

**Programm-, Ressourcen- und  
Prozessoptimierung als Bestandteile der  
Anpassungsplanung von spanenden  
Fertigungssystemen in der Fließfertigung  
von Aggregaten**

**Dissertation  
zur Erlangung der Würde eines Doktors  
der Wirtschaftswissenschaften (Dr. rer. pol.)  
der Universität Paderborn**

**Vorgelegt von  
Dipl.- Ing. Christian Tonigold**

**Paderborn, Dezember 2007**

Hauptbericht: Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier  
Mitbericht: Prof. Dr. Leena Suhl



## Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik zur **Anpassungsplanung** von Fertigungssystemen entwickelt, die die Investitionsentscheidung in frühen Konzeptphasen erleichtern soll. Sie basiert auf **mathematischen Modellen zur Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung**. Das fokussierte Anwendungsgebiet ist die spanende Fließfertigung von Aggregaten.

Die **prognostizierte Marktnachfrage** herzustellender Produkte bildet die grundlegende Basis für planerische Aufgaben bei der Konzeption eines neuen Fertigungssystems. Auf dort getroffene Aussagen hin bzgl. zu erwartender Stückzahlen und Varianten über dem **Lebenszyklus einer Anlage** werden diese ausgelegt. Basierend auf der Nachfrageprognose wird das **Produktionsprogramm** erstellt, das zwei Komponenten enthält. Zum einen ist eine **horizontale Komponente** zu nennen, die die Verteilung von Produktionsstückzahlen auf parallele Linien regelt. Zum Beispiel ist eine Systemstruktur denkbar, bei der die Basisvariante über eine spezielle, hochproduktive Anlage läuft und konstruktiv abweichende Produktvarianten mit niedrigeren Stückzahlvolumina über eine produktflexible Linie. Die **vertikale Komponente** innerhalb der Programmplanung beschreibt basierend auf einer Stückliste das Zusammenspiel vor- und nachgelagerter Wertschöpfungsstufen. Ein nicht zu beseitigender Engpass in einer vorgelagerten Stufe kann zu einer Fremdvergabe der dort stattfindenden Wertschöpfung führen. Beide Aspekte, sowohl die horizontale Abstimmung als auch die vertikale, werden in einem **integrierten Modell** untersucht. Ein zusätzlicher Gesichtspunkt ist, dass durch eine auf statischen Eingangsgrößen hinsichtlich des Marktverhaltens basierende **Programm- und Ressourcenplanung** der wirtschaftliche Erfolg der Investition nicht garantiert werden kann, weil Veränderungen an den Eingangsgrößen von vornherein zu anderen Planungsergebnissen geführt hätten. Ein Lösungsansatz besteht darin, zu bewertende Fertigungskonzepte dahingehend zu untersuchen, wie sie sich auf unvorhergesehene Marktänderungen anpassen können. Dies können **grobe technische Anpassungen** sein – z.B. Erhöhung der Anlagenkapazität durch Ankopplung eines weiteren Produktionsmoduls – aber auch **organisatorische Maßnahmen**, beides jeweils in Verbindung mit entsprechenden Kosten. Werden anschließend mehrere Marktszenarien unter Einbeziehung dieser Anpassungsmöglichkeiten berechnet und der optimale Anpassungspfad über dem Lebenszyklus des Systems ermittelt, werden diejenigen Anlagen mit dem „am besten geeigneten“ Maß an Anpassungsflexibilität am kostengünstigsten abschneiden, da die Flexibilität einen erheblichen Einfluss auf die Investitionssumme bzw. die laufenden Kosten einer Anlage hat. Ein weitergehender Schritt in diesem Zusammenhang ist die **Ressourcen und Prozessplanung**. Im Falle einer Anlagenneuplanung stehen die Produkte mit ihren konstruktiven Details bereits fest. Schließlich werden bei der Aus-

gestaltung der Anlage vorgegebene Taktzeiten, Bearbeitungsschritte und -zeiten benötigt. Verschiebt sich etwa im Rahmen der angeführten Berechnung verschiedener Marktszenarien die Nachfrage nach oben, so kann auf bereits erwähnte grobe technische und organisatorische Maßnahmen zurückgegriffen werden. Jedoch besteht gleichsam die Möglichkeit, näher auf die Ressourcen und die ihnen zugeschriebenen Prozesse einzugehen. So kann die nachträgliche Installation vereinzelter technischer Produktionsressourcen in Kombination mit einer Umplanung der vorhandenen Prozesskette zur Erhöhung des Anlagenoutputs durchaus den Anforderungen aus dem Markt genügen. Dies würde lediglich zu punktuellen Eingriffen innerhalb der bestehenden Anlage und somit zu einem niedrigeren Investitionsvolumen bzw. Anpassungsaufwand beitragen. Eine so generierte, „feine Anpassungsalternative“ hinsichtlich der Technik kann anschließend in die oben erwähnte Lebenszyklusbetrachtung und damit in die Programm- und Ressourcenplanung einfließen. In manchen Fällen lassen sich damit weitaus günstigere Investitionsalternativen identifizieren und kostspielige Fehlplanungen vermeiden.

**Schlagwörter:** Programmplanung, Ressourcenplanung, Prozessplanung, mathematische Optimierung, Flexibilität, Unsicherheit, Marktdynamik

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Ausgangssituation und Gegenstand der Arbeit</b> .....	<b>4</b>
2.1 Das Marktverhalten als Treiber für die Anpassungsplanung.....	4
2.2 Programm- und Ressourcenplanung für ein Fertigungssystem .....	6
2.3 Ressourcen- und Prozessplanung für ein Fertigungssystem.....	8
<b>3 Stand der Technik und Diskussion der vorgestellten Ansätze</b> .....	<b>12</b>
3.1 Der Planungsprozess von Fertigungssystemen und der Umgang mit Unsicherheiten .....	12
3.2 Vorhandene Ansätze zur Programm- und Ressourcenplanung über dem Lebenszyklus einer Fertigungsanlage .....	19
3.3 Vorhandene Ansätze zur Ressourcen- und Prozessplanung .....	21
3.3.1 Konfigurationsplanung von Fertigungssystemen .....	22
3.3.2 Leistungsabstimmung in der Fließfertigung.....	26
<b>4 Forschungsbedarf und Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik</b> .....	<b>30</b>
4.1 Berücksichtigung von Unsicherheiten als Eingangsdaten für die Anpassungsplanung .....	30
4.2 Handlungsbedarf in der Programm- und Ressourcenplanung .....	30
4.3 Handlungsbedarf in der Ressourcen- und Prozessplanung .....	32
<b>5 Konzept zur Anpassungsplanung von Fertigungssystemen</b> .....	<b>38</b>
5.1 Marktentwicklung als Parameter der Anpassungsplanung .....	39
5.2 Konzept zur Programm- und Ressourcenplanung .....	40
5.2.1 Benötigte Eingangsparameter.....	40
5.2.2 Antizipation der Flexibilitätsnutzung .....	41
5.2.3 Resultate .....	43
5.3 Konzept zur Ressourcen- und Prozessplanung .....	46
5.3.1 Benötigte Eingangsparameter.....	47
5.3.2 Antizipation der Flexibilitätsnutzung .....	51
5.3.3 Resultate .....	53
<b>6 Optimierungsmodelle zur Anpassungsplanung von Fertigungssystemen</b> .....	<b>56</b>
6.1 Optimierungsmodell zur Programm- und Ressourcenplanung.....	56

6.1.1 Eingangsgrößen.....	57
6.1.2 Entscheidungsvariablen .....	61
6.1.3 Zielfunktion.....	63
6.1.4 Nebenbedingungen.....	64
6.2 Optimierungsmodell zur Ressourcen- und Prozessplanung.....	72
6.2.1 Eingangsgrößen.....	73
6.2.2 Entscheidungsvariablen .....	76
6.2.3 Zielfunktion.....	78
6.2.4 Nebenbedingungen.....	79
6.3 Kopplung der beiden Modelle .....	91
<b>7 Validierung der Modelle an einem Beispiel .....</b>	<b>94</b>
7.1 Produkt und Marktverhalten als Planungsgrundlage.....	94
7.2 Produkt und zu bewertende Fertigungskonzepte im Kontext.....	96
7.2.1 Hybrides Fertigungssystem.....	98
7.2.2 Flexibles Fertigungssystem.....	102
7.3 Ergebnisse aus der Programm- und Ressourcenplanung.....	107
7.4 Ressourcen- und Prozessplanung im Beispiel.....	115
7.4.1 Funktionelle Beschreibung der Zylinderkopflinie des flexiblen Systems .....	116
7.4.2 Spezifikation der Linie und der Bearbeitungsprozesse.....	118
7.4.3 Problemstellung und Zielsetzung.....	127
7.4.4 Ergebnisse aus der Optimierung .....	127
7.5 Programm- und Ressourcenplanung unter Einbeziehung der durchgeföhrten Ressourcen- und Prozessplanung .....	133
7.6 Kritische Würdigung der Modelle und der Planungswerzeuge.....	137
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>140</b>
<b>A Anhang: Konzeptumsetzung unter Einbeziehung der erstellten     Optimierungsmodelle .....</b>	<b>143</b>
A.1 Modul zur Generierung von Marktszenarien .....	144
A.2 Modul zur Programm- und Ressourcenplanung.....	148
A.3 Modul zur Ressourcen- und Prozessplanung .....	161
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>171</b>

## 1 Einleitung

Bei der Planung von Fertigungssystemen werden überwiegend **sequenzielle Planungsschemata** angewandt. Es werden Anforderungen an das zu installierende System aus dem herzstellenden Produkt abgeleitet und in entsprechende Fertigungsstrukturen und -elemente übersetzt. Dieses Vorgehen ist praktikabel, solange sich an den Anforderungen aus Produkt und Markt nichts ändert. Da jedoch insbesondere in den letzten beiden Jahrzehnten zu beobachten war, dass diese Voraussetzung immer weniger gegeben ist, sollte, was den grundsätzlichen Planungsprozess anbetrifft, ein Umdenken stattfinden. Die Beantwortung von „**Was wäre wenn...?**“-Fragen sollte verstärkt in den Mittelpunkt gestellt werden. Dieser Anspruch erschwert den ohnehin bereits komplexen Planungsprozess zusätzlich, weshalb die Planer mit entsprechenden Hilfsmitteln auszustatten sind, die sie bei der Findung des bestgeeigneten Fertigungssystems unterstützen. Eine Produktionsanlage ist dann „optimal“ auf die Fertigungsaufgabe ausgerichtet, wenn sie sich aus monetärer Sicht möglichst **robust gegenüber Änderungen an den Planungsprämissen und damit den Anforderungen aus dem Markt** erweist, also **flexibel** darauf reagieren kann. Dies schließt auch einen Umbau der Anlage mit ein, solange dieser mit einem vertretbaren finanziellen Aufwand durchgeführt werden kann. Es muss innerhalb einer **Anpassungsplanung** möglich sein, die Frage nach der Reaktionsfähigkeit eines Fertigungssystems nicht mehr nur rein qualitativ zu beantworten, sondern quantitative Kostenaussagen zu treffen.

Notwendige **Anpassungen an einem Fertigungssystem** werden vor allem durch zwei Einflussfaktoren hervorgerufen: schwankende oder unerwartete Produktionsstückzahlen sowie neue bzw. angepasste Produktvarianten. Diesbezügliche **Unsicherheiten** sollten noch während des Planungsprozesses einer Anlage Berücksichtigung finden und werden vor allem durch gesamtwirtschaftliche Faktoren, die Preisentwicklung von Energieträgern, gesellschaftliche und politische bzw. steuerliche Rahmenbedingungen sowie laufende Umweltdebatten beeinflusst. Insbesondere auf der Ebene der **Programm- und Ressourcenplanung** müssen diese Unsicherheiten berücksichtigt werden, denn hier wird bezogen auf den Anlagenlebenszyklus über die auf dem System herzstellenden Stückzahlen und Varianten sowie auf grober Detaillierungsebene über die Struktur des Fertigungssystems entschieden. Auf der Ebene der **Ressourcen- und Prozessplanung** geht es um die detaillierte Ausgestaltung des Systems mit Produktionsressourcen und die Zuteilung von Fertigungsprozessen auf diese Ressourcen. Auch auf dieser Ebene können Systemanpassungen vorgenommen werden. Es muss eine Methodik entwickelt werden, die es erlaubt, dass gewonnene Ergebnisse aus der detaillierten Ressourcen- und Prozessplanung in der übergeordneten Programm- und Ressourcenplanung übernommen werden können. Grundkonzepte aus der Programm- und Ressourcenplanung

müssen ihrerseits als Basis für die Ressourcen- und Prozessplanung verwendet werden können.

Was in frühen Konzeptphasen keinesfalls geleistet werden kann, ist eine Betrachtung von Problemfeldern der operativen Ebene. So können in einer solchen Planungsphase keinerlei Aussagen hinsichtlich der Sequenzbildung, Auftragseinlastung oder Losgrößenbildung getroffen werden, auch wenn entsprechende Ansätze u.a. aus [YaBo88], [BoYa89], [KeDu95], [Mull98], [Mull02] und [MuTa05] entnommen werden könnten, deren Autoren sich allesamt mit der Feinplanung von Fertigungssystemen auf der Prozessebene beschäftigt haben. Ebenso irrelevant ist im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit eine Glättung der Auslastung über alle Produktvarianten und Stationen einer Fertigungsanlage hinweg. Vielmehr ist es im Rahmen der Feinplanung völlig ausreichend, wenn bei der Suche nach der **kostengünstigsten Systemkonfiguration** die zur Verfügung stehende Taktzeit von keiner Variante in keiner Station überschritten wird. Im Fokus steht demnach die Identifizierung der wirtschaftlichsten Form einer Fertigungsanlage, wobei diese „Form“ stets nur ein möglicher Anpassungszustand dieser Anlage sein kann, der zeitlich begrenzt das kostenmäßige Optimum unter den momentan vorherrschenden (Markt-)Bedingungen darstellt. Maschinenausfälle und die Bildung von Warteschlangen innerhalb eines Fertigungssystems spielen in der vorliegenden Arbeit ebenfalls keine Rolle, da in frühen Planungsphasen darüber nur unzureichende Informationen vorliegen. Stochastische Prozesszeiten treten überwiegend in jenen Bereichen auf, in denen der Mensch die hauptsächlich bearbeitende Ressource darstellt wie etwa in der Montage. Dort sollten sie bei der Planung entsprechend berücksichtigt werden (vgl. [KuTe97]).

In der vorliegenden Arbeit ist der Fokus auf die **großserielle, spanende Aggregatefertigung** gerichtet, da hier die Investitionssummen bei der Installation eines neuen Fertigungssystems aufgrund des hohen Produktionsvolumens und den strengen Qualitätsanforderungen in der Regel beträchtlich sind. Fehlplanungen haben damit drastische Auswirkungen auf den wirtschaftlichen Erfolg der Investition bzw. des kompletten Unternehmens. Aufgrund der hohen technischen und wirtschaftlichen Anforderungen sind derartige Fertigungsanlagen meist nach dem **Fließprinzip** aufgebaut. Der einzuhaltende Fertigungsprozess bestimmt die Art und Anordnung der Ressourcen. Stationen sind oft durch hoch spezialisierte Maschinen, eine einzuhaltende interne Bearbeitungssequenz und meist eine feste Taktzeit charakterisiert. Es existieren folgende Ausprägungsarten, wobei die erste und – zumindest am Rande – die letzte die Grundlage der vorliegenden Arbeit bilden:

- Bei der **Fließbandfertigung** sind die einzelnen Stationen durch ein streng getaktetes Fließband miteinander verbunden, was einen stetigen und gleichmäßigen Strom an Bauteilen ermöglicht. Meist gelingt eine völlige Angleichung der Arbeitsinhalte der

Stationen an die Vorgabetaktzeit nicht ganz, so dass im Großteil der Stationen mit so genannten Austaktungsverlusten gerechnet werden muss. Zudem führen Stationsausfälle zu einem Produktionsstillstand aufgrund der starren Verkettung.

- Diese Ausfälle können dadurch abgemildert werden, indem zwischen den Stationen Puffer eingerichtet werden, die im Falle einer Stationsstörung Bauteile aufnehmen oder abgeben. Hierbei handelt es sich um eine **Fließstraßenfertigung** oder **elastische Fließfertigung**.
- Wenn die Verschiedenartigkeit der auszuführenden Produktionsprozesse eine strenge Austaktung nicht zulässt, so wird von der **Fließreihenfertigung** oder **losen Fließfertigung** gesprochen.

Bei der Fließbandfertigung lassen sich nach [BeSc06] drei unterschiedliche Arten der Fertigung unterscheiden:

- **single-model-line:** Produktion von **nur einem Produkt** oder von Produkten mit identischen Bearbeitungszeiten.
- **mixed-model-line:** Produktion **mehrerer Produkte** in einer **beliebigen Reihenfolge**. Die Bearbeitungszeiten der Produkte können sich bei den einzelnen Bearbeitungsprozessen voneinander unterscheiden. Diese Problematik kann durch Puffer ausgeglichen werden, wenn die Produktionsreihenfolge der Produkte sich nicht zu sehr unterscheidet. Alternativ sollten die Bearbeitungszeiten je Arbeitsstation für die einzelnen Produkte nicht erheblich voneinander abweichen, damit sich keine Warteschlangen bilden.
- **multi-model-line:** Produktion von **mehreren Produkten** in größeren Mengeneinheiten, so genannten **Losen**. Diese Produktionsart wird dann angewandt, wenn Maschinen oder Anlagen von einem zum anderen Produkt umgerüstet werden müssen und der Umrüstvorgang viel Zeit beansprucht. Auch lässt sich dadurch die Anzahl an bereitzustellenden Anbauteilen auf diejenigen beschränken, die für das momentan gefertigte Produkt benötigt werden. Außerdem kann so die Prozessgüte leichter kontrolliert werden.

Insbesondere die Arten „mixed-model-line“ sowie „multi-model-line“ werden im weiteren Verlauf der Arbeit behandelt, denn auch im Aggregatebau sind verschiedene Varianten eines Erzeugnisses zu fertigen.

## 2 Ausgangssituation und Gegenstand der Arbeit

### 2.1 Das Marktverhalten als Treiber für die Anpassungsplanung

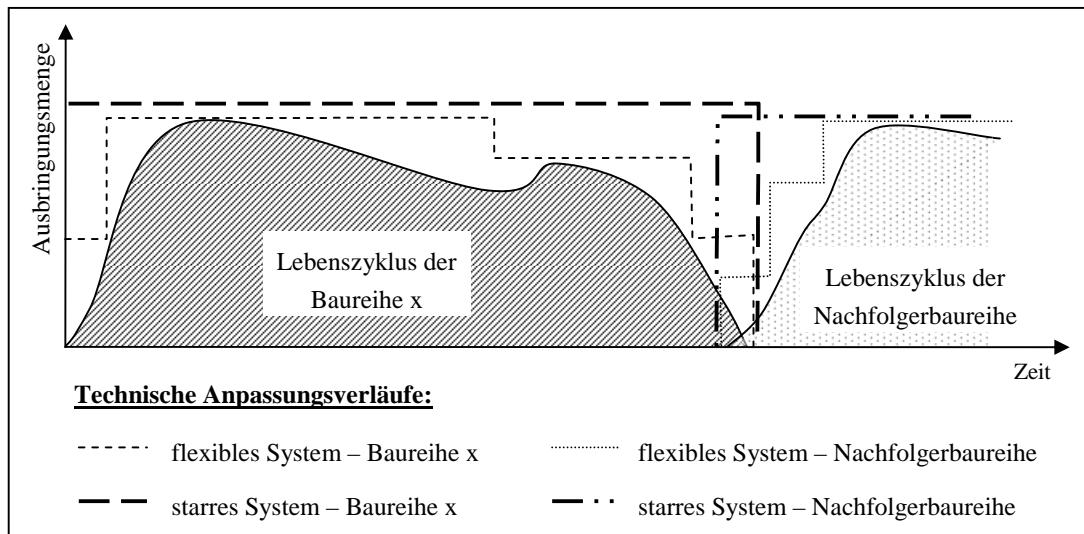
**Ausgangspunkt der betrieblichen Planung ist die Absatzprognose.** Sie liefert die Basis für den Absatzplan, aus welchem unter anderem der Produktionsplan abgeleitet wird [vgl. Wöhe02, S. 468]. Die Absatzplanung ist dabei mit Schwierigkeiten verbunden, da die **prognostizierten Absatzmengen** in der Regel **unsicher** sind und **mit zunehmendem Zeithorizont unpräziser** werden. Nahmias formuliert in [Nahm05, S. 55] einige Eigenschaften, die allgemein auf Prognosen zutreffen; darunter finden sich z.B. folgende:

- Prognosen sind für gewöhnlich falsch,
- eine gute Vorhersage besteht aus mehr als einer Zahl,
- je weiter Vorhersagen in die Zukunft reichen, umso ungenauer werden sie.

Diese drei Punkte bringen in ganz besonderem Maße zum Ausdruck, dass eine Planung keinesfalls auf einer statischen Prognose beruhen sollte, was im Umkehrschluss zu einer Vielzahl von Planungsläufen unter geänderten Eingangsdaten führt. Wird ein neues Fertigungssystem geplant, so sollte dieses in der Lage sein, sich im späteren Betrieb auf verschiedene **Marktbedingungen** einzustellen, sich also flexibel auf diverse Markterfordernisse anzupassen. Da **Flexibilität** meist einen gewissen **finanziellen Mehraufwand** bedeutet, darf nicht ein beliebig flexibles Konzept ausgewählt werden. Die Flexibilitätsmerkmale müssen vielmehr optimal auf die Anforderungen zugeschnitten sein. Es muss also eine Planungsmethodik zur Verfügung gestellt werden, mit der es möglich ist, genau dieses optimale Maß an Flexibilität zu ermitteln und den Aufwand für die Anpassungen eines geplanten Fertigungssystems über dem Anlagenlebenszyklus monetär fassbar zu machen.

Ein weiterer Punkt, der eine Anpassungsplanung erforderlich macht, ist die **aktuelle Entwicklung** von sich **verkürzenden Produktlebenszyklen**. Ein Produkt muss zunehmend den heterogenen Anforderungen der Kunden genügen, um verkauft werden zu können. Für die Hersteller bedeutet dies neben einer verbreiterten Produktpalette vor allem, dass möglichst variabel produziert werden kann, um die geforderten Varianten darstellen zu können, woraus sich ebenfalls ein nicht unerheblicher Flexibilitätsbedarf ableiten lässt. Dies gilt umso mehr, wenn nachträglich, also nach der Installation der entsprechenden Fertigungssysteme, Änderungen am Produkt(-spektrum) vorgenommen werden sollen.

Ein anderer Aspekt, der einen gewissen Flexibilitätsgrad einfordert und damit eine Anpassungsplanung über dem Anlagenlebenszyklus nötig macht, liegt im generellen Verlauf der Nachfragekurve nach Produkten begründet. Eine schematische Darstellung bezogen auf eine Baureihe und deren Nachfolger findet sich in folgender Abbildung:



**Abbildung 2-1:** Kapazitätsanpassungen über dem Lebenszyklus zweier aufeinander folgender Baureihen für flexible und starre Fertigungssysteme

Bei einem Stückzahlflexiblen Fertigungssystem können die Kapazitäten sehr viel enger an die Nachfragekurve angeglichen werden als es beispielsweise bei einer **starren Transferstraße** möglich ist, bei der meist die **komplette technische Kapazität zu Beginn der Produktion installiert** sein muss. Zudem gelingt es bei einem gestuften Abbau der Anlage einer Baureihe die benötigte Hallenfläche für das Fertigungssystem des Nachfolgerproduktes freizugeben. Dies ist in besonderem Maße dort von Interesse, wo Hallenfläche eine knappe Ressource darstellt wie etwa bei historisch gewachsenen Fabriken, die in ihrer Ausdehnung aufgrund z.B. angrenzender Wohngebiete oder anderer Industriebetriebe beschränkt sind.

Basierend auf den oben dargelegten Erfordernissen und Unwägbarkeiten aus dem Markt ist herauszufinden, wie sich ein spezifisches Fertigungssystem über der Zeit verhält, d.h. zu welchem Zeitpunkt es welche Mengen welchen Produktes herstellt. Im Zuge der Ressourcenplanung ist eine integrierte Programmplanung durchzuführen. Dieses Themenfeld bildet damit einen zentralen Baustein in der zu entwickelnden Methodik.

## 2.2 Programm- und Ressourcenplanung für ein Fertigungssystem

„Die Aufgabe der Planung des Fertigungsprogramms (Produktionsprogrammplanung) besteht darin, festzulegen, welche Erzeugnisse in welchen Mengen in einem bestimmten Zeitabschnitt hergestellt und verkauft werden sollen“ [Dang01, S. 59]. Im weiteren Kontext des Zitats wird zwischen der strategischen, taktischen und operativen Programmplanung unterschieden. Die operative Ebene beschäftigt sich überwiegend mit der Einplanung von konkreten Kundenaufträgen, die taktische z.B. mit der Personalplanung und die strategische mit der Fragestellung, welche Produkte an welchen Produktionsstandorten eines Unternehmens gefertigt werden sollen. Grundig's Definition für die strategische Programmplanung lautet: „Festlegung von Produktfeldern (Produktarten) und Größenordnungen zur Sicherung der Planung von langfristigen Investitionen (Flächenbedarfe, Standortfestlegungen, Gebäude, Anlagen)“ [Grun00, S. 53]. Gerade dieses zweite Zitat zeigt, dass **in frühen Planungsphasen** die **strategische Produktionsprogrammplanung nie getrennt von der langfristigen Ressourcenplanung** stattfinden sollte, da Kapazitäten von Fertigungssystemen die Produktionsmenge beeinflussen und umgekehrt. Dies wird noch deutlicher bei folgendem Zitat aus [GüTe05, S. 162]:

„Bei der Aufstellung des Produktionsprogramms sind Maßnahmen zur Abstimmung der Produktionsmengen mit den vorhandenen Kapazitäten zu ergreifen. Potentielle Engpassbereiche und -faktoren sollen rechtzeitig sichtbar gemacht und die notwendigen Anpassungsmaßnahmen eingeleitet werden. Hierzu kommt sowohl die Anpassung der Belastung an die Kapazität [...] als auch die Anpassung der Kapazität an die Belastung [...] in Frage.“

Im weiteren Verlauf wird darauf hingewiesen, dass bei der Produktionsprogrammplanung einerseits eine horizontale Abstimmungskomponente und andererseits eine vertikale zur Geltung kommen müssen. Sollten bei einer verteilten Produktion mehrere Fertigungssysteme in der Lage sein, das betreffende Produkt herzustellen, so ist in der **horizontalen Abstimmung** darüber zu entscheiden, **auf welchen Ressourcen welche Mengen hergestellt werden** sollen. Handelt es sich um ein Zwischenprodukt, so ist zusätzlich auf **vertikaler Ebene** zu überprüfen, ob **vor- oder nachgelagerte Fertigungssysteme** in der Lage sind, die geplanten Mengen zu verarbeiten. Auch der Autor in [Schm95, S. 164] führt den Sachverhalt an, dass sich Programmplanung und Ressourcenplanung nicht trennen lassen und beschreibt das so genannte **Inversionsgesetz der Fabrikplanung** mit den folgenden Kernaussagen:

- „Die vorausschauende Festlegung des Produktionsprogramms bestimmt primär Funktion, Dimension und Struktur der zukünftigen Fabrik.“
- „Die Treffsicherheit bei der Festlegung des Produktionsprogramms beeinflusst maßgeblich die Wirtschaftlichkeit der Investition.“

- *Da das Produktionsprogramm mit dem Absatzprogramm direkt korrespondiert, gehen die größten Einflüsse auf die Planung der zukünftigen Fabrik vom zukünftigen Absatzmarkt aus.“*

Weiter heißt es:

*„Abweichungen des späteren tatsächlichen vom geplanten Produktionsprogramm können zu Abweichungen bei den Fertigungsprozessen, den Belastungszeiten der Betriebsmittel sowie den Transportströmen (hinsichtlich Richtung und Intensität) führen. Diese Abweichungen können wiederum ‚durchschlagen‘ auf den Maschinen-, Flächen- und Personalbedarf, auf das Transport-, Lager- und Umschlagsystem sowie letztlich auf die Wirtschaftlichkeit der Investition.“*

Es wird also wiederholt gefordert, dass bei der **Programm- und Ressourcenplanung** ein **grundsätzlicher Abstimmungsprozess zwischen den Anforderungen des Marktes und den zu installierenden Ressourcen** des zukünftigen Fertigungssystems vorgenommen werden soll. Diese Forderung wird auch in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen und **auf die strategische bzw. taktische Planung projiziert**. Einige andere Autoren greifen ebenfalls diesen Anspruch auf, sehen ihn jedoch auf die operative Planungsebene beschränkt. Meist wird er jedoch völlig vernachlässigt und es kommt ein konventionelles, sequenzielles Planungsvorgehen zum Einsatz, wie es in Kapitel 3.1 aufgezeigt wird.

Relevante Literaturstellen bilden Forschungsarbeiten aus den Gebieten der Fabrik- und Standortplanung sowie der Programmplanung.

Viele der vorhandenen Lösungsmethodiken aus der Standort- und Programmplanung greifen auf das Instrument der mathematischen Optimierung zurück. Um hieraus entsprechende Ansätze übernehmen zu können, soll die in der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Methodik zur Anpassungsplanung ebenfalls auf mathematischen Optimierungsmodellen basieren. Zusätzlich kann auf diese Art und Weise der Aufwand zur Implementierung einer Heuristik umgangen werden. Es wird damit gerechnet, dass die sich ergebenden Problemstellungen durch ein exaktes Verfahren in einer akzeptablen Zeit gelöst werden können.

Wird der geforderte Abstimmungsprozess zwischen dem Markt und den Ressourcen konsequent weitergedacht, so stellt sich letztlich die Frage, wie die Prozesskette, die durch die Ressourcen dargestellt wird, ihren Beitrag innerhalb der Anpassungsplanung leisten kann. Sollten Systemanpassungen erforderlich sein, so können diese auch durch kleinere Eingriffe bezüglich der Zuordnung von Prozessen auf Stationen und Maschinen vorgenommen werden. Somit kann die Ressourcen- und Prozessplanung als weiterer zentraler Kern der zu entwickelnden Methodik aufgefasst werden.

## 2.3 Ressourcen- und Prozessplanung für ein Fertigungssystem

Die **Aufgaben** innerhalb der **Ressourcen- und Prozessplanung** sind tendenziell auf der Ebene der **Feinplanung von Fertigungssystemen** angesiedelt. Häufig übernimmt diesen Planungsschritt nicht der zukünftige Systemnutzer sondern ein Lieferant, da er über detailliertes Wissen bezüglich seiner angebotenen Maschinen verfügt.

Sowohl das Produkt und die notwendigen Bearbeitungsprozesse zur Herstellung einer Einheit, als auch die Ergebnisse aus der Grobplanungsphase dienen hier als Ausgangsbasis für weitere Planungsaktivitäten.

Allgemein muss zunächst eine **Gegenüberstellung von Bearbeitungsanforderung und Ressourcenpotenzial** stattfinden, um die prinzipiell denkbaren Bearbeitungsmittel herauszufiltern (vgl. [Chry06], Kapitel 4: "Process Planning").

Aufgrund der Bearbeitungselemente am Produkt und unter Zuhilfenahme von **fertigungstechnischen Tabellen**, in denen Fertigungszeiten in Abhängigkeit von Material, Werkzeug, Schnittgeschwindigkeit, Vorschub, etc. hinterlegt sind, werden anschließend **Prozesszeiten** für die verschiedenen Bearbeitungselemente in Abhängigkeit von der herausgefilterten, grundsätzlich geeigneten Fertigungstechnologie oder etwa von spezifischen Bearbeitungsmaschinen ermittelt.

Das **Ergebnis** lässt sich in eine Aussage überführen, **wie viele Maschinen welchen Typs** benötigt werden und **welche Prozesse auf welchen Bearbeitungsressourcen ausgeführt** werden, um die durchzuführenden Bearbeitungsprozesse in einer vorgegebenen Taktzeit darstellen zu können. Auf keinen Fall dürfen dabei wirtschaftliche Aspekte in den Hintergrund geraten, da letztlich die **Investitionsentscheidung** zum Großteil **auf monetären Daten beruht**. Ebenfalls eingeschlossen ist eine Planung der benötigten **Humanressourcen**, da diese, besonders in einem Hochlohnland wie Deutschland, mit von ausschlaggebender Bedeutung sein können. Daneben sind bei der Zuteilung von Arbeitsinhalten auf Fertigungsressourcen eine Reihe von Restriktionen aus der realen Welt zu beachten, wie etwa die Ausführbarkeit von Prozessen in bestimmten Bauteilaufspannungen. Mit der zu entwickelnden Methodik soll eine Ressourcen- und Prozessplanung auf Basis von reellen Problemen möglich werden. Dies setzt voraus, dass alle in der Realität vorhandenen Restriktionen, soweit notwendig und sinnvoll, entsprechend formuliert und berücksichtigt werden.

Sind die Fertigungsressourcen festgelegt und die Arbeitsvorgänge auf diese verteilt, werden **Layouts** erstellt, die eine detaillierte Abbildung der Maschinenaufstellung, der Verkettungseinrichtungen und Peripheriegeräte enthalten.

Für dieses Problem der Ressourcen- und Prozessplanung lassen sich relevante Literaturstellen aus zwei Forschungsrichtungen entnehmen:

- Zum einen finden sich ähnliche Fragestellungen bei der **Konfigurationsplanung** von Produktionssystemen – überwiegend bei der Planung von **Flexiblen Fertigungssystemen** (FFS). Hier spielen jedoch oft andere Aspekte, bedingt durch die Struktur eines solchen Systems, die zentrale Rolle, was eine direkte Übertragung auf eine Fließfertigung im Aggregatebau unmöglich macht. So sind z.B. Optimierungsvariablen bzgl. der Zwischenpuffer oder der Bauteilführung durch das System zu finden.
- Zum anderen lassen sich ähnliche Ansätze im Bereich der **Linienaustaktung**, oder anders genannt, der **Leistungsabstimmung** finden. Auch hier sind Prozesse Bearbeitungsstationen unter Berücksichtigung eines bestimmten Ziels zuzuordnen. Jedoch geht oft der **Bezug zur Produktionsressource verloren**. Dies ist darauf zurückzuführen, dass derartige Modelle überwiegend in der **Montage** Anwendung finden und dort der Mensch als die zentrale Ressource fungiert. Menschen sind extrem flexibel was ihre Prozessfähigkeit anbelangt und somit nahezu für jeden Montageprozess einsetzbar. In der mechanischen Bearbeitung von Bauteilen kommt es jedoch in hohem Maße auf die **Prozessfähigkeiten der Ressourcen**, in diesem Fall der Maschinen, an. Daher darf die Prozessfähigkeit der Ressourcen auf keinen Fall vernachlässigt werden, sondern muss vielmehr integriert mit der Festlegung der Prozessabfolge betrachtet werden. Im Rahmen der Linienaustaktung können grundlegend **vier Problemklassen** identifiziert werden:
  - ▶ vorgegebene Taktzeit und Minimierung der Anzahl an Arbeitsstationen (bei dieser Klasse wird vom „simple assembly line balancing problem“ – Typ 1 „**SALBP-1**“ gesprochen),
  - ▶ vorgegebene Stationszahl und Minimierung der Taktzeit (**SALBP-2**),
  - ▶ vorgegebene Stationszahl und vorgegebene Taktzeit (**SALBP-F**) und damit die Auslastungsglättung als vorrangiges Ziel, sowie
  - ▶ Minimierung beider Entscheidungsvariablen (**SALBP-E** oder **SALBP-G**).

Das **SALBP** ist generell durch folgende Punkte gekennzeichnet:

- ▶ Betrachtung einer Fertigungslinie mit einer **Taktzeit**
- ▶ Produktion **eines Produktes**
- ▶ **deterministische Bearbeitungszeiten** für die durchzuführenden Prozesse
- ▶ **keinerlei Restriktionen** bei der Zuweisung von Vorgängen auf Stationen außer dem Vorranggraphen
- ▶ **sequenzielle Produktionslinie** ohne parallele Ressourcen

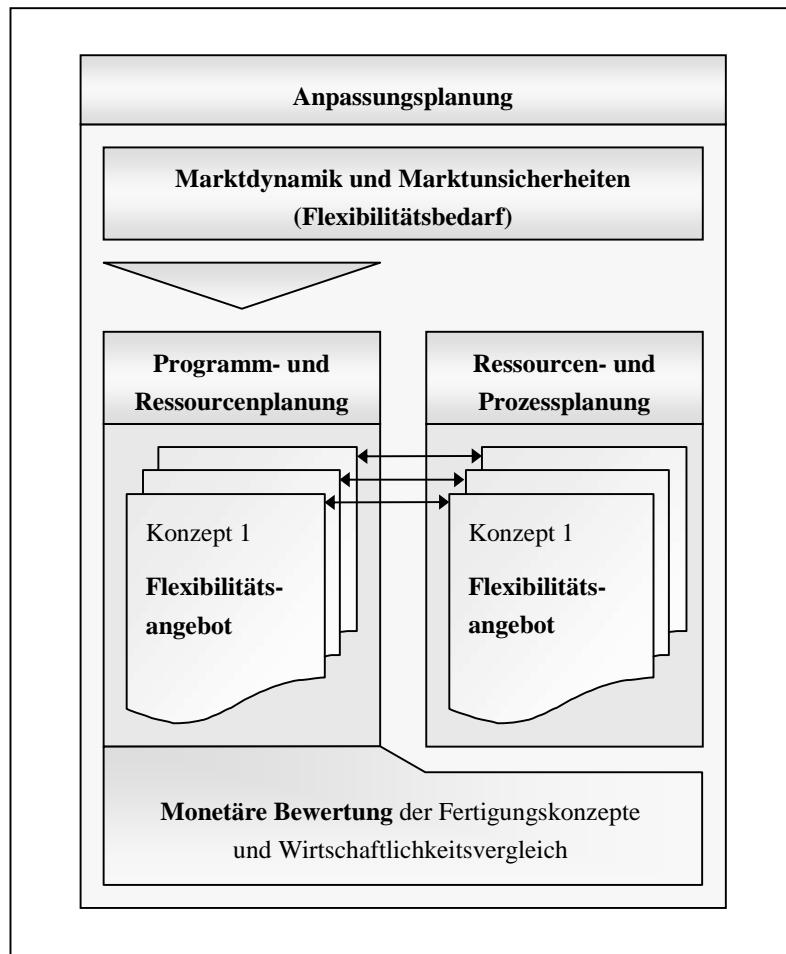
- in Bezug auf Betriebsmittel und Bemannung **gleichartig ausgestattete Stationen**

Im Gegensatz dazu konzentrieren sich neuere Forschungsarbeiten auf realitätsnähere Modelle mit beispielsweise abgeänderten Zielfunktionen oder einer zulässigen Parallelisierung von Ressourcen. Zusammengefasst werden diese Modelle unter dem Begriff „generalized assembly line balancing problem“ (**GALBP**).

Lösungsansätze aus dem Bereich der mathematischen Optimierung existieren sowohl für die **Konfigurationsplanung von Produktionssystemen** als auch für die **Leistungsabstimmung**, so dass auf der Ebene der **Ressourcen- und Prozessplanung** auf diese Ansätze für einzelne Teilespekte des Gesamtproblems zurückgegriffen werden kann.

Zusammenfassend greift die zu entwickelnde Methodik im Wesentlichen auf drei Forschungsfelder zurück: die **Programm-, Ressourcen- und Prozessplanung**.

Nachfolgende Abbildung verdeutlicht den Zusammenhang der einzelnen Betrachtungsfelder und stellt damit die **drei Basisbausteine** der in der vorliegenden Arbeit zu entwickelnden Methodik zur **Anpassungsplanung** heraus: als zentrale Eingangsgröße wird der **Markt mit seiner Dynamik und Unsicherheit** verstanden. Gestützt auf diese Daten ermittelt die **Programm- und Ressourcenplanung** über dem Lebenszyklus mit Hilfe der spezifischen Möglichkeiten einer Anlage die Systemanpassungen und Produktionsmengen. Daneben existiert das Modul zur **Ressourcen- und Prozessplanung**, um Anpassungsmöglichkeiten auf der Ebene der Prozesskette identifizieren zu können.



**Abbildung 2-2:** Betrachtungsfelder innerhalb der Anpassungsplanung in der Aggregatfertigung

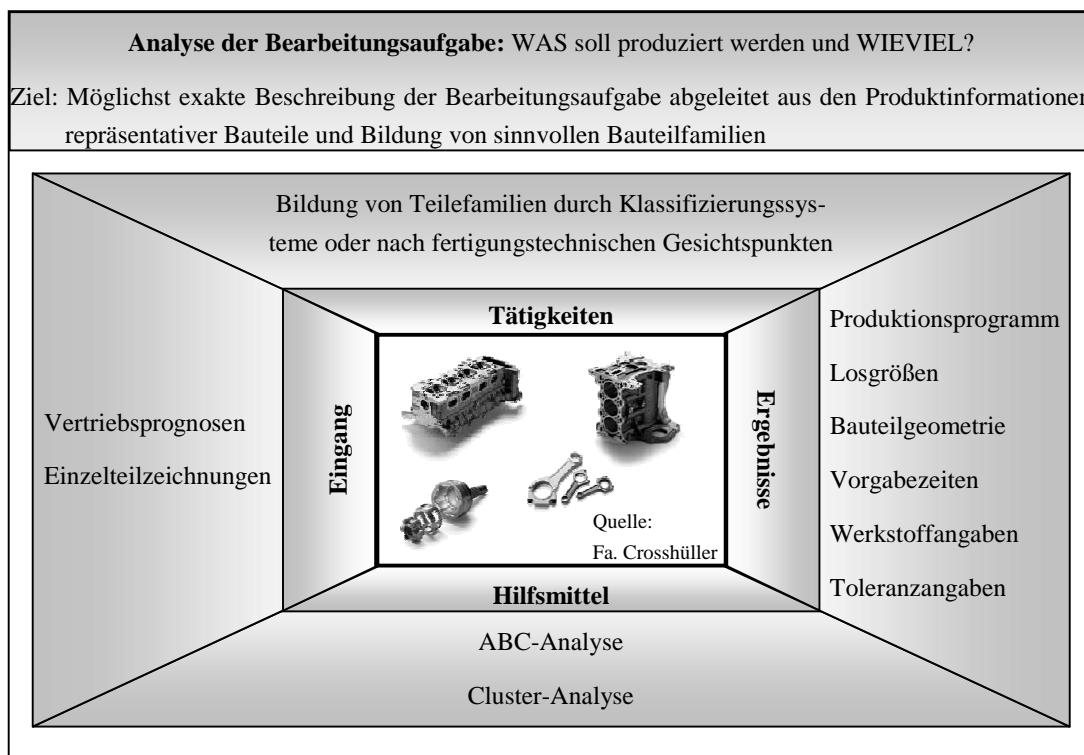
### 3 Stand der Technik und Diskussion der vorgestellten Ansätze

In diesem Kapitel wird zunächst dargelegt, wie sich im Allgemeinen ein Planungsprozess für ein neu zu installierendes Fertigungssystem vollzieht und welchen Stellenwert darin Marktunsicherheiten haben. Anschließend wird auf bisher geleistete Forschungsarbeit zu den Themen Programm-, Ressourcen- und Prozessplanung eingegangen.

#### 3.1 Der Planungsprozess von Fertigungssystemen und der Umgang mit Unsicherheiten

Grundlage für betriebliche **Planungsprozesse von Fertigungssystemen** stellen **sequenzielle Planungsschemata** dar. Sehr ausführliche und doch überschaubare Informationen finden sich hierzu in [Dang01] Kapitel 7 und 8. Ein prinzipielles Grundplanungsschema wird in [EvSc96] erläutert, welches in seiner dargestellten Form breite Anwendung findet und lediglich durch unternehmensspezifische Ansätze erweitert oder modifiziert wird. Nachfolgend wird hierüber ein kurzer Überblick gegeben.

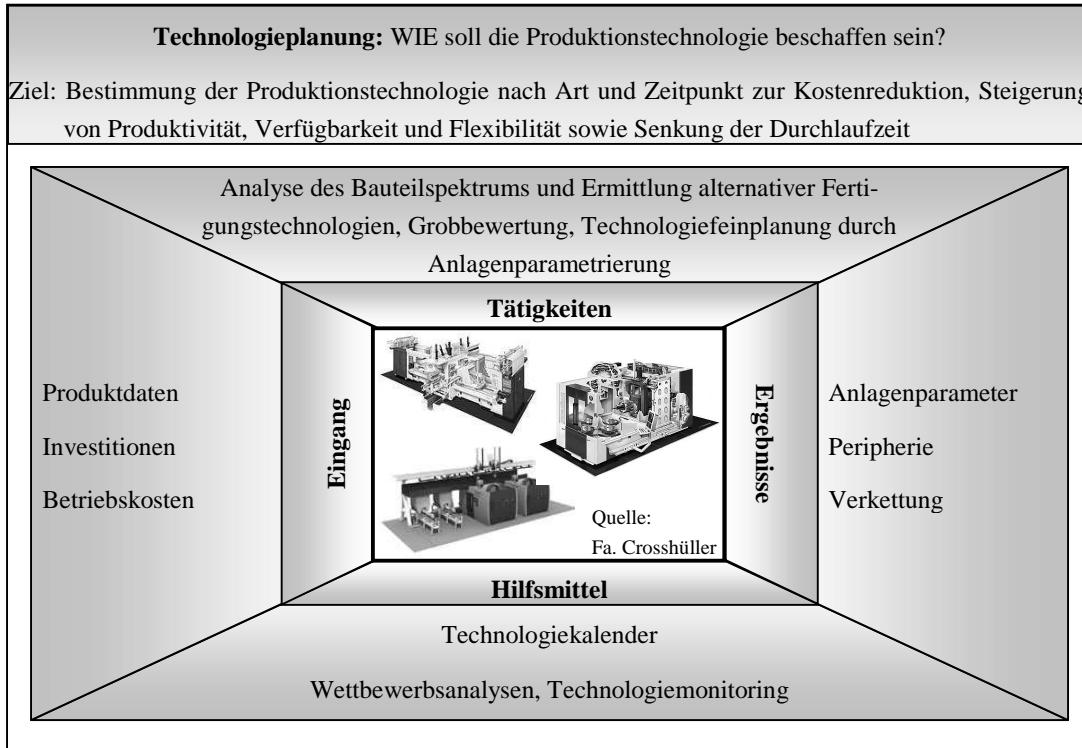
Den **Ausgangspunkt** gängiger Planungsprozesse stellt die **Bearbeitungsaufgabe** dar, die im Wesentlichen durch die herzustellenden Produkte definiert wird. Im Mittelpunkt stehen die Geometrie der Produkte, deren Funktion und spätere Beanspruchung, Werkstoffe und das geplante Produktionsprogramm. Als Informationsquellen dienen **Vertriebsprognosen** und **Konstruktionszeichnungen**. Durch ABC- oder Cluster-Analysen lassen sich die Bauteile in Gruppen einteilen, aus denen lediglich repräsentative Vertreter zur Ableitung der Bearbeitungselemente herangezogen werden, was den Analyseaufwand reduziert. Bei der Auswahl der Repräsentanten ist darauf zu achten, dass sämtliche Arten notwendiger Bearbeitungselemente berücksichtigt werden und Kapazitätsanforderungen sowie das Kostenaufkommen nicht verfälscht werden. Aufgrund der auftretenden „**Erzeugnisähnlichkeit**“ zeichnet sich von Seiten der Produkte bereits in diesem Planungsschritt der benötigte **Flexibilitäts- und Automatisierungsgrad** der Anlage ab. Ergänzt wird diese Einschätzung durch Vertriebsprognosen, woraus die Marktdynamik und somit die marktseitigen Anforderungen an das Fertigungssystem in Bezug auf Flexibilität und Automatisierung abgeleitet werden können.



**Abbildung 3-1:** Die Analyse der Bearbeitungsaufgabe als erster Schritt bei der Planung von Fertigungssystemen

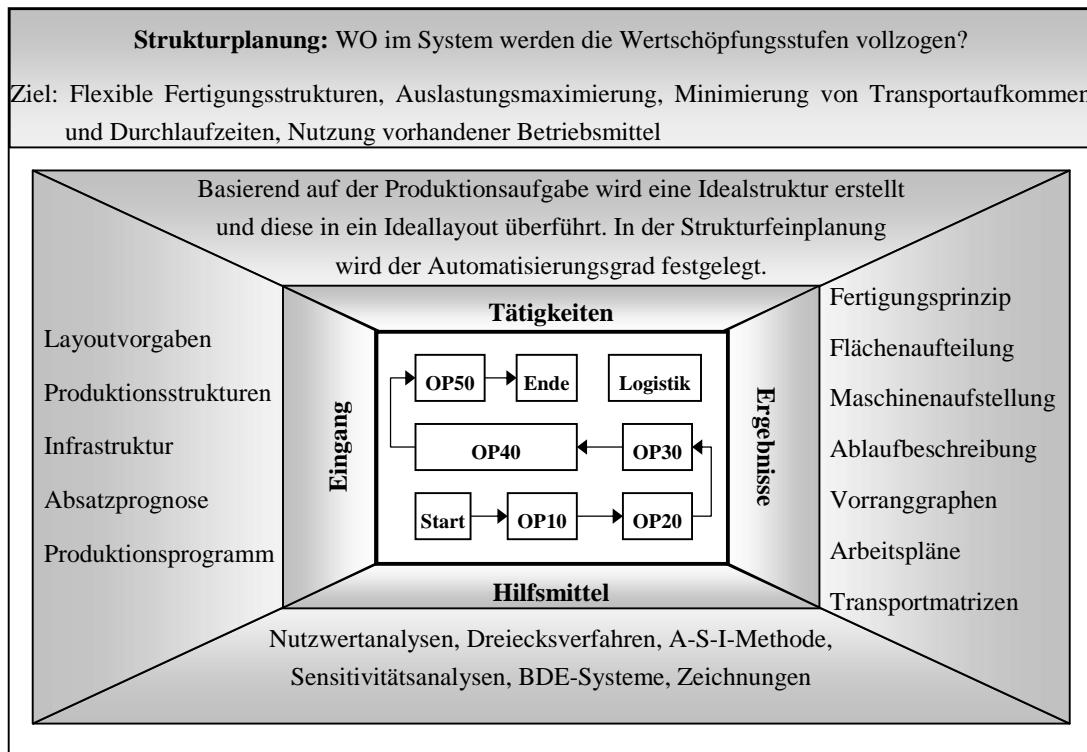
Anschließend an die Analyse der eigentlichen Bearbeitungsaufgabe können in der Phase der **Technologieplanung** verschiedene auf dem Markt befindliche **Bearbeitungstechnologien und Fertigungsverfahren** auf ihre **Tauglichkeit** untersucht werden, die definierten Anforderungen aus Produkt und Markt zu erfüllen. Zudem werden durch den Einsatz neuer Verfahren und Produktionstechniken Ziele verfolgt wie etwa die **Flexibilisierung** der Produktion sowie die **Steigerung von Effizienz, Qualität und Maschinenverfügbarkeit** oder die **Senkung von Kosten, Durchlauf- und Lieferzeiten**. Starke Einfluss üben dabei generelle Technologietrends und Wettbewerbsanalysen aus. Letztlich entscheidend für die Auswahl sind jedoch die Anforderungen, die sich aus der konkreten Bearbeitungsaufgabe ableiten lassen sowie **Technologiekosten** und daraus entstehende Folgekosten. Als Ergebnisse sind eine grobe Anlagenparametrierung hinsichtlich Größe und Leistung des Fertigungssystems und dessen Elemente zu erwarten genauso wie Informationen über benötigte Peripheriegeräte und Verkettungseinrichtungen. Häufig wird die Technologieplanung unter Abstimmung mit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie Investitionsplanungen vorgenommen, da es gilt, in frühen Planungsphasen die erarbeiteten Konzepte unter Einbindung der betreffenden Abteilungen im Unternehmen untersuchen bzw. absichern zu lassen. Ein geeignetes Hilfsmittel, um die im Unternehmen befindliche Technologie planen bzw. einen Überblick darüber ge-

ben zu können, stellt der **Technologiekalender** von Westkämper [West86] dar. Hierin werden zukünftig im Unternehmen geplante Produkte und Produktionstechnologien in einen zeitlichen Zusammenhang gebracht. Diese Form lässt eine übersichtliche Darstellung möglicher Technologiewechsel und verschiedener Einsatzszenarien über einer Zeitachse zu.



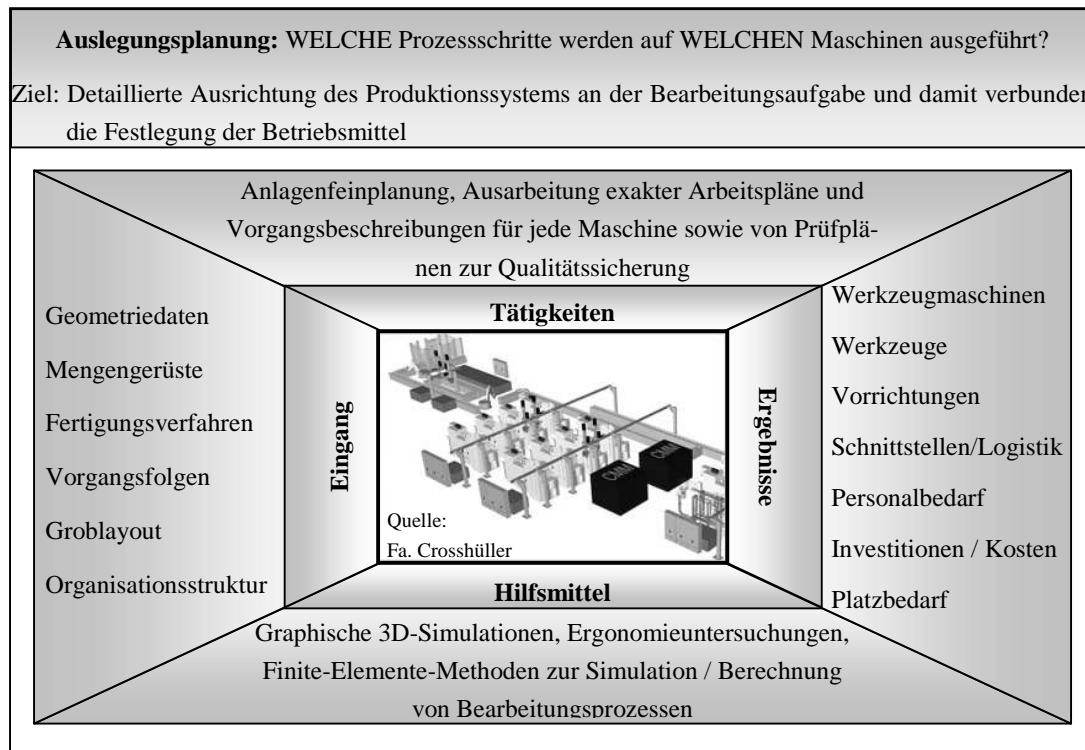
**Abbildung 3-2:** Die Technologieplanung als Auswahlinstrument für geeignete Fertigungstechnik und -verfahren

Nachdem verschiedene Technologiekonzepte ausgearbeitet worden sind, ist für das Fertigungssystem eine **Struktur** zu erarbeiten. Im Falle einer **Fließfertigung** ist diese Struktur durch die nacheinander **zu durchlaufenden Bearbeitungsstationen** vorgegeben. Eingangsinformationen bilden zum großen Teil Restriktionen aus der bereits bestehenden, angrenzenden Produktionsstruktur sowie aus vorhandener Logistik- und Verkettungstechnik bzw. aus Ver- und Entsorgungseinrichtungen. Somit ist der Bezug zur generellen **Fabrikplanung** hergestellt. Als wesentliche Ergebnisse der **Strukturplanung** sind grobe Pläne zur **Maschinenaufstellung**, **Kapazitätsbedarfe** sowie **Arbeitspläne** und **Vorranggraphen** für das jeweilige Technologiekonzept zu erwarten. Als Ziele werden in diesem Planungsschritt eine hohe **Auslastung** der einzelnen Fertigungsbereiche, möglichst geringe **Transportaufkommen** und die **Nutzung eventuell vorhandener Betriebsmittel aus anderen Produktionssystemen**, die dort nicht mehr benötigt werden und für eine Weiterverwendung zur Verfügung stehen, verfolgt.



**Abbildung 3-3:** Die Strukturplanung als Anknüpfungspunkt zur Fabrikplanung

Im Anschluss kann die **Auslegungsplanung** erfolgen. Ergebnisse bilden dabei **exakte Angaben über zu installierende Werkzeugmaschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen, Schnittstellen, Logistikkomponenten, Steuerungselemente, zuzukaufende Anlagen- teile sowie Konstruktionszeichnungen, Platzbedarfe, Layoutdarstellungen** für das Produktionssystem und **Personaleinsatzpläne**. Für Arbeiten auf dieser Ebene der Fein- abstimmung erhält der Planer sehr hilfreiche Unterstützung durch kommerzielle Soft- warelösungen wie z.B. Berechnungs- und Simulationswerkzeuge zur Materialflusun- tersuchung oder Prozesssimulation während der Bauteilbearbeitung.



**Abbildung 3-4:** Die Auslegungsplanung als abschließender Schritt bei der Planung von Fertigungssystemen

Das aufgezeigte Planungsvorgehen hat überwiegend strategischen Charakter, weist jedoch auch taktische Züge auf. Unter **strategischen Gesichtspunkten** sind insbesondere die **Technologieauswahl** und die **Strukturplanung** einzuordnen, da sie mit langfristigen, für das Unternehmen mit entsprechenden finanziellen als auch personellen Folgen verbunden sind. Die **Auslegungsplanung** hingegen kann zum Teil auch auf **taktischer**, also mittelfristiger Planungsebene, gesehen werden, da es beispielsweise im Falle von Veränderungen am Produkt bei laufender Serie auch zur Umplanung der konkreten Zuweisung von Bearbeitungsschritten auf Maschinen bzw. zur Nach-, Ersatz- oder Desinvestition von Produktionsmitteln kommen kann. Zur **operativen** Ebene zählen Detailuntersuchungen, bei denen etwa unter Zuhilfenahme von Materialflusssimulationen über die Pufferdimensionierung entschieden wird.

Gerade auf **operativer Ebene** existieren zahlreiche Forschungsarbeiten, die sich mit der Optimierung der dortigen Planungsfragestellungen beschäftigen: **wann wird welcher Auftrag** in das System eingelastet, wie groß werden die **Warteschlangen** vor den Maschinen und wie müssen demnach **Puffer** dimensioniert sein, wie lassen sich **Lieferterminabweichungen** minimieren oder ganz vermeiden und einiges mehr. Im Grunde wird also auf kurzfristiger Ebene die im Fertigungssystem vorhandene Flexibilität genutzt, um derartige Fragen möglichst gut beantworten zu können und auftretende Nach-

arbeit, Eilaufträge, Ausfälle von Mitarbeitern, technische Störungen oder sonstige Unwägbarkeiten bei der Aufstellung des kurzfristigen Arbeitsprogramms abfedern zu können.

Bevor jedoch kurzfristige, bedarfsbezogene Arbeitsprogramme für eine Produktionsanlage ausgearbeitet werden können und damit die Nutzung der Anlagenflexibilität stattfinden kann, muss bereits **in frühen Phasen der Investitionsplanung** über die Art und Struktur des zu installierenden Systems entschieden werden. Dafür ist es notwendig, dass eine **Anpassungsplanung** durchgeführt wird, in der die spätere Flexibilitätsnutzung vorweggenommen wird. Das heißt, es sind in frühen Projektphasen **Marktdynamik** und **Marktunsicherheiten in die Planung zu integrieren**. Unsicherheiten bzgl. der Absatzzahlen oder zusätzlich zu fertigender Varianten haben einen erheblichen Einfluss auf die Investitionsentscheidung. Herrscht eine vergleichsweise niedrige Marktdynamik vor und bestehen zudem keinerlei Zweifel über die Zuverlässigkeit der zugrunde gelegten Planungsdaten, so wird die Entscheidung auf starre, hochproduktive Anlagen fallen. Je dynamischer das Marktfeld und umso mehr die Planungsparameter mit Ungewissheit überlagert sind, desto eher wird die Entscheidung auf flexible Anlagen fallen. Jedes andere Vorgehen führt nahezu zwangsläufig zum unwirtschaftlichen Betrieb der Anlage und damit zu Nachinvestitionen oder Produktionsausfällen bzw. zur Nichterfüllung der Nachfrage. Andererseits führen **flexible Fertigungseinrichtungen** unweigerlich zu einem **höheren Investitionsbedarf**. Ziel muss es demnach sein, dem Planer ein Werkzeug in die Hand zu geben, mit dem es ihm möglich ist, lediglich **den tatsächlich benötigten Flexibilitätsgrad einzuplanen**. Dies wurde ebenfalls bereits in [Mene01] für die Montageplanung propagiert.

Insbesondere die erwähnten **Unsicherheiten bzgl. der Absatzzahlen** und **zusätzlicher Varianten** stellen sich **als Treiber für die Anpassungsplanung** in der spanenden Aggregatefertigung heraus. Beide haben immensen Einfluss auf das Ergebnis der Programm-, Ressourcen- und Prozessplanung. Nur wenige Autoren behandeln diese Unsicherheiten durch **stochastische Modelle**, die einen erheblichen Rechenaufwand bedeuten. Es werden dort die betreffenden Eingangsparameter direkt im Modell mit einer gewissen Eintrittswahrscheinlichkeit beaufschlagt. Dieses Vorgehen haben z.B. die Autoren in [Läng94] zur Berechnung von Lebenszykluskosten herangezogen und in einem **Ansatz der dynamischen Programmierung** verwirklicht. Bei einem anderen Vorgehen mit Unsicherheiten umzugehen wird mit fix vorgegebenen Eingangsdaten gerechnet. Es handelt sich hierbei um einen **deterministischen Ansatz**. Um jedoch in diesem Fall Unsicherheiten berücksichtigen zu können, werden mehrere **Szenarien** unabhängig voneinander berechnet, wobei sich die Szenarien untereinander durch eine Varianz der entsprechenden Eingangsparameter unterscheiden. Als Resultat ergibt sich der Einfluss der Veränderung dieser Eingangsparameter auf das Optimierungsziel. Dieses Vorgehen beschreiben z.B. die Autoren in [Herr83], [Hoit85], [Günt93], [Hall99], [Zäpf00],

[Wien03], [Hern03], [NyHe04], [WiVi04]. Hierin kommt teilweise die **Szenario-Technik** zur Erzeugung von Szenarien zum Einsatz, bei der nach einem vorgegebenen Schema zukünftige Entwicklungen vorausgedacht und entsprechende Reaktionsmöglichkeiten hinterlegt werden. Sie läuft im Wesentlichen in drei Schritten ab:

- Analyse-Phase: Abgrenzung des eigentlichen Problems, Sammeln der wichtigsten Informationen und Herausarbeiten der Kerneinflussbereiche
- Prognose-Phase: Vorausdenken möglicher zukünftiger Entwicklungen und Störereignisse für die identifizierten Einflussbereiche
- Synthese-Phase: Generierung von Szenarien

Einen sehr ausführlichen Überblick über die Szenario-Technik liefert [GaFS96]. Sie ist ein Stellvertreter aus einer Reihe von **qualitativen Prognoseverfahren**, die in der Literatur weit verbreitet sind. Hierzu zählen neben der **Delphi-Methode** auch die **historische Analogie** und das **Relevanzbaum-Verfahren**. Mit Hilfe dieser Methoden kann versucht werden, Unsicherheiten während des Planungsprozesses greifbar zu machen, jedoch haben sie weniger zum Ziel, mehrere, in sich konsistente Szenarien zu erzeugen, so dass die Szenario-Technik einen entscheidenden Vorteil aufweist. **Quantitative Prognoseverfahren** wie etwa die **Regressionsrechnung**, **ökonometrische Modelle**, **Portfolio-Analyse**, **Trendprognose** oder die **exponentielle Glättung** versuchen meist **Zusammenhänge** zwischen zwei oder mehreren Einflussparametern herauszustellen bzw. basierend auf dem historischen Verhalten von Eingangsparametern deren zukünftige Entwicklung vorherzubestimmen. Auch hier ist keine kalkulationsfähige Szenarioschar zu erwarten, so dass diese Verfahren z.B. erst noch mit der Szenario-Technik kombiniert werden müssten. Da das Durchrechnen verschiedener Marktszenarien zur Erfassung der am Markt herrschenden Unsicherheit als sehr sinnvoll erachtet wird, wird diese Herangehensweise in der vorliegenden Arbeit übernommen.

Verschiedene Arten der Prognoseerstellung sind in [Schn02] näher erläutert, darunter auch einige der oben genannten. Darüber hinaus wird ein Leitfaden aufgezeigt, wie mit Unsicherheiten umgegangen werden sollte. Dabei wird zunächst darauf abgezielt, dass so viele Informationen eingeholt werden sollten wie möglich, das heißt – ähnlich wie es Nahmias fordert – nicht nur eine Prognose, sondern zusätzlich eine Aussage über deren Genauigkeit. Ferner sollten mehrere Planungsschleifen durchgeführt werden, da sich im Laufe der Planung grundlegende Daten ändern können und somit sich die Planungsbasis verschieben kann. Es wird also eine **revidierende** oder auch **rollierende Planung** empfohlen. Außerdem sollten verschiedene Mechanismen zur „*Absicherung gegen Fehlinformationen*“ zum Einsatz kommen. Auf strategischer Ebene kann sich dies etwa durch eine Aufspaltung der Gesamtentscheidung in mehrere kleine, zeitlich versetzte Entscheidungen ausdrücken, wobei der erste Schritt die nachfolgenden möglichst wenig einschränken oder festlegen darf. Auf mittel- und kurzfristiger Entscheidungsebene

werden im Bereich der Produktion oft Kapazitätsreserven, Sicherheitszeiten oder Sicherheitsbestände eingeplant, was jedoch in der Regel zu einem Anstieg des Investitionsbedarfs bzw. der laufenden Betriebskosten führt.

### 3.2 Vorhandene Ansätze zur Programm- und Ressourcenplanung über dem Lebenszyklus einer Fertigungsanlage

Längle et al. stellen in [Läng94] eine Methodik vor, mit der sie unterschiedliche Fertigungskonzepte auf ihre Stückzahlflexibilität hin monetär untersuchen können. Es werden sämtliche **Ausgaben und Einnahmen im Laufe des Lebenszyklus** und vor allem die Aufwendungen zur Systemanpassung auf den **net present value** (NPV) zurückgeführt, was einer Kapitalwertberechnung entspricht. Dabei stützen sich die Autoren auf eine schwankende Marktnachfrage und nur wenige, sehr grobe Kostendaten für die Ressourcen als Inputgrößen. Die Autoren in [NyHe04] verwenden zur Berechnung der **Lebenszykluskosten**, verursacht durch **Anpassungen von Ressourcen** in einem Fertigungssystem, eine einfache **Kostenfunktion**, die die Frequenz der Strukturveränderungen sowie direkte und indirekte Kosten der Anlage einbezieht. Der Gedanke der Rückführung aller Anpassungsaufwendungen auf den Kapitalwert wird für die zu entwickelnde Methodik übernommen.

