

# ***Feasibility-Studie***

- 1. Einführung, Übersicht**
- 2. Marktsituation und -entwicklung**
  - 2.1 Anlagenkapazität
  - 2.2 Empirische Preis- und Produktionskurven
- 3. Ermittlung von Investitionskosten**  
**Onsites, offsites**
  - 3.1 Kapitalumschlagkoeffizienten (Turnover ratios)
  - 3.2 Kapazitäts-Preis-Diagramme
  - 3.3 Zuschlagfaktoren
  - 3.4 Wilson-Formel
    - 3.4.1 Apparatekosten
    - 3.4.2 Preisindex
    - 3.4.3 Investment-Faktor
    - 3.4.4 Zuschlagfaktoren für Werkstoff, Temperatur und Druck
- 4. Gliederung der Herstellkosten**  
**Low-cost-Anlagen**
- 5. Ermittlung der Rentabilität**
  - 5.1 Zeitlicher Ablauf einer Investition
  - 5.2 *Statische* Rentabilität
    - 5.2.1 Return on Investment (ROI) bzw. Rendite
    - 5.2.2 Ermittlung der Herstellkosten
  - 5.3 *Dynamische* Rentabilität (DCF-Methode)
  - 5.4 Sensibilitäts-Analyse
  - 5.5 Kostendiagramme
- 6. Sicherheitstechnische Aspekte/Anlagensicherheit (Einführung)**
  - 6.1 Standort einer Chemie- oder verfahrenstechnischen Anlage
  - 6.2 Abgrenzung der Sicherheitstechnik
  - 6.3 Risiko und Sicherheit
  - 6.4 Sicherheitstechnische Grundlagen
  - 6.5 Auswirkungen von Stoff- und Energiefreisetzungen

## 1. Einführung, Übersicht

*Feasibility-Studie:* (Durchführbarkeits- bzw. Machbarkeitsstudie)

Marktsituation und voraussichtliche Marktentwicklung der Produkte und der Rohstoffe

- Prüfung konkurrierender Verfahren; Patentlage; Erwerb von Lizenzen
- Auflagen von Behörden, Umweltschutz
- Erweiterung oder NEU-Anlage
- Entwicklungskosten
  - Investitionskosten
  - Rohstoffkosten
  - Kosten für Betriebsmittel
  - Personalkosten
  - sonstige Kosten
  - Rentabilität
- Standort

## 2. Marktsituation und -entwicklung

Marktanalyse für Mengen und Preise der Produkte und Rohstoffe für die zur Kalkulation unterstellte Laufzeit der Anlage.

Beachtung von Angebot, Nachfrage und Substitutionsprodukten.

Evtl. langfristige Verträge

### 2.1 Anlagenkapazität

Anlagenkapazität, Produktion, Produktionskapazität

Masse an Produkt pro Jahr (a) bzw. pro Tag (d)

$M_a$  in t / a

$M_d$  in t / d

Durchsatz an Produkt oder Reaktionspartner (Edukt)

Masse pro Stunde (h)

$\dot{M}_h$  in t / h

Anzahl  $N_a$  der Betriebsstunden (h) pro Jahr (a)

$N_a$  in h / a

Meist  $N_a = 8000$  h/a

$$\dot{M}_h = \frac{M_a}{N_a} > \frac{M_a}{N_{a,ges}} \quad (1)$$

da  $N_a < N_{a,ges}$

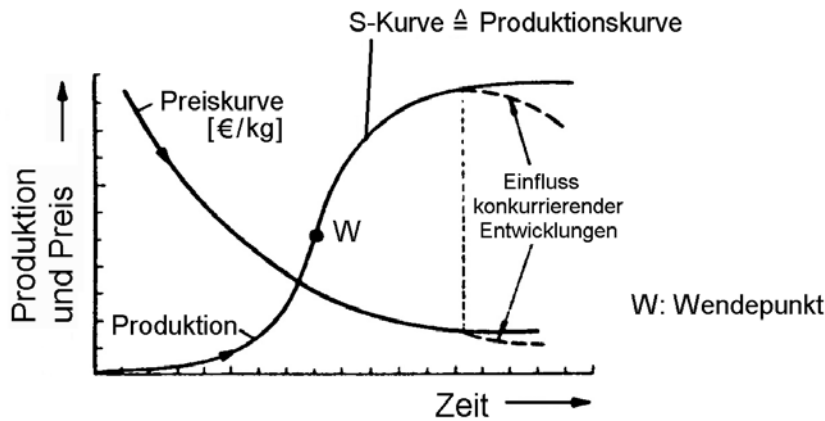
$$N_{a,ges} = 365.2 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d} = 8764.8 \text{ h/a}$$

Restzeit von 764.8 h wird für *Wartung* und *Reparaturen* benötigt

⇒ Stream factor (*Ausnutzungsfaktor*)  $f_s$  :

$$f_s = \frac{N_a}{N_{a,ges}} \approx \frac{8000 \text{ h/a}}{8764.8 \text{ h/a}} \approx 0.913 \quad (91.3 \%)$$

## 2.2 Empirische Preis- und Produktionskurven



Preis: spezifische Kosten oder Einheitspreis [Abb. 4]

Abb.1 Grundsätzliche Entwicklung eines neuen Produkts oder einer neuen Erfindung im Verlauf der Zeit  
(Trendkurven zur Ermittlung der wirtschaftlich günstigsten Kapazität  $M_a$ )

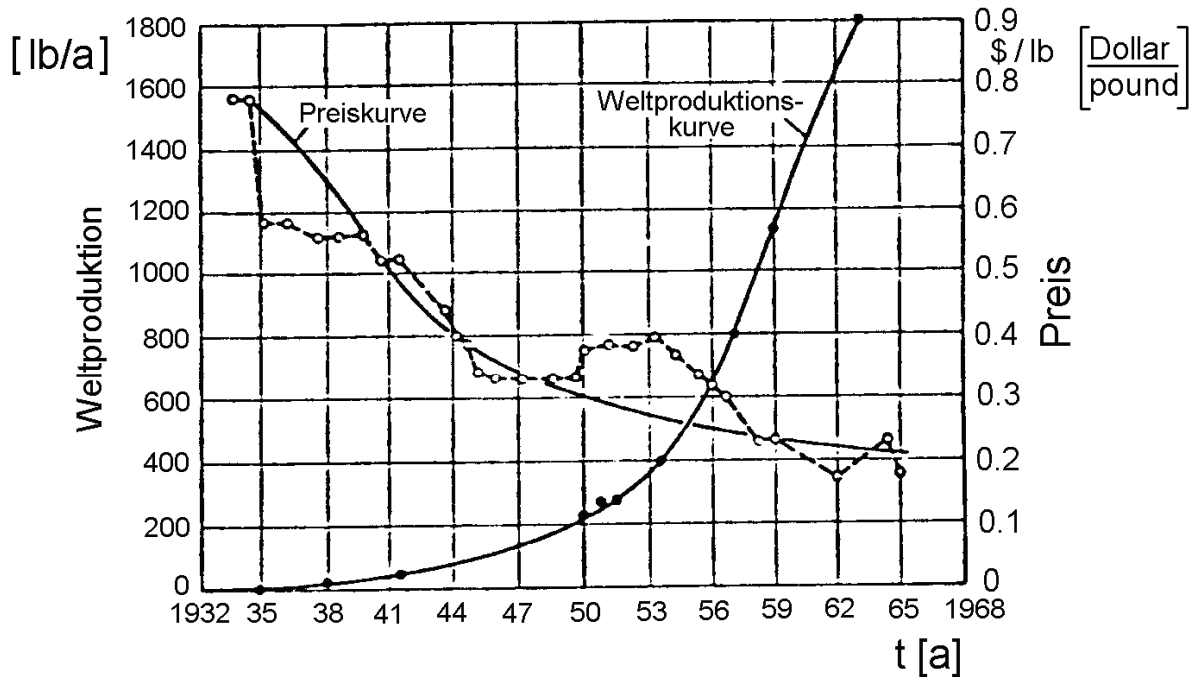


Abb. 2 Mengenwachstum und Preisentwicklung von Polyvinylchlorid (PVC)  
1 lb  $\approx$  0.454 kg

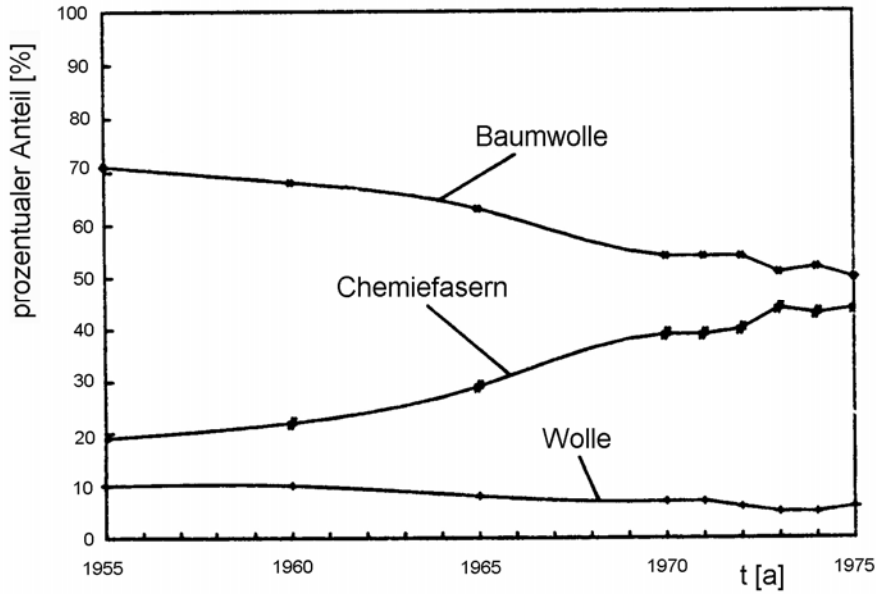


Abb. 3a Prozentuale Anteile der Produktion von Baumwolle, Wolle und Chemiefasern an der Gesamtproduktion (rel. Produktionskurven)

*Weltverbrauch der Textilfasern in 1000 Tonnen [ICAC, 2001]*

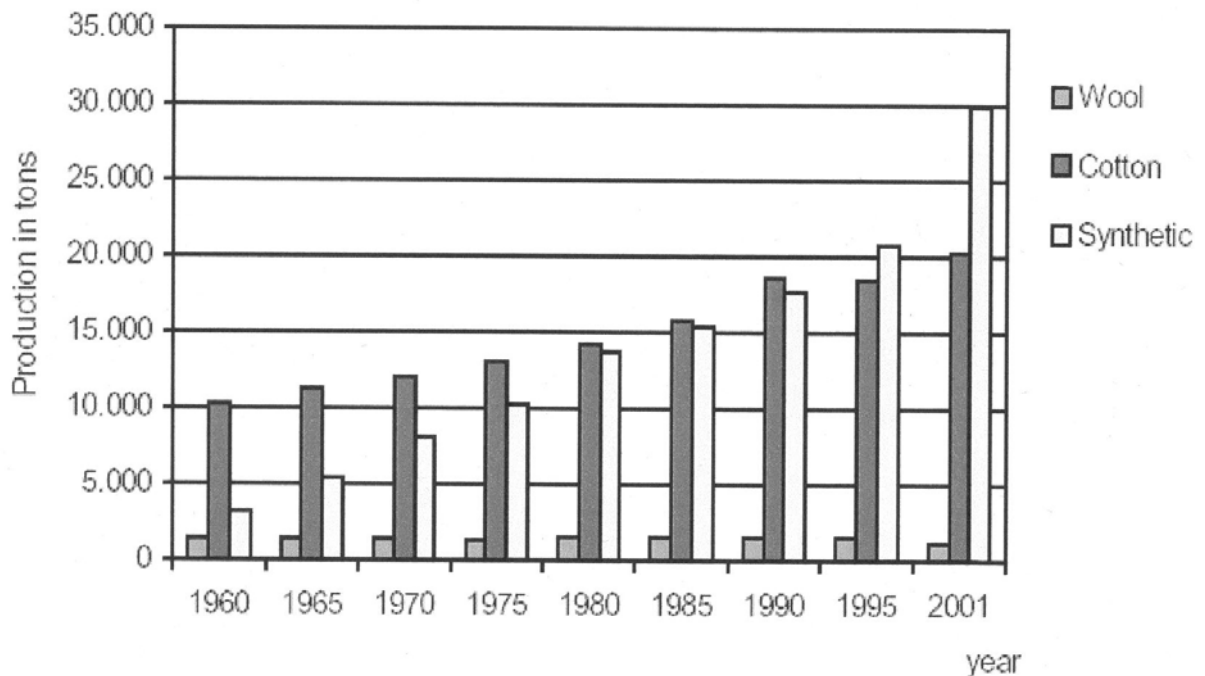


Abb. 3b Produktion (Produktionskapazität) von Baumwolle, Wolle und Chemiefasern

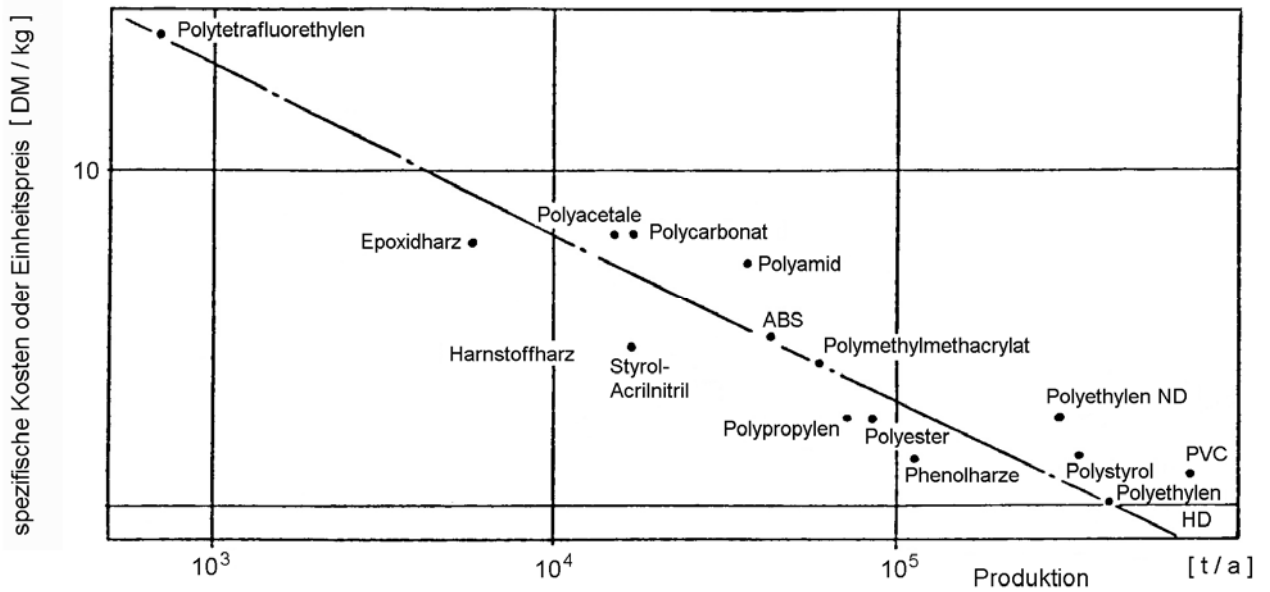
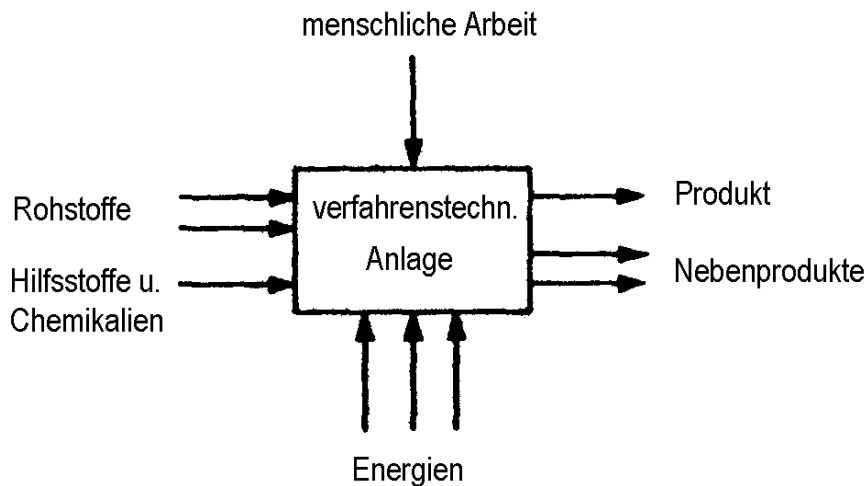


Abb.4 Beziehung zwischen Produktionskapazität ([t/a]) und Einheitspreis ([DM/kg]) bei Kunststoffen (BRD 1969) (aus Preis- und Produktionskurve bei t = const.)

