

Anlagen- und Energiewirtschaft

Kosten- und Investitionsschätzung sowie Technikbewertung von Industrieanlagen

von
Prof. Dr. Jutta Geldermann

1. Auflage

Verlag Franz Vahlen München 2014

Verlag Franz Vahlen im Internet:
www.vahlen.de
ISBN 978 3 8006 4788 0

Zu [Inhalts-](#) und [Sachverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei beck-shop.de DIE FACHBUCHHANDLUNG

möglichst in den gleichen Einrichtungen durchgeführt und somit die Anzahl der Anlagenteile (und damit der Anlagenkapitalbedarf) reduziert. Der zeitliche Ablauf der Verfahrensschritte wird ebenfalls im Entwurf fixiert. Durch Konkretisieren der einzelnen Verfahrensschritte und durch Festlegen der jeweils vorgesehenen verfahrenstechnischen Konzeption (z. B. Zentrifugen für Fest-Flüssig-Trennungen) gelangt man vom Grundfließbild zum Verfahrensfleißbild, während zugleich der Verfahrensablaufplan präzisiert wird. Chargenzeit und Schichtarbeitszeit des Personals sollten entsprechend arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse aufeinander abgestimmt sein. So kann etwa ein täglicher Wechsel des Arbeitsablaufs die Unfallgefahr erhöhen. Da Chargenprozesse im Gegensatz zu kontinuierlichen Prozessen während des gesamten Prozessablaufes Steuereingriffe zum Verändern der Betriebsbedingungen erfordern, sind sie besonders anfällig für Fehlbedienungen (bei manuellem Betrieb) bzw. für Ausfälle von Steuergeräten (bei automatisierten Anlagen) (Ullrich, 1996, S. 84).

5.3 Kosten für Rohstoffe

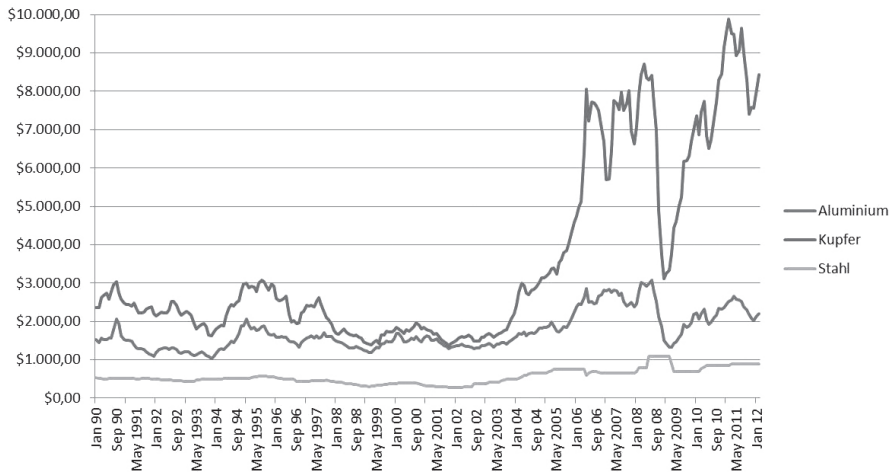
Die Rohstoffkosten haben bei Grund- und Industriechemikalien den relativ größten Kostenanteil an den Gesamtkosten (Hassan, 2001, S. 455). Die erforderlichen Rohstoffkosten ergeben sich aus dem Verfahrensfleißbild und den Materialbilanzen. Der Jahresbedarf wird mithilfe der Betriebsstunden pro Jahr berechnet. Bei diskontinuierlicher Produktion ermittelt man diese Daten aus der Rezeptur. Die Preise für Rohstoffe erhält man am besten von den potenziellen Lieferanten. Bei bekannten Prozessen kann man in einer ersten Näherung auch auf die in der Fachliteratur angegebenen spezifischen Materialbedarfszahlen zurückgreifen. Die in den Fachzeitschriften angegebenen Preise gelten für größere Mengen und können je nach Ort, Vertrags- und Lieferbedingungen und aktuellen Marktbedingungen stark variieren.

Preise für Chemikalien veröffentlichen die Fachzeitschriften *European Chemical News* und *Chemical Market Reporter*. Preise für wichtige Metalle werden an den Börsen in London (London Metal Exchange – LME), in Singapur (SIMEX) und New York (COMEX) festgelegt. Bild 5.2 zeigt die Preisentwicklung über ein Jahrzehnt.

