

# 2 Einführung in die ressourcenbeschränkte Projektplanung

## 2.1 Definition grundlegender Begriffe

Ein Projekt ist nach DIN 69901 definiert als

„Vorhaben, das im Wesentlichen durch Einmaligkeit der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist, [wie z. B.]

- Zielvorgabe,
- zeitliche, finanzielle, personelle oder andere Begrenzungen,
- projektspezifische Organisation.“<sup>2</sup>

Bei einem Projekt handelt es sich dementsprechend um ein einmaliges, zeitlich abgeschlossenes und komplexes Vorhaben, durch dessen Ausführung unter Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen ein zuvor definiertes Sachziel erreicht werden soll. Diese Form der Arbeitsorganisation hat in den vergangenen Jahren in vielen Branchen stark an Bedeutung gewonnen.<sup>3</sup>

Das Projektmanagement kann als „Gesamtheit aller Planungs-, Steuerungs-, Koordinierungs- und Überwachungsaufgaben zur sach-, termin- und kostengerechten Realisierung von Projekten“ definiert werden.<sup>4</sup> Im Rahmen der Projektplanung wird das Projekt analysiert und die Durchführung des Projekts vorbereitet. Die Projektsteuerung und -koordinierung beinhaltet, dass die Projektarbeit so umgesetzt wird, dass die gesteckten Projektziele erreicht werden. Bei der Überwachung des Projekts werden die Soll-Werte aus der Planung mit den Ist-Werten aus der Projektrealisierung verglichen und gegebenenfalls Maßnahmen ergriffen, um Abweichungen entgegenzuwirken oder auszugleichen.<sup>5</sup>

Die Projektplanung wird im Folgenden detaillierter erläutert, da sie den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit darstellt. Planung kann als gedankliche Vorwegnah-

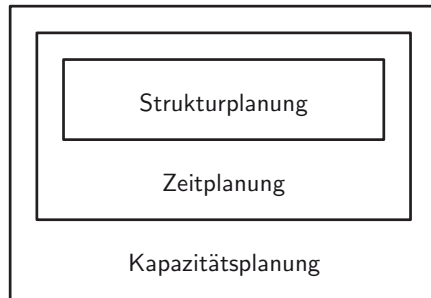
---

2 Deutsches Institut für Normung (2009b), S. 11.

3 Vgl. Zimmermann et al. (2010), S. 1.

4 Zimmermann et al. (2010), S. 4.

5 Vgl. Zimmermann et al. (2010), S. 4.



*Abbildung 2.1: Planungsaufgaben in der Projektplanung*

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Küpper und Helber (2004), S. 239

me zukünftiger Handlungen definiert werden. Bezogen auf die Projektplanung bedeutet dies, dass das komplexe Vorhaben durchdacht wird, um die im Rahmen des Projekts zu bearbeitenden Arbeitsschritte zu strukturieren und zu terminieren.<sup>6</sup>

Abbildung 2.1 stellt die unterschiedlichen Planungsaufgaben in der Projektplanung zueinander in Beziehung.<sup>7</sup> Im Rahmen der Strukturplanung wird das Projekt in einzelne Arbeitsgänge zerlegt und die Projektstruktur definiert. Auf der Basis dieser Planung wird für jeden Arbeitsgang im Rahmen der Zeitplanung ein Bearbeitungszeitraum festgelegt. Es schließt sich die Kapazitätsplanung an, in der für die abschließende Terminierung der Arbeitsgänge die Begrenzungen der Ressourcen einbezogen werden. Diese einzelnen Planungsschritte werden im Folgenden jeweils detaillierter behandelt.

## 2.2 Planung der Projektstruktur

Im Rahmen der Strukturplanung wird das Projekt in einzelne Arbeitsgänge zerlegt. Ein Arbeitsgang oder Vorgang kann nach DIN 69900 als „Ablaufelement zur Beschreibung eines bestimmten Geschehens mit definiertem Anfang und Ende“ charakterisiert werden.<sup>8</sup> Im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz wird in der Literatur zur ressourcenbeschränkten Projektplanung grundsätzlich angenommen, dass jeder Arbeitsgang durchgeführt werden muss, um das Projektziel zu erreichen. Die Projektstruktur wird dabei folglich nicht als flexibel angesehen.