In [Feld04] wird die strategische Ausrichtung der Montage durch die **stufenweise Anpassung** eines Montagesystems an die durch den Markt vorgegebene Nachfrage, vor allem während des Produktionshochlaufs, beschrieben. Dies wird durch organisatorische und technische Maßnahmen erreicht. Zudem werden, genau wie in [Wien03] und [Wien04], die zum Montageprozess notwendigen technischen Ressourcen als Elemente eines Baukastens betrachtet, die flexibel miteinander kombiniert werden können, so dass ein sehr breites Feld – vom manuellen bis hin zum vollautomatischen Montageprozess – abgedeckt werden kann. Auch in [Schu03] und [Schu04] spielen **modulare Produktionsressourcen**, sowohl hinsichtlich technischer als auch organisatorischer Aspekte, die zentrale Rolle als eigentliche „Befähiger von Wandlungsfähigkeit“. Sowohl auf Änderungen am Produkt als auch an den Produktionsmengen kann durch geeigneten Einsatz von **Produktionsmodulen** reagiert werden. Ebenso kann der Grad der Wiederverwendbarkeit der installierten Systeme für Nachfolgerprodukte gesteigert werden, da flexible Ressourcen des Altsystems durch Sonderwartungen wieder für einen weiteren Produktlebenszyklus aufbereitet werden können. Es wird in einer so genannten „**Produktionsstrukturmatrix**“ **qualitativ** bestimmt, welchen **Einfluss** diverse „**Change Driver**“ auf das momentan untersuchte Fertigungssystem haben. Anschließend wird durch manuelle Veränderung von z.B. der Bearbeitungsreihenfolge des Produkts und anderen Maßnahmen versucht, diesen Einfluss zu minimieren bzw. auf einzelne, leicht austauschbare oder zu ergänzende Strukturelemente zu konzentrieren. Um aus diesen

erzeugten Alternativen eine Entscheidung ableiten zu können, wird in letzter Instanz eine Investitionsanalyse über dem gesamten Lebenszyklus der Anlage durchgeführt. Sehr **grobe Anpassungssprünge** und deren Kosten bilden in [WiVi03] und [WiVi04] die Basis zur Bewertung von Fertigungssystemen über ihrem Lebenszyklus. Das gleiche Prinzip der **stufenweisen Anpassung von Ressourcen** wird am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU-München verfolgt. Sowohl technische als auch organisatorische Reaktionsmöglichkeiten stehen bei Änderungen von Stückzahlen und Varianten zur Verfügung und werden dem Planer in Form von Entscheidungsalternativen bei der Systemanpassung angeboten [Rein03]. Gleiches gilt für einen ähnlichen Ansatz in [BlKo05]. Das IPA-Institut der Fraunhofer-Gesellschaft beschreibt in [KuKl04] ein Vorgehen in sechs Schritten zur Planung von Ressourcen in Fertigungssystemen:

- Abbildung von Szenarien zur Deckung des Produktionsbedarfs
- Festlegung der Ressourcen und Berechnung der Stückkosten
- Zeitpunkt für einen Wechsel des Migrationsszenarios
- Bestimmung der optimalen Fertigungstiefe
- Berechnung der Gesamtkosten der Migrationspfade
- Auswahl der besten Migrationsalternative

Die „Szenarien“ des ersten Punktes stellen Möglichkeiten dar, wie sich die untersuchten Fertigungssysteme technisch oder organisatorisch anpassen können. Der Punkt der stufenweisen Anpassung von Organisation und Technik ist sehr realitätsnah, da Fertigungssysteme lediglich von einem diskreten Zustand in einen anderen überführt werden können. Eine stufenlose Anpassung ist nahezu ausgeschlossen, da keine „halben“ Maschinen und damit Kapazitäten installiert werden können. Eine Integration dieses Aspektes in die zu entwickelnde Methodik ist sinnvoll.

Lineare Optimierungsmodelle mit dem Ziel der reinen Programmplanung finden sich beispielsweise in [Hoit85], [Zäpf89], [Neum96] und [GüTe05]. Ein gemeinsames Element sind dabei Nebenbedingungen, die die Festlegung des Produktionsprogramms bewerkstelligen. Da in der zu entwickelnden Methodik die Programmplanung integriert mit der Ressourcenplanung stattfinden soll, müssen entsprechende Bausteine zur Programmplanung einfließen, so dass die betreffenden Elemente aus den aufgezählten Quellen übernommen werden können. Zäpfel stellt bzgl. der Lebenszyklusbetrachtung in [Zäpf89] ein mathematisches Modell zur **simultanen Programm-, Kapazitätsdimensionierungs- und Fertigungstiefenplanung** vor. Es werden die Barwerte von Aus- und Einzahlungen über die Planungsperioden hinweg erfasst, Kapazitäten nach Bedarf eingerichtet oder abgebaut und Nebenbedingungen bzgl. des Produktabsatzes berücksichtigt. Allerdings können keine verteilten Produktionssysteme modelliert werden, da

jegliche Möglichkeit zur Kalkulation von Transportkosten fehlt. Dieser Teilaспект kommt erst in einem zusätzlich aufgeführten **Standortmodell** zur Geltung, das auf Heuristiken basiert. Auch Günther und Tempelmeier [GüTe94] sowie Neumann [Neum96] oder auch Domschke, Scholl und Voß [DoSV97] arbeiten ähnliche Ansätze heraus und skizzieren alternative Lösungsverfahren, präsentieren jedoch kein ganzheitliches Modell.

#### **Anmerkung zu den vorgestellten Ansätzen:**

Es kann festgestellt werden, dass mehrfach in den vorgestellten Ansätzen zur Ressourcenplanung ein Vorgehen beschrieben wird, das auf **diskreten Systemzuständen** basiert, sei es lediglich in technischer Hinsicht oder zusätzlich in organisatorischer. Diese Idee der diskreten Systemzustände auf grobem Niveau wird in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen. Sollten sich **Änderungen an den Produktionsanforderungen** gegenüber dem Planszenario ergeben, so kann in einem solchen Modell aufgrund der diskreten Systemzustände im Verlauf des **Anlagenlebenszyklus** unter Inkaufnahme entsprechender Kosten zu einem anderen Systemzustand gewechselt werden.

Zudem bleiben die meisten Modelle **auf eine Produktionslinie beschränkt**, was im Falle einer **verteilten bzw. mehrstufigen Fertigung** nicht praktikabel ist. In einem frühen Planungsstadium muss es möglich sein, vor- und nachgelagerte Fertigungslinien integriert zu betrachten und deren Anpassungen über dem Lebenszyklus zu erfassen, genauso wie die Möglichkeit der Verteilung zu produzierender Stückzahlen auf parallele Fertigungseinrichtungen.

Zusätzlich kann es von Interesse sein, kurzfristige Stückzahlspitzen durch Nutzung eines **Puffers** zwischen zwei aufeinander folgenden Linien im Falle einer mehrstufigen Produktion abzufedern, anstatt die Fertigungskapazitäten kapitalintensiv auszubauen bzw. auf einen externen Lieferanten zurückzugreifen. Auch ein solcher Ansatz wurde in noch keinem existierenden Modell integriert realisiert.

### **3.3 Vorhandene Ansätze zur Ressourcen- und Prozessplanung**

Neben der Programm- und Ressourcenplanung existieren im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit zwei weitere Planungsfelder, die ebenfalls nicht losgelöst voneinander betrachtet werden sollten. Es handelt sich hierbei um die Ressourcen- und Prozessplanung, bei der **basierend auf den auszuführenden Herstellungsprozessen** für das (die) Produkt(e) diese **Prozessschritte in eine geeignete Reihenfolge** gebracht und so **auf Fertigungsressourcen verteilt** werden, dass sämtliche **Restriktionen** aus der Realität nicht verletzt und ein gewisses **Ziel** erreicht wird. Bei der Planung eines Fertigungssystems stehen das Produkt und seine Fertigungsprozesse weitestgehend fest.

Werden existierende, grobe Anpassungsalternativen hinsichtlich der Produktionstechnik aus der Programm- und Ressourcenplanung als gegeben vorausgesetzt, so kann darauf aufbauend die **technologische Anpassungsfähigkeit** des Systems **auf detaillierter Ebene** untersucht werden.

Gesetzt den Fall, dass sich ein Fertigungssystem auf seiner geplanten Endausbaustufe befindet und damit seine maximale technische Kapazität erreicht hat, jedoch die nachgefragten Stückzahlen über dieses Niveau hinauswachsen, so kann mittels der zu entwickelnden Methodik eine weitere Ausbaustufe generiert werden, die die bisherige Endausbaustufe als Basis verwendet und punktuell im System versucht, möglichst kostengünstige **Änderungen an den Produktionsressourcen** (Nachinvestitionen) und der **Prozesskette** (Neuzuteilung von Fertigungsschritten auf Ressourcen) vorzunehmen.

Wie bereits in der Problemgliederung in Kapitel 2.3 herausgearbeitet wurde, können entsprechende Ansätze aus der Konfigurationsplanung von Fertigungssystemen einerseits und der Leistungsabstimmung in der Fließfertigung andererseits entnommen werden.

### 3.3.1 Konfigurationsplanung von Fertigungssystemen

Bei der Konfigurationsplanung stehen sowohl das **Produkt** als auch die **Bearbeitungsmaschinen**, die die Bearbeitungsprozesse ausführen sollen, **im Mittelpunkt der Betrachtungen**. Dies geschieht bei zahlreichen Autoren durch eine **Klassifizierung** von unterschiedlichen Werkstücken einerseits und einer **Charakterisierung** von Maschinen andererseits. Hausknecht vernachlässigt dabei die Einteilung von Werkstücken in Klassen und konzentriert sich bei seinem „**Expertensystem zur Konfigurationsplanung**“ [Haus89] auf die Fertigungssysteme selbst. Es wird von einer großen Anzahl möglicher Anlagenkonfigurationen ausgegangen, die im weiteren Verlauf **im Dialog mit dem Planer** schrittweise reduziert wird. Als Orientierungshilfe dienen dabei verschiedene **Flexibilitätskennzahlen** wie etwa die Betriebsmittelflexibilität oder die Auftrags- und Bearbeitungsflexibilität. Bei der Planung des Systems sollen sämtliche zu fertigende Produktvarianten berücksichtigt und möglichst realitätsnah über dem Lebenszyklus als abwechselnd gefertigt angesehen werden. Dadurch wird es möglich, entstehende Wechselkosten zwischen den unterschiedlichen Systemzuständen (Umbauten wegen der Varianten) zu erfassen und eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchzuführen. Auch Straub [Stra81] geht von einer äußerst **detaillierten Klassifizierung** der Werkstücke und Fertigungsmaschinen aus und schließt daraus auf das optimale Fertigungssystem. Grundlage bei der Bewertung und Auswahl bilden dabei Kapazitäten und entstehende Kosten der jeweiligen Systemalternative. In [Roth92] wird ein sehr ähnliches Vorgehen aufgezeigt. Ausgehend von **DIN 8589**, in der die spanenden Fertigungsverfahren aufgeschlüsselt sind, wird ein Werkstück inklusive sämtlicher zu fertigender Einzelbearbeitungselemente beschrieben und entsprechend klassifiziert. Auf gleicher

Basis werden **Fertigungsmaschinen** „charakterisiert“, d.h. ihnen werden gewisse Eigenschaften und **Prozessfähigkeiten** zugeschrieben. Somit kann durch einen **Abgleich** herausgefunden werden, welche Bearbeitungsschritte auf welcher Maschine ausführbar sind. Anschließend werden Schritt für Schritt die verschiedenen Möglichkeiten der Zusammenlegung von Einzelbearbeitungen geprüft und verschiedene Fertigungsablaufvarianten gebildet, indem die Maschinen mit diesen Teilarbeitsvorgängen belegt werden. So ergibt sich ein großes Spektrum an möglichen Fertigungssystemen. Eine abschließende Auswahl wird entweder anhand entstehender Kosten oder minimaler Durchlaufzeiten getroffen. Bei der Berechnung der Kosten greift der Autor auf detaillierte Maschinenstundensätze und Fertigungszeiten zurück. Lueg stützt sich bei seinen Untersuchungen in [Lueg75] ebenfalls auf ein **fertigungsbeschreibendes Klassifizierungssystem**, in dem Fertigungsanforderungen aus dem Bauteil den technologischen Maschinendaten gegenübergestellt werden. Aus der Vielzahl an denkbaren Lösungsvarianten wird anschließend über Ziele wie „Minimierung der Durchlaufzeiten“, „Minimierung der Belegungszeiten“ oder „Minimierung der Kosten“ das bestgeeignete ausgewählt. Im HIPARMS-Projekt [Drab03] wird das Problem aufgegriffen, dass tendenziell hochflexible Maschinen eine relativ geringe Produktivität besitzen. Im Gegensatz dazu weisen sehr produktive Maschinen und Anlagen, wie z.B. Transfermaschinen, eine eher geringe Flexibilität auf, da sie praktisch starr auf ihre Aufgabe hin konstruiert werden und damit völlig unflexibel im Hinblick auf Stückzahlschwankungen oder die Fertigung zusätzlicher Varianten sind. Der vorgestellte Ausweg aus diesem Problem basiert wiederum auf einer **Modularisierung**, wobei in diesem Fall die Maschinenelemente einer Transferstraße als Module betrachtet werden. Diese Module können durch den Planer, also **expertengestützt**, über standardisierte Schnittstellen aus einer **Bibliothek** ausgesucht und frei miteinander kombiniert werden, wobei eine Rechnerunterstützung über diverse Online-Assistenten erfolgt. Somit können auch Transfermaschinen jeweils auf geänderte Stückzahlen oder Varianten angepasst werden. Besonderes Interesse wird dabei den Einzelmodulen und Submodulen der Transfermaschine gewidmet, wie etwa Motorleistung der Arbeitsspindel, Positioniergenauigkeit oder Ähnliches. Ändern sich die Anforderungen, die sich aus den zu fertigenden Produkten ergeben, können (Sub-)Module bei Bedarf ausgetauscht, die geänderten oder neuen Prozessschritte auf die Module der neu konfigurierten Transferstraße verteilt und im Anschluss daran 3D-Simulationen bzgl. des Verhaltens der Gesamtmaschine sowie ihrer Komponenten und der ablaufenden Prozesse in den Maschinen durchgeführt werden. In [FISW05] wird ebenfalls die **Konfiguration eines „Agilen Fertigungssystems“** (AGF) durch **Simulationsstudien** abgesichert und deren Verhalten in einem dynamischen Umfeld beobachtet. So können etwa nach der Konfiguration verschiedene Bedingungen simuliert und das Verhalten der Maschinen bzw. des Gesamtsystems genauestens untersucht und Auswirkungen auf die Systemleistung durch Änderungen an Eingabeparametern (z.B. der Geschwindigkeiten von Portalrobotern) erfasst werden.

Eine konsequente Strukturierung aller Informationen während der Produkt- und Prozessplanung wird in [Stei96] als zentrales Element der Planungsarbeiten herangezogen. Es werden drei grundsätzliche Module beschrieben:

- Produkt-Modul: hierin sind sämtliche **Produkt beschreibenden Informationen** zusammengefasst sowie detaillierte Zwischenzustände, die die Produkte während ihres Weges vom Rohteil hin zum Fertigteil annehmen.
- Ressourcen-Modul: in diesem Modul sind sämtliche **funktionalen Möglichkeiten** der Bearbeitungsressourcen hinterlegt.
- Prozess-Modul: durch einen **Abgleich** der zu erstellenden Produktzustände während des Herstellungsprozesses mit den funktionalen Möglichkeiten der einzelnen Ressourcen werden die Bearbeitungsprozesse definiert und zugewiesen.

Die aufgeführten Autoren gehen die Problemstellung der Konfiguration von (flexiblen) Fertigungssystemen durch einen Abgleich der für die Produkterstellung notwendigen Prozessschritte und der Maschinen-Prozessfähigkeit an. Dieser Grundgedanke wird in dem zu entwickelnden Ansatz zur Ressourcen- und Prozessplanung übernommen. Jedoch soll die durchzuführende Aufgabe nicht wie bisher geschildert expertengestützt manuell in unter Umständen iterativen Planungsschleifen erfolgen, sondern durch eine mathematische Optimierung bewerkstelligt werden.

Diverse Autoren greifen diesen Anspruch auf und haben für das Problem der Konfigurationsplanung **Flexibler Fertigungssysteme** auf verschiedenen Teilgebieten entsprechende **mathematische Optimierungsmodelle** formuliert. In [Tetz90] wird hierüber ein guter Überblick gegeben. Der Autor gruppierter die vorhandenen Ansätze anhand der Zielvariablen. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Modellklassen beschrieben und ggf. durch Arbeiten anderer Autoren ergänzt.

- Optimierung der **Arbeitspläne**: hier wird von einem von vorn herein **bekannten Fertigungssystem** ausgegangen, dessen Ressourcen nicht verändert werden können. Es wird lediglich die **Verteilung der Prozessschritte auf die Ressourcen** und damit die Zuordnung von einzelnen Bearbeitungsschritten auf die Maschinen oder Maschinengruppen optimiert.
- Optimierung der **Kapazitäten**: auch in diesem Fall wird die **Konfiguration des Fertigungssystems als bekannt vorausgesetzt**, ebenso der Weg, den die einzelnen Bauteile durch das System nehmen. Es wird in der Optimierung festgelegt, **wie viele Maschinen, Paletten, Transportwagen und Beladestationen** benötigt werden.
- Optimierung der **Ressourcen**: diese Kategorie stellt eine Kombination beider bisher vorgestellter Klassen dar. Es werden Entscheidungsvariablen hinsichtlich der **Art und Anzahl an Maschinen** sowie der **Prozessschrittzuordnung** generiert. Damit ist diese Problemklasse sehr nah mit dem zu entwickelnden Ansatz zur Ressourcen-

und Prozessplanung verwandt. Aus ihr können mehrere Ansätze aufgegriffen und angepasst übernommen werden.

- Optimierung von **Produkt und Ressourcen**: in dieser Klasse stellt die Entscheidung, ob ein Bauteil auf einer Linie produziert wird, eine weitere Variable dar. Ähnliche Modelle werden auch in [Tetz95] und [WhSu85] behandelt. In [LeJo91] werden zudem die Verkettungseinheiten zwischen den Ressourcen, wie z.B. FTS oder Paletten, betrachtet.
- Optimierung von **System und Ressourcen**: bei Modellen dieser Klasse wird zusätzlich zum Problem der Ressourcenbestimmung die Frage nach dem **Anlagentyp** sowie der Anzahl an Anlagen gestellt.
- Optimierung von **Produkt, System und Ressourcen**: diese Klasse stellt die höchst entwickelte Form von mathematischen Modellen dar, da hier sämtliche beschriebenen Freiheitsgrade Berücksichtigung finden.

Alle Modelle, die in diesem Überblick von Tetzlaff beschrieben werden, verwenden als **Grundlage Investitionen und einmalige bzw. periodenabhängige Kosten**. Hauptsächlich behandeln sie Probleme der Klassen „Arbeitspläne“, „Kapazitäten“ und „Ressourcen“. Darüber hinaus wird speziell auf einen Sonderfall hingewiesen, der auf **Fertigungssysteme in der Großserienproduktion** angewandt werden kann. Dort ist die überwiegend vorherrschende Organisationsform das **Fließprinzip**. Außerdem gibt es nur eine sehr **beschränkte Anzahl an zu fertigenden Produkten bzw. Varianten** und die **Nachfrage** nach diesen wiederum ist **meist deterministisch durch den Vertrieb vorgegeben**. Allerdings behandeln die vorgestellten Modelle aus diesem Sonderbereich mit ihren Nebenbedingungen nur wenige Teilprobleme, die bei der Anpassungsplanung von Fertigungssystemen zu lösen sind. Ist eine Produktionsanlage an geänderte Marktbedürfnisse anzupassen, so ist eine **Vielzahl expliziter Vorgaben** aus der bereits installierten Anlage zu berücksichtigen wie etwa das Layout oder der verfügbare Platz zur Aufstellung zusätzlicher Produktionsmittel. Ebenso kann nicht beliebige Produktionstechnik installiert werden, sondern muss mit der bereits installierten kompatibel sein.

Einen anderen Überblick über analytische Modelle bei der Konfiguration flexibler Fertigungssysteme geben die Autoren in [SoVi94]. Es werden folgende sechs Modellklassen gebildet: Optimierung der **Fertigungskapazitäten**, der **Puffer**, des **Anlagenlayouts**, der Anzahl an **Werkstückträgern** innerhalb des Systems und der **Fahrerlosen Transportsysteme** sowie der **Arbeitsbelastung** einzelner Maschinen. In diesem Fall sind die Klassen „Optimierung der Kapazitäten“ und „Optimierung der Arbeitsbelastung“ die wichtigsten Quellen für die vorliegende Arbeit, decken sich jedoch weitestgehend mit den bereits besprochenen Klassen „Kapazitäten“ und „Ressourcen“ aus [Tetz90]. Abschließend betonen die Autoren, dass viele ihrer Kollegen **wichtige Problemfelder getrennt** voneinander betrachten, obwohl diese im Grunde zusammen unter-

sucht werden müssten, da sie auch in der Praxis untrennbar miteinander verbunden sind. Gleiche Kritik äußern die Autoren in [TeKu92]. Auch hier wird ein Überblick über verschiedene **Ansätze zur Konfigurationsplanung flexibler Fertigungssysteme** gegeben. Im Fokus stehen insbesondere Modelle, die sich mit der **Arbeitsplanoptimierung**, der **Kapazitätsoptimierung** und der **Ressourcenoptimierung** beschäftigen. Es werden jeweils die mathematischen Grundüberlegungen vermittelt und weitere Autoren genannt, die auf ähnlichem Gebiet geforscht haben. Entsprechendes gilt für Modelle aus [TeKu93], jedoch weisen die dort geschilderten Problemklassen keinen signifikanten Unterschied zu den bereits beschriebenen auf, so dass an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung verzichtet wird.

#### **Anmerkung zu den vorgestellten Ansätzen:**

Es kann festgestellt werden, dass sich sämtliche Modelle der vorgestellten Autoren mit **abgegrenzten Teilbereichen der Konfigurationsplanung** beschäftigen. Es findet sich in den meisten Ansätzen ein gemeinsamer Punkt wieder, der in der vorliegenden Arbeit Anwendung finden soll: die **Zuteilung von Prozessen auf Ressourcen** wird durch einen **Abgleich der Anforderungen** aus dem Werkstück bzw. den Prozessen und dem Potenzial der zur Verfügung stehenden Ressourcen bewerkstelligt.

Ein weiterer zentraler Gesichtspunkt ist, wo im System welche Maschinen aufzustellen sind und wie viele davon. Auch diese Fragestellung wurde in manchen Modellen bereits behandelt, teilweise integriert mit der Prozesszuteilung. Jedoch behandeln die vorgestellten Verfahren die Konfigurationsplanung von FFS, so dass andere, bei Fertigungssystemen nach dem Fließprinzip nicht auftretende Fragestellungen in den Fokus rücken. So werden die Modelle durch abweichende Nebenbedingungen gesteuert und nach anderen Zielfunktionen optimiert wie etwa der kürzesten Weglänge von Bauteilen durch ein FFS oder der Minimierung von Durchlaufzeiten.

Ein zusätzlicher Aspekt wird dadurch gebildet, dass das zu entwickelnde Modell zur Ressourcen- und Prozessplanung in der Lage sein soll, **basierend auf einer bereits existierenden Fertigungslinie** eine Anpassungsplanung durchzuführen. Dies hat zur Folge, dass das Problem der Prozesszuordnung bzw. der Maschineninvestition einerseits stark eingeengt wird, da nicht an jeder Stelle im System beliebige Produktionstechnik installiert werden darf, andererseits aber genau daraus eine Vielzahl an zusätzlich zu integrierenden Nebenbedingungen entsteht, die die Lösungssuche deutlich erschweren.

#### **3.3.2 Leistungsabstimmung in der Fließfertigung**

Bei der Leistungsabstimmung für ein Fertigungssystem treten Fragestellungen und Lösungsansätze in Erscheinung, die auch bei einer Systemumplanung in der spanenden Großserienfertigung von Bedeutung sind. So wird beispielsweise nicht von einem wahl-

frei verketteten Maschinenpark entsprechend eines FFS ausgegangen, sondern von einer Linie, in der die **sequenziellen Bearbeitungsstationen** mit einzelnen, manchmal auch mit parallelen, Ressourcen ausgestattet sind. Überwiegend wird die Leistungsabstimmung bei Neuplanungen eingesetzt, so dass für Systemumbauten spezifische Aspekte nicht berücksichtigt sind. In den meisten Fällen werden Probleme aus der Montageplanung aufgegriffen.

So befassen sich die Autoren in [DoKS96] mit einem Problem der Klasse **SALBP-F**, entsprechend der Problemklassifizierung aus Kapitel 2.3, also mit vorgegebener Taktzeit und festgesetzter Stationszahl. Jedoch wird nicht wie bei einem echten SALBP nur eine Produktvariante gefertigt, sondern mehrere Varianten. Hierfür wird für alle Varianten eine ersetzende „**Mischvariante**“ gebildet, in der sämtliche Prozesse aller Produktvarianten in einem gemeinsamen Vorranggraphen vereint und entsprechend ihrer Bearbeitungsdauer gewichtet werden. Somit wird die **eigentliche Mehrproduktfertigung auf eine Einproduktfertigung zurückgeführt**. Bei diesem Vorgehen, das auch an anderer Stelle in der Literatur mehrfach Anwendung findet, wird vernachlässigt, dass für unterschiedliche Varianten einzelne Prozesse unterschiedlich lang dauern können. Dies kann zur Folge haben, dass beispielsweise bei einer **losweisen Taktfertigung** einzelne Bearbeitungsstationen überlastet sind, während sie bei einem Los eines anderen Produktes nahezu stillstehen. Werden die Prozesse auf die einzelnen Stationen verteilt, wird voraussetzungsgemäß lediglich der Mittelwert der Bearbeitungszeiten berücksichtigt und nicht die einzelnen, durch die Varianten gegebenen Extremwerte. Ein Ausweg aus diesem Problem besteht darin, für jede Variante getrennt diese Auslastungsunterschiede zu glätten bzw. die Gültigkeit, und damit die Taktzeiteinhaltung, der gefundenen Prozesszuordnung für jede Variante in jeder Station zu überprüfen. Letzteres ist ein Anspruch, dem die zu entwickelnde Methodik gerecht werden soll, und den die Autoren in [ScVo95] in Form eines **SALBP-E** bereits aufgegriffen haben. Der dortige Lösungsalgorithmus besteht darin, **iterativ für jeweils eine vorgegebene Stationsanzahl die Taktzeit zu minimieren** und eine **gültige Prozesskonfiguration** für sämtliche Stationen zu ermitteln. Gelingt dies nicht, da beispielsweise bei einer vorgegebenen Ausbringungsmenge eine maximale Taktzeit überschritten wird, so ist die Stationszahl um eins zu erhöhen. Als Indikator für die Gültigkeit einer Lösung wird der Bandwirkungsgrad herangezogen, der sich unter anderem durch das Produkt aus Stationsanzahl und Taktzeit errechnet.

Die beiden Autoren in [MuFr97] verwenden eine **Heuristik**, um das Problem der Bandabstimmung zu lösen, da ihrer Meinung zufolge exakte Verfahren bei der aufkommenden Vielzahl an Entscheidungsvariablen nicht mehr anwendbar sind. In deren Modell werden **stochastische Prozesszeiten**, die eben diskutierte **Mehrproduktfertigung** und die Möglichkeit der **Parallelisierung von Prozessen** pro Station einbezogen. Es werden Untersuchungen hinsichtlich des Materialbestands in der Linie, der durchschnittlichen

Durchlaufzeit, des Systemausstoßes sowie der durchschnittlichen Arbeitskosten pro Bauteil durchgeführt. Eine Weiterentwicklung hinsichtlich des gleichen Problems wird in [MuTa03] vorgestellt. Der Lösungsansatz wird dabei durch einen **Ameisenalgorithmus** ersetzt. In einer weiterführenden Studie wird das Modell dahingehend abgeändert, dass die Anzahl der Montagearbeiter, die Systemauslastung, maschinen- und personalbezogene Kosten sowie die Wahrscheinlichkeit, ob ein Prozess innerhalb einer gewissen Zeitspanne abgeschlossen werden kann, in die Zielfunktion einbezogen werden [MuTa06]. Mit Problemen aus dem Bereich der **kostenorientierten Leistungsabstimmung** beschäftigen sich die Autoren in [Amen00] und [ScBe05]. Bei dem vorgestellten „cost-oriented assembly line balancing problem“ (**CALBP**) wird die Anzahl an Stationen mit nicht parallel geschalteten Ressourcen bei **gegebener Taktzeit** und **Einproduktfertigung** minimiert, wobei Löhne und Investitionen als Hauptbestandteile in die zu minimierende Zielfunktion eingehen. Die Grundüberlegung, Kosten als Zielwert bei der Prozesszuteilung auf Stationen und der Investitionsplanung heranzuziehen, wird als Anforderungsbestandteil an die in der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Methodik übernommen.

Scholl und Klein haben in [ScKl99] einen **Vergleich vier verschiedener Lösungsansätze** für das **SALBP-1** durchgeführt. Es werden sowohl Lösungsgüte als auch Lösungszeit für jedes der vorgestellten **Branch-and-Bound-Verfahren** untersucht und Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede in den Modellen aufgezeigt. Einen deutlich ausführlicheren Überblick über die verschiedenen Modellklassen und Lösungsansätze liefern die Zusammenfassungen in [BeSc06] und [ScBe06]. Es wird klar herausgestellt, dass bei der Betrachtung von **Mehrproduktfertigung** auch **eigens entwickelte Modelle zum Einsatz kommen sollten**, anstatt das Problem auf eine Einproduktfertigung zurückzuschrumpfen. Dies stellt eine Forderung dar, die den diesbezüglich oben abgeleiteten Anspruch an die zu entwickelnde Methodik bekräftigt. In dem Überblick werden außerdem Arbeiten angeführt, die sich mit der Erweiterung bestehender Modelle beschäftigen: so greifen einige Autoren zusätzlich zur Entscheidung nach der **Anzahl der Stationen** bei vorgegebener Taktzeit die Frage nach den **benötigten Ressourcentypen** auf, da generell nicht alle Prozesse mit allen Ressourcentypen ausgeführt werden können und damit die **Investitionsentscheidung mit der Austaktungsfragestellung eng verknüpft** ist. Derartige Modelle werden der Kategorie des „assembly line design problem“ (**ALDP**) zugeordnet. In diesem Zusammenhang werden **vielfach Vereinfachungen** in die Modelle aufgenommen, um die Problemgröße klein und folglich lösbar zu halten. Es werden etwa **Vorranggraphen eingeschränkt** oder die **Anzahl der Prozesse auf unter 50 limitiert**. Da die Ressourcenentscheidung und die gleichzeitige Optimierung der Prozesszuteilung auf diese Ressourcen einen fundamental wichtigen Punkt innerhalb der Ressourcen- und Prozessplanung darstellt, muss dieser Aspekt in die zu entwickelnde Methodik derart übernommen werden, dass Probleme mit einer

realistischen Größe und Komplexität mittels des angestrebten exakten Verfahrens lösbar sind. Andere Autoren beschäftigen sich ausschließlich mit der **Parallelisierung von Ressourcen** in Bearbeitungsstationen und den damit zu lösenden Problemen. In einem solchen Fall können ohne Verletzung der geltenden Taktzeitbeschränkung beliebig viele Prozesse in einer Station ausgeführt werden, da eine Erweiterung der Stationen und deren Kapazitäten durch das Hinzufügen von Ressourcen jederzeit möglich ist. Werden also herkömmliche Lösungsansätze für das Standard-Austaktungsproblem durch diesen Punkt erweitert, so **erhöht sich die entstehende Problemkomplexität allein dadurch ungemein**. Jedoch ist auch dieser Punkt essenziell bei der Betrachtung von Fertigungsanlagen in der spanenden Produktion, so dass auch er in die zu entwickelnde Methodik Eingang finden muss. Entsprechende Ansätze aus bestehenden Modellen können angepasst integriert werden.

### **Anmerkung zu den vorgestellten Ansätzen:**

Es kann gesagt werden, dass die in diesem Unterkapitel angesprochenen Modelle in ihrer bestehenden Form nicht für die Anpassungsplanung in der spanenden Fließfertigung angewandt werden können, da sie sich mit der Neuplanung von Fertigungssystemen beschäftigen. Bei der Anpassungsplanung sind vielschichtige Rahmenbedingungen aus dem bereits bestehenden System zu berücksichtigen und müssen als solches in entsprechender Form in die Methodik einfließen. So lassen sich durch das streng **vorgegebene Layout der bereits existierenden Anlage** nicht beliebig Maschinen in Stationen integrieren. Ebenso ergeben sich **Restriktionen aus dem Verkettungssystem**, der **Orientierung der Maschinen** und der zur Verfügung stehenden **Hallenfläche** zur Installation neuer Produktionstechnik.

Es wurden in der Vergangenheit durchaus **einzelne Aspekte** wie etwa die **Parallelisierung von Ressourcen** in den Stationen behandelt, jedoch fehlt der Gesamtzusammenhang bzw. ein Modell, in dem die **Restriktionen**, wie sie sich aus **der realen Welt** ergeben, verarbeitet sind. Wie bereits festgehalten, dürfen in der Realität Prozesse nicht ohne Beachtung wichtiger Nebenbedingungen, wie z.B. von **Vorrangbeziehungen** oder der **Ausführbarkeit von Prozessen auf Ressourcentypen** und der **Bauteilaufspannung** in den Maschinen, Fertigungsressourcen zugewiesen werden.

Die Planung mit Hilfe einer „**Mischvariante**“ stellt sich ebenfalls, wie im Text dargelegt, größtenteils als nicht realitätsnah dar, was bedeutet, dass das zu entwickelnde Modell eine echte **Mehrproduktfertigung** zulassen muss.

## 4 Forschungsbedarf und Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik

### 4.1 Berücksichtigung von Unsicherheiten als Eingangsdaten für die Anpassungsplanung

Wie in Kapitel 3 „Stand der Technik“ herausgearbeitet, werden **Marktdynamik und -unsicherheiten** bei der strategischen Planung von Fertigungssystemen bisher nicht in dem Maße berücksichtigt, wie es aufgrund der potenziell schwerwiegenden Folgen angebracht wäre. In der vorliegenden Arbeit sollen hierzu verschiedene Marktszenarien zum Einsatz kommen, die aus einer vom Benutzer festgelegten Anzahl an diskreten Perioden bestehen und neben der Eintrittswahrscheinlichkeit eines spezifischen Szenarios Informationen darüber enthalten, in welcher Periode welches Produkt in welcher Stückzahl auf welchem Markt bzw. von welchem Kunden nachgefragt wird. Die Gesamtwahrscheinlichkeit der Szenarien muss sich zu „1“ ergeben. Ein Durchrechnen aller dieser Szenarien für jedes der denkbaren Produktionskonzepte lässt eine übersichtliche Risikodarstellung für jedes der Konzepte zu.

Die tatsächliche **Generierung von Marktszenarien** steht in dieser Arbeit nicht im Mittelpunkt der Betrachtungen, ist jedoch **Voraussetzung** für die weitere Bewertung von Fertigungssystemen und damit die **Anpassungsplanung**. Forschungsaktivitäten sind auf diesem Gebiet nicht angedacht, da entsprechende Ansätze aus bereits bestehenden Prognoseverfahren und Methodiken zur Szenariengenerierung abgeleitet werden können. Das zu programmierende **Modul zur Szenariengenerierung** soll die Möglichkeit bieten, geplante Produkte in ihrer **Stückzahl** und **Auftretenswahrscheinlichkeit** über dem **Lebenszyklus** abzubilden. Daraus wird unter Berücksichtigung von **Schwankungskorridoren** automatisiert eine vorher vom Benutzer **definierte Anzahl an Marktszenarien** erzeugt.

### 4.2 Handlungsbedarf in der Programm- und Ressourcenplanung

Die **primäre Entscheidung im Programm- und Ressourcenmodell** ist diejenige nach dem **diskreten Systemzustand** für jede einzelne Periode, sowohl in technischer als auch in organisatorischer Hinsicht. Fertigungssysteme sind vom Benutzer in Form von diskreten Ausbaustufen zu definieren, die sowohl technische Fertigungsmodule umfassen können, als auch den organisatorischen Schichtbetrieb. Für jede betrachtete Fertigungsline ist also in Abhängigkeit von den Marktbedürfnissen in jeder Periode herauszufinden, welcher der vom Benutzer eingegebenen möglichen Systemzustände der

günstigste ist. Dabei dürfen nicht nur abgegrenzte Momentaufnahmen betrachtet werden, sondern es müssen vielmehr die Nebenbedingungen so formuliert werden, dass Abhängigkeiten zwischen zwei aufeinander folgenden Perioden entstehen. **Zustandswechsel** müssen über zusätzliche Summanden in der **Zielfunktion** entsprechend Eingang finden und werden dadurch kostenmäßig bestraft. Da die **Fertigungskapazität** direkt vom jeweils geltenden Systemzustand abhängt und gleichzeitig das **Fertigungsprogramm** festgelegt wird, wird der engen Verknüpfung zwischen Programm- und Ressourcenplanung Rechnung getragen.

Im Rahmen der **Programmplanung** soll es möglich sein, **verteilte und mehrstufige Produktionssysteme** zu modellieren. Dabei können Ausgangs- bzw. Eingangslager der betreffenden Fertigungslinien eine Rolle spielen. Aus diesem Grund sind **Lagerrestriktionen** im Modell der Programm- und Ressourcenplanung zu integrieren, die eine weitere Abhängigkeit zwischen den Produktionsperioden hervorrufen. Eine Vorproduktion, und damit das Befüllen des Lagers in einer Periode, hat Einfluss auf die Produktion der Nachfolgeperiode und deren Kapazitätsauslastung. Diese Lagerhaltungsvariable führt zu entsprechenden Kosten und ist so in das Modell aufzunehmen, dass sie ebenfalls Eingang in der zu minimierenden Zielfunktion findet, in der über dem Lebenszyklus abgezinste Kosten addiert werden.

Ebenso schlägt sich **nicht erfüllte Nachfrage** in der Zielfunktion nieder. Diese Nichterfüllung hat entsprechende Auswirkungen auf die Nebenbedingungen, die den Teiestrom bei verteilten und/oder mehrstufigen Fertigungssystemen regeln. Eine Fertigungslinie kann immer nur die Menge an eine oder mehrere nachfolgende Linien liefern, die sie produziert hat, es sei denn, die Liefermenge wird durch einen in der Vorperiode gebildeten Lagerbestand ergänzt. Gleiches gilt für den Transport zu den Märkten. Reicht die vorhandene Kapazität und ein evtl. Lagerbestand nicht aus um die Marktnachfrage zu befriedigen, so ist zu überprüfen, welche Kosten niedriger ausfallen: die aus der nicht erfüllten Nachfrage – was einem Bezug der Teile von externen Lieferanten gleichkommt – oder die aus dem Kapazitätsausbau.

Für größere **Transportstrecken** sind entsprechende Elemente in die Zielfunktion einzubinden, da **Logistikkosten** einen nicht unerheblichen Teil der Lebenszykluskosten ausmachen können. Ein entsprechender Ansatz kann aus z.B. dem Standortmodell in [Zäpf89] entnommen werden. In diesem Fall sind die dort vorkommenden Nebenbedingungen um die Möglichkeit zu erweitern, mehrstufige Produktionssysteme abzubilden, da die erzeugten Produkte in dem dort aufgeführten Modell lediglich direkt an die Märkte geliefert werden und es keine Möglichkeit gibt, sie zu nachfolgenden Fertigungslinien zu transportieren.

Zusätzliche Summanden in der Zielfunktion sollen gebildet werden durch **fixe und variable Kosten**, die vom jeweils aktiven Systemzustand und der Produktionsmenge abhängen.

Benötigte Eingangsparameter für jedes der zu untersuchenden Fertigungskonzepte und für jeden organisatorischen Ausbauzustand bilden die Anzahl und ggf. das Qualifizierungsprofil der eingesetzten Arbeitskräfte, Arbeitszeiten, Anzahl an Schichten und Zuschlagssätze für Nacht-, Wochenend- und Sonderschichten. Vom organisatorischen Systemzustand unabhängige Informationen bilden Investitionen und Kosten beim Systemwechsel, Betriebs- und Verbrauchskosten, Gemeinkosten, Produktions- und Lagerkapazitäten, die gebildeten Marktszenarien, die Stücklistenstruktur bei einer mehrstufigen Produktion sowie eine Beschreibung der Fertigungsmöglichkeiten für jede Linie. Ein technischer Zustand einer Linie kann dadurch gekennzeichnet sein, dass durch Sonderinvestitionen die Linie für die Produktion einer zusätzlichen Variante vorbereitet wird. Demnach muss die Möglichkeit, diese Variante fertigen zu können, in Abhängigkeit vom technischen Systemzustand definiert werden.

### 4.3 Handlungsbedarf in der Ressourcen- und Prozessplanung

Den wichtigsten Ansatz für diesen Teil der Arbeit stellt die **Konfigurationsplanung** von Flexiblen Fertigungssystemen bereit, allerdings gelten andere Voraussetzungen. Zum einen handelt es sich bei FFS nicht um Fertigungssysteme nach dem Fließprinzip, weshalb die einzelnen Bearbeitungsmaschinen nicht in Linie miteinander verkettet sind. Zum anderen herrscht in FFS im Allgemeinen keine einzuhaltende Taktzeit, die zur Fertigstellung der Bearbeitungsschritte innerhalb einer Station oder Maschine gilt. Trotzdem ist der Grundgedanke, wie er in Modellen der Klasse „Ressourcenoptimierung“ in [Tetz90] verarbeitet ist, auch in der vorliegenden Arbeit gültig: es wird der Frage nachgegangen, **wie viele und welche Maschinen** benötigt werden und **welche Prozessschritte** darauf ausgeführt werden. Andere Betrachtungsfelder der Konfigurationsplanung wie Pufferoptimierungen oder detaillierte Layoutbetrachtungen werden nicht vorgenommen. In [Roth92] befasst sich der Autor mit der „Planung und Optimierung der Verfahrensteilung in der Fertigung“. Er schreibt in seinem Ausblick:

*„Als Weiterführung der Arbeit ist eine Ausweitung des hier vorgestellten Verfahrens im Hinblick auf die Unterstützung von Investitionsentscheidungen bei Fertigungseinrichtungen denkbar. Im Rahmen der Planung von Ersatzinvestitionen wäre zu überprüfen, ob anstelle einer vom Funktionsumfang her identischen Maschine nicht vorteilhafter eine Maschine mit verändertem Einsatzspektrum, beispielsweise hinsichtlich Mehrverfahrens- oder Mehrseitenbearbeitung zu beschaffen ist. Bei Kapazitätserweiterungen oder einer grundlegenden Veränderung des Produktionspro-*

*gramms sollten systematisch diejenigen Fertigungseinrichtungen bestimmt werden können, die einen vorhandenen Bestand an Fertigungseinrichtungen unter Berücksichtigung der Organisation und Kostenstruktur einer Fertigung nach Zeit- oder Kostengesichtspunkten optimal ergänzen. In Anbetracht der hohen Maschinenpreise und des damit verbundenen Investitionsrisikos bedarf es dazu einer erweiterten Planungsmethode, mit der bereits im Planungsstadium die zeitlichen und wirtschaftlichen Auswirkungen konkurrierender Investitionsmöglichkeiten auf die Verfahrensteilung einer Fertigung zuverlässig quantifiziert werden können.“*

Dem hier dargestellten Anspruch soll in vollem Umfang nachgekommen werden.

Ein anderer Punkt ist die **Leistungsabstimmung** und damit verbunden die Fragestellung der Zuteilung von Prozessschritten auf Bearbeitungsstationen unter Einhaltung einer gewissen **Taktzeit**. Auch dieser Gesichtspunkt ist bei der Serienfertigung von großer Bedeutung und wird deshalb in das zu erstellende Modell aufgenommen.

Da sich in der Literatur keine integrierte Betrachtung findet, die sich auf die Umplanung von Fließfertigungssystemen bezieht und einhergehend die komplexen Restriktionen aus einer bestehenden Fertigung aufgreift, ergibt sich Folgendes für das zu entwickelnde Modell zur Ressourcen- und Prozessplanung:

Für die **Ressourcen- und Prozessplanung** sind entsprechende Daten über sowohl die durchzuführenden **Bearbeitungseinzelschritte** nötig, als auch über die ausführenden **Ressourcen**. Es handelt sich hierbei um die **Feinplanung** eines Fertigungssystems. Die generierten Marktszenarien finden in diesem Modell keine Anwendung, da diese ihren Einfluss lediglich in der Programm- und Ressourcenplanung haben. Nur dort wird entsprechend auf Periodenbasis geplant. Das in diesem Abschnitt zu erstellende Modell behandelt lediglich eine Momentaufnahme aus dem Lebenszyklus der Fertigungsanlage. Es wird von einem bereits bestehenden Fertigungssystem ausgegangen bzw. von einer diskreten Ausbaustufe aus der Programm- und Ressourcenplanung. Die dort vorliegenden Informationen müssen im Zuge der Feinplanung derart verfeinert werden, dass herausgestellt wird, welche Prozessschritte in Abhängigkeit vom untersuchten Fertigungskonzept oder von der Fertigungstechnologie wie viel Fertigungszeit beanspruchen. Ebenso werden Informationen über die denkbaren Fertigungsressourcen benötigt, die in einer Art Ressourcenbibliothek zusammengestellt sein müssen.

Im Falle von kleineren Änderungen, entweder am Produkt oder an der geforderten Ausbringungsmenge, kann es ausreichend sein, darauf mit Maßnahmen zu reagieren, die weit aufwandsärmer sind als grobe technische oder organisatorische Anpassungen aus der Programm- und Ressourcenplanung. Vielmehr könnte das Ziel verfolgt werden, mit den vorhandenen Ressourcen auszukommen bzw. in nur geringem Umfang Investitionen zu tätigen. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, einzelne Prozessschritte aus ih-

ren bisherigen Maschinen herauszunehmen und in benachbarte Stationen zu verschieben und/oder nur **punktuell in neue Produktionsressourcen zu investieren** und diese an geeigneter Stelle im System zu integrieren.

Die **Zielfunktion** des zu erstellenden Modells behandelt folgende Kosten und ist demnach zu minimieren: **Investitionen** für neue Maschinen, **Verschrottungskosten** für Altmaschinen, **fixe und variable Produktionskosten** sowie **Umstellungskosten** im Falle von Prozessschrittverschiebungen.

Eine der **wesentlichsten Entscheidungen** innerhalb des Modells behandelt die Frage, in welcher **Station** des Fertigungssystems welcher **Maschinentyp** in welchen **Mengen** installiert werden soll, um die geforderte Ausbringungsmenge für alle Produkte zu erreichen. **Fehlmengen** sind in diesem Modell nicht zulässig.

In jeder **Station** dürfen lediglich **Maschinen des gleichen Typs** errichtet sein, was bedeutet, falls in einer Station neu investiert wird, nur eine Maschine des gleichen Typs hinzugestellt wird, oder es werden zuvor alle Altmaschinen desinvestiert. Sollte die „Verschrottung“ von Maschinen Erlöse generieren, so sind hier entsprechende „negative Kosten“ anzusetzen. Außerdem muss die Anzahl verschrottungsfähiger Maschinen auf die tatsächlich vorhandene Anzahl an Maschinen in einer Station begrenzt werden. Ein Ansatz zur Investitionsplanung kann [TeKu92] oder [Tetz90] entnommen werden.

Neu aufgestellte Maschinen sind ebenfalls in ihrer Anzahl beschränkt aufgrund ihres **Flächenbedarfs**, der wiederum vom installierten Maschinentyp abhängt. Es kann auch aus statischen Gründen bzgl. der Fertigungshalle nicht möglich sein, bestimmte Maschinentypen in einer Maschinengruppe aufzustellen. Ein weiterer Punkt, der im Fall eines kompletten Desinvests und anschließendem Neuinvest beachtet werden muss, ist, dass nach der Deinstallation von Maschinen die **Verkettungseinrichtungen** noch immer vorhanden sind. Dementsprechend sind Nebenbedingungen aus dieser Verkettung zu beachten. So darf unter keinen Umständen die **Kapazität** des Verkettungsmittels, z.B. eines Portalroboters, überschritten werden. Zudem verfügt jeder Maschinentyp über einen **Orientierungstyp**. Dieser legt fest, wie eine Verkettung dieses Maschinentyps geschehen kann. Transfermaschinen sind innen verkettet, Bearbeitungszentren werden von vorne oder oben be- und entladen. All diese Aspekte müssen durch entsprechende Nebenbedingungen in das Modell Eingang finden.

Eine **andere zentrale Frage** innerhalb dieses Modells ist, **welcher Fertigungsprozess** – dessen Ausführungszeit vom verwendeten Maschinentyp abhängt – **auf welcher Station** ausgeführt werden soll, ohne dabei den gegebenen **Vorranggraphen** zu verletzen. Auch hier findet sich ein entsprechender Ansatz in [Tetz90], der jedoch auf die in der vorliegenden Arbeit geltenden Restriktionen hin abgeändert werden muss.

Gleiche Prozesse für unterschiedliche Produkte sind in der gleichen Station auszuführen und dürfen nicht auf mehrere Stationen verteilt werden. Zudem darf ein Bauteil von nur einer Maschine innerhalb einer Station bearbeitet werden.

Da das zu erstellende Modell ein **einperiodisches Modell** sein soll, ist die betrachtete Zeitperiode näher zu spezifizieren. Der sich ergebende Zeitvorrat steht zur Ausführung aller Prozessschritte aller Produkte zur Verfügung. Demnach muss auch für jede Station die Summe aus allen dort zugeordneten Fertigungsprozessen über alle Produkte kleiner gleich der insgesamt zur Verfügung stehenden Zeit sein. In diesem Zusammenhang gibt es vier verschiedene Produktionstypen, die mit dem Modell darstellbar sein sollen:

- Zunächst ist die **taktlose Fertigung** zu nennen, bei der alle Produkte in **beliebiger Reihenfolge** in das System eingelastet werden können. Bei stark unterschiedlichen Produktvarianten führt dies zu sich gegenseitig überholenden Bauteilen auf der Linie, da einige Varianten in manchen Maschinen länger verbleiben als andere. Zudem muss von **unendlich großen Puffern** vor den Maschinen ausgegangen werden, da sich sonst z.B. für extrem seltene Varianten mit einem sehr aufwendigen Verfahrensschritt und mehreren hintereinander eintreffenden Bauteilen dieser Variante eine lange Schlange auf dem Transportband vor der Engpassmaschine bilden würde, die andere Produkte blockiert. Nur im Falle sehr ähnlicher Produktvarianten und damit nahezu gleicher Bearbeitungsprozesse und -zeiten stellt diese Art der Fertigung ein denkbare Konzept dar.
- Gegenläufig ist ein Konzept mit jeweils **vorgegebenen Taktzeiten** für die herzustellenden Produkte. In einem solchen Fall wird von einer **losweisen Fertigung** ausgegangen, wobei die Zeit für Rüstvorgänge von der insgesamt zur Verfügung stehenden Zeit abgezogen werden muss. Die Prozesse sind so auf Stationen zuzuordnen, dass für jedes Produkt an jeder Station keine Taktzeitüberschreitung durch die Ausführung der Prozessschritte auftritt.
- Da es manchmal nur schwer möglich sein kann Taktzeiten vorzugeben, sollte im Modell eine Fertigungsart berücksichtigt werden, bei der die **Taktzeiten als variabel** angesehen werden, was einen zusätzlichen Komplexitätsgang in die Optimierungsaufgabe einbringt. Unter dieser Voraussetzung wird im Verlauf der Optimierung ständig ein Abgleich zwischen den Entscheidungsvariablen bzgl. der Anzahl zu installierender Maschinen in den Stationen, bzgl. der Prozesszuordnung zu Stationen und bzgl. der Taktzeit für die einzelnen Produkte vorgenommen.
- Eine letzte Fertigungsart ist dadurch gekennzeichnet, dass die verschiedenen **Produktvarianten in beliebiger Reihenfolge** in einem **Einheitstakt** über die Linie laufen, vergleichbar mit einem Montageband. Die Fertigung muss sich also in diesem Fall nach der **längsten Taktzeit** über die verschiedenen Produkte und Stationen gesehen richten.

Auf das Thema der Produktionstypen wird in Abschnitt 6.2.4 im Rahmen der Modellierung nochmals näher eingegangen.

Auch die **Bauteilaufspannung** ist bei der Optimierung zu berücksichtigen, da verhindert werden muss, dass Prozesse innerhalb einer Station und damit Maschine zusammengeführt werden, die nur durch ein Umsetzen des Bauteils in eine andere Spannlage realisiert werden können.

Eingabeparameter bilden für das Modell die maschinenbezogenen Investitionen und Desinvestitionen, fixe und variable Kosten sowie der Platzbedarf und Orientierungstyp von Maschinentypen. Über Stationen müssen dementsprechend Informationen vorliegen, wie viel Platz diese bereitstellen, welcher Orientierungstyp dort installiert ist und somit nur installiert werden kann, sowie die Kapazität des dort befindlichen Verkettungssystems. Ebenso muss es möglich sein, da das Modell auf einer bereits existierenden Anpassungsstufe aus der Programm- und Ressourcenplanung aufbaut, die bestehende Fertigung abzubilden, d.h. den Status quo bzgl. der Prozessverteilung und Maschinenaufstellung darzustellen bzw. was es kostet, diese Verteilung der Prozesse auf Maschinentypen und Stationen abzuändern. Zudem ist die zur Verfügung stehende Zeit abzüglich der Rüstzeiten anzugeben sowie einer der dargelegten Fertigungstypen auszuwählen.

Auf Seiten der Prozesse sind zunächst deren Anzahl und deren Ausführbarkeit auf den verschiedenen Maschinentypen anzugeben sowie deren Fertigungszeit, die auf dem jeweiligen Maschinentyp benötigt wird. Der Vorranggraph muss in einer entsprechenden Nebenbedingung des Modells berücksichtigt werden und hat damit erheblichen Einfluss auf die Prozesszuteilung auf Stationen.

Abschließend sind Angaben zu den Bauteilaufspannungen innerhalb von Maschinen zu machen und die Ausführbarkeit von Prozessen bei diesen Spannlagen zu definieren. Dies soll verhindern, dass innerhalb einer Station und Maschine Prozesse auf z.B. entgegen gesetzten Bauteilseiten durchgeführt werden, wenn dies aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit einer der Bearbeitungsstellen bei der in der Maschine vorliegenden Spannlage nicht zulässig ist.

Eine so **generierte Anpassungsalternative** kann anschließend der Methodik zur Programm- und Ressourcenplanung zur Verfügung gestellt werden, die daraufhin in einer **Lebenszyklusbetrachtung** darüber entscheidet, ob auf diese zurückgegriffen werden sollte oder ob das Hinzustellen eines Produktionsmoduls, das Einführen einer zusätzlichen Schicht oder der Bezug von Bauteilen von einem externen Lieferanten kostengünstiger ist. Als entscheidende Kennzahl werden hierfür die **net present cost** herangezogen. Somit werden Investitionsentscheidungen nicht mehr nur auf Basis von Anfangsinvestitionen bzw. statischen – oder im besten Fall – dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchgeführt, sondern lebenszyklusorientiert komplett unter Beachtung der

am Markt vorherrschenden Unsicherheiten bewertet und letztendlich die Entscheidung abgesichert.

## 5 Konzept zur Anpassungsplanung von Fertigungssystemen

Für die Programm- und Ressourcenplanung einerseits und für die Ressourcen- und Prozessplanung andererseits werden **zwei** voneinander **getrennte, mathematische Optimierungsmodelle** aufgestellt. Dabei bilden die Informationen hinsichtlich des prognostizierten Produktabsatzes einen wesentlichen Eingabeparameter und stecken somit den erforderlichen Flexibilitätsrahmen ab. Marktunsicherheiten werden in Form von Szenarien erfasst, die einzeln im Modul der Programm- und Ressourcenplanung berechnet und ausgewertet werden.

Innerhalb der Programm- und Ressourcenplanung wird für ein Fertigungskonzept darüber entschieden, wie die Fertigungsressourcen über dem Anlagenlebenszyklus auf grober technischer sowie organisatorischer Ebene den Marktgegebenheiten kostenoptimal anzupassen sind. Durch eine Berechnung mehrerer Anlagenkonzepte kann ein Wirtschaftlichkeitsvergleich durchgeführt werden.

Werden detaillierte Untersuchungen hinsichtlich der technischen Systemanpassung gewünscht, kann ein weiteres Modul zur Ressourcen- und Prozessplanung eingesetzt werden. Als Basis für eine derartige Untersuchung wird ein definierter Anpassungszustand aus der Programm- und Ressourcenplanung verwendet. Dieser muss ausreichend detailliert beschrieben sein, d.h. es müssen Informationen bzgl. der verwendeten Maschinentypen sowie deren Anzahl und Anordnung im Fertigungssystem vorliegen. Darüber hinaus ist ein Prozessplan nötig, der beschreibt, welche Bearbeitungsprozesse in welchen Fertigungsabschnitten durchgeführt werden. Treten Änderungen an den geforderten Stückzahlen oder Produktvarianten auf, so kann durch dieses Modul eine neue Prozessverteilung vorgenommen werden, wobei eine Investitionsrechnung für neue Betriebsmittel sowie – falls gewünscht – eine Taktzeitanpassung integriert stattfindet. Das Ergebnis einer solchen Optimierung kann anschließend in das entsprechende ursprüngliche Linienkonzept als zusätzlicher technischer Anpassungszustand überführt werden.

Im Mittelpunkt der beiden Modelle steht eine **Zielfunktion**, für die es gilt, unter Variation von Entscheidungsvariablen einen bestmöglichen Wert zu ermitteln. Für den hier vorgestellten Einsatz bietet sich eine **Minimierung von Kosten** an, da letztendlich eine unternehmerische Investitionsentscheidung stets auf Kostengesichtspunkte zurückgeführt wird. So genannte **Nebenbedingungen** sorgen dabei für die Einhaltung realer Gesetzmäßigkeiten, etwa dass die Produktionsmenge die Fertigungskapazität nicht überschreiten darf.

## 5.1 Marktentwicklung als Parameter der Anpassungsplanung

Ausgangspunkt des zu entwickelnden Ansatzes bildet die Vertriebsprognose für die herzustellenden Produkte. Den Planungsabteilungen wird eine solche Vertriebsprognose zur Verfügung gestellt, um die erforderlichen Kapazitäten ermitteln zu können. Teil dieser Vertriebsprognose ist die erwartete Marktdynamik, also die Veränderlichkeit der Nachfrage über dem Lebenszyklus. Sowohl die Dauer und Intensität des Hochlaufs, als auch unter Umständen ein neuerlicher Anstieg der Verkaufszahlen durch eine geplante Modellpflege wird auf diesem Wege vom Vertrieb vorgegeben. Die generelle Form der Kurve wird in den Planungsabteilungen überwiegend als Planungsgrundlage akzeptiert. Lediglich die Höhe der Kammlinie ist oft ein Diskussionspunkt, was letztendlich daran liegt, dass diese über die maximal zu installierende Kapazität entscheidet und somit die Arbeit der Planer maßgeblich beeinflusst.

Oft werden im Zusammenhang mit dieser Prognose **keinerlei Aussagen bzgl. der Zuverlässigkeit der Prognosedaten** getroffen. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit ein **Unsicherheitskorridor** eingeführt, der diese Prognoselinie einhüllt. Die Breite und generelle Form des Korridors soll vom Planer beliebig festgelegt werden können.

Im nächsten Schritt soll vom Planer definiert werden, wie **viele Szenarien innerhalb dieses Korridors** berechnet werden sollen. Als minimale Anzahl können drei Szenarien angesehen werden: das Planszenario, also dasjenige entsprechend der Vertriebsprognose, und jeweils ein positives und ein negatives, die sich aus der oberen und unteren Begrenzungslinie des Korridors ergeben.

Nachfolgend sollen die **Einzelszenarien mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit** belegt werden, was es dem Planer ermöglicht, seine Einschätzung bzgl. der zukünftigen Marktverhältnisse einfließen zu lassen. Die so erhaltenen, mit ihrer Wahrscheinlichkeit gewichteten Einzelszenarien für ein Produkt können grundsätzlich zur Berechnung innerhalb des Programm- und Ressourcenmodells eingesetzt werden. Jedoch ist ein zusätzlicher Aspekt zu berücksichtigen: stellt das zu planende Produkt eine Komponente für mehrere verschiedene Endprodukte dar, so sollte es möglich sein, das bisher aufgezeigte Vorgehen für jedes Endprodukt getrennt durchzuführen und diesen eine **Auftretenswahrscheinlichkeit** zuzuweisen. Abschließend können unter Berücksichtigung aller Wahrscheinlichkeiten sämtliche Kombinationen der Endprodukte und ihrer Einzelszenarien gebildet und so zu Gesamtzenarien vereinigt werden.

Nach der Erstellung der Szenarien ist festgelegt, welcher Flexibilitäts- und Anpassungsbedarf vorhanden ist. Die möglichen Marktentwicklungen sind also in eine greifbare Form gebracht und können zur Berechnung herangezogen werden. Gegenübergestellt wird dieser Flexibilitätsbedarf mit dem Flexibilitätsangebot der betrachteten Fertigungskonzepte. Dies geschieht zunächst auf grober Detaillierungsebene in einem Mo-

dell zur Programm- und Ressourcenplanung, dessen Konzept im folgenden Kapitel vor-  
gestellt wird.

## 5.2 Konzept zur Programm- und Ressourcenplanung

Aus dem Absatzmarkt wird die Vertriebsprognose abgeleitet und aus dieser das Plan-  
szenario. Ebenso hat der Absatzmarkt Einfluss auf das Produkt und damit die Produkt-  
entwicklung. Ist diese abgeschlossen, kann aufgrund der Bearbeitungsaufgabe, die sich  
im Wesentlichen durch die Bauteilgeometrie, Werkstoffangaben und Toleranzen defi-  
niert, auf verschiedene Fertigungskonzepte und deren spezifische Technologie, resultie-  
rende Arbeitspläne und Vorranggraphen geschlossen werden. Für jedes dieser Konzepte  
ist die Programm- und Ressourcenplanung durchzuführen und in deren Verlauf der op-  
timale Anpassungsverlauf, basierend auf den technischen und organisatorischen Anpas-  
sungsmöglichkeiten des jeweiligen Konzepts und damit dessen Flexibilitätsangebot, für  
jedes der erzeugten Szenarien zu erstellen, sowie die dabei anfallenden Kosten, die Pro-  
duktionsstückzahlen und der Ressourcenbedarf zu ermitteln. Gleichzeitig ist bei der  
Minimierung der Lebenszykluskosten die make or buy Entscheidung zu fällen: werden  
bei Bedarf eigene Kapazitäten geschaffen, was einem Wechsel des Ausbauzustands und  
damit zusätzlichen sprungfixen Kosten entspricht, oder werden die benötigten Stück-  
zahlen von einem Lieferanten bezogen.

Da der erzeugte Anpassungspfad nicht nur für ein denkbares Marktszenario gebildet  
wird sondern für eine Vielzahl an möglichen, ergibt sich eine **Kostenverteilung** – ab-  
hängig von den Ergebnissen der jeweiligen Szenarien und deren Wahrscheinlichkeiten.  
Aus der sich ergebenden Kostenverteilung wird das **Risiko eines Fertigungssystems**  
ermittelt und mit den Ergebnissen anderer Fertigungskonzepte verglichen.

### 5.2.1 Benötigte Eingangsparameter

Für das zu entwickelnde Optimierungsmodell sind folgende Eingabedaten relevant:

Die **Marktnachfrage** bildet die Grundlage für die Kapazitätsplanung. Sie wird wie oben  
beschrieben in Form von Marktszenarien bereitgestellt.

Von Seiten der **Produkte** muss bei mehrstufigen Fertigungssystemen die Wertschöp-  
fungskette in Form einer **Stückliste** vorliegen.

Hinsichtlich der Linien des Fertigungssystems werden folgende Informationen benötigt:

- Für die jeweiligen **Produktionslinien** muss festgelegt werden, **welche Produkte**  
**darauf gefertigt werden können** bzw. ob dies nur in gewissen technischen Anpas-  
sungszuständen möglich ist. In diesem Zusammenhang ist der **Kapazitätsbedarfs-  
faktor** vorzugeben, der festlegt, welches Produkt bei der Fertigung einer Einheit wie

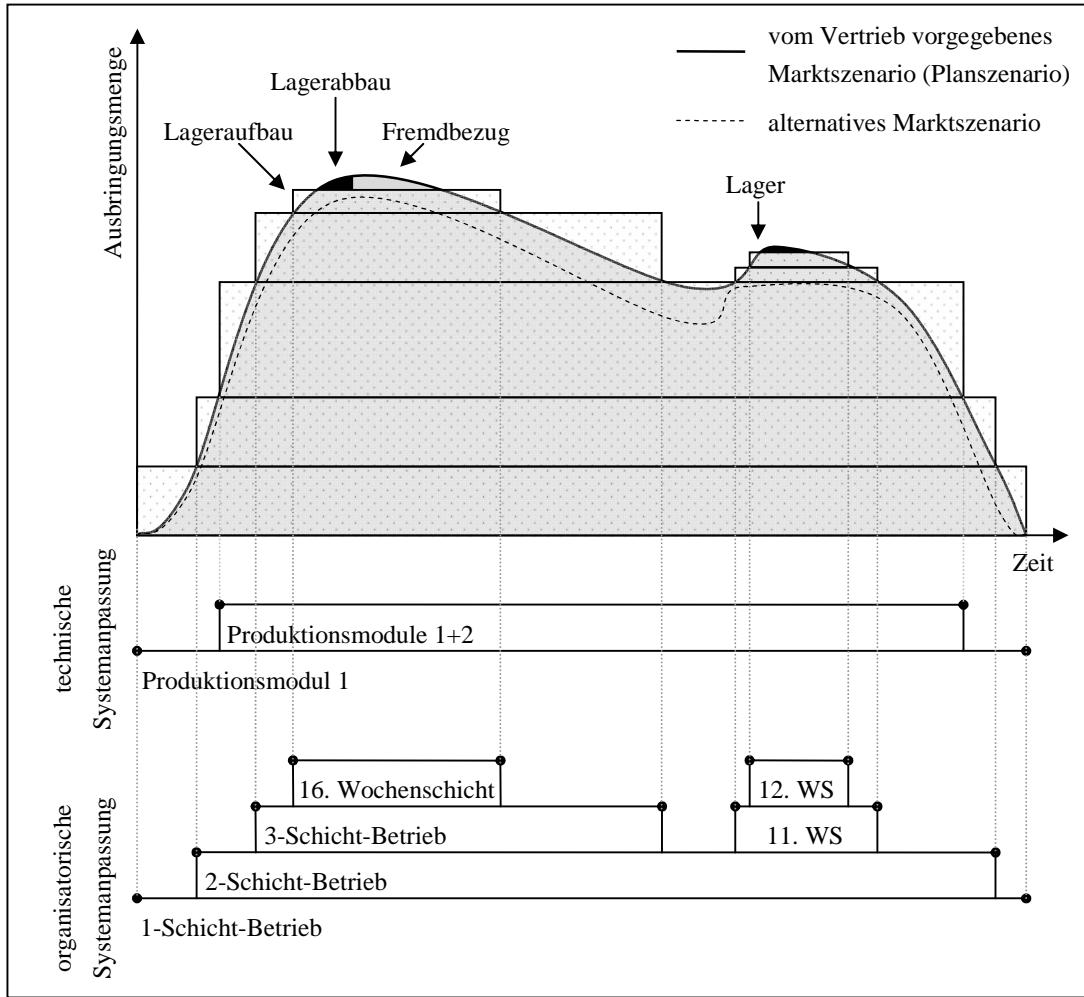
viele der zur Verfügung stehenden, vom Benutzer in Abhängigkeit vom Ausbauzustand zu definierenden Kapazitätseinheiten verbraucht.