Als *Hilfsmittel* gelten in der chemischen Industrie beispielsweise Lösungs-, Adsorptions- und Absorptionsmittel sowie Katalysatoren. Die *Betriebsstoffe* dienen der Aufrechterhaltung des Betriebs, ohne stofflich in das Endprodukt einzugehen, wie z. B. Schmierstoffe, Filtertücher, Reinigungsmittel, Arbeitsschutzkleidung. Zu den Materialkosten werden die Materialgemeinkosten gerechnet, die ca. 3–10 % des Wertes der zentral gelagerten Stoffe ausmachen.

Bei Prozessen der Petrochemie, Kohlechemie und der organischen Grundstoffchemie werden oft der Rohstoff- und Energiebedarf zusammengerechnet (Hassan, 2001, S. 455).

Bild 5.2: Preisentwicklung einer Tonne Kupfer, Aluminium und Stahl



Quelle: IndexMundi2012

Bei der Stoffauswahl in der industriellen Produktion sind die jeweils aktuellen Umweltschutzvorschriften, wie Recyclinggebote oder Rücknahmeverpflichtungen zu beachten. Bei der Optimierung der Einsatzstoffe kann daher die Minimierung des Reststoffanfalls eine wichtige Nebenbedingung sein. Prinzipiell ist auch die Abwägung zu treffen, ob teurere reinere Rohstoffe direkt bezogen und eingesetzt werden sollen, oder aber minderwertigere Rohstoffe, die betriebsintern aufbereitet werden. Als Beispiel kann die NE-Metallindustrie genannt werden, die als Einsatzstoffe teilweise Stäube und Schlämme verwenden, die als Reststoffe aus der Eisenproduktion stammen (Rentz u. a., 1999; Geldermann u. a., 1999).

Tabelle 5.2 zeigt einen groben Vergleich der Kosten von Betriebsstoffen, die für eine überschlägige Abschätzung verwendet werden können. Dabei ist zu beachten, dass insbesondere die Preise für Erdgas, Strom und Heizöl starken Schwankungen unterliegen (vgl. auch Bild 5.3).

5.4 Energiekosten

Verstärkt durch die Diskussionen um den Klimaschutz rückt die effiziente Energieverwendung in den Vordergrund, mit dem übergeordneten Ziel der Senkung der Treibhausgasemissionen, insbesondere von Kohlendioxid (Fichtner, 2005). Eine Bestandsaufnahme des Ist-Zustands des Energieeinsatzes in der Produktion ist eine Voraussetzung für eine detaillierte Planung und Kontrolle des betrieblichen Energieflusses, um den einzelnen Verbrauchern ihren Energiebedarf zuzuordnen und um ggf. Einsparungsmaßnahmen zu identifizieren. Ausgangspunkt für die Schätzung von Energiekosten ist eine „Energiebilanz“ auf Aggregat-, Prozess- oder Betriebsebene. Energiebilanzen sind das Ergebnis