<sup>6</sup> Vgl. Küpper und Helber (2004), S. 238.

<sup>7</sup> Vgl. Küpper und Helber (2004), S. 239.

<sup>8</sup> Deutsches Institut für Normung (2009a), S.15.

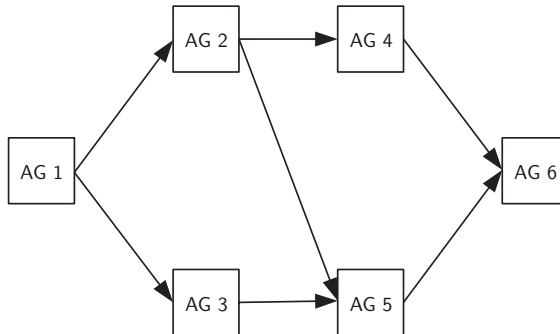


Abbildung 2.2: Beispiel für einen Vorgangsknotennetzplan

Zwischen den Arbeitsgängen können Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen bestehen. Eine derartige Reihenfolgebeziehung sagt aus, dass mit der Bearbeitung eines nachfolgenden Arbeitsgangs erst begonnen werden darf, wenn die Bearbeitung des Vorgängers abgeschlossen wurde. Die Notwendigkeit, eine Reihenfolgebeziehung zwischen zwei Arbeitsgängen zu definieren, kann unterschiedliche Ursachen haben.<sup>9</sup> Technologische Reihenfolgebeziehungen begründen sich in den technologischen Randbedingungen des Projekts. So kann beispielsweise eine neue Software erst eingeführt werden, nachdem die Entwicklung abgeschlossen wurde. Prozedurale Reihenfolgebeziehungen begründen sich in den Verfahrensrichtlinien, die für das Projekt eingehalten werden müssen. Im Rahmen eines Bauprojekts ist es beispielsweise möglich, dass erst Bodenproben ausgewertet werden müssen, bevor mit der Bebauung des Grundstücks begonnen werden darf.

Das durch die Arbeitsgänge und Reihenfolgebeziehungen definierte Projekt kann mit unterschiedlichen Netzplantechniken visualisiert werden. Die am weitesten verbreitete Darstellungsform ist die Verwendung von Vorgangsknotennetzplänen.<sup>10</sup> Diese Netzpläne werden in der englischsprachigen Literatur als „Activity-on-Arrow Networks“ bezeichnet. Dabei werden die Arbeitsgänge bzw. Vorgänge als Knoten eines Netzwerks dargestellt.

Ein Beispiel für ein derartiges Netzwerk ist in Abbildung 2.2 gegeben. Im Rahmen des Projekts müssen sechs Arbeitsgänge bearbeitet werden. Die Pfeile kennzeichnen die auch als Vorrangbeziehungen bezeichneten Reihenfolgebeziehungen zwischen den Arbeitsgängen. So darf beispielsweise Arbeitsgang (AG) 2 erst be-

<sup>9</sup> Vgl. zu diesen im Folgenden erläuterten Ursachen Badiru und Pulat (1995), S. 107.

<sup>10</sup> Vgl. Zimmermann et al. (2010), S. 59.

gonnen werden, wenn die Bearbeitung von AG 1 abgeschlossen wurde. AG 5 darf erst begonnen werden, wenn sowohl AG 2 als auch AG 3 beendet wurden. Es wird dabei angenommen, dass der Netzplan zyklensfrei ist und eine topologische Sortierung der Arbeitsgänge vorliegt, so dass die Ordnungszahl eines Nachfolgers immer größer ist als die seines Vorgängers.

