

Kostenkalkulation im Anlagenbau: Modell zur Bewertung der Konkurrenzfähigkeit im Entwicklungsstadium

Stephan Horst, Jannik Höfer, Peter Kleine-Möllhoff*, Fabienne Wennagel, Nils Wiech, Michael Pfost, Berca Atmaca, Julia Gries und Rolf Epple

DOI: 10.1002/cite.202000023

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

Während Grundchemikalien größtenteils im industriellen Maßstab mittels verfahrenstechnisch optimierter Großanlagen hergestellt werden, entwickeln Forschungsinstitute biobasierte Prozesse zur Herstellung von Plattformchemikalien im Labor- und Pilotmaßstab. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Kostenkalkulationsmodell zur Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten verfahrenstechnischer Anlagen vorgestellt, auf dessen Basis die ökonomische Konkurrenzfähigkeit in der Entwicklung befindlicher Verfahren ermittelt werden kann. Das Modell ist für Anwendungen im industriellen Maßstab geeignet.

Schlagwörter: Chemieindustrie, Entwicklung, Furfural, Kostenkalkulationsmodell, Plattformchemikalien

Eingegangen: 25. Februar 2020; *revidiert:* 08. Mai 2020; *akzeptiert:* 03. Juni 2020

Cost Calculation in Chemical Plant Engineering: A Model for Assessing Competitiveness in the Development Stage

While basic chemicals are mainly produced on an industrial scale by means of process-optimized large-scale plants, research institutes are developing biotechnological processes for the production of platform chemicals on a laboratory and pilot scale. In the context of this work, a cost calculation model for estimating the investment and operating costs of process engineering plants is presented, on the basis of which the economic competitiveness of processes currently under development can be determined. The model is usable for industrial-scale applications.

Keywords: Chemical industry, Cost calculation model, Development, Furfural, Platform Chemicals

1 Einleitung

Die nachhaltige Herstellung von Erzeugnissen ist gesellschaftlich wie auch politisch ein aktuelles Thema. Insbesondere in der chemischen Industrie spielt die Nachhaltigkeitsdiskussion der Prozesskette eine wichtige Rolle. Im Fokus liegen dabei vor allem die petrochemisch hergestellten Grundchemikalien. In Wettbewerb zu diesen stehen aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellte Plattformchemikalien, die als Basis zur Herstellung von höherwertigen Chemikalien und Endprodukten dienen. Anwendung finden Plattformchemikalien u. a. in Kraftstoffen, der Verpackungs- und Lebensmittelindustrie sowie dem Kosmetikbereich [1].

Das Potenzial von biobasierten Plattformchemikalien wird als hoch eingestuft und ist daher Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Plattformchemikalien, wie beispielsweise Furfural, werden bereits im industriellen

Maßstab produziert. Die jährliche Produktionsmenge von Furfural liegt bei ca. 300 000 t pro Jahr [2].

Die biobasiert hergestellten Plattformchemikalien stehen in Wettbewerb zu petrochemisch hergestellten Grundchemikalien. Nachhaltigkeit ist zwar ein wichtiges aber kein ausschlaggebendes Verkaufsargument, sondern der Preis. Das heißt, die Herstellkosten der biobasierten Plattformchemikalien konkurrieren direkt mit den Herstellkosten der petrochemisch hergestellten Grundchemikalien.

Stephan Horst, Jannik Höfer, Prof. Peter Kleine-Möllhoff,
Fabienne Wennagel, Nils Wiech, Michael Pfost, Berca Atmaca,
Julia Gries, Rolf Epple
Peter.Kleine-Moellhoff@Reutlingen-University.de
Hochschule Reutlingen, ESB Business School, Alteburgstraße 150,
72762 Reutlingen, Deutschland.

Um Plattformchemikalien im industriellen Maßstab herzustellen, muss zum einen der Prozessablauf reibungslos funktionieren und zum anderen der Angebotspreis der Chemikalien konkurrenzfähig sein. Aktuell liegt der Fokus der Forschung auf der Entwicklung und Festlegung der Prozessrouten im Labor- bzw. Technikums-Maßstab. Um eine preisliche Konkurrenzfähigkeit der jeweiligen Prozesstechnologie am Markt sicherzustellen, ist eine frühzeitige Abschätzung des möglichen Angebotspreises der Plattformchemikalie auf Basis der Investitions- und Betriebskosten notwendig. Hierzu muss möglichst effizient und mit den in der Regel vorliegenden eingeschränkten Informationen eine Extrapolation vom Labor- oder Pilotmaßstab auf industrielle Anwendung ermöglicht werden. Die Vergabe von Forschungs- und Förderungsmitteln ist oftmals auch an ökonomische Analysen zur Konkurrenzfähigkeit der in der Entwicklung befindlichen Verfahren gekoppelt.

Aus Sicht der Forschung besteht die größte Schwierigkeit bei der Kostenermittlung zur Herstellung von Plattformchemikalien in der unzureichenden Datenverfügbarkeit von vergleichbaren Anlagen und deren Preisen im industriellen Maßstab. Ebenso lassen sich keine unmittelbaren Rückschlüsse von Laborprozessen auf deren künftige industrielle Machbarkeit ziehen. Es existieren zwar bereits Publikationen, die unterschiedliche Ansätze zur Abschätzung von Anlageninvestitionskosten im chemischen Anlagenbau in frühen Projektphasen erörtern (z. B. [3]), jedoch mangelt es an einem ganzheitlichen Modell in Form eines Leitfadens. Dieser sollte neben dem Vorgehen zur Berechnung der Investitionskosten auch eine Möglichkeit zur einfachen Dimensionierung der Apparaturen und der damit verbundenen Angebotseinholung bieten, da diese die Grundlage der Investitionskostenrechnung sind. Darüber hinaus sind für die ganzheitliche Betrachtung der Konkurrenzfähigkeit am Markt auch die Berechnung der Betriebskosten und aller weiteren Kosten zur Abschätzung des Preises, der am Markt angeboten werden kann, notwendig. Ziel ist es deshalb, ein für die Ermittlung des möglichen Angebotspreises von Plattformchemikalien ausgelegtes Kostenkalkulationsmodell zu entwickeln. Dieses Modell soll auf bereits bestehenden Kalkulationsmodellen aus der Betriebswirtschaftslehre aufbauen, die kombiniert, angepasst und anschließend auf bisher kostenseitig unbekannte Herstellungsprozesse angewendet werden können.

Das entwickelte Kostenmodell zielt somit darauf ab, die bestehenden Diskrepanzen zwischen Forschung und der Großindustrie zu schließen. Es findet überwiegend in der Forschungs- und Entwicklungsphase eines Herstellungsprozesses einer Plattformchemikalie Anwendung. Die Relevanz des vorgestellten Kostenmodells für Großunternehmen mit bereits etablierten Herstellungsprozessen ist verhältnismäßig gering, da diese auf Basis von Erfahrungswerten die Kosten mit einer sehr viel höheren Genauigkeit definieren können.

