

Bernburg
Dessau
Köthen



Hochschule Anhalt
Anhalt University of Applied Sciences

emw

Fachbereich
Elektrotechnik, Maschinenbau
und Wirtschaftsingenieurwesen

Daniel Baumgärtner

Vorname Nachname

Wirtschaftsingenieurwesen (MB), 2011, 4055644

Studiengang, Matrikel, Matrikelnummer

Bachelorarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

Thema:

**Kostenschätzung des Technischen
Anlagenbaus – ein Alternativen-Vergleich**

Prof. Dr. Michael Brusch

Vorsitzende(r) der Bachelorprüfungskommission/1.Prüfer(in)

Dipl. Ing. Thomas Seidel

2.Prüfer(in)

19.07.2017

Abgabe am

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	5
1. Einleitung	6
2. Projekte im Technischen Anlagenbau	8
2.1 Projektbegriffe	8
2.2 Anlagenplanung als wirtschaftliche und technische Organisationsaufgabe	9
2.3 Projektmanagement im Anlagenbau	10
2.3.1 Einfluss- bzw. Stabsprojektmanagement	10
2.3.2 Matrix-Projektmanagement	10
2.3.3 Autonomes Projektmanagement	11
2.4 Der Vertrag im Technischen Anlagenbau	11
2.4.1 Allgemeiner Teil	12
2.4.2 Technischer Teil	13
2.4.3 Kaufmännischer Teil	14
3. Projektphasen	15
3.1 Vorprojektierung	16
3.1.1 Machbarkeitsstudie (Feasibility Studie)	17
3.1.2 Pre-Engineering	21
3.2 Basic-Engineering	22

3.3 Detail-Engineering	23
3.4 Planungsabwicklung	24
3.5 Bau und Montage	25
3.6 Inbetriebnahme.....	26
4. Verfahren der Kostenschätzung.....	28
4.1 Kapazitätsverfahren.....	28
4.1.1 Vergleich mit einer älteren Anlage der gleichen Produktion	29
4.1.2 Vergleich mit Anlage anderer Größe	29
4.1.3 Vergleich mit ähnlichen Anlagen.....	29
4.2 Strukturverfahren	30
4.2.1 Gesamtfaktorenmethode.....	30
4.2.2 Einzelfaktorenmethode.....	33
4.3 Modulare Kostenschätzung.....	36
5. Vergleich der Verfahren der Kostenschätzung	39
5.1 Kapazitätsverfahren.....	39
5.2. Strukturverfahren	40
5.2.1 LANG-Verfahren	40
5.2.2 Miller-Verfahren	40
5.2.3 Einzelfaktorenmethode.....	40
5.3 Modulare Kostenschätzung.....	42
5.4 Genauigkeitsvergleich ausgewählter Verfahren.....	44

6.Zusammenfassung und Ausblick.....	46
Literaturverzeichnis	48
Selbstständigkeitserklärung.....	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kostenverteilung für ein Projekt über die Laufzeit.....	16
Abbildung 2: „Ablaufschema für die Erarbeitung der Feasibility Studie“	18
Abbildung 3: Verfahren in einer BlackBox-Darstellung	21
Abbildung 4: Schnittstelle zwischen Basic-Engineering und Detail-Engineering.....	23
Abbildung 5: schematische Darstellung eines normalen Ablaufs einer Inbetriebnahme ohne Störungen.....	27
Abbildung 6: Gesamtfaktor für die direkten Anlagenkosten in Abhängigkeit vom mittleren Maschinen- und Apparatewert	32
Abbildung 7: Strukturiertes Verfahrensfliessbild.....	37
Abbildung 8: Erwartete Genauigkeit bei klassischer Verfahrensentwicklung gemäß den AACE-Richtlinien	44
Abbildung 9: Erwartete Genauigkeit bei einem modularen Ansatz nach L. Hady	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuschlagsfaktoren für die Kalkulation der Investitionskosten von kompletten verfahrenstechnischen Anlagen.....	32
Tabelle 2: Anlagentypen nach BASF.....	33
Tabelle 3: Zuschlagsfaktoren zum Ermitteln des Anlagenkapitalbedarfs chemischer Anlagen.....	34
Tabelle 4: Designkriterien für Pumpen.....	36

1. Einleitung

Der Technische Anlagenbau befasst sich mit der Planung und Errichtung komplexer technischer Gebilde, in denen verschiedene technische Einrichtungen und Bauten zusammenwirken. Das Ziel ist, dass der Gesamtkomplex ein angestrebtes Ziel erreicht. Als Projekt bezeichnet man ein technisch-wirtschaftliches Vorhaben mit definierten Start- und Zielbedingungen, die Realisierung des Projektes als Projektabwicklung und das entstehende komplexe technische Gebilde als Anlage. Obwohl viele Planungsphasen und Methoden der Kostenschätzung etwa bei Energie- oder biotechnologischen Anlagen ähnlich sind, konzentriert sich diese Arbeit auf Projekte im Chemischen Anlagenbau.

Für Anbieter und Auftraggeber ist es von beidseitigem Vorteil eine möglichst effiziente und genaue Vorkalkulation der Investitionskosten zu erstellen. Das Risiko einer Fehlkalkulation ist meist mit großen zusätzlichen Kosten verbunden. Zum einen können nicht eingehaltene vertraglich vereinbarte Planungsfortschritte mit etwaigen Vertragsstrafen einhergehen, zum anderen werden Anteile der Auftragssumme fällig für eine Verschiebung eines vorher definierten Meilensteins.

Pehlke & Kunzmann haben 2008 in einer Studie¹ herausgefunden, dass von 1919 Ideen nur 52 die Marktreife erreichten. Von diesen 52 marktreifen Ideen wurden 26 als Misserfolg gewertet und nur 11 Umsetzungen als letztendlich erfolgreich eingestuft. Dies bedeutet, dass nur 1% aller Ideen erfolgreich implementiert werden. Anhand dieses Beispiels kann man erkennen wie wichtig die Kostenschätzung im Chemischen Anlagenbau ist. Denn es muss so frühzeitig wie möglich eine Entscheidung getroffen werden, ob ein Projekt aufgegeben oder von einer zu Grunde liegenden Idee bis zu einer produzierenden technischen Anlage finanziert und umgesetzt wird. Für die Entscheidung, ob ein Projekt realisiert wird, werden in der Planungsphase Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen durchgeführt.

Die vorliegende Arbeit setzt an dem Punkt ein, an dem ein Auftraggeber einen Anbieter (z.B. ein Ingenieurbüro), beauftragt die Planung für eine Anlage zu übernehmen. Es soll gezeigt werden, mit welchen Verfahren der Kostenschätzung gearbeitet wird. Vorrangig werden Klassische Methoden (Kapazitätsverfahren und Strukturverfahren) sowie neuere Methoden

¹ W. Pehlke und K. Kunzmann: Methodologies for Cost Estimation of Chemical Plants as a Function of Engineering Progress, 2008

(Modulare Kostenschätzung) beschrieben, deren Herangehensweise an die Kostenschätzung erläutert und miteinander verglichen. Im Chemischen Anlagenbau kommt die Kostenschätzung der Investitionskosten in allen Phasen des Projektes zum Tragen. Es gilt hier, zum richtigen Zeitpunkt des Projekts eine sinnvolle Auswahl des Schätzverfahrens zu gewährleisten. Kriterien dafür will die vorliegende Arbeit deutlich machen.

Es werden Verfahren der Kostenschätzung des Chemischen Anlagenbaus dargestellt, ihre Genauigkeit und ihre Grenzen werden aufgezeigt und miteinander verglichen. Wesentliche Punkte der Arbeit sind

- Eine Darstellung der Projektphasen
- Die Vorstellung der Kostenschätzverfahren
- Der Vergleich der Kostenschätzverfahren

Die aufgelisteten Schwerpunkte finden sich in den Kapiteln der Arbeit wieder.

In Kapitel 2 wird ein Grundstein für die Betrachtung der Kostenschätzung gelegt. Es werden allgemeine Begriffe geklärt, die für das Verständnis der Thematik essenziell sind. Hierbei wird versucht aus betriebswirtschaftlicher Sicht den Umgang eines Unternehmens mit einem Projekt darzustellen.

Im nächsten Abschnitt, Kapitel 3, werden die Projektphasen dargestellt welche ein Projekt im Chemischen Anlagenbau durchlaufen kann. Von der sog. Vorprojektierung bis zur Inbetriebnahme nimmt die Genauigkeit der Planung weiter zu und eine technische Anlage immer mehr Form an.

In Kapitel 4 werden die Verfahren der Kostenschätzung beschrieben und erläutert. Anfangs werden klassische Verfahren (Kapazitäts- und Strukturverfahren) erläutert und im Anschluss moderne Verfahren (modulare Kostenschätzung) beschrieben.

Im darauf aufbauenden Kapitel, Kapitel 5, wird ein Vergleich der Kostenschätzverfahren durchgeführt. Es werden Vor- und Nachteile einzelner Verfahren dargestellt und am Ende des Kapitels miteinander verglichen.

2. Projekte im Technischen Anlagenbau

2.1 Projektbegriffe

Der Projektbegriff ist in der Chemischen Industrie, wie auch in vielen anderen Wirtschaftszweigen, ein weit verbreiteter Begriff. Laut DIN EN ISO 9000:2005 ist das „Projekt ein zielgerichtetes, einmaliges Vorhaben, das aus einem Satz von abgestimmten, gelenkten Tätigkeiten mit Anfangs- und Endtermin besteht und durchgeführt wird, um unter Berücksichtigung von Zwängen bezüglich Zeit, Ressourcen (zum Beispiel Geld bzw. Kosten, Produktions- und Arbeitsbedingungen, Personal) und Qualität ein Ziel zu erreichen.“²

Ein Projekt beinhaltet Zielvorgaben, welche die Grundrichtung des Projektes vorgeben. Alle Handlungen sind zunächst auf die Erfüllung der Ziele ausgerichtet. Somit ist ein Projekt „eine zeitlich befristete, relativ innovative und risikobehaftete Aufgabe von erheblicher Komplexität, die aufgrund ihrer Schwierigkeit und Bedeutung meist ein gesondertes Projektmanagement erfordert.“³ Im Technischen Anlagenbau wie auch in der Chemischen Industrie werden verschiedene Arten von Projekten unterschieden. Hierbei wird folgende Einteilung vorgenommen.

- Forschungsprojekte: Erwerb von Grundkenntnissen
- Entwicklungsprojekte: Erbringung eines vordefinierten Ergebnisses eines marktfähigen Produktes mit hohem Innovationsgrad
- Rationalisierungsprojekt: Optimierung der innerbetrieblichen Prozesse
- Kooperationsprojekt: Zielgerichtete Zusammenarbeit mehrerer Unternehmen
- Anlagenprojekt: Erstellung von komplexen Lösungen mit zumeist schlüsselfertigen Ausarbeitungen für Kunden

Die im späteren Teil der Arbeit erläuterten Verfahren der Kostenschätzung beziehen sich auf Anlagen- oder Rationalisierungsprojekte. Werden diese als Kooperationsprojekte realisiert, wird auf deren spezifische Bedingungen in dieser Arbeit nicht eingegangen, da sie keinen Einfluss auf die verwendeten Verfahren der Kostenschätzung haben.

² DIN EN ISO-Norm 9000:2005

³ K. Voigt, G. Schewe: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/13507/projekt-v7.html>; 18.07.2017, 11:49 Uhr

2.2 Anlagenplanung als wirtschaftliche und technische Organisationsaufgabe

Die Umsetzung der Planung einer Anlage stellt das beteiligte Personal vor eine Vielzahl von wirtschaftlichen Organisationsaufgaben. Es gilt die begrenzten verfügbaren Ressourcen optimal einzusetzen, um eine hohe Zuverlässigkeit einer Anlage gewährleisten zu können. Meist sollen Produktaufträge mit hohen qualitativen und/oder quantitativen Anforderungen realisiert werden. Das Ziel ist zum einen die Betriebskosten einer Anlage durch hohe und optimale Wirkungsgrade gering zu halten und zum anderen die Investitionskosten zu beschränken. Erreicht wird dieses Ziel durch die Bereitstellung verschiedenster erforderlicher Arbeitskapazitäten. An einem Projekt sind eine Vielzahl von unterschiedlichen Fachdisziplinen beteiligt. Es ist wichtig die Details eines Projektes zu durchschauen und mit notwendigem technischem und betriebswirtschaftlichem Know-how in ein großes Ganzes zusammenzuführen.⁴

Die Anlagenplanung wird laut Danzer (1974) in folgende vier Teile untergliedert:⁵

- Systemplanung: Angepasst an die vorliegenden Verhältnisse und das jeweilige Ziel sind die technischen und finanziellen Auswirkungen eines Vorhabens sowie die Alternativen zu erfassen, zu prüfen und zu bewerten.
- Objektplanung: Es werden die in der Systemplanung einbezogenen Objekte z.B. Apparate, Rohrleitungen, Bauten betrachtet und geplant.
- Durchführungsplanung: unter Berücksichtigung sämtlicher personeller, materieller, terminlicher sowie finanzieller Anforderungen werden die Resultate der Systemplanung und der Objektplanung zusammengeführt.
- Bereitstellungsplanung: Befasst sich mit der Bereitstellung der zu beschaffenden Inputfaktoren, z.B. Energie, Rohstoffe und Arbeit, der Planung der Durchführung folgend.