### 3. Ermittlung von Investitionskosten



### Anlagengrenze (battery limits)

*onsites*: Verfahrensanlagen *innerhalb* der Anlagengrenze ("Betriebsanlagen")

*offsites*: Nebenanlagen *außerhalb* der Anlagengrenze

### 3.1 Kapitalumschlagkoeffizienten (turnover ratios)

Methode bezieht sich allein auf Verfahrensanlagen

Benutzung von *Kapitalumschlag-Koeffizienten (turnover ratios)* :  $f_u$

Bei der chemischen Industrie beträgt im Mittel der Jahresumsatz ( $P_a$ ) etwa das 1.2 bis 1.5 - fache der Investitionskosten ( $K_I$ ), d.h. ( $f_u \approx 1.2$  bis  $1.5$ ) :

$P_a$  : Jahresumsatz in €

$P_t$  : Produktpreis pro Jahrestonne in  $\frac{\text{€}}{\text{t/a}}$

$$\bar{f}_u \equiv \frac{P_a}{K_I} = \frac{M_a P_t}{K_I} = 1.2 \text{ bis } 1.5 \quad ; \quad K_I : \text{ Investitionskosten in €} \quad (2)$$

$\begin{matrix} \text{t/a} & \text{€/(t/a)} \\ \uparrow & \uparrow \end{matrix}$

$\bar{f}_u$  = mittlerer Kapitalumschlagkoeffizient

NEU-Anlagen :  $\bar{f}_u$  etwa 30 bis 50 % niedriger

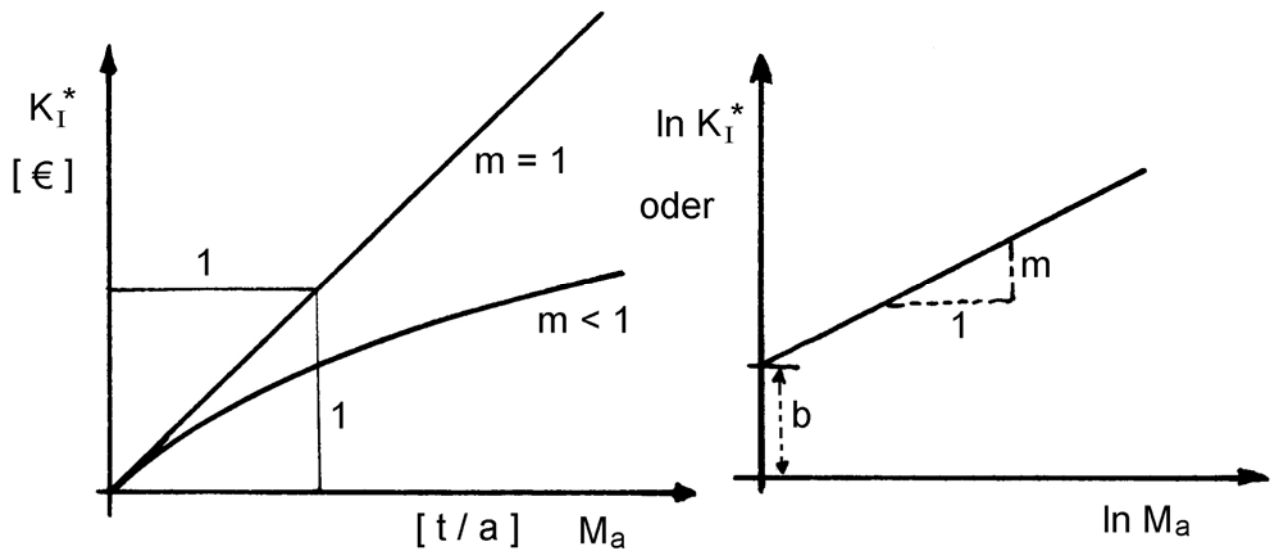
Genauigkeit :  $\pm 30$  % bis  $\pm 40$  % : Schwankungen infolge Unsicherheit der  
Marktanalyse

$f_u$  : tabelliert, mit zunehmender Zeit gilt:  $f_u \downarrow$  infolge  $K_I \uparrow$ ,  $P_t \downarrow$

$M_a, P_t$ : Abschätzung aus *Marktanalyse*

### 3.2 Benutzung von Kapazitäts-Preis-Diagrammen:

aus bestehenden Chemieanlagen



$$K_I^* = b M_a^m \tag{3a}$$

$$K_I^* [\text{€}]; M_a [\text{t/a}], b \left[ \frac{\text{€}}{(\text{t/a})^m} \right]$$

$m < 1$  : Degressionsexponent

$$K_{I,2}^* = b M_{a,2}^m$$

$$\Rightarrow K_{I,2}^* = \left( \frac{M_{a,2}^m}{M_{a,1}^m} \right) K_{I,1}^* \tag{3b}$$

$$K_{I,1}^* = b M_{a,1}^m$$

Verdopplung von  $M_a$  :  $K_{I,2}^* = \left( \frac{2}{1} \right)^{0.7} K_{I,1}^* = 1.65 K_{I,1}^* \neq 2 K_{I,1}^*$

Grenzen dieser Methode:

- Gl.(3a) gültig bis max.  $\approx 3 M_a$
- Anlagen sind *nicht* geometrisch ähnlich
- Anlagen bestehen aus anderen Werkstoffen

aktuelle Investitionskosten :

$$K_{I, \text{aktuell}} = i/i_0 K_I^*$$

$i/i_0$ : (rel.) Preisindex

Acht Randbedingungen:

1. Sämtliche Angaben werden auf einen *einheitlichen Zeitpunkt*, hier auf das Jahr 1957, bezogen. Ältere Literaturangaben, wie z. B. Kurve 67 oder die Kurven 71–74 (deutsche Vorkriegsanlagen), konnten durch Umrechnung mit einem geeigneten Preisindex angeglichen werden.

2. Bei allen eigenen Ermittlungen blieben *Grundstücke, Nebenanlagen und Hilfsbetriebe* grundsätzlich *unberücksichtigt*.

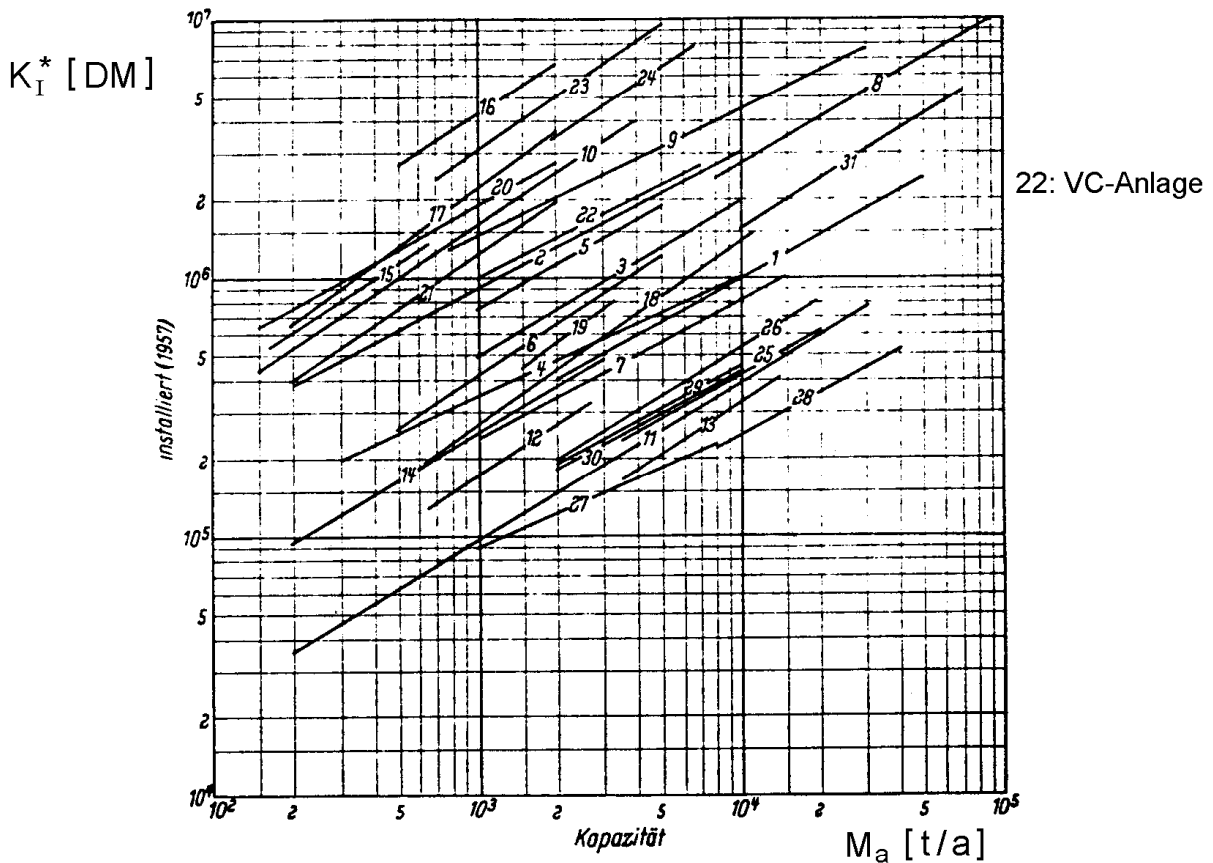


Abb. 6 Anschaffungskosten ( $K_I^*$ ) vollständiger chemischer Anlagen (Anwendung von Gl. (3a))

3. Sofern der *Bauteil* eingeschlossen ist, wurde möglichst angegeben, ob es sich um *Freianlagen* oder *eingehauste Anlagen* handelt. Alle anderen Nebenpositionen sind immer einbegriffen.

4. *Tanklager* normaler Größe für Rohstoffe und Endprodukte sind eingeschlossen, nicht jedoch im allgemeinen Gasometer und größere Siloanlagen.

## Erläuterungen zu Abb. 6

Kurve	Verfahren	Kapazitätsmaßstab	Degres- sions- exponent m	Bemerkungen
1	Formaldehyd	Produkt, 37%ig (t/a)	0,55	Freianlage
2	Oxalsäure	Produkt (t/a)	0,53	ohne Bauteil
3	Calciumformiat	..	0,60	..
4	Natriumformiat	..	0,46	..
5	Ameisensäure	Produkt, 85- 90%ig, (t/a)	0,58	..
6	Natriumsulfid	Produkt, 60- 62%ig, (t/a)	0,66	..
7	Natriumsulfat (me- chanischer Sulfatofen)	Produkt (t/a)	0,53	..
8	Soda nach SOLVAY	Produkt (t/a)	0,58	..
9	Natriumbichromat	..	0,49	..
10	Essigsäure aus Melasse	..	0,67	..
11	Salzsäure aus H <sub>2</sub> und Cl <sub>2</sub>	Produktion bez. auf HCl (t/a)	0,61	..
12	Chlorkalk, mit Kalk- löschanlage	Produkt, 35- 37%ig, (t/a)	(0,67)	..
13	Eindampfung von Natronlauge, von 50 auf 99,5%	Produktion bez. auf 99,5%ige NaOH (t/a)	(0,67)	..
14	Natriumhypochlorit- Lauge	Chloreinsatz (t/a)	0,60	..
15	Kaliumchlorat, elektrolytisch	Produkt (t/a)	(0,65)	ohne Bauteil, Ex- ponent geschätzt
16	Chlordioxyd, einschl. Chloratelektrolyse	..	(0,65)	..
17	Wasserstoffperoxyd, elektrolytisch, ohne Platin	..	0,75	ohne Bauteil
18	Wasserstoff, elektro- lytisch	Produkt, Nm <sup>3</sup> /24h	0,71	..
19	Wasserstoff, an Eisen	..	0,75	eingehaust, brit. Angaben ohne Bauteil
20	DDT	Produkt (t/a)	0,55	..
21	γ-Hexachloreyclo- hexan	Produkt, 35%ig (t/a)	0,68	..
22	Vinylchlorid aus C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> und Cl <sub>2</sub>	Produkt (t/a)	0,62	..
23	Polyvinylchlorid aus C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> und Cl <sub>2</sub>	..	0,70	..
24	Vinylacetat aus C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> und Essigsäure	..	(0,67)	..
25	Speiseöl durch Ex- traktion von Ölsaaten, chargenweise	..	0,55	..
26	wie 25, jedoch halb- kontinuierlich	..	0,62	..
27	Fetthärtung, chargen- weise	..	0,44	..
28	wie 27, jedoch kon- tinuierlich	..	0,53	..
29	Fettsäuredestillation	Einsatz (t/a)	0,54	ohne Bauteil
30	Hochdruck-Fettspal- tung, chargenweise	Produkt (t/a)	0,54	..
31	Phosphorsäure, nasses Verfahren, mit Phos- phat-Mahlanlagen	Produkt, 55%ig (t/a)	0,63	eingehaust, brit. Angaben

5. Soweit es möglich war, wurde neben der Angabe des Endproduktes *das Verfahren* technisch näher bezeichnet. Auf diese Weise sollen Zweifel über Alternativmöglichkeiten des Verfahrens sowie die Produktionstiefe ausgeschlossen werden.

6. Die *Kapazitätsangaben* beziehen sich auf vollkontinuierlichen Betrieb bei durchschnittlich 8000 Betriebsstunden pro Jahr. Ist nichts besonderes vermerkt, sind bei den Produkten handelsübliche Konzentrationen und technische Reinheitsgrade anzunehmen.

7. Waren nur Angaben für *eine* Betriebsgröße zugänglich, so erfolgte gleichfalls eine kurvenmäßige Darstellung, und zwar entweder durch Extrapolation nach beiden Seiten im Verhältnis 2:1 und Anwendung eines mittleren Exponenten von 0,67 oder aber durch Übernahme eines veröffentlichten Degressionsexponenten. Derartige Fälle sind besonders markiert, indem der Exponent in den Erläuterungen zu Abb. 76–78 in Klammern gesetzt ist.

8. Britische Angaben wurden im Verhältnis des offiziellen Wechselkurses konvertiert. Dieses Vorgehen wird im Rahmen der hier erreichbaren Genauigkeitsgrade als zulässig betrachtet.

Das Verfahren bietet trotz seiner geringen Genauigkeit oft große Vorteile, vor allem wenn der Mangel an technischen Informationen die Anwendung detaillierter Schätzungsmethoden ausschließt.

Es ist außerdem eine *schnelle* Schätzmethode für  $K_I$ .

### 3.3 Zuschlagfaktoren

Kostenermittlung aus Zuschlagfaktoren, wenn Kosten für Apparate und Maschinen bekannt sind:

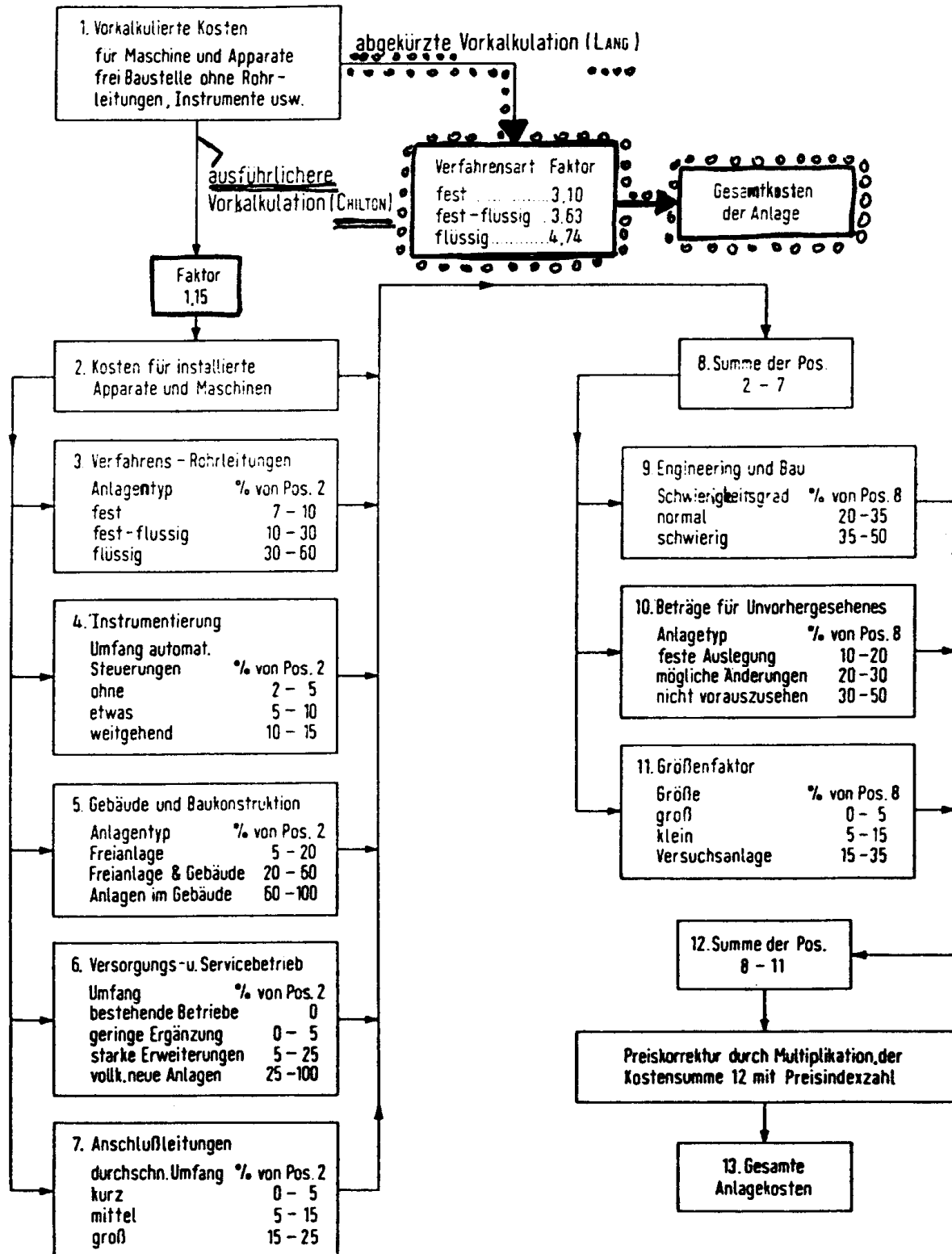


Abb.7 Vorkalkulation mit Zuschlagfaktoren

### 3.4 Wilson-Formel

Methode beruht ebenfalls auf der Tatsache, dass Chemieanlagen in gewissem Sinn *ähnlich* strukturiert sind und ist aufgrund genauer Analyse der Investitionskosten *bestehender* Anlagen entwickelt worden.

Ermittlung der Kosten  $K_I$  für Maschinen und Apparate (ohne Pumpen) nach der Methode von Wilson (1971):

$$K_I = \frac{i}{i_0} f_K f_M f_T f_p N \bar{P}_A \quad (4a)$$

$K_I$  zu ermittelnde Investitionssumme in Mio €

$N$  Anzahl der Maschinen und Apparate (ohne Pumpen)  
wird dem *Fließschema* (s. Vorlesung "Fließschemata) entnommen

$\bar{P}_A$  durchschnittlicher Kostenanteil des Einzelapparates in Mio € (einschließlich Großmaschinen, aber ohne Pumpen) [Apparatekosten]

$i/i_0$  auf das Vergleichsjahr (für das die Kosten  $\bar{P}_A$  ermittelt wurden) bezogener Preisindex chemischer Anlagen

$f_K$  kapazitätsabhängiger Faktor zur Umrechnung der Kosten für Maschinen und Apparate auf Gesamtkosten (Investmentfaktor)

$f_M$  Faktor zur Berücksichtigung von Sonderwerkstoffen

$f_T$  Faktor zur Berücksichtigung der Abweichung der mittleren Betriebstemperatur  $\bar{T}$  von der *Umgebungstemperatur*  $T_u$

$f_p$  Faktor zur Berücksichtigung der Abweichung des mittleren Betriebsdruckes  $\bar{p}$  vom *Umgebungsdruck*  $p_u$

### 3.4.1 Apparate-Kosten

$$\bar{P}_A = 180 M_a^{0.675} \tag{4b}$$

wobei  $M_a$  die jährliche Produktion in Tonnen ist.

