

Formelsammlung Industrial Engineering

Kennzahlen und Formeln in der praktischen Anwendung

Bearbeitet von
Rainer Bokranz, Kurt Landau

1. Auflage 2014. Buch. IX, 123 S. Kartoniert
ISBN 978 3 7910 3422 5
Format (B x L): 17 x 24 cm
Gewicht: 269 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Technik Allgemein > Technik: Allgemeines](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

The logo for beck-shop.de features the text 'beck-shop.de' in a bold, red, sans-serif font. Above the 'i' in 'shop' are three red dots of increasing size. Below the main text, the words 'DIE FACHBUCHHANDLUNG' are written in a smaller, red, all-caps, sans-serif font.

beck-shop.de
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](#) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

SCHÄFFER
POESCHEL

1 Grundsachverhalte

1.1 Produktivität

1.1.1 Betriebswirtschaftliche Sicht

Handbuch: Band 1, S. 8 f.

In der Betriebswirtschaftslehre wird, dem klassischen Ansatz von Gutenberg folgend, die *(Durchschnitts-) Produktivität* als Ergiebigkeit des Einsatzes der drei Produktionsfaktoren (Einsatzfaktoren) menschliche Arbeit, Betriebsmittel und Material bestimmt. Wir haben es in Gutenbergs Modell zwar mit drei Einsatzfaktoren zu tun, aber das bedeutet nicht, dass man die zwingend auch alle verwenden muss. Verbreitet sind die Bezüge zu den beiden Ressourcen menschliche Arbeit und Betriebsmittel, wie sie auch im Arbeitssystem-Modell verwendet werden.

Ressourcenpreise – und damit Kosten – bleiben ausgeklammert, weil es nur um die »Ergiebigkeit« der Ressourcen geht, also um eine Mengenrelation. Der Produktionsfaktor »Material« kann, muss aber nicht einbezogen werden, wenn das zu keinen sinnvollen Schlüssen führt. Das ist bei Aufgabenstellungen im Industrial Engineering oft der Fall. Die Produktionsbedingungen und das Know-how werden ebenso wenig berücksichtigt wie die erzeugte Qualität, z. B. in Form notwendiger Nacharbeit.

$$P = \frac{m}{m_R}$$

P = (Durchschnitts-) Produktivität

m = Arbeitsergebnismenge

m_R = Ressourceneinsatzmenge

Sachverhalt

Formel

In einem Automobilwerk 1 mit 6.000 Beschäftigten (Besch) werden werktäglich 1.200 Fahrzeuge (Fz), in einem anderen Werk 2 mit 4.700 Beschäftigten 1.100 Fahrzeuge hergestellt.

$$P_1 = 1.200 \text{ Fz} / 6.000 \text{ Besch} = 0,200 \text{ Fz pro Besch}$$

$$P_2 = 1.100 \text{ Fz} / 4.700 \text{ Besch} = 0,234 \text{ Fz pro Besch}$$

Danach ist das zweitgenannte produktiver als das erstgenannte Werk. Das Beispiel zeigt jedoch, dass so hochaggregierte Kennzahlen nur begrenzten praktischen Nutzen haben, weil dabei eine Reihe wichtiger Produktionsbedingungen unbeachtet bleiben, z. B. Variantenzahlen, Fertigungsumfang und Fertigungstiefe. Diese einfache Produktivitätskennzahl dient deshalb nur zum Gewinnen erster Indikationen.

Handbuch: Teil 1, S. 23 f.

Im Regelfall wird mit Durchschnittsproduktivitäten argumentiert, wie beschrieben. Wenn es darum geht, Veränderungseffekte aufgrund von Veränderungsmaßnahmen zu beschreiben, ist es zweckmäßiger, *Grenzproduktivitäten* zu verwenden.

$$P_G = \frac{m_2 - m_1}{m_{R2} - m_{R1}}$$

P_G = Grenzproduktivität

m_1 = Arbeitsergebnismenge vor der Veränderungsmaßnahme

m_2 = Arbeitsergebnismenge nach der Veränderungsmaßnahme

m_{R1} = Ressourceneinsatzmenge vor der Veränderungsmaßnahme

m_{R2} = Ressourceneinsatzmenge nach der Veränderungsmaßnahme

Beispiel

Sachverhalt

Formel

Beispiel Angesichts der vorstehend angeführten Daten wurde im Werk 1 ein Verbesserungsprojekt geplant, bei dem man den Output auf werktäglich 1.280 Fahrzeuge steigern und die Beschäftigtenzahl um 500 Personen reduzieren will.