2 Methodik

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Kostenkalkulationsmodell basiert auf einer Vielzahl von unterschiedlichen Informationsquellen. Überwiegend wurden Literaturrecherchen, Experteninterviews, der Besuch der 5-HMF-Pilot-Produktionsanlage der Universität Hohenheim sowie Kenntnisse und Erfahrungen der Autoren in industrieller Wirtschaftlichkeitsrechnung als Informationsgrundlage genutzt.

Die Auswahl der in das Kalkulationsmodell integrierten Kostenfaktoren basiert auf einer ausführlichen Evaluation mittels Kriterien, wie Schätzgenauigkeit, Anwendbarkeit in frühen Entwicklungsphasen und Übertragbarkeit auf die Chemie- beziehungsweise Prozessindustrie.

Die Verifikation der Ergebnisse für die biobasierte Herstellung von Furfural erfolgt mithilfe des aktuellen Marktpreises (Stand Dezember 2019). Zusätzlich werden die Investitions- und Betriebskosten mithilfe von Angaben aus Literatur verifiziert.

3 Vorstellung des entwickelten Kostenkalkulationsmodells

Für die Kostenkalkulation des Angebotspreises wurde eine dreistufige Vorgehensweise entwickelt (s. Abb. 1). Dabei ist im ersten Schritt die Berechnung der Anlageninvestitionskosten notwendig, um auf Basis dieser im Folgenden die Betriebskosten ermitteln zu können. Für die Abschreibung wurde für das vorgestellte Modell eine lineare Abschreibung über 20 Jahre angenommen. In das Modell können aber andere Abschreibungsarten, z. B. über eine Annuitätenrechnung, ohne Probleme integriert werden.

Die Betriebskosten werden im zweiten Schritt kalkuliert und liefern als Ergebnis die Gesamtbetriebskosten der Anlage pro Jahr. Um die Restgemeinkosten, wie Entwicklungsgemeinkosten, Vertriebs- und Verwaltungsgemeinkosten sowie Gewinnmarge [4], die nicht in den Betriebskosten abgebildet sind, in die Rechnung zu integrieren, werden diese mittels allgemeinem Zuschlagsfaktor abgebildet.

Im dritten Schritt erfolgt die Validierung des in den Schritten 1 und 2 errechneten Angebotspreises mithilfe des aktuellen Marktpreises der jeweils betrachteten Plattformchemikalie. Der mit dem vorgestellten Kostenmodell errechnete Angebotspreis muss den Marktpreis der Chemikalie unterschreiten. Andernfalls ist nach Möglichkeiten der Reduktion von Kosten oder der Gewinnmarge zu suchen und es lassen sich Potenziale zur notwendigen Kostensenkung identifizieren [5]. Die Validierung mittels des Marktpreises ist somit ein wichtiger Aspekt des vorgestellten Kalkulationsmodells.

3.1 Berechnung der Investitionskosten

Die Ausgangsbasis zur Berechnung der Investitionskosten mittels des vorgestellten Kostenkalkulationsmodells bilden Informationen zum Prozess, die Apparatenliste sowie In-

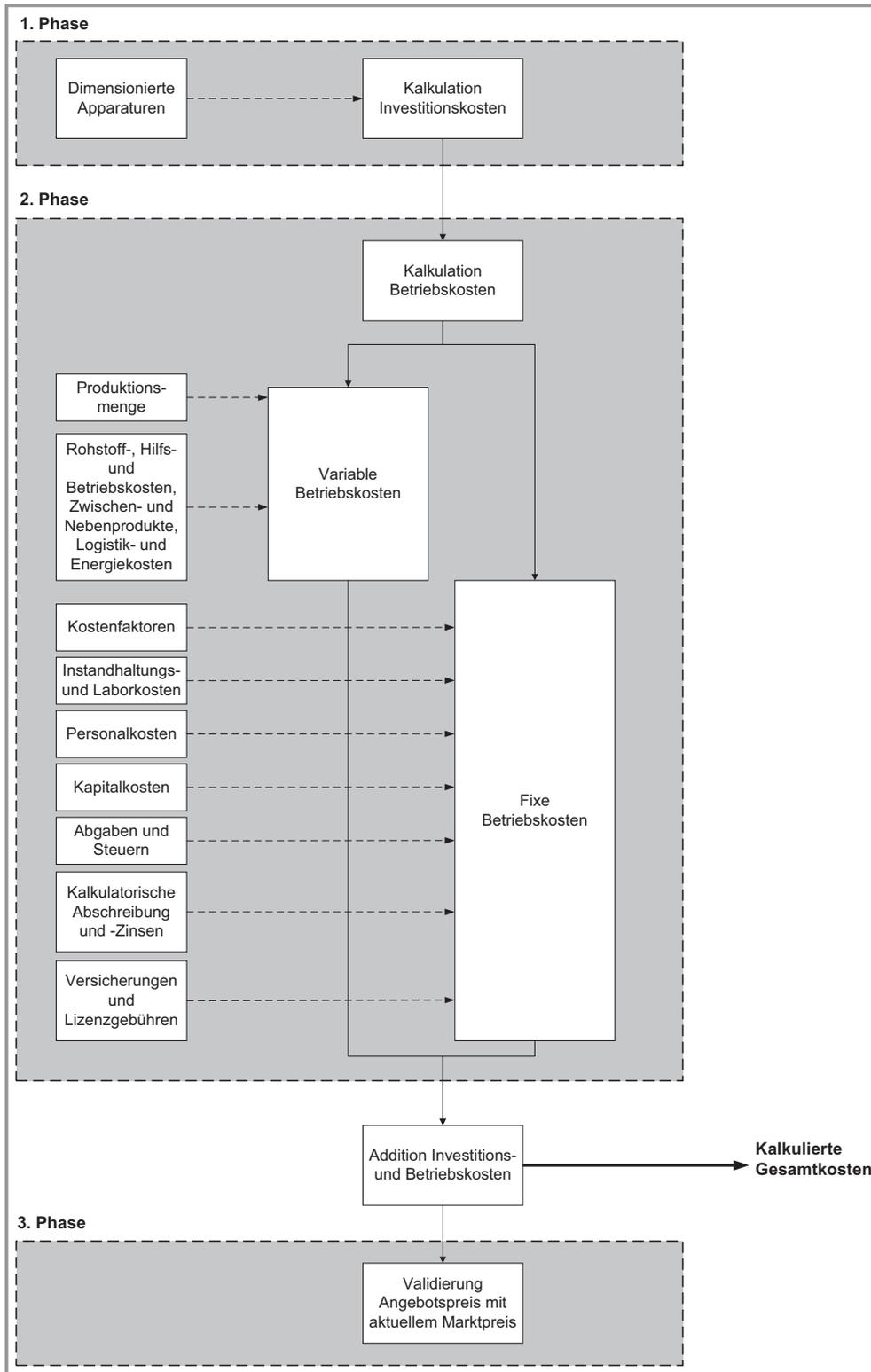


Abbildung 1. Ablauf bei der Kostenkalkulation mittels des vorgestellten, dreistufigen Modells.

formationen über die benötigten Rohstoffe (s. Tab. 1). Diese Informationen werden im ersten Schritt zur Dimensionierung der für den jeweiligen Prozessschritt nötigen Apparaturen herangezogen. Anschließend können Angebote einge-

holt und mittels der Faktormethode nach Hand [6] und der Plant Component Ratio (PCR) Methode [6] der gemittelte Anlageninvestitionspreis kalkuliert werden. Das Vorgehen ist in Abb. 2 veranschaulicht.

