, 5=Dh3++R03	0,20	2	0,12	17	s3.4, 5=Dh3++R03+R04	0,20	30	0,024	47	58740
6	0	s3.1, 6=Dh3	1	15	1	15	s3.2, 6=Dh3+	0,60	0	0,60	15	s3.3, 6=Dh3++R03	0,20	2	0,12	17	s3.4, 6=Dh3++R03+	0,80	0	0,096	17	53740
7	0	s3.1, 7=Dh3	1	15	1	15	s3.2, 7=Dh3+	0,60	0	0,60	15	s3.3, 7=Dh3++	0,80	0	0,48	15	s3.4, 7=Dh3+++R04	0,20	30	0,096	45	56240
8	0	s3.1, 8=Dh3	1	15	1	15	s3.2, 8=Dh3+	0,60	0	0,60	15	s3.3, 8=Dh3++	0,80	0	0,48	15	s3.4, 8=Dh3+++	0,80	0	0,384	15	51240

Subpfadwerte in der Projektphase 4 - DS Dokumentation Serie																	
Subpfad	D	Pfadbeschreibung	p	d	P	D	Pfadbeschreibung	p	d	P	D	Pfadbeschreibung	p	d	P	D	K
1	0	s4.1, 1=Dh4	1	15	1	15	s4.2, 1=Dh4+R05	0,10	10	0,10	25	s4.3, 1=Dh4+R05+R06	0,50	3	0,05	28	279700
2	0	s4.1, 2=Dh4	1	15	1	15	s4.2, 2=Dh4+R05	0,10	10	0,10	25	s4.3, 2=Dh4+R05+	0,50	0	0,05	25	264700
3	0	s4.1, 3=Dh4	1	15	1	15	s4.2, 3=Dh4+	0,90	0	0,90	15	s4.3, 3=Dh4++R06	0,50	3	0,45	18	239700
4	0	s4.1, 4=Dh4	1	15	1	15	s4.2, 4=Dh4+	0,90	0	0,90	15	s4.3, 4=Dh4++	0,50	0	0,45	15	224700

Subpfadwerte in der Projektphase 5 - SF Serienvorbereitung Freigabe															
Subpfad	D	Pfadbeschreibung	p	d	P	D	Pfadbeschreibung	p	d	P	D	K			
1	0	s5.1, 1=Dh5	1	10	1	10	s5.2, 1=Dh5+R07	0,30	3	0,30	13	85800			
2	0	s5.1, 2=Dh5	1	10	1	10	s5.2, 2=Dh5+	0,70	0	0,70	10	75800			

Subpfadwerte in der Projektphase 6 - MF Markt Freigabe															
Subpfad	D	Pfadbeschreibung	p	d	P	D	Pfadbeschreibung	p	d	P	D	K			
1	0	s6.1, 1=Dh6	1	15	1	15	s6.2, 1=Dh6+R08	0,30	15	0,30	30	401380			
2	0	s6.1, 2=Dh6	1	15	1	15	s6.2, 2=Dh6+	0,70	0	0,70	15	201380			

Die Subpfad-Realisationen der jeweils Knoten werden für die Prognose in einem stochastischen Prozess der Phasendauern für das ganze Projekt zusammengefaßt. Die folgende Abbildung zeigt Pfadbeschreibung der ersten 24 Pfade des stochastischen Prozesses mit 128 Pfaden.

Tabelle 42: Pfadbeschreibungen der stoch. Dauer (Prognosetool)

Ergebnisse des stochastischen Prozess X(d~)							
Pfad w	Pfadbeschreibung	Abbruch	s(n=2,w)	s(n=3,w)	s(n=4,w)	s(n=5,w)	s(n=6,w)
1	S6,1 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08		0	1	1	1	1
2	S6,2 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 +		0	1	1	1	2
3	S6,3 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + + Dh6 + R08		0	1	1	2	1
4	S6,4 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + + Dh6 +		0	1	1	2	2
5	S6,5 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + + Dh5 + R07 + Dh6 + R08		0	1	2	1	1
6	S6,6 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + + Dh5 + R07 + Dh6 +		0	1	2	1	2
7	S6,7 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + + Dh5 + + Dh6 + R08		0	1	2	2	1
8	S6,8 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + + Dh5 + + Dh6 +		0	1	2	2	2
9	S6,9 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08		0	1	3	1	1
10	S6,10 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 +		0	1	3	1	2
11	S6,11 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + + R06 + Dh5 + + Dh6 + R08		0	1	3	2	1
12	S6,12 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + + R06 + Dh5 + + Dh6 +		0	1	3	2	2
13	S6,13 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + + + Dh5 + R07 + Dh6 + R08		0	1	4	1	1
14	S6,14 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + + + Dh5 + R07 + Dh6 +		0	1	4	1	2
15	S6,15 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + + + Dh5 + + Dh6 + R08		0	1	4	2	1
16	S6,16 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + + + Dh5 + + Dh6 +		0	1	4	2	2
17	S6,17 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08		0	2	1	1	1
18	S6,18 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 +		0	2	1	1	2
19	S6,19 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + + Dh6 + R08		0	2	1	2	1
20	S6,20 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + + Dh6 +		0	2	1	2	2
21	S6,21 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + + Dh4 + R05 + + Dh5 + R07 + Dh6 + R08		0	2	2	1	1
22	S6,22 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + + Dh4 + R05 + + Dh5 + R07 + Dh6 +		0	2	2	1	2
23	S6,23 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + + Dh4 + R05 + + Dh5 + + Dh6 + R08		0	2	2	2	1
24	S6,24 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + + Dh4 + R05 + + Dh5 + + Dh6 +		0	2	2	2	2

Im ersten Pfad werden alle Einzelrisiken und die pessimistischen Dauer erwartet, damit liefert dieser Pfad 1 die maximal erwartete Dauer, die jedoch mit einer Pfadwahrscheinlichkeit von 0,000072 extrem unwahrscheinlich ist.