- Wenn Linien nicht über das gesamte betrachtete Zeitfenster zur Verfügung stehen, weil sie etwa zunächst für anderweitige Produktionsaufgaben eingesetzt werden, so befinden sich jene Linien unter Umständen zu Beginn der betrachteten Produktionsaufgabe bereits in einem definierten **Startzustand**, der ebenfalls einen Eingabeparameter bildet.
- Periodenfixe und stückzahlvariable **Kosten** sowie Aufwendungen für Änderungen am System sind sowohl für die technische Seite, als auch für die organisatorische zu definieren. Sie bilden die Basis für die Ermittlung des negativen Kapitalwertes über dem Lebenszyklus. Zusätzliche Kostenbestandteile stellen die Transporte bei verteilten oder mehrstufigen Systemen sowie Lager- und Fremdbezugskosten dar.
- Für **Ausgangslager**, die hinter jeder Fertigungslinie vorgesehen werden können, sind der Anfangsbestand diverser Produkte und die insgesamt zur Verfügung stehende Lagerkapazität anzugeben.

Generelle Eingabedaten bilden zum einen der periodenabhängige **Diskontierungsfaktor**:  $DisFact_{Pe} = \frac{1}{(1+i)^t}$ . Dabei steht  $i$  für den Zinssatz in Prozent/100 und  $t$  für die Periode, in der eine Auszahlung stattfindet. Andererseits berücksichtigt ein **Kapazitätssteigerungsfaktor** die kontinuierlichen Verbesserungen am System.

### 5.2.2 Antizipation der Flexibilitätsnutzung

Die **Antizipation der Flexibilitätsnutzung** findet im Wesentlichen dadurch statt, dass die erzeugten **Marktszenarien** mit dem **Flexibilitätspotential** der jeweiligen Fertigungskonzepte überlagert werden. In Abbildung 5-1 sind die einzelnen Kapazitätsstufen dargestellt, die aus den technischen sowie organisatorischen Anpassungsmöglichkeiten des Systems abgeleitet werden.



**Abbildung 5-1:** Antizipation der Flexibilitätsnutzung im Rahmen der Programm- und Ressourcenplanung durch Überlagerung von Flexibilitätsangebot und -nachfrage

Das Planszenario gibt die benötigten Stückzahlen vor. Aus allen vom Benutzer definierten Anpassungsstufen ist die kostenminimale Kombination über dem Lebenszyklus zu ermitteln. Dabei eingeschlossen sind die Möglichkeiten, fehlende Kapazitäten über eine Vorproduktion und damit eine kurzfristige Lagerhaltung abzufangen, sowie fehlende Produktionsmengen von einem externen Lieferanten zu beziehen. In dem dargestellten Beispiel handelt es sich überwiegend um organisatorische Anpassungen. Zunächst beginnt die Fertigung im 1-Schicht-Betrieb und wechselt anschließend in den 2-Schicht-Betrieb. Auch nach Hinzufügen eines weiteren Produktionsmoduls reichen die Kapazitäten im 3-Schicht-Betrieb nicht aus, um die Nachfrage komplett zu befriedigen. Aus diesem Grund wird letztlich zu einer Wochendschicht gegriffen. Außerdem wird die Möglichkeit der Lagerhaltung in Anspruch genommen, um nachgelagerte Nachfragespitzen bedienen zu können. Zu dem Zeitpunkt, an dem der Lagerbestand aufgebraucht

ist, wird auf einen externen Lieferanten zurückgegriffen. Die theoretisch mögliche Einführung einer 17. Wochenschicht wird nicht vollzogen, da die Kombination aus Lagerhaltung und Fremdbezug günstiger ist. Wird die oben dargestellte Lösung als die optimale erkannt, so wird dieser Anpassungsverlauf gespeichert und mit ihm alle Werte der beteiligten Entscheidungsvariablen, die während der Optimierung festgelegt worden sind: das Produktionsvolumen auf den jeweiligen Fertigungslinien, Transportaufkommen, Lagerhaltung und Fremdbezugsmengen.

Gleiches Vorgehen wird für **alle alternativen Marktszenarien** angewandt, wodurch sich eine Vielzahl an unterschiedlichen Anpassungsverläufen für ein Fertigungskonzept ergibt. Dementsprechend lässt sich daraus eine **Verteilung der zu erwartenden NPC** ableiten. Die Verteilung nimmt eine umso geringere Schwankungsbreite an, je flexibler ein System ist. Je größer also der Flexibilitätsbedarf durch sehr unterschiedliche Marktszenarien ist, desto höher sind die Anforderungen an die Fertigungskonzepte, sich dahingehend anzupassen. Unflexible Systeme lassen sich nur sehr kostenintensiv anpassen, wohingegen hochflexible Systeme von vornherein aufgrund zu hoher Investitionen und Betriebsausgaben nur schwer konkurrieren können. Auf diese Art und Weise wird dasjenige Fertigungssystem herausgefiltert, das am wirtschaftlichsten für die zu erfüllende Produktionsaufgabe geeignet ist.

Die wesentlichsten Resultate, die im Rahmen der Programm- und Ressourcenplanung zu erwarten sind, werden im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

### 5.2.3 Resultate

Das wichtigste Ergebnis aus der Optimierung des Produktionsprogramms und der groben Ressourcenkonfiguration über dem Lebenszyklus stellt die **zu erwartende Kostenverteilung** für ein Fertigungskonzept dar. Bezogen auf die beiden Szenarien in Abbildung 5-1 wird sich für das Planszenario ein anderer Anpassungsverlauf einstellen als für das „alternative Szenario“. Dies liegt vor allem daran, dass im letzteren Fall aufgrund der abgeschwächten Nachfrage die zusätzlichen Wochenendschichten nach der Modellpflege nicht benötigt werden, sowie an der Einsparung von Lagerhaltung und dem Einkauf fremder Leistungen. Auch kann der 3-Schicht-Betrieb wesentlich früher wieder verlassen werden, was zusätzliche Kosteneinsparungen mit sich bringt. Werden Wahrscheinlichkeiten für die beiden Szenarien in die Ergebnisse einbezogen, kann folgende Darstellung aufgebaut werden:

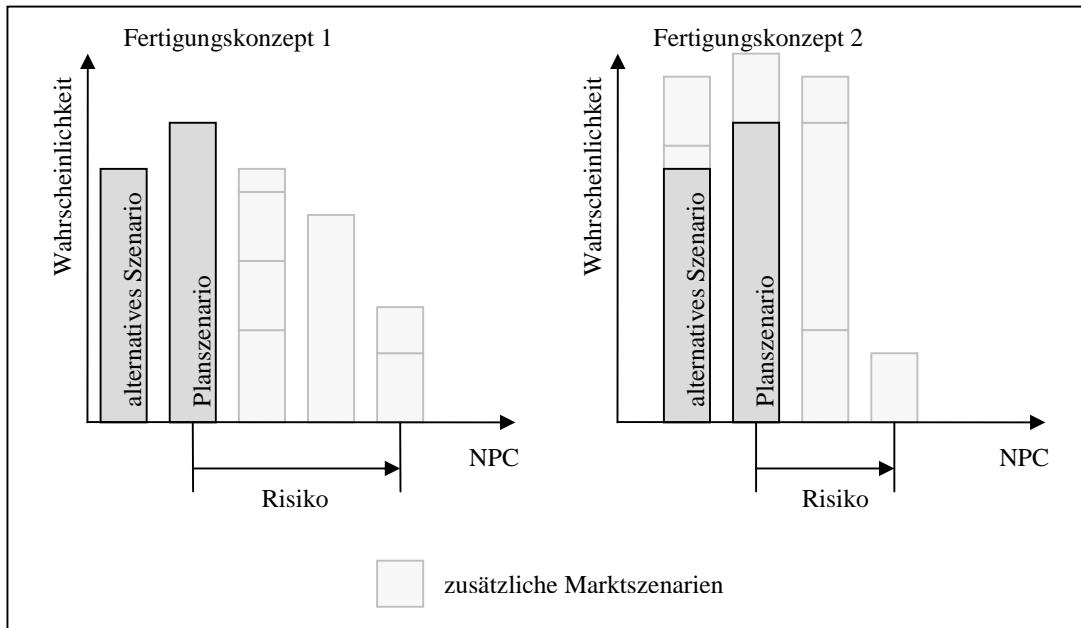
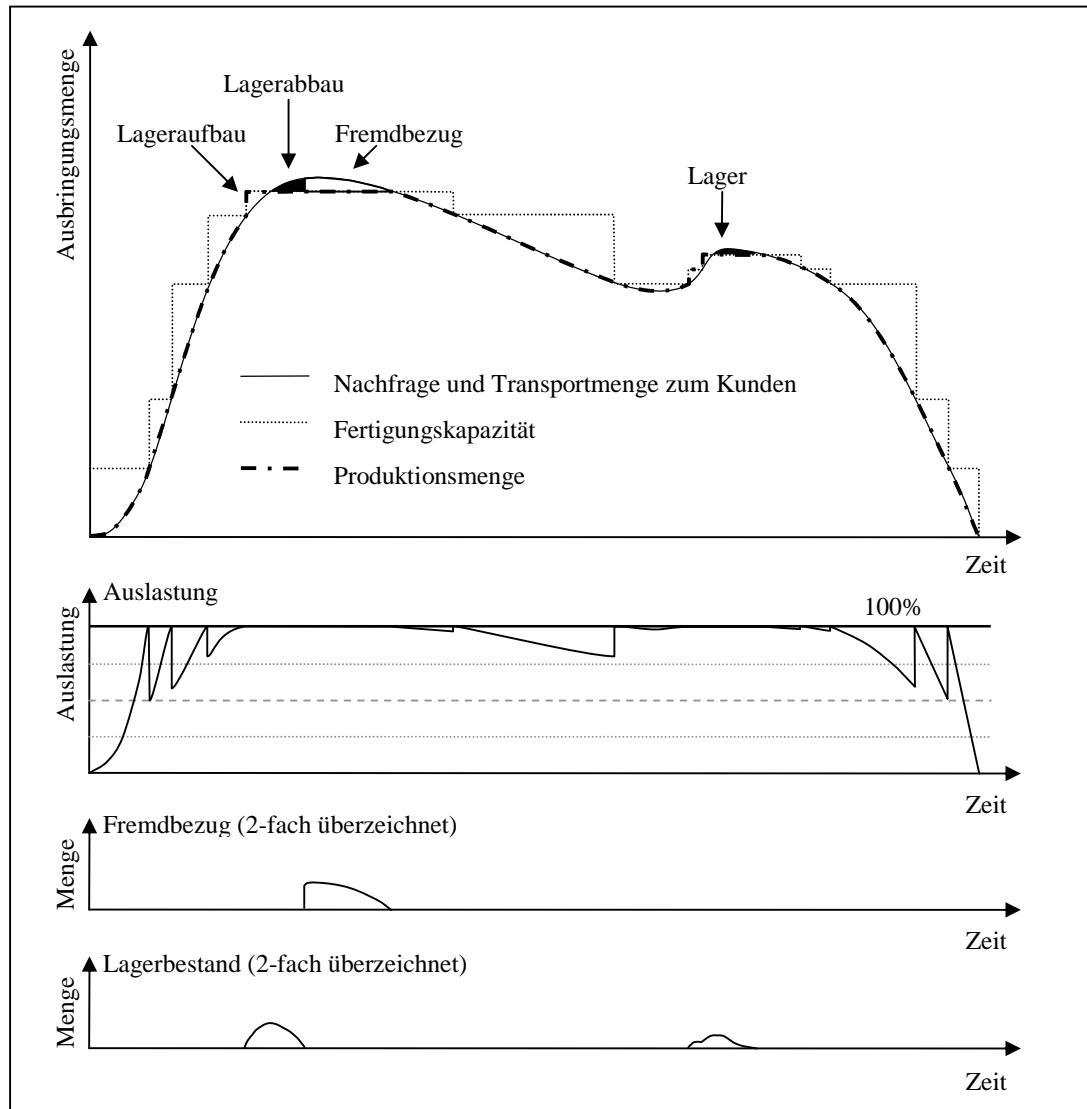


Abbildung 5-2: NPC-Verteilung in Form von Histogrammen

Für Fertigungskonzept 1 kann sich beispielsweise eine tendenziell niedrigere Verteilungskurve ergeben als bei Konzept 2. Dafür ist sie etwas breiter, da sich für beide in Summe die Wahrscheinlichkeiten der Szenarien zu 100% addieren müssen. Außerdem könnte aus den beiden Diagrammen abgelesen werden, dass es sich bei Konzept 2 um das flexiblere handelt, da die Schwankungsbreite über alle Szenarien hinweg niedriger ist, insgesamt die Kosten jedoch für die beiden herausgegriffenen Szenarien höher liegen. Dafür ist das Risiko, das sich aus der Differenz zwischen dem NPC-Wert für das Planszenario und dem Maximalwert für die NPC ergibt, etwas niedriger. Je mehr Szenarien gerechnet werden, desto aussagekräftiger und detaillierter werden die dargestellten Diagramme und die damit verbundenen Risikoanalysen, und umso leichter kann auf ein geeignetes Fertigungskonzept geschlossen werden.

Eine schematische Darstellung hinsichtlich der **technischen und organisatorischen Systemanpassungen** sowie der einhergehenden Kapazitätsveränderung kann Abbildung 5-1 entnommen werden. Auch sie gehören zu den zentralen Ergebnissen.

Werden zum Beispiel die Ergebnisse des oben eingeführten Planszenarios ausgewertet und dargestellt, können ergänzend für die noch verbleibenden Entscheidungsvariablen **Produktion, Transportaufkommen, Lagerverlauf** und **Fremdbezug** entsprechende Kurvenverläufe generiert werden.



**Abbildung 5-3:** Zusätzliche Darstellungsformen der Ergebnisse aus der Programm- und Ressourcenplanung

Wird vorausgesetzt, dass keine weitere Wertschöpfungsstufe zu bedienen ist, wird die komplette Produktion zum Kunden bzw. Markt transportiert. Der Fremdbezug von extern fällt auch unter dieses Transportaufkommen, dessen Kurve in diesem Fall identisch mit der Nachfragekurve ist. Bei verteilten oder mehrstufigen Fertigungssystemen ist dies nicht der Fall. Fremdbezug und Lagerbestand sind aufgrund ihres nur marginalen Auftretens zweifach überhöht dargestellt, die Kapazitätsauslastung entspricht dem Quotienten aus Produktionsmenge und Fertigungskapazität.

### 5.3 Konzept zur Ressourcen- und Prozessplanung

Für die Ebene der **Ressourcen- und Prozessplanung** wird ebenfalls ein mathematisches Optimierungsmodell erstellt. In diesem werden einerseits die Struktur einer einzelnen Fertigungslinie und deren Ressourcen sowie andererseits die zu fertigenden Produkte und deren Bearbeitungsprozesse näher betrachtet. Grundlage für die Optimierung bildet eine der bekannten technischen Anpassungsalternativen aus der Programm- und Ressourcenplanung. Die Fragestellung, die mit diesem Modell beantwortet werden soll, ist, wie bestehende Fertigungsanlagen bei Veränderungen am Markt auf der Ebene der Prozesskette angepasst werden können. Diese Anpassungsmöglichkeit beinhaltet das **punktuelle Investieren** in Einzelmaschinen an „beliebiger“ Stelle des Fertigungssystems, das **Verschieben von Prozessschritten** von einer Ressource zu einer anderen und das **Variieren der Taktzeit**. Das Modell soll ausgehend von einer gegebenen Situation kostenminimale Veränderungen am Fertigungssystem vornehmen, so dass die zukünftigen Marktbedürfnisse erfüllt werden können, wobei diese zukünftigen Anforderungen nicht in zeitdiskreten Perioden beschrieben sind. Dieses zu entwickelnde Modell basiert auf einer Momentaufnahme und der Anpassungsaufwand bezieht sich auf eine konkrete Zielvorgabe für die Zukunft. Dabei sind Restriktionen aus dem zur Verfügung stehenden Platz zur Aufstellung von Betriebsmitteln genauso zu berücksichtigen wie die Lage von Bauteilen in der jeweiligen Ressource und damit die Ausführbarkeit von Bearbeitungsoperationen in der Maschine bei der darin festgelegten Bauteilaufspannung. Auch die Verkettungseinrichtungen zwischen den Bearbeitungsressourcen dürfen in ihrer Kapazität nicht überschritten werden. Zudem wird eine Möglichkeit der integrierten Variation der Taktzeit bei losweiser Fertigung realisiert. Bei einer Losfertigung zweier Produkte auf einer Linie und einer vorgegebenen Anhebung der Ausbringungsmenge von je 10% würde sich theoretisch jeweils eine Verringerung der Taktzeit um 10% ergeben. Handelt es sich bei Produkt A jedoch um ein seltenes Derivat, das bei der Herstellung eine teure Sondermaschine benötigt, diese jedoch bereits voll ausgelastet ist, so besteht ohne Einflussnahme auf die Taktzeit lediglich die Möglichkeit der Investition in eine zusätzliche Einheit dieser Sondermaschine. Wird aber die Taktzeit in die Optimierung einbezogen, so kann das Ergebnis lauten, das Derivat A in seiner bisherigen Taktzeit weiter zu fertigen und dadurch einen größeren Anteil der insgesamt zur Verfügung stehenden Arbeitszeit auf das Produkt A zu verwenden. Für Produkt B ergibt sich dadurch ein weit niedrigerer Wert für die einzuhaltende Taktzeit als durch die 10% Ausbringungserhöhung veranlasst und damit ein erhöhter Bedarf, Kapazitäten nach oben anzupassen. Liegen die Kosten für diese Kapazitätsanpassung jedoch niedriger als der Invest für die oben erwähnte Sondermaschine, so ist dieser Weg der zuerst beschriebenen Alternative vorzuziehen.

Ein zusätzlicher Schwierigkeitsgrad entsteht dadurch, dass eine **echte Mehrproduktfertigung** abbildbar sein soll, d.h. es sollen keine Vereinfachungen durch das Berechnen einer repräsentativen Mischvariante getroffen werden.

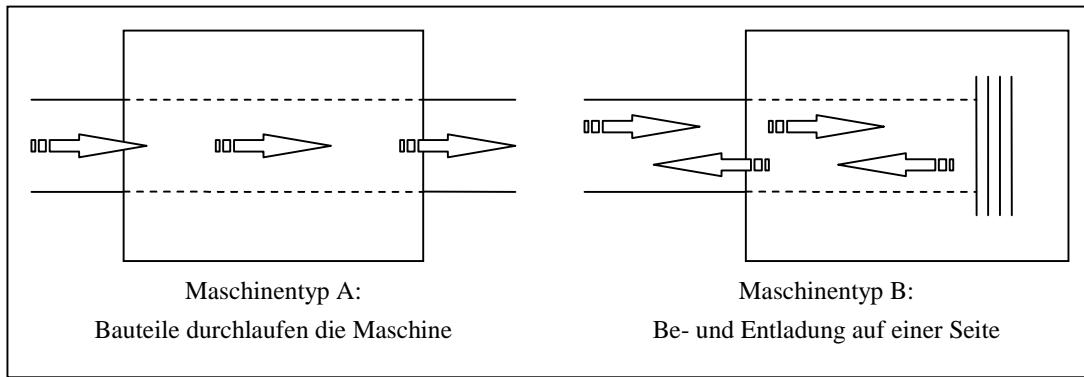
Ist auf diese Art und Weise eine Anpassungsalternative auf Basis einer bereits gegebenen Anpassungsstufe aus der Programm- und Ressourcenplanung erstellt worden, kann sie als **zusätzliche Stufe** in diese einfließen und dort zu einem **verringerten Investitions- und Anpassungsbedarf** beitragen.

### 5.3.1 Benötigte Eingangsparameter

Zur Realisierung eines solchen mathematischen Modells werden einige Eingangsparameter benötigt, die im Folgenden aufgezeigt werden.

Zunächst werden Informationen darüber benötigt, welche **Maschinentypen** für das Fertigungssystem in Frage kommen. Dazu gehören die für einen Maschinentyp spezifischen Daten:

- **Investitionen** bestehend aus Installation, Kaufpreis, Einrichtungskosten, Transportsystemanpassungskosten, Programmierungskosten, Integrationskosten etc.
- **Desinvestitionen** für bestehende Maschinen wie Verschrottungskosten, negative Verkaufserlöse, etc.
- **Fixkosten** je Maschine im betrachteten Zeitraum wie zum Beispiel die zurechenbaren Personalkosten
- **Platzbedarf** für jede Maschine inklusive der Fläche für den Arbeitsschutz und den An- und Abtransport für Roh- und Betriebsstoffe sowie Hilfsmittel
- der **Orientierungstyp** eines Maschinentyps, der grob, wie in Abbildung 5-4 dargestellt, nach der Art des An- und Abtransportes der Bauteile unterschieden werden kann, und
- der Anteil der zu verrechnenden Investitionen und Desinvestitionen, wenn der betrachtete Zeitraum kürzer als die Amortisationszeit der einzelnen Maschinen ist. Dadurch kann eine realistische Verrechnung der Investitionen erfolgen für den Fall, dass eine Maschine länger als der betrachtete Zeitraum verwendet wird.

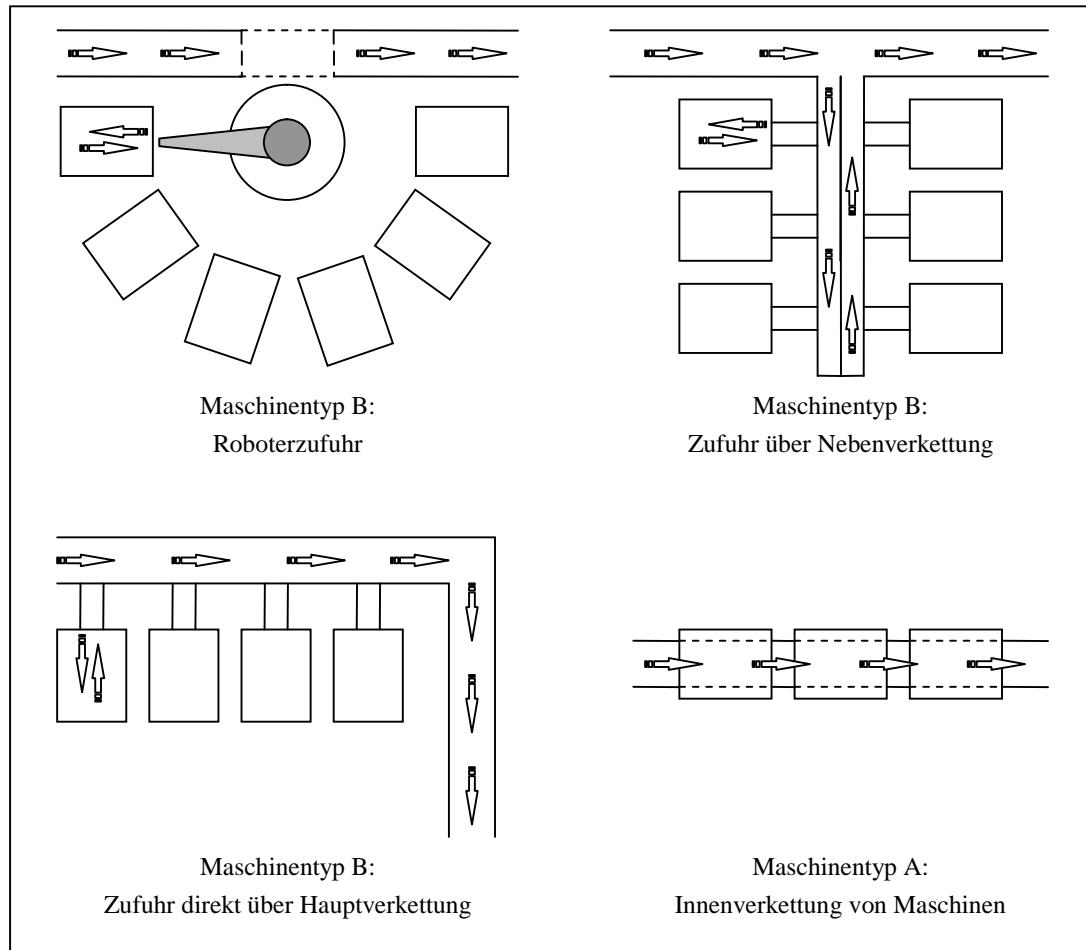


**Abbildung 5-4:** Zwei grundlegende Orientierungstypen für Bearbeitungsmaschinen

Innerhalb einer Fertigungslinie aus dem Bereich der Serienproduktion sind die Einzelmaschinen in Gruppen angeordnet, wobei alle Maschinen innerhalb einer Gruppe gleiche Aufgaben ausführen. Auch zu diesen Gruppen oder **Stationen** können entsprechende Angaben und Spezifikationen vorgegeben werden:

- Zunächst ist die **vorhandene Fläche** der gesamten Maschinengruppe zu definieren, auf der Maschinen installiert werden können. Bei bestehenden Fertigungslinien ist auch die Fläche zu berücksichtigen, auf der bereits Maschinen aufgestellt sind.
- Ebenfalls findet die **Kapazität des bestehenden Transportsystems** als eine begrenzende Größe für die Produktion im Modell Beachtung. Ist beispielsweise in einer Maschinengruppe ein stationärer Roboter installiert, können nicht mehr Teile gefertigt werden, als dieser auf die Bearbeitungsmaschinen zuteilen und von dort wieder abholen kann. Ebenso kann die Fahrschiene eines Portalroboters nicht beliebig lang gestaltet werden, da ab einem gewissen Punkt die Fahrgeschwindigkeit des Roboters nicht mehr ausreicht, um im Mittel auch die letzte Maschine in seinem Strang mit Bauteilen zu versorgen.
- Beim **Orientierungstyp einer Station** wird davon ausgegangen, dass die Orientierung innerhalb einer Maschinengruppe festgelegt und nicht veränderbar ist. Da die Kosten für eine grundsätzliche Veränderung des kompletten Transportsystems und die damit unter Umständen zusammenhängende Umstellung von Maschinen immens wären und somit nicht mehr von einem kleinen Eingriff in die Produktionstechnik gesprochen werden kann, soll im Rahmen dieses Optimierungsmodells jener Aspekt nicht in die Betrachtung einfließen. In Abbildung 5-5 sind verschiedene Arten der Gruppen- oder Stationsbildung dargestellt, wobei sich für Maschinenorientierungstyp B grundsätzlich mehrere Möglichkeiten anbieten. Für innenverkettete Maschinen kommt lediglich eine Aufstellungsform in Frage, da hier der Materialfluss zwingend durch die sequenziell und meist im Takt arbeitenden Maschinenein-

heiten hindurchströmt. Jede dieser gezeigten Gruppen hat ihre Vor- und Nachteile, auf die jedoch an dieser Stelle nicht eingegangen wird. Für das Optimierungsmodell ist lediglich festzulegen, welche der Maschinenorientierungen in den jeweiligen Maschinengruppen vorherrscht.



**Abbildung 5-5:** Grundsätzliche Möglichkeiten der Stationsbildung

Da das **Modell für die Anpassung bestehender Fertigungslinien konzipiert** ist, muss die **Ausgangssituation** der bestehenden Anlage integriert werden. Hierfür muss dem Modell übergeben werden, wie viele Maschinen von welchem Maschinentyp in den einzelnen Maschinengruppen bereits vorhanden sind, und wie viele maximal hinzugefügt werden dürfen.

Bei der Erhebung der Modellparameter ist auf verschiedene Faktoren zu achten, die vom Produktionsablauf unabhängig sind. So können z.B. bei sehr schweren Maschinen statische Probleme innerhalb der Fertigungshalle auftreten, die eine beliebige Aufstellung von Maschinen in der Halle nicht zulassen. Alternativ können bestimmte Standorte

aufgrund der Betriebslautstärke oder der Erschütterungsempfindlichkeit von Maschinen ungeeignet sein.

Eine entscheidende Eingangsgröße ist die **zur Verfügung stehende Produktionszeit**. Hierunter wird die für jede einzelne Maschine verfügbare Arbeitszeit verstanden. Diese Zeitangabe ist um Rüstzeiten und sonstige Stillstandzeiten, wie sie etwa für die Maschinenwartung etc. anfallen, zu bereinigen.

Eine weitere elementare Information ist die Anzahl der zu fertigenden Varianten bzw. Produkte und deren **Produktionsvolumen** innerhalb der bereits genannten Produktionszeit.

Für die **Arbeitsprozesse** ist zu definieren:

- die **Anzahl der Arbeitsprozesse** und
- **auf welchen Maschinentypen** jeder Prozess ausgeführt werden kann bzw. wie lange die **Bearbeitung** auf dem jeweiligen Maschinentyp **dauert**.
- Eingabe der **Prozesskosten** je Stück für jeden Maschinentyp, auf dem der Arbeitsvorgang durchgeführt werden kann (variable Kosten). Als Beispiele sind die zurechenbaren Personalkosten, Stromkosten, Kosten für Kühl-/Schmiermittel, der Werkzeugverschleiß oder auch die Materialkosten, die bei diesem Prozess anfallen, zu nennen.
- Zudem kann erfasst werden, auf welchem Maschinentyp ein Prozess in der bestehenden Fertigungsline ausgeführt wird und welche Kosten entstehen, wenn er zukünftig auf einem anderen Maschinentyp ausgeführt würde. Hierunter fallen zum Beispiel **Kosten zur Anpassung** oder Erstellung von Werkzeugen und Hilfsmitteln, zur Schulung der Mitarbeiter oder zur Maschinenprogrammierung.

Anschließend ist festzulegen, wie sich die Produkte bzw. Varianten zusammensetzen. Für jedes Produkt muss angegeben werden, ob und mit welcher Häufigkeit ein Prozess für das entsprechende Produkt ausgeführt werden muss. Hier sollten rationale Zahlen verwendet werden können, um unterschiedliche Ausführungszeiten für verschiedene Produkte definieren zu können. Beim Planfräsen einer Werkstückseite ist die Bearbeitungszeit beispielsweise von den relevanten Produktabmessungen abhängig. Hier kann der Prozess für eine Basisvariante definiert und die Abweichung bei einem anderen Produkt etwa mit einem Faktor von „1,2“ ausgedrückt werden.

Bei der Eingabe des **Vorranggraphen** wird für jeden Arbeitsprozess angegeben, welche anderen Prozesse vor diesem abgeschlossen sein müssen, damit dieser Prozess durchgeführt werden kann. Ist kein Vorgängerprozess vorhanden, kann der Prozess auf jeder beliebigen Maschinengruppe ausgeführt werden. Um mehrere Vorgängerprozesse definieren zu können, wird ein so genannter Vorgängerlevel eingeführt. Hat ein Prozess

x einen Vorgänger y, so wird dem Prozess x auf Level 1 der Vorgänger y zugeordnet. Besitzt Prozess x weitere direkte Vorgänger, so wird jedem von diesen eine eigene, um „1“ erhöhte Levelnummer zugeordnet. Gleichzeitig ist damit automatisch festgelegt, dass alle Vorgängerprozesse des Prozesses y vor dem Prozess x ausgeführt werden müssen. Übertragen auf ein Fertigungssystem bedeutet dies, dass die Vorgänger eines Prozesses auf einer früheren oder spätestens auf derselben Station auszuführen sind.

Für jeden **Prozess** muss die Möglichkeit gegeben sein festzulegen, ob er prinzipiell in jeder **Maschinengruppe ausführbar** ist, oder ob er nur in manchen Maschinengruppen ausgeführt werden kann. Dies ist dann von großer Bedeutung, wenn zum Beispiel von einem oder mehreren Prozessen zusätzliche Anforderungen an die Statik, an die Höhe oder Breite der Halle oder an ortsgebundene Logistikeinrichtungen gestellt werden. Außerdem muss festgelegt werden können, in welcher Station der bestehenden Fertigungsline momentan welche Prozesse durchgeführt werden und welche Kosten entstünden, wenn der Prozess in eine andere Maschinengruppe verlegt würde. Hier können Kosten für Strom- und Wasseranschlüsse, Transportbänder etc. erfasst werden.

Zusätzlich muss die Möglichkeit bestehen, falls es die Abläufe in der geplanten Fertigungsline erfordern, verschiedene **Aufspannungen** zu definieren. Dabei wird berücksichtigt, wie beispielsweise ein Motorblock durch die Fertigungsline befördert wird. Handelt es sich um eine Befestigung an der Unterseite, kann der Motorblock von oben oder an den Seiten bearbeitet werden. Sollte sich die Befestigung auf der Oberseite befinden, ist lediglich eine Bearbeitung der unteren Bereiche möglich. Im Modell kann die Anzahl der verschiedenen Aufspannungen festgelegt werden und es muss für jeden Prozess definiert werden, in welchen Aufspannungen dieser ausführbar ist.

### 5.3.2 Antizipation der Flexibilitätsnutzung

Die **Antizipation der Flexibilitätsnutzung** innerhalb der Ressourcen- und Prozessplanung findet dadurch statt, dass das **Flexibilitätspotenzial der Fertigungsline und deren Maschinen der vom Benutzer festzulegenden Produktionsanforderung gegenübergestellt** wird.

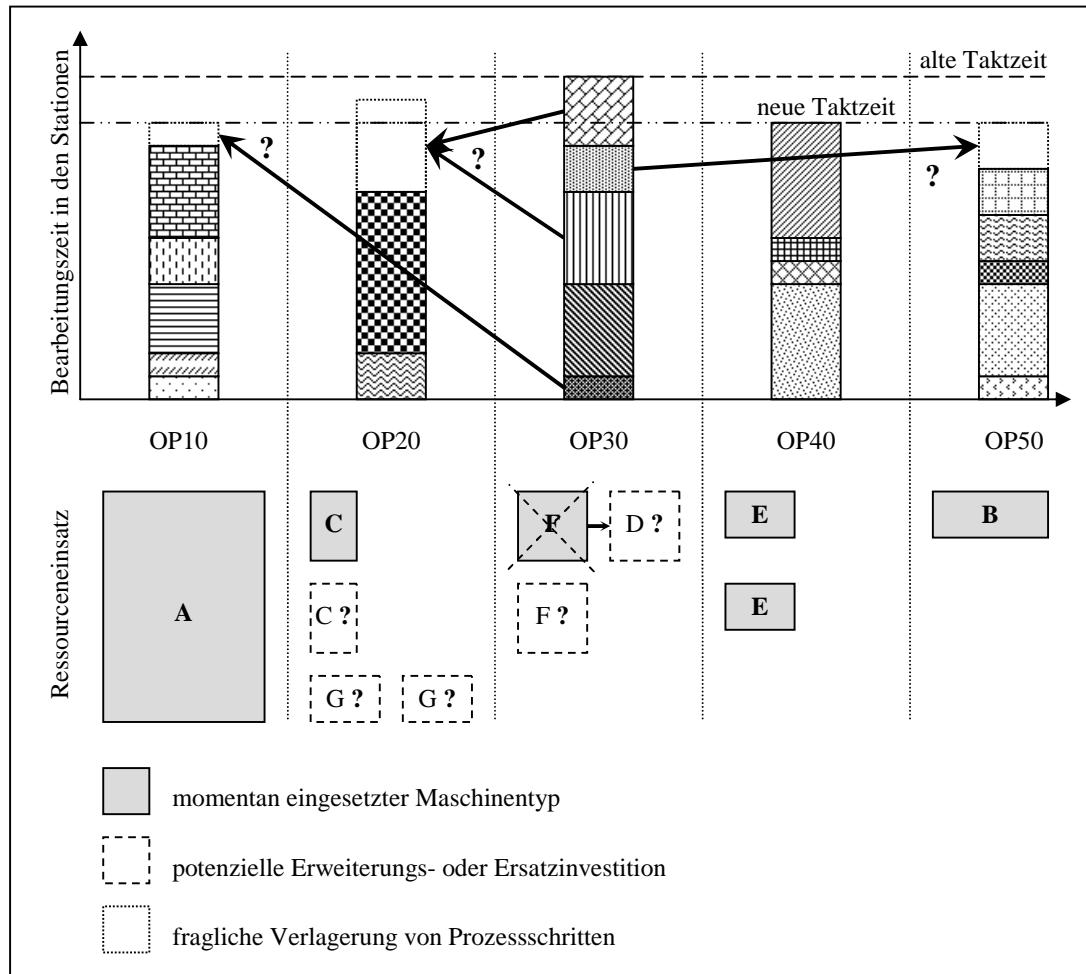
Diese Produktionsanforderung drückt sich einerseits in den auf dieser Linie zu fertigenden Produkten und deren Bearbeitungsprozessen aus, und andererseits im vorzugebenden Produktionsvolumen. In beiden Belangen können sich über dem Lebenszyklus Änderungen ergeben, die einen technischen Umbau der Produktionsanlage erforderlich machen. Wird eine detailliertere Betrachtung des Anpassungsbedarfs gewünscht, als dies mit der Programm- und Ressourcenplanung möglich ist, so muss eine Auswertung auf der Ebene der Ressourcen und Prozesse erfolgen. Dabei liegt das Flexibilitätspotenzial in den einzelnen Ressourcen der Fertigungsline begründet. Es wird u.a. definiert durch die Fähigkeit der Maschinen, bestimmte Bearbeitungsprozesse generell auszuführen

zu können bzw. durch die Bearbeitungszeit, die von ihnen dabei in Anspruch genommen wird. Ebenso als Flexibilitätspotenzial kann freie Hallenfläche interpretiert werden, da in einem solchen Fall zusätzliche Fertigungsressourcen leicht integriert werden können.

Wird auf einer Linie ein Produkt hergestellt und wird die geforderte Ausbringungsmenge angehoben, so ergibt sich eine entsprechend niedrigere Vorgabetaktzeit, wie in Abbildung 5-6 dargestellt. Bei einer markanten Absenkung der Taktzeit kommt es in der Regel vor, dass einzelne Stationen mit ihrer bisherigen Bearbeitungszeit die Vorgabe nicht mehr einhalten können. In einem solchen Fall bleiben folgende Reaktionsmöglichkeiten:

- eine **Verschiebung von Prozessschritten** aus ihrer bisherigen Station (OP) heraus in nicht voll ausgelastete Stationen
- das **punktuelle Investieren** in zusätzliche Bearbeitungsressourcen bzw. in Ersatzmaschinen
- oder eine **Kombination beider Möglichkeiten**

Wird mehr als nur eine Produktvariante gefertigt, so wird die Problemstellung komplexer, da in einem solchen Fall nicht von vornherein bekannt sein muss, in welcher Taktzeit die jeweilige Variante zu fertigen ist. Zwar wird noch immer, wie im Aggregatebau üblich, eine Serienfertigung zugrunde gelegt, jedoch werden die einzelnen Produkte nicht gleichzeitig, sondern abwechselnd in hinreichend großen Losen aufgelegt. Dies hat zur Folge, dass für beide Varianten eine unterschiedliche Taktzeit vorgegeben oder im Zuge der Optimierung bestimmt werden kann. Eine Ermittlung der Taktzeit im Zuge der Berechnungen bedeutet jedoch, dass sich ein hochkomplexes Problem ergibt. Nur bei sehr ähnlichen Produktvarianten können beide gleichzeitig ohne Losbildung eingelastet werden, wodurch sie in einer Einheitstaktzeit gefertigt werden können.



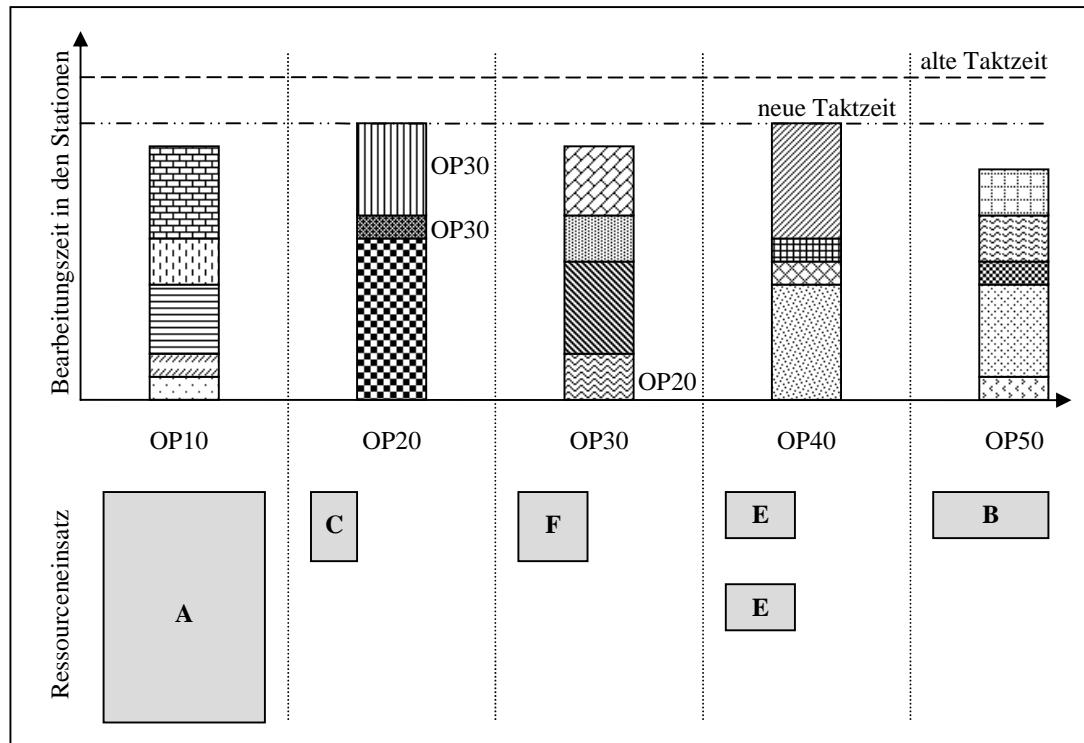
**Abbildung 5-6:** Antizipation der Flexibilitätsnutzung im Rahmen der Ressourcen- und Prozessplanung durch Überlagerung von Flexibilitätsangebot und -nachfrage

Das Modell muss in der Lage sein, sämtliche Freiheitsgrade zu handhaben und bei vorgegebener Produktionsanforderung den geringstmöglichen Umbauaufwand zu identifizieren. Dazu ist es notwendig, dass dem Modell die **verschiedenen Optionen zur Systemanpassung** übergeben werden. Dazu zählen im Wesentlichen eine **Ressourcenbibliothek**, in der die zur Auswahl stehenden Ressourcen aufgelistet und deren **Prozessfähigkeiten** und **Fertigungszeiten** hinterlegt sind, ein **Vorranggraph**, der die willkürliche Verschiebung von Prozessen einschränkt, und die **momentan gültige Prozesszuordnung auf die Stationen**.

### 5.3.3 Resultate

Durch die Optimierung wird festgelegt, innerhalb **welcher Station** bei den vorgegebenen Bedingungen künftig **welcher Maschinentyp** in **welcher Anzahl** einzusetzen ist.

Dies schließt die Angabe ein, wie viele Maschinen zu desinvestieren sind, wenn ein Typwechsel innerhalb einer Station vollzogen werden soll, da in einer Maschinengruppe lediglich ein Maschinentyp vertreten sein darf. Sollten sich dahingehend zwingende Veränderungen ergeben, so hat dies merklichen Einfluss auf die anfallenden Wechselkosten, da es sich faktisch um Neu- oder Ersatzinvestitionen handelt.



**Abbildung 5-7:** Durch die Optimierung festgelegte Prozesszuordnung und erforderliche Strukturveränderungen

Eine alleinige **Verschiebung von Prozessen** unter Beibehaltung der vorliegenden Produktionsstruktur bedeutet dagegen einen weit geringeren finanziellen Aufwand, als in dem kleinen Beispiel in Abbildung 5-7 dargestellt. Dort wird vorausgesetzt, dass die Maschinentypen C und F ausreichend flexibel sind, um die neu zugeordneten Bearbeitungsaufgaben übernehmen zu können und der Vorranggraph den Prozesstausch zwischen den beiden OPs 20 und 30 zulässt. Ein Grund, warum diese Zuteilung nicht von Anfang an gewählt worden ist, könnte sein, dass in den OPs 20 und 30 bisher ähnliche Bearbeitungsaufgaben zusammengefasst gewesen waren und diese mit ähnlichen oder sogar gleichen Werkzeugen durchgeführt wurden. Diese Gliederung wird aufgegeben, um nicht nachträglich investieren zu müssen. Dafür werden Aufwendungen etwa zur Umprogrammierung der Maschinen oder Beschaffung zusätzlicher Werkzeuge in Kauf genommen, die jedoch in der Regel einer Investition in neue Maschinen vorzuziehen sind.

Sämtliche Kosten lassen sich einteilen in einmalige Wechselkosten, periodenfixe und stückzahlvariable Kosten, die später im Modul zur Programm- und Ressourcenplanung übernommen werden können.

Wie bereits in der Einleitung von Unterkapitel 5.3 erwähnt kann es bei der Fertigung mehrerer Produkte günstiger sein, kostenintensive Anpassungen dadurch zu umgehen, dass die **Taktzeit** für die jeweiligen Produkte verändert wird. Demzufolge ist auch dies ein wichtiger Ausgabeparameter.

Auch lässt sich für jedes Produkt errechnen, wie hoch die **Auslastung der Bearbeitungsstationen** ist, wenn ein Los dieses Produktes über die Linie läuft.

Außerdem lässt sich der **Flächennutzungsgrad** aus der in jeder OP zur Verfügung stehenden Hallenfläche sowie der Anzahl und dem Typ der dort eingesetzten Maschinen bestimmen.

Schließlich wird noch eine Aussage darüber generiert, in welcher **Bauteilaufspannung** in jeder Station gefertigt wird, da diese über die Zugänglichkeit der bearbeiteten Stellen direkten Einfluss auf die zulässige Prozesszuteilung auf Maschinengruppen hat.

## 6 Optimierungsmodelle zur Anpassungsplanung von Fertigungssystemen

### 6.1 Optimierungsmodell zur Programm- und Ressourcenplanung

Für das nachfolgende Modell wird angenommen, dass das zu untersuchende **Fertigungssystem** aus einer oder mehreren **Fertigungslinien** besteht, die entweder parallel gleiche oder verschiedene Produkte fertigen können oder aber sequenzielle Wertschöpfungsstufen darstellen, die die Produkte in einer vorzugebenden Reihenfolge durchlaufen (**verteiltes/mehrstufiges Fertigungssystem**).

Jedes **Produkt** wird nach Abschluss einer solchen Wertschöpfungsstufe zu einem anderen, höherwertigeren Zwischenprodukt und muss als solches im Modell definiert werden. Festzulegende Endprodukte werden direkt an ebenfalls zu definierende Kunden bzw. Märkte geliefert. Das **Nachfragevolumen** dieses Marktes wird hier als eine bereits in **Szenarien** übersetzte Eingangsgröße angenommen.

Die **Nachfrage ist grundsätzlich zu erfüllen**, es darf also nicht zu einer Minderbelieferung des Kunden kommen. Dies setzt voraus, dass eine nicht erfüllbare Nachfrage durch externe Kapazitäten abgedeckt wird.

Jeder Fertigungslinie sind **Ausgangslager** zugeordnet, die zur Befriedigung vorübergehender Nachfragespitzen genutzt werden können.

Das Modell ist **zeitdiskret**; die einzelnen Perioden über dem gesamten Lebenszyklus der Produktionsanlage werden als konstant angenommen. Dies ermöglicht eine gleichmäßige **Abzinsung der anfallenden Auszahlungen** zur Berechnung des negativen Kapitalwertes. Erlöse durch die Produkte werden aufgrund der oft mangelhaften Datenlage und deren Irrelevanz bei der Entscheidung für ein Fertigungskonzept nicht berücksichtigt.

**Transportzeiten** werden **gegenüber einer Periodenlänge als vernachlässigbar klein angesehen**, d.h. alle Produkte, die innerhalb einer Periode gefertigt werden, gelangen noch in der gleichen Periode zum Kunden, zur nachfolgenden Wertschöpfungsstufe oder ins Lager.

Die **Anpassungsfähigkeit von Fertigungslinien** drückt sich in zu definierenden, **diskreten Anpassungsstufen** aus, die sich sowohl auf die **Produktionstechnik**, als auch die **Organisation** beziehen können. Über dem Lebenszyklus wird hieraus für jede Periode diejenige Kombination gebildet, die geringstmögliche Kosten bei bestmöglichem

Systemoutput generiert. Dabei spielen Reihenfolge-, Rüst- und Losgrößenfragestellungen keine Rolle.

### 6.1.1 Eingangsgrößen

#### Mengen:

$MaxPe$	Anzahl an Perioden
$MaxPr$	Anzahl an Produkten
$MaxLi$	Anzahl an Produktionslinien des Fertigungssystems
$MaxMar$	Anzahl an Kunden oder Märkten
$MaxTS$	Maximale Anzahl an technischen Anpassungsstufen über alle Produktionslinien
$MaxOS$	Maximale Anzahl an organisatorischen Anpassungsstufen über alle Produktionslinien

#### Indizes:

$Pe$	Index der Perioden 0... $MaxPe$
$Pr$	Index der Produkte 1... $MaxPr$
$OPr$	Index der Komponenten, die in anderen Produkten verbaut werden oder Index der Produkte der Wertschöpfungsstufe „n“ 1... $MaxPr$
$DPr$	Index der Zusammenbauten, die andere Produkte beinhalten oder Index der Produkte der Wertschöpfungsstufe „n+1“ 1... $MaxPr$
$Li$	Index der Produktionslinien innerhalb des Fertigungssystems 1... $MaxLi$
$FLi$	Index der Produktionslinien für die Komponenten bzw. Produkte der Wertschöpfungsstufe „n“ 1... $MaxLi$
$TLi$	Index der Produktionslinien für die Zusammenbauten bzw. Produkte der Wertschöpfungsstufe „n+1“ 1... $MaxLi$
$Mar$	Index der Kunden oder Märkte 1... $MaxMar$
$TS$	Index der technischen Anpassungsstufen 0... $MaxTS$

$TS2$	Index der technischen Anpassungsstufen 0... $MaxTS$
$OS$	Index der organisatorischen Anpassungsstufen 0... $MaxOS$
$OS2$	Index der organisatorischen Anpassungsstufen 0... $MaxOS$

### Parameter:

$CI$	Berücksichtigung von Lager während der Optimierung. „1“ wenn Lager Beachtung finden sollen, „0“ sonst
$ShAt$	Kodierung der Information, an welcher Stelle im System nicht befriedigte Nachfrage wirksam werden soll. „0“, wenn bei mehrstufigen Fertigungssystemen für die einzelnen Linien im System nicht erfüllte Nachfrage einzeln registriert wird und diese Minderproduktion unter Inkaufnahme von entsprechenden Fremdbezugskosten als extern eingekauft angenommen wird. Bei „1“ wird angenommen, dass der größte Engpass im System die maximale Ausbringungsmenge des Fertigungssystems bestimmt. Damit entsteht die Minderproduktion direkt an den zum Kunden liefernden Linien. Auch hier wird davon ausgegangen, dass die Fehlmengen durch einen externen Lieferanten unter vorzgebenden Bezugskosten von extern eingekauft werden
$Demand_{Pr,Mar,Pe}$	Nachfrage des Kunden bzw. Marktes $Mar$ nach dem Produkt $Pr$ in der Periode $Pe$
$BoM_{OPr,DPr}$	Die Stückliste gibt an, welche Komponenten $OPr$ in welcher Stückzahl in welchen Zusammenbau $DPr$ eingehen
$LineAss_{Li,Pr}$	Legt fest, ob Produkt $Pr$ auf Linie $Li$ gefertigt werden kann. „1“ für ja, „0“ sonst
$StageAss_{Li,TS,Pr}$	Legt fest, ob Produkt $Pr$ auf Linie $Li$ im technischen Ausbauzustand $TS$ gefertigt werden kann. „1“ für ja, „0“ sonst
$TrCostLi_{FLi,OPr,TLi,DPr}$	Anfallende Transportkosten, wenn eine Einheit der Komponente $OPr$ von Linie $FLi$ zur Linie $TLi$ für den Zusammenbau $DPr$ geliefert wird
$TrCostMar_{Pr,Li,Mar}$	Anfallende Transportkosten, wenn eine Einheit des Produktes $Pr$ von Linie $Li$ zum Kunden bzw. Markt $Mar$ geliefert wird

$TrCostLiI_{Li,Pr}$	Anfallende Kosten, wenn eine Einheit des Produktes $Pr$ von Linie $Li$ zu deren Ausgangslager transportiert und eingelagert wird
$Capa_{Li,TS,OS}$	Fertigungskapazität in Stück der Linie $Li$ , wenn sie sich im technischen Ausbauzustand $TS$ und im organisatorischen Ausbauzustand $OS$ befindet
$CapaDem_{Li,TS,Pr}$	Kapazitätsbedarfsfaktor auf Linie $Li$ im Ausbauzustand $TS$ , wenn dort eine Einheit des Produktes $Pr$ gefertigt wird
$CapaInc_{Pe}$	Kapazitätssteigerungsfaktor für das komplette Fertigungssystem in Periode $Pe$ , wobei als Basis die in $Capa_{Li,TS,OS}$ eingegebenen Werte dienen
$FixCostTS_{Li,TS}$	Periodenfixe Kosten seitens der Produktionstechnik, wenn sich Linie $Li$ im technischen Ausbauzustand $TS$ befindet
$VarCostTS_{Li,TS,Pr}$	Stückzahlvariable Kosten seitens der Produktionstechnik, wenn sich Linie $Li$ im technischen Ausbauzustand $TS$ befindet und dabei eine Einheit des Produktes $Pr$ fertigt
$ChCostTS_{Li,TS,TS2}$	Systemanpassungskosten für Linie $Li$ , wenn deren technischer Ausbauzustand von $TS$ auf $TS2$ geändert wird
$FixCostOS_{Li,TS,OS}$	Periodenfixe Kosten seitens der Organisation, wenn sich Linie $Li$ im technischen Ausbauzustand $TS$ befindet und im organisatorischen Zustand $OS$
$VarCostOS_{Li,TS,OS,Pr}$	Stückzahlvariable Kosten seitens der Organisation, wenn die im technischen Ausbauzustand $TS$ befindliche Linie $Li$ im organisatorischen Zustand $OS$ eine Einheit des Produktes $Pr$ fertigt
$ChCostOS_{Li,TS,OS,OS2}$	Systemanpassungskosten für die im technischen Ausbauzustand $TS$ befindliche Linie $Li$ , wenn deren Organisation von Zustand $OS$ auf $OS2$ geändert wird
$ICost_{Li,Pr}$	Periodenfixe Kosten, wenn eine Einheit des Produktes $Pr$ im Lager der Linie $Li$ eingelagert ist
$ICapa_{Li,Pr}$	Einlagerungskapazität von Linie $Li$ bzgl. des Produktes $Pr$

$InitI_{Li,Pr}$	Anzahl eingelagerter Einheiten des Produktes $Pr$ im Lager der Linie $Li$
$ShCost_{Li,Pr}$	Reichen die vorhandenen Fertigungskapazitäten der Linie $Li$ nicht aus um die Nachfrage zu bedienen, so entstehen je Einheit Fremdbezugskosten für das Produkt $Pr$
$DisFact_{Pe}$	Von Periode $Pe$ abhängiger Abzinsungsfaktor zur Berechnung des (negativen) Kapitalwertes
$InitTS_{Li}$	Ist Linie $Li$ des Fertigungssystems bereits vorhanden, wird jedoch in Periode 1 noch für andere Produktionsaufgaben verwendet, so kann angegeben werden, welches der anfängliche technische Ausbauzustand ist, wenn diese Linie der vorliegenden Produktionsaufgabe zugeschrieben wird
$InitOS_{Li}$	wie $InitTS_{Li}$ , jedoch auf den organisatorischen Ausbauzustand bezogen
$FstPe_{Li}$	Stellt für die Linie $Li$ die frühestmögliche Periode dar, zu der sie der vorliegenden Produktionsaufgabe zugeschrieben werden kann
$LstPe_{Li}$	Stellt für die Linie $Li$ die spätestmögliche Periode dar, zu der sie noch der vorliegenden Produktionsaufgabe zugeschrieben werden kann

#### Eingeschränkte Mengen:

$IdxFixCostTS_{Li,TS}$	Menge aller Produktionslinien und technischer Anpassungsstufen für die gilt: $FixCostTS_{Li,TS} > -1$
$IdxFixCostOS_{Li,TS,OS}$	Menge aller Produktionslinien und organisatorischer Anpassungsstufen für die gilt: $FixCostOS_{Li,TS,OS} > -1$
$IdxLineAss_{Li,Pr}$	Menge aller Produktionslinien und Produkte für die gilt: $LineAss_{Li,Pr} > 0$
$IdxDemand_{Mar,Pr,Pe}$	Menge aller Kunden bzw. Märkte, Produkte und Perioden für die gilt: $Demand_{Pr,Mar,Pe} > 0$

$IdxConLi_{FLi, OPr, TLi, DPr}$  Menge aller Komponenten und deren Produktionslinien sowie der Zusammenbauten und deren Produktionslinien für die gilt:

$TrCostLi_{FLi, OPr, TLi, DPr} > -1$  und

$FLi \in IdxLineAss_{Li=FLi, Pr=OPr}$  und

$TLi \in IdxLineAss_{Li=TLi, Pr=DPr}$

$IdxConMar_{Pr, Li, Mar, Pe}$  Menge aller Produkte, Produktionslinien, Kunden bzw. Märkte und Perioden für die gilt:

$TrCostMar_{Pr, Li, Mar} > -1$  und

$Li \in IdxLineAss_{Li, Pr}$  und

$Mar \in IdxDemand_{Mar, Pr, Pe}$

### 6.1.2 Entscheidungsvariablen

#### Binärvariablen:

$SBin_{Li, Pe, TS \in IdxFixCostTS, OS \in IdxFixCostOS}$  Binärvariable, die den Wert „1“ annimmt, wenn sich Linie  $Li$  in Periode  $Pe$  im technischen Anpassungszustand  $TS$  und im organisatorischen Zustand  $OS$  befindet, „0“ sonst. Die Einschränkung der Indizes  $TS$  und  $OS$  bewirkt eine deutliche Reduktion der erzeugten Binärvariablen, da lediglich diejenigen Zustände berücksichtigt werden, die mit Fixkosten  $\geq 0$  angegeben sind. Gleiches Vorgehen findet sich wiederholt in der Arbeit und wird nicht weiter erläutert

#### Stetige Entscheidungsvariablen ( $\geq 0$ ):

$ShLi_{Li, Pr \in IdxLineAss, Pe}$  Gibt an, wie viel der geforderten Stückzahlen von Produkt  $Pr$  auf Linie  $Li$  in Periode  $Pe$  nicht erfüllt werden können

$TrLi_{OPr, DPr, FLi, TLi \in IdxConLi, Pe}$  Transportmenge von Produkt  $OPr$  der Linie  $FLi$  zur Linie  $TLi$  für Produkt  $DPr$  in Periode  $Pe$

$TrILi_{OPr, DPr, FLi, TLi \in IdxConLi, Pe}$  Bei Berücksichtigung von Lagern nach den Fertigungslien gibt diese Variable die Transportmenge von Produkt  $OPr$

aus dem Ausgangslager der Linie  $FLi$  zur Linie  $TLi$  für Produkt  $DPr$  in Periode  $Pe$  an

$TrMar_{Pr,Li,Mar,Pe \in IdxConMar}$  Transportmenge des Produktes  $Pr$  von Linie  $Li$  zum Kunden bzw. Markt  $Mar$  in Periode  $Pe$

$ShMar_{Pr,Li,Mar,Pe \in IdxConMar}$  Gibt an, wie viel der Nachfrage auf Markt  $Mar$  nach dem Produkt  $Pr$  durch die Linie  $Li$  in Periode  $Pe$  nicht erfüllt werden kann

$TrIMar_{Pr,Li,Mar,Pe \in IdxConMar}$  Transportmenge des Produktes  $Pr$  aus dem Ausgangslager der Linie  $Li$  zum Kunden bzw. Markt  $Mar$  in Periode  $Pe$

$TrLil_{Li,Pr \in IdxLineAss,Pe}$  Transportmenge des Produktes  $Pr$  der Linie  $Li$  zu deren Ausgangslager in Periode  $Pe$

$I_{Li,Pr \in IdxLineAss,Pe}$  Bestand des Produktes  $Pr$  im Ausgangslager der Linie  $Li$  in Periode  $Pe$

$Pro_{Li,Pr \in IdxLineAss,Pe}$  Produktionsmenge des Produktes  $Pr$  auf Linie  $Li$  in Periode  $Pe$

$OSw_{Li,Pe,TS \in IdxFixCostTS,OS \in IdxFixCostOS,OS2}$  Variable, die den Wert „1“ annimmt, wenn sich der organisatorische Zustand der Linie  $Li$  in Periode  $Pe$  von  $OS$  auf  $OS2$  ändert, wobei der technische Anpassungszustand auf  $TS$  verbleibt. In jedem anderen Fall wird die stetige Variable auf den Wert „0“ gezwungen

$TSw_{Li,Pe,TS \in IdxFixCostTS,TS2}$  Variable, die den Wert „1“ annimmt, wenn sich der technische Zustand der Linie  $Li$  in Periode  $Pe$  von  $TS$  auf  $TS2$  ändert, „0“ sonst

$TFixCostT$  Gesamtfixkosten über dem Lebenszyklus bezogen auf die Produktionstechnik

$TVarCostT$  Über dem Lebenszyklus addierte variable Produktionskosten aus der Produktionstechnik

$TChCostT$  Gesamtkosten über dem Lebenszyklus zur technischen Systemanpassung

$TFixCostO$  Gesamtfixkosten über dem Lebenszyklus bezogen auf die Produktionsorganisation

$TVarCostO$  Über dem Lebenszyklus addierte variable Produktionskosten aus der Produktionsorganisation

---

<i>TChCostO</i>	Gesamtkosten über dem Lebenszyklus zur organisatorischen Systemanpassung
<i>TTrCostLi</i>	Gesamtkosten, die sich über dem Lebenszyklus aus den Lieferbeziehungen zwischen den Linien ergeben
<i>TTrCostMar</i>	Lebenszyklusgesamtkosten zur Lieferung der nachgefragten Produkte an die Kunden bzw. Märkte
<i>TShCost</i>	Gesamtfremdbezugskosten über dem Lebenszyklus
<i>TICost</i>	Gesamtgerkosten über dem Lebenszyklus

### 6.1.3 Zielfunktion

Ziel des Optimierungsmodells ist es, über dem Lebenszyklus des Fertigungssystems möglichst geringe net present cost (NPC), oder mit anderen Worten, abdiskontierte Gesamtkosten, zu generieren. Der Grund, warum nicht eine Maximierung des Gewinns angestrebt wird, liegt darin, dass vielfach die Endprodukte, die in diesem Modell an die Kunden bzw. Märkte geliefert werden, wiederum lediglich Komponenten für ein größeres Ganzes darstellen. In diesem Fall müssten also unternehmensinterne Verkaufs- oder Verrechnungspreise für diese Produkte vorliegen, um sie als Erlöse in die Zielfunktion einfließen lassen zu können. Da dies jedoch überwiegend nicht der Fall ist und außerdem zum Vergleich verschiedener Varianten von Fertigungssystemen zur Erfüllung geforderter Stückzahlen definierter Produkte ein Kostenvergleich über dem Lebenszyklus gesehen vollkommen ausreichend ist, wird unten dargestellte Zielfunktion verwendet. Minimiert wird dabei die Summe der fixen und variablen Kosten aus der Produktionstechnik *TFixCostT*, *TVarCostT* und der Produktionsorganisation *TFixCostO*, *TVarCostO* sowie den Aufwendungen zur Anpassung des Fertigungssystems bzgl. der Technik *TChCostT* und Organisation *TChCostO*. Weitere Bestandteile bilden Transportkosten innerhalb des Fertigungssystems *TTrCostLi*, also von Linie zu Linie, als auch vom Fertigungssystem zu den Kunden bzw. Märkten *TTrCostMar*. Einen weiteren wichtigen Bestandteil stellen die Gesamtfremdbezugskosten *TShCost* dar, da jede nicht produzierte Einheit über entsprechende Kosten „von außerhalb“ eingekauft werden muss. Einen zusätzlichen Kostenpunkt bilden die Lagerkosten *TICost*.

$$\min \left\{ \begin{array}{l} TFixCostT \\ + TVarCostT \\ + TChCostT \\ + TFixCostO \\ + TVarCostO \\ + TChCostO \\ + TTrCostLi \\ + TTrCostMar \\ + TShCost \\ + TICost \end{array} \right\}$$

#### 6.1.4 Nebenbedingungen

Die Nebenbedingungen, die einerseits die Bedingungen der Realität verkörpern und andererseits logische Relationen zwischen den Variablen darstellen, sind zum besseren Verständnis im folgenden Teil der Arbeit in thematische Gruppen unterteilt.

##### Kostenbestandteile der Zielfunktion:

Die Fixkostenanteile aus der Produktionstechnik ergeben sich aus dem Produkt der Kostensätze und der Zustandsvariablen  $SBin_{Li,Pe,TS,OS}$ , die u.a. angibt, welcher technische Zustand für welche Linie in welcher Periode aktiv ist. Dieses Produkt wird über dem Lebenszyklus diskontiert mit dem Faktor  $DisFact_{Pe}$ . Gleiche Diskontierung findet mit jedem anderen Kostenbestandteil der Zielfunktion statt, da der negative Kapitalwert über dem Lebenszyklus minimiert wird.

$$TFixCostT = \sum_{Li,Pe,TS,OS} DisFact_{Pe} \cdot FixCostTS_{Li,TS} \cdot SBin_{Li,Pe,TS,OS}$$

Zur Berechnung der variablen Kostenanteile wird der hierfür gültige Kostensatz aus der Produktionstechnik multipliziert mit der tatsächlichen Produktionsmenge.

$$TVarCostT = \sum_{Li,Pe,TS,Pr} DisFact_{Pe} \cdot VarCostTS_{Li,TS,Pr} \cdot Pro_{Li,Pr,Pe}$$

Die Variable  $TSw_{Li,Pe,TS,TS2}$  gibt an, in welcher Periode welche Linie von welchem technischen Ausbauzustand in einen anderen wechselt und nimmt dabei den Wert „1“ an, was dazu führt, dass der gegebene Kostensatz diskontiert und über dem Lebenszyklus aufsummiert wird.

$$TChCostT = \sum_{Li,Pe,TS,TS2} DisFact_{Pe} \cdot ChCostTS_{Li,TS,TS2} \cdot TSw_{Li,Pe,TS,TS2}$$

Bzgl. der fixen, variablen und Wechselkosten auf organisatorischer Seite gilt gleiches wie für die Kosten aus der Produktionstechnik, jedoch hängen die Kosten der Organisation stets noch vom vorherrschenden technischen Systemzustand ab, weshalb hier ein Index mehr in Erscheinung tritt.