### 3.4.2 Preisindex

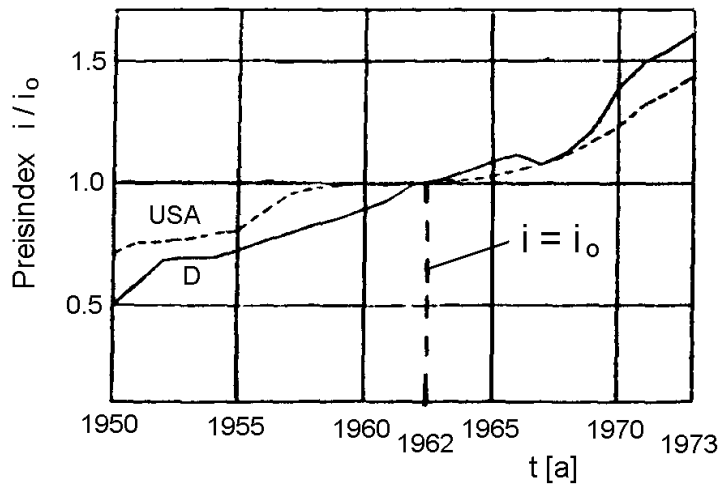


Abb. 8 Preisindices chemischer Anlage in USA und D

$i_0 (= 100)$ : Preisindex im Bezugsjahr 1962

$i_0 = 100$ : [1985, Bezugsjahr in D]	
Jahr	$i/i_0$
1989	1.114
1992	1.307
1994	1.367
2002	1.471
2004	1.534
2005	1.584
2006	1.627
2007	
2008	

### 3.4.3 Investment-Faktor

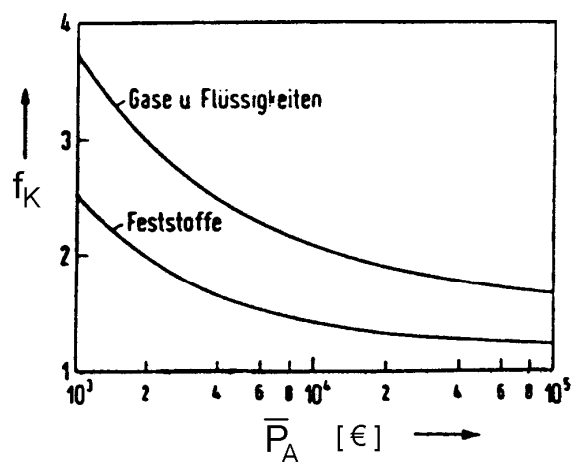
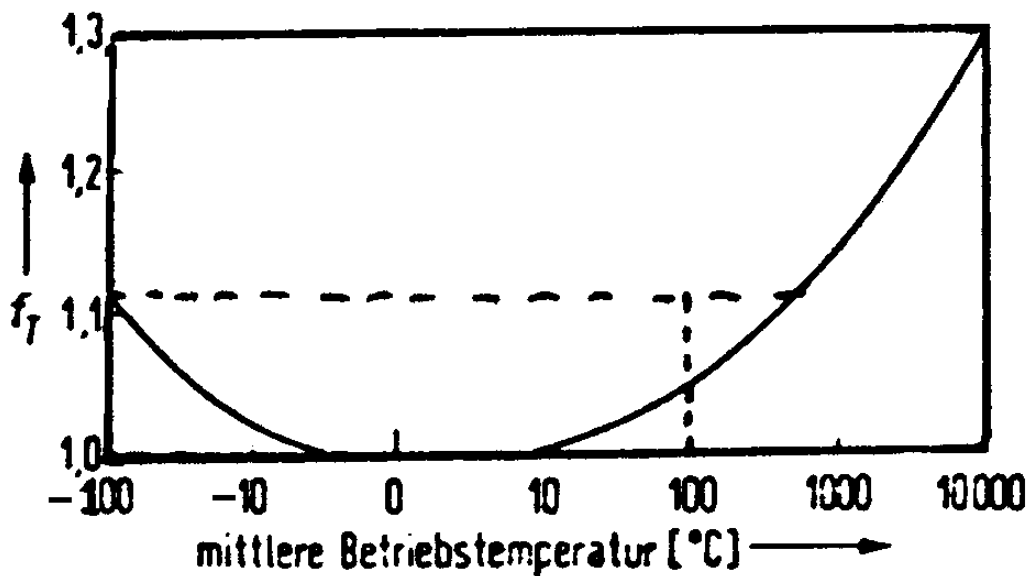


Abb. 9 Investmentfaktoren  $f_K$  in Abhängigkeit vom mittleren Preis  $\bar{P}_A$  des Einzelapparates

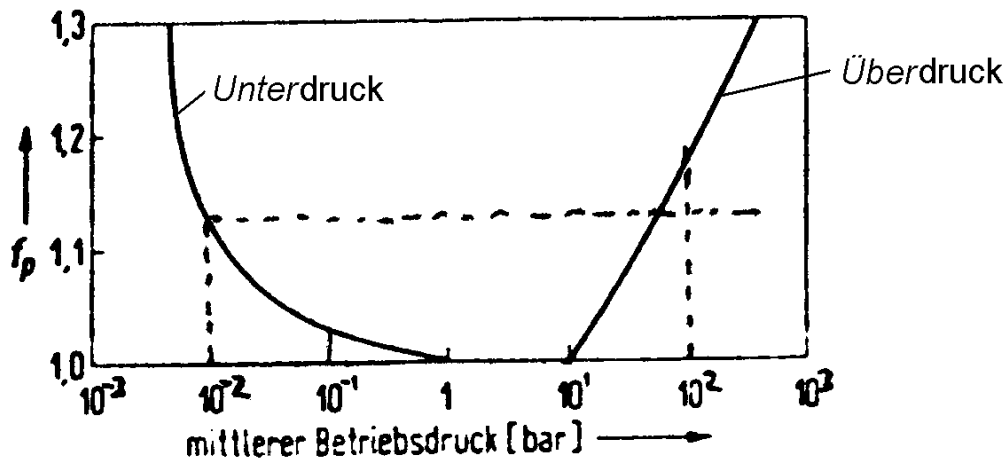
### 3.4.4 Zuschlagfaktoren für Werkstoff, Temperatur und Druck

Tab.1 Werkstofffaktoren  $f_M$

Werkstoff	$f_M$
Kohlenstoffstahl	1.00
Bronze	1.05
Kesselbaustahl	1.07
Aluminium	1.08
Gußstahl	1.12
ferritischer Cr-Stahl	1.27
austenitischer Cr-Stahl	1.50
Hastelloy C	1.54
Monel	1.65
Nickel	1.71
Titan	2.00



**Abb. 10 Korrekturfaktor  $f_T$  :** Erzeugung hoher Temperaturen ist kostengünstiger als die Erzeugung tiefer Temperaturen



**Abb.11 Korrekturfaktor  $f_p$**  : Erzeugung von *Überdruck* ist kostengünstiger als die Erzeugung von *Unterdruck*

#### 4. Gliederung der Herstellkosten, Low-cost-Anlagen

1. Rohstoffkosten
2. Betriebsmittelkosten; Betriebshilfsmittelkosten
3. Personalkosten einschließlich Betriebsaufsichtskosten
4. Reparatur- und Wartungskosten
5. Analysenkosten
6. Werksgemeinkosten
7. Forschungskosten einschließlich Kosten für Weiterentwicklung
8. Generalien-Kosten
9. Steuer- und Versicherungskosten
10. Abschreibungskosten
11. Amortisationskosten und Gewinn

2 bis 7 : Umwandlungskosten

2 bis 10 : Herstellkosten ( $K'_H$ ) ohne Rohstoffkosten

1 bis 10 : Herstellkosten (Produktionskosten) ( $K_H$ ); s. Tab. 2

3,8,9,10,11 : Fixkosten  $\neq f(M_a)$

1,2,4 bis 7 : variable (veränderliche) Kosten ( proportionale Kosten, unterproportionale Kosten )

1 bis 11 : Selbstkosten

7, 8 + Verkaufskosten (für Fracht, Vertrieb, Werbung) : allgemeine Kosten ( $K_{al}$ )

Gesamtherstellkosten :  $K_{H,ges}$

Herstellkosten ( $K_H$ ) minus Gutschrift für Nebenprodukte ( $K_{NP}$ ), d.h.  $K_{H,ges} = K_H - K_{NP}$

**Tab. 2 Herstellkosten (Produktionskosten-) Vorkalkulation (Preisbasis 1970)**

Kalkulations-Nr. .... Produktion von: Vinylacetat-Monomer Ausnutzungsfaktor 90%  
 Kalkulator ..... Produktionshöhe: 21 600 metr. t/Jahr (f<sub>S</sub> = 0.9)  
 Datum ..... Standort .....

Investitionskosten (K <sub>I</sub> ): 2 750 000		Maßeinheit	Preis/ Einheit in \$	Einheiten/ t Produkt	Einheiten/ Jahr	Kosten/ Jahr in \$	Gruppen- kosten/ Jahr in \$	Einzelkosten/ t Produkt in \$	Gruppen- kosten/ t Produkt in \$
↓ Gruppen									
1	Roh- und Hilfsstoffe						5270000		244
	Essigsäure	t	220	0,727	15700	3455000		160	
	Acetylen	t	242	0,318	6870	1660000		77	
	Katalysatoren und Hilfs- chemikalien					155000		7	
2	Energien						125000		5,80
	Heizöl								
	Dampf	t	1,1	2,52	54500	60000		2,78	
	elektr. Energie	kWh	0,006	162	3500000	21000		0,47	
	Kühlwasser	m <sup>3</sup>	0,011	237	4400000	44000		2,05	
	Preßluft								
3	Betriebslöhne						90000		4,16
		Arbeits-h	2,60		4960	65000		3,00	
		Arbeits-h	3,00		8320	25000		1,16	
3	Betriebsaufsicht 1 Betriebsassistent					10000	10000		0,46
4	Reparaturen und Unterhaltung: 2% auf Kapitalinvestition						137500		6,82
	Löhne					55000		2,53	
	Materialien		2% auf Kapitalinvestition			55000		2,53	
	Werkstattanteil		50% auf Reparaturlöhne			27500		1,26	
2	Betriebshilfsmittel		1% auf Kapitalinvestition				27500		1,28
5	Laboratoriumskontrolle		1,18/t Produkt				23750		1,10
6	Transportkosten im Werk		1,18/t Produkt				23750		1,10
7	Technische Weiterentwicklung								
2-7	Umwandlungskosten						427,50		19,76
8	Generalien						77500		3,59
	50% auf Betriebs- und Rep.-Löhne					72500			
	50% auf Betriebsaufsicht					5000			
9	Steuern- und Versicherungen 2% auf Investition						55000		2,55
10	Abschreibung 15 Jahre linear						184000		8,52
2-10	Herstellkosten ohne Rohstoffe						753000		34,88
1-10	Herstellkosten (Produktionskosten) minus Gutschriften für Nebenprodukte gleich Gesamtproduktionskosten						6023000		278,88
							6023000		278,88

Minimierung von K<sub>I</sub> (max. zulässige Belastung der Produktion durch K<sub>I</sub>):

$$K_I / t_0 \leq M_a P_t' - (K_H + G) ; P_t' [€/t] : \text{Produktpreis pro Tonne t}$$

s. Abschn. 5.2

⇒ low-cost-Anlagen, d.h. Freianlagen einfachster Ausstattung ohne Zwischenproduktlagerung

Tab. 3 Richtwerte einiger Betriebsmittelpreise in Deutschland Bezugsjahre 1972 und 2007		
Stoff	Preise (1972)	Preise (2007)
Erdgas	2.0 - 2.5 DM/MWh	20 - 30 €/MWh
Heizdampf	10 - 15 DM/t	10 - 12 €/t (6 bar) 12 - 14 €/t (16 bar) 13 - 15 €/t (31 bar)
elektrische Energie	0.04 - 0.10 DM/kWh *	0.05 - 0.07 €/kWh (AP)
Flusswasser (Uferfiltrat)	30 - 50 DM/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	26 - 50 €/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> (AP)
voll entsalztes Wasser, kalt	0.8 - 2.5 DM/m <sup>3</sup> **	800 - 2500 €/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>
Trinkwasser		1100 - 2500 €/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>

\* Abhängig von der Abnahmemenge, in Einzelfällen können auch niedrigere Preise resultieren

\*\* Abhängig von der Größe der Entsalzungsanlage; AP : Arbeitspreis (variabel)

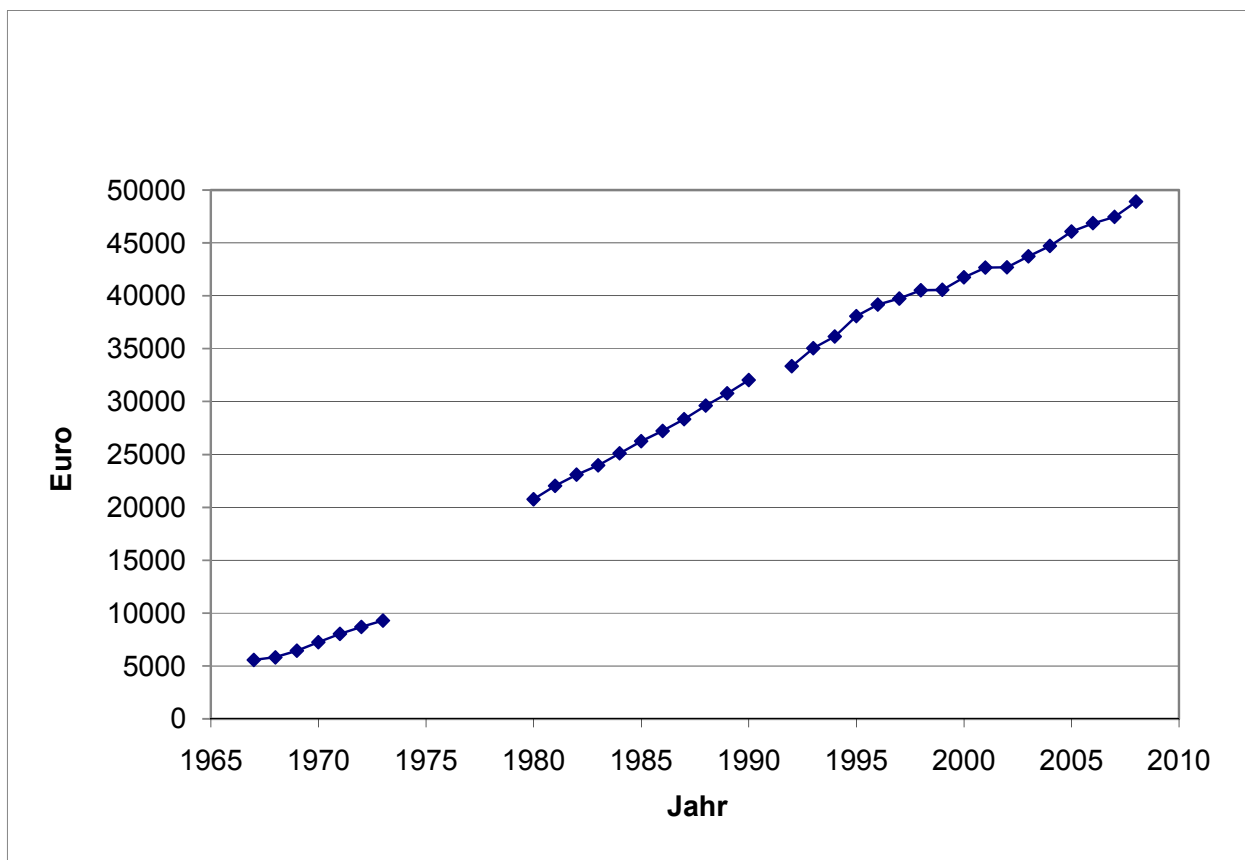


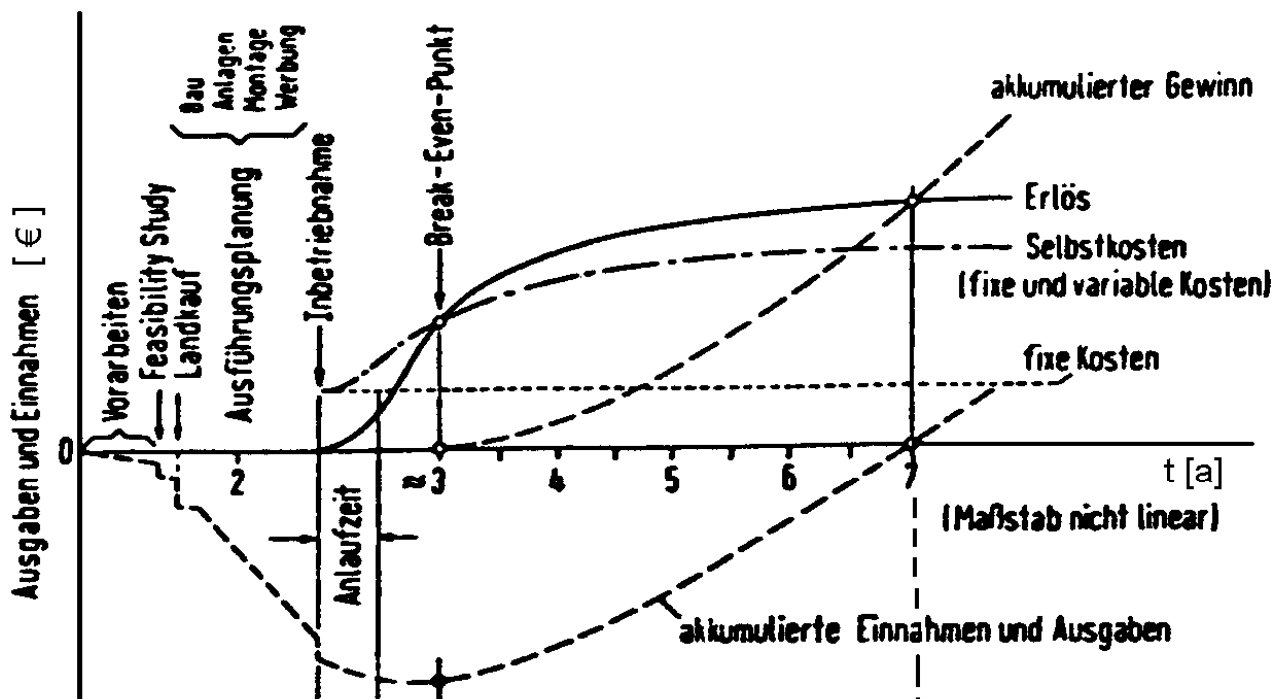
Abb.12 Bruttolohn je Beschäftigten in der Chemischen Industrie

## 5. Ermittlung der Rentabilität

### 5.1 Zeitlicher Ablauf einer Investition

Es sind zu beachten:

- zeitlicher Verlauf von
  - Entwicklungskosten
  - Geländekosten
  - Planung
  - Bau
  - Umlaufgüter
- Anfahrperiode
  - keine volle Produktion
  - Kosten aufteilen in fixe und variable Anteile
  - Break-Even-Punkt (Nutzenschwelle) : Erlös = Selbstkosten
- Normalbetrieb
  - Entwicklung von Erlösen und Preisen beachten



**Abb.13a Schematischer Ablauf einer Investition**

(cash - flow - Diagramm)

$$t_{Rü} = 4 \text{ a}$$

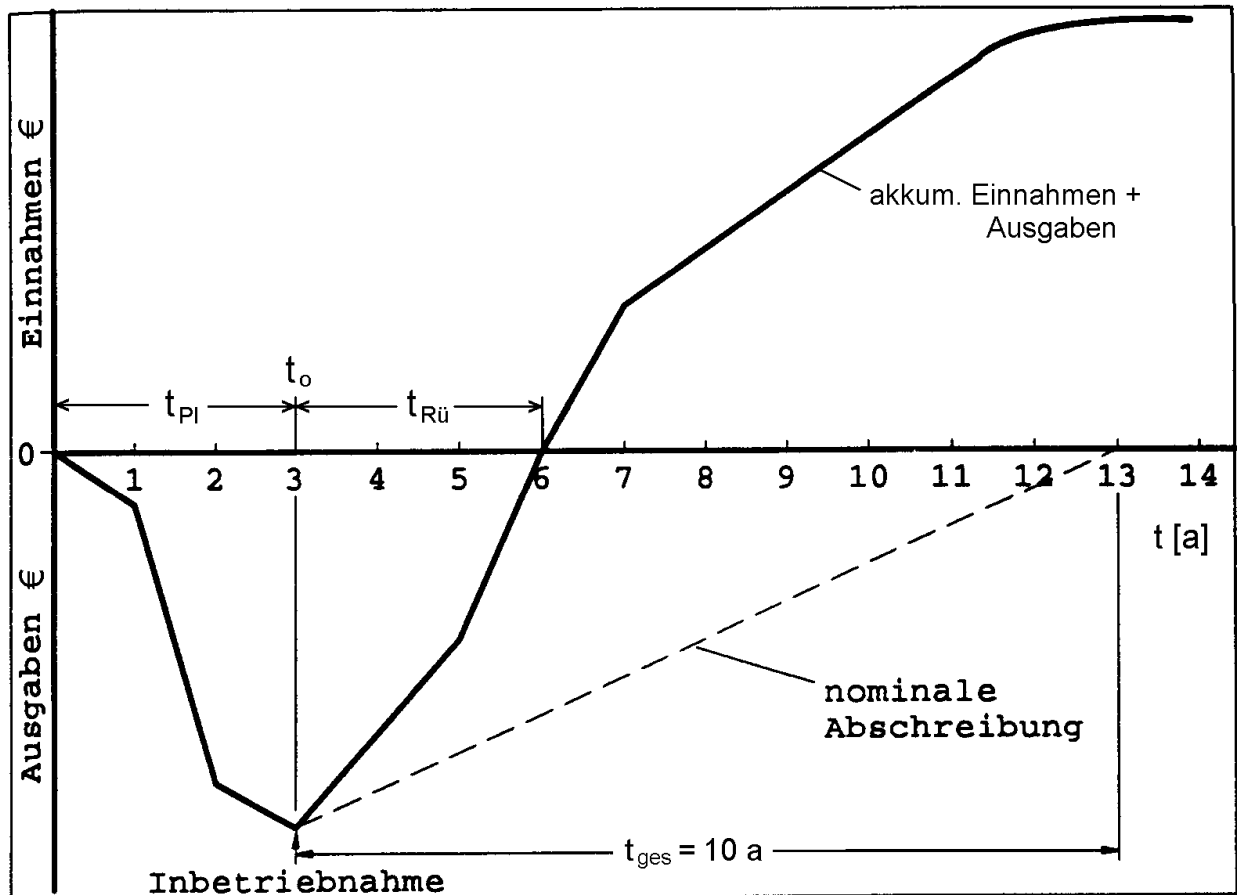


Abb.13b Cash-flow-Diagramm (vereinfachte Darstellung)