Diese vier Planungsarten laufen mitunter parallel ab und sind nicht ausschließlich aufeinander aufbauend. Sie sind nicht in sich geschlossen und voneinander unabhängig.⁶

⁴ G. Berecker: Planung und Bau Verfahrenstechnischer Anlagen, 2013, S.1ff

⁵ Danzer, W.: Führungsaspekte und Widerstände bei der Realisierung von Projekten. Beitr. In „Projektorganisation“, Hrsg. W. Bloch, Bd. 19 Schriftreihe „Arbeitsstudium-Industrial Engineering“ des Verbandes für Arbeitsstudien – REFA e.V. Berlin, Köln: Beith-Vertr. 1974

⁶ (vgl.) G. Bernecker: Planung und Bau Verfahrenstechnischer Anlagen, S.4

2.3 Projektmanagement im Anlagenbau

Die Deutsche Industrie Norm (DIN) sieht im Projektmanagement die „Gesamtheit von Führungsaufgaben, -organisation, -techniken und -mitteln für die Initiierung, Definition, Planung, Steuerung und den Abschluss von Projekten.“⁷

Im Allgemeinen wird in drei verschiedene Varianten des Projektmanagements unterschieden.

2.3.1 Einfluss- bzw. Stabsprojektmanagement

Diese Form des Projektmanagements ist ausschließlich für kleine Projekte geeignet. Durch den linearen Aufbau der Projektstruktur werden alle Projektentscheidungen von in Linie übergeordneten Instanzen getroffen. Der Projektleiter tritt hier als Projektkoordinator auf, welcher keine Weisungsbefugnis gegenüber den am Projekt beteiligten Mitarbeitern hat. Diese Mitarbeiter sind in den speziellen Fachabteilungen dem jeweiligen Fachabteilungsleiter unterstellt.

2.3.2 Matrix-Projektmanagement

Das Matrix-Projektmanagement sieht eine Teilung der Weisungsbefugnis vor. Sie wird aufgeteilt zwischen dem Projektleiter sowie den Fachabteilungsleitern. Der Projektleiter übernimmt u.a. repräsentative Aufgaben. Er verantwortet das Erreichen der gesetzten Ziele, z.B. Einhalten der geplanten Kosten oder des Terminrahmens, gegenüber der Geschäftsleitung, und er übernimmt die Darstellung nach außen, insbesondere gegenüber dem Auftraggeber. In fachlicher Hinsicht sind die Projektteilnehmer den jeweiligen Fachabteilungsleitern unterstellt. Es entsteht eine Matrix, bei der die Mitglieder der verschiedenen Fachabteilungen z.B. Verfahrenstechnik, Ingenieurtechnik, Beschaffung und Montage, den jeweiligen Projekten zugehörig sind und sich im Rahmen des Projektes zu Projektgruppen zusammenschließen können.

Bei dieser Form des Projektmanagements ist eine schnelle und effiziente Anpassung an die Projekterfordernisse möglich. Durch den Zugriff auf die speziellen Fachabteilungen können Mitarbeiter je nach Bedarf in das Projekt integriert und wieder entfernt werden. Somit erfolgt

⁷ Deutsche Industrie Norm (DIN): 69901-5:2009-01

die Anpassung des Projektteams je nach Größe, Laufzeit und Komplexität des Projektes und in welchem Stadium des Fortschritts es sich befindet.

2.3.3 Autonomes Projektmanagement

Das Ziel dieser Form des Projektmanagements ist, den großen Informations- und Kommunikationsaufwand zu verkleinern und den Formalismus zu minimieren, welcher erforderlich ist, um Kompetenzen und Verantwortung über die gestellten Aufgaben zu verteilen. Gerade bei großen Projekten findet eine signifikante Verbesserung der Arbeitsabläufe statt.

Dies erfolgt über die Zusammenfassung der Projektbeteiligten in Projektgruppen, welche nur dem Projektleiter in fachlicher und disziplinarischer Hinsicht unterstellt sind. Die Weisungsbefugnis des Fachabteilungsleiters über den Mitarbeiter der jeweiligen Fachabteilung entfällt. Nach Beendigung des Projektes kann der für das Projekt beanspruchte Mitarbeiter wieder in die jeweilige Fachabteilung eingegliedert werden.

2.4 Der Vertrag im Technischen Anlagenbau

Ein Vertrag ist die rechtliche Grundlage für eine Zusammenarbeit mindestens zweier Geschäftspartner. Im deutschen Gesetzestext wird er in §§145-157 und §§305-361 BGB definiert als „eine Rechtseinrichtung, durch welche Rechte und Pflichten der Vertragspartner auf Grund übereinstimmender gegenseitiger Willenserklärungen rechtsverbindlich festgelegt werden.“⁸ Der Inhalt eines Vertrags ist weitestgehend, mit den immer geltenden rechtlichen Grenzen, den Vertragspartnern freigestellt. Nach dem Schuldverhältnis (§§241-853 BGB) können verschiedene Verträge unterschieden werden. Zum Beispiel verpflichtet sich beim Werksvertrag (§§631-651 BGB) ein Partner (der Unternehmer) zum Herstellen eines Werkes, der andere (der Besteller) zum Zahlen einer vereinbarten Vergütung. Der Vertrag dient somit zur Sicherung beider Interessen und zur Vermeidung von Streitigkeiten von Auftraggeber und Auftragnehmer.

⁸ Bürgerliches Gesetzbuch (BGB): Verträge (§§145-157 BGB), Gestaltung rechtsgeschäftlicher Schuldverhältnisse durch Allgemeine Geschäftsbedingungen (§§305-361 BGB)

2.4.1 Allgemeiner Teil

In diesem ersten Teil eines Vertrags sind rechtliche Rahmenbedingungen abgesteckt. Es werden z.B. Unternehmen A als Auftraggeber und Unternehmen B als Auftragnehmer definiert, Haftungen bzw. Haftungsausschlüsse zugewiesen, Liefer- und Leistungsbedingungen den Parteien zugeordnet.

Weitere wichtige Festlegungen sind die Absprachen über:

- Personaleinsatz: Der Auftraggeber hat das Interesse sich vor schlecht qualifiziertem Personal sowie häufig wechselndem Personal seitens des Auftragnehmers zu schützen,
- Unterlieferanten: Das Interesse des Auftraggebers ist die hochwertigste Qualität der Apparate und Maschinen. In der Realität spiegelt sich diese Variante als die kostenintensivste Variante wieder, wodurch er zu Kompromissen bereit ist. Im Gegensatz dazu versucht der Auftragnehmer alleine, den Auftrag mit optimaler Qualität der Ausrüstung zu realisieren. In der Regel kann der Auftraggeber dem Auftragnehmer keine Unterlieferanten vorschreiben, da dieser dann die Möglichkeit verliert im Wettbewerb bestehen zu können. Sollte er doch dem Auftragnehmer eine „Lieferantenvorschrift“ aufzwingen, liegt es im Ermessen des Auftragnehmers sowohl die Gewährleistung der entsprechenden Komponenten abzulehnen als auch Mehrkosten geltend zu machen.
- Projektunterlagen: Die Dokumentation der getroffenen Entscheidungen spielt, je größer die Investitionssumme ist, eine immer größere Bedeutung. Es werden genaue Absprachen zwischen beiden Parteien getroffen in welcher Form und in wievielfacher Ausführung Dokumente zu erstellen sind. Sei es im technischen Schriftverkehr, bei Protokollen von etwaigen Besprechungen, Projektfortschrittsberichten oder dem Projektterminplan, welcher in regelmäßigen Abständen übergeben werden muss.

2.4.2 Technischer Teil

2.4.2.1 Festlegung des Liefer- und Leistungsumfangs des Auftragnehmers

Es handelt sich hierbei um die Gesamtheit der Anforderungen des Auftraggebers an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers. Im Folgenden ist eine typische Auflistung der Leistungen des Auftragnehmers:⁹

- Erstellung der für die Genehmigungsplanung erforderlichen Unterlagen
- Vertretung der Anlagentechnik gegenüber den zuständigen Behörden
- Vollständige Planung und Konstruktion der Anlage
- Montage
- Inbetriebnahme
- Durchführung der Leistungs- und Garantienachweise im Rahmen des Probetriebs
- Führung des Projektschriftverkehrs inkl. Erstellung der monatlichen Projektfortschrittsberichte und Aktualisierung der Terminpläne
- Erstellung der vollständigen Anlagendokumentation gemäß Spezifikationen
- Schulung des Betriebspersonals des Auftraggebers

Im Lieferumfang kann Folgendes enthalten sein:¹⁰

- Gebäude und Stahlbau
- Heizungs-, Klima- und Lüftungstechnik des Gebäudes
- alle Anlagenkomponenten wie Behälter, Apparate und Maschinen
- Rohrleitungen und Armaturen samt aller Halterungen
- Isolierungen und Begleitheizungen
- Mess- und Regelungstechnische Ausrüstung
- Elektrische Ausrüstung
- Leitechnische Ausrüstung

⁹ (vgl.) F. P. Helmus: Anlagenplanung, Wiley-VCHVerlag, 2003, S. 67

¹⁰ (vgl.) F. P. Helmus: a.a.O., S. 66

2.4.2.2 Festlegung des Liefer- und Leistungsumfangs des Auftraggebers

Es wird im Folgenden die Gesamtheit der Anforderungen an die Lieferungen und Leistungen des Auftraggebers dargestellt. Je nach Interessenlage des Auftraggebers kann diese Anforderung unterschiedlich ausfallen. Sollte zum Beispiel ein Konzern mit Tochterunternehmen, welche als Zulieferer in Frage kommen, bestrebt sein, die Ausrüstung der Anlage bei den Tochterunternehmen zu beschaffen, so besteht in einem solchen Falle die Möglichkeit, dass der Auftraggeber dem Auftragnehmer bestimmte Anlagenteile nach dessen Forderungen beistellt. Leistungen des Auftraggebers sind i.d.R.:¹¹

- Einholen der Behördlichen Genehmigung (als Anlagenbetreiber ist der Auftraggeber automatisch Antragsteller)
- die Beauftragung von Gutachtern
- Bereitstellung der für die Planung notwendigen Unterlagen wie Geländepläne, Angaben über die Bodenbeschaffenheit etc.
- Beistellung der Betriebsmittel für die Inbetriebnahme
- Kostenlose Bereitstellung der Fläche für die Baustelleneinrichtung
- Kostenlose Gestellung von Strom und Wasser auf der Baustelle

2.4.3 Kaufmännischer Teil

Im Kaufmännischen Teil werden alle für die betriebswirtschaftliche Abwicklung relevanten Punkte aufgezeichnet und zwischen beiden Parteien geregelt. Diese relevanten Punkte können wie folgt aufgegliedert sein:¹²

- Termine
- Vertragsstrafen/Gewährleistungen
- Mängel/Abnahme
- Preise/Zahlungsbedingungen/Bürgschaften
- Änderungen
- Kündigungen/Sistierung
- Versicherung
- Geheimhaltung

¹¹ (vgl.) F. P. Helmus, a.a.O., S. 68

¹² (vgl.) F. P. Helmus, a.a.O., S. 70ff

- Salvatorische Klausel
- Inkrafttreten
- Unterschriftregelung

3. Projektphasen

In der Fachliteratur erfolgt allgemein die Planung einer Technischen Anlage nach folgendem Muster:¹³

1. Vorprojektierung
2. Basic – Engineering
3. Detail – Engineering
4. Planungsabwicklung der Anlage
5. Montage der Anlage
6. Anlageninbetriebnahme
7. Übergabe der Anlage

In Jeder Phase des Projektes ist die Kostenplanung sowie die Kostenkontrolle von größter Bedeutung. Es muss in der Regel so geplant werden, dass

- eine Übersicht über Kosten-Soll, Kosten-Ist und die zu erwartenden Restkosten gegeben ist, der Kostenstatus des Projektes muss daher transparent offenliegen,
- den entstehenden Kosten immer eine notwendige Finanzierung laut Finanzplan gegenübersteht, mit dem Ziel eine möglichst kleine Zinsbelastung für das Projekt entstehen zu lassen und
- Ergebnisse aus der Risiko-Analyse, Änderungswünsche des Auftraggebers sowie Nachforderungen rechtzeitig berücksichtigt werden können.¹⁴

¹³ (vgl.) K. Sattler, W. Kasper: Verfahrenstechnische Anlagen Planung Bau und Betrieb, 2000, S.34

¹⁴ (vgl.) K. Sattler, W. Kasper: a.a.O., S. 60

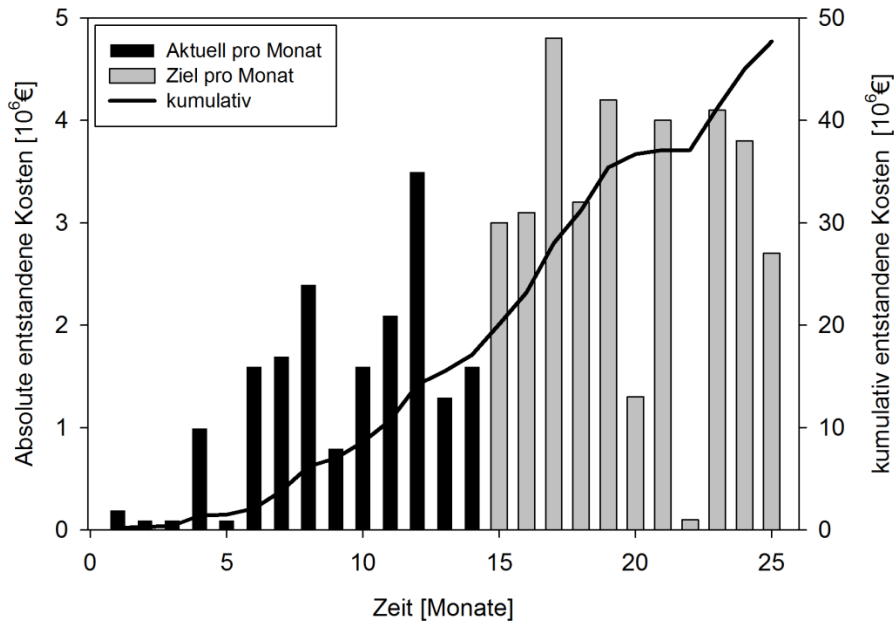


Abbildung 1: Kostenverteilung für ein Projekt über die Laufzeit¹⁵

Im Abbildung 1 ist ein Projekt mit einer Laufzeit von 25 Monaten und den entstandenen sowie den geplanten und geschätzten Kosten dargestellt. Es sind zum einen die absoluten Werte der Kosten dargestellt, und zum anderen die kumulierten Kosten des gesamten Projektes.