Tabelle 1. Benötigte Informationen zur Dimensionierung der Apparaturen als erster Schritt der Investitionskostenberechnung.

Bezeichnung	Beschreibung
Informationen zum Prozess	Prozessfließbild mit In- und Outputs sowie Verweilzeiten in den unterschiedlichen Prozessschritten
Apparaturenliste	Auflistung der zum Betrieb des jeweiligen Herstellungsprozesses notwendigen Apparatur
Benötigte Rohstoffe	Auflistung aller Eingangs- und Ausgangsstoffe inkl. deren benötigter Menge, physikalischen Eigenschaften und Verhältnissen zueinander
Informationen zum Endprodukt	Ausbeute des Endprodukts an den Eingangsstoffen und dessen Reinheit am Ende des Herstellungsprozesses
Betriebszeit des Herstellungsprozesses	Betriebszeit der Anlage pro Jahr sowie die Information über die Jahresproduktionsmenge

Zur Berechnung der Ein- und Ausgangsmengen je Prozesseinheit über die Zeit werden das Prozessfließbild, die Betriebszeit pro Jahr, die Jahresproduktionsmenge sowie die Ausbeute herangezogen. Begonnen wird mit dem Massenstrom des Endprodukts \dot{m} (s. a. Gl. (1)). Die Massenströme (in kg s^{-1}) für alle weiteren Rohmaterialien können dann über ihre jeweiligen Verhältnisse zu den Eingangs- oder Ausgangsstoffen abgeleitet werden (Gl. (2)).

$$\dot{m} = \frac{\text{Jahresproduktionsmenge}}{3600 \cdot \text{Jahresproduktionsstunden}} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{\text{Ausgang}P_n} = \dot{m}_{\text{Ausgang}P_{n-1}} + \sum_1^x \dot{m}_{\text{Eingangsstoffe}} - \sum_1^x \dot{m}_{\text{Ausgangsstoffe}} \quad (2)$$

mit $\dot{m}_{\text{Ausgang}P_n}$ = Massenstrom am Ausgang des Prozessschrittes P_n , $\dot{m}_{\text{Ausgang}P_{n-1}}$ = Massenstrom am Ausgang des vorgelagerten Prozessschrittes und $\sum \dot{m}_{\text{Eingangsstoffe}}$ = Summe der Eingangsstoffe die im Prozessschritt P_n in den Prozess gelangen.

Zur Dimensionierung bestimmter Apparaturen ist eine Berechnung der Volumina (m^3) notwendig. Hierfür wird die Information über den Volumenstrom am Ausgang der Prozesseinheit benötigt. Dieser lässt sich mittels der Dichte aus dem Massenstrom errechnen. Ebenso bedarf es der von der Plattformchemikalie und Herstellungsprozess abhängige Verweilzeit. Die in der vorgestellten Kalkulationsmethode angewandte Dimensionierung eines Prozessschrittes ist beispielhaft in Gl. (3) veranschaulicht.

$$V_{P_n} = \dot{V}_{\text{Ausgang}P_n} \tau_{P_n} \quad (3)$$

mit V_{P_n} = Volumen des Prozessschrittes P_n , $\dot{V}_{\text{Ausgang}P_n}$ = Volumenstrom am Ausgang des Prozessschrittes P_n und τ_{P_n} = Verweilzeit des Stoffes im Prozessschritt P_n .

Falls die Information der Verhältnisse für alle im Laufe des Prozesses ein- und ausgebrachten Stoffe nicht vorliegt und somit der Massenstrom und Folgewerte nicht berechnet werden können, müssen diese Verhältnisse abgeschätzt werden. Bei chemischen Reaktionen kann das Verhältnis, sofern die Information für wenigstens einen Stoff vorliegt, über die molare Masse der Reaktionsedukte und -produkte als Annäherung an die realen Verhältnisse unter Beachtung der stöchiometrischen Gesetze gebildet werden. Genauer kann die Abschätzung erfolgen, wenn Informationen über die Ausbeute an den Reaktionsedukten oder die Selektivität der Reaktionen bekannt sind. Dann kann auch der Anteil ermittelt werden, der nicht vollständig reagiert ist.

Sind die im Prozess benötigten Apparaturen dimensioniert, kann zur Kostenfindung übergegangen werden. Dabei werden die in Abb. 2 zwei veranschaulichten und im Folgenden näher erläuterten Herangehensweisen verfolgt.

Die erste Möglichkeit zur Ermittlung des Preises einer Apparatur beruht auf der Angebotsrecherche, basierend auf den Dimensionierungsanforderungen, sowie weiteren Forderungen aus dem Prozessablauf. Dabei bezieht sich die Recherche auf den direkten Kontakt zu Herstellern solcher Anlagen, auf die Nutzung von Katalogen (für Standardteile wie Pumpen) und die Recherche mittels Händlerplattformen im Internet. Für den Fall, dass kein adäquates Angebot für die geforderte Spezifikation eingeholt werden kann, muss die zweite alternative Herangehensweise zur Preisermittlung gewählt werden. Bei dieser wird neben dem Angebot, das sich der geforderten Spezifikation annähert, ein weiteres Referenzangebot gesucht. Mithilfe des Referenzangebots soll ein preislicher Zusammenhang in Bezug auf die wichtigsten Anforderungen (z. B. Speicherkapazität eines Tanks) zwischen den beiden Angeboten hergestellt werden, mit dem anschließend das zutreffendste Angebot linear skaliert wird. Eine lineare Skalierung ist die Multiplikation eines ermittelten linearen Faktors mit dem Referenzangebot. Um genauere Ergebnisse zu erzielen, können auch Degressionsexponenten zur Skalierung eines einzelnen Angebots herangezogen werden. Die Anwendung von Degressionsexponenten unterscheidet sich von der linearen Skalierung dahingehend, dass diese anstatt einem linearen Kostenverlauf einen degressiven Kostenverlauf der einzelnen Apparaturen beschreiben. Ein Beispiel einer solchen Degression kann durch einen exponentiellen Zusammenhang wie in Gl. (4) dargestellt werden.

$$y = ae^{bx} \quad (4)$$

mit y = preisliches Ergebnis der Skalierung, a = Ausgangspreis des Referenzangebotes und e^{bx} = exponentieller Anstieg des Preises mit Mehrleistung, Durchsatz etc.

