

1 Mathematisch-physikalische Grundlagen

1.1 Komplexe Rechnung

Da die Kenntnis der **komplexen Rechnung** vorausgesetzt wird, wird nachfolgend nur eine Zusammenstellung der wichtigsten Formeln gegeben.

In der Wechselstromtechnik wird bei sinusförmigem Verlauf von Spannung und Strom die komplexe Rechnung angewendet. Zur Darstellung der elektrischen Größen kann die Komponentenform oder die Exponentialform benutzt werden.

Bei der Komponentenform wird die komplexe Größe durch Real- und Imaginärteil dargestellt, bei der Exponentialform durch Betrag und Winkel. Die komplexe Größe selbst wird durch Unterstreichung gekennzeichnet. Die komplexe Darstellung ist demnach folgende:

- bei der Spannung $\underline{U} = U_w + jU_b = U \cdot e^{j\varphi_U}$
- beim Strom $\underline{I} = I_w + jI_b = I \cdot e^{j\varphi_I}$
- beim Widerstand $\underline{Z} = R + jX = Z \cdot e^{j\varphi_Z}$
- bei der Leistung $\underline{S} = P + jQ = S \cdot e^{j\varphi_S}$

Dabei sind:

$\underline{U}, \underline{I}, \underline{Z}, \underline{S}$ jeweils die komplexen Größen

U_w, I_w, R, P jeweils die Realteile

U_b, I_b, X, Q jeweils die Imaginärteile

U, I, Z, S jeweils die Beträge

$\varphi_U, \varphi_I, \varphi_Z, \varphi_S$ jeweils die Winkel zur reellen Achse

Die Umrechnung der Komponenten- in die Exponentialform erfolgt entsprechend nachfolgender Rechenvorschrift

$$\text{Betrag} = \sqrt{(\text{Realteil})^2 + (\text{Imaginärteil})^2}$$

$$\text{Winkel} = \arctan\left(\frac{\text{Imaginärteil}}{\text{Realteil}}\right)$$

Die Umrechnung der Exponential- in die Komponentenform erfolgt nach

$$\text{Realteil} = \text{Betrag} \cdot \cos(\text{Winkel})$$

$$\text{Imaginärteil} = \text{Betrag} \cdot \sin(\text{Winkel})$$

Am Beispiel des Widerstands ergeben sich danach

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \text{und} \quad \varphi_Z = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \quad \text{bzw.}$$

$$R = Z \cdot \cos \varphi_Z \quad \text{und} \quad X = Z \cdot \sin \varphi_Z$$

Bei der Addition bzw. Subtraktion komplexer Größen sind die Realteile für sich und die Imaginärteile für sich zu addieren bzw. zu subtrahieren.

Am Beispiel zweier komplexer Widerstände ergeben sich danach:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = (R_1 + R_2) + j(X_1 + X_2)$$

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

$$\varphi_Z = \arctan\left(\frac{X_1 + X_2}{R_1 + R_2}\right)$$

Bei der Multiplikation bzw. Division komplexer Größen sind die Beträge zu multiplizieren bzw. zu dividieren und die Winkel bei Multiplikation zu addieren bzw. bei Division zu subtrahieren.

Am Beispiel des Widerstands ergeben sich danach:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U \cdot e^{j\varphi_U}}{I \cdot e^{j\varphi_I}} = \frac{U}{I} \cdot e^{j(\varphi_U - \varphi_I)} \quad (1.1)$$

Die Berechnung der komplexen Leistung ergibt sich aus:

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* \quad (1.2)$$

Das heißt, zur Berechnung der komplexen Leistung ist die komplexe Spannung mit dem konjugiert komplexen Strom zu multiplizieren. Konjugiert komplexe Größen sind solche, die sich nur durch das Vorzeichen des Exponenten in der Exponentialform bzw. des imaginären Teils in der Komponentenform von der Ausgangsgröße unterscheiden.

2 Transformatoren

2.1 Einphasentransformator

2.1.1 Aufbau

Transformatoren sind ruhende elektrische Maschinen. Ihre Aufgaben sind:

- Änderung von Spannung und Strom, um den Energietransport wirtschaftlich zu gestalten
- Ausgleich der Spannungsfälle, die bei der Übertragung der Elektroenergie im Netz entstehen
- galvanische Trennung der Netze, um entsprechende Schutzaufgaben zu erreichen

Der Einphasentransformator dient hier vor allem der einfacheren Erläuterung der Transformatorwirkungsweise, hat aber in der Elektroenergieerzeugung, Energieübertragung und Energieverteilung sonst kaum Bedeutung.