$t_{Rü}$  : Kapitalrückflusszeit

$t_{ges}$  : Nutzungsdauer der Anlage [s. Gl.(9a)]

$t_{PI}$  : Planungsdauer [s. Gl.(9a)]

$t_0$  : Zeitpunkt der Inbetriebnahme [s. Gl.(8)]

## 5.2 Statische Rentabilität

### 5.2.1 Return on Investment (ROI) bzw. Rendite

Für den Ertrag der Investition (Return on Investment: ROI) bzw. Rendite (Kapitalrendite)  $r$  gilt:

$$r \equiv \text{ROI} \equiv \frac{1}{t_{\text{Rü}}} = \frac{G + \text{Abschreibungen} / a}{K_I} = \frac{E - K_H}{K_I} \quad (5a)$$

oder wenn  $K_I$  als Eigenkapital zur Verfügung steht:

$$r' \equiv \text{ROI}' \equiv \frac{1}{t_{\text{Rü}}'} = \frac{G + \text{Abschreibungen} / a + K_{\text{SZ}}}{K_I} \quad (5b)$$

$r \left[ \frac{1}{a} \right]$ ,  $r' \left[ \frac{1}{a} \right]$  : Kapitalrückflusskoeffizienten

$t_{\text{Rü}}$  [a] : Kapitalrückflusszeit, Wiedereinbringzeit ,

$t_{\text{Rü}}'$  [a] : kürzeste Amortisationszeit (pay-out time) .

$K_{\text{SZ}}$  [€ / a] : Kosten für Steuern und Zinsen

$E$  [€ / a] : (Verkaufs) Erlös [Umsatz, *Ergebnis*];  $E(t)$  : wenn  $t \uparrow$  dann  $E \downarrow$  .

$K_H$  [€ / a] : Herstellkosten

*angestrebt* wird:  $t_{\text{Rü}} \approx 3 \text{ bis } 4 \text{ a}$  bzw.  $\frac{1}{t_{\text{Rü}}} = r \approx 0.33 \text{ bis } 0.25 \frac{1}{a}$   
 $\approx 33 \text{ bis } 25 \frac{\%}{a}$

rentabel :  $\text{ROI} \approx 0.25 \frac{1}{a}$

"unseriös" :  $\text{ROI} \gtrsim 0.35 \frac{1}{a}$

Der Gewinn (Ergebnis)  $G$  [€ / a] vor Steuern und Zinsen wird wie folgt definiert:

$$G \equiv E - K_H - K_{\text{al}} \quad (6a)$$

Für den Gewinn (Überschuss)  $G'$  [€ / a] nach Steuern und Zinsen gilt:

$$G' \equiv G - K_{\text{SZ}} \quad (6b)$$

$K_{\text{al}}$  [€ / a] : allgemeine Kosten (s. Kap. 4)

Bilanz 2007	BASF		Bayer		Henkel		Lanxess		Merck	
Umsatz [Mrd. Euro]	57,95	(+10,2) <sup>a</sup>	32,39	(+11,8)	13,07	(+2,6)	6,61	(-4,8)	7,08	(+12,0)
Ebit <sup>b</sup> [Mrd. Euro]	7,61	(+4,9)	3,15	(+14,2)	1,34	(+3,5)	0,21	(-42,8)	0,20	(-80,6)
Ergebnis vor Ertragssteuern [Mrd. Euro]	6,94	(+6,3)	2,23	(+12,8)	1,25	(+6,3)	0,17	(-40,1)	-0,1	
Jahresüberschuss nach Steuern [Mrd. Euro]	4,07	(+26,4)	1,93	(+12,7)	0,94	(+8,0)	0,11	(-43,1)	3,52	(+252)
Investitionen in Sachanlagen [Mrd. Euro]	2,63	(+8,4)	1,89	(+8,7)	0,47	(+9,0)	0,28	(+6,4)	0,28	(+10,7)
F+E-Aufwand [Mrd. Euro]	1,28	(+8,1)	2,58	(+12,2)	0,35	(+2,9)	0,88	(±0)	1,03	(+67)
F+E-Quote [%]	2,21	(-7,9)	7,97	(+0,8)	2,55	(-5,4)	1,3	(±0)	14,55	(+21)
Umsatz pro Beschäftigte [Mio. Euro]	0,61	(+10,9)	0,31	(+11,1)	0,25	(+4,2)	4,52	(+7,4)	0,23	(±0)
Ebitda-Marge <sup>c</sup> [%]	17,6	(-4,9)	13,2	(-21,0)	12,9	(±0)	10,9	(+12,4)	27,4	(+5,4)
Umsatzrendite <sup>d</sup> ROS [%]	13,1	(-5,1)	9,8	(-18,3)	10,3	(±0)	0,03	(-99,4)	13,8	(-22,9)
Kapitalrendite <sup>e</sup> ROCE [%]	16,4	(-6,3)			15,4	(+6,2)	17,7			
Ergebnis je Aktie [Euro]	8,32	(+30,6)	5,84	(+263) <sup>f</sup>	2,14	(+7,5)	1,32	(-43,3)	16,21	
Beschäftigte (31.12.2007)	95175	(-0,1)	106200	(+0,2)	52 303	(+1,1) <sup>g</sup>	14610	(-11,4)	30968	(+3,2)

<sup>a</sup>Veränderungen zum Vorjahr in Prozent in Klammern.

<sup>b</sup>Ebit (Ergebnis vor Zinsen und Steuern).

<sup>c</sup>Ebitda (Ergebnis vor Zinsen, Steuern und Abschreibungen)/Umsatz.

<sup>d</sup>Ebit (Ergebnis vor Zinsen und Steuern)/Umsatz.

<sup>e</sup>Ebit/durchschnittlich eingesetztes Kapital.

<sup>f</sup>Inkl. Einfluss der Schering-Akquisition.

<sup>g</sup>Im Jahresdurchschnitt.

## 5.2.2 Ermittlung der Herstellkosten

*Herstellungspreis* :  $E / M_a$  [€ / t]

minimaler Preis des Produktes < *minimaler Verkaufspreis*

↳  $E / M_a + \text{Zuschläge}$

aus Gl. (5a) folgt:

$$\frac{E}{M_a} = \frac{K_H}{M_a} + \frac{1}{t_{Rü}} \frac{K_I}{M_a} \quad (7a)$$

Für die Herstellkosten  $K_H$  gilt

$$K_H = M_a (K_R + K_B) + (1 + q) K_P + (a_1 + w) K_I + p U \quad (7b)$$

$K_R$  [€ / t Produkt] Rohstoffkosten

$K_B$  [€ / t] Betriebsmittelkosten

$K_P$  [€ / a] Personalkosten

$q K_P$  [€ / a] Zuschlag für Analysen- und Werksgemeinkosten

$a_1 K_I$  [€ / a] Abschreibung auf Investitionskosten; i.A. wird mit 10-jähriger linearer Abschreibung gerechnet, d.h.  $a_1 = 0.1$

$p U$  [€ / a] Zinsen auf Umlaufvermögen U (z.B. Lösungsmittelfüllung) innerhalb der Anlagengrenze

$p$  [-] Zinssatz

$w K_I$  [€ / a] Reparatur- und Wartungskosten

### 5.3 Discounted Cash Flow: DCF - Methode

alle Geldbeträge werden auf einen festen Zeitpunkt  $t_0$  diskontiert

$$(Ei - A)_{t_0} = (Ei - A)_t (1 + p_0)^{-t} \quad (8)$$

$Ei$  : erwartete Einnahmen in [ € / a ], z.B. aus Produktverkauf

$A$  : erwartete Ausgaben in [ € / a ], z.B.  $K_E$  (Entwicklungskosten,  $K_I$ ,  $K_H$ )

$t$  : Anzahl der Jahre *nach* Inbetriebnahme ( $t > 0$ )

*vor* Inbetriebnahme ( $t < 0$ )

Durch Addition aller jährlichen Kapitalbewegungen, verzinst auf den Zeitpunkt  $t_0$

(Gl. (8)) für die Dauer  $t_{PI}$  der Verfahrensentwicklung erhält man [Kostenbilanz] :

verzinsten Summe der Einnahmen = verzinsten Summe der Ausgaben :

$$\sum_{t=-t_{PI}}^{t_{ges}} (Ei - A)_t (1 + p_0)^{-t} = 0 \quad (9a)$$

$p_0$  = "interner Zinssatz", Maß für Rendite des Projektes, wird so lange variiert bis obige (Gl. (9a)) Bedingung erfüllt ist; angestrebt wird:

$$p_0 \gtrsim 0.12 \quad (12 \%)$$

$t_{PI}$  [a] : Dauer der Planung bzw. Verfahrensentwicklung

$t_{ges}$  [a] : Nutzungsdauer der Anlage (häufig  $t_{ges} \gtrsim 10a$ )

Tab. 4 **Kostenbilanz** eines Projektes

	Jahr	$K_E$	$K_I$	$(E_i - K_H)$	$\sum_{t_{pi}=-5}^{10} (E_i - A)_t$	$\frac{1}{t_{Ru}}$	$b \equiv \sum_{t_{pi}=-5}^{10} (E_i - A)_t (1 + p_o)^{-t} \text{ (9b)}$		
	$t =$	[Mio €]	[Mio €]	[Mio €]	[Mio €]	$\frac{\%}{a}$	$p_o = 0.10$	$p_o = 0.15$	$p_o = 0.123$
							[Mio €]	[Mio €]	[Mio €]
1. Jahr	-5	-0.5			-0.5		-0.81	-1.0	-0.89
2.	-4	-2.5			-3.0		-4.47	-5.38	-4.87
3.	-3	-1.0			-4.0		-5.80	-6.90	-6.29
4.	-2	-1.0			-5.0		-7.01	-8.22	-7.55
5.	-1	-0.5	-10.0		-15.5		-18.61	-20.32	-19.34
6.	0	-0.5	-10.0		-26.0		-29.11	-30.82	-29.84
↑ Nutzungsdauer $t_{ges} = 10 \text{ a}$ ↓	1.			2.5	-23.5	10	-26.84	-28.64	-27.61
	2.			5.5	-18.0	21	-22.30	-24.51	-23.25
	3.			7.0	-11.0	27	-17.02	-19.91	-18.31
	4.			7.0	-4.0	27	-12.23	-15.91	-13.91
	5.			7.0	+3.0	27	-7.88	-12.42	-9.99
	6.			5.0	+8.0	19	-5.05	-10.27	-7.49
	7.			5.0	+13.0	19	-2.48	-8.38	-5.27
	8.			5.0	+18.0	19	-0.14	-6.74	-3.30
	9.			5.0	+23.0	19	+1.97	-5.32	-1.54
	10. Nutzungsjahr			5.0	+28.0	19	+3.90	-4.08	+0.03 ≈ 0
$K_E$ : Entwicklungskosten $E_i - K_H$ : erwarteter Kapitalrückfluss [€/a]						positive $E_i > A$	negative $E_i < A$	Kostenbilanz (9b) soll im 10. Jahr Null werden ( $b \approx 0$ )	

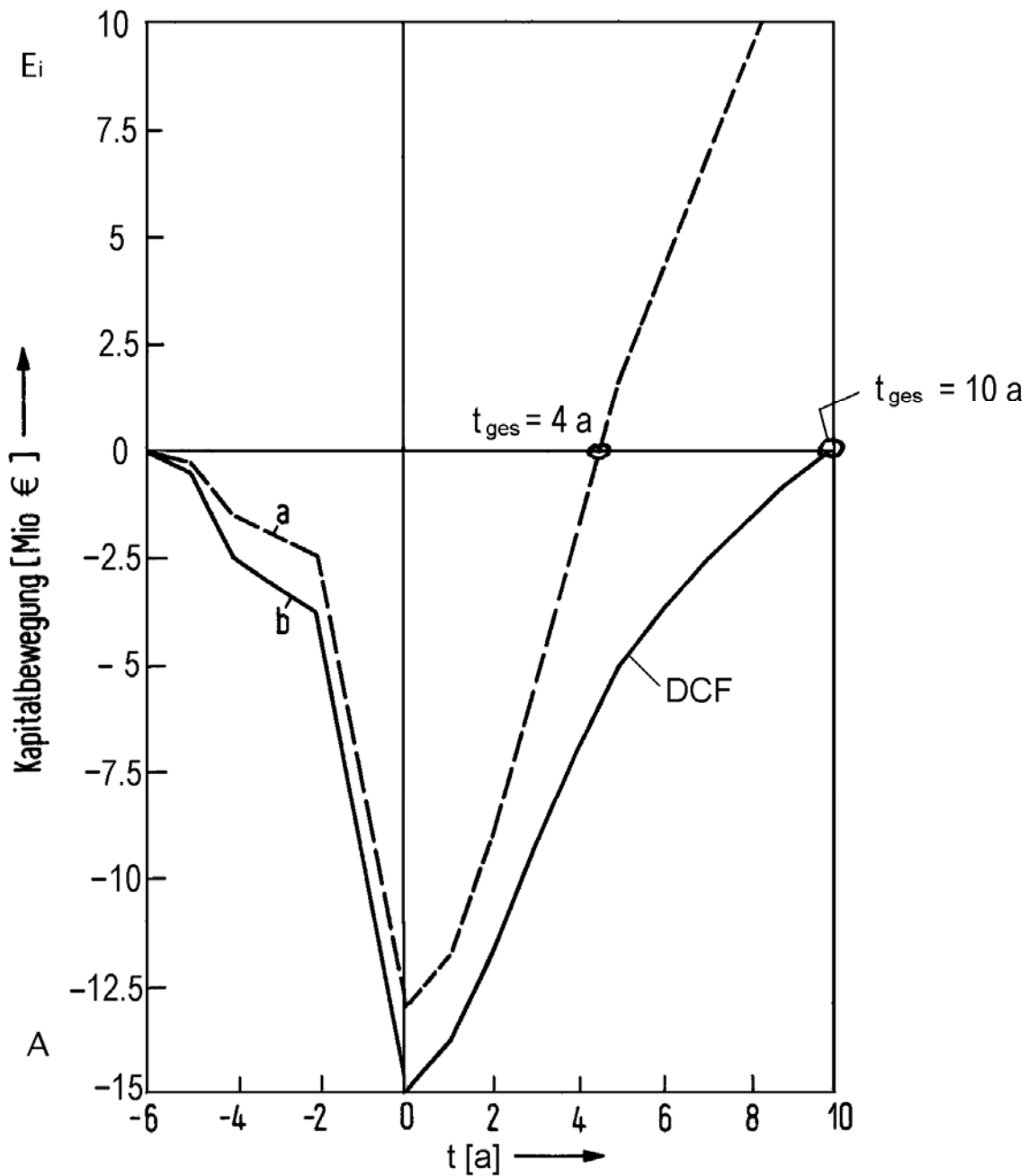


Abb. 14 Typische Kapitalbilanz

a statische Methode,  $\sum_{t_{pl}=-5}^{t_{ges}} (E_i - A)_t$ , etwa *lineare* Zeitabhängigkeit, d.h. *ohne* Berücksichtigung der Kapitalzinsen ( $p_o$ )

b DCF-Methode,  $\sum_{t_{pl}=-5}^{t_{ges}=10} (E_i - A)_t (1 + p_o)^{-t} = 0$  für  $p_o = 12.3 \%$ ,  $t_{ges} = 10$  a

## 5.4 Sensibilitätsanalyse

Man variiert in Gln. (9) die verschiedenen Einflussgrößen (unter Konstanthaltung aller übrigen) um einen bestimmten Bruchteil  $\Delta x/x$  (z.B. 10%) und ermittelt die jeweiligen relativen Abweichungen  $\Delta p_0/p_0$  des internen Zinssatzes vom ursprünglichen Wert  $p_0$ . (vgl. Tab.6 )

Tab.5 Unterteilung der Kosten (in Mio €) des Beispiels aus Tab.4; Kapazität der Anlage: 30000 t/a

Jahr	Entwickl.-kosten (K <sub>E</sub> )	Invest.-kosten <sup>1)</sup> (K <sub>I</sub> )	Produkt			variable Kosten		fixe Kosten			(E - A)
			Preis €/t	Auslastung %	Erlös Mio €	Netto-Rohst. 2)	Betr.-mittel <sup>3)</sup>	Betr.-mittel	Personal <sup>4)</sup>	Rep. <sup>5)</sup>	
-5	-0,5										- 0,5
-4	-2,5										- 2,5
-3	-1,0										- 1,0
-2	-1,0										- 1,0
-1	-0,5	-10,0									-10,5
0	-0,5	-10,0									-10,5
1			1000	72	21,5	- 7,1	-2,9	-1,0	-4,0	-4,0	2,5
2			1000	90	27,0	- 9,0	-3,5	-1,0	-4,0	-4,0	5,5
3			1000	100	30,0	-10,0	-4,0	-1,0	-4,0	-4,0	7,0
4			1000	100	30,0	-10,0	-4,0	-1,0	-4,0	-4,0	7,0
5			1000	100	30,0	-10,0	-4,0	-1,0	-4,0	-4,0	7,0
6			933	100	28,0	-10,0	-4,0	-1,0	-4,0	-4,0	5,0
7			933	100	28,0	-10,0	-4,0	-1,0	-4,0	-4,0	5,0
8			933	100	28,0	-10,0	-4,0	-1,0	-4,0	-4,0	5,0
9			933	100	28,0	-10,0	-4,0	-1,0	-4,0	-4,0	5,0
10			933	100	28,0	-10,0	-4,0	-1,0	-4,0	-4,0	5,0

<sup>1)</sup> Enthält Umlaufvermögen; Steuern wurden nicht berücksichtigt.

<sup>2)</sup> Enthält Nebenproduktgutschriften bzw. -kosten.