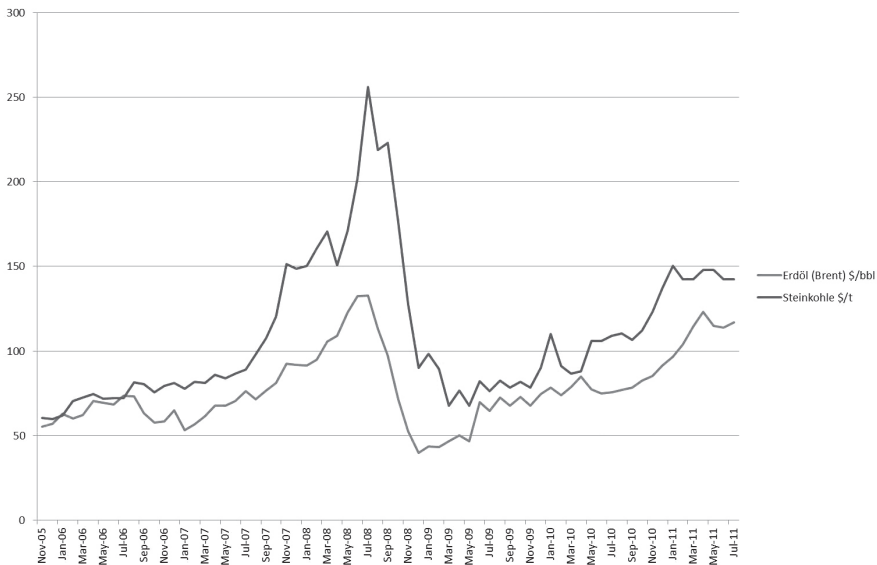
Tabelle 5.2: Kosten von Betriebsstoffen

Betriebsstoff	UK	USA
Leitungswasser	60 p/t	50 c/t
Erdgas	0.4 p/MJ	0.7 c/MJ
Strom	1.0 p/MJ	1.5 c/MJ
Heizöl	65 £/t	100 \$/t
Kühlwasser	1.5 p/t	1 c/t
gekühltes Wasser	5 p/t	8 c/t
vollentsalztes Wasser	90 p/t	90 c/t
Wasserdampf	7 £/t	12 \$/t
Druckluft (9 bar)	0.4 p/m ³ (Stp)	0.6 c/m ³
Regelluft (9 bar) (trocken)	0.6 p/m ³ (Stp)	1 c/m ³
Kühlung	1.0 p/MJ	1.5 c/MJ
Stickstoff	6 p/m ³ (Stp)	8 c/m ³

Legende: £1 = 100p, 1\$ = 100c, 1 t = 1000 kg = 2200 ib, stp = 1 atm, 0 °C

Quelle: (Sinnott, 2005, S. 264), Werte aus Mitte 2004

Bild 5.3: Preisentwicklung von Steinkohle und Erdöl



Quelle: <http://www.bgr.bund.de>

einer Input/Output-Analyse der Energieströme, die für den gesamten Betrieb wie auch für einzelne Prozesse innerhalb des Betriebes durchgeführt werden kann (Tabelle 5.3). Als Inputströme gelten dabei alle Energieträger, die in das Unternehmen eingehen und für die Energieumwandlung eingesetzt werden. Als Output werden die unterschiedlichen Abwärmeströme und Emissionen betrachtet (Geldermann, 2006). Die Energiekosten umfassen:

Tabelle 5.3: Grundgerüst für eine Energiebilanz

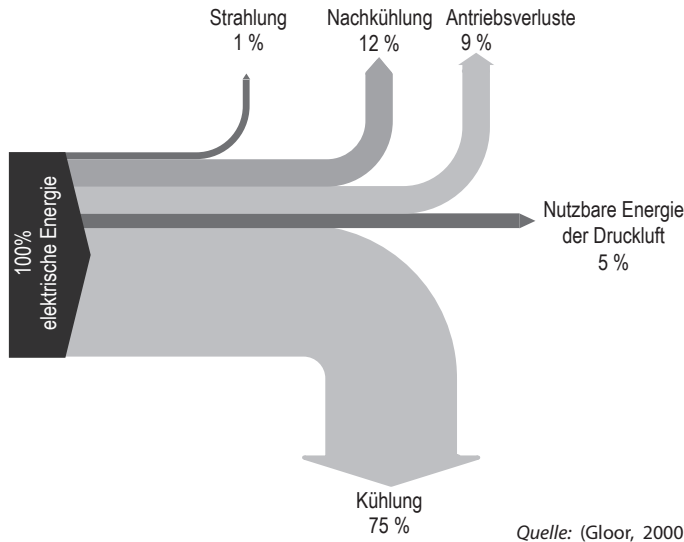
Input	Menge	Output	Menge
1. Fossile Energieträger [kWh]		1. Abwärme [kWh]	
1.1 Kohle (Stein- und Braunkohle)		1.1 Abluft [m ³]	
1.2 Heizöl (extra leicht, leicht, mittel)		1.2 Abwasser [m ³]	
1.3 Gas		2. Emissionen [kg]	
2. Strom [kWh]		2.1 CO ₂	
3. Fernwärme [kWh]		2.2 NO _x	
4. Erneuerbare Energieträger [kWh]		2.3 CO	
4.1 Biomasse		2.4 SO ₂	
4.2 Photovoltaik		2.5 C _x H _y	
4.3 Wind		2.6 Staub	
4.4 Sonnenenergie in Kollektoren			
5. Fossile Treibstoffe [kWh]			
5.1 Benzin			
5.2 Diesel			