$$P_G = \frac{1280 \text{ Fz} - 1.200 \text{ Fz}}{6.000 \text{ Besch} - 5.500 \text{ Besch}} = 0,16 \text{ Fz}$$

Der Veränderungseffekt prägt sich in der Grenzproduktivität aus. Bei diesem Beispiel darin, dass sich die Produktivität beim 1.280sten Fahrzeug, gegenüber der Ist-Produktivität, um 0,16 Fahrzeuge pro Beschäftigtem erhöht. Die Durchschnittsproduktivität beträgt dann 0,327 Fahrzeuge pro Beschäftigtem – eine Steigerung von 16 %. So lange sie eine positive Grenzproduktivität induziert, ist eine Maßnahme produktivitätswirksam.

1.1.2 Technisch-organisatorische Sicht

Sachverhalt Handbuch: Band 1, S. 26 f.

Die *Arbeitssystemproduktivität OEE* (Over all Equipment Effectiveness) ist, neben dem Zeitgrad, die verbreitetste Rechenvorschrift zur Produktivität. Over all soll heißen, unter Einbeziehung aller relevanten, produktivitätsbeschreibenden Aspekte. Das sind bei diesem Ansatz die Verfügbarkeit, die Effizienz und die Qualität. Die theoretisch maximale Produktivität (= 100%-OEE) wird um Verluste (Wertschöpfungsausfälle) bei diesen drei Aspekten korrigiert und dann die (Ist-) Arbeitssystemproduktivität OEE ausgewiesen.

Die ausgewiesenen Daten sind zu hinterfragen. Beispielsweise sinkt mit steigenden Losgrößen der Rüstzeitanteil und die OEE steigt. Aber das wäre kein »Verdienst« der Produktion. Werden Sollzeiten in den Arbeitsplänen im Rahmen des Änderungsdienstes reduziert, führt das c. p. über eine gestiegene Effizienz zu einer höheren OEE, obwohl gar keine Outputwirkung vorliegt.

Formel $OEE = VF \cdot EF \cdot QF$

OEE = Arbeitssystemproduktivität

VF = Verfügbarkeitsfaktor = $V / 100\text{-}\% \text{-} OEE$

V = Verfügbarkeit [= $100\text{-}\% \text{-} OEE - (\text{Rüst-, Nacharbeits-, Störungsstunden})$]

EF = Effizienzfaktor = $1 - E/V$

E = Effizienz = $\text{Ist-Arbeitszeit} - \text{Soll-Arbeitszeit}$, auch als Zeitgrad bezeichnet

QF = $1 / (1 + \text{Ausschussfaktor})$

Beispiel	<i>100%-Kapazität in Std.</i>	352
	Rüstzeiten	29
	Störungsunterbrechungen	28
	Nacharbeit	11
	Verfügbarkeitsverlust	68
	Verfügbarkeit	284
	<i>Verfügbarkeitsfaktor = $284 / 352 =$</i>	<i>0,81</i>
	Sollstunden lt. Arbeitsplan	266
	erfasste Iststunden	282
	Effizienzverlust	16
	Effizienzbereinigung	268

$$\begin{aligned}
 \text{Effizienzfaktor} &= 1 - (16/284) = 0,94 \\
 \text{Gutteilestunden} &280 \\
 \text{Qualitätsverlust (1,5 \% Ausschuss)} &4 \\
 \text{Qualitätsbereinigung} &264 \\
 \text{Qualitätsfaktor} &= 1 - (4/284) = 0,99 \\
 \text{Ges. Produktivitätsverlust} &88 \\
 \text{OEE} &= 0,81 \cdot 0,94 \cdot 0,99 = 0,75
 \end{aligned}$$

In der Verfügbarkeit liegt bei diesem Beispiel der stärkste Verbesserungshebel. Der Effizienzverlust könnte ein Zeichen dafür sein, dass die Zeitwirtschaft verbesserungsbedürftig ist. Der Qualitätsverlust hat auf die Produktivität eine nur geringe Auswirkung. Da hier jedoch Kostenbetrachtungen ausgeklammert sind, kann sich das aus wirtschaftlicher Sicht anders darstellen.