Bei dieser Interpretation eines Pfeils als Vorrangbeziehung zwischen zwei Arbeitsgängen handelt es sich um die grundlegendste Reihenfolgebeziehung.<sup>11</sup> Es können zusätzlich auch minimale und maximale Zeitabstände zwischen der Beendigung oder dem Start eines Arbeitsgangs und der Beendigung oder dem Start eines weiteren Arbeitsgangs berücksichtigt werden.<sup>12</sup> Auf diesen Aspekt wird in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht eingegangen.

Für wohldefinierte Netzpläne gilt, dass jeweils genau ein Arbeitsgang den Projektbeginn und das Projektende darstellt. Da diese Eigenschaft nicht bei jeder Problemstellung aus der Praxis vorliegt, werden stets Dummy-Arbeitsgänge mit einer Dauer von 0 Zeiteinheiten eingefügt, die Projektbeginn und -ende markieren. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass kein Arbeitsgang vor dem Beginn des Projekts startet und kein Arbeitsgang nach dem Projektende beendet wird.<sup>13</sup>

Als weitere Visualisierungsmöglichkeit von Projekten kommen Vorgangspfeilnetzpläne in Frage. Diese werden in der englischsprachigen Literatur als „Activity-on-Arc-Networks“ bezeichnet. Bei dieser Darstellung werden die Arbeitsgänge als Pfeile und die Knoten als Ereignisse interpretiert. Ein Beispiel für diese Darstellungsart wird in Abbildung 2.3 präsentiert. Das Ereignis 1 löst das Projekt aus. Die Bearbeitung von AG 1 und AG 2 kann begonnen werden. Durch die Beendigung von AG 1 wird das Ereignis 2 ausgelöst, wodurch die Bearbeitung von AG 3 und AG 4 beginnen darf. Für die Auslösung von Ereignis 3 und damit den Beginn von AG 5 muss sowohl AG 2 als auch AG 3 fertig gestellt worden sein.

Bei der Verwendung eines Vorgangspfeilnetzplans müssen unter Umständen Schein- oder Dummy-Arbeitsgänge eingefügt werden, um beispielsweise die Reihenfolgebeziehungen zwischen den Arbeitsgängen eindeutig abbilden zu können.<sup>14</sup> Das Problem, eine Darstellung mit einer minimalen Anzahl von Dummy-Arbeitsgängen zu finden, ist allerdings bereits  $\mathcal{NP}$ -schwer.<sup>15</sup>

Auf der Basis der durch eine Netzplantechnik visualisierten Projektstruktur kann die Zeitplanung erfolgen.

<sup>11</sup> Vgl. Kolisch und Padman (2001), S. 251.

<sup>12</sup> Vgl. z. B. Bartusch et al. (1988), S. 204-209.

<sup>13</sup> Vgl. Zimmermann et al. (2010), S. 66.

<sup>14</sup> Vgl. Domschke und Drexl (2011), S. 111.

<sup>15</sup> Vgl. Krishnamoorthy und Deo (1979), S. 193.

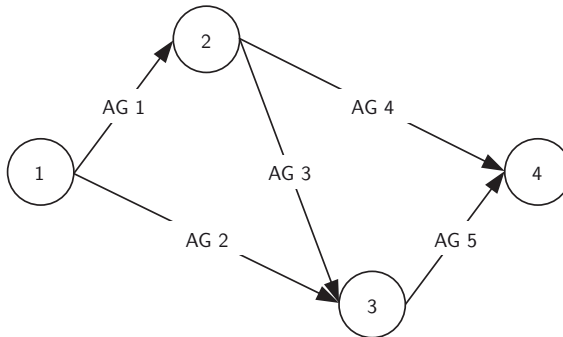


Abbildung 2.3: Beispiel für einen Vorgangspfeilnetzplan

## 2.3 Zeitplanung

Bei der Zeitplanung wird für jeden Arbeitsgang ein Zeitfenster definiert, in dem der Arbeitsgang ausgeführt werden kann, ohne das Projekt zu verzögern. In der sogenannten Vorwärtsrechnung werden für jeden Arbeitsgang  $j$  die *frühesten* Startzeitpunkte  $EST_j$  und Endzeitpunkte  $EFT_j$  bestimmt. In der Rückwärtsrechnung werden die *spätesten* Startzeitpunkte  $LST_j$  und Endzeitpunkte  $LFT_j$  bestimmt. Das entsprechende Vorgehen ist in Algorithmus 2.1 dargestellt und wird im Folgenden erläutert.<sup>16</sup>