Transformatoren bestehen in der Hauptsache aus Eisenkern, Wicklungen und Kühlmittel. Der **Eisenkern** besteht aus dünnen, gegeneinander isolierten kaltgewalzten Blechen, die zu einem Blechpaket geschichtet sind. Die **Wicklungen**, die man in Primär- und Sekundärwicklungen aufteilt, werden meist direkt übereinander bei der Zylinderwicklung oder nebeneinander bei der Scheibenwicklung angeordnet. Dies ist in **Bild 2.1** dargestellt.

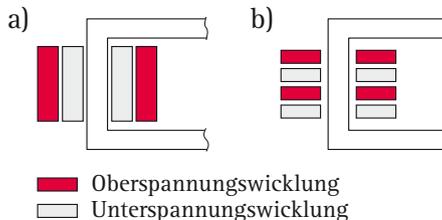


Bild 2.1 Wicklungsarten

- a) Zylinderwicklung
- b) Scheibenwicklung

Das Kühlmittel dient der Abfuhr der Verlustwärme. Es ist entweder Mineralöl in Öltransformatoren oder Luft in sogenannten Trockentransformatoren. Beim Öltransformator wird die Wärme über den Kessel und die Luft abgeführt. Bei Transformatoren höherer Leistung wird die Wärme über einen Ölkühler an die Luft oder auch an Wasser abgegeben. Das Wasser kann gleichzeitig auch für Heizzwecke verwendet werden. Trockentransformatoren sind hauptsächlich Verteilungstransformatoren der Spannungsebenen 10 kV auf 400 V mit Leistungen bis etwa 2,5 MVA. Alle anderen Transformatoren sind Öltransformatoren.

2.1.2 Wirkungsweise

Des besseren Verständnisses wegen wird hier auf drei verschiedene Fälle eingegangen, und zwar auf den idealen leerlaufenden Transformator, den idealen belasteten Transformator und den realen belasteten Transformator. Die drei Fälle sind in Bild 2.2 a–c dargestellt.

Beim Transformator werden die Formelzeichen der Primärseite mit dem Index 1 versehen und die der Sekundärseite mit 2.

Beim **idealen leerlaufenden Transformator** wird die Nennspannung U_1 eingespeist. Dabei fließt der Leerlaufstrom I_{10} . Da Spannung und Strom Wechselgrößen sind,

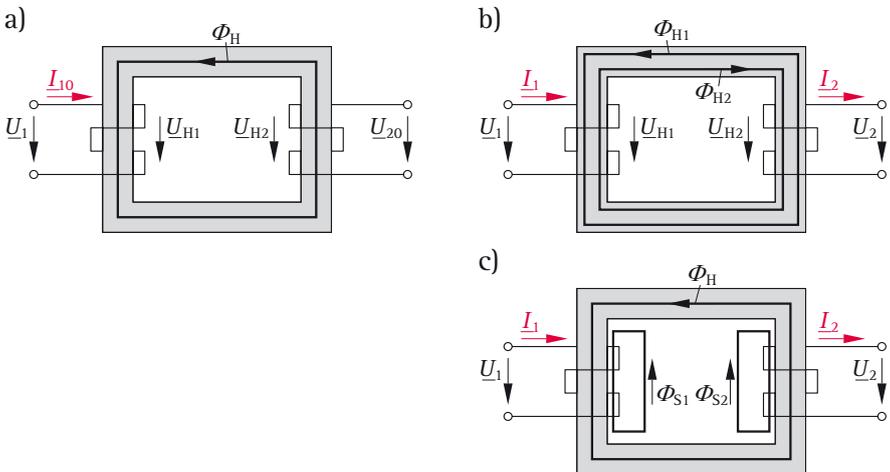


Bild 2.2 Transformatorwirkungsweise

- idealer leerlaufender Transformator
- idealer belasteter Transformator
- realer belasteter Transformator

3 Gleichstrommaschinen

3.1 Grundlagen

Bestimmungen für umlaufende elektrische Maschinen enthält die VDE 0530. Elektrische Maschinen sind im gesamten Bereich der Energietechnik von der Erzeugung bis zur Anwendung im Einsatz. Generatoren wandeln mechanische in elektrische Energie um, Motoren arbeiten umgekehrt.

Für den Wirkungsgrad gilt allgemein:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + P_V} = \frac{P_{zu} - P_V}{P_{zu}} \quad (3.1)$$

P_{zu} ist beim Generator mechanisch und beim Motor elektrisch. P_{ab} ist beim Generator elektrisch und beim Motor mechanisch. P_V sind die Verluste in der Maschine.