Die Gesamtfixkosten bzgl. der Produktionsorganisation ergeben sich somit aus dem Produkt des organisatorischen, periodisch wiederkehrenden Fixkostensatzes und der binären Variablen  $SBin_{Li,Pe,TS,OS}$  multipliziert mit dem Diskontierungsfaktor.

$$TFixCostO = \sum_{Li,Pe,TS,OS} DisFact_{Pe} \cdot FixCostOS_{Li,TS,OS} \cdot SBin_{Li,Pe,TS,OS}$$

Für die variablen Kosten gilt:

$$TVarCostO = \sum_{Li,Pe,TS,OS,Pr} DisFact_{Pe} \cdot VarCostOS_{Li,TS,OS,Pr} \cdot Pro_{Li,Pr,Pe}$$

Bei Wechseln in der Organisation, also etwa beim Übergang vom Zwei- in den Dreischichtbetrieb, müssen die dabei anfallenden Kosten erfasst werden.

$$TChCostO = \sum_{Li,Pe,TS,OS,OS2} DisFact_{Pe} \cdot ChCostOS_{Li,TS,OS,OS2} \cdot OSw_{Li,Pe,TS,OS,OS2}$$

Die Transportkosten innerhalb des Fertigungssystems setzen sich einerseits aus den Aufwendungen zusammen, die entstehen, wenn Produkte entweder direkt von einer Linie zu einer nachfolgenden Linie gebracht werden  $TrLi_{OPr,DPr,FLi,TLi,Pe}$ , oder aber wenn die Belieferung aus dem Ausgangslager der vorausgehenden Linie  $TrILi_{OPr,DPr,FLi,TLi,Pe}$  stattfindet. Andererseits wirkt sich ein zweiter Summand, der durch die Transporte von einer Linie in deren Ausgangslager gebildet wird, aus. Die in diesem Fall maßgebliche Variable ist  $TrLiI_{Li,Pr,Pe}$ .

$$TTrCostLi = \sum_{OPr,DPr,FLi,TLi \in IdxConLi,Pe} \left( \begin{array}{c} DisFact_{Pe} \cdot TrCostLi_{FLi,OPr,TLi,DPr} \\ \cdot (TrLi_{OPr,DPr,FLi,TLi,Pe} + CI \cdot TrILi_{OPr,DPr,FLi,TLi,Pe}) \end{array} \right) \\ + \sum_{Li,Pr,Pe} DisFact_{Pe} \cdot TrCostLiI_{Li,Pr} \cdot CI \cdot TrLiI_{Li,Pr,Pe}$$

Aufwendungen für die Transporte zu den Kunden bzw. Märkten entstehen entweder durch Belieferungen direkt von der Linie  $TrMar_{Pr,Li,Mar,Pe}$  oder aus dem Ausgangslager der Linie  $TrIMar_{Pr,Li,Mar,Pe}$ .

$$TTrCostMar = \sum_{Pr,Li,Mar,Pe} DisFact_{Pe} \cdot TrCostMar_{Pr,Li,Mar} \cdot (TrMar_{Pr,Li,Mar,Pe} + CI \cdot TrIMar_{Pr,Li,Mar,Pe})$$

Fremdbezugskosten können innerhalb des gesamten Fertigungssystems anfallen, also unter Umständen bei jeder Fertigungslinie im Einzelnen, oder aber erst bei den die Kunden bzw. Märkte beliefernden Linien. Ein gleichzeitiges Auftreten ist ausgeschlossen, da sich der Benutzer vor der Optimierung über den Parameter  $ShAt$  entscheiden muss, wo – falls erforderlich – nicht befriedigte Nachfrage auftreten soll.

$$TShCost = \begin{aligned} & (1 - ShAt) \cdot \sum_{Pr,Li,Pe} DisFact_{Pe} \cdot ShCost_{Li,Pr} \cdot ShLi_{Li,Pr,Pe} \\ & + ShAt \cdot \sum_{Pr,Li,Mar,Pe} DisFact_{Pe} \cdot ShCost_{Li,Pr} \cdot ShMar_{Pr,Li,Mar,Pe} \end{aligned}$$

Spielen bei der Betrachtung von Fertigungssystemen Ausgangslager hinter den Produktionslinien eine Rolle, so werden die dadurch periodisch anfallenden Kosten, abhängig vom eingelagerten Produkt und dessen Anzahl, ebenfalls über die Perioden aufsummiert und in die Zielfunktion aufgenommen.

$$TICost = CI \cdot \sum_{Pr,Li,Pe} DisFact_{Pe} \cdot ICost_{Li,Pr} \cdot I_{Li,Pr,Pe}$$

#### Erfassung von organisatorischen und technischen Veränderungen am System:

Ändert sich von einer Periode auf die andere der technische Systemzustand, so bilden die beiden Summanden auf der linken Seite den Wert „2“, was die Variable  $TSw_{Li,Pe,TS,TS2}$  dazu zwingt, mindestens den Wert „1“ anzunehmen. Da jedoch Kosten minimiert werden und die Variable direkten Einfluss auf die Wechselkosten hat, welche wiederum in die Zielfunktion eingehen, nimmt sie immer den geringstmöglichen Wert an. Gleiches gilt für den Fall, dass kein Wechsel stattfindet. Die Variable  $TSw_{Li,Pe,TS,TS2}$  nimmt dann ebenfalls den Wert „1“ an, wobei deren Indizes  $TS$  und  $TS2$  gleich sind. Das Ungleichheitszeichen sorgt in allen anderen Fällen, in denen die Paarung der Variablen auf der linken Seite nicht zutreffend ist, dafür, dass  $TSw_{Li,Pe,TS,TS2}$  den Wert „0“ annimmt und somit für eine gültige Nebenbedingung.

$$\sum_{OS} SBin_{Li,Pe=Pe-1,TS,OS} + \sum_{OS} SBin_{Li,Pe,TS=TS2,OS} \leq 1 + TSw_{Li,Pe,TS,TS2} \quad \forall Li, Pe, TS \in IdxFixCostTS, TS2$$

Gleicher Zusammenhang gilt zwischen den Zuständen in den Perioden  $Pe-1$  und  $Pe$  und der Wechselvariablen  $OSw_{Li,Pe,TS,OS,OS2}$ , nur dass diese zusätzlich vom Index  $TS$  abhängt, über dem deshalb summiert werden muss.

$$\sum_{TS} SBin_{Li,Pe=Pe-1,TS,OS} + \sum_{TS} SBin_{Li,Pe,TS,OS=OS2} \leq 1 + \sum_{TS} OSw_{Li,Pe,TS,OS,OS2} \quad \forall Li, Pe, OS, OS2$$

Zudem muss sichergestellt werden, dass innerhalb einer Periode lediglich einmal gewechselt wird, und dies sowohl hinsichtlich der Technik, als auch der Organisation:

$$\sum_{TS,TS2} TSw_{Li,Pe,TS,TS2} = 1 \quad \forall Li, Pe$$

$$\sum_{TS,OS,OS2} OSw_{Li,Pe,TS,OS,OS2} = 1 \quad \forall Li, Pe$$

#### Beziehung zwischen der Zustandsvariablen und der Wechselvariablen:

Folgende Bedingung koppelt die beiden Variablen für den aktiven technischen Zustand und die Wechselvariable derart, dass lediglich dann von einem organisatorischen Zustand in einen anderen gewechselt werden darf, wenn der Ausgangszustand auch in der entsprechenden Periode aktiv ist.

$$\sum_{OS,OS2} OSw_{Li,Pe,TS,OS,OS2} = \sum_{OS} SBin_{Li,Pe,TS,OS} \quad \forall Li, Pe, TS$$

#### Fertigungskapazitäten:

Hinsichtlich der Produktionskapazitäten muss gelten, dass die Produktionsstückzahlen niemals die Kapazitäten übersteigen dürfen. Hierbei wird sowohl ein Faktor zur jährlichen Kapazitätssteigerung  $CapaInc_{Pe}$  als auch der Kapazitätsbedarfsfaktor  $CapaDem_{Li,Pr}$  berücksichtigt:

$$\begin{aligned}
& \sum_{TS,OS} Capa_{Li,TS,OS} \cdot CapaInc_{Pe} \cdot SBin_{Li,Pe,TS,OS} \\
& \geq \sum_{Pr,TS,OS} CapaDem_{Li,TS,Pr} \cdot Pro_{Li,Pr,Pe} \cdot SBin_{Li,Pe,TS,OS} \\
& \quad \forall Li, Pe
\end{aligned}$$

Da das Produkt  $Pro_{Li,Pr,Pe} \cdot SBin_{Li,Pe,TS,OS}$  auf der rechten Seite der Ungleichung aus einer Binär- und einer stetigen Variable besteht, muss dieser Term linearisiert werden, um weiterhin ein gemischt-ganzzahliges, lineares Modell zu erhalten.

Es wird eine neue Variable definiert ( $Cap_{Li,TS,Pr,Pe}$ ), die anstelle dieses Produktes in die Gleichung eingesetzt wird. Um diesen Weg einschlagen zu können, ist es erforderlich, drei weitere Nebenbedingungen zu definieren, die für diese Linearisierung benötigt werden:

$$\begin{aligned}
\sum_{OS} Cap_{Li,TS,Pr,Pe} & \leq \sum_{OS} SBin_{Li,Pe,TS,OS} \cdot BigM \\
& \quad \forall Li, TS \in IdxFixCostTS, Pr \in IdxLineAss, Pe
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{OS} Cap_{Li,TS,Pr,Pe} & \geq Pro_{Li,Pr,Pe} - \left( BigM - \left( \sum_{OS} SBin_{Li,Pe,TS,OS} \cdot BigM \right) \right) \\
& \quad \forall Li, TS \in IdxFixCostTS, Pr \in IdxLineAss, Pe
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{OS} Cap_{Li,TS,Pr,Pe} & \leq Pro_{Li,Pr,Pe} + \left( BigM - \left( \sum_{OS} SBin_{Li,Pe,TS,OS} \cdot BigM \right) \right) \\
& \quad \forall Li, TS \in IdxFixCostTS, Pr \in IdxLineAss, Pe
\end{aligned}$$

Da die Möglichkeit der Herstellung von Produkten auf Linien zusätzlich vom technischen Ausbauzustand der betreffenden Linie abhängt, muss dies in einer entsprechenden Nebenbedingung formuliert werden. Hierzu wird der Eingabeparameter  $StageAss_{Li,TS,Pr}$  eingeführt. Kann ein Produkt in jenem Zustand nicht auf der Linie produziert werden, so ergibt sich auf der rechten Seite unten stehender Ungleichung der Wert „0“. Somit darf der Zustand nicht ausgewählt werden oder aber das fragliche Produkt darf nicht auf dieser Linie im betreffenden technischen Zustand gefertigt werden.

$$Pro_{Li,Pr,Pe} \leq \sum_{OS,TS} StageAss_{Li,TS,Pr} \cdot SBin_{Li,Pe,TS,OS} \cdot BigM \quad \forall Li, Pr \in IdxLineAss, Pe$$

### Marktnachfrage:

In der nachfolgenden Gleichung wird angenommen, dass die beim Kunden bzw. Markt herrschende Nachfrage nach Produkten erfüllt werden muss. Es existieren drei Belieferungsmöglichkeiten: direkt von der Produktionslinie, aus deren Ausgangslager und in letzter Instanz unter Inkaufnahme von Fremdbezug  $ShMar_{Pr,Li,Mar,Pe}$ .

$$\sum_{Li} TrMar_{Pr,Li,Mar,Pe}$$

$$Demand_{Pr,Mar,Pe} = + CI \cdot \sum_{Li} TrIMar_{Pr,Li,Mar,Pe} \quad \forall Pr, Mar, Pe > 0$$

$$+ ShAt \cdot \sum_{Li} ShMar_{Pr,Li,Mar,Pe}$$

### Netzwerkbedingungen:

Hinsichtlich der Transportbeziehungen muss sichergestellt sein, dass an einer Linie  $TLi$  nie größere Mengen verarbeitet werden können, als Rohmaterialien bzw. Vorprodukte von der (den) Vorgängerlinie(n)  $FLi$  geliefert werden. Lediglich kleinere Verarbeitungsmengen sind zulässig, führen jedoch zu Fremdbezug der an  $TLi$  erbrachten Wertschöpfung für den Fall, dass  $ShAt$  den Wert „0“ hat. Die linke Seite ergibt die Menge an Produkten  $OPr$ , die von Linie  $FLi$  zur Linie  $TLi$  für Produkt  $DPr$  in Periode  $Pe$  geliefert werden. Finden Lager in der Optimierung Berücksichtigung, so sorgt der Faktor  $CI$ , der in einem solchen Fall den Wert „1“ hat, dafür, dass die Transporte aus dem Lager in die Bilanzgleichung einfließen.

$$\sum_{FLi} TrLi_{OPr,DPr,FLi,TLi,Pe} = BoM_{OPr,DPr} \cdot Pro_{Li=TLi,Pr=DPr}$$

$$+ CI \cdot \sum_{FLi} TrILi_{OPr,DPr,FLi,TLi,Pe} = + (1 - ShAt) \cdot BoM_{OPr,DPr} \cdot ShLi_{Li=TLi,Pr=DPr}$$

$$\forall OPr, DPr, TLi, Pe > 0$$

In einer weiteren Transportgleichung ist festgelegt, dass lediglich die an einer Linie  $FLi$  erzeugten Produkte  $OPr$  in Periode  $Pe$  zusammen mit den fremdbezogenen Teilen weitergeliefert werden dürfen. Beliefert werden nachfolgende Linien, wodurch sich der Transportbedarf  $TrLi_{OPr,DPr,FLi,TLi,Pe}$  ergibt, Märkte bzw. Kunden sowie bei entsprechend gesetzter Option das Ausgangslager der Fertigungs linie.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{DPr, TLi} TrLi_{OPr, DPr, FLi, TLi, Pe} \\
 & + \sum_{Mar} TrMar_{Pr=OPr, Li=FLi, Pe} = \frac{Pro_{Li=FLi, Pr=OPr, Pe}}{(1 - ShAt) \cdot ShLi_{Li=FLi, Pr=OPr, Pe}} \quad \forall OPr, FLi, Pe > 0 \\
 & + CI \cdot TrLiI_{Li=FLi, Pr=OPr, Pe}
 \end{aligned}$$

### Lagerbilanzgleichung:

Werden Lager bei der Optimierung mit einbezogen, so nimmt der Eingabeparameter  $CI$  den Wert „1“ an; andernfalls „0“, wodurch sämtliche Elemente der folgenden Lagerbilanzgleichung ausgeschaltet würden. Der aktuelle Lagerbestand in einer Periode ergibt sich aus dem Lagerbestand der Vorperiode zuzüglich dem momentanen Zugang aus der Produktionslinie abzüglich der Transporte sowohl zu den Nachfolgerlinien als auch zu den Kunden bzw. Märkten.

$$\begin{aligned}
 & CI \cdot I_{Li, Pr, Pe=Pe-1} \\
 & + CI \cdot TrLiI_{Li, Pr, Pe} \\
 & - CI \cdot \sum_{Mar} TrIMar_{Pr, Li, Mar, Pe} = CI \cdot I_{Li, Pr, Pe} \quad \forall Li, Pr \in IdxLineAss, Pe \\
 & - CI \cdot \sum_{DPr, TLi} TrILi_{OPr=Pr, DPr, FLi=Li, TLi, Pe}
 \end{aligned}$$

### Vorgabe von Startzuständen und -zeitpunkten der Produktionslinien:

Manchmal kann es nötig sein, dass es nicht der Optimierung überlassen werden soll, in welchem Systemzustand eine Linie die Produktion aufnehmen soll. Es könnte etwa der Fall auftreten, dass eine flexible Rochadelinie bis zur zehnten Periode andere Produkte herstellt als diejenigen, die im betrachteten Fall relevant sind. Somit steht diese Linie erst in der elften Periode im vorliegenden Optimierungsproblem zur Verfügung und befindet sich außerdem in einem bereits festgelegten Systemzustand.

Aus Sicht des technischen Systemzustandes einer Linie wird demnach folgende Gleichung eingeführt, die für eine festgelegte Startperiode  $FstPe_{Li}$  einen definierten Systemzustand  $InitTS_{Li}$  vorschreibt. Hat der Parameter  $InitTS_{Li}$  den Wert „-1“, so wird diese Gleichung bei der Optimierung außer Acht gelassen. Werte größer als „-1“ werden als der vorgegebene Startzustand in Startperiode  $FstPe_{Li}$  interpretiert.

$$\sum_{OS} SBin_{Li, Pe=FstPe, TS=InitTS, OS} = 1 \quad \forall Li, Pe, TS$$

Analog wird bei der Vorgabe eines organisatorischen Zustandes vorgegangen:

$$\sum_{TS} SBin_{Li,Pe=FstPe,TS,OS=InitOS} = 1 \quad \forall Li, Pe, OS$$

Ist es lediglich von Interesse eine Startperiode vorzugeben ohne Einfluss auf den Startzustand zu nehmen, so kommt nachfolgende Gleichung zum Einsatz. Wird für  $FstPe_{Li}$  ein Wert größer als „-1“ gesetzt, so werden für alle Perioden kleiner als  $FstPe_{Li}$  die Systemzustände mit dem Index  $TS = 0$  und  $OS = 0$  auf „1“ festgelegt und somit die Linie innerhalb dieser Zeitspanne vom Produzieren abgehalten.

$$SBin_{Li,Pe < FstPe, TS=0, OS=0} = 1 \quad \forall Li, Pe, TS \in IdxFixCostTS, OS$$

Umgekehrt verhält es sich, wenn für eine Linie eine maximale Periode definiert werden soll, zu der sie noch produktiv sein soll. Hierfür ergibt sich folgende Gleichung:

$$SBin_{Li,Pe > LstPe, TS=0, OS=0} = 1 \quad \forall Li, Pe, TS \in IdxFixCostTS, OS$$

Wird keine benutzerdefinierte Vorgabe hinsichtlich des organisatorischen Startzustandes einer Linie getroffen (also  $InitOS_{Li} = -1$ ) und entscheidet die Optimierungssoftware, dass eine Linie im technischen Ausbauzustand  $TS = 0$  beginnen soll – was einer Installation der Linie zu einem späteren, von der Optimierung festgelegten Startzeitpunkt gleichkommt – kann von vornherein der organisatorische Zustand  $OS$  ebenfalls auf „0“ gezwungen werden, indem alle anderen Zustände, bei denen der Index  $OS$  größer als „0“ ist, auf den Wert „0“ gesetzt werden.

$$SBin_{Li,Pe, TS=0, OS} = 0 \quad \forall Li, Pe, TS \in IdxFixCostTS, OS \in IdxFixCostOS > 0$$

Umgekehrt lässt sich gleiches Vorgehen für die technischen Zustände anwenden:

$$SBin_{Li,Pe, TS, OS=0} = 0 \quad \forall Li, Pe, TS \in IdxFixCostTS > 0, OS \in IdxFixCostOS$$

#### Sonstige Nebenbedingungen:

Für jede Produktionslinie  $Li$  kann in jeder Periode  $Pe$  nur ein aktiver Systemzustand  $TS$  sowie ein Zustand  $OS$  gewählt werden:

$$\sum_{OS} SBin_{Li,Pe, TS, OS} \leq 1 \quad \forall Li, Pe, TS \in IdxFixCostTS$$

$$\sum_{TS} SBin_{Li,Pe,TS,OS} \leq 1 \quad \forall Li, Pe, OS$$

Hinsichtlich der Ausgangslager der Fertigungslinien muss sichergestellt sein, dass, sofern ein Anfangsbestand  $InitI_{Li,Pr}$  vom Benutzer definiert worden ist, dieser in Periode „0“ eingelagert wird und somit in Periode „1“ zur Verfügung steht. Darüber hinaus darf niemals die Lagerkapazität  $ICapa_{Li,Pr}$  überschritten werden.

$$I_{Li,Pr,Pe=0} = InitI_{Li,Pr}$$

$$I_{Li,Pr,Pe} \leq ICapa_{Li,Pr}$$

## 6.2 Optimierungsmodell zur Ressourcen- und Prozessplanung

Folgendem mathematischem Modell liegt die Voraussetzung zugrunde, dass **eine Fertigungslinie** räumlich in **Maschinengruppen** unterteilt ist. Jede Maschinengruppe kann aus mehreren Maschinen bestehen. Die Maschinengruppen müssen so nah beieinander liegen, dass die **Transportzeiten** zwischen den Maschinengruppen vernachlässigbar sind. Jedes zu fertigende Werkstück durchläuft die Fertigungslinie auf einem Transportsystem vom Anfang der Produktionslinie bis zu deren Ende. Ein **Rücktransport** in die entgegengesetzte Richtung ist **nicht zulässig**. Jedes zu fertigende Teil darf maximal von einer Maschine in jeder Maschinengruppe bearbeitet werden. Die Bauteile, die in dieser Maschinengruppe nicht bearbeitet werden, laufen an dieser Station vorbei oder durch sie hindurch.

**Puffer oder Zwischenlager** innerhalb der Fertigungslinie **werden nicht in die Betrachtung einbezogen**, ebenso werden die Transportzeiten der Werkstücke, die Kosten für das Transportsystem und die Logistik nicht berücksichtigt.

Aufgrund von Produktions- oder Materialfehlern entsteht in einer Fertigung **Ausschuss**, der entweder nachbearbeitet oder ausgeschleust werden muss. Dies hat zur Folge, dass am Anfang einer Fertigungslinie Bauteile bearbeitet werden, welche im weiteren Verlauf wegen mangelhafter Qualität nicht weiterbearbeitet werden können. Dies wird im Modell nicht berücksichtigt und muss vom Produktionsplaner in die zu produzierende Stückzahl eingerechnet werden.

Die zu produzierenden Stückzahlen für jedes einzelne Produkt müssen einer Fließfertigung angemessen hoch sein. Des Weiteren wird von einer Fertigung ausgegangen, bei der die Prozesse stets in der festgelegten Zeit durchgeführt werden können.

Die Fertigung muss kontinuierlich ablaufen, darf also auch bei einem Produktwechsel nicht stillstehen. Ebenso wird davon ausgegangen, dass bereits zu Beginn wie auch am

Ende einer Periode auf der Fertigungsline produziert wird. Die betreffende **Periode** muss demnach **gegenüber der Durchlaufzeit der Produkte hinreichend groß** sein.

Der **Bezug von externen Leistungen** ist im Gegensatz zum Programm- und Ressourcenmodell **nicht gestattet**, d.h. das komplette geforderte Produktionsvolumen muss erfüllt werden können. Funktioniert dies z.B. aufgrund von fehlender Hallenfläche zur Aufstellung zusätzlicher Produktionsressourcen nicht, so handelt es sich um ein unlösbares Problem.

### 6.2.1 Eingangsgrößen

#### Mengen:

$MaxMT$	Anzahl an Maschinentypen
$MaxMG$	Anzahl an Maschinengruppen
$MaxEP$	Anzahl an Endprodukten
$MaxPc$	Anzahl an verschiedenen Bearbeitungsprozessen
$MaxPl$	Maximale Anzahl an Vorgängerprozessen über alle Bearbeitungsprozesse
$MaxCS$	Anzahl an verschiedenen Aufspannungen
$MaxMa$	Maximal mögliche Anzahl an Maschinen eines Maschinentyps

#### Indizes:

$MT$	Index der Maschinentypen 1... $MaxMT$
$MG$	Index der Maschinengruppen 1... $MaxMG$
$Ma$	Index der Maschinen 1... $MaxMa$
$EP$	Index der Endprodukte 1... $MaxEP$
$Pc$	Index der Prozesse 1... $MaxPc$
$Pl$	Index der Vorgängerlevel 1... $MaxPl$
$CS$	Index der Aufspannungen 1... $MaxCS$

Parameter:

$TTime$	Gesamte Zeit, die jeder Maschine für die Ausführung der Prozesse zur Verfügung steht. Die Zeit wird auch als Dauer der Periode bezeichnet
$ToP$	Art der Fertigung
$InvestCost_{MT}$	Investitionen bzw. Kosten, die bei Kauf, Installation und Integration einer neuen Maschine vom Typ $MT$ anfallen
$DIInvestCost_{MT}$	Desinvestitionen bzw. Kosten, die für den Abbau, Verkauf oder für die Verschrottung einer bestehenden Maschine vom Typ $MT$ anfallen, wenn diese aus der Linie entfernt wird. Positives Vorzeichen für anfallende Kosten, negatives Vorzeichen für erzielbare Erlöse
$FixCostMT_{MT}$	Fixkosten, die für jede installierte Maschine vom Typ $MT$ im Verlauf der Periode anfallen, beispielsweise Personalkosten je Maschine
$SpacePerMA_{MT}$	Flächenbedarf für eine Maschine des Typs $MT$ inklusive benötigter Fläche für das Transportsystem und Sicherheitssperrfläche
$Orientation_{MT}$	Orientierung der Maschinen des Typs $MT$ (siehe Abbildung 5-4: zwei grundlegende Orientierungstypen für Bearbeitungsmaschinen)
$Abschreibung_{MT}$	Anteil der Investitionen $InvestCost_{MT}$ , der für den Maschinentyp $MT$ in der betrachteten Periode verrechnet wird
$TotalSpace_{MG}$	Gesamte verfügbare Fläche in der Maschinengruppe $MG$
$MGorient_{MG}$	Bestehender Orientierungstyp der Maschinen aus Maschinengruppe $MG$
$TransCapa_{MG}$	Kapazität des Transportsystems der Maschinengruppe $MG$ in Stück für die betrachtete Periode
$MaConfSt_{MG,MT}$	Konfiguration der bestehenden Fertigungslinie. Anzahl der Maschinen vom Typ $MT$ , die in der Maschinengruppe $MG$ stehen
$MaMaxInv_{MG,MT}$	Maximale Anzahl an Maschinen des Typs $MT$ , die in der Maschinengruppe $MG$ hinzugefügt werden können

$PcTimeConf_{Pc,MT}$	Arbeitszeit, die der Maschinentyp $MT$ für die Ausführung des gesamten Prozesses $Pc$ inklusive Werkzeugwechselzeit benötigt
$VarCostI_{Pc,MT}$	Variable Kosten für jede einzelne Ausführung des Prozesses $Pc$ auf dem Maschinentyp $MT$
$EPConf_{EP,Pc}$	Konfiguration der Endprodukte: wie häufig muss der Prozess $Pc$ für das Endprodukt $EP$ ausgeführt werden. „0“ wenn der Prozess nicht für $EP$ benötigt wird. Es sind rationale Zahlen als Eingabe zulässig
$PcVorg_{Pc,Pl}$	Für jeden Vorgängerlevel $Pl$ wird festgelegt, welchen Vorgängerprozess der Arbeitsprozess $Pc$ benötigt. Benötigt ein Prozess keinen Vorgängerprozess, so hat $PcVorg_{Pc,Pl}$ für diesen Prozess für alle Vorgängerlevel den Wert null. Für jeden weiteren Vorgängerprozess, den ein Prozess benötigt, wird jeweils der nächste Vorgängerlevel mit diesem Wert belegt.
$Demand_{EP}$	Nachfrage nach dem Endprodukt $EP$ in der betrachteten Periode bzw. die zu fertigende Stückzahl des jeweiligen Endproduktes
$MaxCycleTime_{EP}$	Maximale verfügbare Taktzeit für das Endprodukt $EP$ . Diese Taktzeit darf an keiner Station bei der Fertigung dieses Endproduktes überschritten werden, wenn die entsprechende Option $ToP$ der Fertigungsart gewählt wird
$PcAsAl_{Pc,MG}$	Legt fest, ob der Prozess $Pc$ in der Maschinengruppe $MG$ ausgeführt werden darf („1“) oder nicht („0“)
$PcStartMG_{Pc,MG}$	Legt die Station der bestehenden Fertigungslinie fest, in welcher der Prozess $Pc$ momentan ausgeführt wird („0“). Für alle anderen Maschinengruppen, in denen der Prozess durchgeführt werden könnte, aber Kosten entstünden, wenn der Prozess dorthin verschoben würde, ist der Wert „1“ einzugeben. Ist der Prozess bisher noch keiner Maschinengruppe zugewiesen, so ist für alle Maschinengruppen eine „0“ einzutragen.
$PcChMGCI_{Pc,MG}$	Eingabe der Kosten die entstehen, wenn ein Prozess von der in $PcStartMG_{Pc,MG}$ definierten, ursprünglichen Maschinengruppe auf eine andere Maschinengruppe $MG$ verschoben wird

$PcStartMT_{Pc,MT}$	Analog zu $PcStartMG_{Pc,MG}$ wird hiermit festgelegt, auf welchem Maschinentyp $MT$ in der bestehenden Fertigungsline der Prozess $Pc$ ausgeführt wird („0“), oder ob durch ein Verschieben des Prozesses auf einen anderen $MT$ Kosten entstehen („1“)
$PcChMTCI_{Pc,MT}$	Eingabe der Kosten die entstehen, wenn ein Prozess von dem in $PcStartMT_{Pc,MT}$ definierten ursprünglichen Maschinentyp auf einen anderen Maschinentyp $MT$ verschoben wird
$CSAll_{Pc,CS}$	Erlaubte Aufspannungen $CS$ zur Ausführung des Prozesses $Pc$ . Es wird eine „1“ eingegeben, wenn der Prozess in der Aufspannung ausgeführt werden kann, sonst „0“

#### Eingeschränkte Mengen:

$TPP_{Pc,Pl}$	Die Menge aller Prozesse $Pc$ und Vorgängerlevel $Pl$ , für die ein Vorgängerprozess $\neq 0$ definiert wurde
$ZPP_{EP,Pc}$	Die Menge aller Prozesse $Pc$ , bei denen für das Endprodukt $EP$ die Ausführungshäufigkeit $\neq 0$ ist

#### **6.2.2 Entscheidungsvariablen**

##### Binärvariablen:

$NrMas_{MG,MT,Ma}$	Binärvariable, die den Wert „1“ hat, wenn eine Anzahl von $Ma$ Maschinen des Typs $MT$ in der Maschinengruppe $MG$ zur Fertigung zur Verfügung steht, sonst „0“
$CSforMG_{MG,CS}$	Binärvariable, welche für die gewählte Aufspannung in dieser Maschinengruppe $MG$ den Wert „1“ hat, und ansonsten „0“ ist

##### Ganzzahlige Variablen ( $\geq 0$ ):

$MaConIn_{MG,MT}$	Variablen, deren Wert für jede Maschinengruppe $MG$ und jeden Maschinentyp $MT$ die Anzahl der zusätzlich benötigten neuen Maschinen angibt
-------------------	---

$MaConDIn_{MG,MT}$	Variablen, deren Wert für jede Maschinengruppe $MG$ und jeden Maschinentyp $MT$ die Anzahl der zu entfernenden Maschinen aus dem Anfangsbestand angibt
--------------------	--

Stetige Entscheidungsvariablen ( $\geq 0$ ):

$FixCost$	Fixkosten, die in der Periode durch alle Maschinen der Fertigungslinie anfallen, beispielsweise Wartungskosten oder Flächenkosten
$TInCost$	Gesamte Investitionen der Periode
$MaCon_{MG,MT}$	Maschinenkonfiguration: Anzahl der Maschinen, die vom Maschinentyp $MT$ in der Maschinengruppe $MG$ stehen
$USpace_{MG}$	Durch Maschinen belegte Fläche in der Maschinengruppe $MG$
$Prod_{EP,Pc,MG,MT}$	Häufigkeit, mit der für das Endprodukt $EP$ der Prozess $Pc$ in der Maschinengruppe $MG$ auf allen vorhandenen Maschinen des Maschinentyps $MT$ ausgeführt wird
$Pieces_{EP,MG,Pc}$	Stückzahl der Teile, die von Endprodukt $EP$ in Maschinengruppe $MG$ mit Prozess $Pc$ bearbeitet werden
$ASSMG_{EP,MG,Pc}$	Zuordnungsvariable der Maschinengruppe. Sie hat den Wert „1“, wenn der Prozess $Pc$ für Endprodukt $EP$ in der Maschinengruppe $MG$ ausgeführt wird, sonst „0“
$ASSMT_{EP,MT,Pc}$	Zuordnungsvariable des Maschinentyps. Sie hat den Wert „1“, wenn der Prozess $Pc$ für Endprodukt $EP$ auf dem Maschinentyp $MT$ ausgeführt wird, sonst „0“
$PcChMG_{Pc,MG}$	Die Variable hat den Wert „1“, wenn der Prozess $Pc$ in der Maschinengruppe $MG$ ausgeführt wird, dieser jedoch vor der Optimierung einer anderen Maschinengruppe zugeordnet gewesen ist und dadurch Wechselkosten entstehen, sonst „0“
$PcChMGCost$	Kosten, die aufgrund eines Wechsels entstehen, weil Prozesse nicht in der Maschinengruppe ausgeführt werden, in der sie bei der bestehenden Konfiguration der Fertigungslinie ausgeführt wurden
$PcChMT_{Pc,MT}$	Die Variable hat den Wert „1“, wenn der Prozess $PC$ auf dem Maschinentyp $MT$ ausgeführt wird, dieser jedoch vor der Op-

	timierung einem anderen Maschinentyp zugeordnet gewesen ist und dadurch Wechselkosten entstehen, sonst „0“
$PcChMTCost$	Kosten, die aufgrund eines Wechsels entstehen, weil Prozesse nicht auf dem Maschinentyp ausgeführt werden, auf dem sie bei der bestehenden Konfiguration der Fertigungslinie ausgeführt wurden
$WT_{MG,MT}$	Kumulierte Arbeitszeit für alle Maschinen des Maschinentyps $MT$ in Maschinegruppe $MG$ , die benötigt wird, um die zugewiesenen Prozesse in der jeweiligen Stückzahl auszuführen
$VarCost_{EP, MG, MT}$	Variable Kosten, die aufgrund der durchgeführten Prozesse und hergestellten Stückzahlen für das Endprodukt $EP$ in der Maschinengruppe $MG$ bei dem Maschinentyp $MT$ anfallen
$TVarCost$	Summe aller variablen Kosten
$WTPart_{EP, MG, MT}$	Belegungszeit einer Maschine des Maschinentyps $MT$ in der Maschinengruppe $MG$ für das Endprodukt $EP$ . Die für die Ausführung aller Prozesse an einem Bauteil für das Endprodukt benötigte Zeit inklusive Transportzeiten
$CT_{EP, MG, MT}$	Gruppenabgabezeit für den Maschinentyp $MT$ in der Maschinengruppe $MG$ und Endprodukt $EP$ . Nach dieser Zeit verlässt ein fertig bearbeitetes Bauteil die Maschinengruppe
$WTMa_{EP, MG, MT, Ma}$	Zeit, welche die $Ma$ Maschinen des Maschinentyps $MT$ in der Maschinengruppe $MG$ für ein Stück des Endproduktes $EP$ benötigen. „0“ für alle $Ma$ die nicht mit der entsprechenden Maschinenanzahl identisch sind
$MGPrefCost$	Strafkosten, die abhängig von der Maschinengruppe zur Beschleunigung der Rechengeschwindigkeit einbezogen werden
$CTEP_{EP}$	Taktzeit für das Endprodukt $EP$

Stetige Entscheidungsvariablen [ - $\infty$  ; + $\infty$  ]):

$TDInCost$	Gesamte Desinvestitionen der Periode
------------	--------------------------------------

### 6.2.3 Zielfunktion

Die zu minimierende Zielfunktion des gemischt ganzzahligen Optimierungsproblems setzt sich aus folgenden Kostenbestandteilen zusammen:

$$\min \left\{ \begin{array}{l} FixCost \\ + TInCost \\ + TDInCost \\ + TVarCost \\ + PchMGCost \\ + PchMTCost \\ + MG PrefCost \end{array} \right\}$$

Minimiert wird die Summe aus den fixen Kosten  $FixCost$ , den Investitionen  $TInCost$ , den Desinvestitionen  $TDInCost$ , den variablen Kosten  $TVarCost$ , den Prozessverschiebungskosten bezüglich der Maschinengruppen  $PchMGCost$  und bezüglich der Maschinentypen  $PchMTCost$ , sowie den Strafkosten  $MG PrefCost$ .

#### 6.2.4 Nebenbedingungen

Auch bei diesem Modell sind die Nebenbedingungen zum besseren Verständnis in thematische Gruppen unterteilt.

##### Maschinenkonfiguration:

Es können nur die Maschinen desinvestiert ( $MaConDIn_{MG,MT}$ ) werden, die im bestehenden Fertigungssystem ( $MaConfSt_{MG,MT}$ ) bereits vorhanden sind.

$$MaConfSt_{MG,MT} - MaConDIn_{MG,MT} \geq 0 \quad \forall MG, MT$$

Es kann für jede Maschinengruppe und jeden Maschinentyp nur maximal die Anzahl an Maschinen neu hinzugefügt werden, die in  $MaMaxInv_{MG,MT}$  definiert ist.

$$MaConIn_{MG,MT} \leq MaMaxInv_{MG,MT} \quad \forall MG, MT$$

Die Anzahl der zur Fertigung verfügbaren Maschinen  $MaCon_{MG,MT}$  errechnet sich aus den Maschinen des bestehenden Fertigungssystems  $MaConfSt_{MG,MT}$  abzüglich der desinvestierten Maschinen  $MaConDIn_{MG,MT}$  und zuzüglich der Anzahl an Maschinen des Typs  $MT$ , die in der Maschinengruppe  $MG$  zusätzlich benötigt werden und in die investiert werden müssen  $MaConIn_{MG,MT}$ .

$$MaCon_{MG,MT} = MaConfSt_{MG,MT} - MaConDIn_{MG,MT} + MaConIn_{MG,MT} \quad \forall MG, MT$$

Es soll ausgeschlossen werden, dass in einer Maschinengruppe verschiedene Maschinentypen stehen:

$$MaCon_{MG,MT} < BigM1 \cdot \delta_{MG,MT} \quad \forall MG, MT$$

mit der Binärvariablen  $\delta_{MG,MT}$  für die gilt:

$$\sum_{MT} \delta_{MG,MT} = 1 \quad \forall MG$$

Zudem muss  $BigM1 > MaxMa$  gelten.

### Investitionen / Desinvestitionen:

Die gesamten Investitionen  $TInCost$  berechnen sich als Summe über alle Maschinengruppen und alle Maschinentypen des jeweiligen Produktes aus der Anzahl der zu investierenden Maschinen  $MaConIn_{MG,MT}$  mit den Einzelinvestitionen für eine Maschine dieses Typs  $InvestCost_{MT}$  und dem davon anzurechnenden Abschreibungssatz  $Abschreibung_{MT}$ .

$$TInCost = \sum_{MG,MT} InvestCost_{MT} \cdot Abschreibung_{MT} \cdot MaConIn_{MG,MT}$$

Die gesamten Desinvestitionen  $TDInCost$  berechnen sich analog zu den Investitionen. Hier setzt sich das Produkt aus den Einzeldesinvestitionen für die Maschine des Typs  $MT$   $DInvestCost_{MT}$  (Abbau oder Verschrottung), dem anzurechnenden Abschreibungssatz  $Abschreibung_{MT}$  und der Anzahl an Maschinen  $MaConDIn_{MG,MT}$ , die entfernt werden sollen, zusammen. Dabei ist zu beachten, dass  $TDInCost$  sowohl negativ als auch positiv sein kann. So müssen anfallende Kosten für die Verschrottung oder den Abbau einer Maschine in  $DInvestCost_{MT}$  mit positivem Vorzeichen verrechnet werden. Falls Verkaufserlöse erzielt werden können, müssen diese mit negativem Vorzeichen eingerechnet werden. Wenn die Verkaufserlöse beim Entfernen von Maschinen dominieren wird  $TDInCost$  negativ.

$$TDInCost = \sum_{MG,MT} DInvestCost_{MT} \cdot Abschreibung_{MT} \cdot MaConDIn_{MG,MT}$$

### Fixkosten:

Die gesamten Fixkosten errechnen sich aus allen Maschinen eines Maschinentyps in einer Maschinengruppe  $MaCon_{MG,MT}$  multipliziert mit den jeweiligen Fixkosten für eine Maschine summiert über alle Maschinentypen und alle Maschinengruppen.

$$FixCost = \sum_{MG,MT} MaCon_{MG,MT} \cdot FixCostMT_{MT}$$

### Flächenverbrauch:

Für jede Maschinengruppe muss die verbrauchte Fläche kleiner oder gleich der für diese Maschinengruppe verfügbaren Fläche  $TotalSpace_{MG}$  sein. Die verbrauchte Fläche errechnet sich für jede Maschinengruppe aus der Anzahl der Maschinen eines Maschinentyps  $MaCon_{MG,MT}$  multipliziert mit dem Flächenbedarf einer einzelnen Maschine vom jeweiligen Maschinentyp  $SpacePerMA_{MT}$  summiert über alle Maschinentypen.

$$\sum_{MT} SpacePerMA_{MT} \cdot MaCon_{MG,MT} \leq TotalSpace_{MG} \quad \forall MG$$

### Orientierung von Maschinentypen und Maschinengruppen:

Mit der nachfolgenden Nebenbedingung wird erreicht, dass einer Maschinengruppe nur Maschinen mit demselben Orientierungstyp hinzugefügt werden.

$$MaConIn_{MG,MT} \cdot Orientation_{MT} = MaConIn_{MG,MT} \cdot MGorient_{MG} \quad \forall MG, MT$$

Da  $MaConIn_{MG,MT}$  auf beiden Seiten der Gleichung steht, ist die Nebenbedingung in folgenden Fällen erfüllt:

- Für den Maschinentyp  $MT$  und die Maschinengruppe  $MG$  ist die Orientierung identisch ( $Orientation_{MT} = MGorient_{MG}$ ). Dann kann  $MaConIn_{MG,MT}$  jeden beliebigen zulässigen Wert annehmen, d.h. es können Maschinen diesen Typs hinzugefügt werden.
- Für den Maschinentyp  $MT$  und die Maschinengruppe  $MG$  ist die Orientierung nicht identisch  $Orientation_{MT} \neq MGorient_{MG}$ . Dann muss  $MaConIn_{MG,MT} = 0$  sein, d.h. es können keine Maschinen diesen Typs hinzugefügt werden.

### Fertigung der Arbeitsprozesse:

Durch eine Nebenbedingung muss die Entscheidungsvariable  $Prod_{EP,PC,MG,MT}$  so festgelegt werden, dass jeder Prozess für jedes Endprodukt innerhalb der Produktionslinie ausgeführt wird, da es in diesem Modell keinen Bezug von Fremdleistungen gibt. Dabei wird mit der unten stehenden Gleichung noch nicht beschrieben, in welcher Maschinengruppe und auf welchem Maschinentyp die Fertigung erfolgen soll, nur dass jeder Prozess in der benötigten Häufigkeit durchgeführt werden muss. Die Häufigkeit jedes Prozesses errechnet sich aus der gewünschten Stückzahl des Endproduktes  $Demand_{EP}$  multipliziert mit der Häufigkeit, mit welcher der Prozess für das jeweilige Endprodukt  $EPConf_{EP,PC}$  benötigt wird.

$$\sum_{MG,MT} Prod_{EP,PC,MG,MT} = EPConf_{EP,PC} \cdot Demand_{EP} \quad \forall EP, PC$$

Für die Fertigungsleitung wird von der Qualitätssicherung vorgeschrieben, dass ein Prozess immer nur in einer Maschinengruppe ausgeführt wird. Daraus ergeben sich folgende Nebenbedingungen:

$$\sum_{EP,MT} Prod_{EP,PC,MG,MT} < BigM2 \cdot \delta_{PC,MG} \quad \forall MG, MT$$

mit der Binärvariablen  $\delta_{PC,MG}$  für die gilt:

$$\sum_{MG} \delta_{PC,MG} = 1 \quad \forall PC$$

Zudem muss gelten:

$$BigM2 > max(EPConf_{EP,PC} \cdot Demand_{EP}) \quad \forall EP, PC$$

Mit dieser Nebenbedingung wird erreicht, dass keine Produktion erfolgt, d.h.  $Prod_{EP,PC,MG,MT} = 0$  ist, wenn ein Prozess nicht auf einer Maschine ausgeführt werden kann bzw.  $PCTimeConf_{PC,MT} = 0$  ist:

$$Prod_{EP,PC,MG,MT} \leq PCTimeConf_{PC,MT} \cdot BigM3 \quad \forall EP, PC, MG, MT$$

$BigM3$  muss hierbei eine hinreichend große Zahl sein, so dass in allen Fällen mit  $PCTimeConf_{PC,MT} \neq 0$  die rechte Seite der Ungleichung immer größer ist als die linke.

Die kumulierte Arbeitszeit aller Maschinen für den Maschinentyp  $MT$  in der Maschinengruppe  $MG$  errechnet sich aus dem Produkt der Häufigkeit  $Prod_{EP,PC,MG,MT}$ , mit

der ein Prozess ausgeführt wird, und der Dauer dieses Prozesses auf dem ausführenden Maschinentyp  $PcTimeConf_{Pc,MT}$ , summiert über alle Prozesse und Endprodukte.

$$WT_{MG,MT} = \sum_{EP,Pc} PctimeConf_{Pc,MT} \cdot Prod_{EP,Pc,MG,MT} \quad \forall MG, MT$$

Diese Arbeitszeit ist für jede Maschine durch die gesamte verfügbare Arbeitszeit  $TTime$  beschränkt. Für jede Maschinengruppe und jeden Maschinentyp errechnet sich die verfügbare Arbeitszeit aus der Anzahl der von diesem Maschinentyp in der Maschinengruppe stehenden Maschinen  $MaCon_{MG,MT}$  multipliziert mit der für eine Maschine verfügbaren Arbeitszeit  $TTime$ . Diese Nebenbedingung stellt somit sicher, dass bei nicht ausreichender Maschinenkapazität in neue Maschinen investiert wird, wodurch sich die verfügbare Arbeitszeit für diese Maschinengruppe und diesen Maschinentyp entsprechend erhöht.

$$WT_{MG,MT} \leq TTime \cdot MaCon_{MG,MT} \quad \forall MG, MT$$

Um eine Entscheidungsvariable zu erhalten, die nicht die Häufigkeit sondern die Stückzahl beinhaltet, wird die Produktionsvariable  $Prod_{EP,Pc,MG,MT}$  durch die Häufigkeit  $EPConf_{EP,Pc}$ , mit welcher der Prozess ausgeführt wird, dividiert und über alle Maschinentypen aufsummiert. Um eine Division durch null zu verhindern, wird die Gleichung nur für die Prozesse durchgeführt, die auch in das jeweilige Endprodukt einfließen.

$$Pieces_{EP,MG,Pc} = \sum_{MT} \frac{Prod_{EP,Pc,MG,MT}}{EPConf_{EP,Pc}} \quad \forall MG, EP, Ppc \in ZPP_{EP,Pc}$$

#### Prozessverschiebungskosten:

Die Entscheidungsvariable  $ASSMG_{EP,MG,Pc}$  ist mit der Division durch  $Demand_{EP}$  auf „1“ normiert, falls der Prozess  $Pc$  des Endproduktes  $EP$  in der Maschinengruppe  $MG$  ausgeführt wird. Wenn er dort nicht ausgeführt wird, ist  $Pieces_{EP,MG,Pc}$  null und somit ist auch  $ASSMG_{EP,MG,Pc}$  null.

$$ASSMG_{EP,MG,Pc} = \frac{Pieces_{EP,MG,Pc}}{Demand_{EP}} \quad \forall MG, EP, Ppc \in ZPP_{EP,Pc}$$

Folgende Nebenbedingung überprüft, ob der Prozess in der Maschinengruppe ausgeführt werden darf ( $PcAsAl_{Pc, MG} = 1$ ) oder nicht ( $PcAsAl_{Pc, MG} = 0$ ).

$$ASSMG_{EP,MG,Pc} \leq PcaSAl_{Pc,MG} \quad \forall MG, EP, Pc \in ZPP_{EP,Pc}$$

Da jeder Prozess nur auf einem Maschinentyp durchgeführt werden darf, hat die normierte Entscheidungsvariable  $ASSMT_{EP,MT,Pc}$  den Wert „0“, wenn der Prozess  $Pc$  für das Endprodukt  $EP$  nicht auf dem Maschinentyp  $MT$  ausgeführt wird, und den Wert „1“, wenn der Prozess auf dem Maschinentyp ausgeführt wird.

$$ASSMT_{EP,MT,Pc} = \sum_{MG} \frac{Prod_{EP,Pc,MG,MT}}{EPConf_{EP,Pc} \cdot Demand_{EP}} \quad \forall MG, EP, Pc \in ZPP_{EP,Pc}$$

Durch die Eingabe von  $PcStartMG_{Pc,MG}$  wird festgelegt, ob in der bestehenden Fertigungslinie ein Prozess in einer bestimmten Maschinengruppe gefertigt wird und es durch das Verschieben des Prozesses zu einmaligen Sonderkosten kommt. Ist dies nicht der Fall, so ist  $PcStartMG_{Pc,MG} = 0$ . Dadurch ist die rechte Seite unabhängig vom Wert von  $ASSMG_{EP,MG,Pc}$  gleich null. Kommt es jedoch für einen Prozess bei einer Maschinengruppe zu diesen einmaligen Verschiebungskosten, so ist  $PcStartMG_{Pc,MG} = 1$ . Wenn dieser Prozess in dieser Maschinengruppe ausgeführt wird, ist  $ASSMG_{EP,MG,Pc} = 1$ . Somit ist die rechte Seite der Ungleichung „1“ und nur dann ist auch  $PcChMG_{Pc,MG} = 1$ . Die Ungleichung ist nötig, um das Maximum für alle Endprodukte zu erhalten.

$$PcChMG_{Pc,MG} \geq ASSMG_{EP,MG,Pc} \cdot PcaStartMG_{Pc,MG} \quad \forall MG, EP, Pc \in ZPP_{EP,Pc}$$

Nun werden für alle Prozesse und alle Maschinengruppen die anfallenden Prozessverschiebungskosten der Maschinengruppen aufsummiert.  $PcChMG_{Pc,MG}$  ist „1“, wenn für den Prozess  $Pc$  Prozessverschiebungskosten anfallen, da er in der Maschinengruppe  $MG$  ausgeführt werden soll.  $PcChMGI_{Pc,MG}$  sind die angegebenen Kosten, die anfallen, wenn der Prozess  $Pc$  in die Maschinengruppe  $MG$  verschoben wird.

$$PcChMGCost = \sum_{Pc,MG} PcaChMG_{Pc,MG} \cdot PcaChMGI_{Pc,MG}$$

Analog zu den beiden obigen Formeln für die Maschinengruppe wird nun berechnet, ob für das Verschieben des Prozesses  $Pc$  auf den Maschinentyp  $MT$  einmalige Sonderkosten anfallen.

$$PcChMT_{Pc,MT} \geq ASSMT_{EP,MT,Pc} \cdot PcaStartMT_{Pc,MT} \quad \forall MT, EP, Pc \in ZPP_{EP,Pc}$$

Diese Prozessverschiebungskosten auf einen anderen Maschinentyp werden wie in obiger Gleichung für die Maschinengruppen aufsummiert und gehen in die Zielfunktion ein.

$$PcChMTCost = \sum_{Pc,MT} PchMT_{Pc,MT} \cdot PchMTCI_{Pc,MT}$$

#### Variable Kosten:

Bei den variablen Kosten werden Verschleißkosten der Maschinen, Kosten für die Abnutzung der Werkzeuge und weitere Kosten verrechnet, die von der Laufzeit der Maschine bei einem bestimmten Prozess abhängen.

Die Eingabegröße  $VarCostI_{Pc,MT}$  definiert die Kosten, die für eine Ausführung des Prozesses  $Pc$  auf dem Maschinentyp  $MT$  entstehen. Wird diese Größe mit der Häufigkeit  $Prod_{EP,Pc,MG,MT}$ , mit welcher der Prozess  $Pc$  auf dem Maschinentyp  $MT$  ausgeführt wird, multipliziert, so ergeben sich über alle Prozesse summiert die variablen Kosten, die auf dem Maschinentyp  $MT$  in der Maschinengruppe  $MG$  für das Endprodukt  $EP$  für alle dort ausgeführten Prozesse entstehen.

$$VarCost_{EP,MG,MT} = \sum_{Pc} Prod_{EP,Pc,MG,MT} \cdot VarCostI_{Pc,MT} \quad \forall EP, MG, MT$$

Werden diese Kosten für alle Maschinengruppen, Maschinentypen und Endprodukte aufsummiert, so resultiert dies in einem weiteren Element der Zielfunktion.

$$TVarCost = \sum_{EP,MG,MT} VarCost_{EP,MG,MT}$$

#### Vorranggraph:

Durch eine Nebenbedingung muss sichergestellt werden, dass für alle ausgeführten Prozesse ( $\forall EP, P \in ZPP_{EP,Pc}$ ), denen ein Vorgängerprozess zugewiesen worden ist ( $\forall P, Pl \in TPP_{Pc,Pl}$ ), diese äußerst wichtige Fertigungsreihenfolge eingehalten wird.

$ASSMG_{EP,MG,Pc}$  hat für einen Prozess  $Pc$  nur bei einer Maschinengruppe  $MG$ , auf welcher der Prozess ausgeführt werden soll, den Wert „1“ und sonst den Wert „0“. So mit hat die rechte Seite der Ungleichung den Wert der Maschinengruppennummer  $MG$ , auf der Prozess  $Pc$  ausgeführt wird. Alle Vorgängerprozesse dieses Prozesses  $Pc$  müssen nun entweder auf der gleichen Maschinengruppe oder auf einer früheren Maschinengruppe ausgeführt werden. Auf der linken Seite steht somit die Maschinengruppen-

nummer  $MG$  auf welcher der Vorgängerprozess  $PcVorg_{Pc,Pl}$  des Prozesses  $Pc$  ausgeführt wird. Diese muss kleiner oder gleich der rechten Seite sein.

$$\sum_{MG} MG \cdot ASSMG_{EP, MG, P_c = P_cVorg_{Pc, Pl}} \leq \sum_{MG} MG \cdot ASSMG_{EP, MG, P_c}$$

$$\forall P_c, Pl \in TPP_{P_c, Pl}, EP \in ZPP_{EP, P_c}$$

### Kapazität des Transportsystems:

Der Zweck der nachfolgenden Nebenbedingung ist es sicherzustellen, dass in jeder Maschinengruppe nur so viele Teile bearbeitet werden, wie es die Kapazität des Transportsystems erlaubt. Auf der rechten Seite der Ungleichung steht somit die maschinengruppenspezifische Kapazität des Transportsystems in Stück  $TransCapa_{MG}$  für die gesamte

Periode. Links wird die Anzahl der gefertigten Teile  $\left[ \frac{Prod_{EP, P_c, MG, MT}}{EPConf_{EP, P_c}} \right]$  eines jeden Prozesses über alle Endprodukte und alle Maschinen der verschiedenen Maschinentyphen summiert. Da jedes Teil in einer Maschinengruppe nur auf einer Maschine bearbeitet werden darf, muss diese Ungleichung für jeden Prozess gelten.

$$\sum_{EP, MT} \frac{Prod_{EP, P_c, MG, MT}}{EPConf_{EP, P_c}} \leq TransCapa_{MG} \quad \forall P_c, MG$$

### Aufspannungen:

Die Binärvariable  $CSforMG_{MG, CS}$  ist mit dieser Nebenbedingung so festgelegt, dass sie die Aufspannung für eine Maschinengruppe festlegt. Jede Maschinengruppe hat eine einzige Aufspannung  $CS$  bei der  $CSforMG_{MG, CS} = 1$  ist und für alle anderen Aufspannungen  $CS$  muss  $CSforMG_{MG, CS} = 0$  sein.

$$\sum_{CS} CSforMG_{MG, CS} = 1 \quad \forall MG$$

Mit  $CSAll_{P_c, CS}$  ist für jeden Prozess definiert, ob er in der Aufspannung  $CS$  ausgeführt werden kann ( $CSAll_{P_c, CS} = 1$ ) oder nicht ( $CSAll_{P_c, CS} = 0$ ). Auf der rechten Seite der Ungleichung wird über alle Aufspannungen  $CS$  das Produkt  $CSAll_{P_c, CS} \cdot CSforMG_{MG, CS}$  aufsummiert. Dieses Produkt hat den Wert „1“, wenn der Prozess  $P_c$  in der Aufspannung  $CS$  ausgeführt werden kann und gleichzeitig  $CSforMG_{MG, CS} = 1$  ist, d.h. diese Aufspannung  $CS$  für diese Maschinengruppe ausge-

wählt ist. Nur wenn dies der Fall ist, hat die rechte Seite der Ungleichung den Wert „1“ und nur dann darf der Prozess  $P_c$  auf dieser Maschinengruppe  $MG$  durchgeführt werden, d.h.  $ASSMG_{EP, MG, P_c}$  kann den Wert „1“ annehmen. In allen anderen Fällen hat die rechte Seite der Ungleichung den Wert „0“ und die linke Seite muss ebenfalls den Wert „0“ haben. Somit darf der Prozess nicht auf der Maschinengruppe ausgeführt werden.

$$ASSMG_{EP, MG, P_c} \leq \sum_{CS} CSAll_{P_c, CS} \cdot CSforMG_{MG, CS} \quad \forall EP, MG, P_c \in ZPP_{EP, P_c}$$

### Strafkosten:

Die Strafkosten errechnen sich aus der Anzahl an Maschinen, die in einer Maschinengruppe summiert über alle Maschinentypen investiert werden, multipliziert mit der jeweiligen Maschinengruppennummer. Dieses Produkt wird über alle Maschinengruppen summiert und mit einem Faktor (hier 0,01) versehen. Dieser Faktor wurde so klein gewählt, damit der Einfluss auf die eigentliche Entscheidung, ob ein Prozess verschoben oder zusätzliche Maschinen hinzugefügt werden sollen, vernachlässigbar klein bleibt. Unterscheiden sich z.B. zwei Alternativen lediglich darin, eine Maschine vom Typ x in Station 2, oder aber im anderen Fall in Station 3 zu investieren bei sonst identischen Anpassungskosten, so wird die indifferente Problemstellung durch diese Gleichung sehr einfach und eindeutig zugunsten der OP 2 gelöst, da hier zu investieren in Summe bedeutet, dass die  $MGPrefCost$  lediglich um  $0,01 \cdot (2 \cdot 1) = 0,02$  steigen und nicht um  $0,01 \cdot (3 \cdot 1) = 0,03$ .

$$MG PrefCost = 0,01 \cdot \sum_{MG} \left( MG \cdot \sum_{MT} MaConIn_{MG, MT} \right)$$

### Taktzeitberechnung:

Die Belegungszeit einer Maschine ist gleichzusetzen mit der gesamten Bearbeitungszeit aller Prozesse in dieser Maschine, die an einem Bauteil durchgeführt werden, zuzüglich der Transportzeiten. Die Gruppenabgabezeit wird als diejenige Zeit definiert, nach welcher jeweils ein fertiges Bauteil die Maschinengruppe verlässt. Steht nur eine Maschine in einer Maschinengruppe, ist die Gruppenabgabezeit gleich der Belegungszeit für ein Bauteil. Stehen mehrere Maschinen eines Maschinentyps in einer Maschinengruppe, können diese so gesteuert werden, dass nicht alle gleichzeitig, sondern nach gleichen Zeitabständen mit der Bearbeitung der Bauteile beginnen. Die Gruppenabgabezeit ist in diesem Fall die Belegungszeit einer Maschine für ein Bauteil dividiert durch die Anzahl der Maschinen dieses Maschinentyps.

Diese beiden Größen, Belegungszeit und Anzahl an Maschinen, sind Entscheidungsvariablen des Optimierungsmodells. Aus diesem Grund muss eine aufwendige Linearisierung zur Berechnung der Gruppenabgabezeit durchgeführt werden, um die aufgezeigte Division in einem gemischt-ganzzahlen, linearen Modell bewerkstelligen zu können.

Zur Berechnung der Belegungszeit  $WTPart_{EP, MG, MT}$  eines Bauteils für das Endprodukt  $EP$  in der Maschinengruppe  $MG$  auf dem Maschinentyp  $MT$  wird die Ausführungshäufigkeit der dort produzierten Prozesse durch die Stückzahl geteilt und multipliziert mit der Bearbeitungszeit, die der jeweilige Prozess benötigt.

$$WTPart_{EP, MG, MT} = \sum_{Pc} \frac{PcTimeConf_{Pc, MT} \cdot Prod_{EP, Pc, MG, MT}}{Demand_{EP}} \quad \forall EP, MG, MT$$

Für die folgenden Nebenbedingungen muss  $BigM$  so groß gewählt werden, dass diese Ungleichung auf jeden Fall erfüllt ist:

$$BigM > WTPart_{EP, MG, MT} \quad \forall EP, MG, MT$$

Zur Laufzeit der Optimierung muss berechnet werden, mit wie vielen parallelen Maschinen die betrachteten Bearbeitungsschritte durchgeführt werden.

Die Binärvariable  $NrMas_{MG, MT, Ma}$  hat den Wert „1“, wenn der Index  $Ma$  identisch der Anzahl der Maschinen vom Typ  $MT$  in der Maschinengruppe  $MG$  ist. Dies ist entweder bei genau einer Maschinenzahl  $Ma$  der Fall, oder wenn die Anzahl „0“ ist, da  $Ma$  bei eins beginnt. In diesem Fall muss die Summe über alle Maschinenindizes kleiner 1 sein.

$$\sum_{Ma} NrMas_{MG, MT, Ma} \leq 1 \quad \forall MG, MT$$

Diese Nebenbedingung legt fest, dass  $NrMas_{MG, MT, Ma} = 0$  für alle  $Ma$  gelten muss, für den Fall, dass keine Maschinen vorhanden sind.

$$NrMas_{MG, MT, Ma} \leq MaCon_{MG, MT} \quad \forall MG, MT, Ma$$

Wenn  $Ma$  Maschinen in der Maschinengruppe  $MG$  vom Typ  $MT$  vorhanden sind ( $MaCon_{MG, MT}$ ), so muss  $NrMas_{MG, MT, Ma}$  genau für dieses  $Ma$  den Wert „1“ annehmen und ansonsten den Wert „0“.

$$\sum_{Ma} Ma \cdot NrMas_{MG, MT, Ma} = MaCon_{MG, MT}$$

Alle Werte von  $WTMa_{EP, MG, MT, Ma}$  werden mit dieser Nebenbedingung auf „0“ gesetzt, wenn in der Maschinengruppe  $MG$  und dem jeweiligen Maschinentyp  $MT$  die Anzahl der vorhandenen Maschinen nicht gleich  $Ma$  ist.

$$WTMa_{EP, MG, MT, Ma} \leq BigM \cdot NrMas_{MG, MT, Ma} \quad \forall EP, MG, MT, Ma$$

Für  $NrMas_{MG, MT, Ma} = 0$  ist die nachfolgende Nebenbedingung irrelevant, da die rechte Seite der Ungleichung kleiner null ist und somit keine Einschränkung des Wertebereichs stattfindet. Wenn allerdings  $NrMas_{MG, MT, Ma} = 1$  gilt, wird der Wertebereich durch  $WTMa_{EP, MG, MT, Ma} \geq WTPart_{EP, MG, MT}$  auf den minimalen Wert von  $WTPart_{EP, MG, MT}$  beschränkt. Dies ist genau dann der Fall, wenn für diese Maschinengruppe und diesen Maschinentyp die Anzahl an Maschinen gleich  $Ma$  ist.

$$WTMa_{EP, MG, MT, Ma} \geq WTPart_{EP, MG, MT} - MigM \cdot (1 - NrMas_{MG, MT, Ma})$$

$$\forall EP, MG, MT, Ma$$

Der Wertebereich von  $WTMa_{EP, MG, MT, Ma}$  wird zusätzlich durch diese Ungleichung nach oben beschränkt. Im Kontext mit den beiden zuvor genannten Ungleichungen ist  $WTMa_{EP, MG, MT, Ma}$  für  $NrMas_{MG, MT, Ma} = 1$  auf den Wert von  $WTPart_{EP, MG, MT}$  festgelegt und sonst null.

$$WTMa_{EP, MG, MT, Ma} \leq WTPart_{EP, MG, MT} \quad \forall EP, MG, MT, Ma$$

Diese Nebenbedingung liefert mit  $CT_{EP, MG, MT}$  die Gruppenabgabezeit für den Maschinentyp  $MT$  der Maschinengruppe  $MG$  beim Endprodukt  $EP$ . Die Werte von  $WTMa_{EP, MG, MT, Ma}$  sind für alle  $Ma$  null, außer für den Fall, dass  $Ma$  identisch mit der Anzahl an Maschinen ( $>0$ ) ist.

$$CT_{EP, MG, MT} = \sum_{Ma} \frac{WTMa_{EP, MG, MT, Ma}}{Ma} \quad \forall EP, MG, MT$$

### Produktionstyp 1:

**Ohne weitere Nebenbedingungen für die Gruppenabgabezeiten** liegt ein eher theoretischer Produktionstyp vor. So müssten vor jeder Maschinengruppe **hinreichend große Zwischenlager** vorhanden sein, durch die jede Maschine der Maschinengruppe mit einem Werkstück beliefert wird, wenn sie mit der Bearbeitung eines anderen fertig ist. Zudem kann das Problem auftreten, dass eine Maschinengruppe während der gesamten

Periode Prozesse für ein Produkt ausführt, welche von den anderen Endprodukten nicht benötigt werden. Die anderen Endprodukte müssten gleichzeitig produziert und demnach an der betreffenden Maschinengruppe vorbei transportiert werden. Es würde somit eine **mixed-model-line** mit **völlig entkoppelten Maschinen** und sehr großen Zwischenlagern vorliegen. Dies ist ein Fall, der in der Großserienfertigung im Aggregatebau nahezu auszuschließen ist, da hier üblicherweise mehrere Produkte in Losen gefertigt werden (**multi-model-line**).

### Produktionstyp 2:

Um eine **realitätsnahe Fertigungsline** modellieren zu können, **müssen die Gruppenabgabezeiten betrachtet werden**. Für jedes Endprodukt ist die Taktzeit größer oder gleich der maximalen Gruppenabgabezeit für alle Maschinengruppen des jeweiligen Endproduktes. Nach jedem Taktzyklus kommt ein zu bearbeitendes Bauteil in eine Maschinengruppe und ein fertiges Bauteil verlässt die Maschinengruppe und wird zur nächsten Maschinengruppe transportiert.

Bei dem hier betrachteten Produktionstyp 2 wird die maximale Taktzeit für jedes Endprodukt  $MaxCycleTime_{EP}$  vom Produktionsplaner vor der Optimierung eingegeben.

Die maximale Gruppenabgabezeit für das Endprodukt  $EP$  darf in keiner Maschinengruppe und bei keinem Maschinentyp die vorgegebene Taktzeit für dieses Endprodukt überschreiten.

$$\sum_{MT} CT_{EP, MG, MT} \leq MaxCycleTime_{EP} \quad \forall EP, MG$$

Dadurch kann die gesamte Stückzahl des ersten Endproduktes mit dessen Taktzeit produziert werden, dann das zweite Endprodukt mit dessen Taktzeit und so weiter. Die Fertigung kann als **multi-model-line** betrieben werden.

### Produktionstyp 3:

Falls die Taktzeiten der Endprodukte nicht bekannt sind oder die Optimierung durch diese Nebenbedingung nicht eingeschränkt werden soll, kann eine variable Aufteilung der Taktzeit auf die Endprodukte während der Optimierung für die **multi-model-line** durchgeführt werden.

Der Wertebereich für die Variable  $CTEP_{EP}$  ist für jedes Endprodukt auf das Maximum der Gruppenabgabezeit aller Maschinengruppen beschränkt und somit die minimal mögliche Taktzeit für dieses Endprodukt.

$$CTEP_{EP} \geq CT_{EP, MG, MT} \quad \forall EP, MG, MT$$

Das Produkt  $CTEP_{EP} \cdot Demand_{EP}$  ist für jedes Endprodukt die Zeit, die benötigt wird, um die gesamte Stückzahl  $Demand_{EP}$  mit der minimalen Taktzeit  $CTEP_{EP}$  herzustellen. Hierzu ist eine Fertigung ohne Pausen und mit konstanter Taktzeit nötig. Die Nebenbedingung gewährleistet, dass die Fertigung aller Endprodukte der Reihe nach in der betrachteten Periode  $TTime$  durchgeführt werden kann.

$$\sum_{EP} CTEP_{EP} \cdot Demand_{EP} \leq TTime$$

#### Produktionstyp 4:

Um die Fertigungslinie als **mixed-model-line** zu betreiben, d.h. die Endprodukte ohne Zwischenlager in beliebiger Reihenfolge zu produzieren, muss die **Taktzeit für alle Endprodukte identisch und gleich der maximalen Gruppenabgabezeit aller Maschinengruppen bei allen Endprodukten** beziehungsweise der maximalen Taktzeit aller Endprodukte sein.