Tabelle 43: Pfadwahrscheinlichkeiten und stochastische Pfaddauern (Prognosetool)

Ergebnisse des stochastischen Prozess X(d~)													
Pfad w	P(n=3,w)	P(n=4,w)	P(n=5,w)	P(n=6,w)	D_ist(n=0 bis 2,w)	D(n=3,w)	D(n=4,w)	D(n=5,w)	D(n=6,w)	K(D(n=3,w))	K(D(n=4,w))	K(D(n=5,w))	K(D(n=6,w))
1	0,0160000	0,0008000	0,0002400	0,0000720	120	172	200	213	243	203740	483440	569240	970620
2	0,0160000	0,0008000	0,0002400	0,0001680	120	172	200	213	228	203740	483440	569240	770620
3	0,0160000	0,0008000	0,0005600	0,0001680	120	172	200	210	240	203740	483440	559240	960620
4	0,0160000	0,0008000	0,0005600	0,0003920	120	172	200	210	225	203740	483440	559240	760620
5	0,0160000	0,0008000	0,0002400	0,0000720	120	172	197	210	240	203740	468440	554240	955620
6	0,0160000	0,0008000	0,0002400	0,0001680	120	172	197	210	225	203740	468440	554240	755620
7	0,0160000	0,0008000	0,0005600	0,0001680	120	172	197	207	237	203740	468440	544240	945620
8	0,0160000	0,0008000	0,0005600	0,0003920	120	172	197	207	222	203740	468440	544240	745620
9	0,0160000	0,0072000	0,0021600	0,0006480	120	172	190	203	233	203740	443440	529240	930620
10	0,0160000	0,0072000	0,0021600	0,0015120	120	172	190	203	218	203740	443440	529240	730620
11	0,0160000	0,0072000	0,0050400	0,0015120	120	172	190	200	230	203740	443440	519240	920620
12	0,0160000	0,0072000	0,0050400	0,0035280	120	172	190	200	215	203740	443440	519240	720620
13	0,0160000	0,0072000	0,0021600	0,0006480	120	172	187	200	230	203740	428440	514240	915620
14	0,0160000	0,0072000	0,0021600	0,0015120	120	172	187	200	215	203740	428440	514240	715620
15	0,0160000	0,0072000	0,0050400	0,0015120	120	172	187	197	227	203740	428440	504240	905620
16	0,0160000	0,0072000	0,0050400	0,0035280	120	172	187	197	212	203740	428440	504240	705620
17	0,0640000	0,0032000	0,0009600	0,0002880	120	142	170	183	213	198740	478440	564240	965620
18	0,0640000	0,0032000	0,0009600	0,0006720	120	142	170	183	198	198740	478440	564240	765620
19	0,0640000	0,0032000	0,0022400	0,0006720	120	142	170	180	210	198740	478440	554240	955620
20	0,0640000	0,0032000	0,0022400	0,0015680	120	142	170	180	195	198740	478440	554240	755620
21	0,0640000	0,0032000	0,0009600	0,0002880	120	142	167	180	210	198740	463440	549240	950620
22	0,0640000	0,0032000	0,0009600	0,0006720	120	142	167	180	195	198740	463440	549240	750620
23	0,0640000	0,0032000	0,0022400	0,0006720	120	142	167	177	207	198740	463440	539240	940620
24	0,0640000	0,0032000	0,0022400	0,0015680	120	142	167	177	192	198740	463440	539240	740620

Diese Integration der Einzelrisiken im probabilistischen Prognosemodell funktioniert auch im Prognosetool soweit die Erwartungswerte für Dauern und Kosten für jede Phase berechnet werden können. Durch die Erzeugung der Werteverteilungen mit dem stochastischen Prozess können auch Aussagen zum Konfidenzintervall mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit gemacht werden. Das Prognosetool macht mit der stochastischen Dauer und den zugehörigen Kosten eine Monte Carlo Simulation um die Werte zu Konfidenzintervallen zu bestimmen.

Tabelle 44: Monte Carlo Analyse der 35 größten Pfad-Dauern

Pfad	Zustandsfolge	P(D~)	D	K	PKUM(D~)	P <= 1: Obergrenze des 1-Intervalls: D[ne=6, w=1]=243
1	56,1 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000072000	243	970620	0,999928000	
33	56,33 = Dist2 + Dh3 + R02 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000168000	241	968120	0,999928000	
3	56,3 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000168000	240	960620	0,99964	
5	56,5 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000072000	240	955620	0,999472	P <= 0,9995: Obergrenze des 0,999-Intervalls: D[ne=6, w=5]=240
35	56,35 = Dist2 + Dh3 + R02 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000672000	238	958120	0,9994	
37	56,37 = Dist2 + Dh3 + R02 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000288000	238	953120	0,998728	
65	56,65 = Dist2 + Dh3 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000108000	238	975620	0,99844	
7	56,7 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000168000	237	945620	0,998332	
97	56,97 = Dist2 + Dh3 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000432000	236	973120	0,998164	
39	56,39 = Dist2 + Dh3 + R02 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000672000	235	943120	0,997732	
67	56,67 = Dist2 + Dh3 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000252000	235	965620	0,99706	
69	56,69 = Dist2 + Dh3 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000108000	235	960620	0,996808	
9	56,9 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000648000	233	930620	0,9967	
99	56,99 = Dist2 + Dh3 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,001008000	233	963120	0,996052	
101	56,101 = Dist2 + Dh3 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000432000	233	958120	0,995044000	
71	56,71 = Dist2 + Dh3 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000252000	232	950620	0,994612	
41	56,41 = Dist2 + Dh3 + R02 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000592000	231	928120	0,99436	
11	56,11 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,001512000	230	920620	0,991768	
13	56,13 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000648000	230	915620	0,990256	
103	56,103 = Dist2 + Dh3 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,001008000	230	948120	0,989608	
2	56,2 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000168000	228	770620	0,9886	
43	56,43 = Dist2 + Dh3 + R02 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000648000	228	918120	0,988432	
45	56,45 = Dist2 + Dh3 + R02 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000259200	228	913120	0,982384	P <= 0,985: Obergrenze des 0,97-Intervalls: D[ne=6, w=45]=228
73	56,73 = Dist2 + Dh3 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000972000	228	935620	0,979792000	
15	56,15 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,001512000	227	905620	0,97882	
34	56,34 = Dist2 + Dh3 + R02 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000672000	226	768120	0,977308	
105	56,105 = Dist2 + Dh3 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,003888000	226	933120	0,977636	
4	56,4 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000392000	225	760620	0,972748	P <= 0,975: Obergrenze des 0,95-Intervalls: D[ne=6, w=4]=225
6	56,6 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000168000	225	755620	0,972356	
47	56,47 = Dist2 + Dh3 + R02 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000648000	225	903120	0,972188	
75	56,75 = Dist2 + Dh3 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,002268000	225	925620	0,96614	
77	56,77 = Dist2 + Dh3 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000972000	225	920620	0,963872000	
36	56,36 = Dist2 + Dh3 + R02 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,001568000	223	758120	0,9629	
38	56,38 = Dist2 + Dh3 + R02 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000672000	223	753120	0,961332	
66	56,66 = Dist2 + Dh3 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,000252000	223	775620	0,960660000	