Die Vorwärtsrechnung beginnt mit der Betrachtung des Dummy-Arbeitsgangs 1, dessen frühester Startzeitpunkt auf den Beginn des gesamten Planungszeitraums festgelegt wird. Da dieser Dummy-Arbeitsgang eine Dauer von 0 Zeiteinheiten hat, kann der Arbeitsgang zu diesem Zeitpunkt auch frühestmöglich beendet werden.

Im Anschluss werden die Zeitpunkte sukzessive für alle verbleibenden Arbeitsgänge in der Reihenfolge ihrer Ordnungsnummer bestimmt. Aufgrund der topologischen Sortierung der Arbeitsgänge wird so sichergestellt, dass ein Arbeitsgang  $j$  erst nach der Berücksichtigung aller seiner direkten Vorgänger  $i \in \mathcal{P}_j$  betrachtet wird. Der früheste Startzeitpunkt  $EST_j$  eines Arbeitsgangs  $j$  kann als das Maximum der frühesten Endzeitpunkte aller seiner direkten Vorgänger berechnet werden. Der früheste Endzeitpunkt  $EFT_j$  wird durch die Addition der Bearbeitungsdauer  $d_j$  bestimmt.

<sup>16</sup> Vgl. zur im Folgenden vorgestellten Vorwärts- und Rückwärtsrechnung Demeulemeester und Herroelen (2002), S. 96-98.

```

 $EST_1 := 0$ 
 $EFT_1 := EST_1$ 
für  $j := 2$  bis  $J$ 
     $EST_j := \max\{EFT_i \mid i \in \mathcal{P}_j\}$ 
     $EFT_j := EST_j + d_j$ 
 $LFT_J := T$ 
 $LST_J := LFT_J$ 
für  $j := J - 1$  bis  $1$ 
     $LFT_j := \min\{LST_i \mid i \in \mathcal{F}_j\}$ 
     $LST_j := LFT_j - d_j$ 

```

*Algorithmus 2.1:* Bestimmung der frühesten und spätesten Start- und Endzeitpunkte

Quelle: Demeulemeester und Herroelen (2002), S. 96 und 98

In der Rückwärtsrechnung wird der späteste Endzeitpunkt des Dummy-Arbeitsgangs  $J$  auf das Ende des Planungshorizonts  $T$  festgelegt. Aufgrund der Bearbeitungsdauer von 0 Zeiteinheiten nimmt auch der späteste Startzeitpunkt von Arbeitsgang  $J$  diesen Wert an. Die verbleibenden Arbeitsgänge werden rückwärts, d. h. nach absteigender Ordnungszahl, betrachtet. Der späteste Endzeitpunkt  $LFT_j$  eines Arbeitsgangs  $j$  bestimmt sich als Minimum der spätesten Startzeitpunkte aller direkten Nachfolger  $i \in \mathcal{F}_j$ . Der späteste Endzeitpunkt  $LST_j$  kann berechnet werden, indem die Bearbeitungszeit  $d_j$  vom spätesten Endzeitpunkt abgezogen wird.

Auf der Basis der frühesten und spätesten Start- und Endzeitpunkte können für die Arbeitsgänge Pufferzeiten bestimmt werden. Es kann beispielsweise berechnet werden, wie lange ein Arbeitsgang verzögert werden darf, ohne den Fertigstellungstermin des Projekts zu gefährden oder wie lange ein Arbeitsgang verzögert werden darf, ohne das Zeitfenster auch nur eines anderen Arbeitsgangs einzuschränken.<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> Vgl. Demeulemeester und Herroelen (2002), S. 100-101.