<sup>3)</sup> 80% der Betriebsmittel wurden zu den variablen, der Rest zu den fixen Kosten gerechnet.

<sup>4)</sup> Schließt alle personalabhängigen Kosten ein.

<sup>5)</sup> Reparatur, Wartung und alle sonstigen kapitalabhängigen Kosten.

Tab.6 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse (für das Beispiel der Tab 4 und 5)  $p_{0,max} = 0.12$

Parameter x	$\Delta x/x$	$\Delta p_0/p_0$
Entwicklungskosten	+10%	- 4%
Investitionskosten <sup>1)</sup>	+10%	- 22%
Produktpreis	-10%	~ -100%
Auslastung der Anlage	-10%	- 45%
Netto-Rohstoffkosten <sup>2)</sup>	+10%	- 29%
Betriebsmittelkosten	+10%	- 13%
Personalkosten <sup>3)</sup>	+10%	- 11%

größtes Rentabilitäts-risiko

<sup>1)</sup> Es wurden angenommen, daß Wartungs- und Reparaturkosten sich proportional zu den Investitionskosten ändern.

<sup>2)</sup> Enthält Nebenproduktgutschriften bzw. -kosten.

<sup>3)</sup> Einschl. aller personalproportionalen Zuschläge.

### 5.5 Kostendiagramme

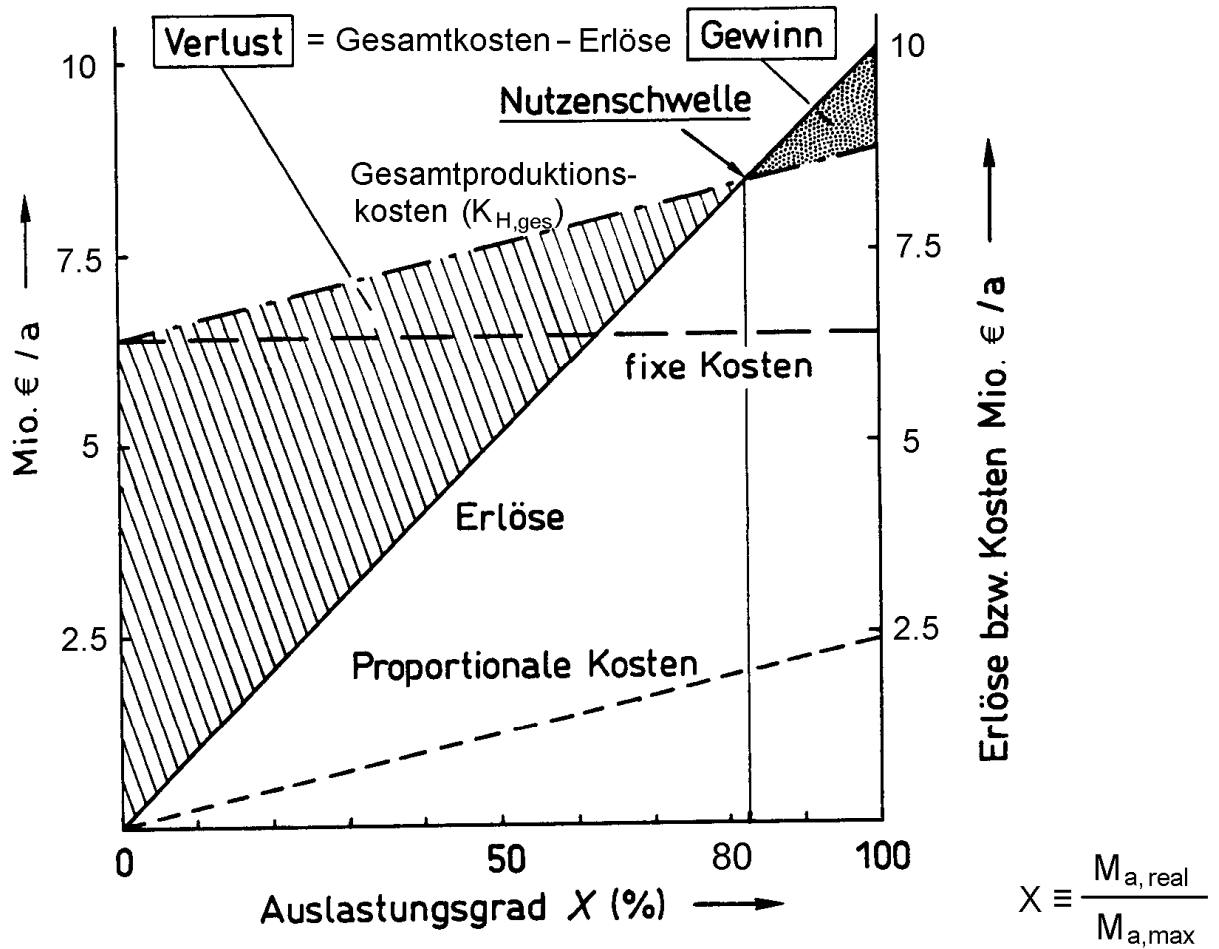


Abb.15a **Kostendiagramm.** Erlöse und Kosten in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad für eine Schwefelsäure-anlage (Kapazität  $M_d = 600 \text{ t SO}_3/\text{d}$ ) – vereinfachte Darstellung mit *linearer* Abhängigkeit der Kosten vom Auslastungsgrad

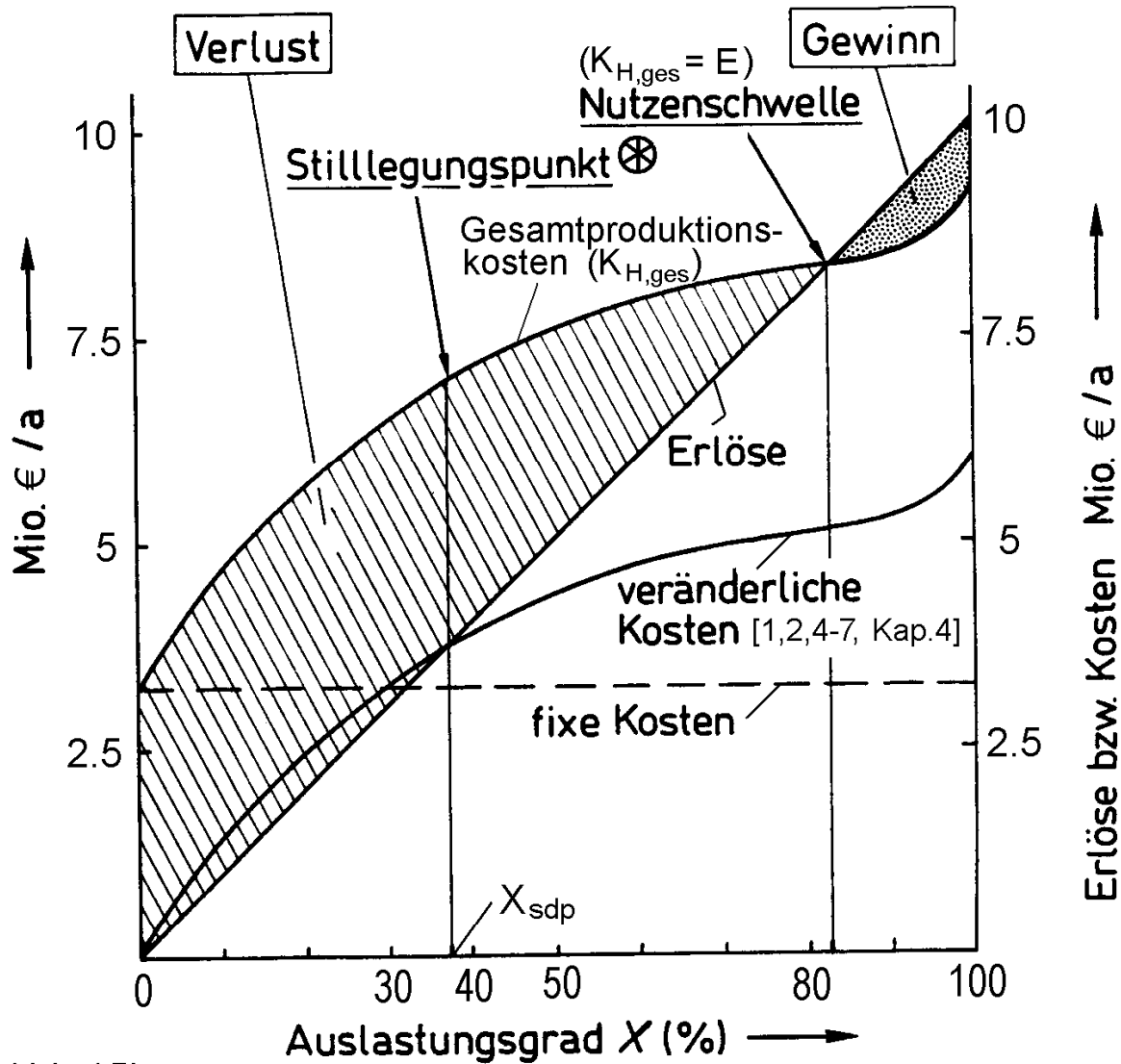


Abb.15b

Kostendiagramm. Erlöse und Kosten in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad – *nichtlineare* Abhängigkeit der Kosten vom Auslastungsgrad

⊗ shut - down point : für  $X \lesssim X_{shut-down\ point}$  : Anlage stilllegen  
 ↳ variable Kosten  $\geq$  Erlöse

## 6. Sicherheitstechnische Aspekte / Anlagensicherheit \*

### 6.1 Standort einer Chemie- oder verfahrenstechnischen Anlage

Bei der Standortwahl sind zu beachten:

- Rohstoffquellen und Absatzmärkte
- Grundstücksqualität
- Infrastruktur
- Arbeitsmarkt
- Nachbarschaft
- Umweltbedingungen
- Risiko und Sicherheit von Chemie- oder verfahrenstechnischer Anlagen [ → Kap. 6.3]
- Entwicklungsmöglichkeiten
- politische Gesichtspunkte

*Sicherheitstechnische* Überlegungen sind in *allen* Lebensphasen einer verfahrenstechnischen Anlage erforderlich, müssen aber bereits bei der *Entwicklung* eines Verfahrens beginnen und sollen zum rechtzeitigen Erkennen von Schwachstellen in der Anlage führen.

	Eingeführtes Produkt		Neues Produkt	Neues Verfahren für eingeführtes Produkt
	Zwischenprodukt oder Großprodukt	Spezialprodukt		
<b>Verfahren</b>				
Entwicklungsstand	●	●	○	●●
Patent- u. Lizenzsituation	●●	●	●●	●●
Rohstoffe (Verfügbarkeit u. zukünftige Preisentwicklung)	●●	●	●	●●
Energiebedarf	●●	—	●	●●
Nebenprodukte (Verwertbarkeit u. Absetzbarkeit)	●●	●	●	●●
Umweltprobleme (Abwasser, Abluft, Abfälle)	●●	●●	●●	●●
Sicherheitsprobleme (Explosionsgefahren; gefährliche Stoffe: brennbar, toxisch)	●●	●	●●	●●
<b>Standort</b>				
Infrastruktur u. Verkehrsanbindung (Straße, Schiene, Hafen u. Wasserwege)	●●	●	●	●●
Arbeitskräfte (Verfügbarkeit, Qualifikation, Zuverlässigkeit)	●	○	●	●●
Rohstoffversorgung	●●	●	●	●
Energieversorgung	●●	○	○	●
Umweltsituation (Standards, besondere Auflagen für Lärmschutz und Abluft)	●●	●●	●●	●●
Sicherheit (u. a. besondere Auflagen)	●●	●	●	●●
Kundennähe	●	●●	●●	●
politische Stabilität	●●	●	●●	●●
<b>Marktsituation</b>				
Marktentwicklung (steigend oder stagnierend)	●	●●	●●	●●
Konkurrenz mit anderen Produzenten	●●	●●	●●	●
Konkurrenz mit anderen Produkten	—	●●	●●	—
eigener Bedarf für das Produkt	●	○	—	●●

- sehr wichtig      ○ weniger wichtig
- wichtig            — ohne Bedeutung

Tab.7 Kriterien für die Entscheidung über Projekte

<b>Produkteigenschaften</b>	Dient das neue Produkt einem neuen Verwendungszweck? (Beispiel: Arzneimittel für bisher nicht heilbare Krankheit)
	Soll das neue Produkt aufgrund neuer Eigenschaften eingeführte Produkte ersetzen?
	Konkurriert das neue Produkt mit anderen Produkten?
<b>Vermarktung</b>	Welche Stellung hat das neue Produkt in der eigenen Produktpalette?
	Sind zur Förderung der Anwendung des neuen Produkts Entwicklungsarbeiten erforderlich?
	Muss ein neuer Kundenkreis geworben werden?
	Ist das neue Produkt für die bisherigen Kunden interessant?
	Ist ein besonderer Kundenservice erforderlich?

Tab.8 Kriterien für die Marktaussichten neuer Produkte

## 6.2 Abgrenzung der Sicherheitstechnik

Die *Sicherheitstechnik* hat unmittelbaren Bezug zum *Umweltschutz* und *Arbeitsschutz* bis hin zur *Produktsicherheit* und ist die Basis der *Anlagensicherheit* (→ Abb. 16). Diese gliedert sich in den *prozessorientierten* Teil und den *anlagenorientierten* Teil. Der *Anwendungsbereich* der Anlagensicherheit umfasst die Planung, die Errichtung, den Betrieb, die Sanierung, die Stilllegung und den Rückbau industrieller *Anlagen* mit/ohne *Stoffumwandlungsprozessen* bei möglichst geringer Gefährdung für *Mensch* und *Umwelt*. Die in den Anlagen realisierten Sicherheitsmaßnahmen sind meist in einer Vielzahl (staatlicher) *Regelwerke* wie z.B. BImSchG insbes. mit der *novellierten* 12. BImSchV (der sog. *Störfall-Verordnung*) als Umsetzung der *Seveso-II-RL* in deutsches Recht, ChemG, GefStoffV, DruckbehV, VbF, GenTG, festgelegt.

---

\*) entnommen aus:  
A. Schönbacher (2002), Thermische Trennverfahren, Springer - Verlag, Berlin

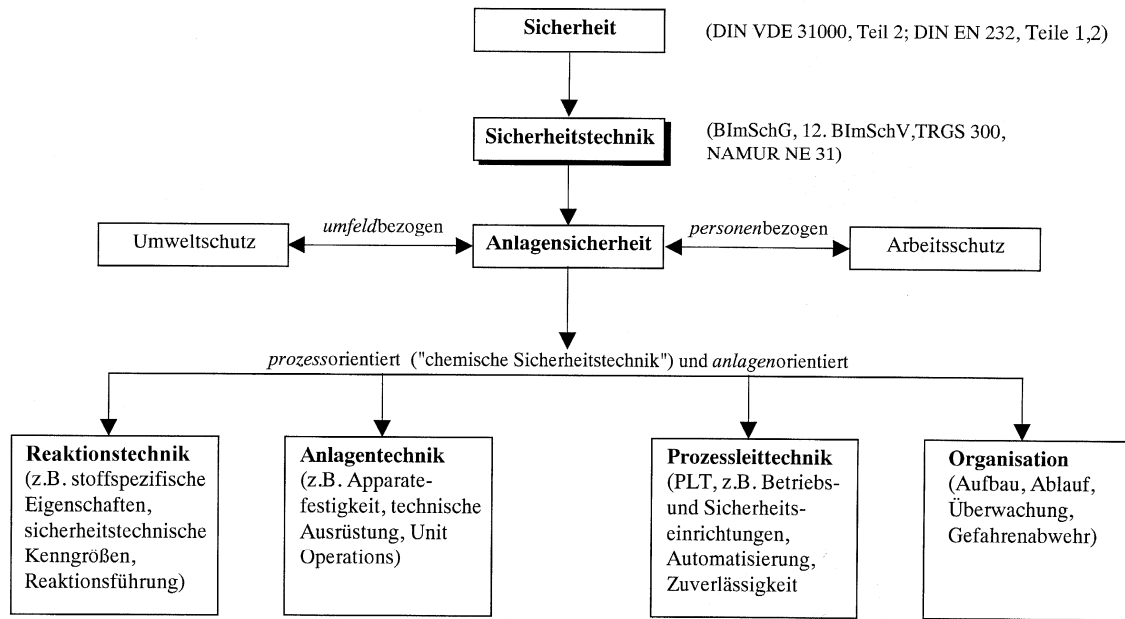


Abb. 16 Zur Abgrenzung der *Sicherheitstechnik*

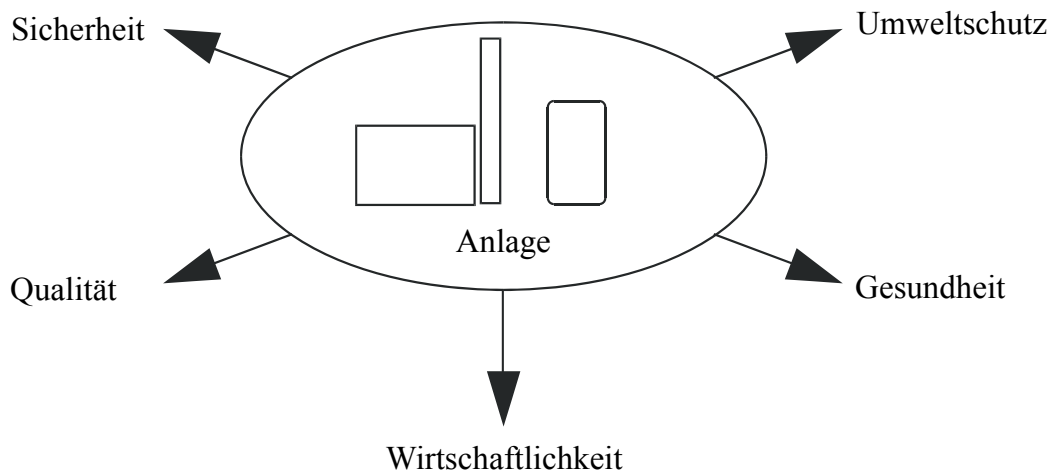


Abb. 17 Zur *Optimierung* verfahrenstechnischer Anlagen hinsichtlich *unterschiedlicher, heute jedoch gleichrangiger* Unternehmensziele

### 6.3 Risiko und Sicherheit

Zur *Minimierung* des *Risikos* R z.B. einer verfahrenstechnischen Anlage mit Stoffumwandlungsprozessen oder eines thermischen Trennapparates, der *brennbare* Stoffe enthält, ist es zunächst unerlässlich mit (meist) *qualitativen* sowie mit *deterministischen* und/oder *probabilistischen* Methoden ( $\rightarrow$  Sicherheitstechnische Planung, s. unten), eine systematische Suche nach den *Gefährdungspotentialen*  $G_f \equiv S$  ( $\rightarrow$  Gl. (1.32c), (1.31)) durchzuführen. Die (störfall)*auslösenden* Ereignisse können insbes. *System-, Auslegungs-, Bedien-, Verfahrens- oder Montagefehler* sowie *Umwelteinflüsse* sein oder sie basieren wie in den meisten Fällen auf der chemischen *Reaktionsfähigkeit* von Stoffen ( $\rightarrow$  Tabelle 10). Zur Gewährleistung von Gesundheit, Umweltschutz, (Anlagen- und Produkt-)Sicherheit, Qualität und Wirtschaftlichkeit ( $\rightarrow$  Abb. 17) beim Betrieb einer Anlage sind *Vorsorgemaßnahmen* wie *Verhinderungs-* und *Begrenzungsmaßnahmen* (sog. *Sicherheitsbarrieren*) bedeutsam, die grundsätzlich in *technischen* und/oder *organisatorischen* Maßnahmen sowie dem *Umfeld* bestehen ( $\rightarrow$  Tabelle 11). Das *Risiko* R [E/a] wird i.A. *nicht* quantitativ erfasst. Es wird als Produkt der Zufallsvariablen H und S definiert\*:

$$R = H S \quad (1.31)$$

- H [1/a] : zu erwartende *Eintrittshäufigkeit* (Frequenz) eines (Schadens) Ereignisses, d.h. Anzahl eines Schadensereignisses (z.B. *Austritt* eines Stoffes mit *gefährlichen* Eigenschaften ( $\rightarrow$  Tabelle 12), *Explosion, Brand* oder Ermüdungsversagen) pro Zeiteinheit (meist Jahr),
- S [E] : zu erwartendes *Schadensausmaß* (Schadensumfang) bzw. Severity (bei Eintritt des Ereignisses), z.B. Sachschaden ( $E \equiv \text{€}$ ), Anzahl von Toten ( $E \equiv \text{Tote}$ ) bzw. von Verletzten ( $E \equiv \text{Verletzte}$ ).