- Dampf,
- elektrische Energie,
- Wasser,
- Brennstoffe,
- Inertgase,
- Druckluft,
- Kälteenergie

und können aus Verfahrensfliessbildern bestimmt werden. Die Ergebnisse können als Flieβschemata der Prozessschritte mit typischen Verbrauchswerten z. B. für die Lackierung von verschiedenen Werkstoffen dargestellt werden. Wirkungszusammenhänge zeigen sich vor allem in **Sankey-Diagrammen** (Bild 5.4), die traditionell im Prozess- und Anlagendesign verwendet werden, um den Einsatz, die Umwandlung, die Verteilung und die Nutzung der Energie bildlich darzustellen und damit Ansatzpunkte für Prozessverbesserungen zu visualisieren (Schmidt, 2006). Die Mengenströme werden auf eine gleiche funktionale Einheit bezogen (z. B. m² lackierte Oberfläche) und je nach ihrer Menge graphisch unterschiedlich breit dargestellt.

Ausgangspunkt für die Energiebilanz sind zunächst die Aufwendungen für die einzelnen Energieträger (Heizöl, Gas etc.). Eine Untergliederung in erneuerbare und nicht erneuerbare Energieträger ist für die Bewertung der CO₂-Emissionen von Bedeutung. Um die verbrauchte Energie den einzelnen Prozessen zuordnen zu können, sind Messungen notwendig. Dabei ist die Energie in jener Form zu messen, in der sie benötigt wird. Wird für einen Prozess beispielsweise Druckluft verwendet, so sollte die eingesetzte Druckluftmenge, und nicht der Energieverbrauch zur Druckluftherzeugung, gemessen werden (Geldermann, 2006). Tabelle 5.4 gibt eine grobe Übersicht über die Genauigkeit und

Bild 5.4: Sankey-Diagramm für den Energiefluss in einer Druckluftanlage



die Fehleranfälligkeit verschiedener Messgrößen, die sich, je nach Messgröße und -verfahren, stark unterscheiden können. Da der Messaufwand erheblich sein kann, wird der Detaillierungsgrad oft nur für bestimmte energieintensive Prozesse vertieft, die

- einen hohen Energiekostenanteil aufweisen,
- einen hohen Anteil an variablen Faktoren aufweisen,
- über die kein Wissen bezüglich des fixen und variablen Verbrauchs vorliegt.

Tabelle 5.4: Messaufwand, Genauigkeit und Fehlerhäufigkeit bei den häufigsten Energiemessungen

Messgröße	Messaufwand	Genauigkeit	Fehleranfälligkeit
Elektrizität	niedrig	hoch	gering
Dampf	hoch	mittel	hoch
Kälte	hoch	mittel	mittel
Druckluft	hoch	mittel	mittel
Heißwasser	mittel	hoch	gering
Warmwasser	niedrig	mittel	gering

Quelle: (Gloor, 2000)

Für eine Schwachstellenanalyse sollten die verbrauchte Energie und die benötigte Leistung getrennt betrachtet werden. Außerdem ist die Wichtigkeit innerhalb der betrieblichen Versorgung zu beachten: Durch die Untersuchung betrieblicher Schlüsselbereiche kann auf eine eventuelle Störanfälligkeit von Aggregaten oder Bereichen vorsorgend reagiert werden. Mithilfe von Energieverbrauchsfunktionen und Energiekennzahlen (wie z. B. spezifischer Verbrauch pro m² Oberfläche) können die eingesetzten Energiemengen für die einzelnen Prozessschritte vergleichbar gemacht werden. Die Umsetzbarkeit

von Maßnahmen zur effizienteren Energieverwendung und Energieeinsparmöglichkeiten unterscheidet sich für bestehende Anlagen und Anlagenneuplanungen bzw. -modernisierungen. So können bei einer **Anlagenauslegung** Größendegressionseffekte realisiert werden, d. h. eine größere Anlage kann in der Regel zu spezifisch niedrigeren Kosten und mit spezifisch geringerem Energieeinsatz produzieren. Zum anderen jedoch können Überdimensionierungen zu einem erhöhten spezifischen Energieverbrauch führen, denn Maschinen und Anlagen weisen unter Auslegungsbedingungen, Teillast oder Notbetrieb einen unterschiedlichen Energieverbrauch auf.¹ Weiterhin wird der Energieverbrauch durch verschiedene **Prozessparameter** beeinflusst, wie z. B. Temperatur, Verweilzeit, Auslastung, Verluste oder Betriebszustand.