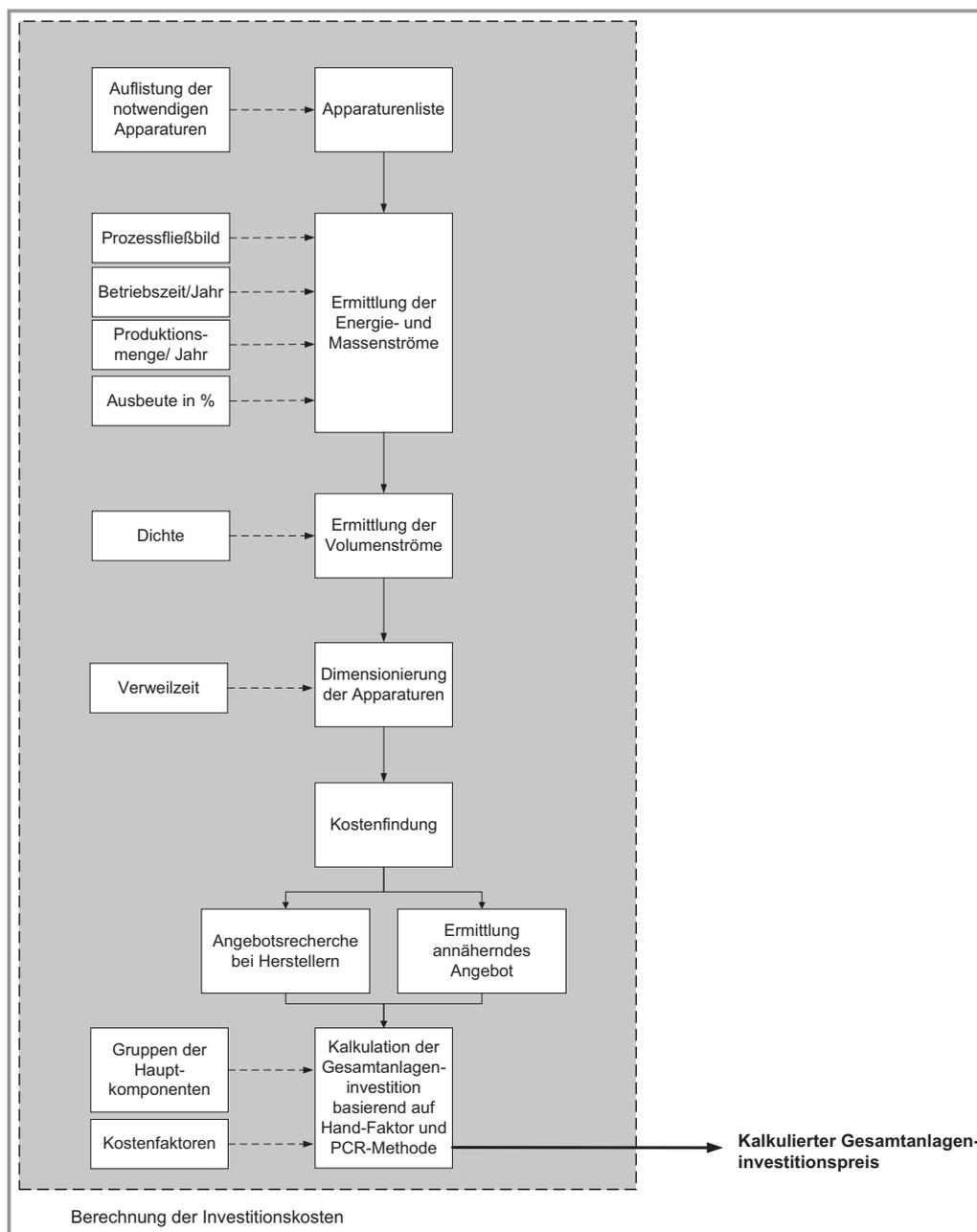


Abbildung 2. Ablauf des Vorgehens bei der Berechnung der Investitionskosten.

Im nächsten Schritt erfolgt die Kalkulation der Gesamtanlageninvestition mittels der Hand-Faktormethode sowie der PCR-Methode. Die Grundlage für die Hand-Faktormethode bilden die im vorherigen Schritt dimensionierten und bepreisten Apparaturen. Zur Berechnung werden die Hauptkomponenten der Apparaturenliste zu bestimmten Produkt- oder Erzeugnisgruppen zugeordnet und mit individuellen Kostenfaktoren belegt. Die Kostenfaktoren beinhalten die zusätzlich zum Preis der Apparatur entstehenden Kosten (z. B. beim Einbau der Apparatur). Der Kostenfaktor variiert abhängig von der Produkt- bzw. Erzeugnisgruppe, der die

Apparatur zugeordnet wird. Tab. 2 veranschaulicht die Zuordnung der Erzeugnisgruppen zu den Kostenfaktoren [6].

Gl. (5) dient zur Ermittlung der direkten Investitionskosten (\$):

$$K_{\text{din}} = \sum_E (P_E F_E) \quad (5)$$

mit K_{din} = direkte Investitionskosten, P_E = Preis der Apparatur und F_E = Kostenmultiplikationsfaktor der verfahrenstechnischen Komponente.

Tabelle 2. Zuordnung der Multiplikationsfaktoren zu den Erzeugnisgruppen nach der Hand-Faktormethode [6].

Hauptkomponente	Kostenmultiplikationsfaktor F_E
Destillationskolonnen	4,0
Druckbehälter	4,0
Wärmeübertrager	3,5
Öfen	2,0
Pumpen	4,0
Verdichter	2,5
Instrumente	4,0
Sonstige Ausrüstung	2,5

Von den direkten Investitionskosten werden mittels Kostenfaktoren die zusätzlichen Kostenbestandteile, wie die indirekten Investitionskosten (z. B. Infrastruktur), die verfahrenstechnischen Kosten (Entwicklung, Konstruktion etc.) und der Risikozuschlag, abgeleitet. Die Summe aus der Multiplikation der zusätzlichen Kostenbestandteile und den direkten Investitionskosten ergibt die gesamten Investitionskosten. Die Kostenfaktoren zur Ermittlung der zusätzlichen Bestandteile sind in Tab. 3 angegeben [7].

Tabelle 3. Zuordnung der Kostenfaktoren F_X zu den Kostenbestandteilen, die mit den direkten Investitionskosten multipliziert werden.

Kostenbestandteil F_X	Kostenfaktor absolut
Indirekte Investitionskosten	0,4
Verfahrenstechnische Investitionskosten	0,2
Risikozuschlag	0,15

Aus Tab. 3 ergibt sich Gl. (6) zur Ermittlung der gesamten Investitionskosten (\$):

$$K_{\text{Ges}} = K_{\text{dIn}}(1 + F_{\text{il}} + F_{\text{vK}} + F_{\text{RZ}}) \quad (6)$$

mit K_{Ges} = Gesamtinvestitionskosten, F_{il} = Kostenfaktor indirekte Investitionskosten, F_{vK} = verfahrenstechnischer Kostenfaktor und F_{RZ} = Risikozuschlagsfaktor.

Zum Vergleich der angewendeten Kostenschätzung nach Hand wird die PCR-Methode als zweiter Ansatz zur Ermittlung der Investitionskosten angewendet, um im Anschluss einen Mittelwert aus beiden Methoden zu bilden. Als Grundlage für diese Methode dienen generelle Kostenverteilungsfaktoren für chemische Anlagen. Dabei werden neben den direkten (s. Tab. 4) auch die indirekten Kostenverteilungsfaktoren (s. Tab. 5), die beim Bau von chemischen Anlagen zu berücksichtigen sind, aufgeführt [6].

Tabelle 4. Direkte Kostenverteilungsfaktoren für die Gewerke beim Bau chemischer Anlagen [6].