3.1 Vorprojektierung

Aus der Sicht des Auftraggebers ist die Investition in eine verfahrenstechnische Produktionsanlage mit hohem Kapitalvolumen und hohem wirtschaftlichen Risiko verbunden. Eine Investition ist nicht alleinig an finanziellen Kriterien zu messen. Sie kann z.B. zur Qualitätsverbesserung von bereits produzierenden Anlagen oder zur Verbesserung der Arbeitsabläufe dienen. Mitunter kann auch ein strategischer Nutzen im Vordergrund stehen. Dieser kann beispielsweise auf die Steigerung des Marktanteils des Unternehmens oder die Entwicklung des Marktwachstums abzielen. Die Investition wird nicht nur danach bemessen, ob der erwartete Nutzen den erforderlichen Aufwand an Investitionsmitteln

¹⁵ K. Sattler, W. Kasper, a.a.O.; S. 60, erstellt mit SigmaPlot 11.0

rechtfertigt und ob die langfristige Tragfähigkeit gegeben ist, sondern auch danach, ob die Investition geschäftsvorbereitende, -erweiternde, -sichernde oder -optimierende Maßnahmen enthält. Hierbei sind Maßnahmen gemeint, deren Erträge nicht kurzfristig in das Unternehmen zurückfließen, sondern zum Erreichen von mittel- und langfristigen Zielen beitragen.

Unter geschäftsvorbereitenden Maßnahmen versteht man z.B. die Erschließung eines neuen Standorts. Es sind Investitionen, die Voraussetzungen für zusätzliche Geschäfte schaffen. Zu geschäftserweiternden Maßnahmen gehören der Aufbau neuer Produktkapazitäten sowie die Erweiterung der bestehenden Kapazitäten, die Steigerung des Marktanteils des Unternehmens oder die Entwicklung des Marktwachstums. Geschäftssichernde Maßnahmen verhindern, dass lukrative Geschäfte eingestellt werden müssen. So sind Behördenauflagen oder Investitionen zur Verbesserung der Produktqualität Beispiele dafür. Geschäftsoptimierende Maßnahmen sind Verbesserungen und Optimierungen der Produktabläufe, so z.B. der Einsatz von Prozessleittechnik in einer vorhandenen Produktionslinie.¹⁶

Machbarkeitsstudie und Pre-Engineering bilden Hauptphasen der Vorprojektierung. Es gilt hierbei den Grundstein für die Erstellung der Produktidee zu legen. Es werden die Möglichkeiten der Realisierung und darauf folgend die verfahrenstechnischer Abläufe zur Herstellung eines bestimmten Produktes geplant. Zur Machbarkeitsstudie gehört die Phase der Wirtschaftlichkeitsanalyse, bei der abgeschätzt wird, ob die Investition ertragreich sein kann, oder ob ggf. die Projektentscheidung negativ ausfällt.

3.1.1 Machbarkeitsstudie (Feasibility Studie)

Für die Geschäftsleitung ist diese Studie als Entscheidungshilfe zu betrachten. Durch moderne Bewertungsmethoden werden Rentabilität, optimaler Ressourceneinsatz und die Stärkung der Ertragskraft des Unternehmens dargestellt.

¹⁶ (vgl.) K. Sattler, W. Kasper: a.a.O., S. 65

Das Ziel der Studie ist die Untersuchung der betriebswirtschaftlichen sowie marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen in ihren Auswirkungen auf das gesamte Unternehmen.

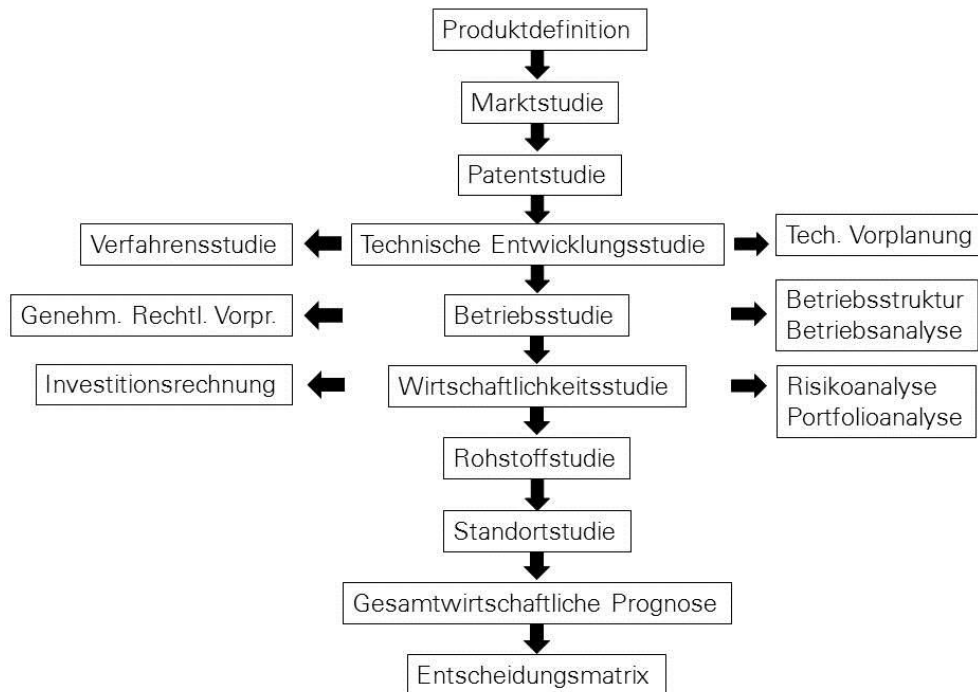


Abbildung 2: Ablaufschema für die Erarbeitung der Feasibility Studie¹⁷.

Nach Abschluss der Produktdefinition in der Forschung wird eine Marktstudie erstellt. Diese Marktstudie ist eine Sammlung von Informationen über die Situation eines speziellen Wirtschaftszweigs. Meist wird diese Sammlung auf eine bestimmte Region (Stadt, Land, Staat) beschränkt, kann aber auch über die Position eines Unternehmens innerhalb eines Wirtschaftszweigs dargestellt werden.

Es wird untersucht, welche Produzenten, Zwischenhändler oder Dienstleistungsunternehmen im Wirtschaftszweig aktiv sind, welche Produkte sie anbieten und verkaufen. Beim Produkt selbst wird auf Menge, Qualität und Preis geachtet. Als letzter Marktteilnehmer sind die Konsumenten zu nennen, welche das Produkt am Ende des Herstellungsprozesses erwerben sollen. In der Realität sind meist für die Erstellung der

¹⁷ (vgl.) K. Sattler, W. Kasper: a.a.O., S. 68, erstellt mit PowerPoint

Marktanalyse die kaufmännischen Abteilungen der Unternehmen verantwortlich, welche u.a. selbstständige Marktforschungsinstitute in Anspruch nehmen.

Ein weiterer Teil der Machbarkeitsstudie ist die Patentstudie. Für das Unternehmen gilt es herauszufinden wie hoch die Kosten für erforderliche Lizenznahmen einschließlich der Kosten für Entschädigungen bei Patentstreitigkeiten sind. Diese Konkurrenzsituation fließt in Kostenform in die Wirtschaftlichkeitsanalyse.¹⁸

Die folgende technische Entwicklungsstudie beschreibt die Basis des Verfahrens. Es werden Erkenntnisse über

- Stoff- und Systemeigenschaften (z.B. Produktspezifikationen, physikalische Eigenschaften)
- toxikologische Daten
- sicherheitstechnische Kennzahlen
- Korrosionsdaten
- kinetische und thermodynamische Kenndaten
- Katalysatoreigenschaften
- Produktqualität, Produkteigenschaften und Produkthandling (z.B. Lagerstabilität)
- Wirtschaftlichkeitsdaten (z.B. Energieverbrauch, optimaler Wärmeverbund, Produktionskosten)

dargestellt.¹⁹

Im Anschluss an die Entwicklungsstudie wird eine Betriebsstudie angefertigt. Bei dieser wird eine genehmigungsrechtliche Vorprüfung durchgeführt. Es wird in Erfahrung gebracht, ob es aus rechtlicher Sicht Probleme bei der Umsetzung des Projektes geben wird. Ein weiterer Teil der Betriebsstudie ist die Optimierung der Betriebsstruktur und des Produktionsablaufs, in welche die zu planende Anlage eingebunden werden soll. Besteht das Projekt lediglich in einer Rationalisierung oder Erweiterung einer bestehenden Anlage, so können Produktionsdaten in einer Betriebsanalyse ausgewertet werden. Dabei werden statische sowie dynamische Investitionsrechnungsverfahren, auch Investitionskostenrechnungsverfahren, angewendet.

¹⁸ (vgl.) K. Sattler, W. Kasper: a.a.O., S. 65

¹⁹ (vgl.) K. Sattler, W. Kasper: a.a.O., S. 67f

Diese Verfahren sind auch unabhängig von einer Betriebsanalyse wichtig, da die enthaltenen Kennzahlen in die Wirtschaftlichkeitsanalyse einfließen. Kennzahlen der statischen Investitionsrechnung sind z.B. die Kosten, der Gewinn oder die Amortisationsdauer der Unternehmung. Mit der dynamischen Investitionsrechnung werden Betrachtungen über einen bestimmten Zeitraum getätigt. Kennzahlen sind hier z.B. der ermittelte Kapitalwert.

Wirtschaftlichkeitsanalyse wird auf der Ebene eines Unternehmens, eines Projekts oder einer Investition durchgeführt. Wirtschaftlichkeit wird im Allgemeinen als Maß für die Effizienz einer Kosten-Nutzen-Relation betrachtet und ist somit das Verhältnis von erreichtem Ertrag zu den eingesetzten Mitteln. Mit diesem Verhältnis kann angegeben werden, inwieweit ein Projekt realisierbar, effizient und somit am Ende lohnenswert ist.

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Ertrag}}{\text{Aufwand}}$$

Ertrag: Die einer Unternehmung in einer Periode wegen der Erstellung von Gütern oder Dienstleistungen zugerechneten Einnahmen.

Aufwand: Die zum bestimmten Zeitpunkt mit finanziellen Mitteln bewerteten verbrauchten Güter und Leistungen.²⁰

Im Allgemeinen entsteht eine positive Investitionsentscheidung bei einer berechneten Wirtschaftlichkeit von ≥ 1 . Hierbei ist zu unterscheiden, dass bei einer Wirtschaftlichkeit von $=1$ die Investition kostendeckend und bei einer Wirtschaftlichkeit >1 ein Wertezuwachs zu erwartet ist.

Speziell im Technischen Anlagebau ist die Wirtschaftlichkeitsanalyse ein Instrument um mehrere funktional gleichwertige Alternativen zu unterscheiden.²¹ Es werden die in den jeweiligen Verfahren ermittelten Ergebnisse miteinander verglichen um die beste Investitionsentscheidung zu treffen.

²⁰ J. Weber: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/wirtschaftlichkeit.html>, 18.07.2017, 11.50 Uhr

²¹ (vgl.) H. Ullrich: Wirtschaftliche Planung und Abwicklung verfahrenstechnischer Anlagen, 1996, S. 145ff

3.1.2 Pre-Engineering

Das Pre-Engineering, bzw. die Vorplanung, bildet den Grundstein einer konzeptionellen Grundplanung einer technischen Anlage. Es werden alle wichtigen Informationen des Verfahrens über Ursachen, Auswirkungen und Einflüsse erfasst, dargestellt und analysiert.

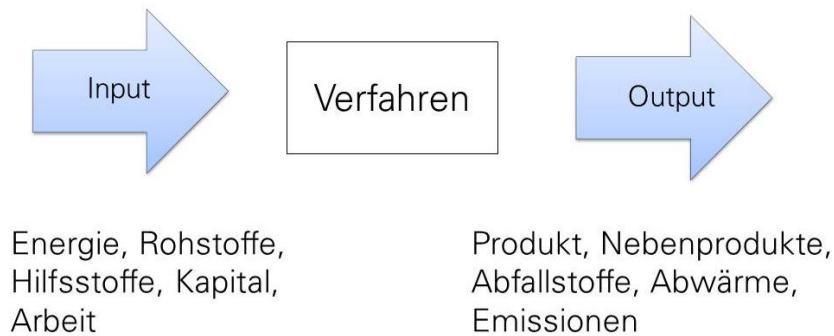


Abbildung 3: Verfahren in einer BlackBox-Darstellung²²

Die Abbildung 3 zeigt das Verfahren als Black Box und die Einflussgrößen eines Verfahrens. Es werden die Inputfaktoren, die notwendigen Größen eines Verfahrens und die Outputfaktoren, Einflussgrößen, welche nach der Ausführung des Verfahrens vorliegen, dargestellt.

Zu allen Input- sowie Outputfaktoren wird eine Vielzahl an Informationen analysiert. Typische Fragestellungen sind hierbei z.B. Welche Produkte sollen erzeugt werden und welche Nebenprodukte entstehen im Produktionsprozess, oder wie viele Roh- Hilfs- und Betriebsstoffe müssen für das geplante Verfahren eingesetzt werden?