1.2 Betriebswirtschaftliche Erfolgskenngrößen

1.2.1 Liquidität

Handbuch: Band 1, S. 13 f.

Als *Cashflow*, aus eigenem Leistungsvermögen erwirtschaftete Mittel, wird der Zufluss an Liquidität bezeichnet. Der Cashflow (CF) ist ein Maßstab für die Liquidität und Ertragskraft.

Es gibt verschiedene Varianten des CF, je nach darin berücksichtigten Aktivitäten, z. B. CF aus Investitionstätigkeit oder aus Finanzierungstätigkeit oder Free CF.

$$CF_B = G_{nSt} + A_{nA} - E_{ne}$$

CF_B = Brutto-Cashflow

G_{nSt} = Gewinn nach Steuern

A_{nA} = nicht zu Ausgaben führende, nicht zahlungswirksame Aufwandspositionen wie: Abschreibungen, Rückstellungszunahme, Verluste aus Anlagenvermögensabgängen, Abnahme des Umlaufvermögens aus L+L (= Lieferungen und Leistungen).

E_{ne} = nicht zu Einnahmen führende, nicht zahlungswirksame Erträge, wie: Zuschreibungen, Rückstellungsabnahmen, Gewinne aus Anlagevermögensabgängen, Zunahme des Umlaufvermögens aus L+L.

Es liegen folgende Daten vor:

	2012 (in Mio. €)		2013 (in Mio. €)	
Position	A_{na}	E_{na}	A_{na}	E_{na}
Abschreibungen	520		490	
Zuschreibungen		425		325
Rückstellungen	155		175	
Forderungen		65		15
Vorräte	20			5
Summe	695	490	665	345
Gewinn n. St.	705		725	

$$CF_{B2012} = 705 \text{ Mio. €} + 695 \text{ Mio. €} - 490 \text{ Mio. €} = 910 \text{ Mio. €}$$

$$CF_{B2013} = 725 \text{ Mio. €} + 665 \text{ Mio. €} - 345 \text{ Mio. €} = 1.045 \text{ Mio. €}$$

Sachverhalt

Formel

Beispiel

Das Unternehmen vermochte im Geschäftsjahr 2013 für finanzielle Engagements (darin sind z. B. Ausschüttungen an Anteilseigner eingeschlossen) 910 Mio. € zu generieren. Im Geschäftsjahr 2013 steigerte es seinen CF in erster Linie nicht durch die Erhöhung des Jahresüberschusses, sondern durch Investitionsvermeidung sowie durch Reduzierung seines Umlaufvermögens, also Sparmaßnahmen i. e. S.

Sachverhalt Handbuch: Teil 1, S. 13 f.

Als *Working Capital* (WC) wird die Differenz aus Umlaufvermögen und kurzfristigen Verbindlichkeiten bezeichnet. Je größer diese Differenz ist, desto höher ist der Anteil des Umlaufvermögens, das mit langfristig zur Verfügung stehendem Kapital zu finanzieren ist.

Ein negatives WC bedeutet, dass ein kurzfristig zu finanzierendes Umlaufvermögen nicht der Grund für die kurzfristigen Verbindlichkeiten ist. Vielmehr liegt der Fall einer bilanzstrukturellen »Todsünde« vor: Anlagevermögen wird kurzfristig finanziert, und Liquiditätsengpässe sind deshalb nicht auszuschließen.

Je größer das WC ist, desto gesicherter sind die Liquidität und damit die finanzielle Beweglichkeit des Unternehmens. Aber das wird mit hohen Finanzierungskosten erkaufte und ist deshalb nicht erstrebenswert.

Die verbreitetsten Ansätze zur Reduzierung des WC sind Verkürzungen bei den debitorischen sowie Verlängerungen bei den kreditorischen Forderungen, sowie die Reduzierung der Lagerbestände und Durchlaufzeiten.