Die vorherige Abbildung zeigt die Monte Carlo Analyse der 35 größten Pfad-Dauern mit zugehörigen Kosten im Prognosetool. Man sieht auch die Pfade die eine Obergrenze für ein Konfidenzintervall darstellen. Die Prognoseergebnisse werden im Prognosetool in einer Ansicht ausgegeben.

Die Abbildung zeigt dass auch für die Vertrauensgrenzen eine Pfadbeschreibung angegeben werden kann und somit das Ergebnis der Prognose trotz der vielen Pfade transparent für steuernde Maßnahmen macht.

Tabelle 45: Prognose der stochastischen Dauer (sowie abhängiger Kosten) mit Integration von Einzelrisiken des Produktentwicklungs-Projektes

Prognose der stochastischen Dauer (sowie abhängiger Kosten) des Produktentwicklungs-Projektes		0	1	2	3	4	5	6
Stufe (Phase)	n=	PF	KF	DV	VF	DS	SF	MF
Erwartungswert	$E\{d^*\} = \sum w (pw \cdot Dw)$				143,40	160,90	171,80	191,30
Erwartungswert der Kosten	$E\{K(d^*)\} = \sum w (pw \cdot Kw)$				200740	436940	515740	777120
Standardabweichung der Dauer	$\sigma\{d^*\} =$				20	22	22	25
Standardabweichung der Kosten	$\sigma\{K(d^*)\} =$				4.424	28.473	29.990	119.064
<b>Konfidenzintervall</b>	<b>Grenzpfade der Prognose</b>							
Obere Vertrauensgrenze	stochastische Dauer $d^*\{n,w\}$							
Untere Vertrauensgrenze	determinist. Kosten $K\{d^*\}$							
<b>100% Vertrauensbereich Obergrenze - <math>S6,1 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 + R08</math></b>								
$P \leq 1: D\{ne=6, w=1\}=243$	$d^*\{n,w=1\}$				172	200	213	243
	$K\{d\{n,w=1\}\}$				203740	483440	569240	970620
<b>100% Vertrauensbereich Untergrenze - <math>S6,128 = Dist2 + Dh3 + + + Dh4 + + + Dh5 + + Dh6 +</math></b>								
$P \leq 0: D\{ne=6, w=128\} =175$	$d^*\{n,w=128\}$				135	150	160	175
	$K\{d\{n,w=128\}\}$				201240	425940	501740	703120
<b>99,9% Vertrauensbereich Obergrenze - <math>S6,5 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + + Dh5 + R07 + Dh6 + R08</math></b>								
$P \leq 0,9995: D\{ne=6, w=5\}=240$	$d^*\{n,w=5\}$				172	197	210	240
	$K\{d\{n,w=5\}\}$				203740	468440	554240	955620
<b>99,9% Vertrauensbereich Untergrenze - <math>S6,128 = Dist2 + Dh3 + + + Dh4 + + + Dh5 + + Dh6 +</math></b>								
$P \leq 0,0005: D\{ne=6, w=128\} =175$	$d^*\{n,w=128\}$				135	150	160	175
	$K\{d\{n,w=128\}\}$				201240	425940	501740	703120
<b>97% Vertrauensbereich Obergrenze - <math>S6,45 = Dist2 + Dh3 + R02 + + R04 + Dh4 + + + Dh5 + R07 + Dh6 + R08</math></b>								
$P \leq 0,985: D\{ne=6, w=45\}=228$	$d^*\{n,w=45\}$				170	185	198	228
	$K\{d\{n,w=45\}\}$				201240	425940	511740	913120
<b>97% Vertrauensbereich Untergrenze - <math>S6,128 = Dist2 + Dh3 + + + Dh4 + + + Dh5 + + Dh6 +</math></b>								
$P \leq 0,015: D\{ne=6, w=128\} =175$	$d^*\{n,w=128\}$				135	150	160	175
	$K\{d\{n,w=128\}\}$				201240	425940	501740	703120
<b>95% Vertrauensbereich Obergrenze - <math>S6,4 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + R04 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + + Dh6 +</math></b>								
$P \leq 0,975: D\{ne=6, w=4\}=225$	$d^*\{n,w=4\}$				172	200	210	225
	$K\{d\{n,w=4\}\}$				203740	483440	559240	760620
<b>95% Vertrauensbereich Untergrenze - <math>S6,128 = Dist2 + Dh3 + + + Dh4 + + + Dh5 + + Dh6 +</math></b>								
$P \leq 0,025: D\{ne=6, w=128\} =175$	$d^*\{n,w=128\}$				135	150	160	175
	$K\{d\{n,w=128\}\}$				201240	425940	501740	703120

Durch die grafische Diagrammdarstellung dargestellt werden mehrere ähnliche Werteverteilungen sichtbar. Die Pfade repräsentieren die unterschiedlichen Szenarien für die Projektkosten, dabei entstehen aufgrund verschiedener Risikoeintritte unterschiedlicher stochastischer Pfade mehrere ähnliche



Wertevertellungen mit jeweils verschobenen Positionen bezüglich Dauer und Kosten. Für das Beispielprojekt entstehen vier ähnlichen Wertevertellungen, die durch die Subpfadwerte der letzten beiden Projektphasen erklärbar werden. Mit den beiden Einzelrisiken der R07 und R08 wurden die Risiken für die deutlichsten Kosten- und Zeitüberschreitungen im Projekt erst in den letzten beiden Projektphasen identifiziert. Es bleibt zum derzeitigen Projektstand (Phase 2 wurde zum Stichtag 120 abgeschlossen) also noch Zeit um Maßnahmen zur Risikoverminderung einzuleiten.