Kategorie	Kostenverteilungsfaktoren [%]
Apparaturen	39
Fundament	4
Isolierung	4
Baustellenarbeit	4
Gebäude	10
Kanäle	1
Verkabelung	8
Instrumentierung	8
Rohrleitungen	22

Die vollständige Apparaturenliste dient als Basis zur Ermittlung der Apparaturenkosten und ist daher in Tab. 4 an erster Stelle aufgelistet. Die Summe aller Apparaturenkosten ergibt nach der PCR-Methode 39 % der direkten Kosten einer chemischen Anlage. Daraus können mithilfe eines Dreisatzes die weiteren direkten Kostenfaktoren ermittelt werden. Dieser Schritt, unter der Annahme der gesamten Apparaturenkosten = 500 000 \$, wird in Gl. (7) beispielhaft an der Ermittlung der Fundamentkosten dargestellt.

$$K_{\text{Fun}} = F_{\text{Fun}} \frac{K_{\text{Apa}}}{F_{\text{Apa}}} = 4 \frac{500000 \text{ \$}}{39} = 51282 \text{ \$} \quad (7)$$

mit K_{Fun} = Fundamentkosten, K_{Apa} = Apparaturkosten, F_{Apa} = Kostenfaktor Apparaturkosten und F_{Fun} = Kostenfaktor Fundamentkosten.

Die Summe der einzelnen Kostenverteilungsfaktoren ergeben die direkten Investitionskosten (\$) nach PCR einer chemischen Anlage (Gl. (8)).

$$K_{\text{dIn}} = \sum_F \left(\frac{K_{\text{Apa}}}{F_{\text{Apa}}} F_F \right) \quad (8)$$

mit F_F = Kostenverteilungsfaktoren des zu ermittelnden Kostenpunkts.

Im nächsten Schritt werden die indirekten Investitionskosten nach PCR ermittelt. Diese sind abhängig von den direkten Investitionskosten. Tab. 5 gibt die Verhältnisse zwischen den direkten Investitionskosten und den indirekten Kostenverteilungsfaktoren an.

Gegenüber der Tab. 3 ergeben sich andere Verteilungsfaktoren, weil es sich bei der Hand- und der PCR-Kostenschätzung um unterschiedliche Methoden handelt. Durch die Faktoren aus Tab. 5 lassen sich aus den direkten Kosten, die nach [6] 28 % der Gesamtkosten ausmachen, zusätzlich die indirekten Kosten beim Bau einer verfahrenstechnischen Anlage in der chemischen Industrie ermitteln. Das Verhält-

Tabelle 5. Indirekte Kostenverteilungsfaktoren für die Komponenten beim Bau chemischer Anlagen [6].

Kategorie	Kostenverteilungsfaktor [%]
Direkte Investitionskosten	28
Verfahrenstechnische Auslegung	10
E- und Leittechnik	2
Indirekte Baustellenkosten	15
Mitarbeiterkosten Baustelle	30
Materialkosten Baustelle	15

nis zwischen direkten Investitionskosten und den indirekten Kosten ist mittels der Kostenverteilungsfaktoren gegeben und kann somit ermittelt werden (analog zu Gl. (7)). Die Gesamtanlagenkosten ergeben sich aus der Summe der direkten und indirekten Investitionskosten.

In das Kostenmodell geht zur Abschreibung der Investitionskosten der Mittelwert aus der Faktormethode nach Hand und der PCR-Methode ein.

3.2 Berechnung der Betriebskosten

Betriebskosten werden überwiegend in Kosten pro Jahr angegeben [8]. Grundsätzlich können die Betriebskosten in zwei Arten unterschieden werden, nämlich fixe und variable Betriebskosten. Im Gegensatz zu den fixen Betriebskosten sind die variablen Betriebskosten abhängig von der Produktionsmenge. In Tab. 6 sind die einzelnen Kostenpositionen den fixen und variablen Betriebskosten zugeordnet aufgeführt.

Zur Ermittlung der fixen Betriebskosten werden die Kostenfaktoren der einzelnen Kostenpositionen mit den Inves-

Tabelle 6. Kostenarten und -faktoren der Betriebskosten in Anlehnung an Sinnott et al. [9] und Festel et al. [10].

Fixe Betriebskosten	Faktor	Variable Betriebskosten
Kostenfaktor Instandhaltung F_{Ins}	0,03	Rohstoffe K_{Roh}
Personalkosten absolut K_{Per} [\$]	-	Zwischen- und Nebenprodukte K_{Zwi}
Kostenfaktor Laborkosten F_{Lab}	0,2	Hilfs- und Betriebsstoffe K_{Hib}
Kostenfaktor Abschreibung der Anlage F_{Aka}	0,05	Logistikkosten K_{Log}
Kostenfaktor Kapitalkosten F_{Kap}	0,1	Energiekosten K_{Erg}
Kostenfaktor Grundsteuern und kommunale Abgaben F_{Gra}	0,02	
Kostenfaktor Versicherungen F_{Ver}	0,01	
Kostenfaktor Lizenzgebühren F_{Liz}	0,01	

titionskosten der Anlage multipliziert. Es wird angenommen, dass die Kostenfaktoren landesspezifisch sind und in dieser Kalkulation auf Deutschland bezogen werden können. Die Gl. (9) zur Ermittlung eines Kostenpunkts (\$), am Beispiel der Instandhaltung, lautet:

$$K_{Ins} = F_{Ins}K_{dIn} = 0,03K_{dIn} \quad (9)$$

mit K_{Ins} = Instandhaltungskosten, F_{Ins} = Kostenfaktor für die Instandhaltung und K_{dIn} = direkte Investitionskosten.

Die Personalkosten müssen separat ermittelt werden. Diese variieren je nach Herstellungsprozess. Personalstrukturen werden individuell von den Verantwortlichen definiert und sind dabei beispielsweise vom Automatisierungsgrad der Prozesse und von den Qualifikationen des Betriebspersonals abhängig. Hinzu kommt, dass die Personalkosten landesabhängig sind, da das Lohnniveau weltweit stark divergiert.

Gl. (10) zur Berechnung der fixen Betriebskosten (\$):

$$K_{fixBetr} = K_{Ins} + K_{Lab} + K_{Aka} + K_{Kap} + K_{Gra} + K_{Ver} + K_{Liz} + K_{Per} \quad (10)$$

mit K_{Lab} = Laborkosten, K_{Aka} = Abschreibung der Anlage, K_{Kap} = Kapitalkosten, K_{Gra} = Grundsteuer und Kommunalabgaben, K_{Ver} = Versicherungsgebühr, K_{Liz} = Lizenzkosten und K_{Per} = Personalkosten

Die Kalkulation der variablen Betriebskosten (\$) basiert auf der Summe aller Rohstoff-, Hilfs- und Betriebsstoffkosten, Zwischen- und Nebenprodukten, den Logistikkosten und den Energiekosten. Die kalkulierten variablen Betriebskosten haben die Einheit \$/Jahr und werden mit der nachfolgenden Gl. 11 berechnet.

$$K_{varBetr} = K_{Roh} + K_{Zwi} + K_{Hib} + K_{Log} + K_{Erg} \quad (11)$$

mit $K_{varBetr}$ = variable Betriebskosten, K_{Roh} = Rohstoffkosten, K_{Zwi} = Zwischen- und Nebenproduktkosten oder -erträge, K_{Hib} = Hilfs- und Betriebsstoffkosten, K_{Log} = Logistikkosten und K_{Erg} = Energiekosten, als Summe aller Energiebedarfe innerhalb des Prozesses.