Formeln

$$WC = UV - Verb_{kurz}$$

$$WC_1 = (WC / U) \cdot 100\%$$

WC = Working Capital

WC₁ = Working Capital – Intensität

U = Umsatz

UV = Umlaufvermögen

Verb_{kurz} = kurzfristige (nicht verzinsliche) Verbindlichkeiten

Beispiel

Aktiva in Mio. €			Passiva in Mio €		
Anlagenvermögen		1.200	600	Eigenkapital	
Umlaufvermögen	Vorräte	400	1.000	Darlehen	Fremdkapital
	Forderungen aus L + L	250	400	Verbindlichkeiten aus L + L	
	Bank	150			
		2.000	2.000		

Umsatz: 2.900 Mio. €

$$WC = (400 \text{ Mio. €} + 250 \text{ Mio. €} + 150 \text{ Mio. €}) - 400 \text{ Mio. €} = 400 \text{ Mio. €}$$

$$WC_1 = (400 \text{ Mio. €} / 2.900 \text{ Mio. €}) \cdot 100\% = 13,8\%$$

Das Umlaufvermögen in Höhe von 800 Mio. € ist doppelt so hoch wie die kurzfristigen Verbindlichkeiten. Es wird also relativ schnell in liquide Mittel umgewandelt: Ein Bankguthaben steht zur Verfügung. Damit wird ausgeglichen, dass die Forderungen geringer als die Verbindlichkeiten sind.

Das WC wird durch ein hohes Darlehen finanziert, ist also »teuer erkaufte«. Deshalb könnte man versuchen, die Vorratshaltung zu verringern, um die Zinslast zu senken. Würde man sie z. B. halbieren, würde c. p. die Darlehensverbindlichkeit um 200 Mio. € sinken und damit 20 % der Zinsbelastung.

Das Unternehmen hat immerhin 1.600 Mio. € (Anlagevermögen und Working Capital) zu finanzieren.

Der WC_1 ist (wie die meisten Kennzahlen) branchenabhängig zu betrachten. Je 1 € Umsatz ist hier ein WC von ca. 14 Ct. gebunden. Ob das als gut, befriedigend oder inakzeptabel anzusehen ist, ist also nur im Einzelfall zu beantworten.

1.2.2 Kapitalrentabilität

Handbuch: Band 1, S. 14.

Es werden drei Kenngrößen unterschieden:

1. Der *ROI* (Return on Investment = Gesamtkapitalrentabilität) ist ein Maßstab für die Profitabilität eines Unternehmens. Informativ ist der ROI relativ zu dem von Wettbewerbern.
2. Der *ROE* (Return on Equity = Eigenkapitalrentabilität) wird dagegen verwendet, um die Profitabilität der eingesetzten Eigenmittel, des eigenen Investments auf den Prüfstand zu stellen.
3. Beim *ROCE* (Return on Capital Employment = Rentabilität des arbeitenden Kapitals) werden im Gegensatz zum ROI im Zähler (ggf. angefallene) a. o. Ergebnisse und im Nenner ein geringeres Gesamtkapital angesetzt, weil es um nicht verzinsliche Anteile bereinigt wird.

Alle drei Formeln werden nicht einheitlich angewandt. Manche Anwender des ROI und des ROE setzen z. B. im Zähler auch das Ergebnis nach Steuern ein, weisen also Nachsteuerrenditen aus.

Die drei Kenngrößen werden berechnet nach:

$$ROI = \frac{G}{GK} \cdot 100 \%$$

$$ROE = \frac{G}{EK} \cdot 100 \%$$

$$ROCE = \frac{G_{\text{korr}}}{EK_v + FK_v} \cdot 100 \%$$

ROI = Verzinsung des Gesamtkapitals in %

ROE = Verzinsung des Eigenkapitals in %

ROCE = Verzinsung des arbeitenden Kapitals in %

G = Gewinn vor Steuern in € aus gewöhnlicher Geschäftstätigkeit (= EBIT)

G_{korr} = Gewinn in €, zuzüglich außerordentlicher Ergebnisse

EK = Eigenkapital in €

EK_v = verzinsliches Eigenkapital in €

FK = Fremdkapital in €

FK_v = verzinsliches Fremdkapital in €

GK = Gesamtkapital in €

Sachverhalt

Formeln

Beispiel Folgender stark vereinfachten Bilanz sind die Daten zur Bestimmung dieser drei Kenngrößen zu entnehmen.