## 2.4 Das Grundmodell zur Kapazitätsplanung: Das ressourcenbeschränkte Projektplanungsproblem (RCPSP)

### 2.4.1 Modellannahmen

Bei der Zeitplanung wurde die Konkurrenz der unterschiedlichen Arbeitsgänge um knappe Ressourcen noch nicht berücksichtigt. Stattdessen wurde nur sichergestellt, dass alle durch die Projektstruktur definierten Reihenfolgebeziehungen eingehalten werden. In der Realität muss für die Terminierung der einzelnen Arbeitsgänge aber immer auch sichergestellt werden, dass zu jedem Zeitpunkt ausreichend Ressourcen zur Verfügung stehen, um alle in Bearbeitung befindlichen Arbeitsgänge auszuführen. Zur Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Kapazitätsplanung kann das ressourcenbeschränkte Projektplanungsproblem (engl. Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)) genutzt werden. Die zum Teil bereits vorgestellten Annahmen für die Modellierung werden im Folgenden erläutert.

Für die Fertigstellung eines Projekts müssen  $J$  Arbeitsgänge ausgeführt werden. Beim ersten Arbeitsgang handelt es sich um den Dummy-Arbeitsgang „Beginn“ ( $j = 1$ ) und beim letzten Arbeitsgang um den Dummy-Arbeitsgang „Ende“ ( $j = J$ ). Für jeden Arbeitsgang  $j$  ist definiert, welche Arbeitsgänge  $i \in P_j$  beendet werden müssen, bevor mit der Bearbeitung von Arbeitsgang  $j$  begonnen werden darf. Die Arbeitsgänge sind topologisch sortiert, so dass ein Vorgänger  $i$  stets eine kleinere Ordnungszahl hat als sein Nachfolger  $j$  ( $i < j$ ).

Der Planungszeitraum erstreckt sich über  $T$  Perioden. Der Startzeitpunkt des Projekts wird als  $t = 0$  definiert.

Der Parameter  $d_j$  gibt Auskunft über die Bearbeitungsdauer des Arbeitsgangs  $j$ . Da in den im Folgenden vorgestellten Modellen eine Zeiteinteilung in diskrete Perioden erfolgt, wird angenommen, dass diese Dauer ganzzahlig ist. Es handelt sich bei dieser Annahme allerdings um keine (wesentliche) Einschränkung der Allgemeinheit, da über eine geeignete Skalierung der Zeitachse nicht-ganzzahlige Bearbeitungsdauern in ganzzahlige Werte überführt werden können.<sup>18</sup> Die Dummy-Arbeitsgänge haben dabei eine Dauer von 0 Zeiteinheiten. Die für die Bearbeitungszeit von Arbeitsgang  $j$  von Ressource  $r$  in jeder Periode benötigten Kapazitäten werden durch  $k_{jr}$  wiedergegeben. Es werden dabei nur erneuerbare Ressourcen betrachtet. Diese Ressourcen sind in jeder Periode in einem gewissen Umfang nutzbar. Es kann sich dabei beispielsweise um Maschinen handeln, die pro Tag

---

18 Vgl. Klein (2000), S. 74.

eine gewisse Anzahl von Stunden zur Verfügung stehen. Wird einerseits die Ressource in einer Periode nicht komplett ausgelastet, so kann die Restkapazität in folgenden Perioden nicht zusätzlich genutzt werden. Andererseits steht die Ressource aber bei einer Nutzung in einer Periode dennoch in der nächsten Periode wieder im vollen Umfang zur Verfügung. Dabei muss es sich bei einer Ressource nicht um eine einzelne Maschine oder eine einzelne Arbeitskraft handeln. Stattdessen wird im Weiteren unter einer Ressource gemäß der etablierten Namenskonvention eine Kategorie verstanden, in der z. B. gleichartige Anlagen zusammengefasst werden. Die erneuerbaren Ressourcen sind im RCPSP durch die Menge  $\mathcal{R}$  gekennzeichnet. Von einer erneuerbaren Ressource  $r$  steht pro Periode die Kapazität  $K_r$  zur Verfügung.