Der DECHEMA/GVC-Arbeitsausschuss „Risiko, Schadensanalyse, Zuverlässigkeit“ hat das neue Matrixverfahren METRIK zur *Risikoklassifizierung* verfahrenstechnischer Anlagen erarbeitet. Das Risiko R in Gl. (1.31) lässt sich bei detaillierter Betrachtung wie folgt aufgliedern:

$$R = H G_f \quad (1.32a)$$

mit der *Häufigkeit* H entsprechend der Beziehung:

$$H \equiv h \psi \quad (1.32b)$$

- h [1/a] : Eintrittshäufigkeit von (störfallauslösenden) Ereignissen ( $\rightarrow$  Tabelle 10),  
 $\psi \leq 1 [-]$  : Wahrscheinlichkeit für das Versagen der *Verhinderungsmaßnahmen* ( $\rightarrow$  Tabelle 11)

und dem *Gefährdungspotential*  $G_f \equiv S$  entsprechend der Beziehung:

$$G_f \equiv G \Phi \quad (1.32c)$$

- G [E] : *Gefahrenpotential* ( $\rightarrow$  Tabelle 10 und Gl. (1.32d)),  
 $0 \leq \Phi \leq 1 [-]$  : Wahrscheinlichkeit für das Versagen der störfallbegrenzenden Maßnahmen ( $\rightarrow$  Tabelle 11),  
 $G_f$  [E] : *Gefährdungspotential*.

\* Diese Definition impliziert, dass die Verteilungen für die Eintrittshäufigkeit des Störfalls und den Schadensumfang durch ihre Mittelwerte darstellbar sind. Dies ist jedoch i.A. nicht der Fall; deshalb ist es besser von den zwei Komponenten H und S des Risikos zu sprechen. Die Verknüpfung dieser Komponenten hängt dann von den jeweiligen Umständen ab.



Größtes vertretbares Risiko, Grenzkrisiko (Risikogrenzwert)  $R_v \approx 10^{-6} \frac{E}{a}$  ?

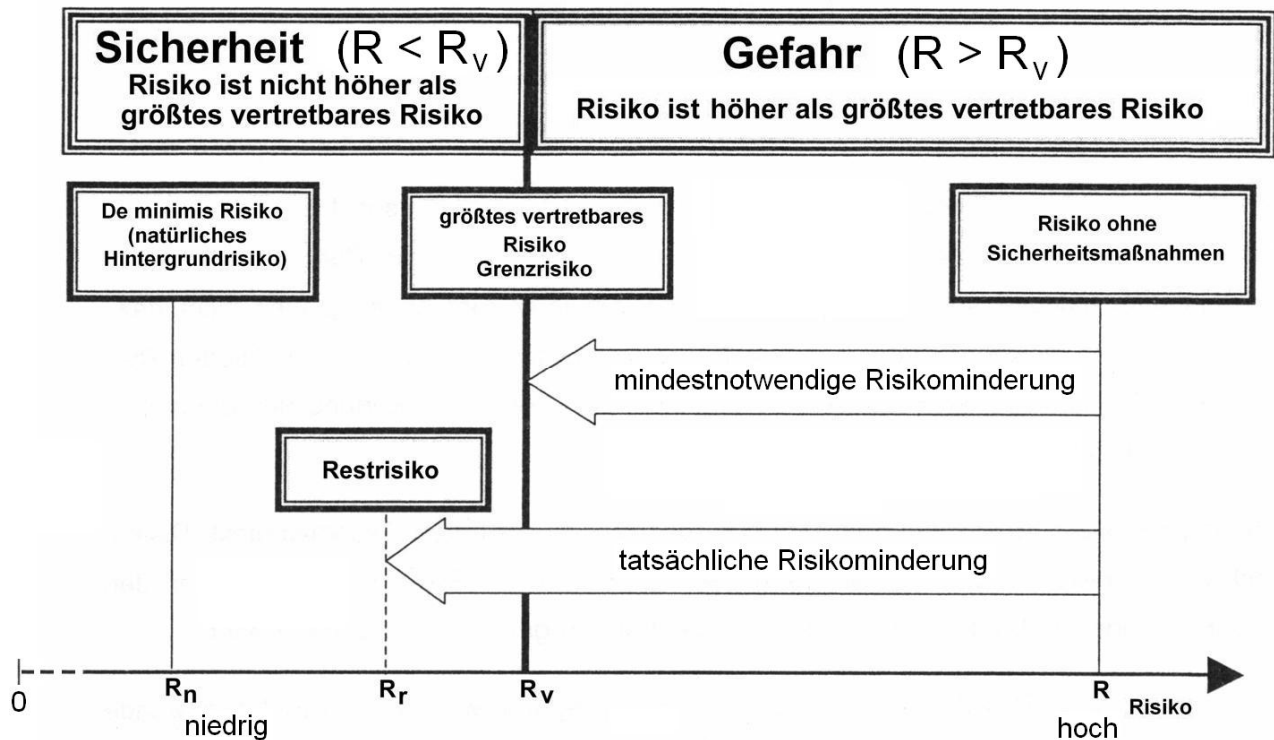
Restrisiko  $R_r \neq 0$  :  $R_r < R_v$

(Mittleres) Individualrisiko : erwartete Häufigkeit  $H [E/a]$  für eine Person zu Schaden zu kommen (Erwartungswert für Individualschäden); Isorisikolinien;  $E \equiv 1$  Toter bzw. 1 Verletzter

Gruppen bzw. (Bevölkerungs) Risiko : Produkt aus der Anzahl der exponierten Individuen in der Gruppe bzw. im Kollektiv und dem Individualrisiko

natürliches Hintergrundrisiko (minimales Risiko)  $R_n$

Gesundheitsrisiko

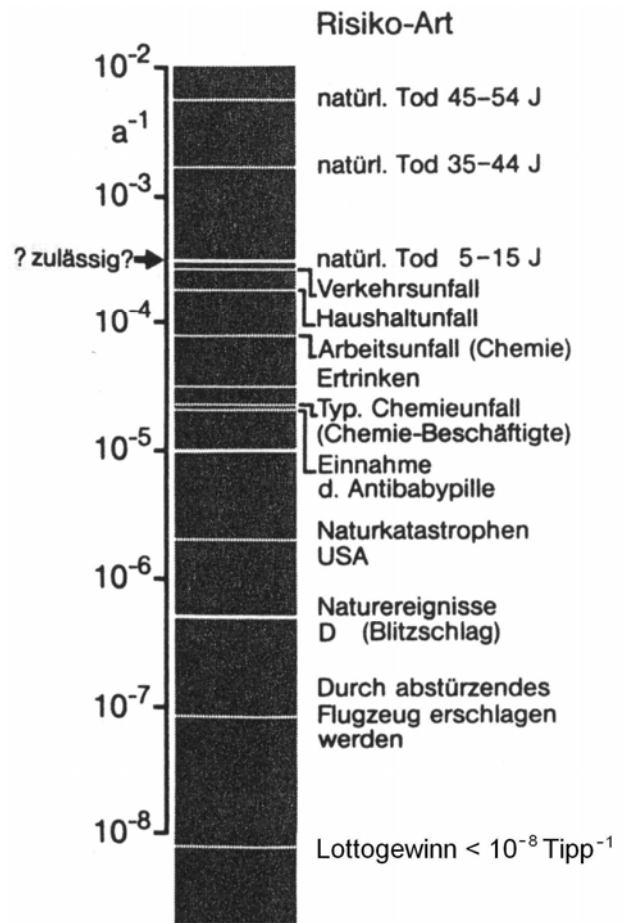


Risikoansatz zur Beurteilung der technischen Sicherheit

Sicherheit und Risiko



Individualrisiko



Individualrisiken und natürliche Hintergrundrisiken [E / a]

E ≡ 1 Toter

### Relative Bedeutung ausgewählter Risikofaktoren

Ursache	in % aller Todesfälle
Rauchen	14,9
Mangelnde Bewegung	11,7
Bluthochdruck	11,1
Alkohol	1,2
Luftverschmutzung	0,9
Sexualverhalten	0,8
Drogen	0,4

*(Quelle: Murray und Lopez, 1996)*

Tab.9 Ausgewählte Risikofaktoren

## Zur Abschätzung des **Risikos**

- von Stoffen und Zubereitungen mit gefährlichen Eigenschaften

Aktuell: Europäisches Chemikalienrecht

REACH-Verordnung (in Kraft getreten am 01.06.2007; 850 Seiten)

[**R**egistrierung, **E**valuierung, **A**utorisierung von **C**hemikalien]

*zwei Sichtweisen:*

Verminderung der *Risiken* für Leib und Leben

bzw.

Entwurf einer neuen EU-Chemikalienpolitik

Ein wichtiger Kernpunkt der REACH-Verordnung ist die Registrierung. Zukünftig dürfen Stoffe als solche, oder in Zubereitungen oder in Erzeugnissen, nur dann in Mengen von mehr als einer Tonne pro Jahr in der Europäischen Gemeinschaft hergestellt, in Verkehr gebracht oder aus Erzeugnissen freigesetzt werden, wenn sie nach den Bestimmungen der Verordnung registriert worden sind.

Im Rahmen der Registrierung ist ein Stoffdossier mit bestimmten Informationen (physikalisch-chemische Daten sowie toxikologische und ökotoxikologische Informationen) einzureichen.

Der Umfang der einzureichenden Informationen richtet sich nach der Menge, in welcher der Stoff pro Jahr vom jeweiligen Registranten produziert oder importiert wird. Das Dossier kann im Rahmen eines Bewertungsverfahrens von der zuständigen EU-Behörde evaluiert werden. Stoffe mit bestimmten gefährlichen Eigenschaften (krebserzeugend, erbgutverändernd, fortpflanzungsgefährdend oder persistent, bioakkumulierbar und toxisch) können einem Zulassungsverfahren unterworfen werden. Unternehmen, die solche Stoffe herstellen oder verwenden, können einen Zulassungsantrag stellen, über den die neue Chemikalienagentur mit Sitz in Helsinki und die Europäische Kommission in Brüssel entscheiden. Zulassungspflichtige Stoffe dürfen dann nur noch für die in einem solchen Zulassungsverfahren positiv beschiedenen Anwendungen eingesetzt werden.

Die Unternehmen haben unter REACH erweiterte Informationspflichten in der gesamten Lieferkette wahrzunehmen, insbesondere bezüglich Exposition und Risikomanagement. Hauptkommunikationsinstrument bleibt das Sicherheitsdatenblatt, das nun unter REACH geregelt wird.

## Wichtige Fristen für die Umsetzung der REACH-Verordnung

Termin	Inhalt
1. Juni 2008	<p>Ab jetzt können Stoffe vorregistriert werden.</p> <p>Non-Phase-in-Stoffe („Neustoffe“) müssen ab jetzt registriert werden.</p> <p>Registrierungsdossiers für Phase-in-Stoffe können jetzt auch schon an die Chemikalienagentur in Helsinki übermittelt werden. Um die Übergangsfristen für die Registrierung in Anspruch zu nehmen, ist eine Vorregistrierung notwendig.</p>
1. Dezember 2008	Die Frist zur Vorregistrierung ist abgelaufen.
1. Dezember 2010	<p>Jeder Hersteller und Importeur muss für seine „gefährlichen Stoffe“ die entsprechenden Einstufungen und Kennzeichnungen an die Agentur melden.</p> <p>Die Übergangsfrist für die Registrierung der CMR-Stoffe (Kategorie 1+2), R 50/53-Stoffe &gt; 100 t/a und Stoffe &gt; 1.000 t/a endet.</p>
1. Juni 2013	Die Übergangsfrist für die Registrierung der Stoffe mit 100-1.000 t/a endet.
1. Juni 2018	Die Übergangsfrist für die Registrierung der Stoffe mit 1-100 t/a läuft ab.

Der VCI schätzt, dass  $\approx 80\,000$  Registrierungsdossiers bei der neuen EU-Chemikalienagentur eingereicht werden.

Nach REACH müssen  $\approx 30\,000$  derzeit genutzte Stoffe in den nächsten 11 Jahren registriert werden.

### Kritik:

- hohe Kosten ( $\approx 2 \cdot 10^9$  €) und viel Expertenarbeit (z.B. toxikologische Tests, Ermittlung von Stoffdaten)
- 5 % - 10 % der Stoffe können infolge REACH in Europa nicht mehr produziert und vermarktet werden
- USA, China sehen Nachteile durch REACH, auch zukünftig den europäischen Markt bedienen zu können
- Nicht-Europäer machen das Geschäft, so dass noch mehr Unternehmen ins Ausland abwandern könnten

**Tab. 10** Gefahrenfelder, Reaktionsfähigkeit von Stoffen, welche die Eintrittshäufigkeit  $h$  erhöhen können und Gefahrenpotentiale  $G$  in verfahrenstechnischen Anlagen

Gefahrenfelder	Chem. Reaktionsfähigkeit und phys.-chem. Stoffeigenschaften	Gefahrenpotentiale $G$
<i>Brand</i> (s. auch andere Gefahrenfelder)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Zündbereitschaft</i></li> <li>– Flammpunkt</li> <li>– Zündtemperatur</li> <li>– Selbstentzündungstemperatur</li> <li>– Glimmtemperatur</li> <li>– Siedetemperatur</li> <li>– Sauerstoff-Grenzkonzentration</li> <li>– Zersetzungsreaktionen</li> <li>– Flammgeschwindigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Masse, Volumen</li> <li>• ausweitende Eigenschaften</li> <li>– Brennbarkeit</li> <li>– Bildung brennbarer Gase</li> <li>– Eintrag von Oxidationsmitteln</li> <li>– spezifische Verbrennungsenthalpie</li> <li>– Wärmestrahlung</li> <li>– Löschwasserkontamination</li> </ul>
<i>Explosion</i> (s. auch andere Gefahrenfelder)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Explosionsfähigkeit</i></li> <li>– Flammgeschwindigkeit</li> <li>– Detonationsneigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ausweitende Eigenschaften</li> <li>– Druckanstiegsgeschwindigkeit</li> <li>– spezifische Reaktionsenthalpie</li> <li>– maximaler Explosionsdruck</li> <li>– Turbulenzerhöhung</li> <li>– Anlaufbedingungen</li> </ul>
<i>Stoff-/Energiefreisetzung</i> (s. auch andere Gefahrenfelder)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Reaktivität</i></li> <li>– Reaktionsgeschwindigkeitskonstante</li> <li>– Aktivierungsenergie</li> <li>– Adiabatische Induktionszeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ausweitende Eigenschaften</li> <li>– adiabatische Temperaturerhöhung</li> <li>– Wärmeproduktionsgeschwindigkeit</li> <li>– Gasbildungsrate</li> <li>– spezifische Reaktionsenthalpie</li> <li>• toxischer Konzentrationsleitwert</li> <li>• Wassergefährdungswert</li> </ul>
<i>Sonstige für Brand, Explosion, Stoff-/Energiefreisetzung relevante Eigenschaften</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aggregatzustand</li> <li>• Verfestigungen, Anbackungen, Verstopfungen</li> <li>– Phasenwechsel</li> <li>– Polymerisation</li> <li>– Viskositätsänderungen</li> <li>• Änderung thermodynamischer Eigenschaften</li> <li>• Radioaktivität</li> <li>• Schlag-, Reibempfindlichkeit</li> <li>• Korrosion, Abrasion, Erosion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reaktionen</li> <li>– Exothermie</li> <li>– Volumenänderung</li> </ul>

Das Ziel der Sicherheitstechnik ist es, *Strategien* zur nachhaltigen *Wertschöpfung* und *Zukunftssicherung* zu entwickeln, wobei das Risiko im Verhältnis zum *Nutzen* als vertretbar erachtet wird. Hierzu tragen bei (→ Tabelle 11):

- die sog. *Vermeidungsmaßnahmen* durch → *inhärente* Sicherheit
  - Verminderung der Eintrittshäufigkeit  $h$
  - Verminderung des Gefahrenpotentials  $G$
- die sog. *Verhinderungsmaßnahmen* durch → *prozessinterne* Sicherheit
  - Verminderung der Versagenswahrscheinlichkeit  $\psi$
- die sog. *störfallbegrenzenden Maßnahmen* durch → *prozessexterne* Sicherheit
  - Verminderung der Versagenswahrscheinlichkeit  $\Phi$ .

Die *Ursachen* der Gefährdungspotentiale  $G_f$  insbes. im Hinblick auf die *thermischen* Verfahren, sind die potentiellen Gefahrenträger wie chemische Arbeitsstoffe (Substanzen, Stoffe, Zubereitungen), Werkstoffe und Hilfsstoffe.

Die *Reaktionsfähigkeit* der gehandhabten Stoffe und Zubereitungen sowie die Reaktionsenthalpien der miteinander reagierenden Stoffe führen dazu, dass Stoffe produziert werden zur Sicherung der *Ernährung* und Güterversorgung, Bereitstellung *nutzbarer* Energie, *Gesundheit* und *Wohlstand*. *Dieselben* Stoffeigenschaften sind jedoch auch untrennbar mit bestimmten Gefährdungspotentialen  $G_f$  gekoppelt. Die sog. *gefährlichen* Stoffeigenschaften, die mit der Größe  $e$  ( $\rightarrow$  Gl.(1.32d)) beschrieben werden, sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

## 6.4 Sicherheitstechnische Grundlagen (*Übersicht*)

Bei der Ermittlung und vollständigen Zusammenstellung der sicherheitstechnischen *Kenngößen* für *Stoffe* und *Stoffgemische* handelt es sich um:

- *explosionstechnische* Kenngößen, wie insbes. Flammpunkt; untere Explosionsgrenze UEG; *obere* Explosionsgrenze OEG; Zündtemperatur und Mindestzündenergie MZE,
- *physikalisch-chemische* und *apparative* Kenngößen von exothermen Reaktionen (*thermische Sicherheit* chemischer Prozesse), wie insbes. Reaktionsenthalpien  $\Delta\tilde{h}_R$  der gewünschten und möglicher unerwünschter Reaktionen, wie z.B. Parallel- oder Folgereaktionen bzw. Zersetzungsreaktionen; eine mögliche Gasentwicklung mit dem Volumen  $V$  und der Gasentwicklungsgeschwindigkeit  $dV/dt$ ; die Wärmeproduktionsgeschwindigkeit/Reaktionsleistung  $dQ_R/dt$ ; die gesamte Wärmeabfuhrleistung  $dQ_{Kü}/dt$  des Systems; sowie die Grenztemperatur  $T_{exo}$  für die thermische Stabilität der beteiligten Stoffe und Reaktionsgemische unter Verfahrensbedingungen,
- weiter von großer Bedeutung ist die Kenntnis der *Randbedingungen*, unter denen die Reaktionen ablaufen sollen. Hierzu zählen die *Reaktionsführung*, wie insbes. kontinuierlich/diskontinuierlich mit Batch/*Semibatch*-Betrieb (dosierungskontrolliert); die vorgelegten Komponenten/Dosiergeschwindigkeit; der Temperatur-Druckbereich; die Phasenverhältnisse bei der Reaktion sowie die *anlagentechnischen* Gegebenheiten, wie insbes. die Reaktorgröße, die technische Ausrüstung und die Wärmeabfuhrleistung der Apparate.