Nachfolgende Nebenbedingung gewährleistet, dass mit der maximalen Taktzeit die gesamten Stückzahlen der Endprodukte in der geplanten Periodendauer gefertigt werden können.

$$CTEP_{EP} \cdot \left( \sum_{EP} Demand_{EP} \right) \leq TTime \quad \forall EP$$

### 6.3 Kopplung der beiden Modelle

Das grundsätzliche Zusammenspiel der beiden Modelle wurde bereits unter Punkt 5 im konzeptionellen Aufbau für die Methodik zur Anpassungsplanung erläutert. Schwierigkeiten in der Zusammenführung der Modelle entstehen vor allem dadurch, dass sich das übergeordnete Modell zur **Programm- und Ressourcenplanung** auf relativ **frühe Konzeptphasen** bezieht, wohingegen im weiterführenden Planungsmodell zur **Ressourcen- und Prozessplanung** bereits sehr **detaillierte Informationen** bzgl. der Ressourcen und der herzustellenden Produkte vorliegen müssen. Dies drückt sich unter anderem in den erforderlichen Eingabeparametern aus.

So wird z.B. auf der Programm- und Ressourcenplanungsebene die Kapazität  $Capa$  einer Fertigungslinie für eine Periode in herstellbaren Einheiten angegeben. Werden mehrere verschiedene Produkte auf einer Linie gefertigt, so besteht die Möglichkeit, für jedes Produkt einen eigenen Kapazitätsnutzungsfaktor  $CapaDem_{Pr}$  einzugeben, wobei dasjenige Produkt mit dem Faktor „1“ als Referenzprodukt angesehen wird. Von diesem

Produkt könnten also tatsächlich *Capa* Einheiten in einer Periode gefertigt werden. Bei nur einem Produkt gilt für die Anzahl an herstellbaren Einheiten *Pro*:

$$\frac{Capa}{CapaDem} \geq Pro$$

Bei mehreren Produkten gilt folgender Zusammenhang:

$$Capa \geq CapaDem_{Pr1} \cdot Pro_{Pr1} + CapaDem_{Pr2} \cdot Pro_{Pr2} + \dots + CapaDem_{Prn} \cdot Pro_{Prn}$$

Im Planungsmodell zur Ressourcen- und Prozessplanung werden zwar auch die nachgefragten Einheiten für jedes Produkt in Stück angegeben, jedoch wird keine konkrete Kapazitätsangabe mehr gefordert. An dieser Stelle ist lediglich noch die zur Verfügung stehende Zeit *TTime* für die Planungsperiode einzugeben. Innerhalb dieser Zeit sind sämtliche Produkte in ihren Nachfragestückzahlen *Demand* herzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Durchführung der einzelnen Prozesse ebenso in Zeitspannen angegeben wird. Am Ende darf also innerhalb keiner Station die Gesamtzeit *TTime* zur Abarbeitung sämtlicher zugewiesener Prozesse, summiert über alle Produkte, überschritten werden. Bei nur einem Produkt gilt:

$$\frac{TTime}{CTEP} \geq Demand$$

Bei mehreren Produkten gilt hingegen:

$$TTime \geq CTEP_{Pr1} \cdot Demand_{Pr1} + CTEP_{Pr2} \cdot Demand_{Pr2} + \dots + CTEP_{Prn} \cdot Demand_{Prn}$$

*CTEP<sub>Pr</sub>* steht dabei für die Taktzeit eines Produktes. Wie bereits erwähnt, kann stets davon ausgegangen werden, dass eine Fertigung im großseriellen Aggregatebau losweise abläuft. Dies bedeutet, dass jedes Produkt mit seiner Taktzeit und Nachfragestückzahl getrennt hergestellt wird (Kapitel 6.2.4: Produktionstypen 2 und 3), oder aber dass sie gemischt über die Linie laufen, dann jedoch in einer Einheitstaktzeit (Produktionstyp 4). Obige Gleichung ist für diese drei Produktionstypen ohne Einschränkung gültig. Da für **Produktionstyp 1** aufgrund der „chaotischen“ Fertigungsstrategie **keine Taktzeit** festgestellt werden kann, ist auch **eine Kopplung an das übergeordnete Modell zur Programm- und Ressourcenplanung nicht möglich**.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass die beiden Werte *Pro* und *Demand* in den genannten Gleichungen praktisch synonym laufen für die herstellbare Menge an Einzelprodukten. Somit können die beiden restlichen Terme ebenfalls gleichgesetzt werden:

$$\frac{Capa}{CapaDem} = \frac{TTime}{CTEP}$$

Des Weiteren treten die beiden Werte  $Capa$  und  $TTime$  in den obigen Gleichungen gewissermaßen als „Kapazität“ auf, so dass die beiden Faktoren  $CapaDem$  und  $CTEP$  jeweils als Maß der Kapazitätsbeanspruchung angesehen werden können. Zur Kopplung der beiden Modelle müssen diese beiden Faktoren entweder vorhanden sein oder bestimmt werden können.

## 7 Validierung der Modelle an einem Beispiel

Im folgenden Abschnitt der vorliegenden Arbeit werden die erstellten Modelle anhand eines Beispielfalls validiert.

### 7.1 Produkt und Marktverhalten als Planungsgrundlage

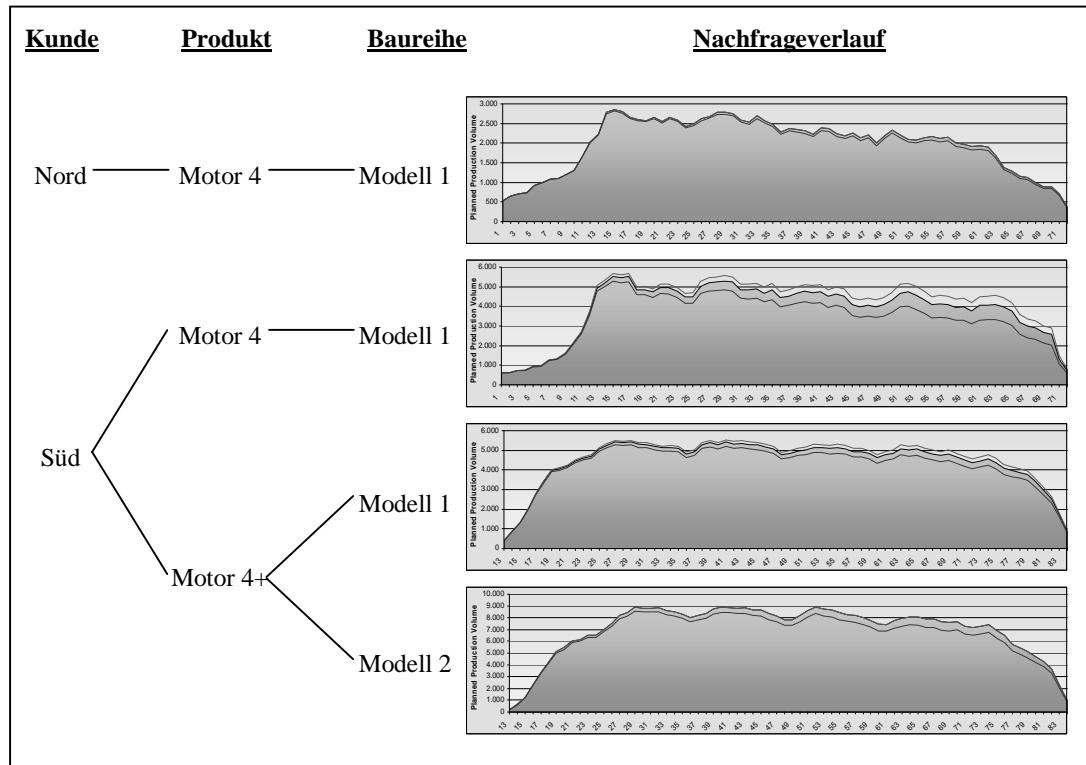
In dem zu bearbeitenden Beispielfall geht es um die Fertigung **zweier Motorvarianten**.

Grundsätzlich handelt es sich dabei um einen 4-Zylinder-Ottomotor in einer Basisversion (**Motor 4**), der durch weitere Anbauteile und Bearbeitungsschritte zusätzlich in einer leistungsgesteigerten Variante (**Motor 4+**) am Markt angeboten werden soll. Zunächst soll am Markt lediglich die Basisversion erscheinen und zeitversetzt um ein Jahr die leistungsgesteigerte Version.

Die Motorvarianten sind **für zwei Fahrzeugbaureihen** konstruiert worden, **Modell 1** und **Modell 2**, wobei die Basisvariante lediglich in Modell 1 zum Einsatz kommt und die leistungsgesteigerte **vermutlich in beiden Modellen**.

Hinsichtlich der Kunden kann festgehalten werden, dass Modell 1 an **zwei Standorten** montiert wird, **Süd** und **Nord**, Modell 2 jedoch nur am Standort Süd. Dies hat zur Folge, dass die Motoren, die aus politischen Gründen nur an einem Standort **in der Nähe von Süd** gefertigt werden, zum Teil auch eine größere Strecke zu überwinden haben und somit die Logistikkosten zum Tragen kommen könnten.

In Abbildung 7-1 ist der grundsätzliche Zusammenhang von internen Kunden, Produkten und Modellen anschaulich dargestellt. Ebenso ist jeder Baureihe, in der das jeweilige Endprodukt verbaut wird, der zugehörige Nachfrageverlauf zugeordnet.



**Abbildung 7-1:** Konstellation von Kunde, Produkt und Baureihe

Es ist erkennbar, dass das größere Produktionsvolumen auf die Variante 4+ entfällt und dass merkliche Unterschiede in den Unsicherheitskorridoren bestehen. Eine genauere Aufstellung der Werte findet sich in Abbildung 7-2.

Kunde	Produkt	Baureihe	Kammlinie [Stck / Monat]	Unsicherheitskorridor [%] von	bis	Auftretenswahr- scheinlichkeit [%]
Nord	Motor 4	Modell 1	2.600	-5,0	0,0	100
Süd	Motor 4	Modell 1	5.000	-21,3	13,5	100
Süd	Motor 4+	Modell 1	5.200	-8,3	5,0	80
Süd	Motor 4+	Modell 2	8.800	-10,8	0,0	100

**Abbildung 7-2:** Kammlinien und Unsicherheitskorridore der Konstellationen

Auffällig ist hierbei, dass **überwiegend mit schlechteren Verkaufszahlen** gerechnet wird als vom Vertrieb prognostiziert, was an den eher negativ tendierenden Korridoren erkennbar ist. Dies ist zurückzuführen auf oft zu optimistische Verkaufseinschätzungen in der Vergangenheit.

Die Stückzahlverläufe werden für das Modell der Programm- und Ressourcenplanung entsprechend übernommen und die in der Tabelle angegebenen Extremwerte der Unsi-

cherheitskorridore über der **Laufzeit von 84 Monatsperioden** als konstant zunehmend bzw. abfallend betrachtet. So fällt etwa für Motorvariante 4+ und Modell 2, deren Nachfrageverlauf in Monat 13 beginnt und in Monat 84 endet, die untere Begrenzungslinie des Unsicherheitskorridors pro Monat um 0,13 % und beginnt bereits in Monat 13 bei -1,56%.

Generell werden für jede der 4 Konstellationen in Abbildung 7-1 **drei Marktszenarien** erzeugt. Eines repräsentiert dabei das Planszenario des Vertriebs mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 50%, die anderen beiden mit jeweils etwa 25% Wahrscheinlichkeit bilden die äußereren Begrenzungslinien des jeweiligen Unsicherheitskorridors.

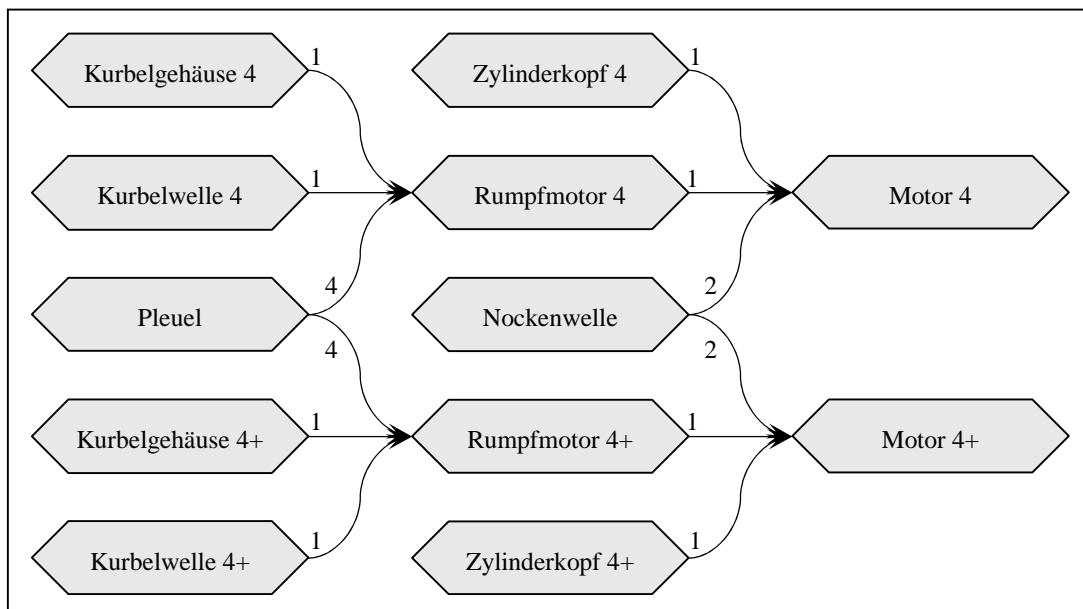
Wichtig zu erwähnen ist, dass politisch noch nicht ganz entschieden wurde, ob Modell 1, das kleiner ist als Modell 2, mit der leistungsgesteigerten Motorvariante 4+ ausgestattet wird. Aus diesem Grund ist Konstellation drei lediglich mit einer **Auftretenswahrscheinlichkeit von 80%** versehen. Dies führt dazu, dass für diese eine Konstellation nicht nur drei Szenarien erzeugt werden, sondern zusätzlich ein vierter, in dem die Produktnachfrage „0“ ist. Insgesamt ergeben sich also durch die volle Kombination aller gebildeten Einzelszenarien 108 Marktszenarien ( $3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 = 108$ ). Da jedoch zwei der acht Korridor-Begrenzungswerte aus Abbildung 7-2 gleich „0“ sind, liegen das Planszenario und die jeweilige Begrenzungslinie aufeinander. Dies führt dazu, dass bei der Kombination der Einzelszenarien einige gleich sein werden. Insgesamt werden also **48** ( $2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 2 = 48$ ) **unterschiedliche Marktszenarien generiert und optimiert**.

## 7.2 Produkt und zu bewertende Fertigungskonzepte im Kontext

Die beiden neuen Motorvarianten sollen zu einem Zeitpunkt auf den Markt kommen, an dem bereits über weitaus innovativeren und umweltschonenderen Motortechnologie nachgedacht wird. Die durchgeführten Modifizierungen am bisher gefertigten Motor sind jedoch aus gesetzlichen Änderungen heraus und die damit in Kraft tretende neue Abgasnorm zwingend erforderlich. Zusätzlich soll eine Absenkung des Treibstoffverbrauchs um etwa 13% die Abwanderung von Kunden zur Konkurrenz verhindern, die ebenfalls mit neuen Motoren am Markt auftritt und wirbt. Somit handelt es sich bei den beiden neuen Varianten lediglich um „Übergangsmotoren“. Diese Tatsache eröffnet der **Fertigungsplanung** vornehmlich **zwei Alternativen**, auf die später näher eingegangen wird. Insgesamt müssen **sieben Linien** neu beplant werden. Dies sind jeweils Produktionslinien für **Kurbelgehäuse (KGH)**, **Zylinderkopf (ZK)**, **Kurbelwelle (KW)**, **Nockenwelle (NW)** und **Pleuel (PL)**, also für die „fünf C's eines Motors“, sowie die **Endmontage (EMO)** und die **Rumpfmontage (RMO)**, in der Kurbelgehäuse, Kurbelwelle und Pleuel vormontiert werden. Die spanende **Fertigung der Vorgängermotoren** basierte durchgehend auf **hybriden Fertigungssystemen**, d.h. in jeder vorhandenen Linie sind starre Elemente, also Transfermaschinen, enthalten genauso wie flexible E-

lemente in Form von Bearbeitungszentren. Die Montagelinien wurden nach dem damaligen Stand der Technik aufgebaut, wobei die Rumpfmontage aus Teilen der vorherigen Linie zusammengesetzt wurde. Hier ist es also nicht möglich, Elemente weiter zu verwenden. Lediglich die **Endmontagelinie** kann zum Teil weiter verwendet werden, was zu einer stark reduzierten Investitionssumme führen würde. Gleiches gilt für die Fertigungsline der **Kurbelgehäuse**. Die Linien für Zylinderkopf, Kurbelwelle, Nockenwelle und Pleuel müssen hingegen in jedem Fall komplett neu installiert werden.

Aus der in Abbildung 7-3 dargestellten **Stücklistenstruktur** ist erkennbar, dass die Pleuel und Nockenwellen ohne Bildung zusätzlicher Varianten in beide Motorvarianten eingebaut werden. Für alle anderen Komponenten existieren jeweils zwei Varianten.



**Abbildung 7-3:** Darstellung der Stücklistenstruktur

Es muss noch erwähnt werden, dass es Bestandteil der geltenden Produktionsvorgaben ist, **keine Bestände zwischen oder in den Linien** aufzubauen. Lagerhaltung ist also in dem betrachteten Beispielfall nicht erlaubt, was dazu führt, dass **fehlende Kapazitäten mit Lieferungen von externen Herstellern** ausgeglichen werden müssen. Da komplettete **Motoren nicht von extern** bezogen werden sollen, sind die Rohteile für die entsprechende Komponente direkt von der jeweiligen Fertigungsline an den externen Produzenten zu liefern. Dort findet die Bearbeitung statt und die fertig gestellten Motorkomponenten sind nach dem Rücktransport auf Einhaltung der Qualitätsvorgaben hin zu untersuchen. Dies verursacht bei den Komponenten Zylinderkopf und Kurbelgehäuse **extrem hohe Kosten zur Qualitätssicherung**, was sich im entsprechenden Kostensatz für diese Bauteile widerspiegelt. Die übrigen mechanisch gefertigten Bauteile lassen sich leichter überprüfen. Die Montage kann generell nicht ausgelagert werden (in

Abbildung 7-4 grau hinterlegt). Somit ist jeder Motor unternehmensintern zu montieren, was es bei diesen Produkten erforderlich macht, unverhältnismäßig hohe „**Fremdbezugskosten**“ einzuführen. Die Optimierung wird also keinesfalls diese Option nutzen, sondern dafür sorgen, dass immer eigene Kapazitäten in den Montagelinien bereitgestellt werden.

Produkt	Kosten für Fremdbezug, Logistik und Disposition sowie Qualitätssicherung [€]
Motor 4	1.000.000
Motor 4+	1.000.000
NW	400
KW 4	550
PL	500
KGH 4	1.400
ZK 4	1.220
RMO 4	1.000.000
KW 4+	600
KGH 4+	1.500
ZK 4+	1.300
RMO 4+	1.000.000

**Abbildung 7-4:** Gesamtkosten pro Bauteil für den Bezug der Fertigungsleistung von externen Lieferanten

### 7.2.1 Hybrides Fertigungssystem

**Eine der beiden Alternativen**, vor denen die Planer nun stehen, ist, die **weiter verwendbaren Maschinenelemente aus den bisherigen Linien für die Endmontage und die Kurbelgehäuse** mit einzuplanen und **wiederum** durchgängig für die jetzt zu beplanenden Produktionsanlagen auf **hybride Fertigungslinien** zu setzen.

Dies würde sich vor allem deshalb anbieten, weil es sich lediglich um eine Motorgeneration handelt, die die Lücke bis zur Markteinführung einer konstruktiv erheblich verbesserten Motorgeneration schließen soll. Zusätzlich ist absehbar, dass die **Anforderungen aus der nachfolgenden Motorgeneration deutlich höher** sein werden als dies heute der Fall ist. Entsprechende Fertigungstechnik ist derzeit noch relativ teuer, wird jedoch **innerhalb der zweiten denkbaren Alternative** bereits für das zu beplanende Fertigungssystem eingesetzt, um die nachfolgende Motorgeneration ebenfalls darauf fertigen zu können und bereits heute mit der Fertigungstechnologie Erfahrung sammeln bzw. einen Wissens- und Verfahrensvorsprung vor der Konkurrenz erringen zu können. Insgesamt wird also mit dem **zweiten Fertigungskonzept eine weitaus flexiblere Variante** beplant.

Das neue **hybride System** ist vor allem dadurch gekennzeichnet, dass die **technischen Kapazitäten von Beginn an installiert** werden. Dies bedeutet, dass die jeweiligen Fer-

tigungslinien lediglich **aus einem technischen Anpassungszustand** bestehen und **ausgeschließlich durch organisatorische Maßnahmen auf Marktveränderungen reagieren** können. Der Umstand, dass die **Endmontage** und die **Kurbelgehäusefertigung** weitestgehend erhalten bleiben, führt dazu, dass für diese beiden Linien die **bisher geltende Betriebsvereinbarung hinsichtlich Wochenendarbeit** gilt. Diese besagt, dass grundsätzlich die Einführung einer zusätzlichen 16. und 17. Schicht am Samstag kein Problem darstellt. Die jetzt geltende, und damit für alle **neu installierten Fertigungslinien greifende Vereinbarung** besagt, dass lediglich noch auf eine 16. Schicht ausgewichen werden kann. Generell gilt, dass für eine 16. Schicht ein **Wochenendzuschlag** von 30% zu zahlen ist und für eine 17. Schicht ein Zuschlag von 50%. Ein Mannjahr wird inklusive aller Umlagen und Nebenkosten mit 118 T€ veranschlagt.

Hinsichtlich der Fertigung der Komponenten auf den Linien kann bemerkt werden, dass, sollten zwei Varianten wie z.B. bei den Zylinderköpfen (Zylinderkopf 4 und Zylinderkopf 4+) gefertigt werden müssen, beide Varianten über die gleiche Linie laufen sollen, wobei ein **individueller Takt und Losfertigung** zugrunde gelegt wird.

Die Anpassungsmöglichkeiten der Fertigungslinien führen zu den in Abbildung 7-5 dargestellten **diskreten Kapazitätsstufen** in ganzen Einheiten.

		Fertigungslinien						
Techn. Zustand	Organ. Zustand	Endmontage	Nockenwelle	Kurbelwelle	Pleuel	Kurbelgehäuse	Zylinderkopf	Rumpfmotor
1	1	7.200	15.000	8.100	30.000	7.000	7.400	7.500
1	2	14.400	30.000	16.200	60.000	14.000	14.800	15.000
1	3	21.600	45.000	24.300	90.000	21.000	22.200	22.500
1	4	23.040	48.000	25.920	96.000	22.400	23.680	24.000
1	5	24.480				23.800		

**Abbildung 7-5:** Diskrete Kapazitätsstufen der Linien des hybriden Fertigungssystems

In diesem Zusammenhang ebenso wichtig sind die **Kapazitätsnutzungsfaktoren** der jeweiligen Linien bei Fertigung des entsprechenden Produktes. Auffällig ist hier, dass sich sämtliche Varianten des leistungsstärkeren Motors nur mit einem zusätzlichen Aufwand zwischen einem und sechs Prozent fertigen oder montieren lassen, was auf eine höhere Taktzeit zurückzuführen ist. Zur Bestimmung der Kapazitätsnutzungsfaktoren dienen die Fertigungszeiten für die Komponenten des Basismotors als Grundlage.

Fertigungslien	Techn. Zustand	Produkte											
		Motor 4	Motor 4+	NW	KW 4	PL	KGH 4	ZK 4	RMO 4	KW 4+	KGH 4+	ZK 4+	RMO 4+
Endmontage	1	1,00	1,04										
Nockenwelle	1			1,00									
Kurbelwelle	1				1,00						1,02		
Pleuel	1					1,00							
Kurbelgehäuse	1						1,00					1,06	
Zylinderkopf	1							1,00					1,01
Rumpfmotor	1								1,00				1,04

**Abbildung 7-6:** Die Kapazitätsnutzungsfaktoren des hybriden Fertigungssystems

Nachfolgend wird eine Übersicht gegeben, mit welchen Kostensätzen und Investitionssummen gerechnet wird.

Zunächst werden die **technischen Betriebskosten** gebildet aus der für die jeweilige Linie benötigten Hallenfläche und dem geltenden Flächenkostensatz von 8 € pro m<sup>2</sup> und Monat. Der Flächenbedarf ist nachfolgend in der Einheit [m<sup>2</sup>] dargestellt:

Techn. Zustand	Fertigungslien						
	Endmontage	Nockenwelle	Kurbelwelle	Pleuel	Kurbelgehäuse	Zylinderkopf	Rumpfmotor
1	2.900	3.225	4.200	830	4.400	3.700	1.600

**Abbildung 7-7:** Flächenbedarf der Fertigungslien des hybriden Systems

**Stückzahlvariable Kosten** werden nicht betrachtet, weder auf der technischen noch auf der organisatorischen Seite.

**Technische Wechselkosten** treten bei dem hybriden Fertigungssystem nicht auf, jedoch werden auch die **Erstinvestitionen** in die entsprechende Tabelle eingetragen, da auch diese einen gewissen „Wechsel“ von Stufe „0“ auf „1“ darstellen. Sie sind in Abbildung 7-8 gezeigt. Anzumerken ist, dass die Endmontagelinie mit einem Erstinvest von 5,25 Mio € verhältnismäßig günstig ist, was auf den relativ niedrigen Automatisierungsgrad einerseits und die Weiterverwendung von Elementen aus der Vorgängerlinie andererseits zurückzuführen ist. Ein kompletter Neuinvest hätte hier eine Summe von 9,25 Mio € bedeutet. Drastischer ist das Bild bei der Linie für die Kurbelgehäusefertigung. Hier werden Kosten von 18 Mio € veranschlagt statt 45 Mio € für eine komplett neue Linie. Somit ergäbe sich eine Einsparung von 31 Mio € durch die Nutzung bereits vorhandener Betriebsmittel.

Fertigungslien	Techn. Zustand	Techn. Zustand	
		0	1
Endmontage	0	0	5.250.000
Endmontage	1	0	0
Nockenwelle	0	0	17.500.000
Nockenwelle	1	0	0
Kurbelwelle	0	0	21.900.000
Kurbelwelle	1	0	0
Pleuel	0	0	9.100.000
Pleuel	1	0	0
Kurbelgehäuse	0	0	18.000.000
Kurbelgehäuse	1	0	0
Zylinderkopf	0	0	25.000.000
Zylinderkopf	1	0	0
Rumpfmotor	0	0	15.850.000
Rumpfmotor	1	0	0

**Abbildung 7-8:** Wechselkosten bzw. die Erstinvestitionen des hybriden Systems

**Organisatorische Fixkosten** bilden sich durch den Personalkostensatz von 118 T€ pro Mannjahr und der in der jeweiligen Linie stehenden Anzahl an Arbeitskräften. Diese sind in nachfolgender Tabelle inklusive aller direkten und indirekten Arbeitskräfte in Abhängigkeit vom organisatorischen Ausbauzustand aufgeführt. Die **Zustände eins bis drei** repräsentieren die **Anzahl an Schichten über einen Arbeitstag**, die **Zustände vier und fünf** stehen für **zusätzliche Samstagsschichten**, wobei eine zweite Samstagsschicht nur für die Endmontage und die Kurbelgehäusefertigung zulässig ist, sofern diese bereits in 15 Wochenschichten betrieben werden.

Fertigungslien	Techn. Zustand	Organ. Zustand				
		1	2	3	4	5
Endmontage	1	180	360	540	585	630
Nockenwelle	1	24	48	72	81	
Kurbelwelle	1	30	60	90	99	
Pleuel	1	12	24	36	42	
Kurbelgehäuse	1	42	84	126	144	162
Zylinderkopf	1	33	66	99	108	
Rumpfmotor	1	48	96	144	162	

**Abbildung 7-9:** Anzahl der Arbeitskräfte für jede Linie und alle vorhandenen organisatorischen Anpassungsmöglichkeiten

**Organisatorische Wechselkosten** ergeben sich, wenn der Schichtbetrieb verändert oder Samstagsschichten eingeführt oder gestrichen werden. In einem solchen Fall er-

rechnen sie sich aus den jeweils neu in die Linien kommenden bzw. freigestellten Arbeitkräften. Der Kostensatz zum Aufbau einer Arbeitskraft beträgt 3,3 T€ bedingt durch Einarbeitung und Schulungen, ein Abbau wird mit durchschnittlich 10 T€ angenommen.

**Interne Transportkosten** fallen für das komplette Fertigungssystem nicht an, da sämtliche Komponenten an einem Standort gefertigt werden. Lediglich **Transportkosten zu den Kunden „Werk Süd“ und „Werk Nord“** werden hier wirksam. Die Logistikkosten für den Transport eines Motors zum Werk Süd belaufen sich auf einen Euro, zum Werk Nord auf sieben Euro.

### 7.2.2 Flexibles Fertigungssystem

**Gleiche Kostensätze** hinsichtlich der **Transporte** gelten auch bei dem flexiblen System. Jedoch ist dieses von Grund auf verschieden zum hybriden System aufgebaut.

Zunächst einmal werden hier aufgrund **ausreichender Erweiterungsflexibilität** der verwendeten Fertigungstechnik **nicht sämtliche Fertigungslinien mit nur einer technischen Kapazitätsstufe ausgestattet**. So werden die Linien für die Nocken- und Kurbelwellen sowie der Kurbelgehäuse aus zwei technischen Anpassungsstufen bestehen, die der Pleuel aus drei, wobei die Nockenwellenlinie und die der Pleuel aus jeweils identischen Fertigungsmodulen bestehen, die parallel fertigen. Die anderen beiden Linien werden bei Bedarf lediglich mit zusätzlicher Fertigungstechnik ausgestattet, was bedeutet, dass hier zunächst ein Großteil der Kapazitäten installiert wird, und später die unter Umständen auftretenden Engpässe durch Zustellen von Maschinen beseitigt werden können. Die Linien für **Endmontage** und **Kurbelgehäuse** werden in diesem Fall **komplett neu installiert**, was – wie ausgeführt – bei dem hybriden System zu einem Mehraufwand im Erstinvest von 31 Mio € führen würde. In Bezug auf die KGH stellt dies ohnehin eine unumgängliche Maßnahme dar, da hier die neue Fertigungstechnik, die für das KGH der nachfolgenden Motorgeneration benötigt wird, zum Tragen kommen muss und somit die bereits in Gebrauch befindlichen Einheiten der Vorgängerlinie nicht mehr verwendbar sind. Insgesamt wird für die spanende Fertigung mit **hochmoderner Produktionstechnik**, basierend auf **flexiblen Bearbeitungszentren**, geplant, weshalb in diesem Zusammenhang auch die Endmontage stärker automatisiert und damit komplett neu installiert würde.

Die Tätigkeiten bei der **Rumpfmontage** sind überwiegend einfacher Natur, weshalb hier mit sehr **vergleichbarer Technik und Organisation** gegenüber der Linie im Hybridsystem geplant wird.

Auch beim flexiblen Fertigungssystem greift die **neue Betriebsvereinbarung**, dass neue Linien nur bis maximal 16 Schichten pro Woche betrieben werden dürfen, wodurch zwar der Zuschlag für die 17. Schicht von 50% hinfällig wird, jedoch auch die

Reaktionsmöglichkeiten auf Marktschwankungen aus Sicht der Organisation eingeschränkt werden.

Ansonsten sind auch beim flexiblen System beide Varianten einer Motorkomponente auf einer Linie zu fertigen, also **in Losen und individuell getaktet** nach dem jeweiligen Produkt.

Die **Kapazitätsstufen** des flexiblen Systems sind in Abbildung 7-10 aufgezeigt, wobei im Vergleich zum hybriden System auffällt, dass in jeder Linie bezogen auf den jeweils höchsten Ausbauzustand bis zu 12% geringere Kapazitäten installiert werden.

		Fertigungslinien						
Techn. Zustand	Organ. Zustand	End-montage	Nocken-welle	Kurbel-welle	Pleuel	Kurbel-gehäuse	Zylinder-kopf	Rumpf-motor
1	1	7.300	7.400	6.000	10.000	5.000	7.150	7.500
1	2	14.600	14.800	12.000	20.000	10.000	14.300	15.000
1	3	21.900	22.200	18.000	30.000	15.000	21.450	22.500
1	4	23.360	23.680	19.200	32.000	16.000	22.880	24.000
2	1		14.800	7.100	20.000	7.300		
2	2		29.600	14.200	40.000	14.600		
2	3		44.400	21.300	60.000	21.900		
2	4		47.360	22.720	64.000	23.360		
3	1				30.000			
3	2				60.000			
3	3				90.000			
3	4				96.000			

**Abbildung 7-10:** Diskrete Kapazitätsstufen der Linien des flexiblen Fertigungssystems

Die **Kapazitätsnutzungsfaktoren** lassen auch hier überwiegend den Mehraufwand zur Produktion der Komponenten des leistungsstärkeren Motors erkennen, jedoch schlägt sich die **höhere Flexibilität** in einem tendenziell **geringeren Mehraufwand** nieder als beim hybriden Fertigungssystem.

Fertigungslien	Techn. Zustand	Produkte											
		Motor 4	Motor 4+	NW	KW 4	PL	KGH 4	ZK 4	RMO 4	KW 4+	KGH 4+	ZK 4+	RMO 4+
Endmontage	1	1,00	1,04										
Nockenwelle	1			1,00									
Nockenwelle	2			1,00									
Kurbelwelle	1				1,00						0,99		
Kurbelwelle	2				1,00						0,99		
Pleuel	1					1,00							
Pleuel	2					1,00							
Pleuel	3					1,00							
Kurbelgehäuse	1						1,00					1,04	
Kurbelgehäuse	2						1,00					1,04	
Zylinderkopf	1							1,00				1,03	
Rumpfmotor	1								1,00				1,00

**Abbildung 7-11:** Die Kapazitätsnutzungsfaktoren des flexiblen Fertigungssystems

Die Tatsache, dass die Linien des flexiblen Systems teilweise mehrere technische Ausbauzustände haben, wirkt sich auch auf die **technischen Fixkosten** aus. Der Flächenkostensatz von 8 € pro m<sup>2</sup> und Monat bleibt erhalten, jedoch ändert sich der Flächenbedarf, wie nachfolgend dargestellt.

Techn. Zustand	Fertigungslien						
	Endmontage	Nockenwelle	Kurbelwelle	Pleuel	Kurbelgehäuse	Zylinderkopf	Rumpfmotor
1	2.900	2.000	5.130	400	4.410	5.000	1.800
2		4.000	5.400	800	6.300		
3				1.200			

**Abbildung 7-12:** Flächenbedarf der Fertigungslien des flexiblen Systems in [m<sup>2</sup>]

Bei einem Vergleich mit dem hybriden System kann festgestellt werden, dass lediglich die Montagelinien den gleichen Platzbedarf haben, sonst jedoch aufgrund des Aufbaus der Linien auf flexiblen Bearbeitungszentren deutlich mehr Platz in Anspruch genommen wird. Der Mehrbedarf bewegt sich im Bereich zwischen 24% und 44,6%, wobei erwartungsgemäß die Rumpfmontage noch eine kleine Ausnahme bildet mit lediglich 12,5% aufgrund der nur geringen Unterschiede zur Linie im hybriden System.

Gleichsam werden auch beim flexiblen System keinerlei **stückzahlvariable Kosten** betrachtet, die **technischen Wechselkosten** bzw. **Erstinvestitionen** gestalten sich wie

in

Fertigungslinien	Techn. Zustand	Techn. Zustand			
		0	1	2	3
Endmontage	0	0	15.500.000		
Endmontage	1	0	0		
Nockenwelle	0	0	14.000.000	28.000.000	
Nockenwelle	1	0	0	15.000.000	
Nockenwelle	2	0	0	0	
Kurbelwelle	0	0	25.500.000	28.700.000	
Kurbelwelle	1	0	0	3.900.000	
Kurbelwelle	2	0	0	0	
Pleuel	0	0	4.900.000	9.600.000	14.400.000
Pleuel	1	0	0	4.950.000	9.900.000
Pleuel	2	0	0	0	4.950.000
Pleuel	3	0	0	0	0
Kurbelgehäuse	0	0	45.600.000	59.000.000	
Kurbelgehäuse	1	0	0	14.000.000	
Kurbelgehäuse	2	0	0	0	
Zylinderkopf	0	0	40.000.000		
Zylinderkopf	1	0	0		
Rumpfmotor	0	0	15.850.000		
Rumpfmotor	1	0	0		

Abbildung 7-13 gezeigt. Werden die Investitionen für die höchsten technischen Ausbaustufen der Linien der beiden Fertigungssysteme in Beziehung gesetzt, so wird ersichtlich, dass beim flexiblen System diesbezüglich Mehraufwendungen zwischen 31,3% bis 60% in Kauf genommen werden müssten. Noch deutlicher ist der Unterschied bei den Linien für die Kurbelgehäuse und die Endmontage, da dort jeweils Elemente aus den Altsystemen in die zu beplanenden Linien des hybriden Systems übernommen werden. Hier ergibt sich ein prozentualer Mehraufwand von um die 200%.

Fertigungslien	Techn. Zustand	Techn. Zustand			
		0	1	2	3
Endmontage	0	0	15.500.000		
Endmontage	1	0	0		
Nockenwelle	0	0	14.000.000	28.000.000	
Nockenwelle	1	0	0	15.000.000	
Nockenwelle	2	0	0	0	
Kurbelwelle	0	0	25.500.000	28.700.000	
Kurbelwelle	1	0	0	3.900.000	
Kurbelwelle	2	0	0	0	
Pleuel	0	0	4.900.000	9.600.000	14.400.000
Pleuel	1	0	0	4.950.000	9.900.000
Pleuel	2	0	0	0	4.950.000
Pleuel	3	0	0	0	0
Kurbelgehäuse	0	0	45.600.000	59.000.000	
Kurbelgehäuse	1	0	0	14.000.000	
Kurbelgehäuse	2	0	0	0	
Zylinderkopf	0	0	40.000.000		
Zylinderkopf	1	0	0		
Rumpfmotor	0	0	15.850.000		
Rumpfmotor	1	0	0		

Abbildung 7-13: Wechselkosten bzw. die Erstinvestitionen des flexiblen Systems

Für die **organisatorischen Fixkosten** ist wiederum der genannte Personalkostensatz von 118 T€ pro Mannjahr maßgeblich. Die Zustände 1 bis 3 stehen für die Anzahl an Tagesschichten, der 4. Zustand für eine zusätzliche Samstagsschicht. Die benötigten Arbeitskräfte sind für jede Linie in Abhängigkeit vom Ausbauszustand nachfolgend aufgeführt. Dabei ergibt sich bei einem Vergleich mit dem hybriden System ein gemischtes Bild. Wird jeweils der dritte organisatorische Ausbauzustand, also der 3-Schicht-Betrieb mit insgesamt 15 Wochenschichten, in Kombination mit dem höchsten technischen Zustand als Vergleichswert herangezogen, so sind in der flexiblen Endmontage 162 Arbeitskräfte weniger als in dem hybriden System beschäftigt, in der Kurbelwellenlinie neun und in der KGH-Linie 18 Arbeitskräfte weniger. Die Linie für die Nockenwellen und die Rumpfmotoren beschäftigen exakt gleich viele Arbeitskräfte und die Linie für Pleuel und Zylinderköpfe beschäftigen 18 bzw. 45 mehr. Per Saldo ergibt sich eine Personaleinsparung gegenüber dem hybriden System von 126 Arbeitskräften.

Fertigungslien	Techn. Zustand	Organ. Zustand			
		1	2	3	4
Endmontage	1	126	252	378	405
Nockenwelle	1	12	24	36	39
Nockenwelle	2	24	48	72	78
Kurbelwelle	1	24	48	72	78
Kurbelwelle	2	27	54	81	87
Pleuel	1	6	9	18	21
Pleuel	2	12	24	36	39
Pleuel	3	18	36	54	60
Kurbelgehäuse	1	27	54	81	87
Kurbelgehäuse	2	36	72	108	117
Zylinderkopf	1	48	96	144	162
Rumpfmotor	1	48	96	144	162

**Abbildung 7-14:** Anzahl der Arbeitskräfte für jede Linie und alle vorhandenen technischen Anpassungsstufen

Die Kostensätze sowie die Berechnungsweise für Personalauf- und -abbau werden analog zum hybriden System berücksichtigt.

Insgesamt über alle Kostenfaktoren betrachtet wären also **vorteilig beim flexiblen System Personaleinsparungen** von 126 Arbeitskräften, **nachteilig jedoch hohe Mehrausgaben für Fläche und Investitionen bzw. Systemveränderungen** gegenüber dem hybriden System zu verbuchen. Wird die Investitionsentscheidung ausschließlich auf Basis der Erstinvestitionen getätigt, was in weiten Teilen der Industrie praktiziert wird, so wird das in dieser Hinsicht deutlich günstigere Hybridsystem dem teureren flexiblen System vorgezogen.

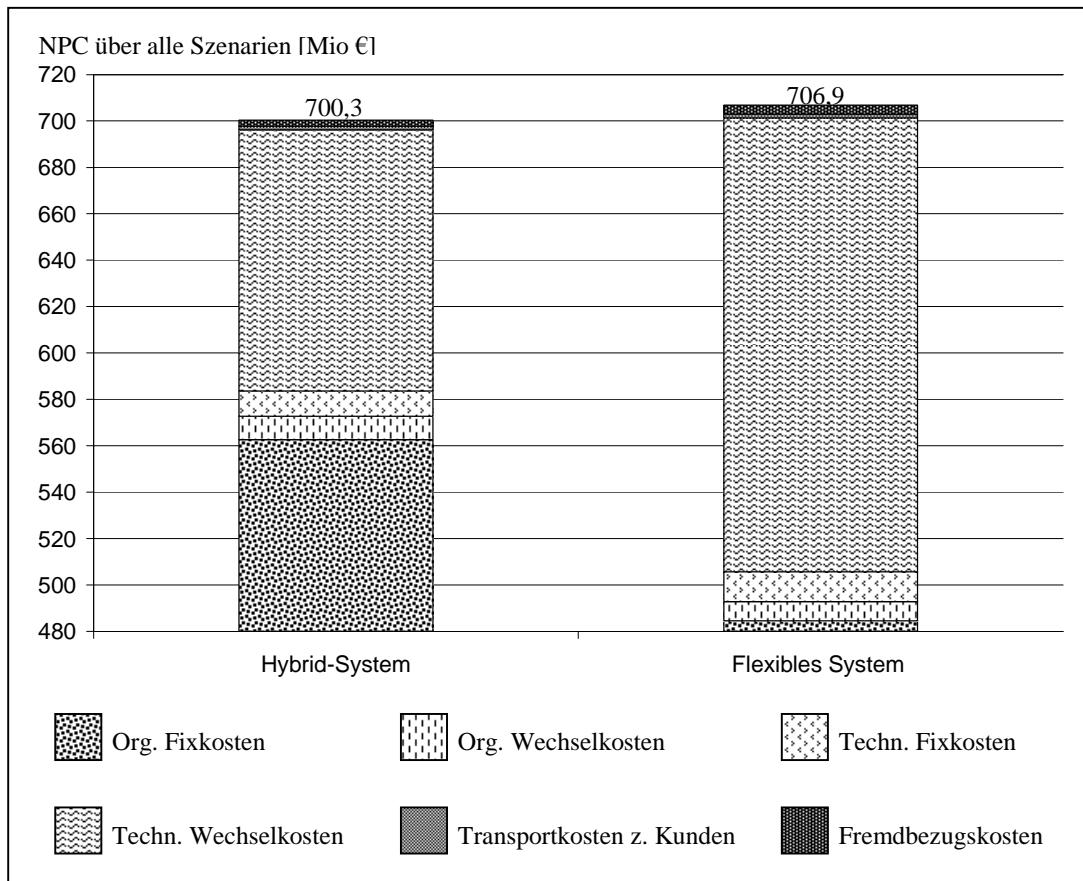
Häufig führt eine derartige Vorgehensweise dazu, dass **alternative Fertigungskonzepte** sehr früh als **nicht konkurrenzfähig eingeschätzt** und folglich verworfen werden, obwohl ihre **Vorzüge erst durch dynamische Betrachtungen** über dem Lebenszyklus herausgestellt werden können. Die beiden dargestellten Fertigungskonzepte werden nachfolgend mit dem erstellten Tool zur Programm- und Ressourcenplanung detailliert betrachtet.

### 7.3 Ergebnisse aus der Programm- und Ressourcenplanung

Ein zentrales Ergebnis stellt die **Gesamtkostenbetrachtung** dar. Diese Gesamtkosten ergeben sich aus allen abgehenden Zahlungsströmen über dem Anlagenlebenszyklus. Zusätzlich werden die Kosten über der Zeit abgezinst, wie bei der Kapitalwertmethode üblich, wodurch sich die „net present cost“ (NPC) ergeben. Werden diese NPC über alle

Szenarien nach ihrer Wahrscheinlichkeit gewichtet und aufsummiert, so ergibt sich ein gewisser Erwartungswert, der für das jeweilige Fertigungskonzept steht.

Bei einer Gegenüberstellung dieser beiden Vergleichswerte für die Fertigungskonzepte fällt auf, dass der anfängliche Unterschied, hervorgerufen durch die höheren Investitionen für das flexible System, auf weniger als sieben Mio € geschrumpft ist. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Kosten ist in Abbildung 7-15 dargestellt.

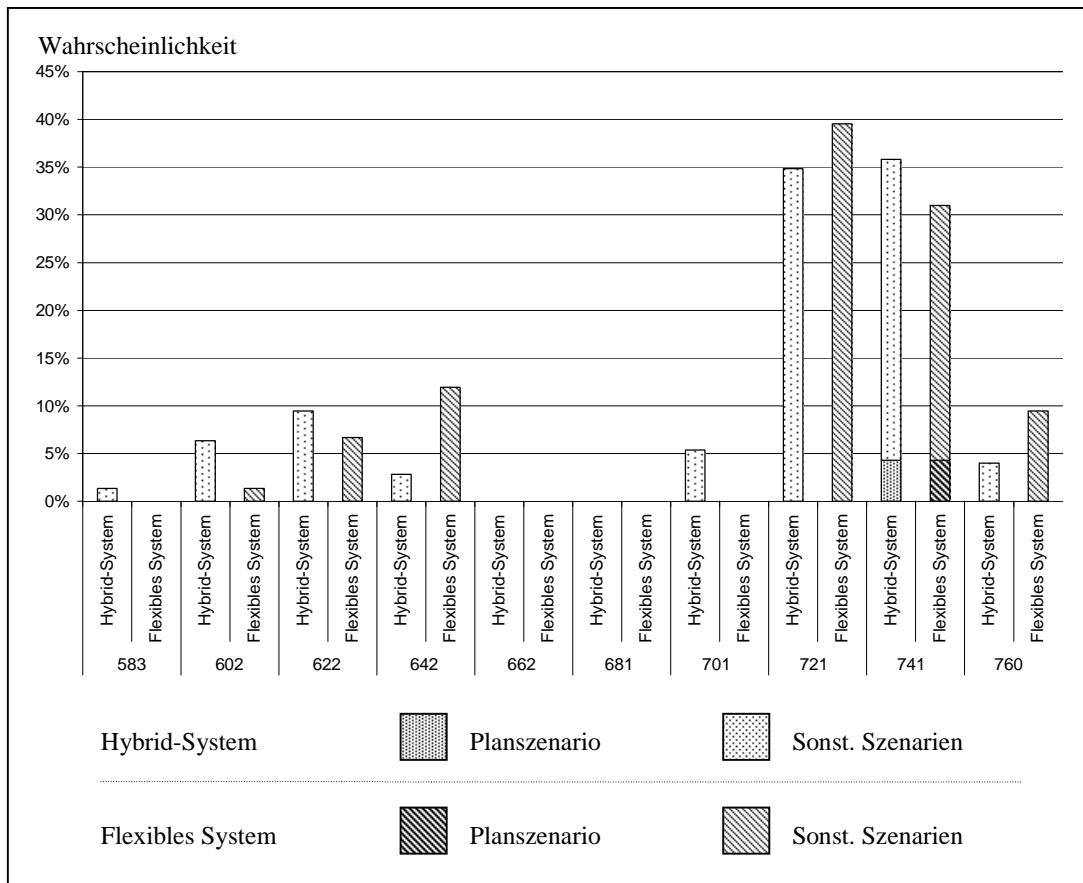


**Abbildung 7-15:** Gegenüberstellung der Gesamtkosten aus den beiden Fertigungskonzepten

Deutlich fällt der Unterschied hinsichtlich der Investitionen bzw. den technischen Wechselkosten sowie den organisatorischen Fixkosten auf. Die Möglichkeit des Fremdbezugs von Teilen wird im flexiblen System etwas mehr genutzt, obwohl dessen Fähigkeit, auf Marktschwankungen durch technische Anpassungen zu reagieren, ausgeprägter ist. Dies ist meist darauf zurückzuführen, dass die vorhandenen **technischen Anpassungsmöglichkeiten im Vergleich zum Fremdbezug nur kleiner Mengen an Bauteilen verhältnismäßig teuer** sind. Zudem stehen dem Hybrid-System in zwei der Fertigungslien zwei zusätzliche Wochenendschichten zur Verfügung, wohingegen dem

flexiblen System durchgängig lediglich eine 16. Schicht bleibt, um organisatorisch auf eine hohe Nachfrage zu reagieren.

Werden die NPC für jedes Szenario genauer betrachtet und in einem Histogramm dargestellt, so ergibt sich die Darstellung in Abbildung 7-16.



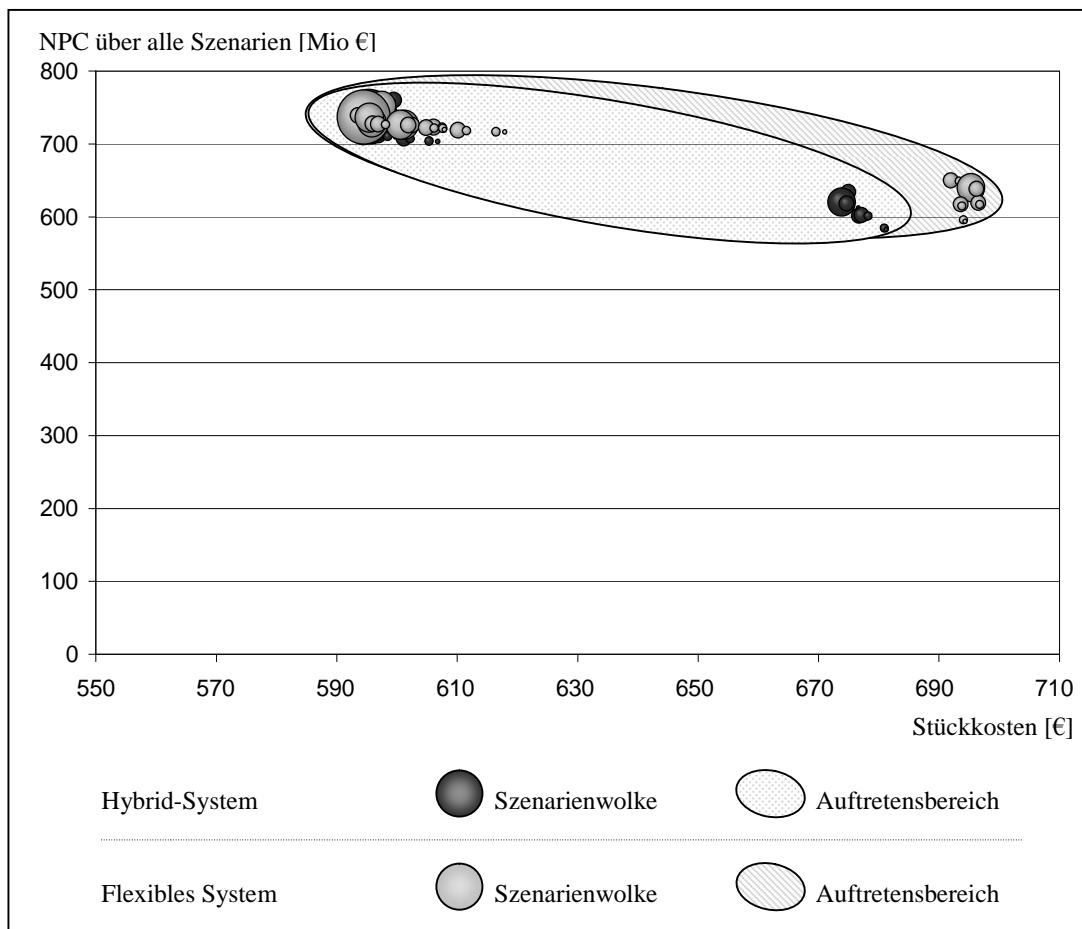
**Abbildung 7-16:** Wahrscheinlichkeiten über den Lebenszykluskosten

Alle auftretenden **NPC-Werte** sind geclustert auf der Abszisse dargestellt und auf der Ordinate die aufsummierten Wahrscheinlichkeiten der eingeordneten NPC-Werte aus den Szenarien.

Erwartungsgemäß ist die Schwankungsbreite, die sich aus der Differenz des dargestellten Minimal- und Maximalwertes ergibt, beim flexiblen System geringer. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit für auftretende höhere Lebenszykluskosten ebenso deutlich erkennbar. Der NPC-Wert für das Planszenario beider Fertigungskonzepte findet sich im gleichen Cluster wieder.

Werden die NPC über den sich ergebenden **Stückkosten** aufgetragen, so ergibt sich die Darstellung in Abbildung 7-17.

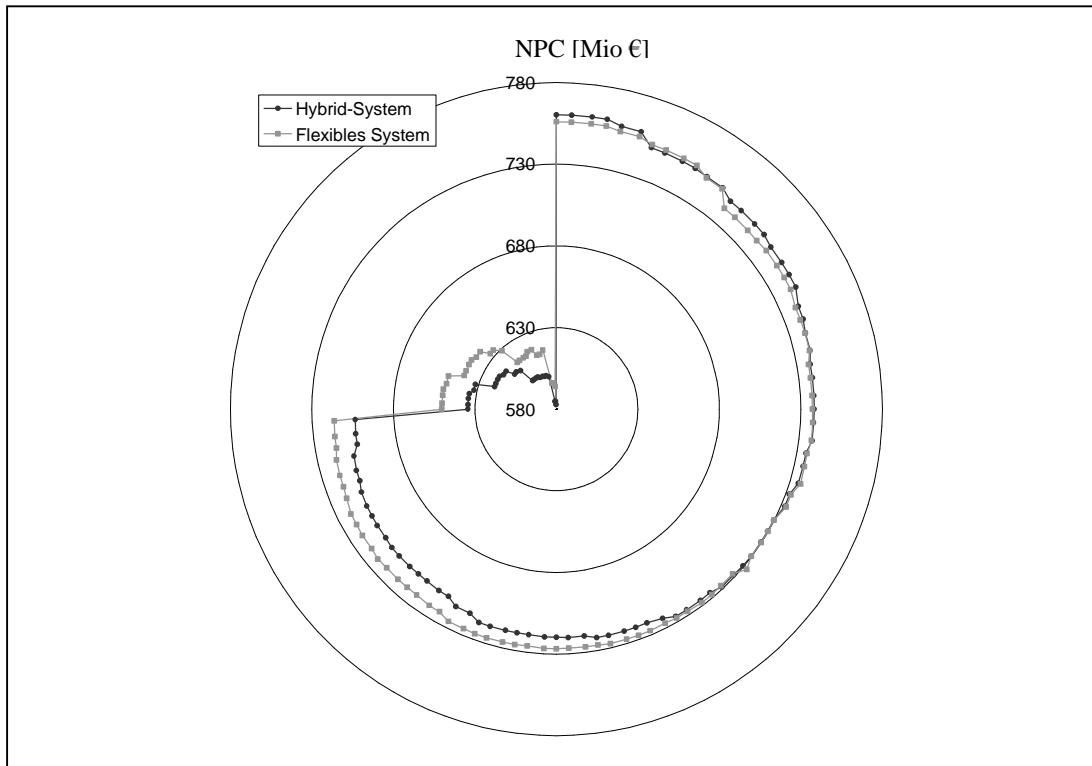
Was sich bei den NPC bereits angedeutet hat, spiegelt sich auch bei den Stückkosten wieder: auch hier kann das Hybrid-System geringere Kosten ausweisen als das flexible System. Jedoch gilt dies für nur eine **kleine Gruppe an Szenarien**, wohingegen sich alle verbleibenden Szenarien weder in ihren NPC-Werten noch in den damit verbundenen Stückkosten merklich unterscheiden. Diese kleine Gruppe an Szenarien wird durch **diejenigen Marktszenarien** gebildet, die sich durch die **Unsicherheit bzgl. des Einbaus der leistungsgesteigerten Motorvariante in das kleinere Fahrzeugmodell von den restlichen Szenarien differenziert**. Die Wahrscheinlichkeit für diesen Einbau liegt bei 80%. Die Marktszenarien, die die restlichen 20% repräsentieren, bilden genau diese abseits eingeordnete Szenariengruppe.



**Abbildung 7-17:** Abgezinste Lebenszykluskosten gegenüber Stückkosten

Ebenso stellt sich die Abspaltung dieser Gruppe in Abbildung 7-18 dar. Hier sind die NPC-Werte für alle Marktszenarien aufsteigend für ein Referenzsystem geordnet und der Wert für das entsprechende Szenario des konkurrierenden Fertigungssystems gegenübergestellt. Wiederum sticht der Unterschied bei dieser abgesonderten Szenariengruppe deutlich hervor. Ebenso erkennbar ist die **Vorteilhaftigkeit des hybriden Sys-**

tems bei Szenarien mit einem „geringen“ NPC-Wert, die gleichzeitig diejenigen Szenarien sind mit verhältnismäßig **geringer Nachfrage**, wohingegen bei ansteigenden Lebenszykluskosten, und damit ansteigender Nachfrage, das flexible System zunehmend besser abschneidet und aus Kostengesichtspunkten heraus sogar Vorteile bringt.



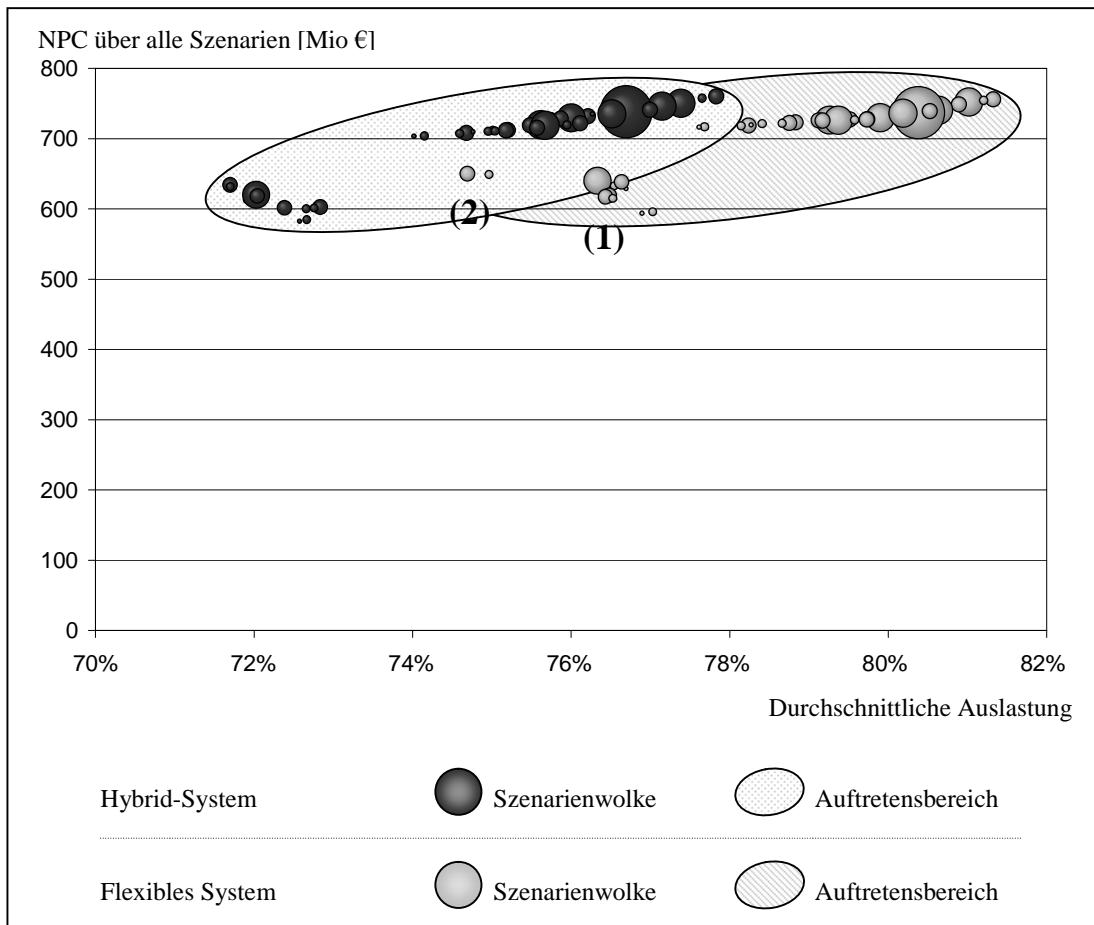
**Abbildung 7-18:** Aufsteigende Sortierung der Szenarien nach ihren NPC-Werten

Hinsichtlich der **Anlagenauslastung** und somit des **Ressourcennutzungsgrades** lässt sich das Diagramm in Abbildung 7-19 generieren. Hierfür wurden die Nutzungsgrade aller Produktionslinien über alle Perioden gemittelt und für jedes Szenario eine Blase gezeichnet.

Auf den ersten Blick kann festgestellt werden, dass die **Auslastung des flexiblen Systems höher** ausfällt als die des Hybrid-Systems. Dies liegt einerseits an den etwas höheren Kapazitätsstufen, was sich aus Abbildung 7-20 ablesen lässt, jedoch auch an der Möglichkeit einiger Linien, die technischen Kapazitäten in einer feineren Granularität aufzubauen, wodurch sich insgesamt eine bessere Anlagenauslastung ergibt.

Ebenso auffällig ist, dass der **Produktionsausfall durch das Ausbleiben der leistungsgesteigerten Motorvariante** in dem kleineren Modell 1 generell in einer schlechteren Anlagenauslastung mündet. Jedoch bildet die bereits erwähnte „kleine Gruppe“ bei beiden Fertigungssystemen eine unterschiedliche Formation. Der Grund hierfür liegt darin, dass für das **flexible System bei allen Szenarien der Untergruppe (1)** dazu ent-

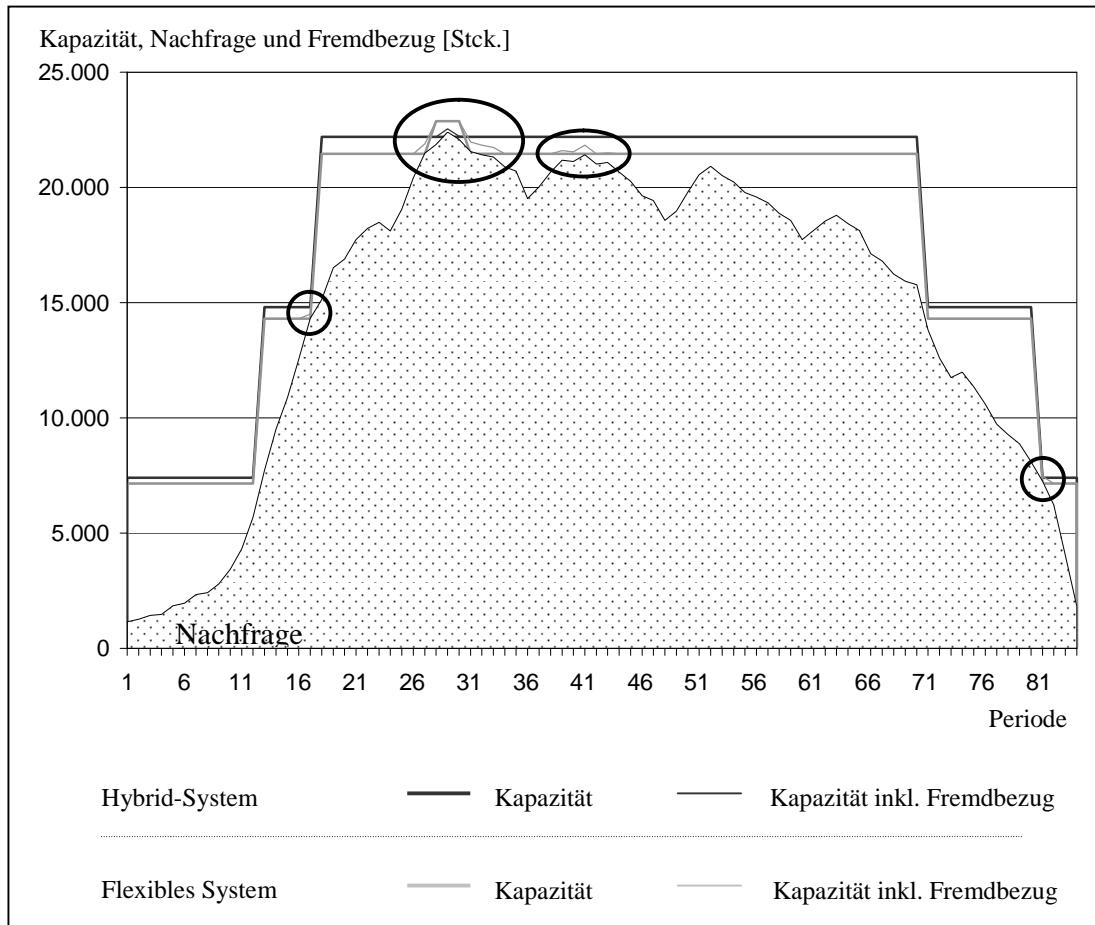
schieden wird, bei einigen Linien auf eine **teure technische Anpassung zu verzichten und fehlende Teile von extern** zu beziehen, wohingegen bei der **Untergruppe (2) die Nachfrage zu groß** ist, als dass die internen Kapazitäten durch externe Lieferanten kostengünstig ergänzt werden könnten, wodurch der eigene Systemausbau aus Kostengründen unausweichlich wird. Dies jedoch hat Auswirkungen auf die Auslastung der Gesamtanlage, die dadurch gegenüber den Szenarien aus Untergruppe (1) fällt.