Ergebnis der Optimierung ist die Festlegung der Endzeitpunkte aller Arbeitsgänge. Dabei kann die Zielfunktion des RCPSP verschiedene Ausprägungen aufweisen.<sup>19</sup> Weit verbreitet ist vor allem die Projektdauerminimierung.<sup>20</sup> Auch in der in diesem Kapitel vorgestellten Modellformulierung ist die Minimierung der gesamten Projektdauer Ziel der Optimierung. Im Folgenden werden zwei verschiedene Ansätze dargestellt, wie die vorgestellte Problemstellung modelliert werden kann.

## 2.4.2 Mathematische Modellformulierungen

### 2.4.2.1 Modellformulierung in stetiger Zeit

Für die Modellformulierung in stetiger Zeit wird als Entscheidungsvariable die reellwertige Variable  $FT_j$  definiert.<sup>21</sup> Sie beschreibt den Endzeitpunkt von Arbeitsgang  $j$ . Da angenommen wurde, dass es sich bei den Bearbeitungsauern um ganzzahlige Werte handelt, nimmt diese Variable bei einem Ablaufplan mit minimaler Projektdauer trotz ihrer Stetigkeit allerdings nur ganzzahlige Werte an. Zudem wird eine Menge  $S_t$  eingeführt. Diese Menge enthält alle Arbeitsgänge, die zum Zeitpunkt  $t$  bearbeitet werden.<sup>22</sup>

$$S_t := \{j \mid (FT_j - d_j) \leq t < FT_j\} \quad (2.1)$$

<sup>19</sup> Vgl. Talbot (1982), S. 1200.

<sup>20</sup> Vgl. zu den Gründen für die Minimierung der Projektdauer Drexl et al. (1997), S. 98.

<sup>21</sup> Vgl. Zimmermann et al. (2010), S. 122.

<sup>22</sup> Vgl. Zimmermann et al. (2010), S. 124. Es wird dabei angenommen, dass die durch einen Arbeitsgang  $j$  beanspruchte Ressource zum Endzeitpunkt  $FT_j$  freigegeben wird, dass zu diesem Zeitpunkt also kein Ressourcenverzehr mehr auftritt. Die Bearbeitungszeit ist daher  $[FT_j - d_j, FT_j]$ .



Auf der Basis der geschilderten Modellannahmen kann das RCPSP in stetiger Zeit (RCPSP-stetig) durch die folgenden Indizes, Mengen, Parameter, Zielfunktion und Nebenbedingungen definiert werden.<sup>23</sup>

### Indizes und (geordnete) Mengen

|                        |   |
|------------------------|---|
| $j, i \in \mathcal{J}$ | topologisch sortierte Arbeitsgänge mit $i, j = 1, \dots, J$     |
| $j \in \mathcal{S}_t$  | Menge der Arbeitsgänge, die zum Zeitpunkt $t$ bearbeitet werden |
| $i \in \mathcal{P}_j$  | Menge der Vorgänger von Arbeitsgang $j$                         |
| $r \in \mathcal{R}$    | Menge der erneuerbaren Ressourcen                               |
| $t \in [0, T]$         | Zeitpunkte  |

### Parameter

|          |  |
|----------|--|
| $d_j$    | Dauer von Arbeitsgang $j$  |
| $k_{jr}$ | Belastung von Ressource $r$ bei Durchführung von Arbeitsgang $j$ |
| $K_r$    | Kapazität von Ressource $r$                                      |

### Entscheidungsvariablen

|        |                                  |
|--------|----------------------------------|
| $FT_j$ | Endzeitpunkt von Arbeitsgang $j$ |
|--------|----------------------------------|