Neben der technischen Planung werden auch kaufmännische Fragestellungen betrachtet. Typische Fragestellungen sind hier z.B. Welche Investitionskosten müssen eingeplant werden oder wie hoch sind die Betriebskosten für Roh,- Hilfs- und Betriebsstoffe?

Diese analysierten Betrachtungen fließen als Vorgaben in ein grundlegendes Verfahrenskonzept ein. Aus dem Ergebnis der nach der Wirtschaftlichkeitsanalyse getroffenen Entscheidung können nun die ersten Planungen beginnen. Diese Planungen beinhalten u.a. Planungen bzgl. des Verfahrens, der Termine und Kostenschätzungen.

²² (vgl.) W. Wagner: Planung im Anlagenbau, 2003, S.14, erstellt mit Power Point

Das Ergebnis am Ende des Pre-Engineerings beinhaltet das fertige Planungskonzept mit allen zugehörigen Komponenten, Ausrüstungen und Apparaten. Die bestehende HOAI (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure) bildet hierbei eine gesetzliche Grundlage für den Leistungskatalog bzw. den Inhalt des Planungskonzepts. Grundsätzlich wird dieses Konzept mit allen Beteiligten des Projektes abgestimmt.

Im Technischen Anlagenbau gilt es in der Regel auch rechtliche Rahmenbedingungen zu beachten. So ist es üblich, in dieser Phase des Anlagenbaus etwaige Behörden zu informieren und auf ein zukünftiges Projekt vorzubereiten. Es werden u.a. gesetzliche Restriktionen betrachtet, die für den Bau einer Anlage eine Rolle spielen.

3.2 Basic-Engineering

Danach beginnt die Ausführungsplanung des Basic-Engineering. Aufbauend auf vorangegangenen Planungsschritten werden die für die Anlage geplanten Apparate hier grundlegend für das Verfahren ausgelegt und definiert. Als Zielgrößen für die Auslegung der Apparate orientiert man sich an der Ausbringungsmenge sowie der Produktqualität.

Das Ergebnis des Basic-Engineering sind drei verschiedene Dokumente. Das erste Dokument ist eine Apparatliste in der die Hauptausrüstung sowie die Abmaße der Ausrüstung aufgeführt sind. Das zweite Dokument ist das R&I-Schema zur Dokumentation der Rohrleitungen und der Instrumente. Das letzte Dokument ist das Verfahrensfleißbild, welches eine schematische Darstellung des Verfahrens darstellt.

Aufbauend auf dem Basic-Engineering erfolgt im erweiterten Basic-Engineering die Erstellung einer Layoutplanung. Beginnend mit dem Layoutentwurf, bei dem Stahlbau, Rohrbrücken, Wege, Leitern, Treppen und Bühnen eingeplant werden, können mit diesem vorläufigem Layoutentwurf während der anfänglichen Planungsphasen eines Projekts etwaige neue Konzepte verändert und angepasst werden.

Die folgende Grafik zeigt den Zusammenhang zwischen Basic-Engineering und Detail-Engineering. Im Basic-Engineering wird der Grundstein für die Planung einer Anlage gelegt, und im Anschluss im Detail-Engineering exakt ausgearbeitet und festgelegt.

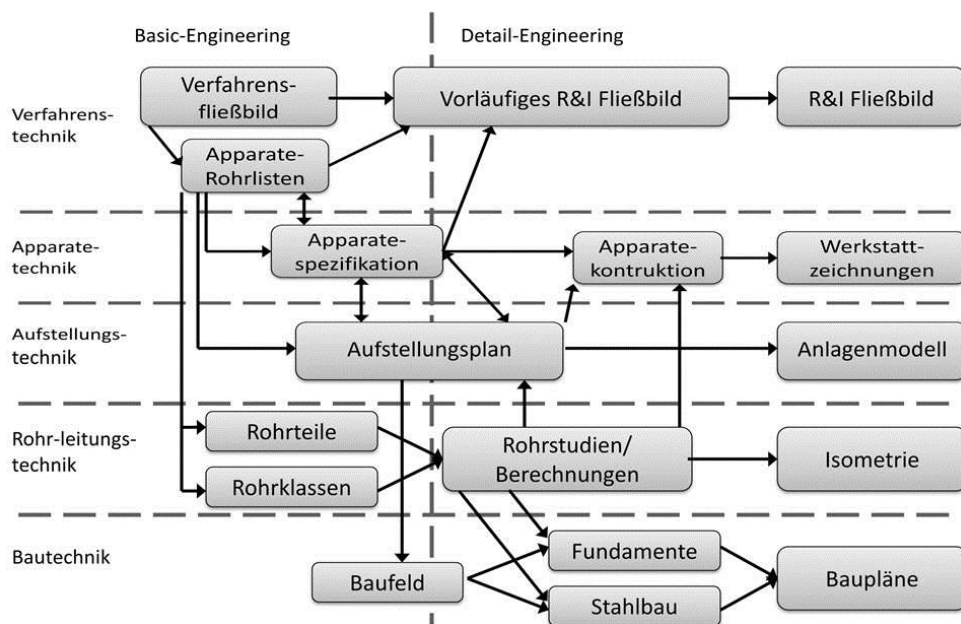


Abbildung 4: Schnittstelle zwischen Basic-Engineering und Detail-Engineering²³

Das Verfahrensfließbild gilt als Ursprung der gesamten Planung. Daher ist diesem Dokument ein hoher Stellenwert zuzurechnen. Darauf aufbauend ist das R&I Fließbild die Zusammenführung der Informationen aus Verfahrenstechnik und den anderen Gewerken.

Sobald die nötigen Informationen für die geplante Anlage erstellt und gesammelt sind, wird zum Ende des Basic-Engineering der Antrag auf behördliche Genehmigung gestellt. Ein Beispiel für die behördlichen Beschränkungen und Gesetze ist das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG). Laut Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz ist das Ziel des Gesetzes, „die Menschen, die Tiere, die Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen“.²⁴

3.3 Detail-Engineering

Nach der verfahrenstechnischen Auslegung der Ausrüstung erfolgt im Detail-Engineering die ausführliche Auslegung der Apparate und Maschinen. Mit den auf Basis der im Basic-

²³ : I. Mierswa und T. Geisbe: Multikriterielle evolutionäre Aufstellungsoptimierung von Chemieanlagen unter Beachtung gewichteter Designregeln, Collaborative Research Center 531, University of Dortmund, 2004

²⁴ Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): https://www.gesetze-im-internet.de/bimsg/___1.html; 18.07.2017, 11.54 Uhr

Engineering erstellten Datenblättern und technischen Spezifikationen können die einzelnen Gewerke geplant und daraufhin die Ausrüstung mit langer Lieferzeit bestellt werden. Durch die oft hohe Komplexität der Ausrüstung kann es vorkommen, dass ein Zulieferer Monate für die Bereitstellung der Ausrüstungsteile benötigt.

Auf Grundlage der Dimensionierung der Hauptapparate ergeben sich für die Folgeapparate entsprechende Spezifikationen. So werden beispielsweise im Anschluss an einen definierten Behälter die sich daraus ergebenden Stutzen definiert, welche wiederum die Rohrleitungsplanung beeinflussen. Es entsteht so die Dimensionierung der Grenzen der Anlage, unter anderem auch Abgrenzungen bzw. statische Berechnung des Stahlbaus folgend auf die Berechnung der Lasten der Ausrüstung.

Das R&I-Fließbild ist das Dokument für die Erstellung der Detailplanung. Es zeigt in einer schematischen Darstellung das Zusammenwirken der Apparate und Ausrüstungen in einer Anlage, bzw. im Kleineren in einer Teilanlage. Diese Fließbilder sind den DIN/EN/ISO Normen unterworfen um zu gewährleisten, dass national sowie international die Verständlichkeit durch Einheitlichkeit der Maße, Kenngrößen, Symbole und Berechnungen der Pläne gewährleistet ist. In der Regel sind alle relevanten Daten der Anlage dargestellt, sowie die Informationen der EMSR-Regelkreise (Elektro-, Mess-, Steuer-, und Regeltechnikregelkreis) enthalten.

Am Ende des Detail-Engineering muss die Planung des Projekts soweit fortgeschritten sein, dass keine Änderungen mehr vorgenommen werden müssen. Es ist die Planung für die Planungsabwicklung abgeschlossen, eine Vielzahl von Materialstücklisten erstellt, es sind Angebote für Ausrüstung eingeholt und verglichen worden und eine Kostenüberprüfung hat stattgefunden.

3.4 Planungsabwicklung

Die Planungsabwicklung ist ein wichtiger Teil der Planung einer technischen Anlage. Es handelt sich hierbei um die Phase in der das Projekt von einem theoretischen Konstrukt in die Realität umgesetzt wird. Die Gefahr besteht, dass aufgrund von mangelnder Planung eine Verschiebung des Endtermins eines Projekts zu Stande kommt. Jede Verzögerung ist hierbei mit zusätzlichen Kosten verbunden.

Die zentrale Person dieser Phase ist der Projektleiter, der durch seine Erfahrung, Sorgfalt und Umsicht für das Gelingen verantwortlich ist. Er muss jegliche Maßnahmen erkennen, einleiten und durchsetzen, welche im Wesentlichen für den terminlichen und finanziellen Erfolg von Planung und Bau der Anlage verantwortlich sind.²⁵

Die Abwicklungsstunden werden als Grenze für die Unterscheidung der Organisationsstruktur herangezogen. Laut Bernecker soll bei einem Projekt mit einer hohen Anzahl an Abwicklungsstunden (>50.000 h) das Projekt funktional strukturiert werden. Die Planungsarbeit kann von einem Projektleiter nicht mehr ausreichend effektiv bearbeitet werden. Es gilt dann funktionale Umstrukturierungen in Teilprojekte mit je einem Projektleiter zu erstellen.

Wichtige Inhalte der Planungsabwicklung seien am Beispiel der Apparate im Folgenden erläutert. Ebenso wichtig sind die Abwicklungsplanung der Maschinen, der Rohrleitungen, des Stahlbaus, der Elektrotechnik, der MSR-Technik.

Behälter, Kolonnen und Wärmeübertrager gelten u.a. als Apparate. Diese sind der Hauptbestandteil der Anlage und werden von der Konstruktionsabteilung des Ingenieurbüros in enger Zusammenarbeit mit dem Hersteller konstruiert und hergestellt. Das chemische Verfahren findet in diesen Teilen der Anlage statt.

Das Endergebnis aus dieser Zusammenarbeit ist die Apparateleitzeichnung. „Diese ist eine Maßstäbliche Darstellung auf einem Formblatt und berücksichtigt die funktions- und einbauabhängigen Hauptabmessungen, alle wesentlichen konstruktiven, festigkeits- und werkstoffmäßigen Belange sowie die Erfordernisse von Transport und Montage, gesetzliche Vorschriften, die Regeln der Technik, Prüf- und Abnahmebedingungen“.²⁶

3.5 Bau und Montage

Im Anschluss an die fertige Planungsabwicklung für die gesamte Anlage beginnt die Phase des Baus und der Montage der Anlage. Diese umfasst alle nötigen Arbeiten zur Errichtung einer Produktionsanlage im technischen Anlagenbau. Sie stellt im weiteren Sinne ebenfalls einen Prozess dar. Der Prozess beginnt mit der Anlieferung der für den Bau

²⁵ vgl. G. Bernecker: a.a.O., S.227

²⁶ vgl. G. Bernecker: a.a.O., S.223

nötigen Ausrüstung und Anlagenteile und endet mit der Übergabe an die Inbetriebnahmeleitung.

Zu den wichtigsten Kernelementen der Montage gehören:²⁷

- Bau- und Montageplanung
- Geländeaufbereitung/Erschließungsarbeiten (sollten die Gegebenheiten des Standorts erst der Anlage angepasst werden müssen)
- Bau- und Stahlbauarbeiten
- Grobmontage der Apparate und Maschinen
- Vormontage, Rohrleitungsmontage
- Montage der EMSR Technik
- Vorbereitung der Inbetriebnahme

Der Bau und die Montage werden in den seltensten Fällen vom späteren Anlagenbetreiber in eigener Regie ausgeführt. Im Falle eines Turn-Key-Auftrags hat das Ingenieurbüro die Aufgabe die Anlage schlüsselfertig an den späteren Betreiber zu übergeben. Als Teil des Turn-Key-Konzeptes werden in der Realität häufig ein oder mehrere Subunternehmen mit dem Bau und der Montage beauftragt. Das Ingenieurbüro behält sich hierbei die Gesamtverantwortung der Montageplanung und des Montageablaufs vor. Durch die Zusammenarbeit mit Subunternehmen entstehen weitere Bau- und Montageverträge welche die Verantwortungsbereiche aller Parteien regeln und alle bau- und montagetechnischen Unterlagen in einem sog. „Montagehandbuch“ vereinen.

3.6 Inbetriebnahme

Laut der Deutschen Industrienorm DIN 32541:1977-05 ist die Inbetriebnahme das „Bereitstellen einer Maschine oder eines vergleichbaren Arbeitsmittels zur Nutzung“.²⁸ In der Praxis bedeutet der Prozess der Inbetriebnahme (Anfahren), die Anlage schrittweise in Betrieb zu nehmen. Es werden Nebenanlagen und Teilsysteme für Hilfsstoff-, Betriebsmittel-, und Energieversorgung angefahren, um die Grundlage für die Versorgung der Hauptsysteme zu gewährleisten. Es müssen u.a. Heizsysteme bei Endothermie bzw.