Aktiva in Mio €		Passiva in Mio €		
Anlagevermögen	25	8	Eigenkapital, verzinslich	
Umlaufvermögen	23	25	Langfristig	Fremdkapital
		5	Kurzfristig, verzinslich	
		8	Kurzfristig, unverzinslich	
		2	Ergebnis v. Steuern	
	48	48		

$$ROI = \frac{2}{46} \cdot 100 \% = 4,3 \%$$

$$ROE = \frac{2}{8} \cdot 100 \% = 25,0 \%$$

$$ROCE = \frac{2}{8 + 25 + 5} \cdot 100 \% = 5,3 \%$$

Diesen ROI wird man in Deutschland in vielen Branchen derzeit als unattraktiv ansehen.

Anders der ROE, denn mit einem Eigenkapitalanteil von ca. 17 % wird eine Verzinsung erzielt, zu der es nicht viele seriöse Anlagealternativen gibt.

In Niedrigzinszeiten ist der ROCE von 5,3 % ein Anreiz, Umschuldungsmöglichkeiten zu prüfen, denn in Höhe der Differenz von FK-Zinsatz und ROCE würde das Ergebnis verbessert.

1.2.3 Ertragsrentabilität

Sachverhalt Handbuch: Band 1, S. 14 f.

Folgende drei Kenngrößen sind verbreitet:

1. Der *EBITA* (Earnings before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization = Gewinn vor Zinsen, Steuern, Abschreibungen auf Sachanlagen und immaterielle Vermögensgegenstände) wird primär zur Beurteilung der aktuellen, kurzfristigen, operativen Leistungsfähigkeit (also vor Investments) verwendet, auch zur Beurteilung der »Überlebensfähigkeit« in Sanierungssituationen.
2. Der *EBIT* (Earnings before Interest and Taxes = Gewinn vor Zinsen und Steuern) dient primär der Beurteilung der Gewinnentwicklung über den Zeitverlauf, und dabei sind schwankende Steuersätze, Zinsaufwendungen oder sonstige außerordentliche Faktoren ausgeschaltet.
3. Der *EBT* (Earning before Taxes = Gewinn vor Steuern) schließt gegenüber dem EBIT die Finanzierungsbedingungen ein, was nicht immer zu nützlicheren Informationen führt, denn Finanzierungsbedingungen sagen zwar etwas über die zugemessene Bonität, aber nichts über das operative Leistungsvermögen eines Unternehmens aus.

Formeln

Es sind: EBT = Ergebnis vor Steuern
 EBIT = EBT ± Finanzierungsaufwand und -ertrag
 EBITDA = EBIT – Abschreibungen

Beispiel

Umsatzerlöse (Gesamtleistung)	125 Mio. €
Materialaufwand	23 Mio. €
Personalaufwand	63 Mio. €
Sonstiger betrieblicher Aufwand	10 Mio. €
Abschreibungen	8 Mio. €
Finanzierungsaufwand	4 Mio. €

$$\text{EBT} = 125 \text{ Mio. €} - 108 \text{ Mio. €} = 17 \text{ Mio. €}$$

$$\text{EBIT} = 17 \text{ Mio. €} + 4 \text{ Mio. €} = 21 \text{ Mio. €}$$

$$\text{EBITDA} = 21 \text{ Mio. €} + 8 \text{ Mio. €} = 29 \text{ Mio. €}$$

Die EBITDA-Marge, also der Umsatzbezug, beträgt ca. 23 %, was ein Hinweis darauf ist, dass man kurzfristig keine Liquiditätsprobleme haben wird. EBIT und EBT werden viele als akzeptabel ansehen. Wie man diese im Einzelfall einschätzt, hängt von der Branche ab.

2 Menschliche Arbeit und Leistung

2.1 Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen

2.1.1 Maximale Haltedauer bei statischer Arbeit

Handbuch: Band 1, S. 152–154.¹

Von statischer Muskelarbeit spricht man ab einer Muskelanspannung von 4-6 Sekunden Dauer. Statische Haltearbeit ist eine besonders ermüdende Arbeitsform. Bei statischer Arbeit führt die Muskelkontraktion zu einer Behinderung der Durchblutung. Die kleinen Haargefäße im Muskel werden zusammengedrückt, ggfs. werden die Blutgefäße im Muskel vollständig abgeschnürt. Der Muskel leistet im Gegensatz zur dynamischen keine äußere Arbeit, denn das Produkt aus Kraft mal Weg wird gleich 0.