### Modell RCPSP-stetig

$$\min Z = FT_J \quad (2.2)$$

unter Beachtung der Restriktionen

$$FT_i \leq FT_j - d_j \quad j \in \mathcal{J}; \quad i \in \mathcal{P}_j \quad (2.3)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{S}_t} k_{jr} \leq K_r \quad r \in \mathcal{R}; \quad t \in [0, T] \quad (2.4)$$

$$FT_j \geq 0 \quad j \in \mathcal{J} \quad (2.5)$$

Durch die Zielfunktion 2.2 wird der Fertigstellungszeitpunkt des letzten Arbeitsgangs  $J$  minimiert. Durch die Nebenbedingung 2.3 wird sichergestellt, dass

---

23 Vgl. Zimmermann et al. (2010), S. 124 und S. 207.

ein Arbeitsgang  $j$  erst dann begonnen werden darf, wenn alle direkten Vorgänger  $i \in \mathcal{P}_j$  beendet wurden. Mit Hilfe der Restriktion 2.4 wird der Ressourcenverzehr zu jedem Zeitpunkt  $t$  auf die Kapazität  $K_r$  begrenzt. Die Ungleichung 2.5 sorgt dafür, dass kein Arbeitsgang vor dem Zeitpunkt Null begonnen wird.

Bei dieser Modellformulierung handelt es sich um eine sehr übersichtliche Darstellung der zugrunde liegenden Problemstellung. Problematisch ist an dieser Modellierung allerdings, dass keine Aussage darüber getroffen wird, wie die modellendogene Menge  $S_t$  aus Restriktion 2.4 bestimmt wird. Aus diesem Grund kann für das Modell mit bekannten Lösungsverfahren für lineare Optimierungsmodelle keine Lösung bestimmt werden.<sup>24</sup> Im Folgenden wird daher eine gemischt-ganzzahlige Modellformulierung vorgestellt, die mit bekannten Standard-Lösungsverfahren, wie z. B. einem Branch-and-Bound-Verfahren, gelöst werden kann.

#### 2.4.2.2 Modellformulierung in diskreter Zeit

In der Modellformulierung in diskreter Zeit wird zur Darstellung der Endzeitpunkte der einzelnen Arbeitsgänge  $j$  eine Binärvariable eingeführt.<sup>25</sup> Diese Entscheidungsvariable  $x_{jt}$  wird auf 1 gesetzt, wenn der Vorgang  $j$  am Ende von Periode  $t$  beendet wird. Ist dies nicht der Fall, nimmt sie den Wert 0 an. Der Zeitindex  $t$  wird folglich nicht mehr als Zeitpunkt, sondern als Periode definiert.

Im Vergleich zum zeitstetigen Modell wird die Anzahl an Variablen durch die Einführung dieser Binärvariable sehr stark erhöht. Um diese Anzahl zu begrenzen, wird die Binärvariable  $x_{jt}$  für jeden Arbeitsgang nur zwischen dem frühesten und dem spätesten Fertigstellungszeitpunkt definiert. Der Lösungsraum wird dadurch nicht eingeschränkt.

Das RCPSP in diskreter Zeit kann durch die folgenden zusätzlichen Daten, Zielfunktion und Nebenbedingungen definiert werden.<sup>26</sup>

#### Geordnete Indexmenge

$t, \tau \in \mathcal{T}$       Perioden mit  $t, \tau = 1, \dots, T$

#### Parameter

$EFT_j$       Frühester Endzeitpunkt von Arbeitsgang  $j$   
 $LFT_j$       Spätester Endzeitpunkt von Arbeitsgang  $j$

<sup>24</sup> Vgl. Talbot und Patterson (1978), S. 1165.

<sup>25</sup> Vgl. Pritsker et al. (1969), S. 94.

<sup>26</sup> Vgl. Klein (2000), S. 79-80.

Ressourcenbeschränkte Projektplanung für flexible  
Projekte

Kellenbrink, C.

2014, XXV, 172 S. 31 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-02870-1