**Abbildung 7-19:** Abgezinste Lebenszykluskosten gegenüber der durchschnittlichen Anlagenauslastung

Wie bereits angedeutet, sind die **Kapazitätsstufen des Hybrid-Systems etwas höher angesetzt als beim flexiblen System**. Dies hat zur **Folge**, dass – wie gezeigt – die **Auslastung tendenziell geringer** ist und könnte ebenso zur Folge haben, dass **Kapazitätsausbauten zeitversetzt** stattfinden, da beispielsweise im Hochlauf eine höhere Stufe längere Zeit Bestand haben kann als eine niedrige. In Abbildung 7-20 sind für die ZK-Linie und das Planszenario die Kapazitätsausbauten und Fremdbezüge über dem Lebenszyklus für beide Fertigungskonzepte dargestellt, jedoch sind in diesem Fall keine zeitversetzten Ausbauten erkennbar. Lediglich die unterschiedlichen Kapazitätsniveaus

zeichnen sich ab. Da beide Linien über nur einen technischen Ausbauzustand verfügen, können die Kapazitätssprünge auf organisatorische Systemanpassungen zurückgeführt werden. So münden in Abbildung 7-20 die höheren Niveaus des Hybrid-Systems in Periode 17 und 81 in einem Verzicht auf Teilebezug von externen Lieferanten, ebenso in den Perioden 39 bis 43, wohingegen das flexible Konzept in all diesen Perioden auf einen externen Lieferanten zurückgreifen muss, da der Ausbau der eigenen Kapazitäten zu teuer würde. In den Perioden 27 bis 33 können beide Linien nicht auf einen Lieferanten verzichten, wobei für die Zeit von Periode 28 bis 30 die Nachfrage so hoch ist, dass die flexible Linie die 16. Wochenschicht heranzieht und somit den Fremdbezug für diesen Zeitraum aufgibt. **Beide Linien** hätten also die **Möglichkeit, die Nachfrage komplett aus eigener Kraft zu befriedigen, tun dies jedoch aus Wirtschaftlichkeitsaspekten heraus nicht.**



**Abbildung 7-20:** Zusammenhang von installierter Fertigungskapazität, Fremdbezug und Nachfrage am Beispiel der ZK-Linie<sup>1</sup>

Insgesamt betrachtet ist der Unterschied zwischen der hybriden und flexiblen Linie hinsichtlich der Lebenszykluskosten nicht sehr groß. Es hat sich gezeigt, dass das hybride Konzept besonders bei Stückzahlschwachen Szenarien Kostenvorteile birgt, jedoch hat sich auch erwiesen, dass in vielen Fällen bei beiden Konzepten Fremdbezug stattfindet anstelle des Aufbaus eigener Kapazitäten. Dies liegt überwiegend an teuren Anpassungsalternativen für die Konzepte und dessen Linien. Aus diesem Grund wird für die beispielhafte Anwendung des Ressourcen- und Prozessmodells eine Linie ausgewählt,

<sup>1</sup> Eigentlich müsste in den Perioden, in denen Fremdbezug stattfindet, die Linie aus der Summe von Kapazität und Fremdbezug deckungsgleich sein mit der Nachfragelinie. Wie aus der Abbildung ersichtlich, ist dies nicht der Fall. Die Verzerrung beruht auf der Tatsache, dass für die verschiedenen Produkte unterschiedliche Kapazitätsnutzungsfaktoren vorliegen. Die Nachfrage sowie der Fremdbezug sind in ganzen Einheiten für die jeweilige Variante dargestellt und ohne Berücksichtigung des Nutzungsfaktors aufsummiert, wohingegen sich die Fertigungskapazitäten auf Einheiten des Referenzbauteils (ZK 4) beziehen.

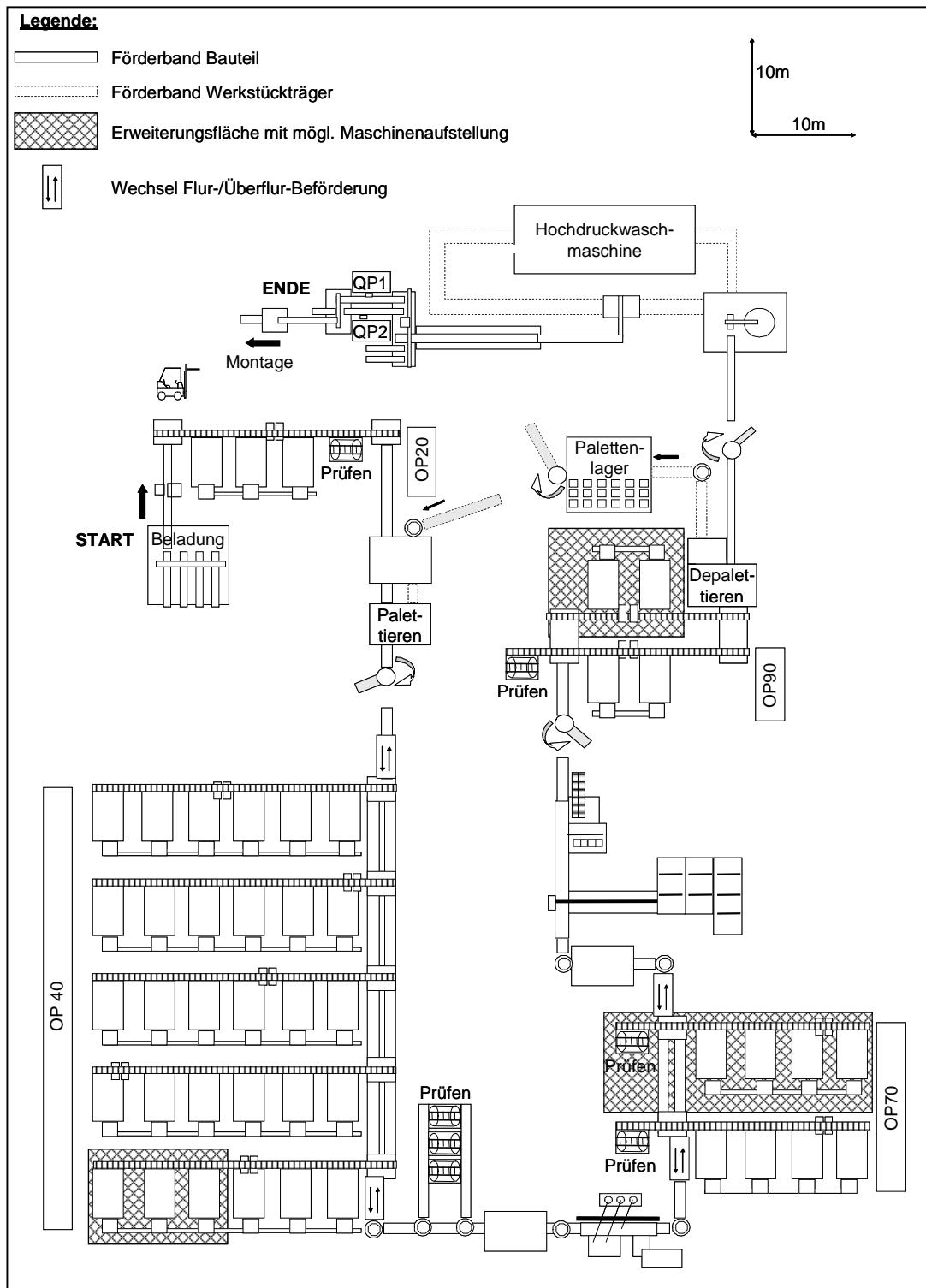
bei der das Potenzial einer zusätzlichen und preiswerten technischen Alternative in besonderem Maße gegeben ist.

## 7.4 Ressourcen- und Prozessplanung im Beispiel

Die **Kapazitäten der Fertigungslinien in beiden Systemen**, hybrid und flexibel, wurden so ausgelegt, dass **im Planszenario die verfügbare Kapazität grundsätzlich ausreicht, die Nachfrage aus eigener Kraft zu befriedigen**; oft reicht sie sogar für optimistische Marktszenarien aus. Jedoch hat sich gezeigt, dass an einigen Stellen eher Fremdbezug stattfindet, anstelle des Ausbaus der eigenen Kapazitäten, und dies, obwohl die externe Fertigung verhältnismäßig teuer ist. Aus diesem Grund wurde eine Fertigungslinie ausgewählt, bei der das Verhältnis aus bereitgestellter Maximalkapazität und der Produktnachfrage unter Einbeziehung der Kapazitätsnutzungsfaktoren aus den Produkten heraus am kleinsten ist. Bei dieser Fertigungslinie ist also das größte Potenzial vorhanden, durch eine zusätzliche technische Ausbaustufe anstelle des Bezugs von extern weiterhin Teile auf der eigenen Linie zu fertigen. **Voraussetzung** hierfür ist, dass diese **Ausbaustufe wirtschaftlich konkurrenzfähig** ist gegenüber dem Fremdbezug.

Bei der betrachteten Linie handelt es sich um die Produktionslinie für die **Zylinderköpfe**. Sie wird zunächst funktionell beschrieben, ihre spezifischen Daten werden, wie sie vom Modul zur Ressourcen- und Prozessplanung abgefragt werden, aufgeführt sowie die Problemstellung und die durch die Optimierung festgestellte Lösung besprochen.

### 7.4.1 Funktionelle Beschreibung der Zylinderkopfflinie des flexiblen Systems



**Abbildung 7-21:** Schematisches Layout der Linie zur Zylinderkopffertigung des flexiblen Systems

Die **ZK-Linie des flexiblen Fertigungssystems** besteht überwiegend aus flexiblen, mehrfach **parallel geschalteten Maschineneinheiten**, so genannten **Bearbeitungszentren**. Daneben stehen Maschinen für Montagetätigkeiten, wie etwa für das Einpressen der Ventilführungen oder der Ventilsitzringe, und für Säuberungstätigkeiten oder Qualitätssicherungseinrichtungen zur Verfügung. Jedoch stehen diese nicht im Zentrum der Betrachtungen, sondern vielmehr die spanenden Bearbeitungsmaschinen, die sich lediglich auf die Stationen OP20, OP40, OP70 und OP90 erstrecken. Alle sonstigen Stationen innerhalb der Linie sind in der Lage, ausreichend Kapazitäten zur Verfügung zu stellen, so dass sich eine detaillierte Betrachtung der Anpassungsmöglichkeiten der Linie auf die aufgezählten Maschinengruppen beschränkt.

Die dargestellte ZK-Linie wurde von Anfang an mit nur einer technischen Ausbaustufe geplant, jedoch wurden **Erweiterungsflächen** in den betreffenden Stationen vorgesehen sowie ein Aufstellungsplan für anzufügende Maschineneinheiten ausgearbeitet.

**OP20** besteht dabei aus drei **Standard-Bearbeitungszentren**, und stellt als einzige keine Erweiterungsfläche zur Verfügung. In dieser ersten spanenden Station wird die Auslassseite des Zylinderkopfes komplett bearbeitet.

Nach einer Qualitätskontrolle werden die Bauteile gereinigt und auf spezielle Werkstückträger gespannt, was die Handhabung der Zylinderköpfe und deren Positionierung in den Maschinen deutlich vereinfacht.

In **OP40** finden die meisten Prozessschritte statt. Diese Station besteht aus insgesamt 27 **Fünfachs-Bearbeitungszentren**, die durch ihre zusätzliche fünfte Achse eine Bearbeitung aller verbleibenden fünf Seiten in nur einer Aufspannung erlauben und somit z.B. auch „schräg“ anzubringende Bohrungen durchführen können. Da der überflur geführte Portalroboter nur eine endliche Geschwindigkeit besitzt, können maximal sechs derartige BAZ in einem Strang parallel geschaltet werden. Somit ergibt sich eine Erweiterungsfläche für drei zusätzliche BAZ.

Nach einer weiteren Qualitätskontrolle und Reinigung kommen erste Montageumfänge, auf die jedoch nicht im Einzelnen eingegangen wird. Die durchgeführten Montagetätigkeiten werden wiederum auf Vollständigkeit geprüft.

**OP70** besteht aus vier parallelen **Doppelspindler-BAZ**, d.h. diese Maschinen führen die zugewiesenen Prozessschritte an zwei Bauteilen gleichzeitig durch, was zwei Bearbeitungsspindeln und somit die doppelte Anzahl an Werkzeugen erforderlich macht, jedoch für eine drastische Reduktion der Stationszeiten sorgt.

An diese Bearbeitungen anschließend finden wiederum nach einer Reinigung Montageumfänge statt, die vor der nächsten spanenden Station OP90 noch auf Richtigkeit geprüft werden. **OP90** kann durch Spiegelung in ihrer Kapazität verdoppelt werden und besteht zunächst aus zwei **Hochleistungs-BAZ**, die sich durch besonders niedrige Zei-

ten für Werkzeugwechsel, Werkstückpositionierung sowie eine hohe Spindelleistung auszeichnen.

Danach werden die Bauteile von ihrem Werkstückträger getrennt und einer Hochdruckwaschmaschine zugeführt, in der alle Späne sowie Reste von Kühl- und Schmierstoffen aus der Bearbeitung vom Bauteil entfernt werden. Hierfür ist es notwendig, dass bereits montierte spezielle Bauelemente, die eine gemeinsame Bearbeitung mit dem Zylinderkopf erfahren haben, wieder demontiert werden. Jedoch dürfen diese Elemente danach nicht mit einem beliebigen anderen ZK verbaut werden. Somit muss sichergestellt werden, dass Zylinderkopf und Anbauteile zusammen durch die Waschmaschine geführt und danach wieder montiert werden. Dies wird durch entsprechende Bauteilträger gewährleistet, die in einem Kreislauf stets neue Bauteile aufnehmen und nach der Reinigung die Bauteile einer erneuten Montageeinrichtung zur Verfügung stellen. Nach einer solchen Entleerung stehen sie wieder zur Aufnahme einer neuen Paarung von ZK und Anbauteilen bereit.

Abschließend findet an jedem Zylinderkopf eine Qualitätskontrolle statt.

#### 7.4.2 Spezifikation der Linie und der Bearbeitungsprozesse

Die betrachtete Linie besteht aus insgesamt **vier spanenden Stationen**, die jeweils aus mehreren **parallelen Maschinen** gebildet werden. Dabei ist jeder Station ein anderer Maschinentyp zugeordnet. Auf dieser Linie sind **zwei Varianten** (ZK 4 und ZK 4+) abwechselnd **in Losen zu fertigen**, wobei rund **110 Prozessschritte** vom Rohteil bis hin zum Fertigteil an den Zylinderköpfen durchzuführen sind. Wie bereits angedeutet, werden **zwei Bauteilaufspannungen** benötigt. Aufspannung 1 definiert die Spannlage auf dem Werkstückträger von OP40 bis OP90 und Aufspannung 2 repräsentiert die Spannung in OP20, in der die Auslassseite bearbeitet wird. Als **Produktionstyp** muss **TOP 3** gewählt werden (nähere Ausführungen hierzu finden sich in Abschnitt 6.2.4).

Da die Nachfrage aggregiert auf Monatsscheiben vorliegt, ist die zur Verfügung stehende **Fertigungszeit** entsprechend einzugeben. Im Beispiel wird von **4,4 Arbeitswochen pro Monat** (was 22 Arbeitstage pro Monat gleichkommt) und von **5,33 Arbeitstage pro Woche** ausgegangen. Die 0,33 Arbeitstage stehen dabei für die zusätzliche Samstagsschicht. Obwohl im 3-Schicht-Betrieb, also 24 Stunden am Tag, gearbeitet wird, wird lediglich eine **effektive Arbeitszeit pro Tag von 18 Stunden** angesetzt, was darauf zurückzuführen ist, dass während Mitarbeiterpausen oder der Maschinenwartung nicht produziert wird und somit diese Zeitanteile nicht mit eingerechnet werden dürfen. Auch Zeiten zum Rüsten oder Maschinenausfallzeiten fallen hierunter. Insgesamt ergibt sich eine **Fertigungszeit** von etwas mehr als **1,5 Mio Sekunden pro Monat**.

Sollte es im Rahmen der Anpassungsplanung notwendig werden, Engpässe durch Maschinen zu ergänzen, so stehen die in Abbildung 7-22 aufgezählten **Maschinentypen**

zur Verfügung. Zudem sind zu jedem Typ notwendige **Investitionen**, der **Flächenbedarf** und die **Maschinenorientierung** angegeben. Hinsichtlich der Bearbeitungsstationen sind die jeweils vorherrschende Maschinenorientierung sowie die verfügbare **Fläche zur Aufstellung von Maschinen** und die **Kapazität des dortigen Transportsystems** angegeben. Diese Kapazität ist im Beispiel auf einen sehr hohen Wert gesetzt, da eine endlose Aneinanderschaltung von Maschinen durch das Linienlayout von vornherein ausgeschlossen werden kann und Erweiterungsflächen bereits vorgegeben sind. So mit kann es nicht auftreten, dass die Kapazität des Transportsystems innerhalb einer Station zum Engpass wird.

Name	Investitionen [€]	Flächenbedarf [m <sup>2</sup> ]	Orientierung
1 Spindler Standard-BAZ	320.000	42	1
5-Achs BAZ	560.000	72	1
Doppelspindler-BAZ	520.000	56	1
1 Spindler HighSpeed-BAZ	400.000	42	1

Name	Kapazität des Transportsystems innerhalb der Station [Stck.]	Verfügbare Fläche [m <sup>2</sup> ]	Orientierung
OP20	1.000.000	150	1
OP40	1.000.000	2.200	1
OP70	1.000.000	650	1
OP90	1.000.000	250	1

**Abbildung 7-22:** Angaben zu Investitionen, Flächen, Orientierungen und Transportkapazitäten innerhalb einer Station

Da sich die beiden Zylinderköpfe der **Motorvarianten 4 und 4+ konstruktiv unterscheiden**, muss nicht jeder Prozessschritt an jeder Variante ausgeführt werden, bzw. die **Ausführungshäufigkeiten** aus Abbildung 7-23 weichen voneinander ab. So kann es z.B. sein, dass ein Prozess überhaupt nicht an einer Variante ausgeführt wird (Variante 4+, Prozess 46: „0“) oder ein Prozess wird nicht mit der gleichen Intensität an beiden Varianten ausgeführt, was sich in unterschiedlichen Faktoren niederschlägt. Da der Gesamtmotor in Anlehnung an den Vorgängermotor entstanden ist, sind in weiten Teilen die Prozessbeschreibungen und die Prozesszeiten übernommen worden. Dadurch kann es vorkommen, dass auch beim Referenzzylinderkopf, der eigentlich durchgängig mit den Faktoren „1“ belegt sein sollte, davon abweichende Faktoren auftreten. So wurde etwa Prozess 19 anfangs bei der Konstruktion mit übernommen, jedoch hat sich im Nachhinein herausgestellt, dass dieser nicht mehr notwendig ist. Dies führt dazu, dass er bei der Fertigung beider ZK-Varianten nicht länger vorkommt, jedoch noch immer im aktuellen Planungsstand enthalten ist, ebenso was den Vorranggraphen anbetrifft. Es können also über diese Ausführungshäufigkeiten konstruktive Änderungen mit abgefangen werden, ohne die Dateneingabe erneut vornehmen zu müssen.

Prozess-Nr.	ZK 4	ZK 4+
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1
7	1	1
8	1	1
9	1	1
10	1	1
11	1	1
12	1	1
13	1	1
14	1	1
15	1	1
16	1	1
17	1	1
18	1	1
19	0	0
20	1	1
21	0	1
22	1	1
23	1	1
24	1	1
25	1	1
26	1	1
27	1	1
28	1	1
29	1	1
30	1	1
31	1	1
32	1	1
33	1	1
34	1	1
35	1	1
36	1	1
37	1	1
38	1	1
39	1	1
40	1	1
41	1	1
42	1	1
43	1	1
44	1	1
45	1	1
46	1	0
47	1	1
48	1	1
49	1	1
50	1	1
51	1	1
52	1	1
53	1	1
54	1	1
55	1	1
56	1	1
57	1	1
58	1	1
59	1	1
60	1	1
61	1	1
62	1	1
63	1	1
64	1	0,8
65	1	0,8
66	1	1
67	1	1
68	1	1
69	1	0,8
70	1	1
71	1	1
72	1	1
73	1	1,1
74	1	1
75	0	0,4
76	1	1
77	1	1
78	0	1,1
79	1	1,3
80	1	1,1
81	1	1,1
82	1	1,1
83	1	1,6
84	1	1,6
85	1	1
86	1	1
87	1	1
88	1	1
89	1,1	1
90	2	1
91	0	1
92	1	1,5
93	1,1	1
94	1	1,2
95	1	1,2
96	1	1,2
97	1	1,1
98	1	1,2
99	1	1,2
100	1	1
101	1	1
102	0	1
103	1	1
104	1	1
105	1	1
106	1	1
107	1	1
108	1	1
109	1	1
110	1	1

**Abbildung 7-23:** Ausführungshäufigkeit von Prozessen bei den beiden ZK-Varianten

Da die auszuführenden Fertigungsprozesse größtenteils grundsätzlich auf allen vier Maschinentypen durchgeführt werden können, wurden, wie in Abbildung 7-24 dargestellt, sämtliche **Prozesszeiten** für alle Maschinentypen ermittelt. Ausnahmen bilden lediglich diejenigen Prozesse, die per Definition lediglich auf einem Maschinentypen stattfinden dürfen. Dies kann z.B. auf spezielle Maschinencharakteristika oder auch einfach nur auf Wirtschaftlichkeitsaspekte zurückgeführt werden, wenn etwa sehr einfache Prozessschritte nicht mit teuren Spezialmaschinen durchgeführt werden sollen. In einem solchen Fall ist als Prozesszeit eine „0“ eingetragen, was bedeutet, dass dieser Prozess auf dem entsprechenden Maschinentyp nicht stattfinden darf. Grau hinterlegt ist dabei das betreffende Kästchen derjenigen Spalte, die den Maschinentyp anzeigt, auf dem der Prozess vor der Optimierung stattfindet. Wird im Rahmen der Optimierung ein Prozess von einem Maschinentyp auf einen anderen verschoben, so wird eine einmalige Aufwendung von **500 Euro pro verschobenem Prozess** veranschlagt für die Programmierung und das Einfahren der Maschine.

Eine weitere Einschränkung kann vorgenommen werden, indem definiert wird, auf welcher Station welcher Prozess ausgeführt werden darf. Eine solche Einschränkung kann z.B. aus der Logistik heraus oder der Versorgungssituation von Stationen mit Kühl-/Schmierstoffen oder anderen Medien bzw. der Entsorgung von Spänen notwendig werden, oder wenn etwa Grobbearbeitungsschritte am Rohteil ausschließlich an der ersten Station ausgeführt werden dürfen aufgrund der damit verbundenen Erschütterungen des Hallenbodens. Derartige Erschütterungen können, falls in der gleichen Station Feinbearbeitungen durchgeführt werden, an sensiblen Bearbeitungsstellen zur Überschreitung von Toleranzgrenzen oder welligen Bearbeitungsoberflächen führen. Somit ist in Abbildung 7-25 die Ausführbarkeit von Prozessen in Stationen mit einer „1“ kodiert.

Prozess Nr.	Maschinentyp			
	1	2	3	4
1	9,39	0	0	0
2	5,76	0	0	0
3	16,86	0	0	0
4	5,44	0	0	0
5	11,42	11,20	5,98	9,71
6	0	7,79	4,37	6,83
7	0	13,98	7,68	12,38
8	0	10,67	5,76	9,39
9	11,42	11,20	5,98	9,71
10	6,72	6,51	3,52	5,76
11	7,15	6,94	3,73	6,08
12	6,94	6,72	3,63	5,98
13	5,55	5,55	2,99	4,80
14	12,48	12,16	6,72	10,78
15	7,47	7,26	3,84	6,51
16	7,47	7,26	3,84	6,51
17	5,98	5,76	3,20	5,12
18	93,79	91,66	48,02	79,60
19	18,89	18,46	10,14	16,22
20	103,39	101,26	55,80	89,20
21	18,89	18,46	10,14	16,22
22	22,73	22,30	12,16	19,63
23	43,00	42,04	23,15	37,13
24	17,07	16,75	9,18	14,83
25	9,50	0	0	0
26	26,46	25,93	14,19	22,94
27	21,02	20,59	11,31	18,03
28	11,20	10,88	5,87	9,50
29	9,07	8,86	4,80	7,79
30	20,17	19,74	10,78	17,39
31	14,51	14,30	7,79	12,59
32	14,30	14,08	7,68	12,38
33	30,09	29,34	16,22	25,93
34	21,34	20,91	11,42	18,46
35	12,91	12,70	6,94	11,20
36	39,91	39,16	21,55	34,46
37	42,47	41,51	22,94	36,60
38	19,74	0	0	0
39	14,08	0	0	0
40	10,88	0	0	0
41	13,02	0	0	0
42	24,11	0	0	0
43	23,58	0	0	0
44	10,46	10,24	5,55	8,96
45	21,23	20,81	11,42	18,35
46	7,26	7,04	3,73	6,19
47	0	16,22	8,96	14,19
48	11,63	11,52	6,30	10,14
49	0	65,73	36,28	57,94
50	95,18	93,36	51,43	82,27
51	30,84	30,30	16,65	26,68
52	6,51	6,19	3,41	5,55
53	10,24	10,03	5,44	8,64
54	36,70	36,06	19,85	31,80
55	31,80	31,16	17,18	27,32
56	11,20	10,88	5,87	9,50
57	7,90	7,68	4,27	6,72
58	6,72	6,62	3,52	5,76
59	15,04	14,83	8,11	13,02
60	18,25	17,71	9,71	15,68
61	11,63	11,52	6,30	10,14
62	6,94	6,72	3,63	5,98
63	8,32	8,11	4,48	7,15
64	19,63	19,10	10,56	16,86
65	18,78	18,35	10,14	16,22
66	8,54	8,32	4,59	7,36
67	13,23	13,02	7,15	11,52
68	17,50	17,18	9,39	15,04
69	10,24	10,03	5,44	8,64
70	17,50	17,18	9,39	15,04
71	5,98	5,76	3,20	5,12
72	11,52	11,31	6,19	9,82
73	6,72	6,62	3,52	5,76
74	116,20	113,85	62,85	100,40
75	11,84	11,63	6,51	10,35
76	116,20	113,85	62,85	100,40
77	39,80	39,05	21,45	34,36
78	11,84	11,63	6,51	10,35
79	143,83	140,84	77,78	124,20
80	37,88	37,24	20,59	32,76
81	66,58	65,19	35,96	57,40
82	64,66	63,27	34,89	55,80
83	21,55	21,13	11,52	18,46
84	21,13	20,81	11,42	18,25
85	13,98	13,66	7,68	12,06
86	4,69	4,69	2,56	4,16
87	4,48	4,27	2,45	3,73
88	5,34	5,12	2,99	4,48
89	12,70	12,48	6,72	11,20
90	6,62	6,51	3,52	5,55
91	8,22	8,11	4,48	7,26
92	56,12	55,27	30,52	48,76
93	39,37	38,31	21,13	33,93
94	60,93	59,86	32,97	52,82
95	60,93	59,86	32,97	52,82
96	60,93	59,86	32,97	52,82
97	124,09	121,53	61,14	55,38
98	9,07	8,86	4,80	7,79
99	13,23	13,02	7,15	11,42
100	11,95	11,52	6,19	10,24
101	11,74	10,99	6,08	9,82
102	12,48	11,95	6,51	10,56
103	14,94	0	0	0
104	0	14,94	0	0
105	0	0	14,94	0
106	0	0	0	14,94
107	5,34	0	0	0
108	0	5,34	0	0
109	0	0	5,34	0
110	0	0	0	5,34

Abbildung 7-24: Ausführungszeiten von Prozessen bezogen auf die Maschinentypen

Prozess Nr.	Station				Prozess Nr.	Station			
	OP 20	OP 40	OP 70	OP 90		OP 20	OP 40	OP 70	OP 90
1	1				56		1	1	1
2	1				57		1	1	1
3	1				58		1	1	1
4	1				59		1	1	1
5		1	1	1	60		1		
6		1	1	1	61		1	1	1
7		1	1	1	62		1	1	1
8		1	1	1	63		1	1	1
9		1	1	1	64		1	1	1
10		1	1	1	65		1	1	1
11		1	1	1	66		1	1	1
12		1	1	1	67		1	1	1
13		1	1	1	68		1	1	1
14		1	1	1	69		1	1	1
15		1	1	1	70		1	1	1
16		1	1	1	71		1	1	1
17		1	1	1	72		1	1	1
18		1			73		1	1	1
19		1			74		1	1	1
20		1			75		1	1	1
21		1			76		1	1	1
22		1	1	1	77		1	1	1
23		1	1	1	78		1	1	1
24		1	1	1	79		1	1	1
25	1				80		1		
26		1	1	1	81		1		
27		1	1	1	82		1		
28		1	1	1	83			1	
29		1	1	1	84			1	
30		1	1	1	85		1	1	1
31		1	1	1	86		1	1	1
32		1	1	1	87		1	1	1
33		1	1	1	88		1	1	1
34		1	1	1	89			1	
35		1	1	1	90			1	
36		1	1	1	91		1	1	1
37		1	1	1	92		1	1	1
38	1				93			1	
39	1				94			1	
40	1				95			1	
41	1				96			1	
42	1				97		1	1	1
43	1				98				1
44		1	1	1	99		1	1	1
45		1	1	1	100		1	1	1
46		1	1	1	101		1	1	1
47		1	1	1	102				1
48		1	1	1	103	1			
49		1			104		1		
50		1			105			1	
51		1	1	1	106				1
52		1	1	1	107	1			
53		1	1	1	108		1		
54		1	1	1	109			1	
55		1	1	1	110				1

Abbildung 7-25: Ausführbarkeit von Prozessen in Stationen

Sowohl die beiden gezeigten Tabellen, in denen die **Ausführbarkeit von Einzelprozessen auf Maschinentypen und in Maschinengruppen** definiert wird, als auch die Einhaltung der **Bearbeitungsreihenfolge** haben einen starken Einfluss auf die Zuteilung von Bearbeitungsinhalten zu Stationen. In der mechanischen Bearbeitung richtet sich dieser **Vorranggraph** nach relativ elementaren Tätigkeiten: „Bearbeitungsfläche schaffen, Loch vorbohren, aufbohren, Gewinde schneiden“ könnte z.B. eine solche vorgegebene Reihenfolge sein. Mehrere solcher Kaskaden bilden zusammen den kompletten Bearbeitungsablauf, wobei, wie in Abbildung 7-26 gezeigt, sie keinerlei Abhängigkeiten untereinander haben müssen. Auch ganz vereinzelte Bearbeitungsinhalte können vorkommen, die jedoch sehr gut zur gleichmäßigen Abtaktung der Bearbeitungsstationen herangezogen werden können. Diese Prozesse können ohne Beachtung von Reihenfolgebeziehungen auf Stationen verteilt werden, solange die grundsätzliche Ausführbarkeit in der Station und auf dem dortigen Maschinentyp zulässig ist. Der Vorranggraph für das Berechnungsbeispiel ist nachstehend abgebildet.

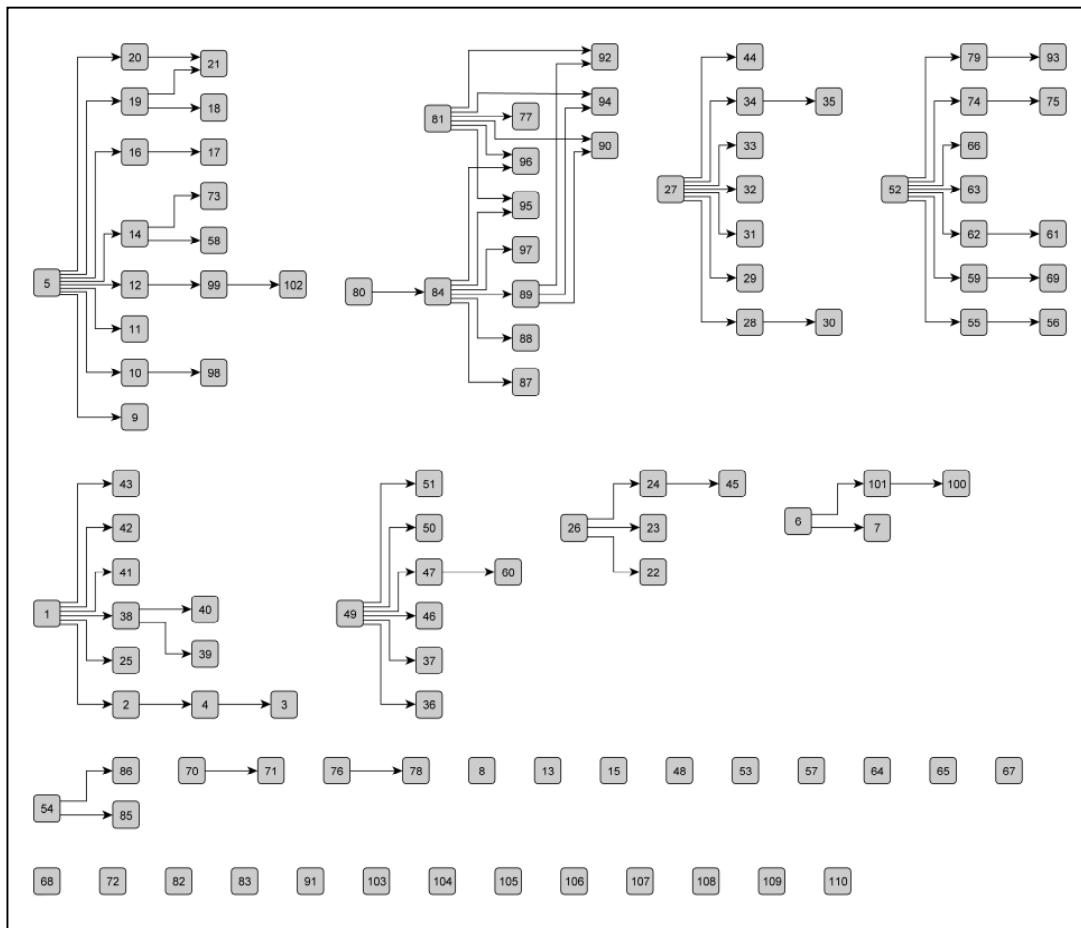


Abbildung 7-26: Vorranggraph für die beiden ZK-Varianten

Eine weitere wichtige Eingabeinformation bildet die **aktuelle Linienkonfiguration**. Es muss also definiert werden, wie viele Einheiten welchen Maschinentyps in welcher Station stehen, bzw. wie viele weitere Einheiten zugelassen sind. In OP40 zum Beispiel stehen vor der Optimierung 27 5-Achs-BAZ und es können drei weitere hinzugestellt werden. Es bestünde jedoch auch die theoretische Möglichkeit, die 27 existierenden Maschinen auszutauschen gegen bis zu 48 Standard-BAZ. Es wurde im mathematischen Modell ausgeschlossen, dass zwei oder mehr unterschiedliche Maschinentypen in einer Station stehen dürfen, was es ermöglicht, für jede Station im Falle des Hinzustellens einer weiteren Maschineneinheit eines bereits bestehenden Typs die tatsächlich zusätzliche installierbaren Maschinen anzugeben und im Falle nicht existierender Maschinentypen die zulässige Maximalanzahl.

Maschinentyp	Station	Anzahl existierender Maschinen	Anzahl (zusätzlich) zulässiger Maschinen
1 Spindler Standard-BAZ	OP 20	3	0
5-Achs BAZ	OP 20		2
Doppelspindler-BAZ	OP 20		2
1 Spindler HighSpeed-BAZ	OP 20		3
1 Spindler Standard-BAZ	OP 40		48
5-Achs BAZ	OP 40	27	3
Doppelspindler-BAZ	OP 40		35
1 Spindler HighSpeed-BAZ	OP 40		48
1 Spindler Standard-BAZ	OP 70		16
5-Achs BAZ	OP 70		8
Doppelspindler-BAZ	OP 70	4	4
1 Spindler HighSpeed-BAZ	OP 70		16
1 Spindler Standard-BAZ	OP 90		4
5-Achs BAZ	OP 90		2
Doppelspindler-BAZ	OP 90		4
1 Spindler HighSpeed-BAZ	OP 90	2	2

**Abbildung 7-27:** Aktuelle und zulässige Linienkonfiguration

Zuletzt ist noch die Möglichkeit zu definieren, die Einzelprozessschritte in verschiedenen **Bauteilspannungen** zu fertigen. Auch diese Information wird dem System in binärer Form übergeben. Eine „1“ bedeutet, dass der Prozess in der in dieser Spalte gezeigten Aufspannung gefertigt werden kann, eine „0“ bedeutet das Gegenteil.

Wie aus Abbildung 7-28 ersichtlich, kann jeder Prozess in nur einer Aufspannung gefertigt werden, was eine strikte Trennung der Prozesse zur Folge hat. Der Grund hierfür liegt darin, dass das Konzept zur Erstellung eines Zylinderkopfes in nur zwei Aufspannungen realisiert werden soll. In der ersten Aufspannung werden alle Prozesse einer Seite des Zylinderkopfes erstellt, in der zweiten Aufspannung werden alle übrigen Seiten des Kopfes bearbeitet.

Prozess-Nr.	Aufspannung 1	Aufspannung 2
1		1
2		1
3		1
4		1
5	1	
6	1	
7	1	
8	1	
9	1	
10	1	
11	1	
12	1	
13	1	
14	1	
15	1	
16	1	
17	1	
18	1	
19	1	
20	1	
21	1	
22	1	
23	1	
24	1	
25		1
26	1	
27	1	
28	1	
29	1	
30	1	
31	1	
32	1	
33	1	
34	1	
35	1	
36	1	
37	1	
38		1
39		1
40		1
41		1
42		1
43		1
44	1	
45	1	
46	1	
47	1	
48	1	
49	1	
50	1	
51	1	
52	1	
53	1	
54	1	
55	1	
56		1
57		1
58		1
59		1
60		1
61		1
62		1
63		1
64		1
65		1
66		1
67		1
68		1
69		1
70		1
71		1
72		1
73		1
74		1
75		1
76		1
77		1
78		1
79		1
80		1
81		1
82		1
83		1
84		1
85		1
86		1
87		1
88		1
89		1
90		1
91		1
92		1
93		1
94		1
95		1
96		1
97		1
98		1
99		1
100		1
101		1
102		1
103		1
104		1
105		1
106		1
107		1
108		1
109		1
110		1

**Abbildung 7-28:** Ausführbarkeit der Fertigungsprozesse in den Bauteilaufspannungen

### 7.4.3 Problemstellung und Zielsetzung

Wie einleitend bereits erwähnt, hat die Zylinderkopflinie das größte Potenzial, durch Hinzufügen einer technischen Ausbaustufe vom Fremdbezug etwas mehr Abstand zu nehmen und die Köpfe selbst zu produzieren. Dies würde, sofern eine kostengünstige Anpassungsalternative existiert, den Mittelabfluss zu einem externen Lieferanten einschränken und gleichfalls die Abhängigkeit zu diesem sowie dessen Preispolitik reduzieren.

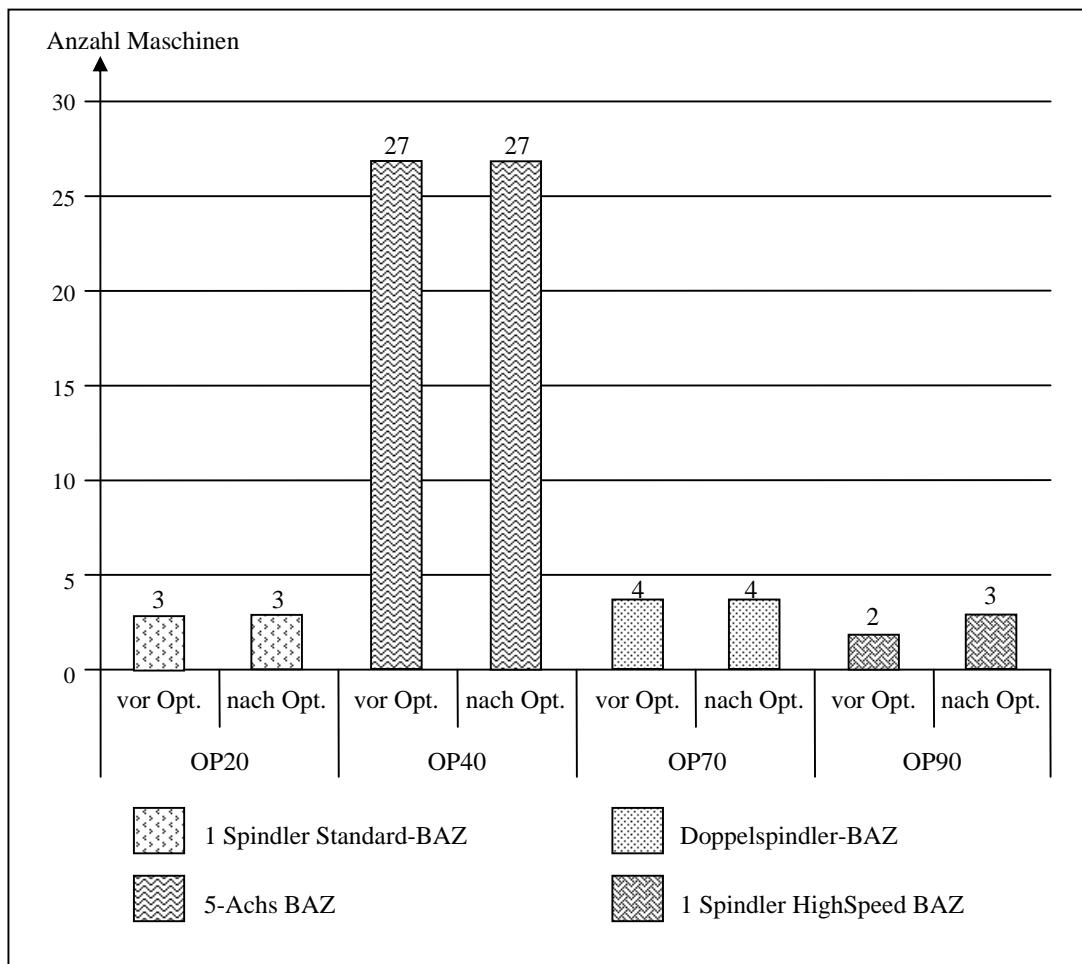
Somit wird zum **Ziel** gesetzt, dass auch **die maximale Nachfrage aus den generierten Marktszenarien heraus durch die Zylinderkopflinie im zu generierenden technischen Ausbauzustand** selbst befriedigt werden kann. Dabei soll sie sich im höchsten organisatorischen Ausbauzustand befinden, also in drei Schichten und einer zusätzlichen Samstagsschicht produzieren. Aufgerundet ergibt sich als Produktionsvorgabe eine Stückzahl für den Standard-Zylinderkopf von 8.400 bzw. 14.450 für den leistungssteigerten ZK 4+. Im Planszenario liegt die gerundete Nachfrage bei etwa 8.100 bzw. 14.350.

Diese beiden Zahlen dienen als letzte Eingangsgrößen für das Ressourcen- und Prozessmodul, dessen Optimierung mit allen benötigten Parametern versehen gestartet werden kann. Die Ergebnisse sind im nachfolgenden Kapitel zusammengefasst.

### 7.4.4 Ergebnisse aus der Optimierung

Eine klare Vorgabe für die Optimierung bestand darin, dass die Fertigung losweise stattfindet. Unter Beachtung dieser Restriktion war bei den Eingabeparametern Produktions- typ drei auszuwählen. Es ergibt sich dabei nach der Optimierung ein **Zielfunktionswert von 401.000,04 Euro**. Somit kann die ZK-Fertigungs linie mit diesem finanziellen Aufwand die erforderlichen Kapazitäten bereitstellen.

Die Lösung beinhaltet dabei eine Investition in eine zusätzliche Maschine des Typs „**Ein-Spindler-HighSpeed-BAZ**“ in **OP90** zu 400 T€. Ansonsten bleibt, was die Produktionstechnik anbelangt, die Linie erhalten wie sie vor der Optimierung war. Damit lassen sich auch die 0,04 Euro im Zielfunktionswert erklären: es wird eine Maschine in der vierten Station installiert, was – laut den Ausführungen in Abschnitt 6.2.4 unter dem Punkt „**Strafkosten**“ – eben diesen Aufschlag auf den Zielfunktionswert nach sich zieht.

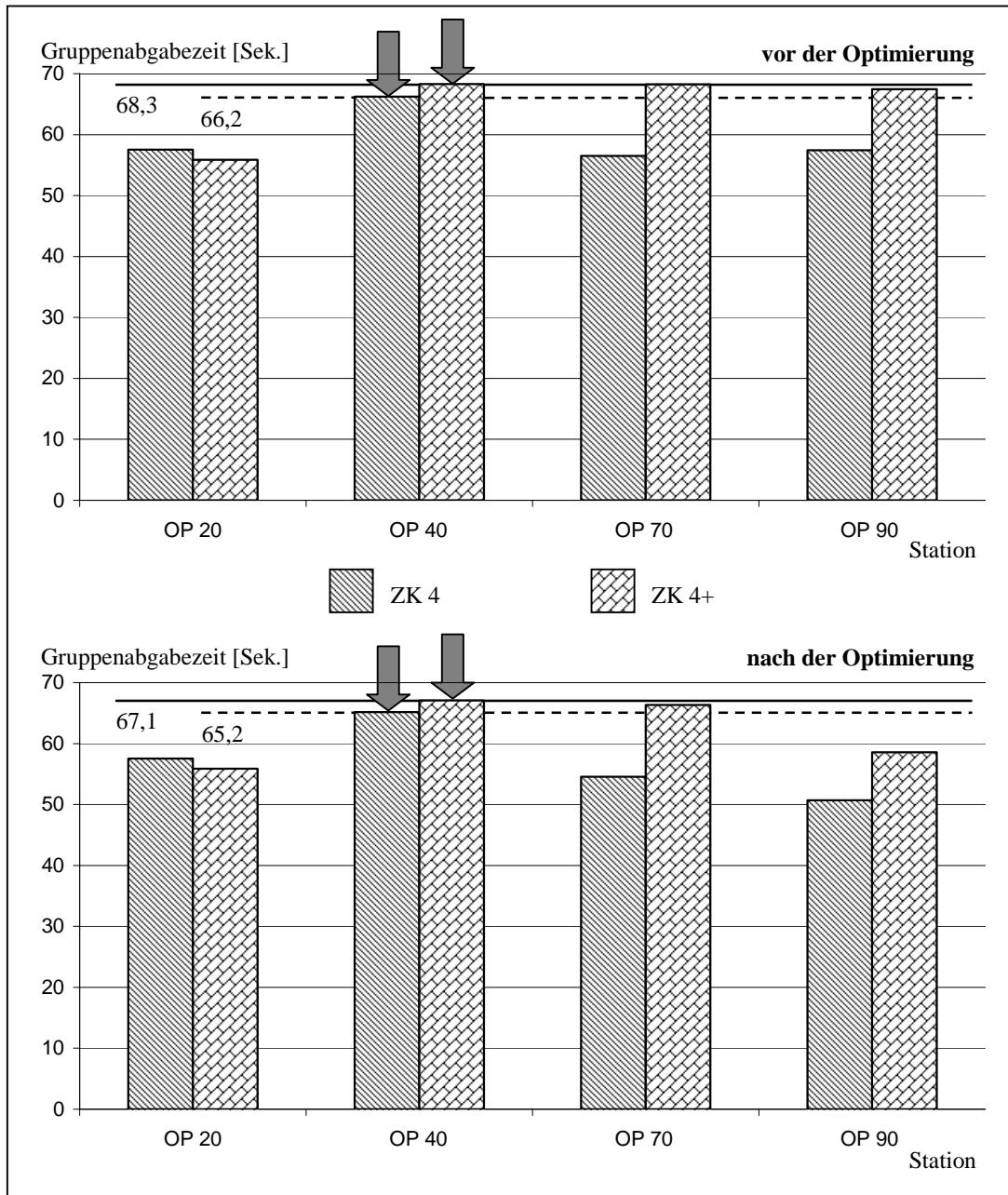


**Abbildung 7-29:** Konfiguration der Zylinderkopflinie nach der Optimierung

Die verbleibenden 1.000 Euro im Zielfunktionswert, die bisher noch nicht erläutert worden sind, lassen sich damit erklären, dass zwei **Prozessschritte** zu je 500 Euro auf andere Maschinentypen **verschoben** worden sind, was in diesem Beispiel gleichbedeutend ist mit der Verschiebung in eine andere Station, da in jeder Station ein anderer Maschinentyp installiert ist und diese Typen auch nicht ausgetauscht wurden.

Als **Taktzeit** für die beiden Zylinderkopfvarianten wurde vom Solver für den Standardkopf eine Zeit von 65,2 Sekunden angesetzt und für den ZK des leistungsgesteigerten Motors 67,1 Sekunden. Diese beiden Werte können aus den Gruppenabgabezeiten in Abbildung 7-30 abgeleitet werden (gekennzeichnet durch Pfeile). Werden sie ins Verhältnis gesetzt, so ergeben sich, übertragen auf das Programm- und Ressourcenmodell, wiederum die Kapazitätsnutzungsfaktoren von 1 und 1,03. Somit wurden die Taktzeiten zu gleichen Anteilen abgesenkt, obwohl der Produktionsausstoß des Standardkopfes einer deutlich größeren Steigerung unterworfen wurde, verglichen mit der des ZK 4+.

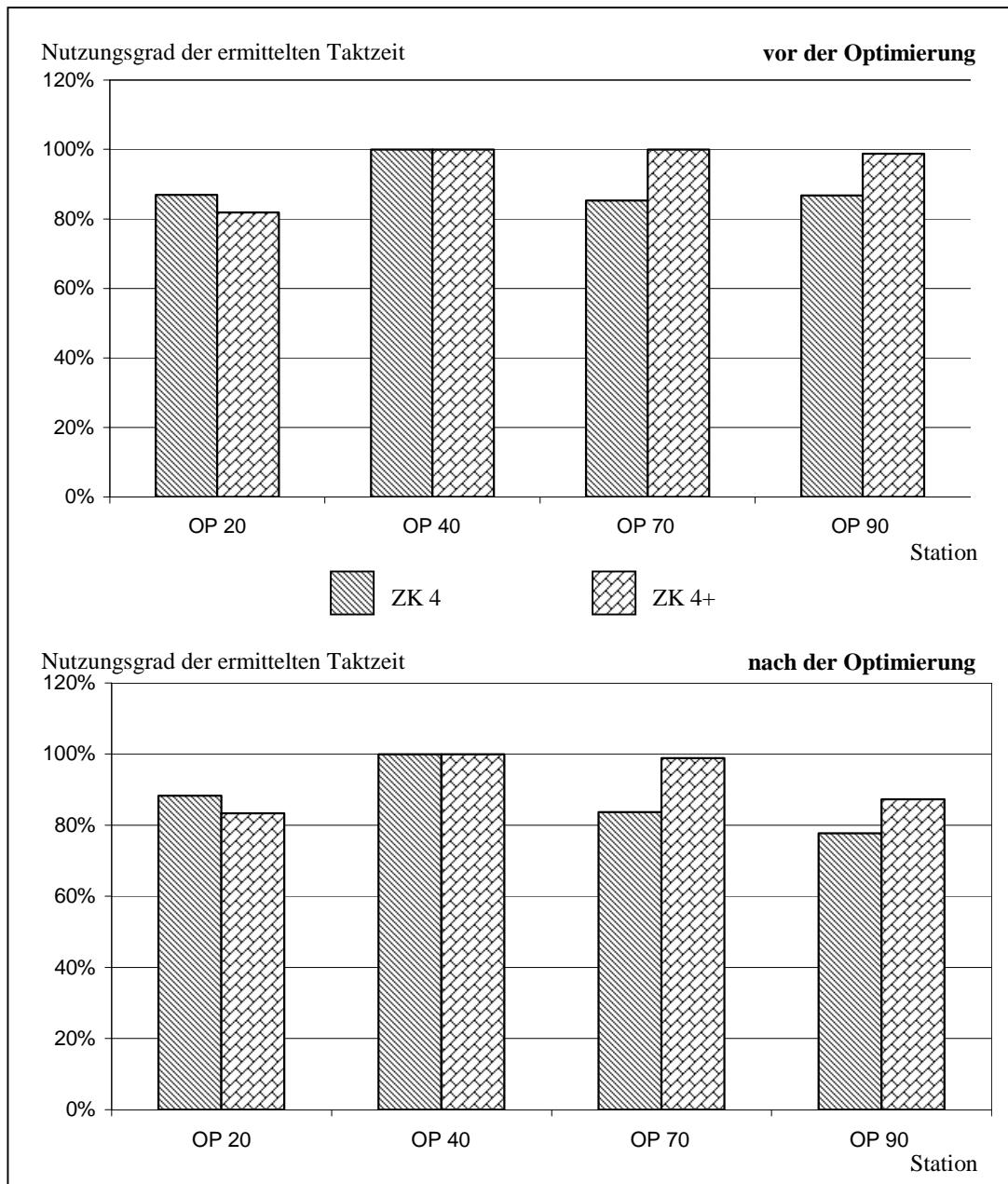
Im Ganzen wird die Linie zu 36,0% der verfügbaren Fertigungszeit zur Produktion des ZK 4 verwendet und zu 63,8% zur Herstellung des ZK 4+. In Summe ergibt sich damit eine Nutzung der Fertigungszeit von 99,8%.



**Abbildung 7-30:** Gruppenabgabezeiten und daraus abgeleitet die Taktzeiten für die beiden Produktvarianten

Werden die **Nutzungsgrade** der einzelnen Stationen bzgl. der verfügbaren Taktzeit pro ZK betrachtet, so fällt auf, dass durch das Hinzufügen einer weiteren Maschineneinheit in OP90 die gemittelte **Stationsauslastung** von etwa 92,4% auf rund 89,9% fällt. Eben-

so auffällig ist, dass bereits vor der Erhöhung der Produktionsmenge die OP40 diejenige Station war, die die höchste **Gruppenabgabezzeit** hatte und damit die Taktzeit vorgab. Trotzdem wurde dieser „Engpass“ durch die Optimierung nicht dadurch beseitigt, indem in dieser Station eine zusätzliche Maschine angefügt wurde, sondern es wurde stattdessen eine kostengünstigere Maschine in einer anderen Station hinzugestellt, wobei eine zwangsläufige Umordnung der Prozessfolge in Kauf genommen wurde.



**Abbildung 7-31:** Nutzung der Taktzeit für jede Station und jede Zylinderkopfvariante

So wurde Prozess 23 aus OP40 in die OP90 verschoben und Prozess 85 von OP70 in die OP40. Diese Lösung entlastet die Stationen 40 und 70, die beide bzgl. des ZK 4+ sehr

hoch ausgelastet sind, und belastet die Station 90, die durch die zusätzliche Maschine in der Lage ist, den Mehraufwand abzufangen.

Prozess Nr.	Verlagerung				Prozesszeit [Sek.]	
	von OP	nach OP	von Maschinentyp	nach Maschinentyp	vorher	nachher
23	40	90	5-Achs BAZ	1 Spindler HighSpeed-BAZ	42,04	37,13
85	70	40	Doppelspindler-BAZ	5-Achs BAZ	7,68	13,66

**Abbildung 7-32:** Prozessverschiebungen und deren Auswirkung auf die Bearbeitungszeiten

Die OP20 wurde während der Optimierung nicht verändert, wohingegen die Station 90 durch die Veränderungen nun noch freie Fertigungszeiten bereitstellt. Somit würde es sich bei einer weiteren Erhöhung der Produktionsmenge anbieten, zusätzliche Prozessverschiebungen zugunsten der hoch ausgelasteten Stationen 40 und 70 vorzunehmen und diese brach liegenden Kapazitäten zu nutzen, anstatt weitere Investitionen vorzunehmen.

Wie gewünscht finden sämtliche Bearbeitungen in der OP20 in einer Aufspannung statt, in allen anderen Stationen wird in der zweiten Aufspannung bearbeitet.

Somit kann diese generierte technische Anpassungsalternative in das übergeordnete Modul zur Programm- und Ressourcenplanung mit aufgenommen werden und es wird sich bei einem erneuten Optimierungslauf über dem Anlagenlebenszyklus herausstellen, ob diese Alternative wirtschaftlich konkurrenzfähig ist gegenüber dem Fremdbezug von Leistungen bzw. der Kapazitätsanpassung auf organisatorischer Ebene.

#### Exkurs: Durchführung der Optimierung unter Vernachlässigung der Losfertigung

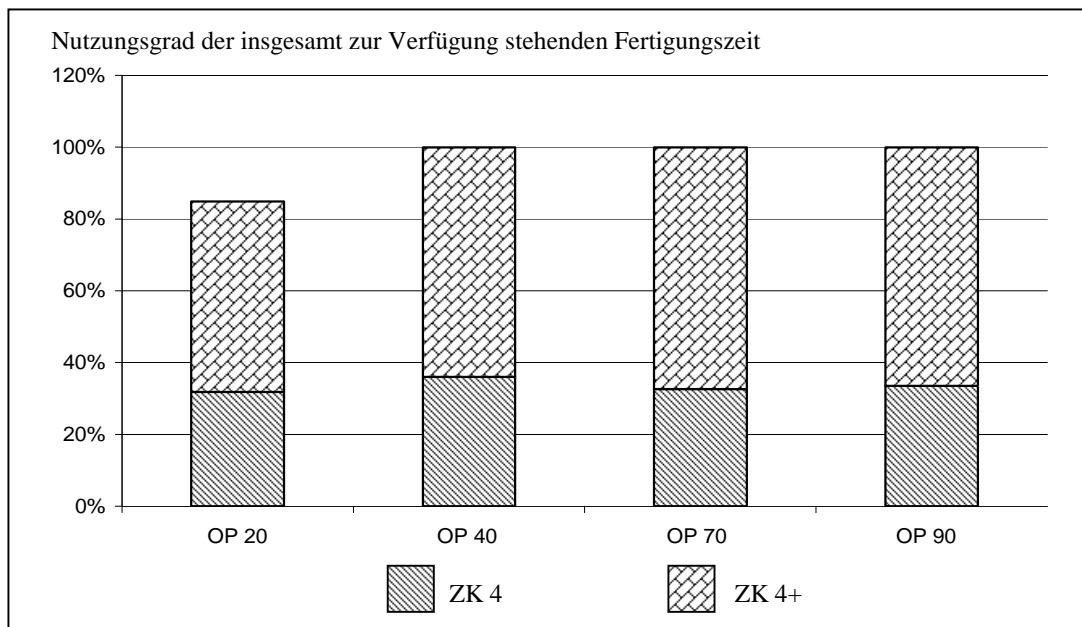
Wird das gleiche Problem unter der Einstellung „**Produktionstyp 1**“ gelöst, so wird **bewusst auf die Restriktion einer losweisen Fertigung verzichtet**. Dies bedeutet, dass die beiden ZK-Varianten in beliebiger Reihenfolge in die Linie eingeschleust und bearbeitet werden und dass zwischen den Stationen hinreichend große Puffer vorhanden sind, um eventuelle Verzögerungen in den Stationen aufzufangen, die dadurch entstehen, dass etwa mehrere leistungsgesteigerte ZK-Varianten nacheinander eingeschleust werden, gefolgt von mehreren Standardvarianten. Durch die längeren Bearbeitungszeiten an den ZK 4+ können sich vor den Stationen Stauungen bilden, die erst wieder aufgehoben werden können, wenn mehrere kürzere Bearbeitungen an den ZK 4 durchgeführt werden. Somit ist hier nur von Bedeutung, dass die insgesamt verfügbare Fertigungszeit in den Stationen nicht überschritten wird.

Als **Ergebnis** wurde ermittelt, dass in einem solchen Fall **keine Investition in Maschinen erforderlich** ist. Es reicht hingegen, eine **größere Anzahl an Prozessen neu anzuzuordnen**. Folgende Tabelle gibt hierüber Aufschluss:

Prozess Nr.	Verlagerung		Maschinentyp	Maschinentyp	Prozesszeit [Sek.]	
	von OP	nach OP			vorher	nachher
9	40	90	5-Achs BAZ	1 Spindler HighSpeed-BAZ	11,20	9,71
11	40	70	5-Achs BAZ	Doppelspindler-BAZ	6,94	3,73
15	40	70	5-Achs BAZ	Doppelspindler-BAZ	7,26	3,84
56	40	70	5-Achs BAZ	Doppelspindler-BAZ	10,88	5,87
69	40	90	5-Achs BAZ	1 Spindler HighSpeed-BAZ	10,03	8,64
73	40	70	5-Achs BAZ	Doppelspindler-BAZ	6,62	3,52
85	70	40	Doppelspindler-BAZ	5-Achs BAZ	7,68	13,66
87	70	90	Doppelspindler-BAZ	1 Spindler HighSpeed-BAZ	2,45	3,73
88	70	90	Doppelspindler-BAZ	1 Spindler HighSpeed-BAZ	2,99	4,48
100	90	70	1 Spindler HighSpeed-BAZ	Doppelspindler-BAZ	10,24	6,19
101	90	40	1 Spindler HighSpeed-BAZ	5-Achs BAZ	9,82	10,99

**Abbildung 7-33:** Prozessverschiebungen und deren Auswirkung auf die Bearbeitungszeiten für den Fall, dass die Losfertigung vernachlässigt wird

Es zeigt sich, dass die Stationen 20 bis 90 nahezu voll ausgelastet sind und die jeweiligen Zeitanteile bzgl. der gesamten Fertigungszeit für ZK 4 und ZK 4+ variieren (siehe Abbildung 7-34). Bei Verwendung des Produktionstyps 3 würden alle Balken einer ZK-Variante die gleiche Höhe haben, da in jeder OP die Einheitstaktzeit über alle Stationen entscheidend ist.



**Abbildung 7-34:** Stationsauslastung bei Vernachlässigung der Losfertigung

Abschließend lässt sich feststellen, dass vermutlich die Anzahl der zu verschiebenden Prozesse bei Vernachlässigung der Losfertigung etwas geringer ist als hier dargestellt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den Eingabeparametern als verfügbare Fertigungszeit lediglich Zeitanteile angegeben werden, die bereits um die Rüstzeiten bei Loswechseln bereinigt sind. Da bei Produktionstyp 1 kein Rüsten stattfindet, könnte hier die verfügbare Fertigungszeit etwas heraufgesetzt werden, was in den Stationen mehr Spielraum schafft und damit den Zwang zur Prozessverschiebung entschärfen dürfte.

## 7.5 Programm- und Ressourcenplanung unter Einbeziehung der durchgeführten Ressourcen- und Prozessplanung

Die aus der Ressourcen- und Prozessplanung erhaltene technische Anpassungsalternative für die ZK-Linie des flexiblen Systems wird unter folgenden Voraussetzungen in das übergeordnete Programm- und Ressourcenmodul eingepflegt:

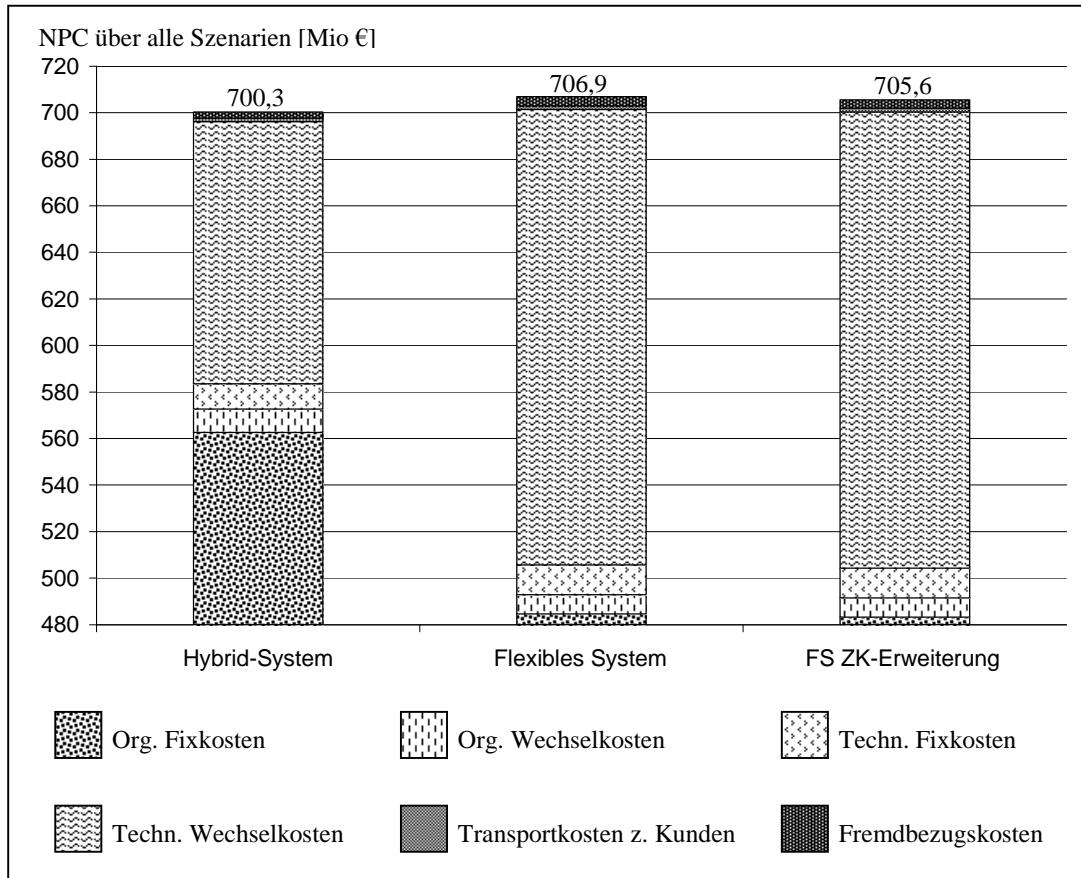
Als **Wechselkosten** vom technischen Zustand 1 nach 2 wird ein finanzieller Aufwand von 401 T€ veranschlagt, **technische und organisatorische Fixkosten bleiben unverändert**, da sowohl die Fläche für die Erweiterung bereits vorgehalten wurde, als auch die **Personaldecke** zur Bedienung und Wartung eines zusätzlichen BAZ **als ausreichend angesehen** wird. Wird diese technische Systemstufe bereits von Beginn an installiert, so fällt der Umstellungsaufwand aufgrund der Prozessverlagerung in Höhe von 1.000 € weg und es ergibt sich eine Investitionssumme von 40,4 Mio €.

**Abgesehen von diesen Änderungen** sind **keinerlei Modifikationen** an den Eingabedaten vorzunehmen und es kann ein neuer Optimierungslauf hinsichtlich der Lebenszyklusbetrachtung gestartet werden, dessen Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden.

Wie aus Abbildung 7-35 ersichtlich, hat die vorgenommene Veränderung an den Eingabedaten gemittelt über alle Szenarien **keinen großen Effekt auf die NPC**. Es kann lediglich eine **Kostensenkung von 1,3 Mio €** erreicht werden, was der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit des Hybrid-Systems nicht sonderlich schadet. Werden die Ergebnisse der einzelnen Szenarien für das erweiterte Fertigungssystem genauer betrachtet, so fällt auf, dass insbesondere bei denjenigen **Szenarien mit hohen Stückzahlen** und damit verbundenen hohen NPC-Werten ein **Kostenvorteil gegenüber dem unveränderten flexiblen System von bis zu knapp 4 Mio €** erreicht werden kann. Einsparungen treten jedoch nicht nur bei den Stückzahlstarken Szenarien auf, sondern auch bei allen anderen. Durch eine entsprechende Auswertung kann festgestellt werden, dass in **sämtlichen Szenarien** im Laufe des Lebenszyklus **auf die neu generierte Anpassungsalternative zurückgegriffen** wird, um teurere organisatorische Anpassungen oder Fremdbezug zu vermeiden bzw. in Dauer und Intensität einzudämmen. In manchen Szenarien belaufen

sich unter Berücksichtigung der erhöhten Wechselkosten die Einsparungen auf lediglich 200 bis 300 T€, was das Kostensenkungspotenzial im Durchschnitt etwas drückt.

In Summe gesehen kann also mit einem Aufwand von 401 T€ **in jedem Fall** über dem Lebenszyklus gesehen eine **Mitteleinsparung** generiert werden, **was die Anpassungsalternative rechtfertigt**.



**Abbildung 7-35:** Gegenüberstellung der Gesamtkosten

Die Aussage, dass gerade die kapitalintensiven Szenarien durch die generierte Anpassungsstufe über dem Lebenszyklus profitieren, wird in Abbildung 7-36 und Abbildung 7-37 bestätigt.