Ableitung der allgemeinen Formel für das Drehmoment:

$$M = \vec{r} \times \vec{F} \quad (\text{Gl. (1.38)})$$

$$M = r \cdot F \cdot \sin(\vec{r}; \vec{F}) \quad (\text{Gl. (1.31)})$$

$$\angle(r; F) = 90^\circ \rightarrow \sin(\vec{r}; \vec{F}) = 1 \quad (\text{Bild 3.1})$$

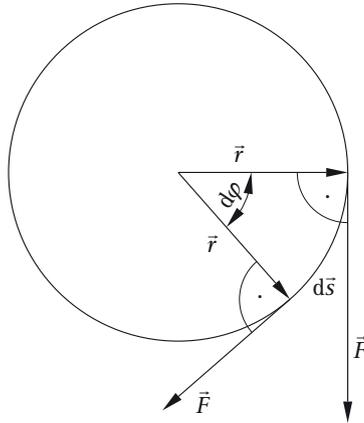
$$M = r \cdot F \rightarrow F = \frac{M}{r}$$

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int F \cdot ds \cdot \cos(\vec{F}; d\vec{s}) \quad (\text{Gl. (1.29)})$$

$$\angle(\vec{F}; d\vec{s}) = 0^\circ \rightarrow \cos(\vec{F}; d\vec{s}) = 1$$

$$ds = r \cdot d\varphi$$

$$W = \int F \cdot ds = \int \left(\frac{M}{r} \right) \cdot r \cdot d\varphi = \int P \cdot dt$$

**Bild 3.1** Drehmoment

Ein Vergleich der beiden Integrale ergibt $M \cdot d\varphi = P \cdot dt$.

$$P = M \cdot \frac{d\varphi}{dt} = M \cdot \omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (3.2)$$

Zugeschnittene Größengleichung:

$$\frac{P}{W} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{M}{\text{Nm}} \cdot \frac{n}{\text{min}^{-1}} \cdot \frac{1 \text{ s}}{60} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{M}{\text{Nm}} \cdot \frac{n}{\text{min}^{-1}} = 0,105 \cdot \frac{M}{\text{Nm}} \cdot \frac{n}{\text{min}^{-1}} \quad (3.3)$$

$$\frac{M}{\text{Nm}} = 9,55 \cdot \frac{P/W}{n/\text{min}^{-1}} = 9550 \cdot \frac{P/\text{kW}}{n/\text{min}^{-1}} \quad (3.4)$$

Das Volumen einer Maschine ist dem Drehmoment proportional.

Ableitung der allgemeinen Formeln für die induzierte Spannung:

$$u_0 = -\int \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{A} + \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s} \quad (\text{Tabelle 1.1 (Z10) (Sp3)})$$

Der erste Teil dieser Gleichung beinhaltet das Transformatorprinzip, der zweite Teil das Generatorprinzip.

Da beim Transformator die Wicklungen fest eingebaut sind, gilt $\vec{v} = 0$, und damit fällt das rechte Integral weg:

$$u_0 = -\int \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{A} = -\frac{\partial \left(\int \vec{B} \cdot d\vec{A} \right)}{\partial t}$$

5 Stromrichter

5.1 Grundlagen

5.1.1 Einsatzgebiete

Den Stromrichtern kommt bei der Steuerung und Regelung von Elektroenergiesystemen große Bedeutung zu. Dabei geht es sowohl um die Gleich- wie auch um die Wechselrichtung. In Stromrichtern werden *Dioden*, *Transistoren* (IGBTs und MOSFETs) und *Thyristoren* als elektronische Schalter verwendet.

Der Einsatz der Stromrichter (ungesteuert oder gesteuert) erfolgt:

- in Elektrolyse-Anlagen (Aluminium-, Kupfergewinnung usw.)
- zur Speisung von Gleichstromnetzen für Bahnen
- bei der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)
- in der Antriebstechnik zur Drehzahlsteuerung von Gleichstrommaschinen
- bei der Drehzahlsteuerung von Drehstrommotoren (Lokomotiven, Hybrid- und Elektrofahrzeuge usw.)
- bei Notstromanlagen
- zur Speisung von Induktionsöfen (Metallhärtung, Herstellung von Kohlestäben)
- bei der Erzeugung und Verteilung der regenerativen Energien

In Zukunft werden sicher noch viele neue Anwendungsgebiete erschlossen.

Stromrichtermaterial ist vor allem der Halbleiterwerkstoff Silizium, in neuesten Entwicklungen auch Siliziumcarbit. Zum Aufbau eines Halbleiterbauelements werden P- und N-dotiertes Silizium verwendet. Bei solchen Bauelementen gibt es je nach Polarität der angelegten Spannung eine Durchlass- bzw. eine Sperrichtung.