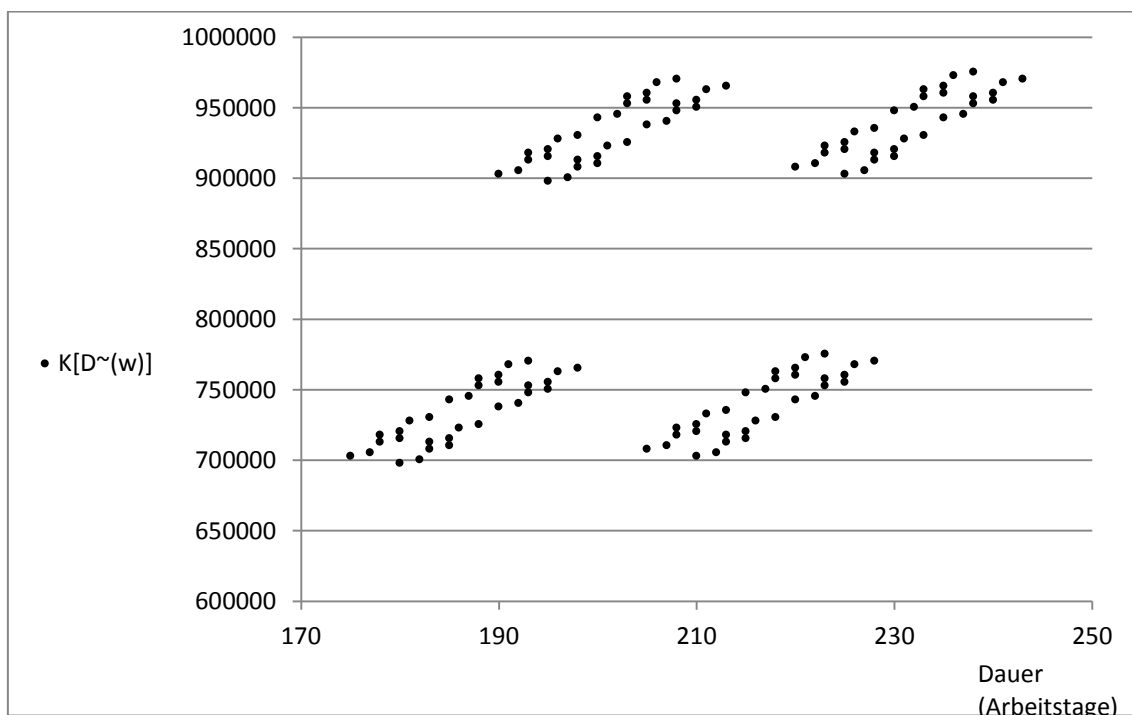


Abbildung 42: Projektkosten in Abhängigkeit von stochastischen Pfaddauern

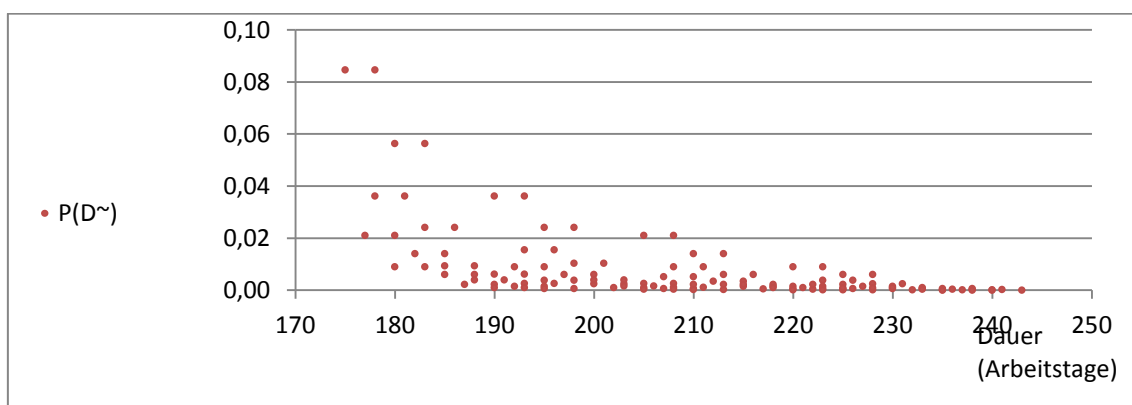


Abbildung 43: einzelne Pfadwahrscheinlichkeiten

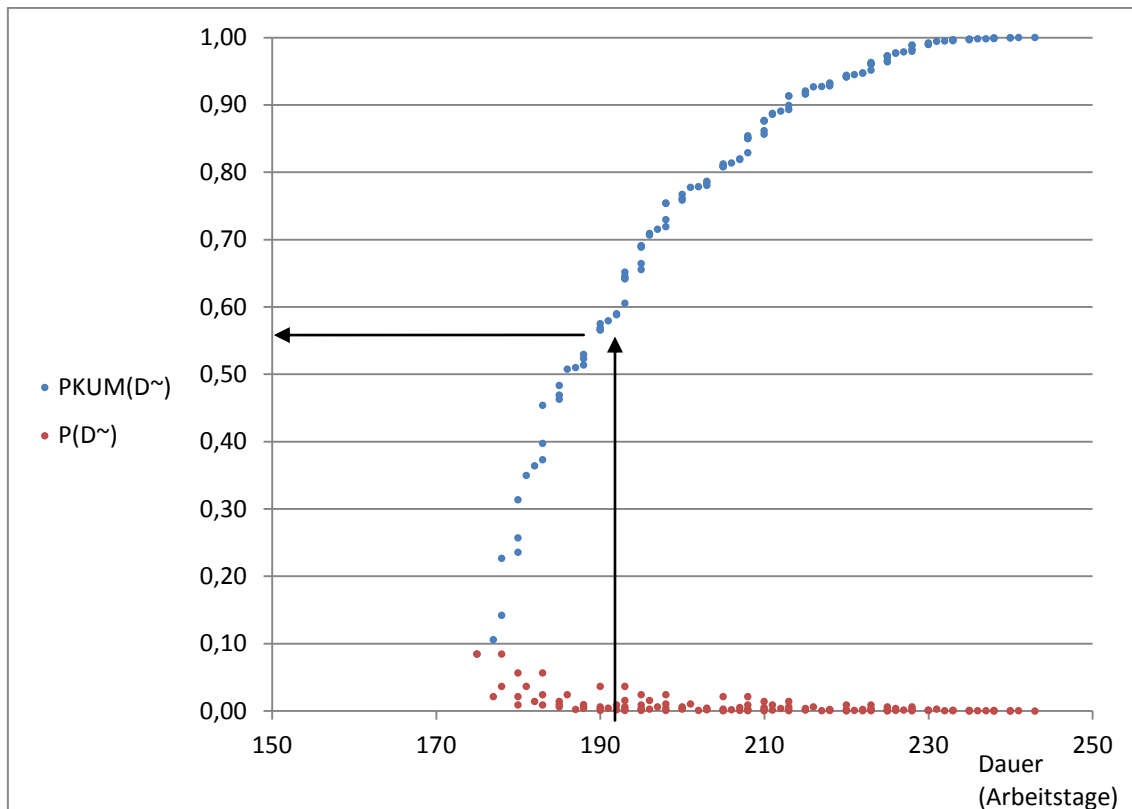


Abbildung 44: kumulierte Pfadwahrscheinlichkeit der Projektdauer

Der berechnete Erwartungswert für die Projektdauer von 191 Arbeitstagen liegt, wie in der Grafik sichtbar, zwischen 50% und 60% kumulierter Wahrscheinlichkeit.

Tabelle 46: Erwartungswert in der Monte Carlo Analyse

Monte Carlo Analyse der Dauern					
Pfad	Zustandsfolge	P(D~)	D	K	PKUM(D~)
82	S6,82 = Dist2 + Dh3 + + R03 + + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 +	0,001008000	193	770620	0,64264
123	S6,123 = Dist2 + Dh3 + + + Dh4 + + R06 + Dh5 + + Dh6 + R08	0,036288000	193	918120	0,641632000
125	S6,125 = Dist2 + Dh3 + + + Dh4 + + + Dh5 + R07 + Dh6 + R08	0,015552000	193	913120	0,605344000
24	S6,24 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + + Dh4 + R05 + + Dh5 + + Dh6 +	0,001568000	192	740620	0,589792
95	S6,95 = Dist2 + Dh3 + + R03 + + Dh4 + + + Dh5 + + Dh6 + R08	0,009072000	192	905620	0,588224
114	S6,114 = Dist2 + Dh3 + + + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 +	0,004032000	191	768120	0,579152
56	S6,56 = Dist2 + Dh3 + R02 + + + Dh4 + R05 + + Dh5 + + Dh6 +	0,006272000	190	738120	0,57512
84	S6,84 = Dist2 + Dh3 + + R03 + + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + + Dh6 +	0,002352000	190	760620	0,568848
86	S6,86 = Dist2 + Dh3 + + R03 + + Dh4 + R05 + + Dh5 + R07 + Dh6 +	0,001008000	190	755620	0,566496
127	S6,127 = Dist2 + Dh3 + + + Dh4 + + + Dh5 + + Dh6 + R08	0,036288000	190	903120	0,565488
26	S6,26 = Dist2 + Dh3 + R02 + R03 + + Dh4 + + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 +	0,006048000	188	725620	0,5292
116	S6,116 = Dist2 + Dh3 + + + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + + Dh6 +	0,009408000	188	758120	0,523152
118	S6,118 = Dist2 + Dh3 + + + Dh4 + R05 + + Dh5 + R07 + Dh6 +	0,004032000	188	753120	0,513744
88	S6,88 = Dist2 + Dh3 + + R03 + + Dh4 + R05 + + Dh5 + + Dh6 +	0,002352000	187	745620	0,509712