Die Kosten für Rohstoffe, Energie sowie Hilfs- und Betriebsstoffe lassen sich wie folgt berechnen (Gl. (12)).

$$K_x = \text{Jahresbedarf}_{\text{Rohstoff}} \cdot \text{Marktpreis}_{\text{Rohstoff}} \quad (12)$$

mit K_x als variable Kosten eines beliebigen Rohstoffs x.

Zwischen- und Nebenprodukte sind differenziert zu betrachten. Wenn für diese eine Nachfrage am Markt besteht, können sie gewinnbringend verkauft werden. Für den Fall, dass die Entsorgung notwendig ist, entstehen Entsorgungskosten. Die Zwischen- und Nebenproduktkosten ermitteln sich, analog zu Gl. (12), aus der Jahresmenge multipliziert mit dem Marktpreis beziehungsweise den Entsorgungskosten.

Die Logistikkosten für den Vertrieb und Einkauf der Plattformchemikalie sind anwendungsfallspezifisch und

deshalb nicht allgemein definierbar, da firmenindividuelle und regionale Faktoren die unterschiedlichen Kostenpunkte beeinflussen können.

Um die Kalkulation der Betriebskosten (\$) abzuschließen, wird die Summe von variablen und fixen Betriebskosten gebildet (Gl. (13)).

$$K_{\text{Betr}} = K_{\text{varBetr}} + K_{\text{fixBetr}} \quad (13)$$

Das Ergebnis spiegelt die Gesamtbetriebskosten für die Jahresproduktionsmenge der hergestellten Chemikalie wider.

3.3 Allgemeiner Kostenaufschlag und Angebotspreis

Für die Untersuchung der Kosten eines Produkts, das über die Grenzen des Unternehmens hinweg an externe Kunden vertrieben wird, sind neben der Betrachtung der Aufwendungen zum Betrieb der Produktionsanlage auch der Aufwand für die der Herstellung vor- und nachgelagerten Tätigkeiten sowie Wagnis, Gewinn und Vertriebskosten zu berücksichtigen. Angeführt werden für das in dieser Ausarbeitung aufgeführte Kostenkalkulationsmodell insbesondere die in Tab. 7 aufgeführten Kostenfaktoren, welche zur Errechnung des Angebotspreises, basierend auf den zuvor ermittelten Herstellkosten pro Einheit, herangezogen werden [4].

Tabelle 7. Allgemeine Kosten.

Allgemeine Kostenpositionen ^{a)}	Faktor
Kostenfaktor Entwicklungsgemeinkosten F_{Entw}	x % von Betriebskosten
Kostenfaktor Vertriebs- und Verwaltungsgemeinkosten F_{VVGK}	x % von Betriebskosten
Gewinnmarge A_{Marge}	x % von Betriebskosten

a) in Anlehnung an Stirzel und Zeibig [4].

Die in Tab. 7 angegebenen Kostenpositionen werden innerhalb des vorgestellten Modells, nach Gl. (14), als Prozentsätze der Gesamtbetriebskosten einzeln berechnet und addiert.

$$K_{\text{Allg}} = K_{\text{Betr}} (F_{\text{Entw}} + F_{\text{VVGK}} + A_{\text{Marge}}) \quad (14)$$

mit K_{Allg} = allgemeiner Kostenaufschlag (\$), F_{Entw} = Kostenfaktor Entwicklungsgemeinkosten (%), F_{VVGK} = Kostenfaktor Vertriebs- und Verwaltungsgemeinkosten (%) und A_{Marge} = Gewinnmarge (%).

Der prozentuale Anteil an den Betriebskosten, den man für den jeweiligen Kostenfaktor vorsieht, ist von dem jeweiligen Kalkulationsansatz der Unternehmung sowie Angebot und Nachfrage abhängig. Im Rahmen dieses Modells sind

diese Faktoren somit nicht objektiv definierbar. Beispielhaft sind jedoch einige dieser Einflussfaktoren, die bei der Kalkulation des in Abschn. 4 vorgestellten Anwendungsfalls berücksichtigt wurden, in Tab. 8 aufgeführt.

Tabelle 8. Einflüsse auf den prozentualen Anteil der allgemeinen Kostenfaktoren an den Betriebskosten.

Allgemeiner Kostenfaktor	Einfluss
Entwicklungsgemeinkosten	Prozess lizenziert/selbstentwickelt
Vertriebs- und Verwaltungsgemeinkosten	Vertriebsstrukturen, Rechtsabteilung, Vertriebsinnen und -außendienst
Gewinnmarge	Risikofaktor des angebotenen Produkts, Wettbewerb, Unternehmensstrategie

Der finale Angebotspreis P_{Angebot} (\$) für die zu produzierende Plattformchemikalie setzt sich wie in Gl. (15) dargestellt zusammen.

$$P_{\text{Angebot}} = \frac{K_{\text{Allg}} + K_{\text{Betr}}}{\text{Jahresproduktionsmenge}} \quad (15)$$

Der errechnete Angebotspreis kann nun mit dem aktuellen Marktpreis der betrachteten Plattformchemikalie verglichen werden. Übersteigt der Angebotspreis den Marktpreis, so lässt sich unmittelbar eine Aussage über die Höhe an notwendigen Einsparungen treffen [5]. Liegt der Angebotspreis unter dem Marktpreis, lässt sich dies entweder als Puffer für etwaige Ungenauigkeiten oder als Potenzial zur Erhöhung der festgelegten Gewinnmarge interpretieren.

4 Ergebnisse und Diskussion

Das vorgestellte Kalkulationsmodell wurde auf den von Westpro modifizierten Huaxia-Prozess zur Herstellung der Plattformchemikalie Furfural angewendet und mittels der von Win [11] bereitgestellten Gesamtinvestitionssumme für die Apparaturen dieser Technologie sowie dem von Tao [12] genannten Marktpreis validiert. Die Ergebnisse hierzu sind in Tab. 9 dargestellt. Dabei wurde der von Win [11] genannte und aus dem Jahr 2005 stammende Nominalwert für die benötigten Apparaturen von 1 500 000 \$ mittels Inflationsrate der einzelnen Jahre auf eine reale Größe für das Jahr 2019 gebracht. In diesem Zusammenhang wurde die Annahme, dass die Apparaturen aus der Volksrepublik China bezogen wird, getroffen. Dies beruht vor allem darauf, dass der betrachtete Prozess von Westpro in China entwickelt und betrieben wird.

In Tab. 10 werden die Ergebnisse der kalkulierten Anlagenkosten mit den Anlagenkosten von Win [11] verglichen, die als Referenz für diese Anlage gelten. Zusätzlich ist eine Schätzgenauigkeit angegeben, die in der Literatur für ent-

Tabelle 9. Ergebnisübersicht des Kostenkalkulationsmodells bei Anwendung auf den von Westpro modifizierten Huaxia-Prozess zur Herstellung der Plattformchemikalie Furfural.