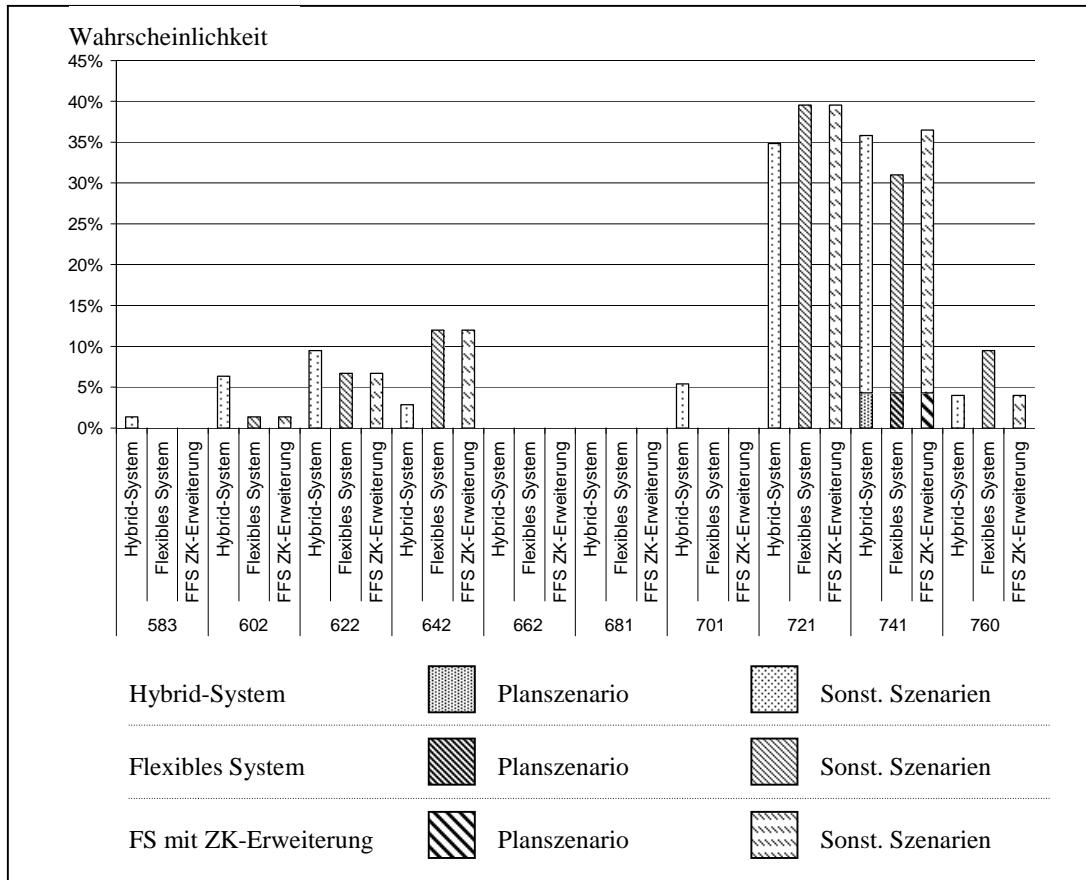


Abbildung 7-36: Wahrscheinlichkeiten über den Lebenszykluskosten

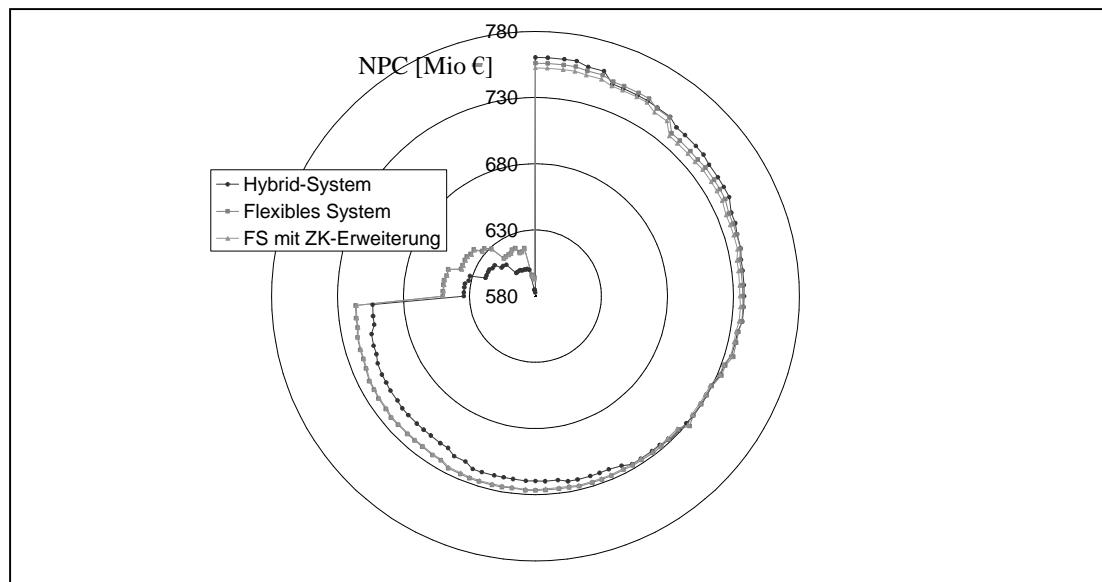


Abbildung 7-37: Aufsteigende Sortierung der Szenarien nach ihren NPC-Werten

In den Gesamtstückkosten für die kompletten Motoren und der Anlagenauslastung ergeben sich durch die zusätzliche Anpassungsalternative der ZK-Linie nur geringfügige Verschiebungen gegenüber dem unveränderten flexiblen System.

Zusammenfassend betrachtet kann gesagt werden, dass die **generierte Anpassungsalternative zwar für das flexible System sinnvoll und wirtschaftlich** ist, jedoch das **Hybrid-System über dem Lebenszyklus** noch immer einen **Kostenvorteil von 5,3 Mio €** aufweist.

Dieser Vorsprung kann lediglich durch **weitere Planungsläufe** und Anwendung des Ressourcen- und Prozessmodells für die verbleibenden Fertigungslinien sowie eine besondere Berücksichtigung der **stückzahlschwachen Szenarien** eingeholt werden, da hier die **Stärke des Hybrid-Systems** zu liegen scheint. Als Grund hierfür kann die relativ **preiswerte Produktionstechnik**, die in jedem Fall zu installieren ist, genannt werden in Kombination mit dem vergleichsweise hohen Personalbedarf, der immer dann besonders zu Buche schlägt, wenn die Produktion im mitarbeiterintensiven 3-Schicht-Betrieb läuft oder Wochenendschichten zum Einsatz kommen. Ist dies nicht der Fall – beispielsweise bei stückzahlschwachen Szenarien – so entstehen an dieser Stelle weit- aus geringere organisatorische (perioden-)fixe Kosten, wohingegen das flexible System die teure Fertigungstechnik in jedem Fall installieren muss und somit seinen Vorteil des gemäßigte Personaleinsatzes nicht ausspielen kann.

Werden die **Fertigungssysteme über dem zu beplanenden Lebenszyklus und darüber hinaus für den nachfolgenden Motor betrachtet**, so kommt ein großer **Vorteil des flexiblen Systems** zum Tragen: die darin eingesetzte Fertigungstechnik (5-Achs-BAZ in Kombination mit einer Bearbeitung von komplexen prismatischen Bauteilen in zwei Aufspannungen) wurde gerade im Hinblick auf den Nachfolgemotor in den Fertigungslinien integriert. Somit ist es nicht erforderlich, für den Nachfolger ein komplett neues Fertigungssystem zu installieren, was beim Hybrid-System jedoch zwingend erforderlich würde. Laut [Hieb91] haben Studien ergeben, dass die **Weiterverwendbarkeit für flexible Fertigungssysteme zwischen 50 und 80%** liegt, die **für Transferstraßen zwischen 5 und 40%**. Werden also für das hybride System, bestehend aus flexiblen Elementen und starren Transferstraßen, eine Weiterverwendbarkeit von 45% angenommen und für das flexible System lediglich eine von 75% sowie ansonsten ähnliche Kosten und Laufzeiten für den Betrieb der Anlage zugrunde gelegt, so ergeben sich Lebenszykluskosten für die nachfolgende Motorgeneration im Fall, dass zunächst das **hybride System** installiert wird, von **654 Mio €** und im Fall, dass gleich zugunsten des **flexiblen Systems** entschieden wird, von **558 Mio €**. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass spätestens für die nachfolgende Motorgeneration die neue Fertigungstechnik installiert werden muss und somit bei der jetzigen Entscheidung für das Hybrid-System nur später enorme Investitionen auf das Unternehmen zukommen. Die Entscheidung, zunächst das Hybrid-System zu installieren, stellt also den denkbar

schlechtesten Weg dar: zunächst wird zwar an der Fertigungstechnik und somit an den Investitionen gespart, was die verantwortlichen Entscheidungsträger in ein gutes Licht stellt, dafür stehen jedoch höhere Aufwendungen für den Betrieb (Personalkosten) an. Verglichen zum flexiblen System kann mit Auslaufen des zu beplanenden Motors eine kleine Einsparung verzeichnet werden. Zusätzlich wird aber mit Einführung der nachfolgenden Motorgeneration in die ohnehin unausweichliche und teure Fertigungstechnik investiert, was in der Gesamtbetrachtung keinen Sinn macht. Auch wenn die zu verwendende neue Fertigungstechnik bis zu deren Einsatz für die Nachfolgergeneration preislich sinken dürfte, so wäre ein Kostenvorteil von knapp 100 Mio € nur schwer einzuholen.

## 7.6 Kritische Würdigung der Modelle und der Planungswerkzeuge

Das mathematische **Optimierungsmodell zur Programm- und Ressourcenplanung** wurde konzeptionell erarbeitet, in MPL umgesetzt und eine Benutzeroberfläche in Excel sowie eine Ergebnisdatenbank erstellt (nähere Informationen zur Umsetzung finden sich im Anhang). Mittels des Gesamtsystems ist es möglich geworden, **schnell** in Planung befindliche **Fertigungskonzepte abzubilden** und ihre Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen aus dem Markt hin zu untersuchen. Basierend auf nur **wenigen Eingabeparametern** können die sich dabei ergebenden **Kosten über dem Lebenszyklus** errechnet werden. Zusätzlich fördert die systematische Ablage der benötigten Daten in Excel die **Transparenz** über den **aktuellen Planungsstand** sowie die **Berechnungsgrundlage**.

Bei einer projektbezogenen Anwendung konnte durch einen Vergleich der Ergebnisse mit den detaillierten Kostenberechnungen des Controllings festgestellt werden, dass die Güte der Resultate weit mehr als nur hinreichend ist, um in frühen Konzeptphasen eine Konzeptentscheidung ableiten zu können bzw. eine Richtung für weitere Untersuchungen und Entwicklungen hinsichtlich der Produktionsanlage vorgeben zu können. Zudem werden nicht nur Aussagen hinsichtlich der **Kosten** generiert, sondern auch hinsichtlich der optimalen **Zeitpunkte**, um das System anzupassen. Ebenfalls wird herausgestellt, welche Strategie die bessere ist: eigene **Kapazitäten** installieren, **Lagerhaltung** oder **Fremdbezug**. Eine manuelle Berechnung all dieser Variablen im Zuge der Konzepterstellung für alle denkbaren Marktentwicklungen würde einen enorm hohen Aufwand bedeuten, und kann von Planern nicht bewerkstelligt werden.

Damit ist ein **sehr hilfreiches Werkzeug** für die Planung von Fertigungssystemen geschaffen worden, das die dynamischen Eigenschaften von Markt und Fertigungssystem berücksichtigt.

Anzumerken bleibt lediglich, dass bei der Betrachtung sehr großer Produktionssysteme, bestehend aus mehr als 20 miteinander in Beziehung stehender Linien und damit verbunden deren Zwischenprodukte und/oder Endprodukte, einer Berechnung über deutlich

mehr als 100 Perioden und dem Einbezug von Lagerhaltung die Grenzen der Problemlösbarkeit erreicht sind. Die bisherigen mit dem Tool untersuchten Planungsprobleme haben sich jedoch stets als deutlich kleiner herausgestellt, oder waren an einigen Stellen derart voneinander entkoppelt, dass eine geeignete Systemabgrenzung gefunden werden konnte. Die **Anwendbarkeit** hat sich also **für realistische Probleme als gegeben erwiesen**.

Hinsichtlich des Werkzeugs für die Ressourcen- und Prozessplanung kann eine ähnliche Problematik identifiziert werden. Probleme vergleichbar mit dem, wie es in Abschnitt 7.4 dargelegt wurde, können noch innerhalb eines akzeptablen Zeitraums gelöst werden. Jedoch wird auch hier eine deutliche Erhöhung der Anzahl an Prozessschritten, Varianten, Stationen und Maschinentypen eine merkliche Anhebung der Lösungszeit bewirken.

Dabei spielen die **zugelassenen Freiheitsgrade** eine erhebliche Rolle. Im Beispiel wurde im Grunde nur die strikte Trennung von Bearbeitungen auf der Auslassseite des Zylinderkopfes vom Rest der Bearbeitungsprozesse erzwungen, ansonsten konnte fast jeder Prozess auf jeder Station und jedem Maschinentyp ausgeführt werden. Einschränkungen an dieser Stelle bewirken eine deutliche Problemvereinfachung und würden so eine komplette Optimierung für sehr viel größere Probleme zulassen. Theoretisch denkbar, praktisch jedoch auf keinen Fall möglich, ist in diesem Zusammenhang eine „**Grüne-Wiese-Planung**“, bei der noch keinerlei **Vorbelegung** von Stationen mit Prozessen und Maschinentypen vorgenommen wurde. Im vorgestellten Modell wird von einem gültigen Startzustand ausgegangen und lediglich Systemveränderungen werden kostenmäßig bestraft. Somit ist es das Beste, nur marginal auf die Fertigungslinie einzuwirken. Ohne diese Vorbelegung besteht die Notwendigkeit, insgesamt eine extrem große Veränderung am System vorzunehmen, nämlich nicht nur für alle Stationen den Maschinentyp festzulegen, sondern zusätzlich die komplette Prozessverteilung von Grund auf zu bewerkstelligen. Die dabei generierte Menge an Möglichkeiten übersteigt die Fähigkeiten von derzeit erhältlichen Sovern. Da jedoch das **Modell als Element zur Anpassungsplanung** von Fertigungssystemen entwickelt wurde, steht dieser Punkt dem ursprünglich vorgesehenen Einsatzfeld nicht entgegen.

Auch der **Vorranggraph** spielt bei der Problemkomplexität eine große Rolle. Wird kein Vorranggraph angegeben, so wird aus dieser Sicht eine Unmenge an Möglichkeiten geschaffen, Prozesse auf Stationen zuzuschreiben. Ein existierender Vorranggraph lässt ein beliebiges vertauschen der Prozessreihenfolge nicht zu und sorgt so für eine Einschränkung des Lösungsraums. Dabei wird angenommen, dass sich der Vorranggraph durch die zur Verfügung gestellten Fertigungsmaschinen nicht ändert. Innovative Fertigungstechnologien können es erforderlich machen, dass die Prozessreihenfolge an einigen Stellen geändert werden muss. So ist es etwa vorstellbar, dass durch eine andere Fertigungstechnologie die gemeinsame Bearbeitung von zwei Bauteilen zur Erreichung

der auferlegten Passgenauigkeit aufgegeben werden kann, was nicht nur die betreffenden Prozesse selbst, sondern auch nachfolgende Prozesse berühren kann. Auf diesem Gebiet könnten weitere Forschungsarbeiten anschließen.

Auch wurde nicht berücksichtigt, dass die **Bearbeitungsgeschwindigkeit** innerhalb einer Maschine **in gewissen Grenzen als variabel angesehen** werden kann. Im Rahmen der mechanischen Bearbeitung könnten z.B. Vorschubgeschwindigkeiten bei gleichzeitiger Drehzahlerhöhung der Bearbeitungsspindel etwas heraufgesetzt werden, um die gesamte Bearbeitungszeit innerhalb einer Station abzusenken. Jedoch hat sich bei einem Versuch gezeigt, dass die Lösungszeiten eines kleineren Problems durch eine integrative Behandlung dieses Aspektes im Modell nicht mehr eingefangen werden konnten und damit eine Anwendung für realistische Problemgrößen völlig ausgeschlossen werden musste.

Weiterhin wurde zunächst eine **Glättung der Stationsbelastungen** im Modell integriert, was sich jedoch als nicht sinnvoll erwiesen hat. Im Falle der Anpassung einer Fertigungslinie ist der Planer daran interessiert, mit möglichst geringem Aufwand ausschließlich die **notwendigsten Veränderungen** am System vorzunehmen, damit die vorgegebenen Stückzahlen und Varianten darauf gefertigt werden können. Eine gleichmäßige Stationsauslastung würde nur dann in die Betrachtungen eingeschlossen, wenn sie ohne zusätzlichen monetären Aufwand erreicht werden könnte. Die Wahrscheinlichkeit, dass während der Optimierung mehrere Konfigurationen denkbar sind, die sich durch den gleichen Investitionsaufwand sowie gleiche Wechselkosten auszeichnen und zudem in der Stationsauslastung merkliche Unterschiede aufweisen, so dass diese Unterschiede nivelliert werden müssten, wird als sehr gering eingeschätzt. Aus diesem Grund wurde dieser Gesichtspunkt nicht weiter verfolgt und zugunsten der Lösungsdauer aus dem Modell entfernt. Jedoch sind auch hier weitere Entwicklungsarbeiten denkbar, sollte dieser Punkt an Bedeutung gewinnen, etwa bei der Planung von Montagelinien.

Eine andere **Weiterentwicklung** könnte das Modell dahingehend erfahren, dass die Abhängigkeit der **Ausführbarkeit von Bearbeitungsprozessen in gewissen Bauteilaufspannungen** vom Maschinentyp hergestellt wird. Manche Maschinen mögen in der Lage sein, trotz einer ungünstigen Bauteilaufspannung aufgrund zusätzlicher Maschinenachsen sich die Werkstücke derart zu positionieren, dass eine Bearbeitung unter Umständen doch möglich ist. Von daher müsste die Ausführbarkeit der Prozesse in bestimmten Spannlagen noch zusätzlich vom Maschinentyp abhängig gemacht werden.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Nicht zuletzt durch die **Globalisierung** haben sich die **Wettbewerbsbedingungen** von Unternehmen international verschärft und zu einem extremen **Kostendruck** geführt. Lediglich Anbieter von exklusiven Luxus- und Nischenprodukten konnten sich bislang diesem Druck einigermaßen entziehen. Dies trifft jedoch nicht auf den deutschen Automobilbau zu, bei dem sich zunehmend die europäische, und insbesondere die asiatische Konkurrenz bemerkbar machen.

Der Wandel innerhalb des kompletten Auftragsprozesses muss zu einem neuen Planungsvorgehen führen, wie in [Meyr04] dargestellt wird: durch „online ordering“ sollen zukünftig die Kundenaufträge direkt in die auftragsbezogene Produktionsplanung aufgenommen werden, was praktisch den Kundenwunsch unmittelbar mit der Produktionsanlage koppelt. Die Vorlieben und **Wünsche der Kunden** haben im Automobilbau besonders innerhalb der letzten zehn bis 15 Jahre zu einer drastischen Steigerung der nachgefragten (Automobil-)**Varianten** gesorgt, was sich wiederum in einer **hochkomplexen Produktionsplanung** niederschlägt. Werden die Wünsche der Kunden nicht befriedigt, so tut dies ein Konkurrent. Indem sie befriedigt werden, müssen eine Vielzahl an Bauteilvarianten konstruiert, beplant, gefertigt, disponiert und montiert werden, was sich in entsprechenden „**Komplexitätskosten**“ niederschlägt. Hinzu kommt, dass Wünsche **schneller** und vor allem kostengünstiger geändert werden können als die entsprechenden Fertigungssysteme, die versuchen, diesen Wünschen nachzukommen. Dies drückt sich in einer ungeheuren **Dynamik der Nachfragemärkte** aus, die überdies mit einer **Unsicherheit** bzgl. der weiteren Entwicklung überlagert sind. Beide Faktoren machen ein Planungsschema nach althergebrachtem Muster unmöglich. Eine alleinige Ausrichtung der Planung an einer **Prognosestückzahl** über der Zeit muss unter diesen Umständen nahezu zwangsläufig zu Problemen führen. Erst durch Absicherung der Fertigungskonzepte gegenüber verschiedenen vorweggenommenen Marktentwicklungen kann den wirtschaftlichen Erfolg einer Investition und damit die optimale Planung der Anlage garantieren. Produkt und Markt definieren dabei sozusagen den **Flexibilitätsbedarf** in der Fertigung, das **Angebot ist durch die Reaktionsmöglichkeiten der einzelnen Fertigungskonzepte gegeben**. Durch eine Überlagerung von Flexibilitätsangebot und –nachfrage kann der optimale und damit kostengünstigste Grad an Flexibilität ermittelt und somit die Konzeptentscheidung unterstützt werden.

Dieses Vorgehen wurde in einer **umfassenden Planungsmethodik** verwirklicht, die sich in zwei Bestandteile gliedert: auf relativ grober Ebene lassen sich für frühe Planungsphasen über dem Anlagenlebenszyklus unter Voraussetzung diverser Marktentwicklungen die für jedes mögliche Fertigungskonzept bestgeeigneten Reaktionsmö-

lichkeiten herausfiltern, die auf einzelnen diskreten Anpassungsmöglichkeiten technischer und organisatorischer Natur beruhen. Eine **kostenmäßige Auswertung** schließt diese Untersuchung der Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen am Markt ab und gibt bei komplexen mehrstufigen und/oder verteilten Fertigungssystemen Aufschluss über das **Produktionsprogramm** und die einzelnen **Zustände der Fertigungsressourcen** über der Zeit.

Der zweite Bestandteil der herausgearbeiteten Planungsmethodik besteht darin, auf relativ detaillierter Ebene die **Anpassungsplanung auf der Prozessebene** zu vollziehen. Für eine einzelne Linie kann innerhalb der **Ressourcen- und Prozessplanung**, wiederum unter Vorgabe eines bestimmten Produktionsausstoßes, festgestellt werden, welche Anpassungen an diesem bestehenden System vorgenommen werden müssen, um die Produktionsvorgaben erfüllen zu können. Diese Anpassungen können lediglich auf kleinere **Verschiebungen, bezogen auf die Prozesszuordnung** zu Stationen, hinauslaufen. Sie können jedoch auch zusätzlich ein **punktuelles Eingreifen in die bestehende Systemkonfiguration** verursachen und damit zu **Nachinvestitionen** führen.

Die **Gesamtmethodik** ergibt sich, indem ein Rahmen um die beiden Bestandteile gespannt wird: ein „grober“ technischer Anpassungszustand einer Linie innerhalb des untersuchten Fertigungskonzeptes in der Programm- und Ressourcenplanung dient als Ausgangszustand für die Ressourcen- und Prozessplanung. Die darin gefundene neue Systemkonfiguration wird als zusätzlicher Anpassungszustand in das Modul zur Programm- und Ressourcenplanung zurücktransferiert.

Somit kann mittels der **Gesamtmethodik** auf grober und detaillierter Planungsebene eine **kostenbasierte Anpassungsplanung** durchgeführt werden, die die **Dynamik** und **Unsicherheiten des Nachfragemarktes** berücksichtigt.

Entwicklungsgrundlage war die **großserielle Fließfertigung von Aggregaten**. Es wurden hieraus die spezifischen Anforderungen in den erstellten mathematischen Modellen berücksichtigt. In welcher Hinsicht noch weitere Fragestellungen, insbesondere auf der Ebene der Ressourcen- und Prozessplanung, integriert werden können, ist bereits unter Punkt 7.6 aufgeführt.

Jedoch könnte die **grundsätzliche Planungsmethodik** in ihrem bestehenden Aufbau auch auf die fließbandgebundene (End-)**Montage** angewandt werden. Was das übergeordnete und mehr abstrakte Planungsmodul der Programm- und Ressourcenplanung anbetrifft, wären keinerlei Erweiterungen oder Änderungen nötig. Im Gegensatz dazu wäre eine direkte Anwendung des Moduls zur Ressourcen- und Prozessplanung auf Montagefragestellungen nicht ohne weiteres möglich. In einem solchen Fall müssten charakteristische Elemente der Montage, wie etwa die Abhängigkeit der Dauer von Montagevorgängen von Geschick und Fertigkeit des Montagemitarbeiters, modelliert werden oder der Einsatz von Springern, die die eigentlichen Montagemitarbeiter in ih-

ren Stationen unterstützen, wenn diese augenscheinlich durch Probleme während einer Bauteilmontage ihre vorgegebene Taktzeit nicht mehr einhalten können. Diese und einige weitere Modellanpassungen müssten vorgenommen werden, so dass sich vermutlich eine Neuentwicklung eher anbieten würde.

Bei einer Übertragung der Planungsmethodik und der erstellten Modelle auf ein anderes Produktspektrum müsste sichergestellt sein, dass die zugrunde gelegten Annahmen bzgl. der Fertigungsart, Fertigungstechnologie und Organisation sowie die Anforderungen aus Produkt und Markt derjenigen der großseriellen Aggregatefertigung entsprechen.

## A Anhang: Konzeptumsetzung unter Einbeziehung der erstellten Optimierungsmodelle

Bevor auf die erstellten Module zur Programm-, Ressourcen- und Prozessplanung eingegangen wird, soll an dieser Stelle die Gesamtstruktur aufgezeigt werden.

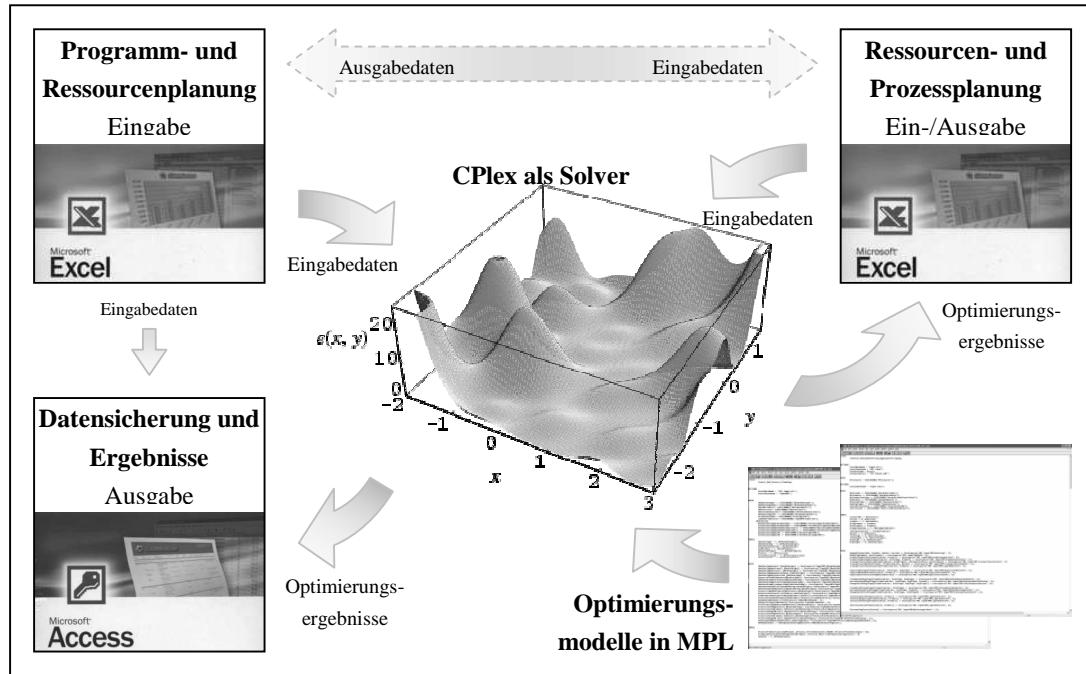


Abbildung A-1: Umgesetzte Gesamtstruktur

Da vielen Planern Microsoft **Excel als Standard-Planungswerkzeug** vertraut ist, wurden die Schnittstellen zwischen Mensch und Optimierung in Excel realisiert. Dies bedeutet, dass die Dateneingabe grundsätzlich in „gewohnter Umgebung“ stattfinden kann.

Auf Seiten der **Programm- und Ressourcenplanung** wurde, wie in den nachfolgenden Unterkapiteln näher ausgeführt, einerseits ein Modul zur Generierung von Marktszenarien integriert und andererseits die komplette Verwaltung von Fertigungskonzepten. Dies bedeutet, dass hier eine große Menge an Daten anfällt, die nur schwer in Excel gehandhabt und gespeichert werden kann. Aus diesem Grund wurde eine **Access-Datenbank** angegliedert, um sowohl die **Sicherung der Eingabedaten** zu gewährleisten, als auch die leistungsfähigen Darstellungs- und Auswertemöglichkeiten einer Datenbank für die Ergebnisse nutzen zu können. Aus diesem Grund schreibt der Solver,

der die Daten aus dem momentan geladenen Konzept in Excel bezieht, die Optimierungsergebnisse direkt in diese Datenbank zurück.

Auf Seiten der **Ressourcen- und Prozessplanung** wird lediglich mit Hilfe von Excel gearbeitet. Sowohl die benötigten Eingabeparameter als auch die Optimierungsergebnisse befinden sich in einer entsprechenden Datei, da hier die Funktionalitäten von Excel einerseits vollkommen ausreichend sind und andererseits die **aufkommende Datenmenge weitaus kleiner** ist.

Auf eine automatisierte Übertragung von Daten zwischen den beiden Excelmodulen wurde bewusst nicht eingerichtet, da das geringe Datenaufkommen zu übertragender Informationen den benötigten Programmieraufwand keineswegs gerechtfertigt hätte. Somit müssen die Daten an dieser Stelle von Hand übertragen werden.

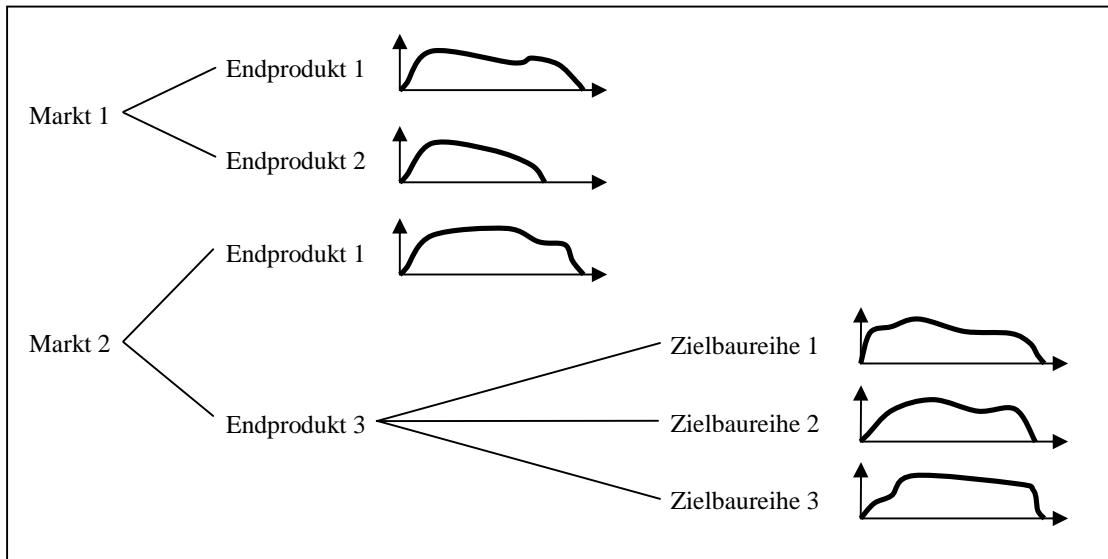
Die Optimierungsmodelle selbst sind mit Hilfe der **Modellierungssprache MPL** entstanden und in entsprechender Syntax verfasst. Die Software ermöglicht einen sehr einfachen und übersichtlichen Modellaufbau und lässt es zu, verschiedenste Solver anzusprechen. Da die zu lösenden Probleme in Abhängigkeit vom Planungsfall hochkomplex werden können, musste auf einen sehr leistungsfähigen **Solver** zurückgegriffen werden. Die Entscheidung ist auf **CPlex 10.0** gefallen.

Bei einem Optimierungslauf wird aus der Benutzeroberfläche in Excel heraus MPL im Hintergrund gestartet und das entsprechende Modell geladen. Anschließend werden die Eingabeparameter aus der Excel-Datei übernommen und zusammen mit dem Modell die Problemmatrix erzeugt, die letztendlich dem Solver zur Verfügung gestellt wird. Die Ergebnisse werden im Fall der Programm- und Ressourcenplanung direkt in der Datenbank ausgegeben, im Fall der Ressourcen- und Prozessplanung dagegen in der jeweiligen Excel-Datei.

## A.1 Modul zur Generierung von Marktszenarien

Mit Hilfe des Moduls zur Erzeugung von Marktszenarien können schnell und unkompliziert **Stückzahlunsicherheiten** einzelner Produkte sowie deren **Auftretenswahrscheinlichkeit** abgebildet werden. Dabei ist ohne Ausnahme das zu Grunde gelegte Konzept aus Kapitel 5.1 umgesetzt worden.

Zunächst kann bzgl. der Produkte unterschieden werden zwischen **Zielbaureihen** und **Endprodukten**. Endprodukte werden direkt am **Markt** nachgefragt und haben einen eigenen Nachfrageverlauf. Auch Zielbaureihen haben einen eigenen Nachfrageverlauf, jedoch werden mehrere Zielbaureihen zusammengefasst zu einem Nachfrageverlauf eines Endproduktes und sind nicht direkt am Markt nachgefragt. Somit sind definierte Zielbaureihen stets mit einem Endprodukt in Beziehung zu setzen. Nachfolgende Darstellung verdeutlicht diesen Zusammenhang.



**Abbildung A-2:** Zusammenhang von Zielbaureihen und Endprodukten im Scenario-Generator

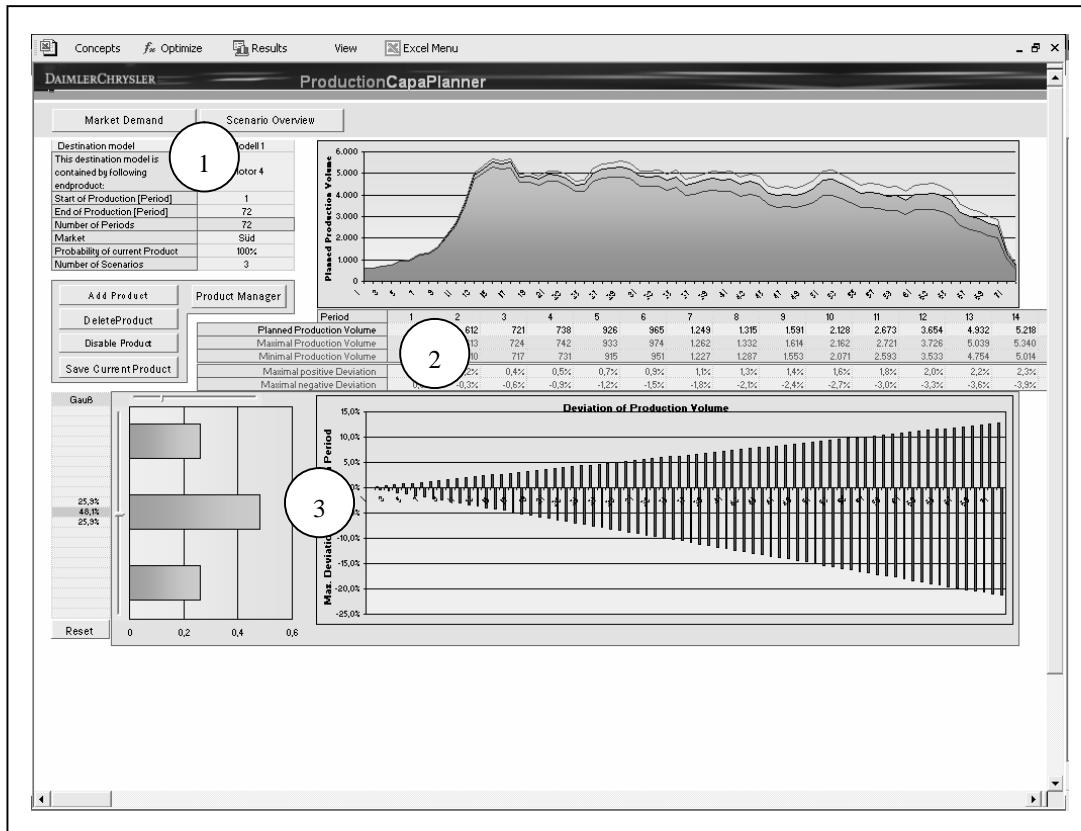
Abbildung A-3 zeigt die komplette Benutzeroberfläche des Scenario-Generator.

In **Sektor 1** wird die **Unterscheidung zwischen Endprodukten und Zielbaureihen** vorgenommen. Dieser Teil der Eingabemaske ist dynamisch gestaltet, d.h. es stehen je nach Eingabe oder Festlegung in einem der Felder spezifische Eingabemöglichkeiten in den anderen Feldern zur Auswahl. Generell muss mit der Definition eines Endproduktes begonnen werden, da sonst keine Zuordnung von Zielbaureihen zu Endprodukten vorgenommen werden kann.

Ist mit der Beschreibung eines Endproduktes begonnen worden, so muss im nächsten Schritt festgelegt werden, ob dieses Endprodukt in mehrere Zielbaureihen eingeht. Wird die Frage mit „Nein“ beantwortet, so kann anschließend die Eingabe von Start- und Endperiode erfolgen, sowie die Definition des Marktes bzw. Kunden, von dem die einzugebenden Stückzahlen nachgefragt werden. Ebenso wird die **Auftretenswahrscheinlichkeit** dieses Endproduktes abgefragt. Wird dieser Wert mit 100% angegeben, so ist dieses Produkt in jedem der später generierten Szenarien vertreten. Ein Wert kleiner als 100% führt dazu, dass auch Szenarien erzeugt werden, in dem die Nachfrage nach dem entsprechenden Produkt den Wert 0 hat.

Unter den fortlaufenden Perioden in **Sektor 2** sind die **Stückzahlen des Planszenarios** einzugeben, das in der Regel den Vertriebsprognosen entspricht. Darunter kann ein **Unsicherheitskorridor** in beliebigen Ausmaßen definiert werden, der die vom Planer erwartete Schwankungsbreite der Nachfrage ausdrückt. Das Diagramm rechts in **Sektor 3** veranschaulicht die **Eingabewerte des Korridors**.

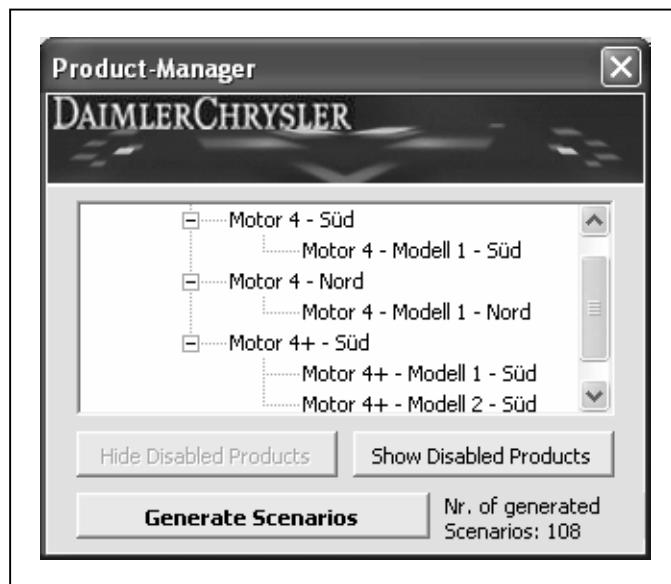
Ein Eingabewert bzgl. der zu erzeugenden Szenarien für diesen Stückzahlverlauf legt fest, wie viele Szenarien innerhalb dieses Korridors erzeugt werden sollen. Das Diagramm links in **Sektor 3** veranschaulicht einerseits die **Anzahl der Szenarien** und andererseits **deren Gewichtung**, oder anders, deren Wahrscheinlichkeit, aufgetragen über der Abszisse. Mit Hilfe von Schieberegeln können diese Wahrscheinlichkeiten angepasst werden.



**Abbildung A-3:** Eingabemaske des Scenario-Generator

Wurde die Frage, ob das momentane Endprodukt in mehrere Zielbaureihen eingeht, mit „Ja“ beantwortet, so ist lediglich der Markt zu definieren und die Eingabe für das vorliegende Endprodukt mit einem Speichervorgang abzuschließen, denn die eigentliche Definition von Stückzahlen und Unsicherheiten erfolgt auf der Ebene der Zielbaureihen. Die Eingabe auf der Ebene der Zielbaureihen erfolgt analog, jedoch müssen definierte Zielbaureihen einem Endprodukt zugeordnet werden, was am Ende eine Überlagerung aller Nachfrageverläufe und Korridore für dieses Endprodukt auf dem betrachteten Markt zur Folge hat.

Einen Überblick über den Zusammenhang von Zielbaureihe und Endprodukt bietet der Product-Manager. Auf der ersten Ebene sind die Endprodukte dargestellt und davon abzweigend die Zielbaureihen, in die das betreffende Endprodukt eingeht.



**Abbildung A-4:** Der Product-Manager als Werkzeug zur Produktverwaltung

Sind alle Nachfragedaten eingegeben, so wird über „Generate Scenarios“ die rechts vorausberechnete Anzahl an Szenarien erzeugt.

Abschließend kann der Benutzer eine Aufstellung aller generierten Szenarien und deren Eintrittswahrscheinlichkeit einsehen. Sollten zwei Szenarien identisch sein, so wird vom System automatisch ein Ersatzszenario mit der addierten Wahrscheinlichkeit gebildet. Sämtliche Szenarien bestehen aus der Angabe, welcher Kunde oder Markt welches Produkt in welchen Stückzahlen über der Zeit nachfragt und wie wahrscheinlich dieser Nachfrageverlauf ist.

## A.2 Modul zur Programm- und Ressourcenplanung

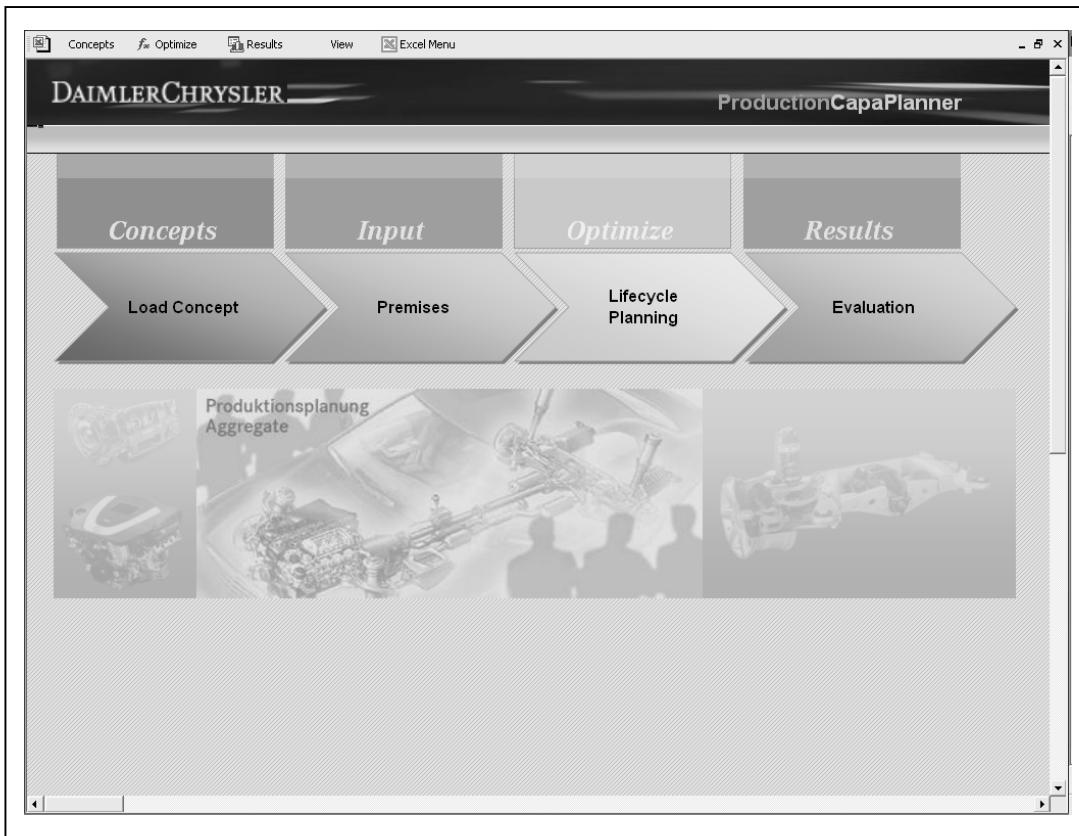


Abbildung A-5: Startseite des ProductionCapaPlanner

Das Tool, in dem die **Methode zur Programm- und Ressourcenplanung** realisiert ist, trägt den Namen „**ProductionCapaPlanner**“ (PCP).

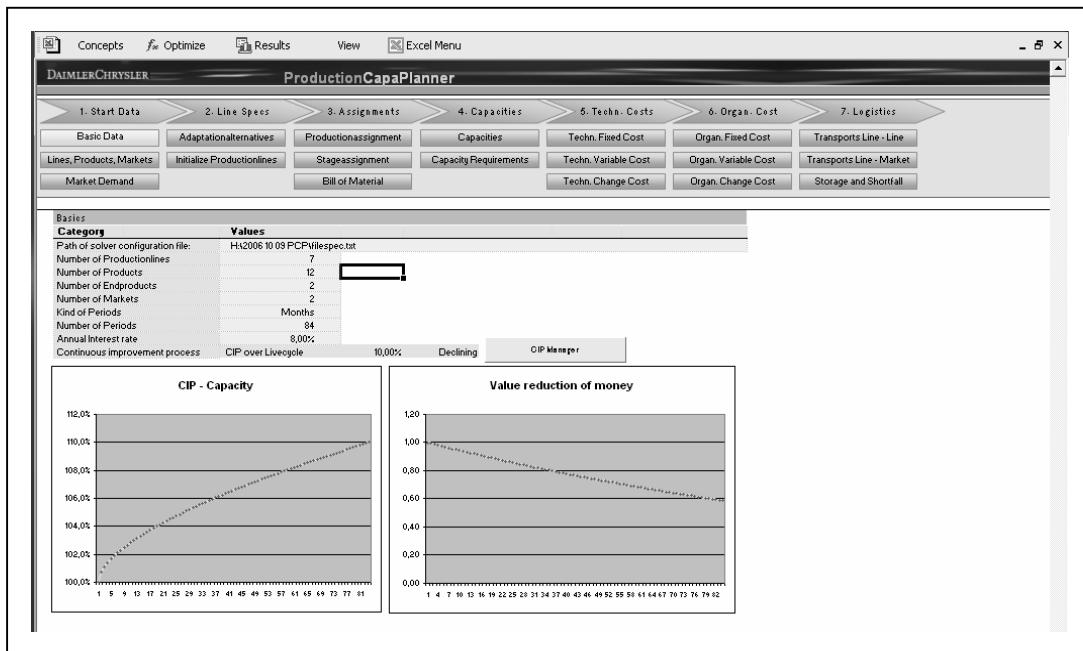
Im Groben besteht es aus vier Sektionen:

- Die erste dient zur **Verwaltung von Fertigungskonzepten**. Hier können neue Konzepte angelegt, alte gelöscht oder Zusatzinformationen zum jeweiligen Konzept abgespeichert werden.
- Der Eingabebereich dient zur **Spezifizierung von Konzepten**. Hier können alle charakteristischen Parameter eines Konzeptes, die für das Optimierungsmodell erforderlich sind, festgelegt oder später eingesehen und auch abgeändert werden.
- „Optimize“ startet die **Optimierung**. Die Daten des momentan in Excel geladenen Konzeptes werden zusammen mit dem MPL-Modell dem Solver zur Verfügung gestellt.
- Nach Beendigung der Optimierung kann über „Results“ auf die **Ergebnisse** in der Access-Datenbank zugegriffen werden.

### Festlegen der Eingabeparameter:

Die Anzahl an Produktionslinien, Produkten, Endprodukten, Perioden und Kunden bzw. Märkten bilden die Basisdaten. Diese Angaben dienen dem Optimierungsmodell zur **Indizierung**. Zur Berechnung des negativen Kapitalwertes wird der **Diskontierungsfaktor** benötigt, dessen Auswirkung über dem Lebenszyklus im rechten Diagramm von Abbildung A-6 dargestellt ist.

Es besteht mit Hilfe des „CIP-Managers“ die Möglichkeit, Managementvorgaben hinsichtlich einer **Kapazitätssteigerung** auf Grund von **kontinuierlichen Verbesserungen** am System zu berücksichtigen. Über dem Lebenszyklus der Produktionsanlage kann der prozentuale Anstieg der Fertigungskapazitäten eingegeben werden (linkes Diagramm).

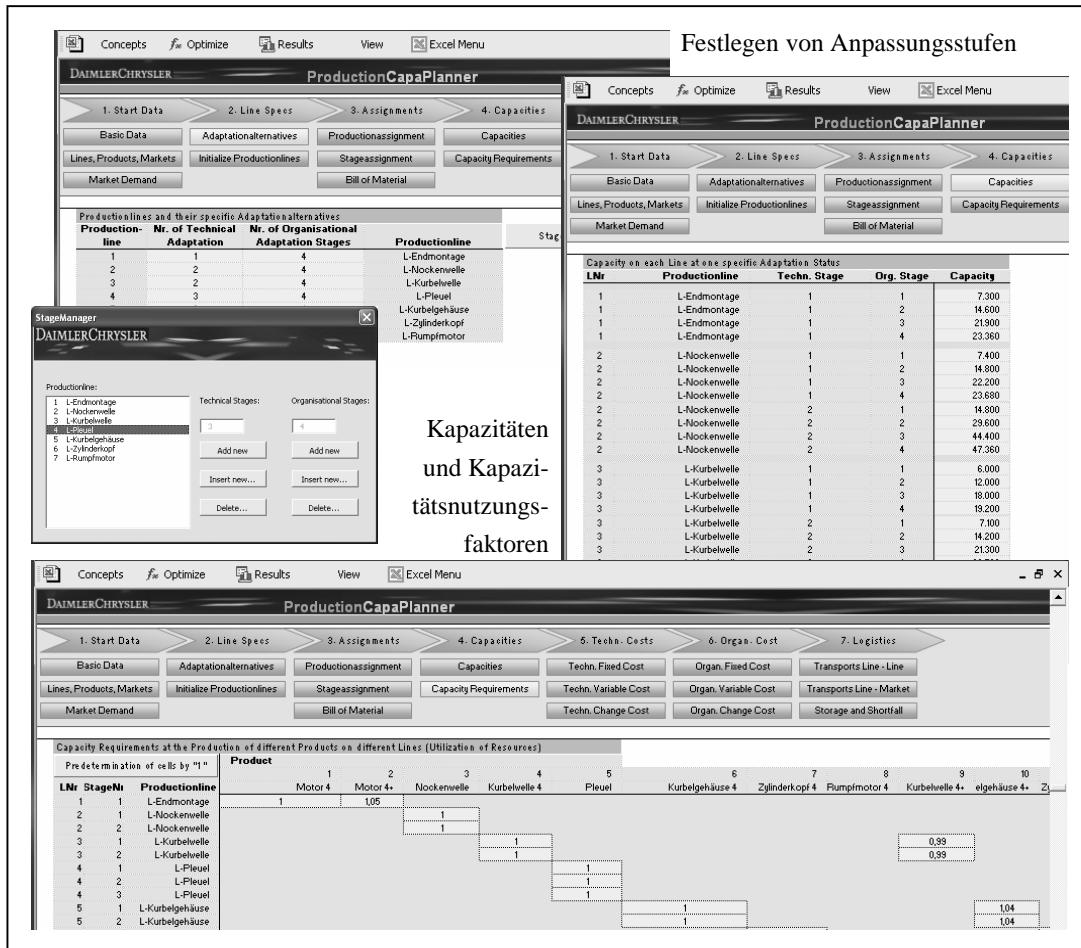


**Abbildung A-6:** Eingabe der Basisdaten

Ebenso zu den Basisdaten wird die Nachfrage nach den jeweiligen Endprodukten in den einzelnen Szenarien gezählt. An dieser Stelle ist das Modul zur Generierung von Markt-szenarien integriert worden.

Hinsichtlich der Fertigungslien ist anzugeben, wie viele technische und wie viele organisatorische **Anpassungsmöglichkeiten** vorhanden sind, um auf Marktveränderungen zu reagieren. Dies können entweder zuschaltbare Produktionsmodule sein oder organisatorische Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung.

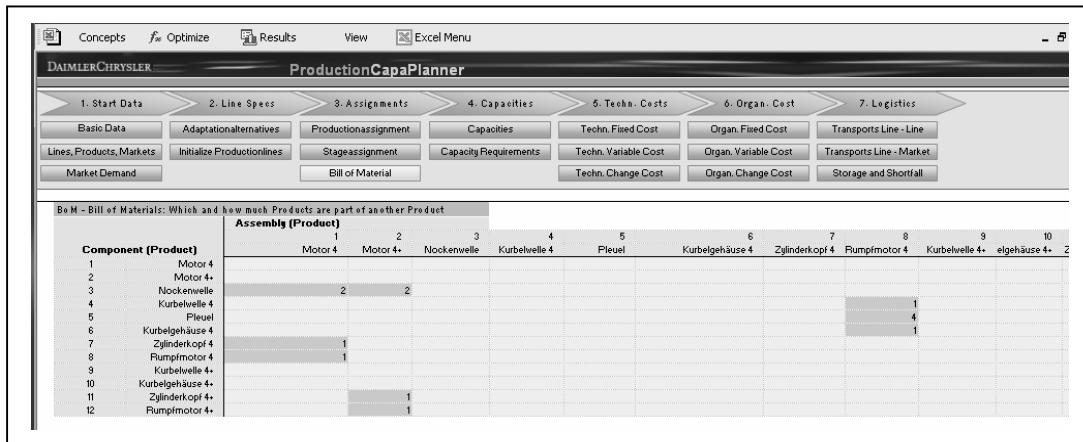
Zu beachten ist, dass einige Parameter, die im Weiteren eingegeben werden, von den definierten Ausbauzuständen abhängen. Dies macht es erforderlich, dass für den Fall sich ändernder Anpassungszustände ein Werkzeug zur Verfügung gestellt wird, das eine automatische Aktualisierung der betroffenen Tabellen bewirkt. Dies ist mit dem „Stage-Manager“ erfüllt, mit dessen Hilfe Ausbaustufen angefügt, eingeschoben oder gelöscht werden können.



**Abbildung A-7:** Definition diskreter Anpassungsstufen, der abzuleitenden Fertigungskapazität und des Kapazitätsnutzungsfaktors

Die **Kapazitäten** müssen für jede Linie in jeder Kombination aus technischem und organisatorischem Ausbauzustand vorgegeben werden. Kapazitäten sind in Stück anzugeben. Die eingegebene Stückzahl bezieht sich dabei auf das Standard-Produkt. Dieses Standard-Produkt hat den **Kapazitätsnutzungsfaktor „1“**. Laufen auf der betrachteten Linie mehrere Produkte mit unterschiedlichen Nutzungsfaktoren, so bildet dasjenige Produkt mit dem Faktor 1 die Referenz hinsichtlich der Fertigungskapazität.

In Abbildung A-8 ist die **Stückliste** abgebildet, die bei mehrstufigen und/oder verteilten Fertigungssystemen benötigt wird.



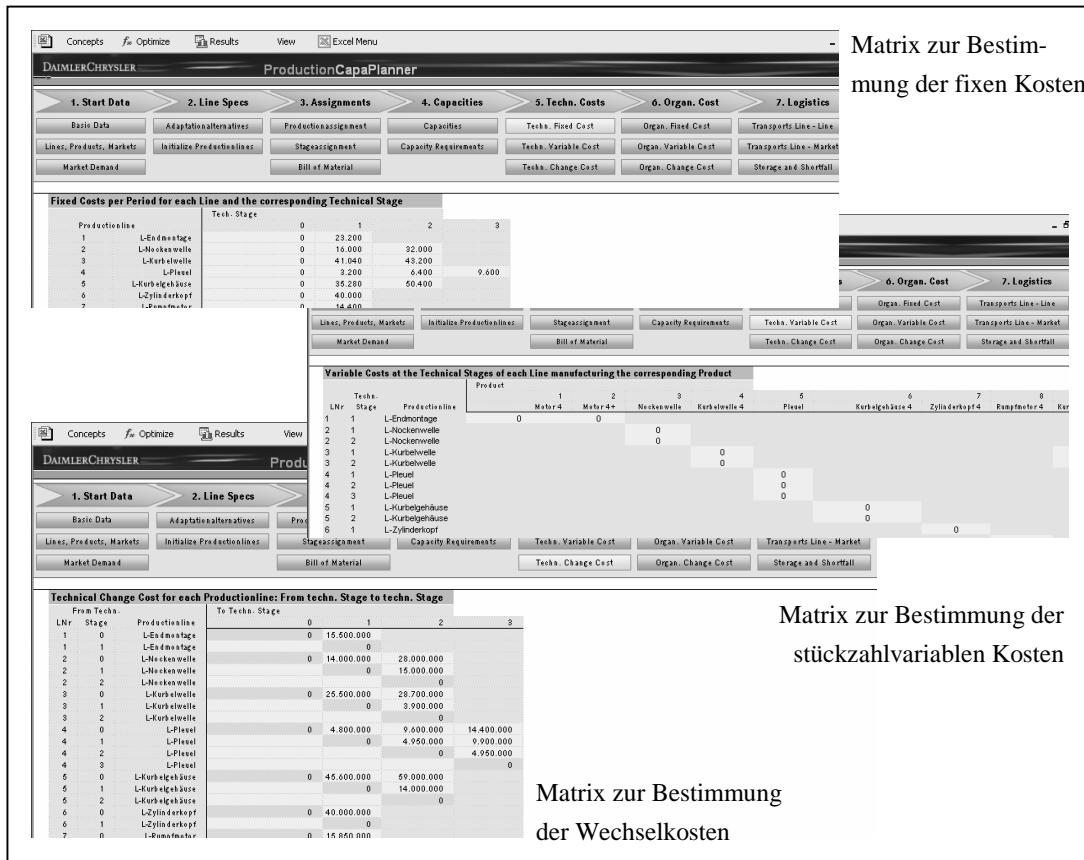
The screenshot shows the 'ProductionCapaPlanner' software interface. The top menu bar includes 'Concepts', 'Optimize', 'Results', 'View', and 'Excel Menu'. Below the menu is a navigation bar with seven steps: 1. Start Data, 2. Line Specs, 3. Assignments, 4. Capacities, 5. Tech. Costs, 6. Organ. Cost, and 7. Logistics. Under 'Start Data', there are buttons for 'Basic Data', 'Adaptationalternatives', 'Productionassignment', 'Capacities', 'Techn. Fixed Cost', 'Organ. Fixed Cost', 'Transports Line - Line', 'Lines, Products, Markets', 'Initialize Productionlines', 'Stageassignment', 'Capacity Requirements', 'Techn. Variable Cost', 'Organ. Variable Cost', 'Transports Line - Market', 'Market Demand', 'Bill of Material', 'Techn. Change Cost', 'Organ. Change Cost', and 'Storage and Shortfall'. The main area displays a 'BoM - Bill of Materials' table. The table has a header row with 'Component (Product)' and 'Assembly (Product)'. The 'Assembly (Product)' column lists: Motor 4, Motor 4+, Nockenwelle, Kurbelwelle 4, Pleuel, Kurbelgehäuse 4, Zylinderkopf 4, Rumpfmotor 4, Kurbelwelle 4+, Gehäuse 4+, and Zylinderkopf 4+. The 'Component (Product)' row lists: 1 (Motor 4), 2 (Motor 4+), 3 (Nockenwelle), 4 (Kurbelwelle 4), 5 (Pleuel), 6 (Kurbelgehäuse 4), 7 (Zylinderkopf 4), 8 (Rumpfmotor 4), 9 (Kurbelwelle 4+), 10 (Kurbelgehäuse 4+), 11 (Zylinderkopf 4+), and 12 (Rumpfmotor 4+). The table body contains numerical values representing the quantity of components required for each assembly part.

**Abbildung A-8:** Abbildung der Stückliste

Da mit Hilfe der Optimierung Lebenszykluskosten minimiert werden, müssen entsprechende Informationen zur **Kostenstruktur** des untersuchten Fertigungssystems vorliegen und dem System übergeben werden. Dabei gibt es zunächst drei verschiedene Grundarten an Kosten:

- **Fixkosten** werden als fixe Kosten je Periode angesehen. Hierzu zählen z.B. Flächenkosten
- **Variable Kosten** fallen mit jedem produzierten Stück an
- **Anpassungskosten** entstehen, wenn eine Linie im Laufe des Lebenszyklus umgebaut wird. Diese Anpassungskosten hängen davon ab, von welchem Systemzustand aus in welchen anderen Zustand gewechselt wird.

In Abbildung A-9 sind für alle drei Kostenarten die entsprechenden Eingabetabellen abgebildet.



**Abbildung A-9:** Eingabe von fixen und variablen Kosten sowie von Investitionen und Anpassungskosten

Kosten werden unterschieden nach ihrer Verursachung. Entstehen die Kosten aus der Produktionstechnik, so sind diese Kosten in Abhängigkeit vom technischen Ausbauzustand anzugeben. Werden sie jedoch aus der Organisation abgeleitet, so sind sie zusätzlich vom organisatorischen Ausbauzustand anzugeben.

Weitere Kostenbestandteile bilden **Logistik- und Fremdbezugskosten**. Werden bei einem mehrstufigen Fertigungssystem Zwischenprodukte von einer Linie zu einer nachfolgenden transportiert, so können die resultierenden Logistikkosten hieraus bei größeren Entfernungen einen beträchtlichen Teil der Gesamtkosten ausmachen, weshalb sie in frühen Konzeptphasen – insbesondere bei mehreren konkurrierenden Standorten – mit einbezogen werden müssen. Eine entsprechende Möglichkeit, diese Kosten je transportierter Einheit zu erfassen, stellt die in Abbildung A-10 oben gezeigte Tabelle dar.

Interne Logistikkosten:  
Kosten durch Transporte zwischen Fertigungslinien

Externe Logistikkosten:  
Kosten durch Transporte zum Kunden / Markt

Definition von Lager- und Fremdbezugskosten sowie die Art und Weise des Fremdbezugs („Network / Market“)

Abbildung A-10: Eingabe von Logistik- und Fremdbezugskosten

In die mittlere Tabelle können die Transportkosten für die Endprodukte zu den Kunden bzw. Märkten eingetragen werden.

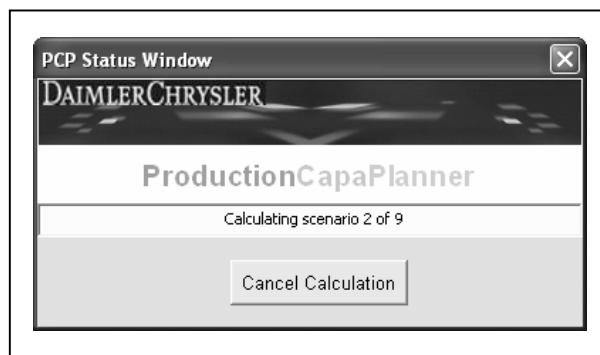
Im PCP kann eingestellt werden, ob jeder Fertigungslinie ein **Ausgangslager** zugeordnet werden soll oder nicht (untere Tabelle in Abbildung A-10). Falls die Option zur Entkopplung der Fertigungslinien durch Lager genutzt wird, muss vom Benutzer für jede Linie und jedes Produkt der **anfängliche Lagerbestand** und die jeweilige **Lagerkapazität** eingegeben werden. Auch die periodisch anfallenden **Lagerungskosten** je Einheit sind anzugeben. Entstehen stückzahlabhängige Kosten durch den Transport von der Linie ins Lager, so können auch diese angegeben werden.

Hinsichtlich des **Fremdbezugs** von Fertigungsleistung muss angegeben werden, welche Kosten dabei anfallen und an welcher Stelle der Fremdbezug stattfinden soll: innerhalb des Produktionsnetzwerkes oder in den letzten, den Kunden bzw. Markt beliefernden Fertigungslinien.

### Optimierung durchführen:

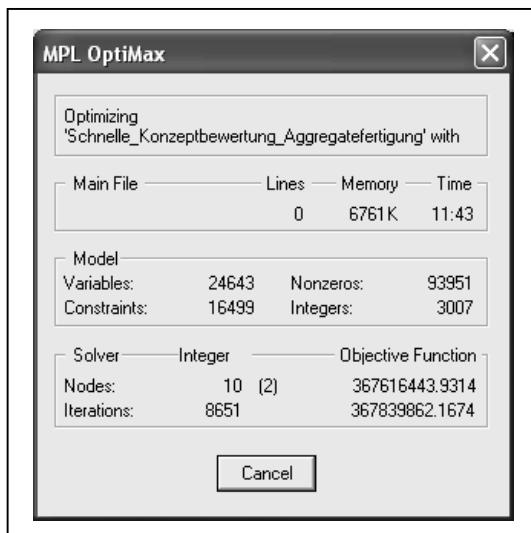
Sind sämtliche Eingabeparameter bestimmt und das Konzept gespeichert, so kann die Optimierung stattfinden („Optimize“ innerhalb der PCP-Menüleiste).

Die Optimierung kann jederzeit durch den Benutzer abgebrochen werden. Ein Statusfenster gibt den aktuellen Stand des Optimierungslaufes zurück.



**Abbildung A-11:** Statusfenster bzgl. des Fortschritts der gesamten Szenarienberechnung

Ein weiteres Fenster gibt Auskunft über diverse Kennzahlen der Optimierung sowie den momentanen Zielfunktionswert.

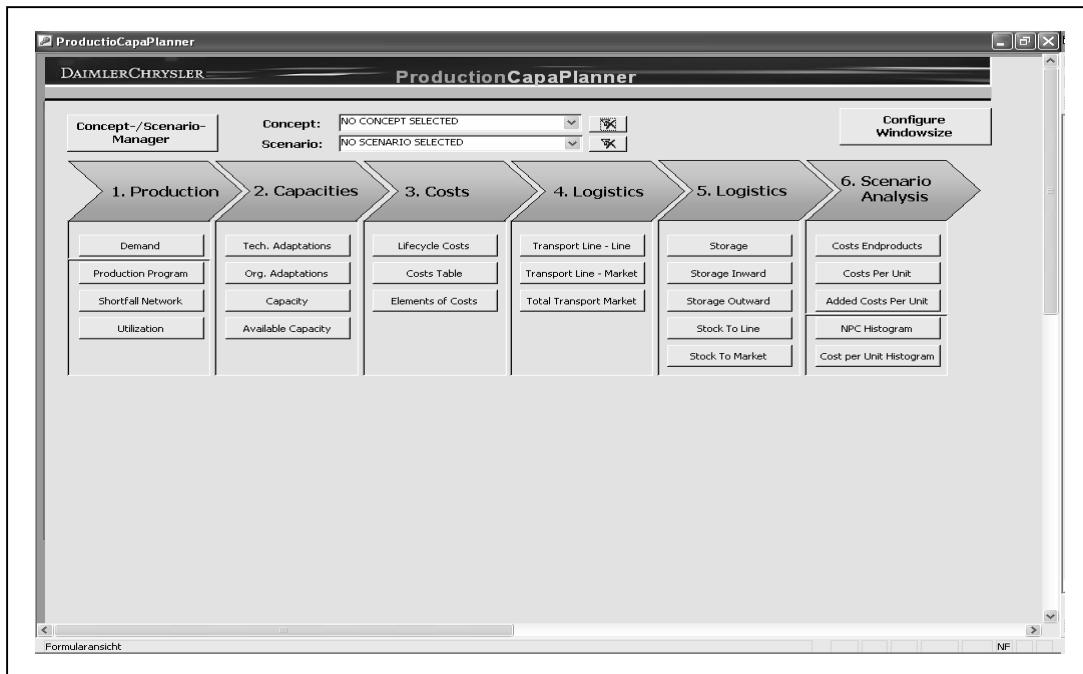


**Abbildung A-12:** Statusfenster bzgl. der Optimierung eines Szenarios

### Ergebnisdarstellung und -analysewerkzeuge:

Die beiden **Auswahlfelder** in der Mitte oben dienen zur **Filterung**. Soll in den Auswertungen lediglich ein Szenario für ein Konzept dargestellt werden, so können sämtliche Ergebnisdarstellungen daraufhin gefiltert werden, was manchmal bei Einzeluntersuchungen die Übersichtlichkeit von Diagrammen verbessert.