Im physiologischen Sinne ist jedoch alles Arbeit, was einen erhöhten Energieumsatz im Muskel verursacht. Man könnte also überspitzt formulieren:

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \cdot \text{Zeit}$$

Häufige statische Haltearbeit ist durch Arbeitsgestaltung nach Möglichkeit zu vermeiden. Da sich sehr schnell Ermüdung einstellt, kommt es zum Leistungszerfall der Arbeitsperson und (bezahlte) Erholungspausen werden notwendig. Sollte eine ergonomisch optimierte Arbeitsgestaltung nicht möglich sein, kann man die maximale Haltezeit in Abhängigkeit von der Haltekraft nach folgender Gleichung berechnen:

$$T = -1,5 + \frac{2,1}{\left(\frac{f}{F}\right)} - \frac{0,6}{\left(\frac{f}{F}\right)^2} + \frac{0,1}{\left(\frac{f}{F}\right)^3}$$

Dabei bedeuten:

T = maximale Haltedauer [min]

f = ausgeübte statische Haltekraft [N]

F = Maximalkraft der eingesetzten Muskelschlinge [N]

Eine Haltekraft von 15% der Maximalkraft stellt die höchstmögliche Kraftleistung dar, die ermüdungsfrei über lange Zeit zu leisten ist. Sie ist demnach die Dauerleistungsgrenze.

Gussteile werden nach dem Vergießen und Ausformen an einer rotierenden Schleifscheibe verschliffen. Der Mitarbeiter arbeitet mit einem zum Oberarm annähernd rechtwinklig gebeugten Unterarm an der Schleifscheibe. Der mittlere Anpressdruck beträgt etwa 60 N (= f), die Maximalkraft in dieser Armhaltung liegt für diesen Werker bei etwa 270 N (=F). Somit ergibt sich eine maximale Haltedauer von

$$T = -1,5 + \frac{2,1}{\left(\frac{60}{270}\right)} - \frac{0,6}{\left(\frac{60}{270}\right)^2} + \frac{0,1}{\left(\frac{60}{270}\right)^3} [\text{min}]$$

$$T = 5,07 [\text{min}]$$

Spätestens nach dieser Zeitspanne muss es zu einem Belastungswechsel oder zu einer Erholungspause kommen.

Sachverhalt

Formel

Beispiel

¹ Hinweis: Einige der hier dargestellten Formeln beruhen auf Quellen der Fachliteratur. Die Zitate werden hier nicht wiederholt. Stattdessen wird auf die Zitierung im Handbuch verwiesen.

2.1.2 Sensorische Schwellen

Sachverhalt Handbuch: Band 1, S. 159–160.

Für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ist es wichtig, die Abhängigkeiten zwischen dargebotenem Sinnesreiz und der subjektiven Empfindung der Arbeitsperson zu kennen und auch bewusst zu gestalten. Dies ist besonders für die bewegungstechnische Gestaltung, die sicherheitsgerechte Gestaltung sowie für die Gestaltung von Prüftätigkeiten von Bedeutung.

Mit der Potenzfunktion nach Stevens ermittelt man die Empfindungsstärke in Abhängigkeit der überschwelligen Reizintensität (Istwert der Reizstärke – Schwellenreizstärke).

Formel
$$E = K \cdot (S - S_0)^n$$

Dabei bedeuten:

- E = Empfindungsstärke
- K = Konstante
- S_0 = Schwellenreizstärke
- S = Istwert der Reizstärke
- n = Exponent

Der Exponent n bestimmt die Steilheit der Empfindungswahrnehmung. Er liegt im Bereich zwischen 0,33 für die Wahrnehmung kleiner Objekte in der Dunkelheit und 3,5 für einen elektrischen Schlag oder 5,0 für die Wahrnehmung eines Blitzes (Abbildung 1).

Art des Signals bzw. des Reizes	n
Kleine Objekte in Dunkelheit wahrnehmen	0,33
Kurzer Lichtreiz	0,50
Geruch (Heptan)	0,60
Lautheit	0,67
Taktile Wahrnehmung (Flexibilität)	0,80
Vibration	0,95
Kälte	1,00
Geschmack (Zucker)	1,30
Propiozeptive Wahrnehmung	1,30
Taktile Wahrnehmung (Rauigkeit)	1,50
Wärme	1,50
Elektrischer Schlag	3,50
Blitz	5,00

Abbildung 1: Empfindungswahrnehmung für verschiedene Signale bzw. Reize

Damit kann der Arbeitsgestalter geeignete Sinnesdimensionen der Mensch-Maschine-Schnittstelle auswählen.