Kennzahl	Wert
Jahresproduktionsmenge [t a^{-1}] analog zu Win [11]	1500
Anlagenkosten [\$] nach Hand [6]	1 658 404
Anlagenkosten [\$] nach PCR [6]	2 458 242
Mittelwert der Investitionskosten [\$] (aus Hand und PCR)	2 058 323
Investment [\$] nach Win [11] (reale Größe in 2019)	2 154 414
Gesamtbetriebskosten [$\text{\$ a}^{-1}$]	1 793 849
Allgemeiner Kostenaufschlag [\$] (Abschn. 3.3)	313 924
Angebotspreis [$\text{\$ t}^{-1}$]	1405
Aktueller Marktpreis [$\text{\$ t}^{-1}$] nach Tao [12]	1616

sprechende Verfahren angenommen wird. Dabei kann die Schätzmethode nach Hand den Methoden der Einzelfaktoren zugeordnet werden, die eine Schätzgenauigkeit von $\pm 20\%$ aufweisen. Das PCR-Verfahren gehört dabei zu der Schätzmethode „Kostenstrukturen ähnlicher Anlagen“, die eine Genauigkeit von $\pm 15\%$ haben [13].

In Tab. 10 wird die hohe Übereinstimmung der Anlagenkosten nach PCR und des Mittelwerts der Anlagenkosten (nach Hand und PCR) mit dem Referenzwert ersichtlich. Die prozentuale Abweichung bei der Berechnung der Anlagenkosten nach Hand beträgt -30% und bei der Anwendung der PCR-Methode $+14,1\%$. Somit liegt der Wert nach PCR innerhalb der, in der Literatur angeführten, Schätzgenauigkeit. Durch die Übereinstimmung der Methode nach PCR und dem Mittelwert der Anlagekosten (nach Hand und PCR) kann, trotz des Abweichens der Methode nach Hand von der in der Literatur angeführten Schätzgenauigkeit, von einer Reproduzierbarkeit der Schätzgenauigkeit von Investitionskosten ausgegangen werden. Die entwickelte Kalkulationsmethode sieht dabei vor, einen Mittelwert aus den Ergebnissen der zwei angewendeten Verfahren zu bilden, um diese dadurch zu glätten. Dadurch entsteht im

Tabelle 10. Vergleich der Investitionskosten der unterschiedlichen Berechnungsmethoden mit dem Referenzwert [11].

	Referenzwert der Anlagenkosten [11] (reale Größe in 2019)	Anlagenkosten nach Hand	Anlagenkosten nach PCR	Mittelwert der Anlagenkosten
Anlagenkosten [\$]	2 154 414	1 658 404	2 458 242	2 058 323
Abweichung vom Referenzwert [%]	–	$-30,0$	$+14,1$	$-4,7$
Angegebene Schätzgenauigkeit der Methode [%] nach Prinzing et al. [13]	–	± 20	± 15	–

vorliegenden Fall eine gesamte Abweichung der Investitionskosten von $-4,7\%$.

Der daraus kalkulierte Angebotspreis pro Tonne Furfural beläuft sich auf 1405 \$ und befindet sich 211 \$ (13 %) unterhalb des aktuell (Stand 2019) am Markt erzielbaren Preises. Diese Diskrepanz lässt sich über die unternehmensspezifischen allgemeinen Kostenaufschläge erklären. Auch im Rahmen des vorgestellten Kostenkalkulationsmodells sind diese stets vom Anwender zu definieren, während die restlichen Kostenfaktoren innerhalb des Modells der Literatur entnommen und somit vom Anwender unbeeinflusst bleiben. Es ist jedoch bei der Anwendung zu prüfen, ob sich aktualisierte Werte in der Literatur finden. Die hier aufgeführten Werte entsprechen der Literatur Stand 2019.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Kostenkalkulationsmodell zur Berechnung des Angebotspreises einer Plattformchemikalie unter Betrachtung eines spezifischen Herstellungsprozesses bietet die Möglichkeit, trotz beschränkter Datengrundlage, eine Abschätzung über deren Konkurrenzfähigkeit am Markt treffen zu können. Die Berechnung erfolgt dabei in drei Schritten und basiert auf einer Prozessanalyse in Bezug auf den Prozessablauf sowie den Stoff- und Energieströmen. So wird auf Basis der Berechnung der Investitions- und Betriebskosten, inklusive der Kalkulation des allgemeinen Kostenaufschlags, der mögliche Angebotspreis für die zu produzierende Chemikalie ermittelt, der abschließend mit dem aktuellen Marktpreis für die jeweils zu betrachtende Plattformchemikalie abgeglichen werden kann.

Hervorzuheben ist insbesondere die Anwendbarkeit in der frühen Phase der Entwicklung der betrachteten Prozessroute. Dies bringt insbesondere den Vorteil einer transparenten Aufbereitung der Kostenaspekte, da die Wirtschaftlichkeit nach der Industrialisierung des Prozesses möglichst früh schon während der Prozessentwicklung überprüft werden kann. Ebenso kann das daraus resultierende wirtschaftliche Potenzial der zu entwickelnden Prozesse bestärkt werden.

Mit dem Kalkulationsmodell kann man auch bei einer schwerzugänglichen Informationsbasis von vergleichbaren

Anlagen, die bereits Anwendung im industriellen Maßstab finden, zu einer verlässlichen Kostenkalkulation kommen. Zeitliche Einsparungen können durch den Zugriff auf in der Betriebswirtschaft bewährte Investitionsrechnungsmethoden und die damit verbundenen Faktoren realisiert werden. Somit ist, bis auf die Zeit für die Festlegung der Faktoren zur Berechnung des allgemeinen Kostenaufschlags, kein gesonderter Zeitaufwand nötig. Die Fakto-

ren erlauben darüber hinaus eine Beschränkung auf die Kosten der Apparaturen als Input, da weitere Kostenaspekte (wie Installationsgebühren, Rohrleitungen etc.) durch die jeweiligen Kosten- und Zuschlagsfaktoren betrachtet werden können. Durch diese Reduktionen und den Rückgriff auf bereits bewährte Methoden ist zur Nutzung des vorgestellten Kalkulationsmodells darüber hinaus keine besondere betriebswirtschaftliche Expertise notwendig.

Mit der Anwendung des Modells auf eine Prozessroute zur Herstellung der Plattformchemikalie Furfural und dem Vergleich mit einem veröffentlichten Wert der Investitionskosten konnte eine Annäherung auf rund 4,7 % zum Literaturwert erzielt werden. Eine Reproduzierbarkeit der Schätzgenauigkeit kann angenommen werden, da sich die erzielten Ergebnisse mit den in der Literatur angeführten Schätzgenauigkeiten für die verwendeten Kalkulationsmethoden decken. Der mit Betriebskosten und allgemeinem Kostenaufschlag errechnete Angebotspreis weicht nur 13 % vom Marktpreis in 2019 ab. Durch diese recht gute Abbildung des Marktpreises lässt sich auch schließen, dass die aus der Literatur entnommenen Kostenfaktoren angemessen sind.