Tatsächlich findet man den errechneten Erwartungswert in der nach Dauer sortierten Monte Carlo Analyse bei 57% Wahrscheinlichkeit auf dem Pfad 114, der aus der Summe der Dauern Dist2 + Dh3 + Dh4 + R05 + R06 + Dh5 + R07 + Dh6 = 191 Arbeitstage besteht. Man sieht sofort dass der Eintritt der Einzelrisiken R05, R06 und R07 und ansonsten nur die am häufigsten geschätzten Dauern (Dh) im Erwartungswert vorhanden ist. Damit ist eine transparente Argumentation für alle Pfade im Projekt möglich.

## Schlussbetrachtungen

### Traditionelle Projektplanung

Im ersten Kapitel wurde ein Überblick zum Projektmanagement allgemein und der Grundlagen der Projektplanung erklärt, sowie die enthaltenen Rechenschritte mit dem Beispielprojekt als Fallbeispiel vorgezeigt. Da in dieser Arbeit Unsicherheit und daher auch Risiko thematisiert wird, wird auch das Risikomanagement in Projekten als Teildisziplin von Projektmanagement allgemein erklärt.

Der Nutzen des Einsatzes von Projektmanagement ist gegeben durch klare Prioritätensetzung, Teamorientierung und effizientem Ressourceneinsatz durch maximale Nutzung von Know-How und Verfügbarkeiten.<sup>158</sup>

Der Nutzen von Planungsaktivitäten wird kurz festgehalten als Instrumente zum Klarlegen von Zielen, Feststellen von Abweichungen und Entscheiden von optimalen Steuerungsmaßnahmen<sup>159</sup>

Eine kritische Würdigung zur traditionellen Projektplanung kann hinsichtlich der Grenzen der traditionellen Zeitanalyse bei Einbeziehung von Mehrpunktschätzungen wie folgt angegeben werden. Bei traditioneller Terminplanung müsste für jede Variante aus der Mehrpunktschätzung eine neue Terminplanung berechnet und dargestellt werden. Das ist für Fallunterscheidungen sehr aufwendig und man hätte trotzdem keine Aussage wie wahrscheinlich die einzelnen Varianten eigentlich wären. Um diese Grenzen der traditionellen Terminplanung zu überwinden, ist ein anderer Modellansatz erforderlich, der verschiedene Möglichkeiten mit Wahrscheinlichkeiten (Probabilität) in die Betrachtung einbindet. In Kapitel drei wird der probabilistische Modellansatz für Terminberechnungen diskutiert. Die Planungsschritte zur Ressourcen- und Kostenplanung werden in dieser Arbeit, wie in der Projektplanung üblich, ausgehend von der Zeitplanung gedacht.