²⁷ vgl. K, Sattler, W. Kasper; a.a.O., S.925

²⁸ Deutsche Industrie Norm (DIN): 32541:1977-05

Kühlsysteme bei Exothermie der Reaktion installiert werden. Es folgt die Etablierung der Hauptsysteme mit deren Reaktionen.

Sind die Reaktionen erfolgreich angefahren wird der komplette Weg der Rohstoffe-Zwischenprodukte-Endprodukte getestet. Es gilt hier an den nötigen Stellen Betriebs- und Leistungsdaten zu dokumentieren, zu protokollieren und zu analysieren, Proben zu entnehmen, Flanschverbindungen zu überprüfen und entsprechende Nachbesserungen, Änderungen, Reparaturen oder Umstellungen durchzuführen. Dieser Probelauf steht am Beginn des Anfahrens einer Anlage und ist mit dem Erreichen der Nennlast beendet. Mitunter kann es beim Anfahren einer Anlage zu zahlreichen Komplikationen kommen. Es ist hierbei nicht unüblich, dass etwaige Nachbesserungen vorgenommen werden.

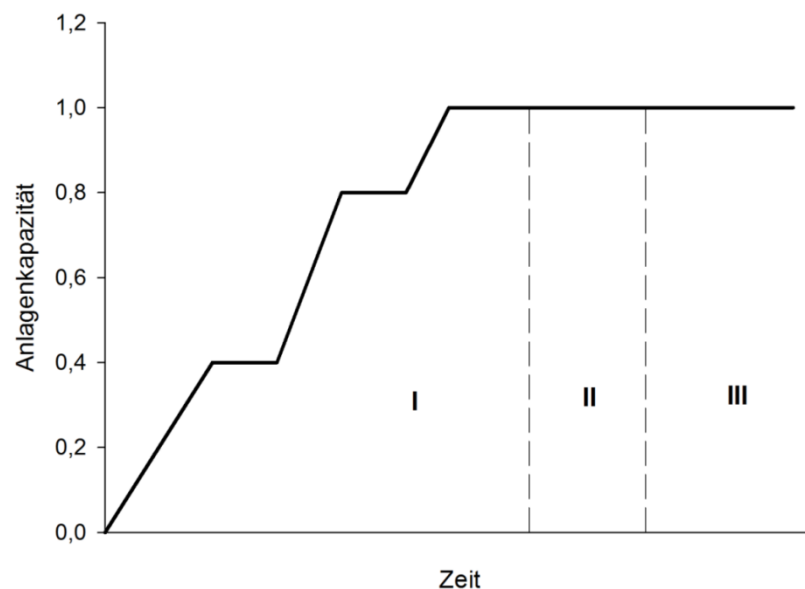


Abbildung 5: schematische Darstellung eines normalen Ablaufs einer Inbetriebnahme ohne wesentliche Störungen²⁹

- I. Anfahren mit Einstellung der Anlagenparameter auf Nennlast
- II. Leistungsnachweis
- III. Stabiler Dauerbetrieb

Der sog. Garantielauf bildet den Abschluss der Inbetriebnahmen. Meist wird die Anlage für 72 Stunden auf der gewünschten Nennlast gefahren und somit die Funktionsfähigkeit unter

²⁹ (vgl.) K.Sattler u. W.Kasper: Verfahrenstechnische Anlagen, Bau, Planung und Betrieb, Wiley-VHC Verlag, 2000, S.944, erstellt mit SigmaPlot 11.0

Beweis gestellt. In der Regel wird nach einem erfolgreich durchgeführten Garantielauf die Anlage an den Betreiber übergeben.

4. Verfahren der Kostenschätzung

Die in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren der Kostenschätzung sind vor allem auf den Chemischen Anlagenbau für Anlagen beliebiger Größe anzuwenden. Der Chemische Anlagenbau ist „ein technisches Gebiet und ein Wirtschaftsbereich, welcher sich mit der Konzipierung, Planung und Umsetzung von industriellen Anlagen beschäftigt. Der Anlagenbau Chemie ist hierbei ein Spezialgebiet zur Realisierung von Anlagen zur Produktion chemischer, petrochemischer und pharmazeutischer Produkte.“³⁰

Betrachtet wird der „Normalfall“, dass ein Auftraggeber mit einer Anfrage bzgl. der Planung einer Anlage auf ein Ingenieurbüro zugeht und im Anschluss den Auftrag der Kostenschätzung erteilt. Hierbei spielt es keine Rolle um welche Art von Anlage es sich handelt.

Mitunter ist es auch möglich, die in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren auf andere Projekte anzuwenden, dies ist jedoch in dieser Arbeit nicht betrachtet worden. Denkbar wäre auch eine Anwendbarkeit in anderen Branchen wie zum Beispiel in der Bio- oder Lebensmitteltechnologie.

Die folgenden Verfahren der Kostenschätzung unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht. Zum einen ist der Ansatzpunkt, also der Zeitpunkt, wann eine Kostenschätzung sinnvoll ist, grundlegend verschieden, zum anderen ist die Herangehensweise an die Schätzungen unterschiedlich.

4.1 Kapazitätsverfahren

Die Kapazitätsverfahren basieren vor allem auf dem Vergleich von Durchsätzen, Produktionsleistungen oder spezifischen Größen von Anlagen. Sie erfordern nur wenige Eingabedaten und haben somit einen begrenzten Planungsaufwand. Es gilt eine Beziehung zu bekannten und gleichartigen Anlagen gleicher oder anderer Größe herzustellen und

³⁰ A. Jaeck: <http://www.internetchemie.info/chemiemarkt/anlagenbau.htm> ; 18.07.2017; 11.58 Uhr

daraus ableitend die Investitionskosten zu ermitteln. Man unterscheidet drei verschiedene Arten der Kapazitätsverfahren.

4.1.1 Vergleich mit einer älteren Anlage der gleichen Produktion

Voraussetzung: Weitestgehende Übereinstimmung in Produktqualität und Durchsatz

Vorgehen: Die bekannten Kostengruppen werden mit den gesammelten Informationen aus älteren Anlagen verglichen und falls nötig mit einem Index versehen, um etwaige Änderungen mit einzubeziehen. Ein Beispiel hierfür ist die Inflation oder Preisentwicklung im Laufe der Zeit.

4.1.2 Vergleich mit Anlage anderer Größe

Voraussetzung: Hinreichende Vergleichbarkeit vor allem in Produktqualität der Anlage muss gewährleistet sein.

Vorgehen: Die Berechnung erfolgt durch die Umrechnung der Kosten K_1 und Durchsatz X_1 der bekannten Anlage mithilfe eines Degressionsexponenten auf die Kosten K_2 der geplanten Anlage für deren Nennleistung X_2

$$K_2 = K_1 \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^m$$

Laut Bernecker (2001) nimmt der Degressionskoeffizient einen Werte zwischen $0,32 < m < 0,87$ an. Als Mittelwert wurde für 71 Anlagen $m=0,71$ berechnet.³¹

4.1.3 Vergleich mit ähnlichen Anlagen

Voraussetzung: Hinreichende Vergleichbarkeit in Verfahren, Produktion und Durchsatz, jedoch nicht bei der Erzeugung des gleichen Produkts.

Vorgehen: Es erfolgt eine Umrechnung der Investitionskosten, bzw. eines Investitionskostenmittelwertes, der kostenmäßig bekannten Anlagen auf die Nennleistung der geplanten Anlage. Sollten keine ausreichend vergleichbaren

³¹ vgl. G. Bernecker: a.a.O., S.154

Anlagen zur Verfügung stehen, werden Anlagenteile, bzw. bekannte und vergleichbare Verfahrensschritte zu Hilfe genommen. Aus diesen Informationen werden dann die Kosten ermittelt und aufsummiert.

4.2 Strukturverfahren

Diese Verfahren benötigen mehr Informationen als Kapazitätsverfahren, sind entsprechend aufwändiger aber auch genauer. Sie werden angewandt sobald die technische Vorplanung beendet und die grobe Struktur der Anlage bekannt ist. Vor allem Mengen- und Stoffbilanzen müssen bekannt und die Hauptausrüstung muss hinreichend dimensioniert sein. Die Strukturverfahren basieren auf der Berechnung der Kosten der Hauptausrüstung. Meist werden in späteren Phasen der Planung die Strukturverfahren verfeinert, indem man bei zunehmendem Informationsstand der Anlage präzisere Werte für die Anlage als Berechnungsgrundlage wählt. In frühen Projektphasen werden die Kosten der Hauptausrüstung geschätzt, in späteren werden die geschätzten Kosten durch beim Hersteller nachgefragte Kosten ersetzt.

Die Kosten der übrigen Leistungen sowie der Hilfsapparate werden aus Erfahrungswerten ermittelt. Aus den Kosten der Hauptausrüstung und der Hilfsapparate werden die Gesamtkosten errechnet.

4.2.1 Gesamtfaktorenmethode

4.2.1.1 Lang-Verfahren

Das Lang-Verfahren ist eine im Jahre 1947 entwickelte Faktorenmethode. Lang stellte bei einer Untersuchung von 14 Anlagen fest, dass eine relativ konstante Verknüpfung der gesamten Anlagenkosten und der Summe aus Maschinen- und Apparatelkosten besteht (Lang, 1948). Sollten die Kosten der kompletten gelieferten Ausrüstung bekannt sein, lassen sich die Kosten der Anlage durch Faktoren leicht schätzen. Aus Fließschema sowie Mengen- und Stoffbilanz werden Informationen für die Art und die Anzahl der Hauptausrüstung entnommen. Bei einer Pumpe müssen beispielsweise Leistung, Bauart, Betriebsdruck und Betriebstemperatur feststehen, um die Hauptausrüstung dimensionieren zu können.

Bei diesem Verfahren werden die Kosten für die Hauptausrüstung durch Multiplikation mit einem Faktor berechnet, dem sog. Lang-Faktor (f_L)³²

K – Summe der Kosten der Hauptkomponenten

f_L – Langfaktor

$$K = \sum K_{\text{Hauptapparate}} * f_L$$

Aus der Analyse einer größeren Menge von Anlagen hat Lang den Lang-Faktor für verschiedene Anlagen wie folgt dargestellt.

f_L	3,10 für Aufbereitungsanlagen im Bereich Steine/Erden
f_L	3,63 für einfache Chemieanlagen
f_L	4,74 für komplexe Chemieanlagen

Dieser Faktor lässt sich in vier Teilfaktoren aufschlüsseln

f_1	Erfassung der Montage der Hauptausrüstung
f_2	Erfassung von Verbindungsleitungen und Armaturen
f_3	Erfassung von Baumaterial und Bauausführung
f_4	Erfassung von Engineering und Zuschlägen

und wie folgt berechnen:

$$f_L = f_1 * f_2 * f_3 * f_4$$

4.2.1.2 Miller-Verfahren

Miller stellte fest, dass die zunehmende Größe der Anlage, edleres Material der Ausrüstung und höherer Betriebsdruck in der Anlage zu einer Erhöhung der Maschinen- und Apparatkosten im Vergleich zu den Kosten der Nebenpositionen führt. Er führte daraufhin den Begriff der mittleren Anschaffungskosten ein. Hierbei erhält das Strukturverfahren eine Sensitivität gegenüber der Anlagenkapazität. Bei größeren Anlagen mit höherwertigen Werkstoffen und höherem Betriebsdruck steigen die mittleren Anschaffungskosten für die Apparate und Maschinen, wohingegen die Zuschlagsfaktoren für die Nebenpositionen

³² vgl. Hirschberg, a.a.O., S.1143

sinken. Durch diese Annahme entsteht eine direkte Verknüpfung bzw. eine Abhängigkeit der Kosten der Nebenpositionen zur Preisentwicklung der Hauptpositionen.

Abbildung 6 zeigt den Gesamtfaktor für direkte Anlagenkosten in Abhängigkeit vom Mittleren Maschinen- und Apparatwert. Für die Berechnung der Vertrauensgrenzen geht Miller von einer statistischen Sicherheit von 95% aus. Mit steigendem Maschinen- und Apparatwert werden diese Vertrauensgrenzen enger. Zum Beispiel liegen die Vertrauensgrenzen zwischen 20000 und 40000 DM bei $\pm 30\%$. Wenn also in diesem Bereich die Gesamtfaktorenmethode angewendet wird, kann man in 95 von 100 Fällen eine Genauigkeit von mindestens $\pm 30\%$ erwarten.

Kurve (a) lineare Regressionskurve der mittleren Maschinen- und Apparatwerte

Kurve (b) Vertrauensgrenzen bei einer statistischen Sicherheit von 95%

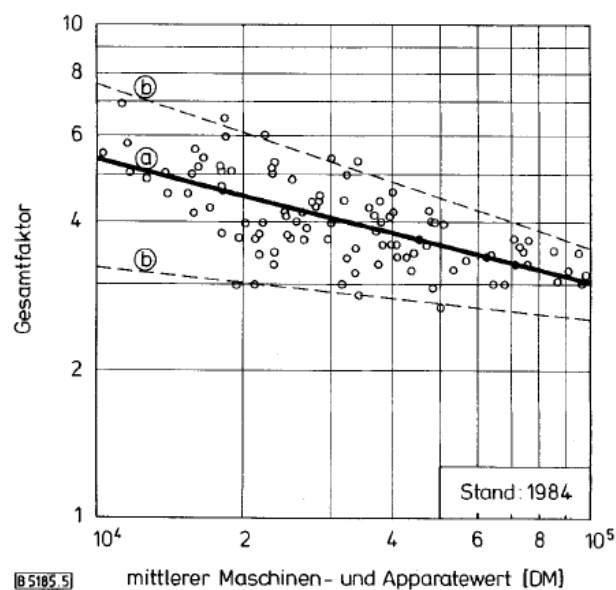


Abbildung 6: Gesamtfaktor für die direkten Anlagenkosten in Abhängigkeit vom mittleren Maschinen- und Apparatwert³³

³³ (vgl.) P. Prinzing et al.: Investitionskostenschätzung für Chemieanlagen, Chemie Ingenieur Technik (57), 1985, Nr. 1, S.8-14

4.2.2 Einzelfaktorenmethode

Die Einzelfaktorenmethode ist eine Methode, welche angewandt wird, wenn die Planungsarbeit bereits im Pre-Engineering angelangt ist. Sie wird an konkrete Bedingungen angepasst. Die Investitionskosten berechnen sich „aus der Summe der Hauptausrüstung multipliziert mit dem Wert 1 plus der Summe der differenzierten Zuschlagsfaktoren für direkte und indirekte Nebenpositionen“³⁴

Die Einzelfaktorenmethode soll an folgender Übersicht verdeutlicht werden.