Im Bereich der Apparatefestigkeit sind insbes. die Festlegung geeigneter Werkstoffe sowie die Festigkeitsuntersuchungen und -analysen von Bedeutung.

Entsprechend Tabelle 10 existieren insbes. die folgenden *Hauptgefahrenfelder* :

- *Explosion* bzw. Explosionsphänomene: insbes. Druckwelle, Druckaufbau, thermische und mechanische Wirkung,
- *Brand* bzw. Verbrennungsprozesse : z.B. Emission von Wärmestrahlung, toxische Brandgase, Löschwasserkontamination,
- *Emission* bzw. Ausbreitung : insbes. Freisetzung von gefährlichen Stoffen und brennbaren Gaswolken.

**Tab. 11** Vermeidungs-, Verhinderungs- und Begrenzungsmaßnahmen gegen den Eintritt von Störungen und Störfällen in *verfahrenstechnischen* Anlagen

	<i>Technik</i>	<i>Organisation</i>	<i>Umfeld/Umwelt</i>
<i>Vermeidungs-, Verhinderungsmaßnahmen, welche die Eintrittshäufigkeit <math>h</math> und/oder die Versagenswahrscheinlichkeit <math>\psi</math> vermindern sollen</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verfahrenskonzept</li> <li>– Auswahl geeigneter Stoffe</li> <li>– Begrenzung der Menge gefährlicher Stoffe</li> <li>– Apparateauswahl</li> <li>– Batch/Conti-Prozess</li> <li>– Verfahrensparameter</li> <li>– Reaktionsabbruch (Quenchen) durch Zugabe geeigneter Stoffkomponenten</li> <li>• spezifikationsgerechte Anlagenteile</li> <li>– Werkstoffauswahl</li> <li>• Brand- und Explosionsschutz</li> <li>• Schutz-/Sicherheits-einrichtungen</li> <li>– Prozessleittechnik (PLT)</li> <li>– selbsttätige Begrenzung von Temperatur, Druck, Konzentration, Füllstand</li> <li>• Überwachung</li> <li>– Gasmelder</li> <li>– Rauchmelder</li> <li>– Brandmelder</li> <li>– Schnellabschaltung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anlagenkonzept</li> <li>– Planung</li> <li>– Bau</li> <li>– Inbetriebnahme</li> <li>– Änderung laufender Anlagen</li> <li>• Sicherheitsmanagement</li> <li>• Betrieb</li> <li>– qualifiziertes Personal</li> <li>– Aus- und Fortbildung</li> <li>– Führung</li> <li>– Organisation</li> <li>– Kommunikation</li> <li>• Instandhaltung</li> <li>– Inspektion</li> <li>– Wartung</li> <li>– Instandsetzung</li> <li>• Kennzeichnung von Gefahrenstellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schutz vor Naturgewalten</li> <li>– Erdbeben</li> <li>– Niederschlag</li> <li>– Hochwasser</li> <li>– Temperaturwechsel</li> <li>– Sonneneinstrahlung</li> <li>– Atmosphärischer Druck</li> <li>• Standortwahl</li> </ul>
<i>Begrenzungsmaßnahmen, welche die Versagenswahrscheinlichkeit <math>\Phi</math> vermindern und den Expositionspfad <math>E</math> im schadensmindernden Sinne beeinflussen sollen</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bautechnische Maßnahmen</li> <li>• Technische Schutzmaßnahmen</li> <li>– Auffangsysteme</li> <li>– Rückhaltesysteme</li> <li>– Wasservorhänge</li> <li>– Schutz tragender Gebäudeteile (Brandschutzisolation, Betonummantelung, Dämmschichtanstrich, Schutzwände)</li> <li>• Sicherheitsabstände</li> <li>• Bekämpfungskonzept</li> <li>– Löscheinrichtungen (Löschwasserversorgung)</li> <li>– Werksfeuerwehr</li> <li>– Sicherheitswege</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interner Gefahrenabwehrplan</li> <li>– Krisenmanagement (Alarm-/Gefahrenabwehrplan)</li> <li>– Technische Hilfeleistung</li> <li>– Werksärztlicher Versorgungsdienst</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Externer Gefahrenabwehrplan</li> <li>– öffentliche Einsatzkräfte</li> <li>– Rettungsdienst</li> </ul>

**Tab. 12** *Gefährliche* Eigenschaften (Gefährlichkeitsmerkmale) von Stoffen und Zubereitungen nach § 3 Chemikaliengesetz (ChemG), die nach Gl. (1.32d) mit der Größe e beschrieben werden

<ul style="list-style-type: none"> <li>• hochentzündlich</li> <li>• leichtentzündlich</li> <li>• entzündlich</li> <li>• brandfördernd</li> <li>• explosionsgefährlich</li> </ul>	<i>Physikalisch-chemische Eigenschaften</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr giftig</li> <li>• giftig</li> <li>• gesundheitsschädlich</li> <li>• ätzend</li> <li>• reizend</li> </ul>	<i>akut toxische Eigenschaften</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• sensibilisierend</li> <li>• krebserzeugend</li> <li>• erbgutverändernd</li> <li>• fortpflanzungsgefährdend</li> </ul>	<i>spezielle toxische Eigenschaften</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• umweltgefährlich</li> </ul>	<i>ökotoxische Eigenschaften</i>

Weiterhin ist zu prüfen, welche der im Abschnitt „Risiko und Sicherheit“ diskutierten Vermeidungs-, Verhinderungs- und Begrenzungsmaßnahmen zu ergreifen sind. Die sicherheitstechnischen Randbedingungen des Verfahrens einschließlich der Ver- und Entsorgung sind zusammenzustellen. Schließlich ist ein *Grundfließschema* mit Festlegung der grundsätzlichen Sicherheitsanforderungen zu entwickeln. Als Ergebnis soll festgestellt werden, dass im Grundsatz ein zufriedenstellendes *Sicherheitskonzept* realisierbar ist und folglich das *Projekt weiter verfolgt* werden kann.

### Sicherheitstechnische Planung

Hierzu sind die folgenden Gesichtspunkte zu beachten:

- Identifizierung (s. unten) der wesentlichen Gefahrenpotentiale durch *Vergleich* der *sicherheitstechnischen Kenngrößen*, Stoffmengen, Reaktionsführung und Verfahrensparameter mit den Merkmalen der vorgesehenen Apparate und ihren Auslegungsdaten (*Auslegungsgrenzen*),
  - Konkretisierung der Art und der Anforderung an die *technischen* und *organisatorischen Sicherheitsmaßnahmen* (Schutzkonzepte, wie z.B. Brand- und Explosionsschutz, → Tabelle 11) für die Anlage anhand der Ergebnisse einer systematischen Sicherheitsbetrachtung auf Basis des erreichten Planungsstandes.
  - Ermittlung der *Auswirkungen/Folgen* (consequences) der geplanten Anlage auf andere Anlagen, die mit dieser verbunden sind sowie auf die *Nachbarschaft* und *Allgemeinheit*,
  - Festlegen eines geeigneten Anlagenstandortes und der Aufstellungskonzeption.
- Methoden* zur Sicherheits- und Risikobeurteilung

Für die *systematische* Identifizierung der *Gefahrenpotentiale* G haben sich die folgenden qualitativen Verfahren/Methoden als geeignet erwiesen: PAAG- bzw. HAZOP-Verfahren; Checklisten-Verfahren; Hoechst-Methode; Vorläufige Gefahrenfeldanalyse (PHA); „Was wäre wenn“-Verfahren; PQM-Methode; Ausfalleffektanalyse (FMEA)

Zur *Abschätzung* und Beurteilung der Sicherheit bzw. des Risikos von stoffumwandelnden Industrieanlagen (z.B. Chemieanlagen) existieren die beiden folgenden Vorgehensweisen (approaches):

(1) *Konsequenzanalysen*/Auswirkungsbetrachtungen („consequence based“ approach oder „deterministic“ approach)

Mit *deterministischen* Berechnungsmethoden (deterministische Konsequenzmodelle) werden unter Berücksichtigung von *stochastischen* Anfangs- und Randbedingungen die *Gefahrenpotentiale* G und Gl. (1.32d) *quantitativ* abgeschätzt, ohne jedoch die Eintrittshäufigkeit h des Ereignisses (Unfall, Störfall) zu quantifizieren.

(2) *Quantitative Risikoanalyse* (QRA: Quantified Risk Assessment bzw. „risk based“ approach oder „probabilistic“ approach)

Mit *probabilistischen* Berechnungsmethoden kann eine *quantitative* Abschätzung der *Wahrscheinlichkeiten*  $\psi$ ,  $\Phi$  für das *Versagen* von Sicherheitsbarrieren sowie der Eintrittshäufigkeiten h von Schadensereignissen erfolgen.

Hierzu werden eine *Ereignisablaufanalyse* (EEA) und eine *Zuverlässigkeitsanalyse* herangezogen. Für die EEA liefert die Ausfalleffektanalyse (s. oben) nützliche Vorabinformationen über die Ausfallarten aller Baueinheiten eines Systems und deren Auswirkungen (Effekte) auf das System. Bei der Auswertung von Ereignisablaufdiagrammen im Rahmen der EEA werden *Zuverlässigkeiten*, d.h. *Überlebenswahrscheinlichkeiten* oder die komplementären *Versagenswahrscheinlichkeiten* von Anlagenkomponenten bzw. von deren Funktionen oder eines Funktionselementes, benötigt. Das *Ausfallverhalten* eines Funktionselementes lässt sich beschreiben durch *empirisch* zu ermittelnde Größen (sie werden – als Mittelwerte aus dem Verhalten mehrerer Anlagenkomponenten eines Typs – durch statistische Auswertung von Beobachtungen erhalten, die beim betrieblichen Einsatz in vergleichbaren technischen Anlagen gemacht werden) wie die *Ausfallrate*  $\lambda$  [Vielfache von  $10^{-6}$  1/a] oder die *Nichtverfügbarkeit*. Die *Ausfallrate* wird als die relative Abnahme des Bestandes an noch nicht ausgefallenen Funktionselementen definiert, die pro Zeiteinheit eintritt und ist i.A. zeitabhängig, d.h. es gilt  $\lambda(t)$ ; häufig lässt sich  $\lambda(t)$  durch eine „Badewannenkurve“ beschreiben. Die *Nichtverfügbarkeit* wird als Ausfallwahrscheinlichkeit pro Anforderung, d.h. als die Wahrscheinlichkeit definiert, bei der das Funktionselement bei Anforderung ausfällt. Auf der Basis solcher *gemessener* Daten, z.B. der Ausfallrate  $\lambda(t)$  sowie unter Berücksichtigung von Methoden zur Bewertung des menschlichen Fehlverhaltens lassen sich die Versagens- bzw. Überlebenswahrscheinlichkeiten zweckmäßig mit der *Fehlerbaumanalyse* abschätzen.

Die QRA gewinnt *zunehmend* an Bedeutung auch in den folgenden Bereichen; (1) Bewertung von Sicherheitsmanagementsystemen, (2) Ermittlung von Domino-Effekten, (3) Optimierung von Inspektionssystemen, (4) Ansiedlung von gefährlichen Industriebetrieben (Land Use Planning), (5) Festlegung von Gefahrgutwegen, (6) Optimierung von Investitionsentscheidungen für Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz. In den *Niederlanden* sowie den *angelsächsischen* Ländern wird QRA bereits in größerem Umfang angewandt. In *Deutschland* dagegen ist der Einsatz der QRA im Bereich verfahrenstechnischer Anlagen, (noch) umstritten.

### **Sicherheitstechnische Prüfungen im Rahmen der Beschaffung und Errichtung**

Hierzu sind die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- Endgültige Festlegung der Art und der Anforderung für die *technischen* Sicherheitsmaßnahmen anhand einer abschließenden, systematischen, sicherheitstechnischen *Prüfung* auf Basis der endgültigen Detailplanungsunterlagen,
- Formulierung der *Betriebsanweisungen*, insbes. für *organisatorische Schutzmaßnahmen* (→ Tabelle 11),
- *Auslegung* von Sicherheitseinrichtungen,
- *Dokumentation* der *Ergebnisse* der *sicherheitstechnischen Prüfung* als Darstellung des *ganzheitlichen* Sicherheitskonzeptes, z.B. in der *Sicherheitsanalyse* bzw. im sog. *Sicherheitsbericht* nach der novellierten *Störfall-Verordnung* (12. BImSchV) ,
- Sicherheitstechnische Prüfungen vor und bei der Inbetriebnahme der Anlage.

Schließlich sind im Bereich der *Anlagensicherheit* noch die folgenden Gesichtspunkte von großer Bedeutung: *Dokumentation* des vollständigen *Sicherheitskonzeptes* einer Anlage und *Zuständigkeiten*.

Die sicherheitstechnischen Überprüfungen sollten in einem *Team* durchgeführt werden, das den für ein Projekt erforderlichen *Sachverstand* zusammenführt und verfügt über : spezifische betriebliche Erfahrungen (*Verfahrensentwicklung, Produktion, Ingenieurtechnik, PLT-Einrichtung, Planung*); einen spezifischen betriebsübergreifenden, *sicherheitstechnischen Sachverstand* (*Anlagensicherheit, Arbeits-, Brand-, Explosions- und Umweltschutz*); Kenntnisse der verschiedenen *technischen Bestimmungen*.

## 6.5 Auswirkungen von Stoff- und Energiefreisetzungen



**Flixborough disaster, 1974**



Großfeuer im Tanklager Buncefield nahe London, 11.12.2005

## Tankfeuer in der Thai Oil Raffinerie in Bangkok, 1999

Ein Ventil am Tank stand beim Befüllen weit offen, auslaufendes Benzin wurde von einem startenden Fahrzeug entzündet, Feuer griff auf 4 weitere Tanks über

- 7 Tote, 13 Verletzte
- 23 850 m<sup>3</sup> Benzin verbrannt
- \$22.3 Millionen Schaden
- Anlage musste danach zeitweilig abgeschaltet werden

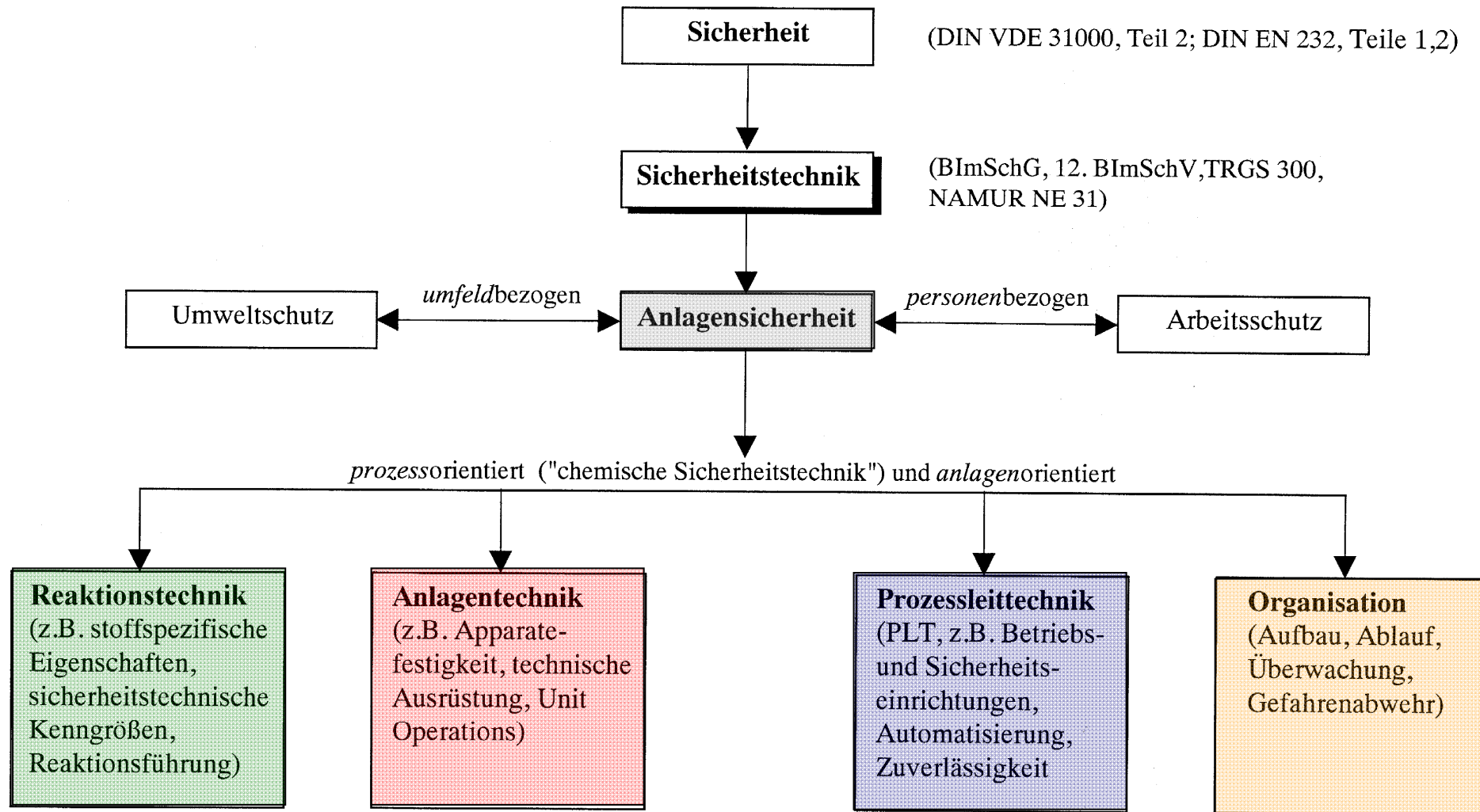




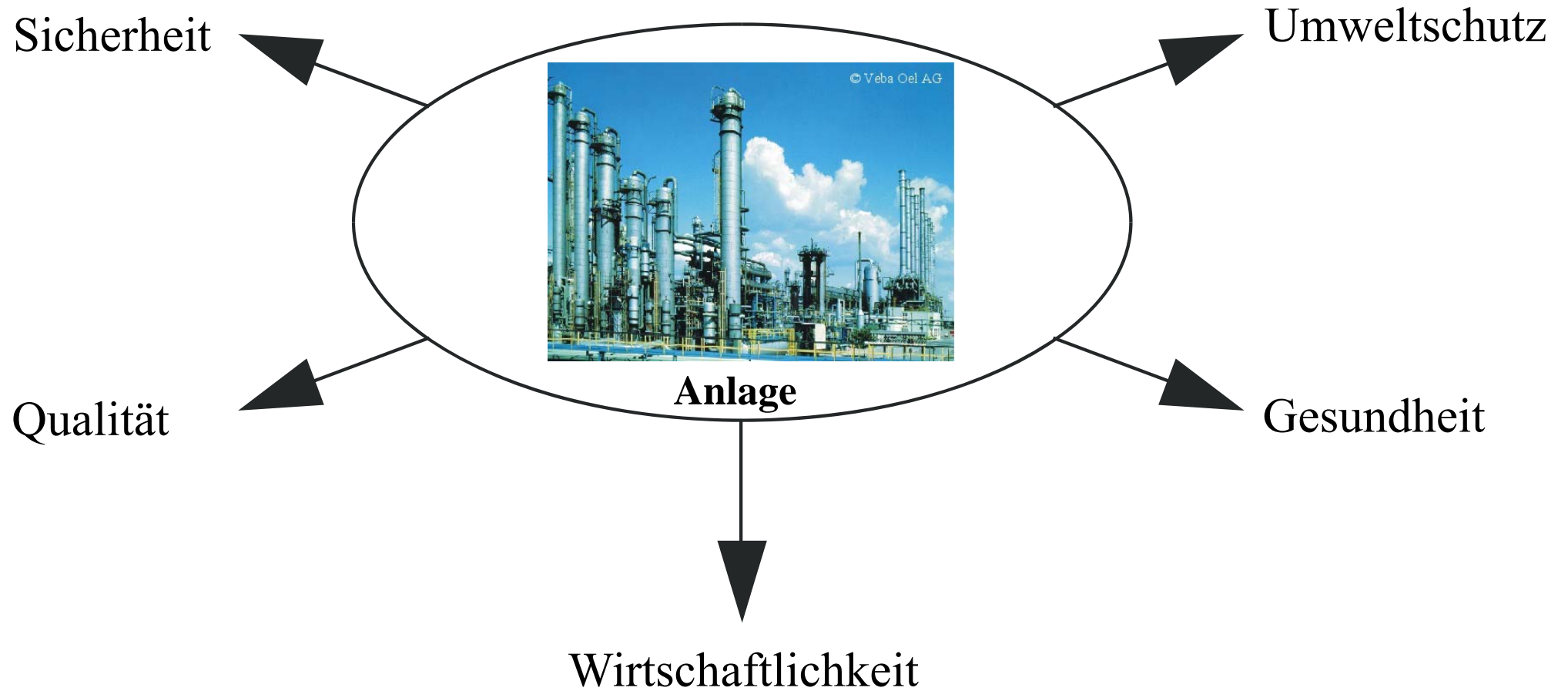
### **Tankfeuer in der Orion Raffinerie in Norco, USA (2001)**