---

<sup>158</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 28

<sup>159</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 147

## Integriertes Projektcontrolling und Earned Value Analysis

Im zweiten Kapitel wurde Projektcontrolling allgemein und die Earned Value Analyse als Methode zum integrierten Projektcontrolling vorbereitend für diese Arbeit erklärt<sup>160</sup> und die enthaltenen Rechenschritte mit dem Beispielprojekt als Fallbeispiel vorgezeigt. Die folgende kritische Würdigung zur Earned Value Analysis beschreibt den Nutzen und die Grenzen dieser Technik auf. Der größere Nutzen der hier erklärten Earned Value Analysis liegt in der systematischen und quantitativen Erfassung des Projektstatus zu fortlaufenden Stichtagen und der Analyse des Trends ausgewählter Kenngrößen und weniger in der Möglichkeit Prognosen auf das Projektende zu stellen.<sup>161</sup>

Eine lineare Fortschreibung des „heutigen“ Zustandes kommt dem Negieren sämtlicher Steuerungsmöglichkeiten gleich und ist bloß als „Rute im Fenster“ zu verstehen. Auch bei der additiven Prognose würde der Projektleiter versuchen korrigierende Maßnahmen als Kompensation der eingewirtschafteten Abweichungen auszuwählen und anzuordnen, um den geplanten Projektendtermin doch einzuhalten. Die Zeit-Prognose aus der Earned Value Analysis werden nicht weiter verwendet, da mit Kapitel drei das probabilistische Prognosemodell für die Prognose der Projektdauer eingeführt wurde.

## Probabilistisches Prognosemodell

Entsprechend der Vorgehensweise in der Projektplanung werden zuerst die Leistung (Qualität, Quantität) aufgrund der Ziele, danach Dauern (Termine) und dann die Kosten (der Ressourceneinsätze) geplant. Auch in diesem probabilistischen Prognosemodell wird diese Vorgehensweise beibehalten.

Zuerst wird ausgehend von mehreren geschätzten Dauern (Mehrpunktschätzung mit Wahrscheinlichkeitsangaben) eine probabilistische Prognose der Projektdauer für jede mögliche Variante (Pfad) durchgeführt. Damit wird ein stochastischer

---

<sup>160</sup> Die Beschreibungen beziehen sich auf (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) und (Anbari, 2003), sowie die standardisierte Earned Value Analysis, die in der Projektmanagement Norm DIN69901-3:2009-01 mit internationalen Abkürzungen und Kennzahlen den Stand der Technik darstellt (siehe Auszug aus der DIN 69901-3:2009-01 - Tabelle 2 im Anhang).

<sup>161</sup> (Patzak & Rattay, Projektmanagement, 4. Auflage, 2004) S. 342

Prozess für die Dauer eines Projektes modelliert, welcher viele Pfade haben kann. Mit den Pfaddauern der einzelnen Varianten kann im nächsten Schritt eine pfadweise Kostenprognose abhängig von der probabilistischen Prognose der Projektdauer ermittelt werden. Das probabilistische Prognosemodell liefert damit verteilte Werte zur pfadweisen Hochrechnung für die Dauer und die Kosten des Projektes. Ein Pfad besteht aus der Reihung der unterschiedlicher Schätzannahmen (pessimistisch, realistisch, optimistisch) für die Phasen des Projekts. Für die Prognosewerte können Erwartungswerte und Vertrauensbereiche unter Wahrscheinlichkeit errechnet werden. Diese neue probabilistische Prognose liefert ein neues Prognosemodell zur Earned Value Analysis neben der linearen, der additiven und der Prognose mit der Ursprungsplanung. Dieses probabilistische Prognosemodell wird mit Erwartungswert und den Risikomaßen für die verteilten Hochrechnungen (Pfade) als neue Prognose für die Earned Value Analysis übergeleitet.

## Nutzung der probabilistischen Prognose beim integrierten Projektcontrolling mit der Earned Value Analysis

Die Anwendung des probabilistischen Prognosemodells bringt als Ergebnis anstatt punktueller Prognosen Werteverteilungen für erwartete Dauern und Kosten eines Projekts mit. Der klare Vorteil für die Prognose von Projektkenngößen im probabilistischen Prognosemodell ist die Einbeziehung der Unsicherheiten.

Die probabilistische Prognose ermöglicht frühzeitige Erkennung von Abweichungen und rechtzeitige Steuerungsmaßnahmen für unerwünschte Pfade.

Ein weiterer Vorteil ist die zwingende Auseinandersetzung der Personen im Projekt mit den Unsicherheiten und Risiken, da ohne Angabe von Schätzwerten unter Wahrscheinlichkeit kein Prognosemodell durchgerechnet werden kann.

Ein Nachteil dieses Modellansatzes ist der hohe Rechenaufwand für die Berechnungen bei manueller Durchrechnung. Dieser Nachteil wird jedoch durch Softwareunterstützung entkräftet. Im Zuge der Diplomarbeit wurde für die Beispielprojekte ein Prognosetool auf Excel-Basis mit Visual Basic Programmierung erstellt. Diese Tool beherrscht die in der Diplomarbeit verwendeten Berechnungen und liefert eine Earned Value Analysis sowie die

Erwartungswerte und Vertrauensbereiche zum stochastischen Prozess Dauer und der deterministisch abhängigen Kosten. Die Modellverfeinerung zur Integration von Einzelrisiken wurde in das Prognosetool eingearbeitet. Es konnte festgestellt werden dass das Modell bei Durchrechnung der Beispielprojekte gut funktioniert. Für die eine breite industrielle Anwendung im Projektcontrolling und Projekt-Risikomanagement ist das während der Durchrechnung von Beispielprojekten programmierte Excel-Prognosetool allerdings nicht geschaffen. Als Funktionsprototyp könnte das Prognosetool jedoch dazu dienen das probabilistische Prognosemodell industriell anwendbar umzusetzen.