Darüber hinaus ist ein Teil des Energieverbrauchs durch das Verhalten von Mitarbeitern beeinflussbar, wie etwa Heizkosten oder Energieverbrauch bei der Beleuchtung. Auf die Bedeutung der guten Betriebspraxis („*good house-keeping*“) wird inzwischen auch im Zusammenhang mit der Umsetzung der EU-Richtlinie (2010/75/EU) hingewiesen. Allgemeine Grundsätze zur Energieeffizienz können unabhängig von einer Stoff- und Energiestromanalyse formuliert werden:

- Vermeiden von Leerlauf, weil sich schon bei kurzer Betriebsunterbrechung das Abschalten lohnen kann. Gegebenenfalls ist eine automatische Abschaltung sinnvoll. Als einfache Faustregel gilt, dass sich das Abschalten einer Maschine lohnt, wenn die Pause größer als die 5-fache Hochlaufzeit ist.
- Volle Auslastung der Anlagen, da für Hilfsprozesse mehr Leistung benötigt wird als für den eigentlichen Prozess.
- Optimierung der Druckluftbereitstellung, indem nur die benötigte Leistung bereitgestellt wird.
- Bei Sanierungen und Neuinvestitionen sollten vom Lieferanten garantierte Werte (z. B. spezifischer Energieverbrauch [kWh pro Produktionseinheit], Leerlaufleistung [kW], Abluftmenge [m³/h], Druckluft [bar] und [m³/h]) für den Energieverbrauch bei der Abnahme überprüft werden. Zur Energieeffizienz gehört auch eine automatische Abschaltung im Leerlauf.

Zur Verdeutlichung der einzelnen Begriffe der Energiebilanz und ihrer Beziehungen untereinander empfiehlt es sich, den Weg von der Energiebereitstellung bis zu ihrer Nutzung hin zu verfolgen (vgl. auch Kapitel 6). Am Anfang der Prozesskette steht die Primärenergie mit den Energieträgern Kohle, Öl, Gas, Uran, Wasser, Sonne, Wind, Erdwärme, Gezeiten und Biomasse. Durch Umwandlung des Energieinhaltes dieser Primärenergieträger entsteht Sekundärenergie, z. B. Benzin, gewonnen aus Rohöl, oder z. B. Briketts, gewonnen aus Rohbraunkohle. Strom ist ebenfalls ein Sekundärenergieträger, da dieser aus der Umwandlung von Primärenergie oder anderen Sekundärenergien (z. B. Heizöl) gewonnen wird.

¹ Eine Kesselanlage weist im Teillastbetrieb ein ganz anderes Verhalten auf als im Auslegungspunkt; der Wirkungsgrad ist schlechter und die spezifischen Emissionen sind höher.

Bei der Energieumwandlung treten Verluste auf, die durch technische Maßnahmen zwar verringert, aber nicht völlig vermieden werden können. Hinzu kommen Verluste durch Transport- und Lagerungsvorgänge. Zieht man die Verluste von der eingesetzten Primärenergie ab, erhält man die Endenergie: Benzin im Tank oder Strom aus der Steckdose. Für Verbraucher steht aber nur die Nutzenergie zur Verfügung, also der Teil, der nach der letzten Umwandlung (z. B. des Stroms in Kochwärme) auch tatsächlich genutzt wird.

Der Energieverbrauch umfasst die Energiemenge, die in einem bestimmten Zeitraum tatsächlich genutzt wird. Kommt eine weitere Bezugsgröße hinzu, spricht man von spezifischem Energieverbrauch. Beispiele: Brennstoffverbrauch je Einheit elektrischer Arbeit (kJ/kWh) oder Energieverbrauch je Produktmenge (kJ/t oder kJ/1.000 Stück). Wird die Mengenangabe durch einen äquivalenten Geldwert ersetzt, so spricht man von *Energieintensität*. Diese zeigt, wieviel Energie für eine bestimmte Wertschöpfung benötigt wird und gibt schließlich – bezogen auf Endenergieverbrauch und Bruttoinlandsprodukt – Auskunft über die Effizienz der Energienutzung eines Landes.