Beispiel Ein neu konstruierter Gabelstapler soll ein Kipp-Wahrnehmungssystem enthalten. Je nach Schwere der Last und Lage des Lastschwerpunkts soll der Staplerfahrer über eine mögliche Kippgefahr gewarnt werden. Die Konstrukteure haben die Wahl zwischen einem Lichtsignal am Bedientableau oder einer in das Lenkrad eingeleiteten Vibration.

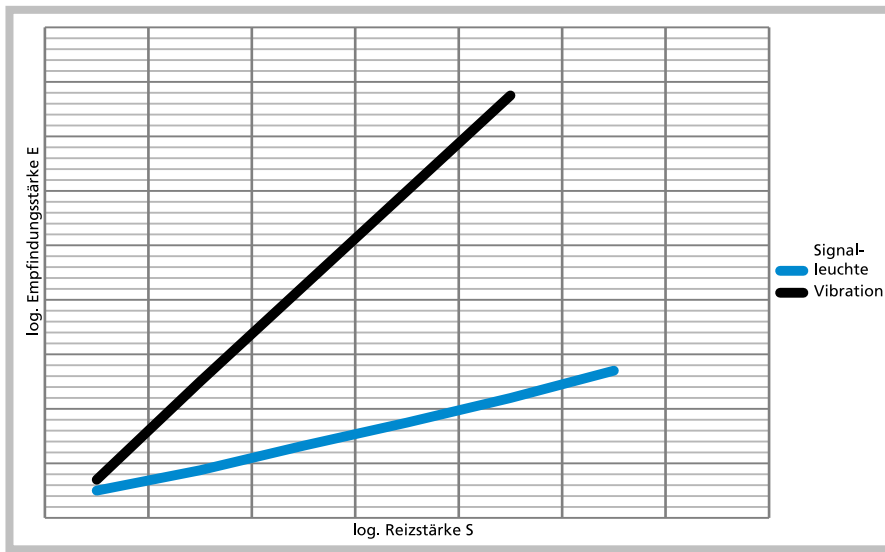


Abbildung 2: Empfindungsstärke als Funktion der Reizstärke

Durch Logarithmierung der Stevensschen Potenzfunktion lässt sich die Empfindungsstärke als Gerade darstellen:

$$\log E = n \cdot \log (S - S_0) + \log K$$

Aus obiger Tabelle $n = 0,5$ für die Signalleuchte und $n = 0,95$ für Vibrationen eingesetzt, ergeben sich die beiden Funktionsverläufe in der folgenden Grafik (Abbildung 2):

Da es sich bei der Warneinrichtung für Kippgefahr um eine sicherheitskritische Funktion handelt, wäre bei der Staplergestaltung die Vibration im Lenkrad zu bevorzugen.

2.1.3 Brechwert des Auges

Handbuch: Band 1, S. 161.

Das menschliche Auge hat einen Brechwert von etwa 60 Dioptrien. Die Dioptrie ist der Kehrwert der Längeneinheit Meter. Der Brechwert des menschlichen Auges ist dynamisch. Er wird durch die Hornhaut und durch die Linse im Auge bestimmt. Die Linse ist flexibel und kann durch Muskelkraft verändert werden. Dadurch verändert sie ihre Form, wodurch sich die Brechkraft ändert. 60 Dioptrien entsprechen einer Brennweite von etwa 17 mm.

$$\text{Brechwert} = \frac{1}{f} \text{ (dpt)}$$

Aus dem Brechwert der Augenlinse lässt sich nicht direkt das Sehvermögen ermitteln. Als Maßeinheit für die Sehschärfe wird stattdessen der Visus verwendet. Er errechnet sich aus dem Kehrwert des gerade noch aufgelösten Sehwinkels (in Winkelminuten), den die beiden kleinsten, noch wahrnehmbaren Details bilden.

$$\text{Visus } 1 = \frac{1}{1 \text{ Winkelminute}}$$

Eine Winkelminute beträgt näherungsweise $0,016^\circ$.

Sachverhalt

Formel