Zusammenfassend wurde in der Diplomarbeit ein probabilistisches Prognosemodell für Projektkenngößen unter Unsicherheit erarbeitet und durchgerechnet. Dieses Modell und das zur Illustration der Beispielprojekte geschaffene Prognosetool (als Funktionsprototyp) sind mein eigener Beitrag zur Einbeziehung probabilistischer Prognosemodelle im Projektmanagement, im Projektcontrolling und im Risikomanagement für Projekte.

## Abbildungen

Abbildung 1: Die drei Planungsgrößen eines Projekts („magisches Dreieck“) .....	6
Abbildung 2: Feuerwehrfahrzeug im Beispielprojekt.....	8
Abbildung 3: Projektstrukturplan zum Fahrzeugbau.....	10
Abbildung 4: Vorgangsknoten-Netzplan zum Beispielprojekt.....	12
Abbildung 5: Netzplan der Vorwärtsrechnung im Beispielprojekt.....	17
Abbildung 6: Netzplan zur Rückwärtsrechnung im Beispielprojekt.....	19
Abbildung 7: Vernetzter Balkenplan im Beispielprojekt .....	19
Abbildung 8: Zusammenhang Risikomanagementaufgaben mit Projektphasen.....	34
Abbildung 9: Projektcontrolling-Regelkreis .....	38
Abbildung 10: S-Kurve (Plankosten, Budget at Completion) zum Beispielprojekt.....	50
Abbildung 11: Earned Value, Ist-Kosten und Plankosten zum Stichtag.....	52
Abbildung 12: Abweichungen KA, PA und TA zum Stichtag im Beispielprojekt.....	54
Abbildung 13: Target Performance Chart.....	56
Abbildung 14: Earned Value Analysis mit linearer-, additiver Prognose .....	59
Abbildung 15: Projektereignisse am Zeitstrahl .....	61
Abbildung 16: Betrachtungsdimensionen traditioneller Terminplanung.....	63
Abbildung 17: Mehrpunkt-Schätzung bei traditioneller Terminplanung.....	63
Abbildung 18: Betrachtungsdimensionen im probabilistischen Modellansatz.....	65
Abbildung 19: Trinomialmodell: Dauer-Schätzwerte einer Projektphase.....	66
Abbildung 20: Folge realisierter Zustände als Pfad .....	67
Abbildung 21: Entscheidungsbaum über Projektphasen.....	68
Abbildung 22: Realisierter Pfad im Entscheidungsbaum .....	70
Abbildung 23: Entscheidungsbaum zum stoch. Trinomial-Prozess "Dauer" .....	72
Abbildung 24: Realisierter Pfad im Entscheidungsbaum .....	79
Abbildung 25: Projektkosten über der Projektdauer .....	83
Abbildung 26: Projektkostenfunktion im probabilistische Modellansatz.....	87
Abbildung 27: Skizze der probabilistischen Pfade in der Kosten-Dauer-Ebene (qualitativ) .....	94
Abbildung 28: Earned Value Analyse mit probabilistischer Prognose (qualitativ).....	96
Abbildung 29: Risiko-Grundtypen .....	97

---

Abbildung 30: : Dichtefunktion: Reine vs. Spekulative Risiken .....	98
Abbildung 31: Geschäftsrisiken .....	98
Abbildung 32: Statistische Kalibrierung eines Risikofaktors .....	100
Abbildung 33: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zeiterwartung (qualitativ) .....	101
Abbildung 34: Bereiche der Risikomaße $EACaR\alpha$ und $TCaR\alpha$ für probabilistischen Pfade in der Kosten-Dauer-Ebene (qualitative Skizze) .....	104
Abbildung 35: Earned Value Analysis, probabilistische Prognose und Risikomaße .....	104
Abbildung 36: Vorgangsknoten-Netzplan.....	105
Abbildung 37: Netzplanintegration im Entscheidungsbaums durch Verzweigungsstellen.....	106
Abbildung 38: Netzplanintegration im Entscheidungsbaums durch Summationsstellen.....	107
Abbildung 39: Entscheidungsbaum mit Abbruch-Möglichkeit.....	111
Abbildung 40: Entscheidungsbaum mit Rücksprung-Möglichkeit.....	112
Abbildung 41: Subpfadmodell mit Dreipunktschätzungen und Einzelrisiken in einer Projektphase .....	114
Abbildung 42: Projektkosten in Abhängigkeit von stochastischen Pfaddauern ....	120
Abbildung 43: einzelne Pfadwahrscheinlichkeiten .....	120
Abbildung 44: kumulierte Pfadwahrscheinlichkeit der Projektdauer .....	121



## Tabellen

Tabelle 1: Projektdefinitionsblatt.....	9
Tabelle 2: Vorgangsliste mit Ablauflogik.....	12
Tabelle 3: Vorgangsliste mit Vorgangsdauern .....	14
Tabelle 4: Vorwärtsrechnung im Beispielprojekt "Feuerwehr-Fahrzeugbau" .....	16
Tabelle 5: Rückwärtsrechnung im Beispielprojekt .....	18
Tabelle 6: Mehrpunktschätzung der Dauern im Projektbeispiel .....	20
Tabelle 7: Varianten der kritische Dauern im Projektbeispiel.....	20
Tabelle 8: Ressourcenarten .....	23
Tabelle 9: Einsatzmittelplan für das Beispielprojekt.....	24
Tabelle 10: ressourcenbasierte analytische Kostenplanung im Beispielprojekt.....	32
Tabelle 11: Liste der Steuerungsmaßnahmen für Zielabweichungen .....	42
Tabelle 12: Die wichtigsten internationalen Abkürzungen und Kennzahlen zur Earned Value Analysis (Auszug aus DIN 69901-3:2009-01 - Tabelle 2) .....	44
Tabelle 13: Plan-Fertigstellungsgrad zur Plandauer je Projektphase.....	47
Tabelle 14: tatsächlicher Projektfortschritt im Beispielprojekt.....	50
Tabelle 15: Berechnung der Earned Value Analysis im Beispielprojekt.....	51
Tabelle 16: Kenngrößen zur Statusbeurteilung in der Earned Value Analysis .....	56
Tabelle 17: Kosten-Prognose der Earned Value Analysis zum Beispielprojekt .....	58
Tabelle 18: Zeit-Prognose der Earned Value Analysis zum Beispielprojekt .....	58
Tabelle 19: Mehrpunktschätzung der Dauern für kritische Aktivitäten .....	71
Tabelle 20: Dreipunktschätzung für Dauern und Wahrscheinlichkeiten .....	72
Tabelle 21: Termineinhaltung und Pfadbeschreibung im Entscheidungsbaum .....	73
Tabelle 22: Wahrscheinlichkeit dass der Termin eingehalten.....	73
Tabelle 23: Dauer-Erwartungswerte und Standardabweichung im Beispielprojekt .....	75
Tabelle 24: Monte Carlo Analyse für Projektdauern.....	76
Tabelle 25: Grenzpfade zum Konfidenzintervall in der Prognose .....	77
Tabelle 26: Informationsenthüllung bis Phase n=1 im Beispielprojekt.....	78
Tabelle 27: Pfadbeschreibung bei Hochrechnung .....	82
Tabelle 28: Dauer-Erwartungswerte mit realisierten Ist-Dauern.....	82