Nr.	Anlagengegenstand bzw. Gewerk und/oder Arbeitsfähigkeit	Basisfaktor bzw. Zuschlagsfaktor	Faktor (gewählt)	Betrag
1	Kosten-Bezugsbasis: Kosten für Hauptausrüstungen (Maschinen, Apparate, Sonderausrüstung), inkl. Lieferung frei Baustelle	1,00		
2	Nebenkosten insgesamt, davon:	2,35.....4,94		
2.1	Montage der Hauptausrüstung, inkl. Hebezeug	0,15.....0,22		
2.2	Material für Rohrleitungen, inkl. Rohrleitungsteile, Armaturen, Dichtungen	0,30.....0,60		
2.3	Montage der Rohrleitungen, inkl. Rohrleitungsteile, Armaturen, Dichtungen	0,20.....0,40		
2.4	Lieferung/Material der Prozessleittechnik (MSR)	0,45.....0,90		
2.5	Montage der Prozessleittechnik (MSR), inkl. Funktionsprüfung	0,20.....0,45		
2.6	Lieferung/Material der Elektrotechnik	0,18.....0,36		
2.7	Montage der Elektrotechnik	0,10.....0,20		
2.8	Lieferung und Montage der technischen Gebäudeausrüstung	0,08.....0,18		
2.9	Material und Leistung für Tiefbau (Fundamente, Erdarbeiten für Kabel- und Rohrverlegung, Oberflächenbefestigung)	0,08.....0,20		
2.10	Material und Leistung für Hoch- und Stahlbau	0,40.....1,00		
2.11	Material und Leistung für Dämmung und Isolation	0,09.....0,18		
2.12	Korrosionsschutz (gesamt)	0,02.....0,04		
2.13	Gerüstbau (gesamt)	0,03.....0,05		
2.14	Baustelleneinrichtung	0,02.....0,04		

³⁴ vgl. K. H. Weber: Engineering verfahrenstechnischer Anlagen, Springer Verlag, 2014, S. 359

2.15	Sicherheitsüberprüfung bzw. -kontrollen (z.B. TÜV, Behörden, Sachkundige u.a.)	0,03.....0,08		
2.16	Unabhängige QS-Prüfungen bzw. -kontrollen (z.B. beim Hersteller oder während Montage)	0,02.....0,04		
3	Direkte Anlagenkosten (Summe 1 bis 2.16)	3,45.....5,94		
4	Indirekte Anlagenkosten			
4.1	Engineering, inkl. Behörden-Engineering (ohne Montage- und Inbetriebnahmeleistung)	20.....30% von Pos. 3		
4.2	Gebühr Genehmigungsbehörde	0,5.....2% von Pos. 3		
4.3	Procurement-Unterstützung	nach Aufwand		
4.4	Bau- /Montageleitung und -überwachung	nach Aufwand		
4.5	Inbetriebnahme/-unterstützung	nach Aufwand		

Tabelle 1: Zuschlagsfaktoren für die Kalkulation der Investitionskosten von kompletten verfahrenstechnischen Anlagen³⁵

Im Beispiel wird gezeigt, dass auf einen Basisfaktor (Hauptausrüstung) durch einen Zuschlag der verschiedenen Gruppen von Nebenkosten die direkten Anlagenkosten und darauf aufbauend die Indirekten Anlagenkosten ermittelt werden können. Die Werte der Zuschlagsfaktoren sind in Bereichen angegeben. Der Anlagenplaner muss hierbei festlegen in welchem Rahmen er die Zuschläge wählt und inwieweit die Anlage geplant und kalkuliert wird.

Eine von der Firma BASF beauftragte Studie wurde 1973 von Helfrich und Schubert³⁶ veröffentlicht. In dieser Studie wurden zu 150 chemischen Anlagen Informationen gesammelt, analysiert und ausgewertet. Das Ergebnis waren erarbeitete Zuschlagsfaktoren für 5 verschiedene Anlagentypen (Anlagentyp A-E), welche ein Bezugsmodell bilden. Diese Einteilung beginnt mit einfachen Anlagen (Anlagentyp A) und ist gekennzeichnet durch komplexer werdende Anlagentypen. Sie gliedern sich wie folgt auf:

Typ A:	Technikums- und Feinchemieanlagen (mittlerer Apparate- und Maschinenwert 10 T€)
	Merkmale: Heterogene Zusammensetzung der Apparate und Maschinen, überwiegend austenitischer Stahl, geschlossener Bau
Typ B:	Farb- und Hilfsmittalanlage (mittlerer Apparate- und Maschinenwert 20 T€)

³⁵ K. H. Weber a.a.O., S.362, Praxisbeispiel

³⁶ Helfrich, F., Schuber, W. (1973); Ermittlung von Investitionskosten, Einfluß auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung; Chem. Ing. Tech. 45, 13, 891-897

	Merkmale: Vorwiegend Rührbehälter und Behälter sowie Trockner und Filter, überwiegend C-Stahl, geschlossener Bau
Typ C:	Kunststoffanlagen (mittlerer Apparate- und Maschinenwert 30 T€)
	Merkmale: Vorwiegend Rührbehälter, einige Behälter, daneben teure Maschinen wie z.B. Extruder, spezielle Pumpen; 60% austenitischer und 40% C-Stahl, geschlossener Bau
Typ D:	Einstranganlagen (mittlerer Apparate- und Maschinenwert 75 T€)
	Merkmale: Vorwiegend Spaltöfen, Kolonnen, Wärmetauscher und Verdichter, einige Behälter; 50% austenitischer Stahl und 50% C-Stahl, Freiluftanlage
Typ E:	Große Destillationen (Kolonnendurchmesser zum Teil >2m; mittlerer Apparate- und Maschinenwert 100 T€)
	Merkmale: Vorwiegend Kolonnen, Wärmetauscher, Behälter; überwiegend C-Stahl, offenes Apparategerüst, Kolonnen auf Einzelfundamenten

Tabelle 2: Anlagentypen nach BASF³⁷

Durch die unterschiedliche Einteilung der Anlagentypen ergeben sich unterschiedliche Zuschlagsfaktoren. In der folgenden Übersicht soll dies deutlich gemacht werden. Diese Zuschlagsfaktoren zum Ermitteln des Anlagenkapitalbedarfs chemischer Anlagen gemäß BASF sind in der folgenden Übersicht dargestellt.³⁸

Lfd. Nr.	Position	BASF (Stand 1996)					Mittelwert (%)
		Anlagentyp					
		A	B	C	D	E	
	Mittlerer Apparate- und Maschinenwert (TDM)	20	40	60	150	200	45
1	Apparate und Maschinen	100	100	100	100	100	100
1a	Montage von (1)	15	10	8	6	4	9
2	Rohrleitungen und Armaturen	42	33	28	20	18	31
2a	Montage von (2)	77	54	43	27	22	50
3	Isolierung, Anstrich	21	15	12	8	7	14
4	Elektronische Einrichtung	26	21	18	14	13	20
4a	Montage von (4)	19	14	11	7	6	13
5	Mess- und Regelgeräte	95	62	53	34	30	58
5a	Montage von (5)	16	11	9	6	5	10
6	Gebäude, Apparategerüste	85	65	58	39	33	62
6a	Baunebenarbeiten, Fundamente	22	16	13	9	8	15
7	Heizung, Lüftung, Sicherheit	12	9	7	5	4	8
8	Direkte Anlagenkosten	530	410	360	275	250	390

³⁷ (vgl.)H. Ullrich: Wirtschaftliche Planung und Abwicklung Verfahrenstechnischer Anlagen, 1996, S. 134

³⁸ Persönliche Information von Herrn Dr. Bender/BASF AG im April 1996 aus H. Ullrich: a.a.O., S. 134

9	Planung und Abwicklung	10 bis 20% von (11)					
10	Unvorhergesehenes	bis 10% von (11)					
11	Anlagenkapital bezogen auf (1)	710	545	480	365	335	520

Tabelle 3: Zuschlagsfaktoren zum Ermitteln des Anlagenkapitalbedarfs chemischer Anlagen³⁹

Eine Anlage vom Typ A wird mit einem Faktor von 710% der Apparate- und Maschinenkosten bewertet, wohingegen eine Anlage vom Typ E nur mit einem Faktor von 335% versehen wird.

4.3 Modulare Kostenschätzung

Eine im letzten Jahrzehnt aufgekommene Möglichkeit die Qualität und Effizienz der Kostenschätzung zu steigern bietet die Modularisierung der Ausrüstungen. Im Allgemeinen sind Module untereinander austauschbare oder erweiterbare Gruppen von Apparaten und Maschinen. Für eine Kostenschätzung bieten diese Module eine äußerst gute Grundlage, da bereits in frühen Phasen der Planung eine detaillierte Planung möglich ist.

Die Grundlage für eine Planung im „modularen Engineering“ bildet eine Art Modulbaukasten. Dieser Modulbaukasten wird zusammengestellt aus Anlagen- bzw. Ausrüstungsteilen. Die Bedingung hierfür ist, dass die Anlagen- bzw. Ausrüstungsvariante mit einem gewissen Wiederholungsgrad geplant und zusammengebaut werden kann. Dadurch lassen sich in allen Projektphasen Kosten senken und die Qualitätsstandards steigern.

Durch eine Definition von Schnittstellen in einer Anlage und durch kontinuierliche Innovation der einzelnen Module ist es möglich einzelne überarbeitete Module zu erneuern bzw. auszutauschen. Dies führt zu einem langfristigen Erfolg der Methode.

In einschlägiger Fachliteratur wurde der Begriff der „Standardausrüstung“ für den modularen Ansatz neu definiert. Es gibt zwei Möglichkeiten Ausrüstung zusammenzufassen. Zum einen können sie funktional unmittelbar zusammenhängen, hierbei ist auch meist eine räumliche Nähe zu erkennen, und zum anderen können Module verfahrenstechnisch die gleichen Aufgaben haben. Kampczyk hat 2003 die Lagerung und Förderung von Edukten und

³⁹ (vgl.) J. Schulze: Modernisierter Preisindex für Chemieanlagen, Chem. Ind. XXXII, 10, S. 657ff; sowie Persönliche Information von Herrn Dr. Bender/BASF AG im April 1996

Produkten dargestellt welche jeweils eine Kombination von Pumpen und Behältern erfordern.⁴⁰

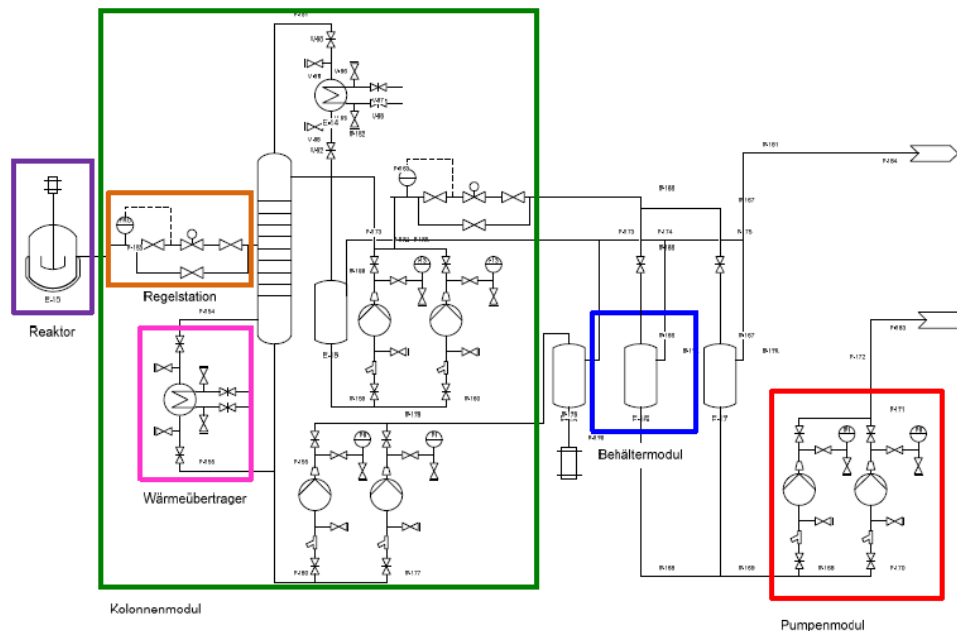


Abbildung 7: Strukturiertes Verfahrensfliessbild⁴¹

In Abbildung 07 ist das Verfahrensfliessbild einer Teilanlage dargestellt. Gekennzeichnet sind mögliche Modulanordnungen für die jeweiligen Ausrüstungen. Das Ziel dieser Anordnung ist eine beispielhafte Zerlegung, um einzelne Bauteile zu einer Art Standardausrüstung zusammenzufassen. Diese Standardausrüstung bzw. die jeweiligen Module können in anderen Teilen der Anlage oder gar in anderen Anlagen neu angeordnet und kombiniert werden. Am Beispiel der Ausrüstung Pumpen soll dies veranschaulicht werden. Die vorrangige Aufgabe einer Pumpe ist ein Medium zu fördern und zu dosieren. Somit gehört die Pumpe zu den mechanischen Grundoperationen ohne Stoffumwandlung. Es gibt eine Vielzahl von möglichen Auslegungen einer Pumpe. Diese können einer Vielzahl von Restriktionen unterworfen sein, wie etwa die Eigenschaft des zu fördernden Mediums, die

⁴⁰ vgl. C. Lühe: Modulare Kostenschätzung als Unterstützung der Anlagenplanung für die Angebots- und Basic-Engineering Phase, 2013, S. 53

⁴¹ G. Schembeker und H. Uzuner: Abschlußbericht und Vortrag zum Forschungsvorhaben AIF/IGF-Nr: 15344 N; DECHEMA-Haus, Frankfurt am Main, 2010

Art der Pumpe oder der benötigten Leistung. Pumpenarten sind z.B. Kreiselpumpen, Membranpumpen, Dosierpumpen, Kolbenpumpen uvm.