Trotz der hohen Übereinstimmung der erzielten Kalkulationsergebnisse mit der PCR-Methode und dem Mittelwert der Anlagenkosten (nach PCR und Hand) mit den Referenzwerten (Investitionskosten aus der Literatur und Marktpreis) sowie der Bestätigung der Reproduzierbarkeit der Genauigkeit durch die in der Literatur belegten Schätzgenauigkeiten des PCR-Verfahrens, sollten noch weitere Prozessrouten mit dem vorgestellten Kostenkalkulationsmodell berechnet werden, um die Genauigkeit des Kalkulationsmodells mit weiteren Anwendungsergebnissen zu validieren. Darüber hinaus lässt sich so auch nochmals das Zutreffen der Faktormethode nach Hand für das vorgestellte Modell überprüfen.

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen eines Projekts zur angewandten Forschung im Wirtschaftsingenieurbereich der ESB Business School an der Hochschule Reutlingen entstanden.

Formelzeichen

A_{Marge}	[%]	prozentuale Gewinnmarge	F_{II}	[-]	Kostenfaktor indirekte Investitionskosten
F_{Aka}	[-]	Kostenfaktor Abschreibung der Anlage	F_{Fun}	[-]	Kostenfaktor Fundamentkosten
F_{Apa}	[-]	Kostenfaktor Apparaturkosten	F_{Gra}	[-]	Kostenfaktor Grundsteuern und kommunale Abgaben
F_{E}	[-]	Kostenmultiplikationsfaktor der verfahrenstechnischen Komponente	F_{Ins}	[-]	Kostenfaktor Instandhaltung
F_{Entw}	[-]	Kostenfaktor Entwicklungsgemeinkosten	F_{Kap}	[-]	Kostenfaktor Kapitalkosten
F_{F}	[-]	Kostenverteilungsfaktoren des zu ermittelnden Kostenpunkts	F_{Lab}	[-]	Kostenfaktor Laborkosten
			F_{Liz}	[-]	Kostenfaktor Lizenzgebühren
			F_{RZ}	[-]	Risikozuschlagsfaktor
			F_{vK}	[-]	verfahrenstechnischer Kostenfaktor
			F_{VVGK}	[-]	Kostenfaktor Vertriebs- und Verwaltungsgemeinkosten
			F_{Ver}	[-]	Kostenfaktor Versicherungen
			K_{Aka}	[\$]	Kosten Abschreibung der Anlage
			K_{Allg}	[\$]	Allgemeiner Kostenaufschlag
			K_{Apa}	[\$]	Apparaturkosten
			K_{Betr}	[\$]	Gesamtbetriebskosten
			K_{dIn}	[\$]	direkte Investitionskosten
			K_{Erg}	[\$]	Energiekosten, als Summe aller Energiebedarfen innerhalb des Prozesses
			K_{fixBetr}	[\$]	fixe Betriebskosten
			K_{Fun}	[\$]	Fundamentkosten
			K_{Ges}	[\$]	Gesamtinvestitionskosten
			K_{Gka}	[\$]	Gemeinkosten der Anlage
			K_{Gra}	[\$]	Grundsteuer und Kommunalabgaben
			K_{Hib}	[\$]	Hilfs- und Betriebsstoffkosten
			K_{Ins}	[\$]	Instandhaltungskosten
			K_{Kap}	[\$]	Kapitalkosten
			K_{Lab}	[\$]	Laborkosten
			K_{Liz}	[\$]	Lizenzkosten
			K_{Log}	[\$]	Logistikkosten
			K_{Per}	[\$]	Personalkosten
			K_{Roh}	[\$]	Rohstoffkosten
			K_{varBetr}	[\$]	variable Betriebskosten
			K_{Ver}	[\$]	Versicherungsgebühr
			K_{X}	[\$]	variable Kosten eines beliebigen Rohstoffs X
			K_{Zwi}	[\$]	Zwischen- und Nebenproduktkosten oder -erträge
			\dot{m}	[kg s ⁻¹]	Massenstrom des Endprodukts
			$\dot{m}_{\text{AusgangP}_n}$	[kg s ⁻¹]	Massenstrom am Ausgang des Prozessschrittes P _n
			$\dot{m}_{\text{Ausgang P}_{n-1}}$	[kg s ⁻¹]	Massenstrom am Ausgang des vorgelagerten Prozessschrittes
			$\sum_1^x \dot{m}_{\text{Eingangsstoffe}}$	[kg s ⁻¹]	Summe der Massenströme der Eingangsstoffe die im Prozessschritt P _n in den Prozess gelangen
			P_{Angebot}	[\$]	Angebotspreis
			P_{E}	[\$]	Preis der Apparatur

$\dot{V}_{\text{Ausgang}P_n}$	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$	Volumenstrom am Ausgang des Prozessschrittes P_n
V_{P_n}	$[\text{m}^3]$	Volumen des Prozessschrittes P_n
τ_{P_n}	$[\text{s}]$	Verweilzeit des Stoffes im Prozessschritt P_n

Abkürzungen

PCR plant component ratio

Literatur

- [1] B. Kamm, M. Kamm, *Chem. Ing. Tech.* **2007**, 79 (5), 592–603. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.200700005>
- [2] R. Mariscal, P. Maireles-Torres, M. Ojeda, I. Sádaba, M. López Granados, *Energy Environ. Sci.* **2016**, 9 (4), 1144–1189. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5EE02666K>
- [3] M. Schembra, J. Schulze, *Chem. Ing. Tech.* **1993**, 65 (1), 41–47. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.330650105>
- [4] M. Stirzel, S. Zeibig, *Controlling* **2009**, 21 (6), 322–325. DOI: <https://doi.org/10.15358/0935-0381-2009-6-322>
- [5] P. Horváth, R. Gleich, M. Seiter, *Controlling*, Verlag Franz Vahlen, München **2015**.
- [6] K. K. Humphreys, *Project and Cost Engineers Handbook*, Taylor & Francis Ltd., Hoboken, NJ **2004**.
- [7] S. Pushpakaran, H. Albaroudi, K. Atayi, C. Baleca, E. Osae, A. Taylor, *Acetic Acid Process Plant Design*, University of Hull, Hull **2016**.
- [8] J. Geldermann, *Anlagen- und Energiewirtschaft: Kosten- und Investitionsschätzung sowie Technikbewertung von Industrieanlagen*, Verlag Franz Vahlen, München **2014**.
- [9] R. K. Sinnott, J. M. Coulson, J. F. Richardson, R. K. Sinnott, *Chemical Engineering Design*, 4. ed., Elsevier, Butterworth-Heinemann, Amsterdam **2006**.
- [10] *Betriebswirtschaftslehre für Chemiker: eine praxisorientierte Einführung* (Ed: G. Festel), Springer, Berlin **2001**.
- [11] D. T. Win, *AU J. Technol.* **2005**, 8 (4), 185–190.
- [12] B. Tao, *Phone Interview on Furfural Production*, Hefei TNJ Chemical Industry Co. Ltd., **2019**.
- [13] P. Prinzing, R. Rödl, D. Aichert, *Chem. Ing. Tech.* **1985**, 57 (1), 8–14. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.330570103>