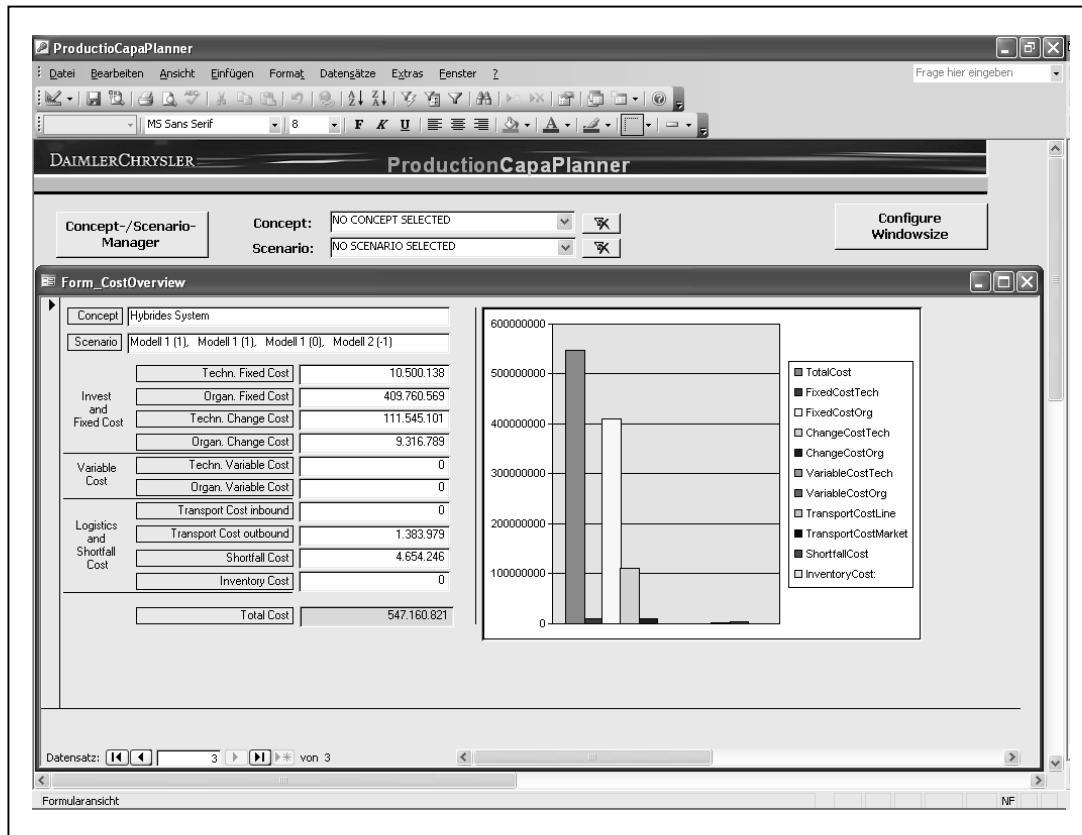
Der **Konzept- und Szenario-Manager** erlaubt eine detaillierte **Übersicht**, für welches Konzept welche Szenarien berechnet worden sind. Überdies können gezielt Ergebnisse aus der Datenbank gelöscht werden.



**Abbildung A-13:** Startseite der Ergebnisdatenbank

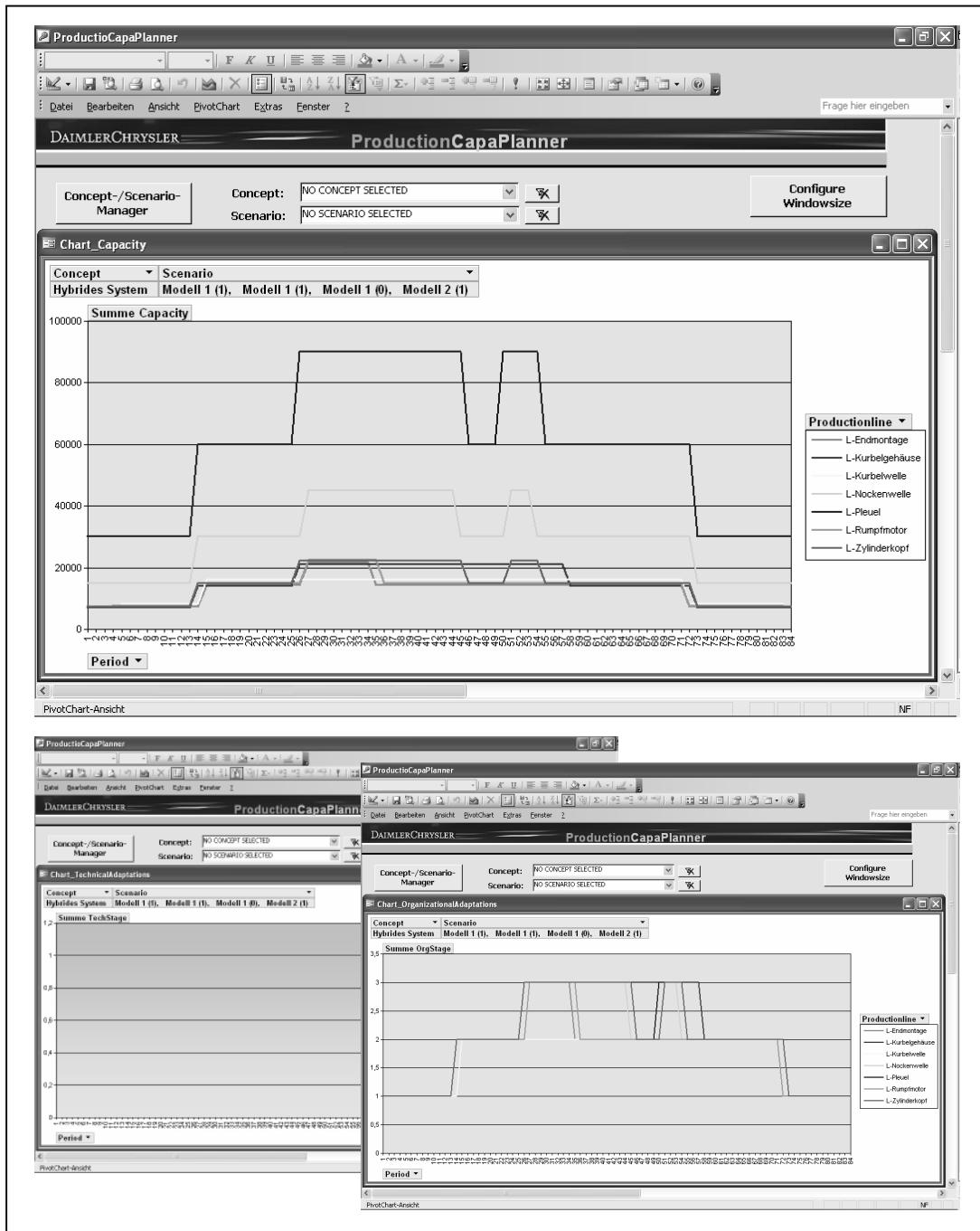
Im Folgenden sollen einige wenige Analysemöglichkeiten kurz aufgezeigt werden.

Als ersten Überblick kann der Benutzer eine Darstellung aufrufen, in der für jedes Konzept und Szenario die anfallenden **Lebenszykluskosten** gezeigt werden sowie deren **Zusammensetzung** aus den einzelnen Kostenkategorien. Dabei dienen die in Excel definierten Kostenblöcke (fixe und variable Kosten sowie Wechselkosten, sowohl technisch als auch organisatorisch) als Grundlage.



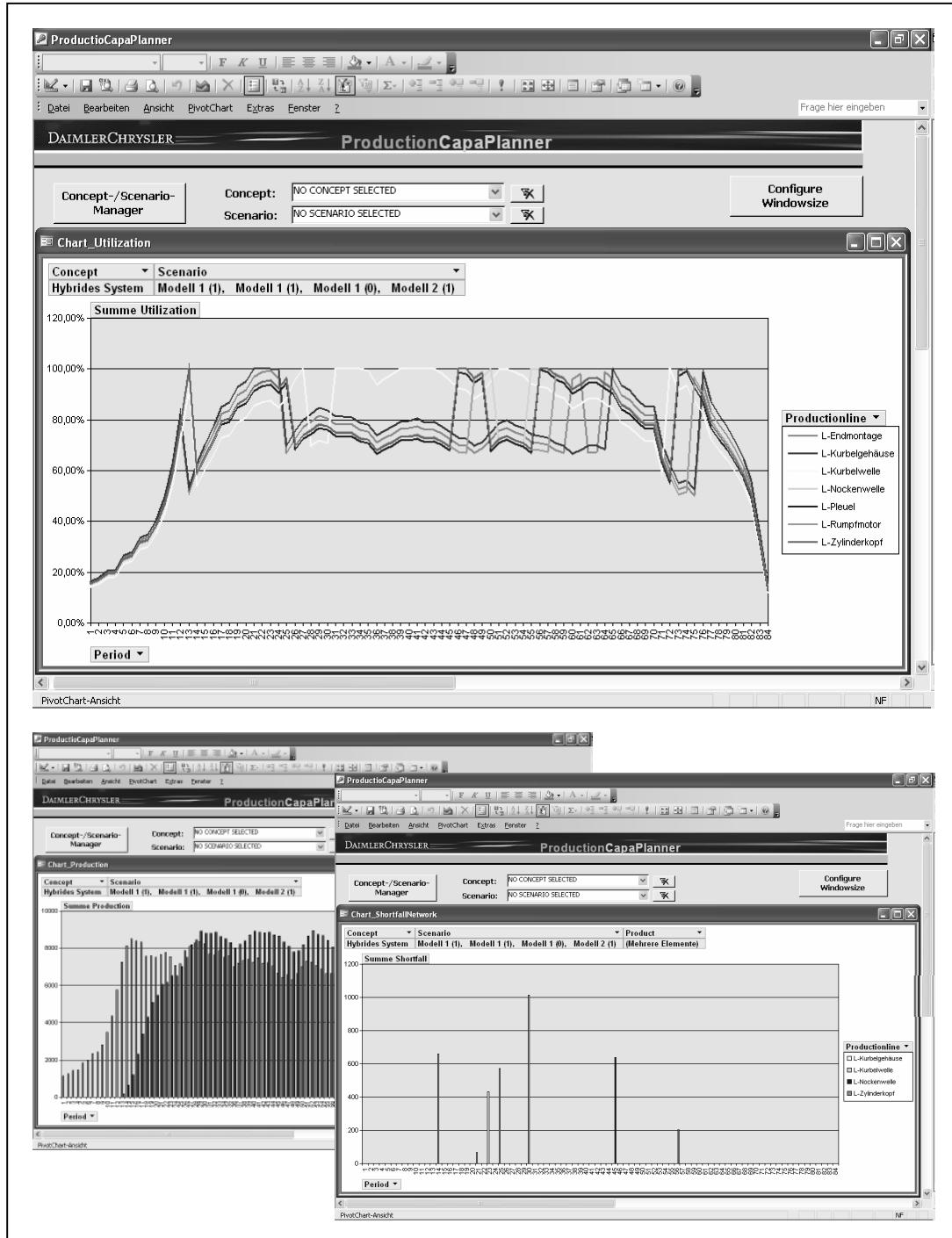
**Abbildung A-14:** Überblick über die Gesamtkosten und deren Zusammensetzung je Konzept und Szenario

Das Diagramm in Abbildung A-15 oben gibt bezogen auf den Anlagenlebenszyklus Auskunft über die einzurichtende **Kapazität** sowie die **Zeitpunkte**, zu denen etwaige Veränderungen vorgenommen sein müssen. Kapazitive Veränderungen lassen sich ableiten aus technischen und/oder organisatorischen Anpassungen am System, die in den beiden unteren Diagrammen aus Abbildung A-15 dargestellt sind.



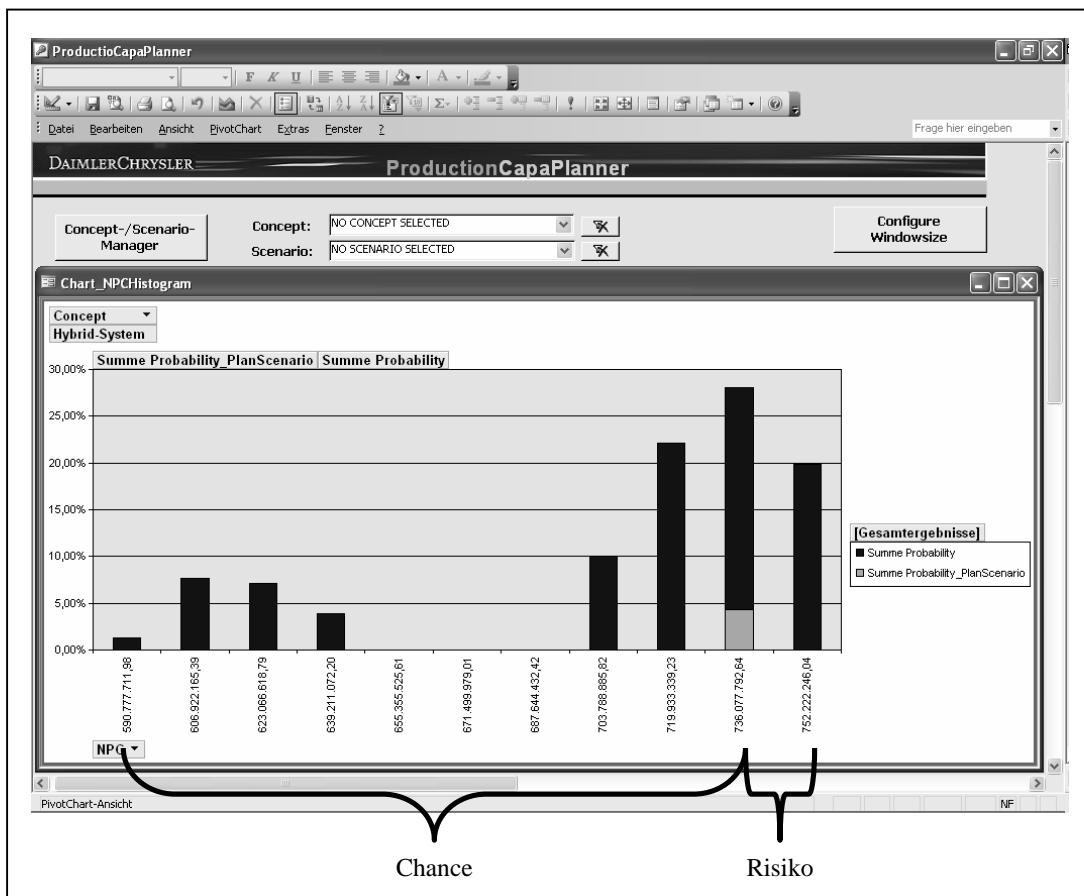
**Abbildung A-15:** Verlauf der vorhandenen Fertigungskapazitäten über dem Lebenszyklus und Darstellung der technischen und organisatorischen Anpassungspfade

Eng verknüpft mit der Frage nach den zu installierenden Kapazitäten sind die **Linienauslastung** und damit das zu fertigende **Produktionsprogramm**. Auf welcher Linie ist in welcher Periode wie viel von welchem Produkt zu fertigen, und welche **Fehlmengen** fallen dabei an.



**Abbildung A-16:** Anlagenauslastung, Produktionsprogramm und Fehlmengen

Eine Analyse, welche **Chancen/Risiken** mit einem speziellen Fertigungskonzept verbunden sind, wird durch das Diagramm in Abbildung A-17 möglich.



**Abbildung A-17:** Histogramm zur Darstellung der Kostenstreuung

Die gesamte **Spannbreite der Kostenstreuung ist repräsentativ für die Sensitivität eines Fertigungskonzepts** auf Marktschwankungen.

Insgesamt setzt sich die Spreizung aus den beiden Elementen „**Chance**“ und „**Risiko**“ zusammen, die beide ihren Ursprung im Cluster des Planszenarios haben. Ein Risiko besteht dafür, einen entsprechenden Aufschlag auf die Lebenszykluskosten des Planszenarios in Kauf nehmen zu müssen, sollten ungünstige Marktbedingungen herrschen. Chancen entstehen dagegen bei günstigen Marktbedingungen.

In diesem Zusammenhang interessant sind auch die zu erwartenden **Kosten pro Einheit**. Diese lassen sich ebenso in einem Histogramm (Abbildung A-18) für jedes Endprodukt anzeigen.



**Abbildung A-18:** Histogramm zur Darstellung der Stückkostenspreizung

Sollte Lagerhaltung bei der Optimierung zugelassen worden sein, so können detaillierte Auswertungen hinsichtlich der **Lagerbewegungen** sowie des **Lagerbestands** aufgerufen werden.

### A.3 Modul zur Ressourcen- und Prozessplanung

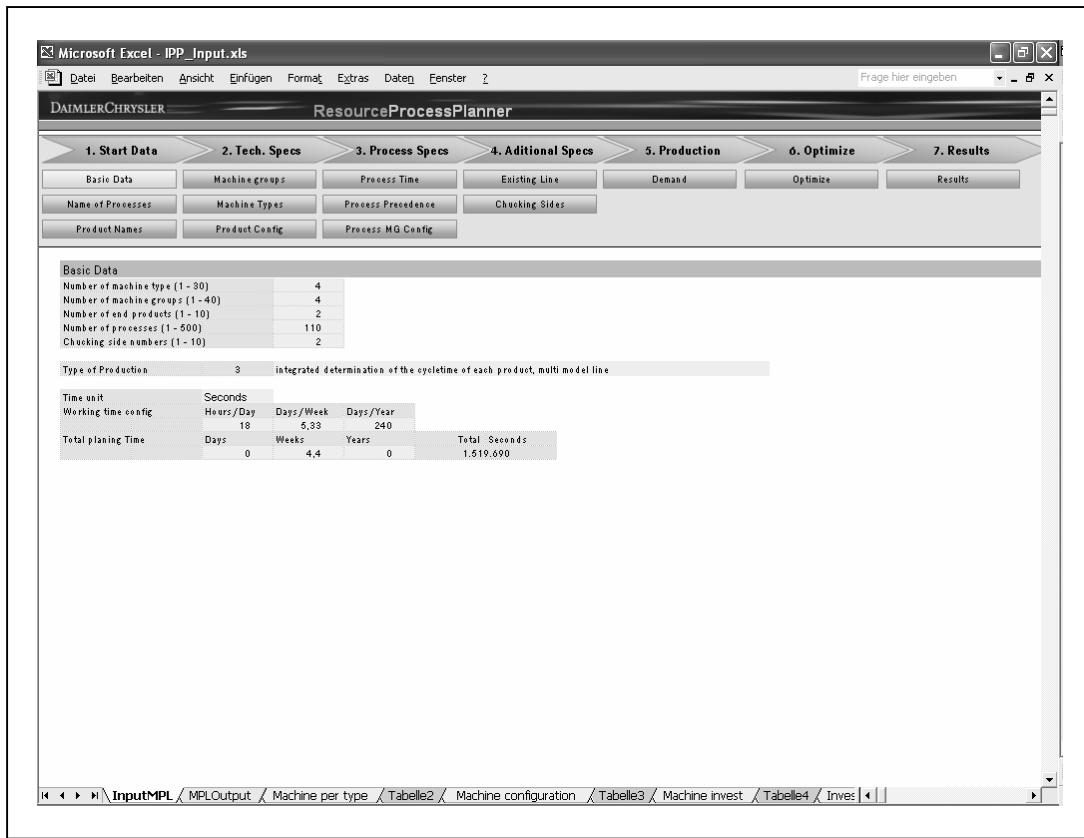


Abbildung A-19: Startseite des ResourceProcessPlanner: Darstellung der Basisdaten

Das Modell zur **Ressourcen- und Prozessplanung** ist in dem Tool „**ResourceProcessPlanner**“ (RPP) integriert. Rein äußerlich unterscheidet sich dieses zunächst nur wenig zum PCP, was letztendlich unterstreichen soll, dass beide als Bestandteile einer **übergeordneten Planungsmethodik** zu verstehen sind.

Wie bereits in der Konzeptbeschreibung dargelegt, dient eine **definierte Ausbaustufe des PCP als Ansatzpunkt für den RPP**. Erforderliche **Eingabeparameter** lassen sich sowohl **aus den Produkten** (Prozessdaten) als auch aus den **technischen Fertigungsressourcen ableiten**. Die Beschreibung der Ressourcen besteht im Groben aus den vorhandenen Maschinen in der betrachteten Linie, den Maschinentypen, die zum Systemumbau zur Verfügung stehen und den damit verbundenen Investitionen, sowie der bisherigen Gliederung der Linie in Bearbeitungsstationen, die evtl. aus mehreren parallelen Bearbeitungsmaschinen bestehen. Auf Seiten der Produkte bzw. Fertigungsprozesse stehen die bisherige Prozesszuordnung auf Stationen, Prozesszeiten und der Vorranggraph. Im Folgenden soll einerseits auf die realisierte Dateneingabe und andererseits auf die Ergebnisdarstellung eingegangen werden.

### Festlegen der Eingabeparameter:

Die Dateneingabe beginnt mit der Festlegung der **Basisdaten**. Hierzu zählen die **Anzahl an Maschinentypen**, wobei nicht unterschieden wird, ob sie bereits im System vorhanden sind oder ob sie lediglich zum Umbau zur Verfügung stehen, der **Anzahl an Bearbeitungsstationen**, die nicht gezwungenermaßen alle im vorhandenen System mit Maschinen besetzt sein müssen, der **Anzahl an Produkten** sowie der **Anzahl an Fertigungsprozessen und Bauteilaufspannungen**.

Ebenso zu den Basisdaten zählt die Information, welcher **Produktionstyp** (siehe Abschnitt 6.2.4) vorherrscht. Er kann aus einer Auswahlliste gewählt werden.

Da die Zeit im Modell des RPP eine entscheidende Größe darstellt, muss diese näher spezifiziert werden. Zunächst ist die grundsätzliche **Zeitmaßeinheit** festzulegen (Sekunden, Minuten, Stunden). Im Anschluss daran muss das Zeitfenster, das zur Durchführung aller benötigten Prozesse für alle Bauteile zur Verfügung steht, definiert werden. Dieses **Zeitfenster** darf lediglich aus der **Produktivzeit** bestehen, es dürfen also Zeiten zum Warten und Rüsten oder auch Ausfallzeiten nicht enthalten sein.

Danach werden die Stationen und die Maschinentypen näher spezifiziert. Zu den Informationen bzgl. der **Stationen** zählen die generelle **Maschinenorientierung** innerhalb jeder Station, die dort vorhandene **Hallenfläche** zur Installation von Fertigungsressourcen sowie die **Kapazität des installierten Transportsystems**. **Maschinentypen** werden grob durch ihren individuellen **Orientierungstyp**, deren **Platzbedarf** und den erforderlichen **Investitionsbedarf** für eine Maschineneinheit näher beschrieben. Die entsprechenden Eingabetabellen sind in Abbildung A-20 dargestellt.

**Machine configuration**

ID	Name	Available Capacity	Orientation Type	Transport System
1	OP20	150	1	1000000
2	OP40	2200	1	1000000
3	OP70	850	1	1000000
4	OP90	250	1	1000000

**Machine type configuration**

ID	Name	Invest. Cost	Demand. Sch.	Rel. Cost	Required Space (sqm)	Orientation Type	Orientation Percent
1	Spindel Standard-BAZ	300000	1	42	1	100%	
2	Spindel-Achse-BAZ	500000	1	22	1	100%	
3	Druckpumpe-BAZ	500000	1	56	1	100%	
4	Spindel HighSpeed-BAZ	400000	1	42	1	100%	

### Abbildung A-20: Spezifikation von Stationen und Maschinentypen

In Abbildung A-21 ist die Tabelle zur **Prozesszuordnung zu Produkten** dargestellt. Da nicht jeder Prozess zwingend an jedem Produkt stattfindet und auch die Ausführungshäufigkeit eines Prozesses von Produkt zu Produkt unterschiedlich sein kann, muss diesem Umstand in der Optimierung und damit in der Dateneingabe Rechnung getragen werden.

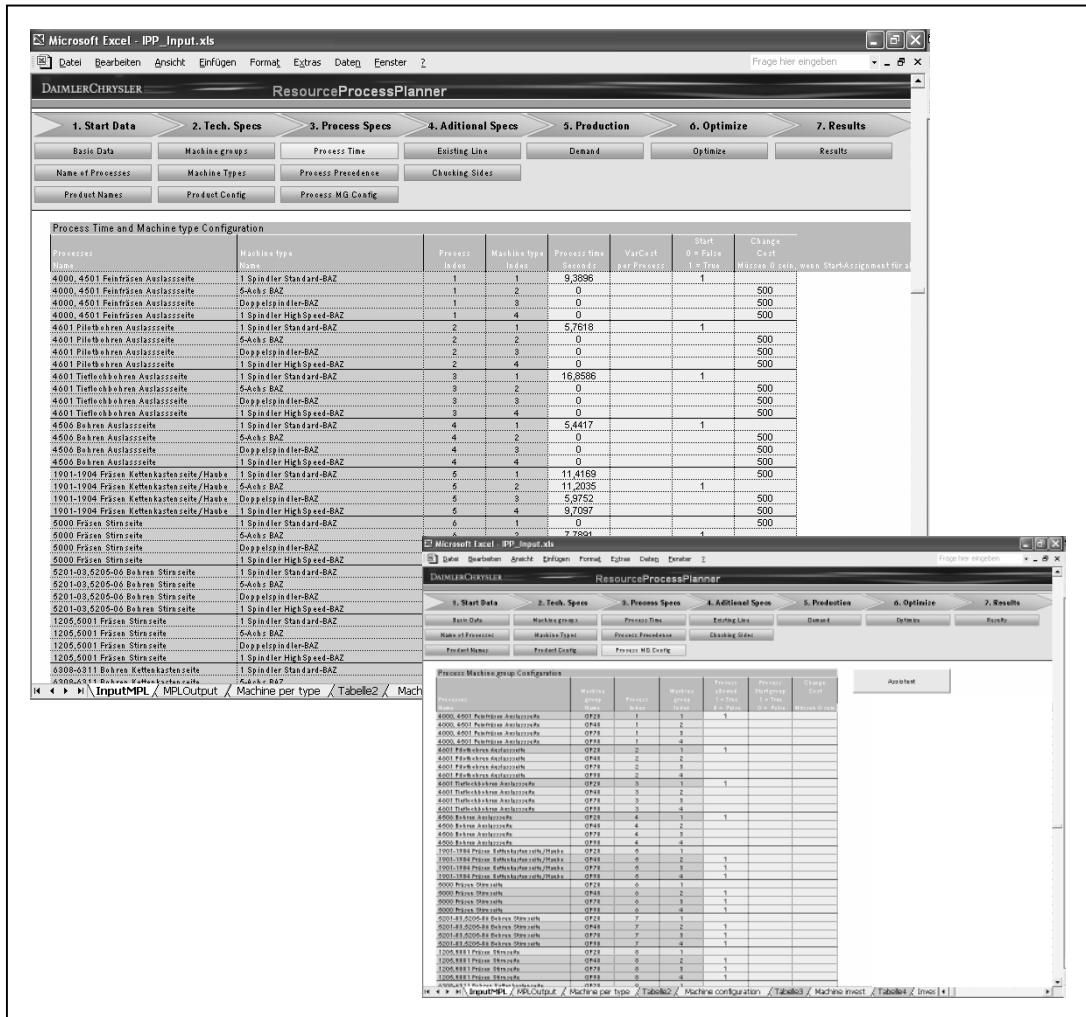
Product	Name	Process ID	Process Index	Number of Executions
Zylinderkopf 1	4000_4601 Bohren Außenseite	1	1	1
Zylinderkopf 1	4001_4601 Bohren Außenseite	1	2	1
Zylinderkopf 1	4401_4601 Tiefebohren Außenseite	1	3	1
Zylinderkopf 1	4500_4600 Bohren Außenseite	1	4	1
Zylinderkopf 1	1901_1904 Fräsen Kettensatzrolle/Hausk.	1	5	1
Zylinderkopf 1	1902_1904 Fräsen Kettensatzrolle/Hausk.	1	6	1
Zylinderkopf 1	5231_0_5205_0 Bohren Stirnseite	1	7	1
Zylinderkopf 1	1205_0_001 Bohren Stirnseite	1	8	1
Zylinderkopf 1	4598_4511 Bohren Kettensatzrolle	1	9	1
Zylinderkopf 1	4599_4511 Bohren Kettensatzrolle	1	10	1
Zylinderkopf 1	4501_4502 Bohren Kettensatzrolle	1	11	1
Zylinderkopf 1	4506_4507 Bohren Kettensatzrolle	1	12	1
Zylinderkopf 1	4401_4402 Bohren Kettensatzrolle	1	13	1
Zylinderkopf 1	4301_4305 Bohren Kettensatzrolle	1	14	1
Zylinderkopf 1	4000_4600 Bohren Kettensatzrolle	1	15	1
Zylinderkopf 1	0401_Bohren Kettensatzrolle	1	16	1
Zylinderkopf 1	1901_1904 Fräsen Kettensatzrolle	1	17	1
Zylinderkopf 1	4308_0_0 Tiefebohren Kettensatzrolle	1	18	1
Zylinderkopf 1	4308_4309 Bohren Kettensatzrolle	1	19	1
Zylinderkopf 1	0301_0_001 Bohren Kettensatzrolle	1	20	1
Zylinderkopf 1	4308_4311 Bohren Kettensatzrolle	1	21	1
Zylinderkopf 1	310_3_108 Bohren Einlassseite	1	22	1
Zylinderkopf 1	310_3_108 Bohren Einlassseite	1	23	1
Zylinderkopf 1	310_3_108 Bohren Einlassseite	1	24	1
Zylinderkopf 1	470_1_4702 Bohren Einlassseite	1	25	1
Zylinderkopf 1	3000 Fräsen Einlassseite	1	26	1
Zylinderkopf 1	310_1_3108 Fräsen Einlassseite	1	27	1
Zylinderkopf 1	370_1_0_3705 Bohren Einlassseite	1	28	1
Zylinderkopf 1	3602 Bohren Einlassseite	1	29	1
Zylinderkopf 1	3603 Bohren Einlassseite	1	30	1
Zylinderkopf 1	3604 Bohren Einlassseite	1	31	1
Zylinderkopf 1	3401_0_0 Bohren Einlassseite	1	32	1
Zylinderkopf 1	3401_0_0 Bohren Einlassseite	1	33	1
Zylinderkopf 1	3401_0_0 Bohren Einlassseite	1	34	1
Zylinderkopf 1	3401_0_0 Bohren Einlassseite	1	35	1

Abbildung A-21: Zuordnung von Prozessen zu Produkten durch Festlegung der Ausführungshäufigkeit von Prozessen bei den Produkten

Daneben muss festgelegt werden, welcher **Prozess auf welchem Maschinentyp** stattfinden kann, bzw. wie viel Zeit dabei in Anspruch genommen wird. Eine „0“ in der Tabelle aus Abbildung A-22 steht dabei für „kann nicht ausgeführt werden“, jede andere Eingabe steht für die benötigte **Prozesszeit**.

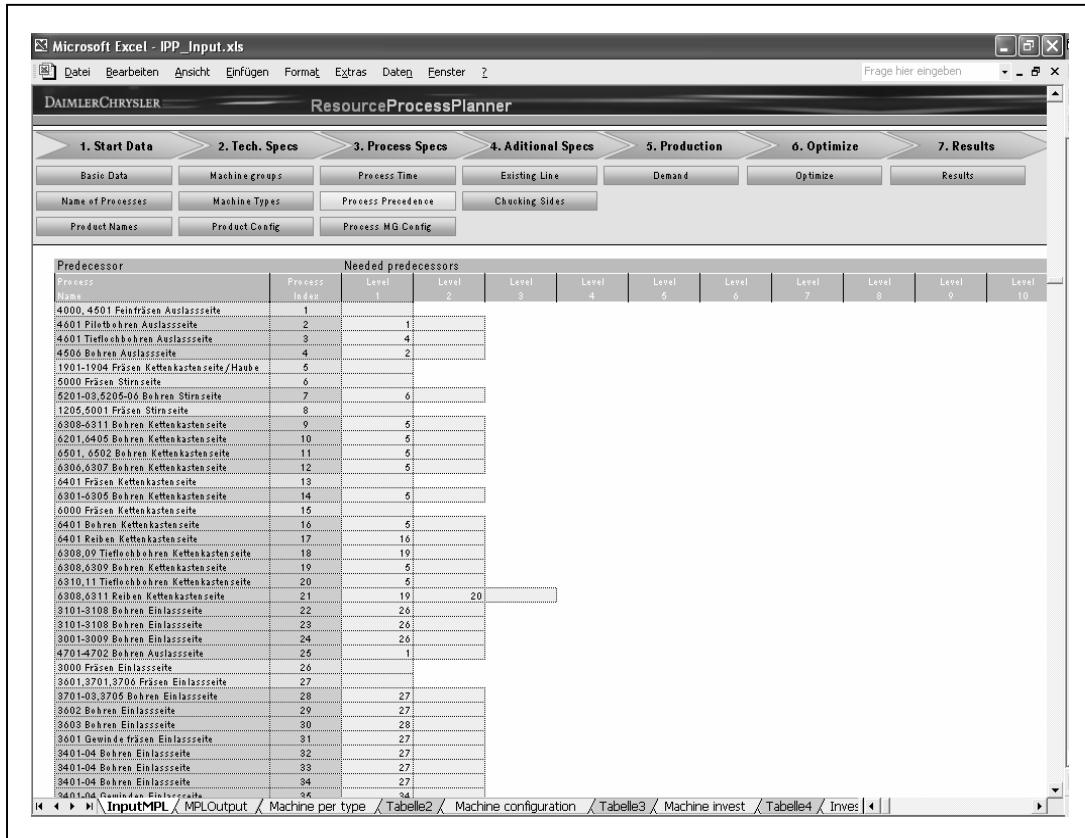
Ebenso kann festgelegt werden, auf welchem Maschinentyp ein Prozess momentan ausgeführt wird und welche Kosten entstehen würden, falls er zukünftig auf einem anderen Maschinentyp stattfinden würde.

Das Gleiche gilt für die anfängliche **Zuordnung von Prozessen auf Stationen**. Auch hier können ein **Startzustand** definiert und mögliche **Verschiebungskosten** hinterlegt werden.



**Abbildung A-22:** Definition von Prozesszeiten, der Ursprungszuordnungen im Fertigungssystem und der entstehenden Kosten bei Veränderungen

Weitere Eingabeparameter bilden die **Vorrangbeziehungen** hinsichtlich der Fertigungsprozesse untereinander. Derartige Vorrangbeziehungen dürfen bei einer Rekonfiguration einer Produktionslinie keinesfalls verletzt werden. Entsprechende Informationen können in die Tabelle aus Abbildung A-23 eingegeben werden.

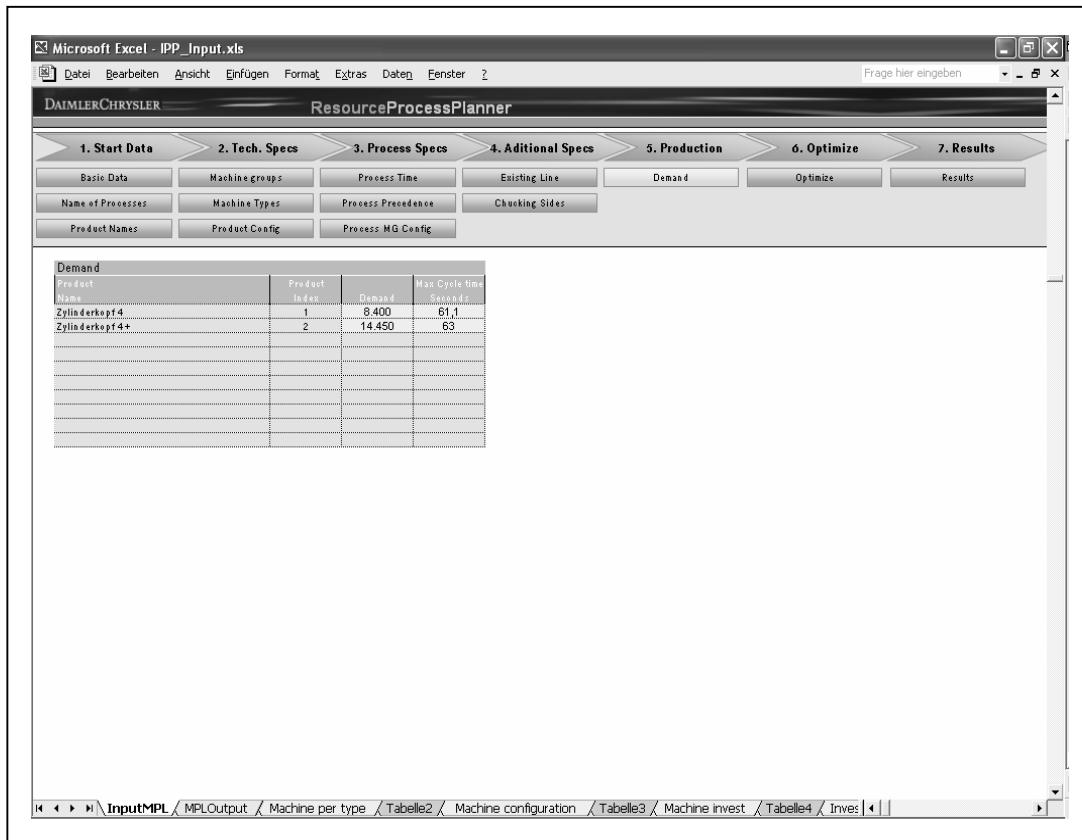


The screenshot shows the 'ResourceProcessPlanner' software interface. The main window title is 'Microsoft Excel - IPP\_Input.xls'. The menu bar includes 'Datei', 'Bearbeiten', 'Ansicht', 'Einfügen', 'Format', 'Extras', 'Daten', 'Fenster', and '2'. The toolbar has buttons for 'Frage hier eingeben', 'DAIMLERCHRYSLER', and 'ResourceProcessPlanner'. Below the toolbar is a navigation bar with tabs: '1. Start Data', '2. Tech. Specs', '3. Process Specs', '4. Additional Specs', '5. Production', '6. Optimize', and '7. Results'. Under '2. Tech. Specs', there are sub-tabs: 'Basic Data', 'Machine groups', 'Process Time', 'Existing Line', 'Demand', 'Optimize', and 'Results'. Under '3. Process Specs', there are sub-tabs: 'Name of Processes', 'Machine Types', 'Process Precedence', 'Checking Sides', 'Product Names', 'Product Config', and 'Process MG Config'. The main content area displays a table of process dependencies. The columns are 'Predecessor', 'Process Index', and 'Needed predecessors' (Level 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10). The table lists numerous processes, such as '4000, 4501 Feinträumen Auslassseite', '4501 Tiefenbohren Auslassseite', '4502 Bohren Auslassseite', and various 'Fräsen' and 'Bohren' processes for different parts like 'Kettenkastenseite/Haube' and 'Stirnseite'. The table shows dependencies like '4000, 4501' being a predecessor for '4501 Tiefenbohren Auslassseite' (Level 2). The bottom status bar shows the path: 'InputMPL / MPLoutput / Machine per type / Tabelle2 / Machine configuration / Tabelle3 / Machine invest / Tabelle4 / Inves'.

**Abbildung A-23:** Abbildung von Vorrangbeziehungen unter den Prozessen

Zusätzliche Eingabedaten werden durch die **momentan installierte Fertigungstechnik** gebildet. Welcher Maschinentyp ist in welcher Station vertreten und wie viele zusätzliche Maschinen können dort installiert werden. Außerdem kann definiert werden, welche Prozesse in welcher **Bauteilaufspannung** durchführbar sind. Im Normalfall ist bei prismatischen Bauteilen aufgrund der Spannlage die freie Zugänglichkeit sämtlicher zu bearbeitender Stellen nicht gewährleistet, so dass im Verlauf der Bearbeitung die Spannlage mindestens einmal gewechselt werden muss.

Eine sehr wichtige Eingangsinformation stellt das nachgefragte **Produktionsvolumen** dar. Dieses kann in die Tabelle aus Abbildung A-24 in Abhängigkeit der definierten Produkte eingegeben werden. Wurde bei den Basisdaten der Produktionstyp 2 (Optimierung unter Berücksichtigung einer vom Benutzer eingegebenen **Maximal-Taktzeit** für jedes Produkt) gewählt, so muss die maximal zulässige Taktzeit in die Tabelle eingetragen werden.

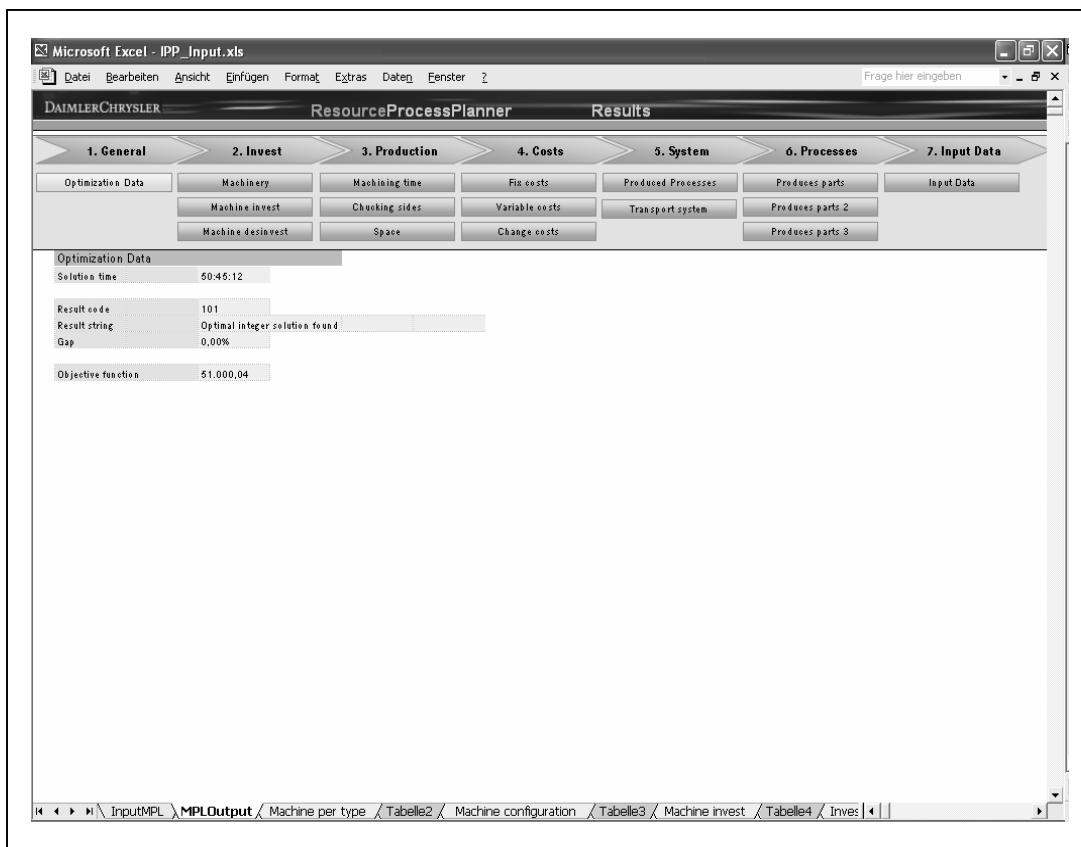


**Abbildung A-24:** Festlegung der Produktnachfrage

### Optimierung durchführen:

Sind alle Eingangsinformationen definiert worden, so kann wiederum über „Optimize“ die Optimierung gestartet werden. Da nicht mehrere Berechnungen hintereinander stattfinden, ist lediglich das Statusfenster des Solvers geöffnet. Nach Abschluss der Optimierung werden die Ergebnisse in die gleiche Exceldatei zurück geschrieben und diverse Auswertungen können vorgenommen werden, auf die im Folgenden eingegangen wird.

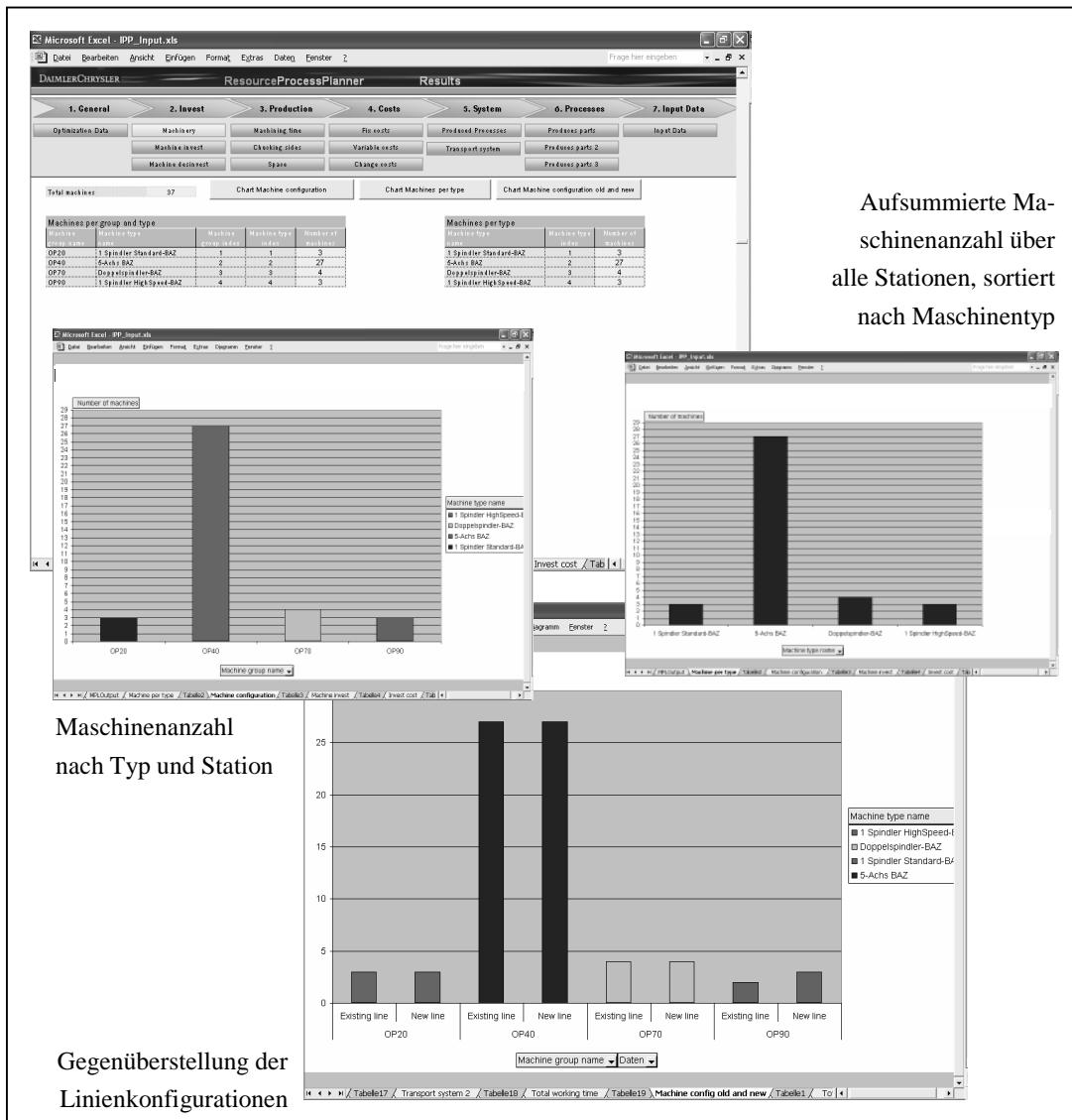
### Ergebnisdarstellung und -analysewerkzeuge:



**Abbildung A-25:** Generelle Informationen über den Erfolg der Optimierung

Neben dem Zielfunktionswert der Optimierung steht die **neue Konfiguration des Fertigungssystems** im Mittelpunkt der Ergebnisse. Werden größere Umbaumaßnahmen benötigt um das nachgefragte Volumen zu befriedigen, so werden mehrere Maschinen im System aufgebaut, entweder als Neuinvestition oder aber als Ersatz für bereits bestehende Maschinen. Sowohl die Aussage, wie viele Maschinen welchen Typs in welcher Station stehen, als auch die über die Stationen summierte Anzahl an Maschinen eines Typs können entweder in Form einer Tabelle oder anschaulich in einem Diagramm eingesehen werden (Abbildung A-26). Übersichtlicher ist eine Darstellung, in der die Konfiguration der Linie vor und nach der Optimierung gegenübergestellt wird, wobei der je Station vorherrschende Maschinentyp farblich kodiert ist. So lassen sich nicht nur Änderungen im Maschinentyp, sondern auch in der Anzahl an Maschinen auf einen Blick erfassen.

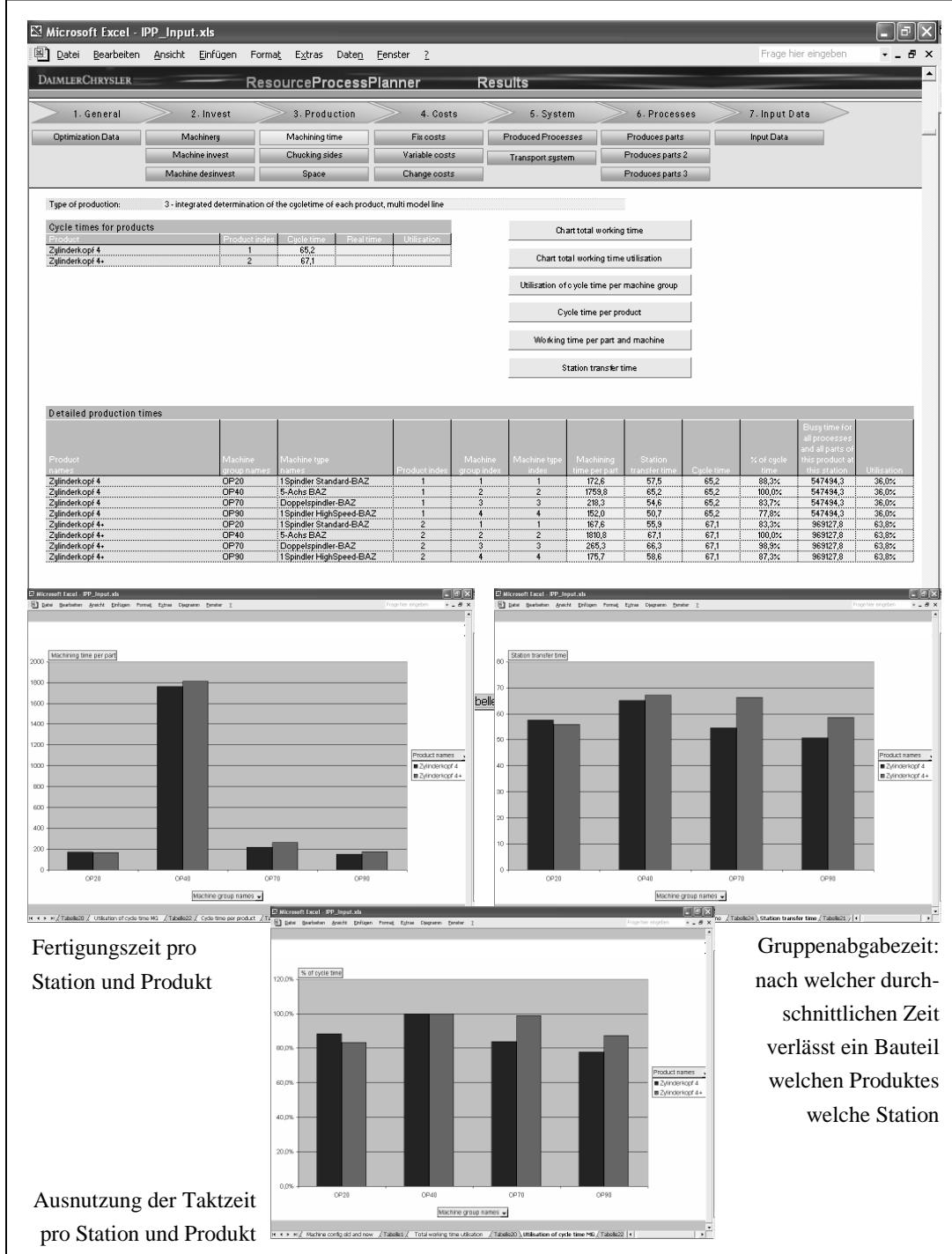
In zusätzlichen Tabellen und Diagrammen wird detailliert dargestellt, welcher Invest und Desinvest in welchen Stationen stattgefunden hat.



**Abbildung A-26:** Darstellung der Maschinenkonfiguration in der Fertigungslinie

Eine weitere wichtige Ergebnisgröße der Optimierung stellt die **ermittelte Taktzeit** für die jeweiligen Produkte dar, sofern sie vom Benutzer vorher nicht fest vorgegeben wurde. Es können die **Fertigungszeit pro Station und Einheit eines Produktes** abgelesen werden genauso wie die **Gruppenabgabezeit**, die sich aus der Division der Fertigungszeit durch die in der jeweiligen Station befindliche Anzahl an Maschinen ableitet. Wird diese Gruppenabgabezeit gegenübergestellt mit der Taktzeit für das jeweilige Produkt, so ergibt sich die **Stationsauslastung** für dieses Produkt. Da die Taktzeit eine Größe ist, die sich nach der maximalen Beanspruchung über alle Stationen für ein Produkt richtet, muss bei Produktionstyp 3 für jedes Produkt in mindestens einer Station die Auslastung 100% betragen. Bei Produktionstyp 4 wird die maximale Beanspruchung über alle Stationen und alle Produkte zum Richtwert, weshalb hier im Normalfall lediglich eine Sta-

tion für ein Produkt hundertprozentig ausgelastet ist. Insgesamt erlaubt die Multiplikation der Taktzeit mit der hergestellten Produktionsmenge die Aussage, welches Produkt die Linie zu welchem Prozentsatz belegt. Die entsprechende Ergebnistabelle ist neben anderen in Abbildung A-27 dargestellt.



**Abbildung A-27:** Fertigungszeiten und Stationsauslastungen im Überblick

Die Fertigungszeiten pro Station ergeben sich durch Multiplikation der Ausführungs- dauern der dort ausgeführten Prozesse mit dem Fertigungsvolumen je Produkt, summiert über alle Produkte. Da es Bestandteil des Modells ist, Prozesse ggf. auf die Stationen neu zu verteilen, ist es ebenfalls von besonderem Interesse, wie nach der Optimierung die **Prozesszuteilung** gestaltet ist. Da sowohl die Umverteilung der Prozesse zwischen den Stationen kostenwirksam sein kann, als auch die Neuzuordnung von Prozessen zu anderen Maschinentypen, sind für beide Fälle entsprechende Auswertungen abrufbar.

The screenshot shows the 'Results' sheet of an Excel spreadsheet. The table is titled 'Machine type change cost' and has columns for 'Process', 'Original machine type', 'Changed to machine type', 'Process index', 'Original machine type index', 'Changed to machine type index', and 'Change cost'. The data in the table includes various machine part numbers and their corresponding process steps and machine types. A chart titled 'Change cost machine type' is also present on the sheet.

Abbildung A-28: Wechsel des Maschinentyps

Zusätzliche Analysen lassen sich hinsichtlich der **gewählten Aufspannung in den Stationen**, des **Platzverbrauchs** und der **Auslastung des dortigen Transportsystems** einsehen. Ebenfalls werden Darstellungen zu den **fixen und variablen Kosten** in der optimierten Linie angeboten, sollten entsprechende Eingabeparameter vom Benutzer definiert worden sein.

## Literaturverzeichnis

- [Amen00] Amen, Matthias: „An exact method for cost-oriented assembly line balancing“, International Journal of Production Economics 64, Elsevier Science B.V., 2000
- [BeSc06] Becker, Christian; Scholl, Armin: „A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing“, European Journal of Operational Research 168, 2006
- [BlKo05] Blumenau, Jean-Claude; Kotz, Thomas: „Wandlungsfähigkeit auf Abruf – Bedarfsgerechte Gestaltung und Bewertung stückzahlflexibler Produktionssysteme für die Massenfertigung von Hochleistungserzeugnissen“, in „Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“ 1-2, 2005
- [BoYa89] Bolat, Ahmet; Yano, Candace Arai: „Procedures to Analyze the Trade-offs Between Costs of Setup and Utility Work for Automobile Assembly Lines“, Technical Report 89-3, Department of Industrial & Operations Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, 1989
- [Chry06] Chryssolouris, George: „Manufacturing Systems: Theory and Practice“, 2. Auflage, Springer Science+Business Media, 2006
- [Dang01] Dangelmaier, Wilhelm: „Fertigungsplanung – Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung“, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2001
- [DoKS96] Domschke, Wolfgang; Klein, Robert; Scholl, Armin: „Antizipative Leistungsabstimmung bei moderner Variantenfließfertigung“, Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 66. Jahrgang, Heft 12, 1996
- [DoSV97] Domschke, Wolfgang; Scholl, Armin; Voß, Stefan: „Produktionsplanung – Ablauforganisatorische Aspekte, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997
- [Drab03] Drabow, Gregor: „HIPARMS – Highly Productive and Reconfigurable Manufacturing Systems“, in “Fit für die maßgeschneiderte Massenfertigung durch agile, rekonfigurierbare Fertigungssysteme: Proceedings of the national workshop within the ARMMS projekt (Stuttgart, Germany, 20.03.2002)“, Mainz Verlag, Aachen, 2003
- [EvSc96] Eversheim, Walter; Schuh, Günther: „Produktion und Management – Betriebshütte – Teil 2“, 7. völlig neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1996

- [Feld04] Feldmann, Klaus; Gergs, Hans-Joachim; Slama, Stefan; Wirth, Ulrike: „Montage strategisch ausrichten – Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen“, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004
- [FlSW05] Fleischer, Jürgen; Stepping, Andreas; Wieser, Jan: „Simulationsunterstützte Optimierung in Agilen Fertigungssystemen“, in „Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“ 1-2, 2005
- [GaFS96] Gausemeier, Jürgen; Fink, Alexander; Schlake, Oliver: „Szenario-Management – Planen und Führen mit Szenarien“, 2. bearbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1996
- [Grun00] Grundig, Claus-Gerold: „Fabrikplanung“, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2000
- [Günt93] Günther, Hans-Otto: „Produktionsmanagement“, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1993
- [GüTe94] Günther, Hans-Otto; Tempelmeier, Horst: „Produktion und Logistik“, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1994
- [GüTe05] Günther, Hans-Otto; Tempelmeier, Horst: „Produktion und Logistik“, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 2005
- [Hall99] Haller, Martin: „Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflussysteme der variantenreichen Großserienproduktion“, Herbert Utz Verlag, München, 1999
- [Haus89] Hausknecht, Matthias: „Expertensystem zur Konfigurationsplanung flexibler Fertigungsanlagen“, VDI Verlag, Düsseldorf, 1989
- [Hern03] Hernández Morales, Roberto: „Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung“, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 16 Nr. 149, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003
- [Herr83] Herrmann, Peter: „Grundlagen einer rechnerunterstützten Investitionsplanung und Wirtschaftlichkeitsrechnung für flexible Fertigung“, Dissertation an der RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenbau, 1983
- [Hieb91] Hieber, W.L.: „Lern- und Erfahrungskurveneffekte und ihre Bestimmung in der flexibel automatisierten Produktion“, Verlag Franz Vahlen GmbH, München, 1991
- [Hoit85] Hoitsch, Hans-Jörg: „Produktionswirtschaft – Grundlagen einer industriellen Betriebswirtschaftslehre“, Verlag Franz Vahlen GmbH, München, 1985

- [KeDu95] Keblis, Matthew F.; Duenyas Izak: „Control of an assembly system with processing time and subassembly type uncertainty“, Technical Report 95-9, Department of Industrial & Operations Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, 1995
- [KuKl04] Kuhn, Claus; Klafft, Michael: „Scale-Up-Produktion: Vorgehensweise zur systematischen Anpassung der Stückzahlen an steigende Bedarfe“, Interaktiv, Nr. 2.2004, 2004
- [KuTe97] Kuhn, Heinrich; Tempelmeier, Horst: „Analyse von Fließproduktionssystemen“, in „Zeitschrift für Betriebswirtschaft“, Gabler-Verlag, 1997
- [Läng94] Länge, K.; Griffin, P.M.; Griffin, S.O.: „A quantification of the economic value of flexible capacity“, International Journal of Production Research, Vol. 32, No. 6, 1994
- [LeJo91] Lee, Heungsoon Felix; Johnson, Roger Vivian: „A Line-Balancing Strategy for Designing Flexible Assembly Systems“, The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 3, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991
- [Lueg75] Lueg, Herbert: „Systematische Fertigungsplanung – Systematik zur Erfassung und Verarbeitung komplexer Fertigungsabläufe“, Vogel-Verlag, Würzburg, 1975
- [Mene01] Meneghelli J. A.; Stadzisz, P.C.; de Lira; A. F.: „An interactive assembly planning generation method for product families“, Proceedings of the IAD, Intelligent assembly and disassembly, IFAC, Brazil, 2001
- [Meyr04] Meyr, Herbert: „Supply chain planning in the German automotive industry“, OR Spectrum 26, 2004
- [MuFr97] McMullen, Patrick R.; Frazier, Gregory V.: „A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations“, International Journal of Production Economics 51, 1997
- [Mull98] McMullen, Patrick R.: „JIT sequencing for mixed-model assembly lines with setups using Tabu Search“, Production Planning & Control, Vol. 9, No. 5, 1998
- [Mull02] McMullen, Patrick R.: „The permutation flow shop problem with just in time production considerations“, Production Planning & Control, Vol. 13, No. 3, 2002
- [MuTa03] McMullen, Patrick R.; Tarasewich, Peter: „Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem“, IIE Transactions 35, 2003

- [MuTa05] McMullen, Patrick R.; Tarasewich, Peter: „A beam search heuristic method for mixed-model scheduling with setups”, International Journal of Production Economics 96, 2005
- [MuTa06] McMullen, Patrick R.; Tarasewich, Peter: „Multi-objective assembly line balancing via a modified ant colony optimization technique”, International Journal of Production Research, Vol. 44, No. 1, 2006
- [Nahm05] Nahmias, Steven: „Production and operations analysis”, 5th Edition, McGraw-Hill Companies, New York, 2005
- [Neum96] Neumann, Klaus: „Produktions- und Operations-Management”, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1996
- [NyHe04] Nyhuis, P.; Heger, C.L.: „Adequate Factory Transformability at Low Costs”, Proceedings International Conference on Competitive Manufacturing COMA '04, Progress in Innovative Manufacturing, 2004
- [Rein03] Reinhart, G.: „Stückzahl- und Variantenflexible Montage“, in: „Die wandlungsfähige Fabrik“, IFA Tagungsband, Hannover, 2003
- [Roth92] Roth, Hans-Peter: „Ein Beitrag zur Planung und Optimierung der Verfahrensteilung in der Fertigung“, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992
- [ScBe05] Scholl, Armin; Becker, Christian: „A note on An exact method for cost-oriented assembly line balancing”, International Journal of Production Economics 97, Elsevier Science B.V., 2005
- [ScBe06] Scholl, Armin; Becker, Christian: „State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing“, European Journal of Operational Research 168, 2006
- [Schm95] Schmigalla, Hans: „Fabrikplanung – Begriffe und Zusammenhänge”, 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 1995
- [Schn02] Schneeweiß, Christoph: „Einführung in die Produktionswirtschaft“, 8. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- [ScKl99] Scholl, Armin; Klein, Robert: „Balancing assembly lines effectively – A computational comparison”, European Journal of Operational Research 114, Elsevier Science B.V., 1999
- [ScVo95] Scholl, Armin; Voß, Stefan: „Kapazitätsorientierte Leistungsabstimmung in der Fließfertigung“, Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 47, 1995
- [Schu03] Schuh, G; Bergholz, M.; Gottschalk, S.: „Fabrikkonzepte für die kollaborative Produktion“, wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 93 (2003)

- [Schu04] Schuh, G; Harre, J.; Gottschalk, S.; Kampker, A.: „Design for Changeability (DFC) – Das richtige Maß an Wandlungsfähigkeit finden“, *wt Werkstattstechnik online*, Jahrgang 94 (2004)
- [SoVl94] Solot, Philippe; van Vliet, Mario: „Analytical Model for FMS Design Optimization: A Survey“, *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1994
- [Stei96] Steinwasser, Peter: „Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozessplanung“, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1996
- [Stra81] Straub, Dieter: „Planung der Fertigungseinrichtungen für flexible Fertigungssysteme zur Bearbeitung prismatischer Werkstücke“, Technischer Verlag Günter Grossmann, Stuttgart-Vaihingen, 1981
- [TeKu92] Tempelmeier, Horst; Kuhn, Heinrich: „OR-Modelle zur Planung flexibler Fertigungssysteme, OR-Spektrum, Vol. 14, 1992
- [TeKu93] Tempelmeier, Horst; Kuhn, Heinrich: „Flexible Fertigungssysteme – Entscheidungsunterstützung für Konfiguration und Betrieb“, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1993
- [Tetz90] Tetzlaff, Ulrich A. W.: „Optimal Design of Flexible Manufacturing Systems“, Physica-Verlag, Heidelberg, 1990
- [Tetz95] Tetzlaff, Ulrich A. W.: „A Model for the Minimum Cost Configuration Problem in Flexible Manufacturing Systems“, *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995
- [West86] Westkämper, E: „Strategische Investitionsplanung mit Hilfe eines Technologiekalenders“, in „Strategische Investitionsplanung für neue Technologien in der Produktion“, München, 1986, S. 143 - 182
- [WhSu85] Whitney, C. K.; Suri, R.: „Algorithms for part and machine selection in flexible manufacturing systems“, *Annals of Operations Research*, Vol. 3, 1985
- [Wien03] Wiendahl, Hans-Peter.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Löllmann, F.: „Regelkreisbasierte Wandlungsprozesse – Wandlungsfähigkeit auf Basis modularer Fabrikstrukturen“, *wt Werkstattstechnik*, Jahrgang 93 (2003)
- [Wien04] Wiendahl, Hans-Peter; Gerst, Detlef; Keunecke, Lars: „Variantenbeherrschung in der Montage“, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004

- [WiVi03] Witte, K.-W.; Vielhaber, W.: „Flexible und wirtschaftliche Serienmontage – Wege zu zukunftsstabilen Montagesystemen“, Shaker Verlag, Aachen, 2003
- [WiVi04] Witte, K.-W.; Vielhaber, W.: „Neue Konzepte für wandlungsfähige Fabriken und Fabrikparks“, Shaker Verlag, Aachen, 2004
- [Wöhe02] Wöhe, Günter: „Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre“, 21. neubearbeitete Auflage, Verlag Franz Vahlen GmbH, 2002
- [YaBo88] Yano, Candace Arai; Bolat, Ahmet: „Survey, development and applications of algorithms for sequencing paced assembly lines“, Technical Report 88-13, Department of Industrial & Operations Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, 1988
- [Zäpf89] Zäpfel, Günther: „Taktisches Produktions-Management“, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1989
- [Zäpf00] Zäpfel, Günther: „Strategisches Produktions-Management“, 2. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2000