Nach Schembecker und Uzuner (2010) werden die wesentlichen Designkriterien für Pumpen wie folgt ausgewählt:⁴²

Pumpensystem	-Offenes oder geschlossenes System
Entscheidungsbaum	<ul style="list-style-type: none"> -Mit Reservepumpe? -Mit Mindeststromabsicherung? -Mit Rückschlagventil? -Mit evakuierter Saugleitung? -Mit sicherer Entlüftung? -Mit ständigem Bypass (mit Freiluftventil)? -Getrennte oder gemeinsame Bypass-Leitung für die Reservepumpe? -Vollautomatisches Umschalten auf Reservepumpe? -Reservepumpe Produktgefüllt? -Fördermedium bei Normbedingungen dampfförmig?
Zusatzverrohrung	<ul style="list-style-type: none"> -Kühlung oder Beheizung der Pumpe nötig? -Mit oder ohne Spülanschluss? -Mit geschlossener Entleerung? -Trockenlaufschutz für die Pumpe? -Kalt- oder Warmstellen der Reservepumpe?
Dichtungsmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> -Einfache Gleitringdichtung -Doppelte Gleitringdichtung -Spaltrohrmotorpumpe -Pumpe mit Magnetkupplung

Tabelle 4: Designkriterien für Pumpen

In dieser Form der Entscheidungsfindung kann ein Pumpenmodul ausgelegt und angepasst werden. Es ist somit für einzelne Module möglich eine wiederholbare Auslegung zu erarbeiten und daraufhin in einer Anlage zu verwirklichen. Gleiches ist auch bei Wärmeübertragern, Verdampfern, Behältern, Reaktoren, Mischern und Rührern, Kolonnen und Filtern möglich.

⁴² Schembecker, G. und Uzuner, H. (2010): Abschlußbericht und Vortrag zum Forschungsvorhaben AIF/IGF-Nr: 15344 N; DECHEMA-Haus, Frankfurt am Main

5. Vergleich der Verfahren der Kostenschätzung

Aus den Erläuterungen der Verfahren der Kostenschätzung geht hervor, dass die Berechnung der voraussichtlich entstehenden Investitionskosten eine anspruchsvolle Aufgabe darstellt. Zunächst folgt die Kritik der einzelnen Verfahren, dann werden die Verfahren in Bezug auf ihre Anwendung in der Realität miteinander in Verbindung gesetzt.

5.1 Kapazitätsverfahren

Eine chemische Anlage, in die investiert wird, wird letztendlich als ein Unikat betrachtet. Ein Vergleich zwischen zwei Projekten bzw. zwei Anlagen kann somit nur näherungsweise und unter Beachtung der konkreten Gegebenheiten repräsentativ sein. Unter Umständen ist es möglich verschiedene existierende Systeme (z.B. Abwassersysteme, Elektroverteilung, oder ggf. Labor oder Lager) für die zu bauende Anlage in Anspruch zu nehmen und so die Investitionskosten der Anlage zu senken. Im Gegensatz dazu können für die Erschließung des Standorts überproportional hohe Kosten entstehen, weil die Gegebenheiten des neuen Standorts große Unterschiede zu denen der Vergleichsanlagen aufweisen. Entsprechend müssen die Kosten für einzelne Systeme aus der Schätzung herausgerechnet oder diese erhöht werden.

Für die Berechnung selbst werden wenige Daten benötigt und somit wenig Zeit für die Berechnung in Anspruch genommen. Die Daten beruhen auf der Produktionsleistung oder spezifischen Größe einer Anlage. Die Genauigkeit der Schätzung ist bei $\pm 50\%$.⁴³ Es lassen sich generell nur allgemeine Aussagen zu den Kosten und der Rentabilität eines Projektes ableiten. Das Kapazitätsverfahren dient somit vor allem der Ermittlung von Orientierungswerten in frühen Phasen der Anlagenplanung.

Aufgrund der statistischen Betrachtungen, die dem Kapazitätsverfahren beim Vergleich mit Anlagen anderer Größe (Abschnitt 4.1.2) zugrunde liegen, ist der Wert für den Degressionskoeffizienten m welcher von einem Anlagenplaner zu wählen ist relativ schwierig zu bestimmen. Für m müssten Kriterien zu Rate gezogen werden, um eine Verbesserung der Genauigkeit der Schätzung zu gewährleisten.

⁴³ vgl. U. Strauch: Modulare Kostenschätzung in der chemischen Industrie. Konzept eines integrierten Systems zur Abschätzung und Bewertung des Kapitalbedarfes für die Errichtung chemischer Anlagen, TU Berlin, 2008; S.20

5.2. Strukturverfahren

5.2.1 LANG-Verfahren

Die Schätzmethode nach Lang ermöglicht eine schnelle Ermittlung und eine einfache Darstellung der gesamten Kosten einer Anlage. Nicht betrachtet werden die Abhängigkeit der Kosten der Hauptausrüstung vom Werkstoff, der Ausrüstungsgröße und den Zustandsbedingungen im Apparat (z.B. Druck und Temperatur).

Die von Lang gewählte Einteilung der Zuschläge (Lang-Faktoren) ist relativ grob, vor allem angesichts der großen zahlenmäßigen Unterschiede der Kostenzuschläge. Ebenso liegen die Zuschläge absolut gesehen relativ hoch, so dass laut Hirschberg (1999) die Vermutung nahe liegt, dass Anteile von Infrastruktur miterfasst werden⁴⁴. Als Beispiel wird hier der Baukostenanteil genannt.

Durch die starren Zuschlagsfaktoren ist es meist problematisch diese an neue Verfahren und Prozesse anzupassen. Nötig ist dann eine Anpassung der spezifischen Faktoren.

5.2.2 Miller-Verfahren

Auch das Kostenschätzverfahren nach Miller hat den Nachteil, dass Maschinen- und Apparatkosten zunächst einzeln ermittelt werden müssen und dieser Wert mit einem relativ hohen Faktor multipliziert wird. Jedoch ist die Kostenschätzung nach Miller genauer als die des Lang Verfahrens.

Das Verfahren ist sehr aufwändig, benötigt viel Zeit und viele bereits vorliegende Informationen müssen für die Kostenschätzung vorliegen. Oft sind diese in frühen Phasen der Planung noch nicht gegeben. Dadurch wird meist in der Praxis das Lang-Verfahren bevorzugt.

5.2.3 Einzelfaktorenmethode

Die Einzelfaktorenmethode ist in erster Linie für die Ermittlung der Investitionskosten kompletter Anlagen geeignet. Die Zuschlagsfaktoren beziehen sich auf eine „ganzheitlich,

⁴⁴ H. G. Hirschberg: Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau, Springer-Verlag, 1999, S. 1144

typisch spezifizierte verfahrenstechnische Anlage“⁴⁵, welche auf einer sog. „grünen Wiese“, gemeint ihr hiermit die Neuerrichtung einer Anlage auf einem gänzlich unbebauten Gelände mit erschlossener Zuwegung, errichtet wird. Für den Umbau, die Erweiterung, Erneuerung und Instandhaltung einer bereits bestehenden technischen Anlage fehlen Standards. Diese Arbeiten sind i.d.R. hochgradig speziell und von Anlage zu Anlage unterschiedlich. Daher ist das Verfahren der Einzelfaktorenmethode dafür weniger oder gar nicht geeignet. Es gilt also:

*„Je spezieller ein Projekt und die Investition,
je weniger ist die Einzelfaktorenmethode geeignet!“⁴⁶*

Laut Weber (2014) baut ein Kostenermittler das Kostenmodell auf einer Erfahrung von wenigstens zwei vorher abgeschlossenen Projekten auf. Das erworbene Wissen aus den zuvor abgeschlossenen Projekten, sowie die analysierten Werte des Projekts fließen in ein Bezugsmodell ein, mit dem das neue Projekt verglichen werden kann. Es gilt hier die Kostenpositionen und/oder Zuschlagsfaktoren projektspezifisch anzupassen und daraufhin anzuwenden. Es wird so deutlich, wo Unterschiede und Gemeinsamkeiten im Vergleich der Bezugsanlage und des neuen Projekts liegen.

Die Kosten für die Hauptausrüstung haben als Bezugsbasis jeglicher Berechnung den größten Einfluss auf die Höhe des berechneten Betrags sowie auf die Genauigkeit der Berechnung. Es ist daher nötig, dass die Hauptausrüstung möglichst genau spezifiziert und unter Wettbewerbsbedingungen beim Hersteller angefragt wurde. Gerade eine besonders teure Sonderausführung von Apparaten und Maschinen (z.B. Hochvakuumpackungen und/oder Edelstahlauskleidung in einer Kolonne) steigert die Bezugsbasis enorm. Hierbei ist zu beachten, dass dabei die berechneten Zuschläge der Nebenpositionen ungerechtfertigt erhöht würden. Als Lösung wird i.d.R. der teure Apparatewert durch einen „fiktiven“ Apparatewert ersetzt, welcher eine Normalausführung nahe kommt.

Preise und Währungen unterliegen weltweit einem schnellen Wandel. Faktoren wie Inflation und Preisbildung von Rohstoff-, Material-, und Transportkosten müssen betrachtet werden und mit etwaigen Korrekturfaktoren versehen werden.

⁴⁵ vgl. Weber: ,a.a.O., S. 361

⁴⁶ K. Weber; a.a.O., S. 361

Die gewählte Bauweise hat einen großen Einfluss auf die Kostenposition „Bau“. Zum Beispiel spielt es eine große Rolle, ob die Anlage eine Freianlage oder Inhouseanlage bzw. in Hoch- oder Flachbauweise ausgeführt wird.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Kostenposition „Prozessleittechnik“ hat der Grad der Automatisierung. Es ist ein großer Unterschied ob die Anlage wenige oder viele prozessgerichtete Steuerungen hat (Anfahrsteuerung, Rezeptsteuerung, fernbediente Anlage u.ä.).

In der Fachliteratur wird vermehrt darauf hingewiesen, dass die Einzelfaktorenmethode eine Methode der Kostenschätzung darstellt, bei der der Anwender viel Erfahrung und zum Teil auch Intuition mit in die Planung des Projektes einfließen lassen sollte, um gute Ergebnisse zu erzielen.

5.3 Modulare Kostenschätzung

Dieses Verfahren kann angewandt werden, wenn die Anlage als modulare Anlage geplant wird. Die Vorteile einer modular geplanten Anlage liegen im günstigen Bau der Anlage, denn durch einen hohen Wiederholungsgrad können Reparaturen und Montagen vereinfacht werden. Durch einen modularen Aufbau kann gewährleistet werden, dass der Austausch einzelner Module den Produktionsprozess wenig beeinflusst und er so schnell realisiert werden kann. In der Planungsphase kann auf vorhandene Module und somit auf vorhandene Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Somit werden durch die effektivere Planung Entwicklungskosten und Entwicklungszeit eingespart.

Die Inbetriebnahme einer Anlage ist, wie in Abschnitt 3.6 gezeigt, ein Teil des Bauprozesses. Durch die modularisierten Anlagenteile kann dieser beschleunigt werden, indem bspw. eine Vielzahl der Module bereits nach der Herstellung auch beim Hersteller im Prüffeld getestet werden. Die Module werden vom Hersteller als montagefertige Anlagenteile ausgeliefert. Am Standort der Anlage werden die Module miteinander verbunden und technisch abgenommen, um ihre Funktionsweise zu garantieren.

Dem praktischen Nutzen stehen zum einen ein erheblicher Arbeits- und Koordinationsaufwand und zum anderen die Problematik der Aktualität der Module gegenüber. Gerade von frühen Phasen der Planung bis zur Vollendung einer Anlage können viele Jahre verstreichen, in dem die Technik, welche für die Anlage infrage kommt,

verändert, verbessert oder gar ganz obsolet wird. Dies führt zu der Problematik, dass die Kostenschätzung in regelmäßigen Abständen überprüft und evtl. überarbeitet werden muss.

Diese Darlegungen belegen, dass die Kostenschätzung für modulare Anlagenplanung besonders in späten Phasen der Anlagenplanung geeignet erscheint. Durch die gute Anpassungsfähigkeit an technische Gegebenheiten liefert das Verfahren mit geeigneter Datenbasis eine hohe Genauigkeit der Prognose. Jedoch wird ein hohes Maß an Input vorausgesetzt.

Laut Weber (2014) erfordert sie „neben viel Know-how auch ein geeignetes Softwarewerkzeug sowie insbesondere eine umfangreiche Datengrundlage“.⁴⁷ Für einen Anlagenplaner ist also zu beachten, dass Wissen und Erfahrung auf dem aktuellen Stand gehalten wird. Dies wird vor allem durch das Abschließen vieler Projekte erworben. Oft ist dies für kleinere Unternehmen schwer umsetzbar.