Energieträger für die Prozessindustrie sind elektrischer Strom, Dampf, Warmwasser, Pressluft und chemische Energie (z. B. Heizöl S, Erdgas). Die Energieumwandlung von elektrischem Strom in Nutzenergie erfolgt z. B. durch Elektromotoren, Elektroheizung, Lichtbogenofen zum Schmelzen von Schrott, Elektrolyse und Entladung oder Elektroabscheider.

Für die Schätzung der Stromkosten spielen folgende Einflussfaktoren eine wichtige Rolle:

- Anteil der Eigenerzeugung
- Anteil des Fremdbezuges

Der Strompreis setzt sich zusammen aus dem *Leistungspreis*, einem fixen Grundbetrag (oder Basispreis), der die Lieferbereitschaft abdecken soll, und dem variablen Arbeitspreis (*Verrechnungspreis*) für die abgenommene Strommenge. Das Unternehmen handelt mit einem Energieversorgungsunternehmen (EVU) einen Vertrag über eine bestimmte Bestelleistung aus (Dauer ca. 1–3 Jahre). Bestelleistung ist die Leistung, die voraussichtlich maximal benötigt wird. Der Leistungspreis beträgt dabei i. d. R. mehrere Hundert Euro pro kW Bestelleistung. Eine Überschreitung der Bestelleistung im Jahresverlauf hat im allgemeinen einen großen Kostensprung zur Folge.

Typische Strompreise für Industriekunden in verschiedenen Ländern bewegten sich zwischen 2007 und 2011 in folgenden Bandbreiten (Eurostat2012):

- Deutschland: 8–10 ct/kWh (Steinkohle, Braunkohle)
- Norwegen: 6–10 ct/kWh (Wasserkraft)
- Frankreich: 5–8 ct/kWh (Nuklearenergie)
- Zypern: 11–21 ct/kWh (Schwere Öle)

Auf die Besonderheiten der Wirtschaftlichkeitsrechnung für Anlagen der Energiewirtschaft wird in Abschnitt 6.4.1 näher eingegangen.

5.5 Weitere relevante Kostenarten

Bei den weiteren relevanten Kostenarten ist zu beachten, dass einige von der Investition abhängen. Vom Anlagenbetrieb abhängige Kostenarten können über den Betriebsmittelverbrauch abgeschätzt werden. Grundsätzlich ist zu prüfen, ob die Kosten entscheidungsrelevant sind, d. h. sich für die Investitionsalternativen unterscheiden. Zu Schwierigkeiten und Lösungsansätzen für Abgrenzungsprobleme bei der Kostenschätzung von Kuppelprodukten und für Emissionsminderungsmaßnahmen wird auf die Abschnitte 8.1.1 und 8.1.2 verwiesen.

Verpackung und Transport

Die Kosten für Verpackung und Transport hängen von der Produktart und der Produktionsmenge ab. So können Flüssigkeiten am Standort in eigene Tanker verladen werden und vergleichsweise günstig transportiert werden. Kosten für Verpackung und Versand von synthetischen Fasern oder Polymeren über zentrale Großmärkte verursachen beispielsweise einen großen Anteil des Verkaufspreises (Sinnott, 2005, S. 262).

Wartung, Reparatur und Instandhaltung

Relevante Einflussfaktoren auf die Kosten für Wartung, Reparatur und Instandhaltung sind u. a. Werkstoffwahl, Korrosionsprobleme, Wartungs- und Reparaturfreundlichkeit, Umgang der Mitarbeiter mit der Anlage. In der Literatur finden sich Listen mit einheitlichen Faktoren für Reparatur und Instandhaltung unter normalen Betriebsbedingungen (Peters u. a., 2004). Typische Faktoren für Adsorptions-, Absorptionsanlagen und thermische Nachverbrennung liegen beispielsweise bei 3–4 % der Investitionssumme (Rentz u. a., 2003).

Versicherung

Diese Kostenart umfasst Beiträge zur Versicherung in Verbindung mit vorhersehbaren und unvorhersehbaren Risiken, wie z. B. Ausfallversicherungen oder Maschinenbruchversicherung.

Arbeitskosten

Zu den Arbeitskosten gehören die Personaleinzel- und Personalgemeinkosten für den eigentlichen Produktionsbereich. Die Führungskosten sind die Gehaltskosten für das technische Überwachungspersonal (Meister, Techniker, Betriebsingenieure). In der Regel steigt die Qualifikation des Personals mit der Komplexität der Anlage.