Während eines tropischen Sturms sank das Dach des Tanks (**d = 82 m**, h = 9.8 m) teilweise ab, ein Blitz entzündete das Benzin

→ Brand wurde erfolgreich nach 65 min Einsatz mit 106 000 ℓ Schaum gelöscht



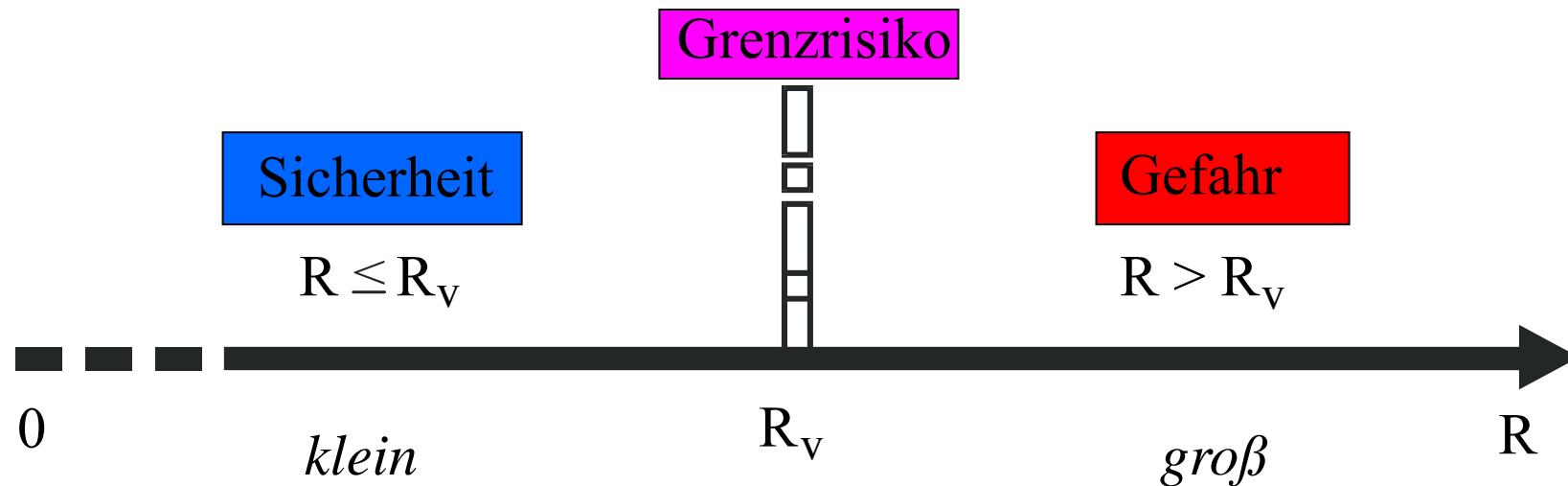
### Zur Abgrenzung der *Sicherheitstechnik*



Zur *Optimierung* verfahrenstechnischer Anlagen hinsichtlich *unterschiedlicher*,  
*heute jedoch gleichrangiger* Unternehmensziele

Die *Sicherheit* ist ein menschliches *Grundbedürfnis*.

Ein *Grenzkisiko* (besser: *Risikogrenzwert*, genauer: *Risikobereich*)  $R_v = 0$  ließe sich jedoch nur realisieren, wenn auf die entsprechende Produktion verzichtet würde:



*Risiko*  $R$  eines *technischen* Vorgangs oder Zustands, *vertretbares Risiko* (*Grenzkisiko*, *Risikogrenzwert*)  $R_v \neq 0$  sowie *Sicherheit* und *Gefahr*; nach *DIN VDE 31000 Teil 2*

$R_v$  *maximaler, noch vertretbarer (tolerierter) Risikogrenzwert*, der  
: abhängt von *sicherheitstechnischen Festlegungen*, wie z.B. staatlichen Maßnahmen, Stand der Technik, gesellschaftlicher Akzeptanz, Risiko/Nutzen-Abwägung. In manchen Ländern wird ein bestimmter *Risikogrenzwert*  $R_v$  gefordert.

Gefahrenfelder, Reaktionsfähigkeit von Stoffen, welche die <b>Eintrittshäufigkeit h</b> erhöhen können und <b>Gefahrenpotentiale G</b> in verfahrenstechnischen Anlagen		
<i>Gefahrenfelder</i>	Chem. <i>Reaktionsfähigkeit</i> und phys.-chem. Stoffeigenschaften	<i>Gefahrenpotentiale G</i>
<i>Brand</i> (s. auch andere Gefahrenfelder)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Zündbereitschaft</i></li> <li>- Flammpunkt</li> <li>- Zündtemperatur</li> <li>- Selbstentzündungstemperatur</li> <li>- Glimmtemperatur</li> <li>- Siedetemperatur</li> <li>- Sauerstoff-Grenzkonzentration</li> <li>- Zersetzungsreaktionen</li> <li>-Flammgeschwindigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Masse, Volumen</li> <li>• ausweitende Eigenschaften</li> <li>- Brennbarkeit</li> <li>- Bildung brennbarer Gase</li> <li>- Eintrag von Oxidationsmitteln</li> <li>- spezifische Verbrennungsenthalpie</li> <li>- Wärmestrahlung</li> </ul>
<i>Explosion</i> (s. auch andere Gefahrenfelder)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Explosionsfähigkeit</i></li> <li>- Flammgeschwindigkeit</li> <li>- Detonationsneigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ausweitende Eigenschaften</li> <li>- Druckanstiegsgeschwindigkeit</li> <li>- spezifische Reaktionsenthalpie</li> <li>- maximaler Explosionsdruck</li> <li>- Turbulenzerhöhung</li> <li>-Anlaufbedingungen</li> </ul>
<i>Stoff-/Energie-freisetzung</i> (s. auch andere Gefahrenfelder)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Reaktivität</i></li> <li>- Reaktionsgeschwindigkeitskonstante</li> <li>- Aktivierungsenergie</li> <li>- Adiabatische Induktionszeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ausweitende Eigenschaften</li> <li>- adiabatische Temperaturerhöhung</li> <li>- Wärmeproduktionsgeschwindigkeit</li> <li>- Gasbildungsrate</li> <li>- spezifische Reaktionsenthalpie</li> <li>• toxischer Konzentrationsleitwert</li> <li>• Wassergefährdungswert</li> </ul>
<i>Sonstige für Brand, Explosion, Stoff-/Energiefreisetzung relevante Eigenschaften</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aggregatzustand</li> <li>• Verfestigungen, Anbackungen, Verstopfungen</li> <li>- Phasenwechsel</li> <li>- Polymerisation</li> <li>- Viskositätsänderungen</li> <li>• Änderung thermodynamischer Eigenschaften</li> <li>• Radioaktivität</li> <li>• Schlag-, Reibempfindlichkeit</li> <li>• Korrosion, Abrasion, Erosion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reaktionen</li> <li>- Exothermie</li> <li>- Volumenänderung</li> </ul>

## Vermeidungs- und Verhinderungsmaßnahmen gegen den Eintritt von Störungen und Störfällen in verfahrenstechnischen Anlagen

	<i>Technik</i>	<i>Organisation</i>	<i>Umfeld/Umwelt</i>
<p>Vermeidungs-, Verhinderungsmaßnahmen, welche die <b>Eintrittshäufigkeit h</b> und/oder die <b>Versagenswahrscheinlichkeit <math>\psi</math></b> vermindern sollen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verfahrenskonzept                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auswahl geeigneter Stoffe</li> <li>- Begrenzung der Menge gefährlicher Stoffe</li> <li>- Apparateauswahl</li> <li>- Batch/Conti-Prozess</li> <li>- Verfahrensparameter</li> <li>- Reaktionsabbruch (Quenchen) durch Zugabe geeigneter Stoffkomponenten</li> </ul> </li> <li>• spezifikationsgerechte Anlagenteile                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Werkstoffauswahl</li> </ul> </li> <li>• Brand- und Explosionsschutz</li> <li>• Schutz-/Sicherheitseinrichtungen                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prozessleittechnik (PLT)</li> <li>- selbsttätige Begrenzung von Temperatur, Druck, Konzentration, Füllstand</li> </ul> </li> <li>• Überwachung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasmelder</li> <li>- Rauchmelder</li> <li>- Brandmelder</li> <li>- Schnellabschaltung</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anlagenkonzept                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Planung</li> <li>- Bau</li> <li>- Inbetriebnahme</li> <li>- Änderung laufender Anlagen</li> </ul> </li> <li>• Sicherheitsmanagement</li> <li>• Betrieb                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualifiziertes Personal</li> <li>- Aus- und Fortbildung</li> <li>- Führung</li> <li>- Organisation</li> <li>- Kommunikation</li> </ul> </li> <li>• Instandhaltung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inspektion</li> <li>- Wartung</li> <li>- Instandsetzung</li> </ul> </li> <li>• Kennzeichnung von Gefahrenstellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schutz vor Naturgewalten                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erdbeben</li> <li>- Niederschlag</li> <li>- Hochwasser</li> <li>- Temperaturwechsel</li> <li>- Sonneneinstrahlung</li> <li>- Atmosphärischer Druck</li> </ul> </li> <li>• Standortwahl</li> </ul>

<b>Begrenzungsmaßnahmen gegen den Eintritt von Störungen und Störfällen in verfahrenstechnischen Anlagen</b>			
	Technik	Organisation	Umfeld/Umwelt
<p><i>Begrenzungsmaßnahmen, welche die <b>Versagenswahrscheinlichkeit <math>\Phi</math></b> vermindern und den <b>Expositionspfad E</b> im schadensmindernden Sinne beeinflussen sollen</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bautechnische Maßnahmen</li> <li>• Technische <i>Schutzmaßnahmen</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auffangsysteme</li> <li>- Rückhaltesysteme</li> <li>- Wasservorhänge</li> <li>- Schutz tragender Gebäudeteile (Brandschutzisolierung, Betonummantelung, Dämmschichtanstrich, Schutzwände)</li> </ul> </li> <li>• Sicherheitsabstände</li> <li>• Bekämpfungskonzept                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Löscheinrichtungen (Löschwasserversorgung)</li> <li>- Werksfeuerwehr</li> <li>- Sicherheitswege</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interner Gefahrenabwehrplan                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Krisenmanagement (Alarm-/Gefahrenabwehrplan)</li> <li>- Technische Hilfeleistung</li> <li>- Werksärztlicher Versorgungsdienst</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Externer Gefahrenabwehrplan                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- öffentliche Einsatzkräfte</li> <li>- Rettungsdienst</li> </ul> </li> </ul>

**Gefährliche** Eigenschaften (Gefährlichkeitsmerkmale) von Stoffen und Zubereitungen nach § 3 Chemikaliengesetz (ChemG), die nach Gl.(1.32d) mit der **Größe e** beschrieben werden

<ul style="list-style-type: none"><li>• hochentzündlich</li><li>• leichtentzündlich</li><li>• entzündlich</li><li>• Brand fördernd</li><li>• explosionsgefährlich</li></ul>	<i>physikalisch-chemische Eigenschaften</i>
<ul style="list-style-type: none"><li>• sehr giftig</li><li>• giftig</li><li>• gesundheitsschädlich</li><li>• ätzend</li><li>• reizend</li></ul>	<i>akut toxische Eigenschaften</i>
<ul style="list-style-type: none"><li>• sensibilisierend</li><li>• Krebs erzeugend</li><li>• erbgutverändernd</li><li>• fortpflanzungsgefährdend</li></ul>	<i>spezielle toxische Eigenschaften</i>
<ul style="list-style-type: none"><li>• umweltgefährlich</li></ul>	<i>ökotoxische Eigenschaften</i>

## Risikoansatz zur Beurteilung der technischen Sicherheit

### **Risikoformel:**

$$R = H S$$

- R [E/a] : Risiko, Risikozahl  
 H [1/a] : zu erwartende (Eintritts)*Häufigkeit*, d.h. Anzahl pro Jahr eines (Schaden-) Ereignisses z.B. Brand, Explosion, Stofffreisetzung  
 S [E] : Schadensausmaß, Konsequenz, z.B. Sachschäden (E ≡ €), Anzahl von Toten ( E ≡ Tote)

$$H \equiv h \psi$$

- h [1/a] : Eintritt*shäufigkeit* von (Störfall auslösenden) Ereignissen  
 $\psi \leq 1$  : *Wahrscheinlichkeit* für das Versagen der Verhinderungsmaßnahmen

$$S \equiv f(M, e, EPf) \Phi \equiv G_f$$

- G [E] : *Gefahrenpotential*  
 G<sub>f</sub> [E] : *Gefährdungspotential*  
 $\Phi \leq 1$  : Wahrscheinlichkeit für das Versagen Störfall *begrenzender* Maßnahmen  
 M [E<sub>1</sub>] : freigesetzte *Masse* [kg], freigesetzte *Energie* [J] oder freigesetztes *Volumen* [m<sup>3</sup>]  
 e [E<sub>2</sub>] : *gefährliche* Eigenschaft des Stoffes; Einheit E<sub>2</sub> ist abhängig von Art der Funktion f  
 EPf [-] : Expositionspfad (Einwirkung) vom Freisetzungsort zum Schutzgut (Mensch, Umwelt, Sachwerte)

*Technische Zuverlässigkeit von Chemie - Anlagen*

ist abhängig von:

- Anzahl N und Art der Verfahrensschritte
- Korrosion, Erosion, Abrieb, Verschmutzung
- Maschinen
- Mess- und Regeleinrichtungen
- Mehrstrangigkeit von Anlagen

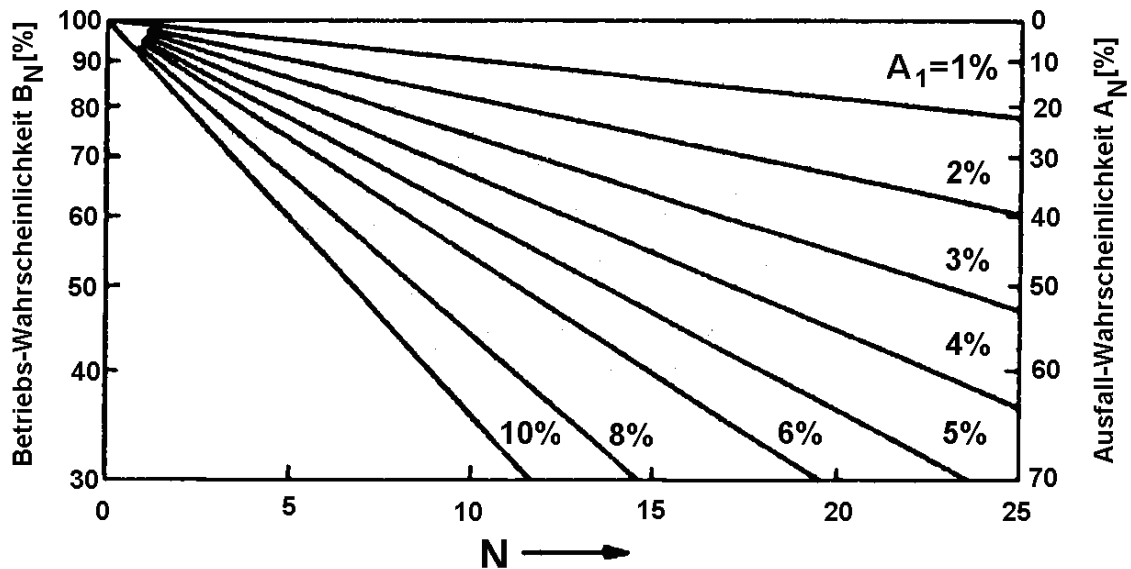


Abb. 18 Betriebs- und Ausfallwahrscheinlichkeiten hintereinander geschalteter Verfahrensschritte in Abhängigkeit von der Anzahl N der Verfahrensschritte und der Ausfallwahrscheinlichkeit  $A_1$  der Einzelschritte

$$A_q + B_q = 1$$

wenn  $A_1 = A_2 = \dots = \text{const.} \equiv A_1$

$$A_N + B_N = 1$$

(d. h. alle Ausfallwahrscheinlichkeiten  $A_q$  sind gleich)

$$B_N = \prod_{q=1}^N B_i \approx B_1^N = (1 - A_1)^N$$

$$A_N = 1 - B_N = 1 - (1 - A_1)^N$$

N : Anzahl der Verfahrensschritte

$A_N, A_q$  : Ausfallwahrscheinlichkeit der *Gesamtanlage* bzw. des Verfahrensschrittes q

$A_1$  : Ausfallwahrscheinlichkeit eines bestimmten Verfahrensschrittes

$B_N, B_q$  : Betriebswahrscheinlichkeit der *Gesamtanlage* N bzw. des Verfahrensschrittes q