⁴⁷ K. H. Weber: a.a.O., S. 336f

5.4 Genauigkeitsvergleich ausgewählter Verfahren

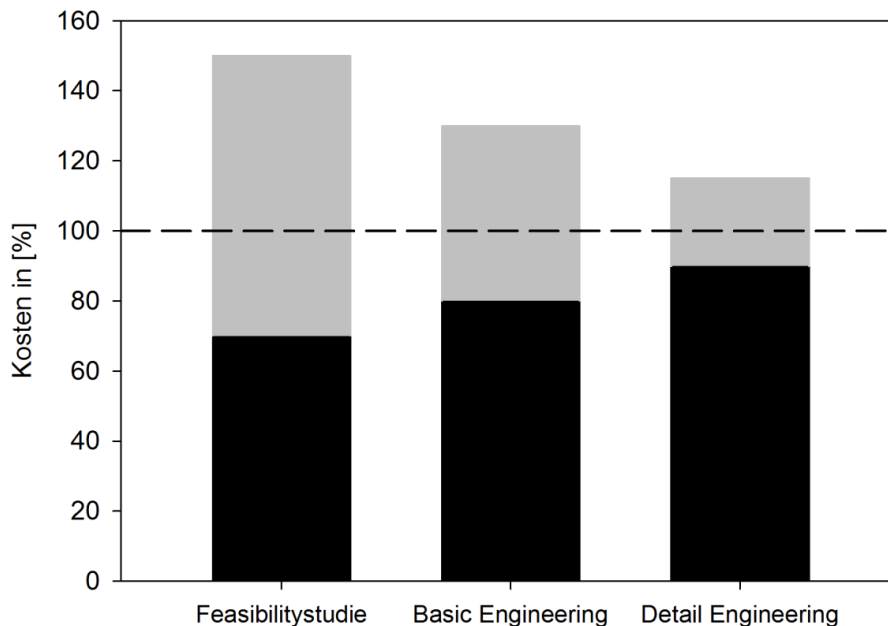


Abbildung 8: Erwartete Genauigkeit bei klassischer Verfahrensentwicklung gemäß den AACE-Richtlinien

Abbildung 8 und Abbildung 9 veranschaulichen die Unterschiede von klassischen Kostenschätzmethoden (Kapazitäts- und Strukturverfahren) und modernen Methoden (Modulare Kostenschätzung). Abbildung 8 zeigt den Verlauf der erwarteten Genauigkeit der Schätzung. Es wird deutlich, dass der Grad der Genauigkeit bei zunehmendem Wissensstand über den Aufbau der Anlage zunimmt. Die Anlage wird als Unikat geplant und ist somit aus der Sicht der Kostenschätzung bei jeder weiteren Anlage von neuem zu schätzen.

In Abbildung 9 wird dargestellt, dass modulare Kostenschätzung in allen Phasen der Anlagenplanung deutlich genauere Schätzungen zulässt. In diesem Modell wird von einer 80%igen Unveränderlichkeit der Module ausgegangen. Die Kosten für die Module stehen weitestgehend fest und lassen sich schnell und genau in eine Kostenschätzung einarbeiten. Alleinig 20% der zu bauenden Anlage sind individuell auf die Anlage zugeschnitten.

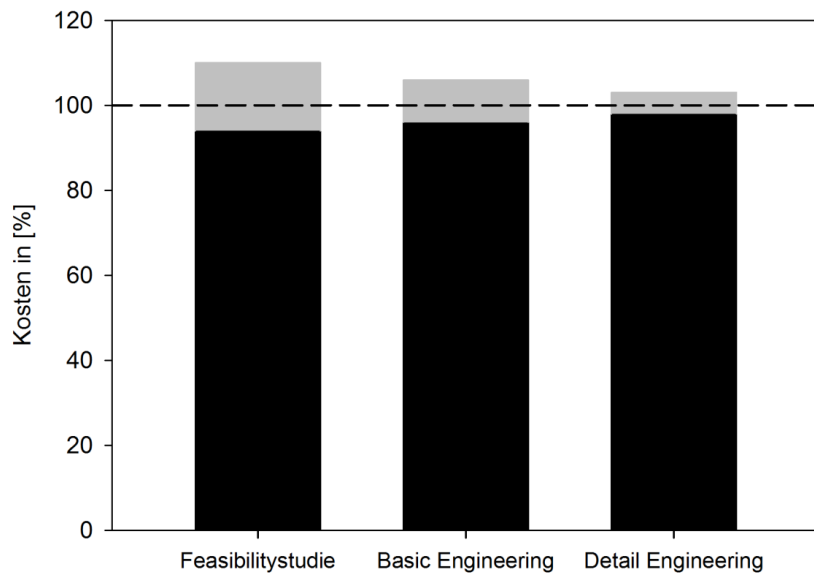


Abbildung 9: Erwartete Genauigkeit bei einem modularen Ansatz nach Hady⁴⁸

Laut Hady (2009) lassen sich in frühen Phasen der Anlagenplanung Genauigkeiten von -7,2% bis 10% erreichen und in späteren Phasen -2% bis 3%. Im Vergleich lassen sich mit klassischen Ansätzen Genauigkeiten in frühen Phasen von -30% bis 50% und in späteren Phasen -10% bis 15% erreichen.

⁴⁸ L. Hady: a.a.O., S.319ff

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden klassische sowie moderne Verfahren der Kostenschätzung im Technischen Anlagenbau erläutert und ihre Genauigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt im Planungsprozess dargestellt. Bei den klassischen Schätzverfahren werden entweder mathematische Konzepte für eine Berechnung zu Grunde gelegt (Kapazitätsverfahren) oder durch stochastische Betrachtung von Erfahrungswerten Zuschläge bestimmt, welche abhängig von den Eigenschaften der Anlage auf den Basiswert, die Summe der Kosten der Hauptausrüstung, aufgeschlagen werden (Strukturverfahren). Die modulare Kostenschätzung, als moderne Form der Kostenschätzung, ist durch eine höhere Genauigkeit der Schätzung gekennzeichnet. Durch eine sinnvolle Erstellung von Modulen sind oft schon in frühen Phasen der Planung relativ gute Prognosen möglich.

Jede Form der Kostenschätzung hat ihre Berechtigung. Durch spezielle Eigenschaften des Verfahrens ist unter bestimmten Umständen die Wahl eines Verfahrens mehr zielführend als das der anderen. Für den Anlagenplaner ist die Wahl eines Kapazitätsverfahrens beispielsweise zielführend, wenn er nach äußerst kurzer Bearbeitungszeit zu ersten Ergebnissen kommen muss. Im späteren Verlauf sind Strukturverfahren oder Verfahren der modularen Kostenschätzung (bei modularer Planung) deutlich genauer, aber auch mit deutlich mehr Arbeitsaufwand verbunden. Der Ansatzpunkt hier ist eine abgeschlossene Entwicklungsstudie, bei der die Hauptausrüstung zum ersten Mal definiert und ausgelegt wurde.

Bei der Anlagenplanung ist es von größter Wichtigkeit die im Projekt entstehenden Kosten im Blick zu behalten. Für die Kostenschätzung ist die Kenntnis der Kostentreiber daher von grundlegender Bedeutung. Bei allen Verfahren der Kostenschätzung gilt es hier die für die Ausrüstung spezifischen Kostentreiber zu kennen. Solche Kostentreiber können in Datenbanken recherchiert werden. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit ist es üblich, dass ein Unternehmen eine solche Datenbank erstellt hat. Für eine bessere Sammlung der Informationen für Kostentreiber wäre eine zentrale Datenbank sinnvoll.

Die Kostenschätzung an sich ist ein Prozess, welcher fließend in die Planung eingearbeitet werden sollte. Es muss eine regelmäßige Kontrolle der Kosten sowie eine Überprüfung der geplanten Kosten stattfinden. Demnach darf die Kostenschätzung nicht nur eine

Dienstleistung im Planungsprozess sein, sondern muss, im Bestfall, durch regelmäßiges Feedback der Informationen zu hochwertigen Ergebnissen führen.

In verschiedenen Artikeln in Fachzeitschriften wird auf eine Zunahme der Modularisierung im Technischen Anlagenbau hingewiesen. Laut der renommierten Fachzeitschrift PROCESS lässt sich durch die konsequente Anwendung der Modularisierung und Standardisierung eine mögliche Verbesserung des Geschäftsergebnisses von bis zu 10% erreichen.⁴⁹ Auch in der Kostenschätzung erweist sich das modulare Verfahren als aufwändig, aber auch am besten geeignet für eine Anlage mit modularem Aufbau. Es ist als relativ junges Verfahren noch optimierbar. Durch Einsatz von spezieller Software ist hier eine Möglichkeit gegeben zum einen Kosten einzusparen und zum anderen evtl. auftretende Fehlerquellen zu minimieren. Weiterführende Arbeiten könnten eine Bearbeitung der Kostenschätzung mittels Software untersuchen.

⁴⁹ PROCESS: 6-2014, S. 66

Literaturverzeichnis

G. Bernecker: Planung und Bau verfahrenstechnischer Anlagen Projektmanagement und Fachplanungsfunktionen, 4. Aufl., Heidelberg u.a.: Springer-Verlag, 2001

Bürgerliches Gesetzbuch (BGB): Vertrag (§§145-157 BGB), Gestaltung rechtsgeschäftlicher Schuldverhältnisse durch Allgemeine Geschäftsbedingungen (§§305-361 BGB)

Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): [https://www.gesetze-im-internet.de/bimsg/_1.html](https://www.gesetze-im-internet.de/bimsg/1.html), 18.07.2017, 11.54 Uhr

W. Danzer: Führungsaspekte und Widerstände bei der Realisierung von Projekten. Beitr. In „Projektorganisation“, Hrsg. W. Bloch, Bd. 19 Schriftreihe „Arbeitsstudium-Industrial Engineering“ des Verbandes für Arbeitsstudien – REFA e.V. Berlin, Köln: Beith-Verl. 1974

Deutsche Industrie Norm (DIN): 69901-5:2009-01

Deutsche Industrie Norm (DIN): 32541:1977-05

B. Ebert: Technische Projekte Abläufe und Vorgehensweisen, 1. Aufl., Weinheim: WILEY-VHC Verlag, 2002

A. Geibel-Kern: Kosten runter, aber wie?, PROCESS, 6-2014, S. 66-68

L. Hady, et al.: Investment cost estimation and calculation of chemical plants with classical and modular approaches, Chemical and Process Engineering (30), 2009, Nr.2, S.319ff

F. Helfrich, W. Schuber: Ermittlung von Investitionskosten, Einfluß auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung; Chem. Ing. Tech. 45, 1973, 13, S. 891-897

F. Helmus: Anlagenplanung von der Anfrage bis zur Abnahme, 1. Aufl., Weinheim: WILEY-VHC Verlag, 2003

H. Hirschberg: Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau Chemie, Technik, Wirtschaftlichkeit, 1. Aufl., Heidelberg u.a.: Springer-Verlag, 1999

A. Jaeck: <http://www.internetchemie.info/chemiemarkt/anlagenbau.htm>, 18.07.2017, 11.58 Uhr

C. Lühe: Modulare Kostenschätzung als Unterstützung der Anlagenplanung für die Angebots- und frühe Basic Engineering Phase, Dissertation, TU Berlin, 2013

I. Mierswa, T. Geisbe: Multikriterielle evolutionäre Aufstellungsoptimierung von Chemieanlagen unter Beachtung gewichteter Designregeln, Collaborative Research Center 531, University of Dortmund, 2004

P. Prinzing et al.: Investitionskostenschätzung für Chemieanlagen Chemie-Ingenieur-Technik 57, 1985, Nr. 1, S. 8-14

K. Sattler, W. Kasper: Verfahrenstechnische Anlagen - Planung, Bau und Betrieb, 1. Aufl., Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2000

G. Schembeker, H. Uzuner: Abschlussbericht und Vortrag zum Forschungsvorhaben AIF/IGF-Nr. 15344 N „Informationstechnische Unterstützung der Anlagenplanung für die Angebots- und frühe Basic Engineering Phase durch ein modulares Planungskonzept“, Gemeinsame Sitzung der Arbeitsausschüsse „Rechnergestützte Anlagenplanung“ und „Pipes, Valves and Pumps“, DECHEMA-Haus, Frankfurt am Main, 2010

U. Strauch: Modulare Kostenschätzung in der chemischen Industrie, Dissertation, TU Berlin 2008

H. Ullrich: Wirtschaftliche Planung und Abwicklung Verfahrenstechnischer Anlagen, 2. Neubearb. Aufl., Essen: Vulkan- Verl., 1996

K. Voigt, G. Schewe: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/13507/projekt-v7.html>, 18.07.2017, 11.49 Uhr

W. Wagner: Planung im Anlagenbau, 1. Aufl., Würzburg: Vogel, 1998

J. Weber: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/wirtschaftlichkeit.html>, 18.07.2017, 11.50 Uhr

K. Weber: Engineering verfahrenstechnischer Anlagen - Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen, 2. Aufl., Berlin u.a.: Springer-Verlag, 2016

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbstständig verfasst, in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt wurde und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen, einschließlich der angegebenen oder beschriebenen Software, verwendet wurden.

Daniel Baumgärtner, Student: 4055644, EMW Köthen

Ort,	Datum,	Unterschrift
Halle (Saale)	19.07.2017	

Prof. Dr. M. Bruschi, Hochschulmentor, 1. Prüfer

Dipl. Ing. T. Seidel, 2. Prüfer