---

Tabelle 29: Monte Carlo Analyse für Projektdauern.....	82
Tabelle 30: Monte Carlo Analyse .....	92
Tabelle 31: Erwartungswerte und Konfidenzintervalle im Prognosetool .....	92
Tabelle 32: Gegenüberstellung von Earned Value Analysis und probabilistisches Prognosemodell.....	94
Tabelle 33: Risikobewältigungs-Matrix .....	100
Tabelle 34: Monte Carlo Analyse für Projektdauern (Prognose Phase 4 bis 6) .....	101
Tabelle 35: Monte Carlo Analyse für Projektkosten (Prognose Phase 4 bis 6) .....	102
Tabelle 36: kritischer Netzplan-Pfad .....	108
Tabelle 37: Entscheidungsbaum der stoch. Dauer am kritischen Netzplan-Pfad..	109
Tabelle 38: Dreipunkt-Schätzung (Prognosetool) zum Produktentwicklungs-Projekt.....	115
Tabelle 39: Kostenschätzmodell (Prognosetool) zum Produktentwicklungs-Projekt .....	115
Tabelle 40: Risikoliste (Prognosetool) für das Produktentwicklungs-Projekt .....	116
Tabelle 41: individuelle Subpfadwerte je Projektphase (Prognosetool).....	116
Tabelle 42: Pfadbeschreibungen der stoch. Dauer (Prognosetool) .....	117
Tabelle 43: Pfadwahrscheinlichkeiten und stochastische Pfaddauern (Prognosetool).....	118
Tabelle 44: Monte Carlo Analyse der 35 größten Pfad-Dauern.....	118
Tabelle 45: Prognose der stochastischen Dauer (sowie abhängiger Kosten) mit Integration von Einzelrisiken des Produktentwicklungs-Projektes.....	119
Tabelle 46: Erwartungswert in der Monte Carlo Analyse.....	121

## Literatur

- Anbari, F. (Dec. 2003). Earned Value Project Management - Method and Extensions. *Project Management Journal*, S. 12.
- AssureConsultingGmbH. (2007). *Studie: Milliardenverluste für die deutsche Wirtschaft*. Abgerufen am 09. 2012 von <http://www.presseportal.de/pm/68231/1093625/studie-milliardenverluste-fuer-die-deutsche-wirtschaft>
- Budde, M., & Brouns, T. (2010). *Netzplantechnik im Projektmanagement*. Von Fallstudienarbeit, Hochschule für Oekonomie & Management, Düsseldorf: [http://winfwiki.wi-fom.de/index.php/Netzplantechnik\\_im\\_Projektmanagement#cite\\_ref-0](http://winfwiki.wi-fom.de/index.php/Netzplantechnik_im_Projektmanagement#cite_ref-0) abgerufen
- DIN69901-3:2009-01 Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 3: Methoden*. (2009).
- DIN69901-5:2009-01 Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe*. (2009).
- Earned Value Analysis*. (08. 01. 2014). Von [http://de.wikipedia.org/wiki/Earned\\_Value\\_Analysis](http://de.wikipedia.org/wiki/Earned_Value_Analysis) abgerufen
- Fleming, Q. &. (2000). *Earned Value Project Management, (2nd Ed)*. Nexton Square, Pennsylvania, USA: Project Management Institute, Inc.
- Leippold, M. (08/1998). *Value at Risk – Standard mit Schönheitsfehler*. Schweizer Bank. Abgerufen am 01. 10. 2013
- (01/2003). *Operational Value at Risk – Ein Ansatz für das Management von Operationellen Risiken*. RiskNews.
- Patzak, G., & Rattay, G. (2004). *Projektmanagement, 4. Auflage*. Wien: Linde Verlag Wien Ges.m.b.H.
- Pitsch, S. (WS 1996/97). *Netzplantechnik: Der STEO-Netzplan*. Von HTML-Version der Datei <http://www.pitsch.de/papers/ufo/ufoWS9697.pdf> abgerufen
- Runzheimer, B., & Barković, D. (2009). Netzplantechnik (NPT) als wichtiges Instrument des Projektmanagements. *Interdisciplinary Management Research V, Osijek 2009*, S. S. 265-318.

- Schwaiger, W. S. (2009). *Vorlesungsskript Controlling unter Unsicherheit - Draft Version*. Technische Universität Wien, Institut für Managementwissenschaften, Wien.
- Schwaiger, W. S. (2010). *Vorlesungsfolien - Controlling von Geschäfts- und operativen Risiken*. Technische Universität Wien - Institut für Managementwissenschaften.
- standishgroup. (2009). *Chaos Report*. Von [www.standishgroup.com](http://www.standishgroup.com) abgerufen
- Völl, W. (2010). *Analytische und simulative ansätze des Projektcontrollings - Eine kritische Analyse*. Hamburg: Dr. Kovac.
- Weaver, P. (2008). A Brief History of Scheduling - Back to the Future. *PM World Today - February 2008 (Vol. X, Issue II)*.