5.1.2 Leistungshalbleiterbauelemente

Halbleiterdioden bestehen aus einem P- und einem N-dotierten Teil. Im Sperrbereich fließt ein sehr kleiner Strom bei hoher Spannung, und im Durchlassbereich fließt ein großer Strom bei kleiner Spannung. **Bild 5.1** zeigt das Schaltzeichen und die Kennlinie einer Siliziumgleichrichterdiode. Bei Wechselspannung erfolgt durch die Halbleiterdiode eine Gleichrichtung. Ihr Einsatz erfolgt als Kleingleichrichterdioden von wenigen mA bis etwa 5 A zur Gleichrichtung von nieder- bis hochfrequenten Wechselspannungen. Leistungsgleichrichterdioden werden von 5 A bis 2000 A hauptsächlich zur Gleichrichtung von Netzspannungen eingesetzt. Sie werden in Ein- oder Zweiweggleichrichterschaltungen verwendet. Für die zulässige Spitzensperrspannung $U_{R \max}$ bzw. $U_{R \text{ RM}}$ gilt:

$$U_{R \max} \geq 1,1 \cdot k \cdot \hat{u}_V \quad (5.1)$$

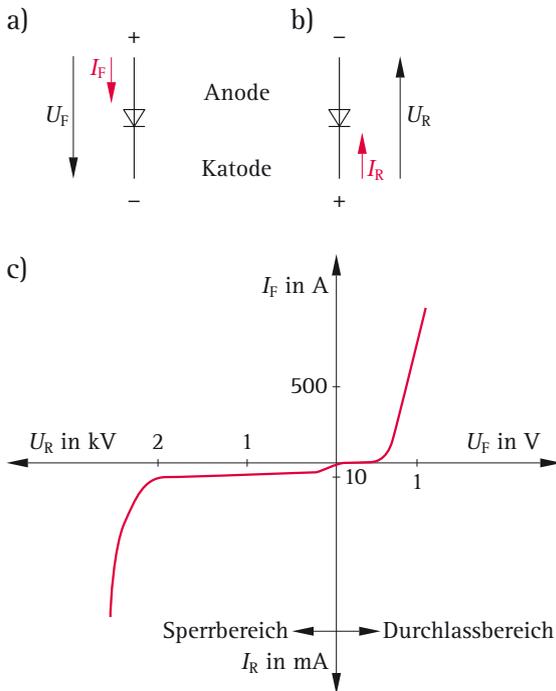


Bild 5.1 Siliziumdiode

- a) in Durchlassrichtung
- b) in Sperrrichtung
- c) Kennlinie

10 Beleuchtungsanlagen

10.1 Grundlagen

Beleuchtungsanlagen sind für den Menschen von großer Bedeutung, da er nahezu 80 % der Information über seine Umgebung durch die Augen aufnimmt. Außerdem dient die Beleuchtung dem Wohlbefinden und sorgt für Sicherheit am Arbeitsplatz und überhaupt im täglichen Leben.

Man kann das menschliche Auge mit einem Fotoapparat vergleichen, wobei die Iris die Blende darstellt, die Netzhaut den Film und die Linse des Auges natürlich die Linse der Kamera.

An die Beleuchtungsanlage werden Forderungen gestellt wie entsprechende Beleuchtungsstärke, örtliche und zeitliche Gleichmäßigkeit, Kontrast- und Farbwiedergabe sowie Blendungsfreiheit.

Das Licht ist elektromagnetische Strahlung, die für das sichtbare Licht im Wellenlängenbereich von 380 nm (blau) bis 780 nm (rot) liegt. Die größte Empfindlichkeit besitzt das Auge bei einer Wellenlänge von 555 nm (gelb-grün).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (10.1)$$

mit:

λ Wellenlänge

c Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$c_0 = 300\,000 \text{ km/s}$$

f Frequenz

Für die Beleuchtungsberechnung sind eine Reihe von lichttechnischen Größen wichtig. Zu ihnen gehören die folgenden Größen:

Lichtstrom Φ_V

Der Lichtstrom ist die von einer Lichtquelle in alle Richtungen ausgestrahlte Lichtleistung (Strahlungsleistung). Sie wird in **Lumen (lm)** gemessen. Zum Beispiel strahlt eine 40-W-Glühlampe 430 lm aus und eine 40-W-Leuchtstofflampe 3 200 lm.

Lichtstärke I_V

Die Lichtstärke ist eine Basisgröße und entspricht dem in eine bestimmte Richtung und einen bestimmten Raumwinkel Ω abgestrahlten Lichtstrom Φ_V . Da die Lichtstärke bei einer Leuchte nicht in alle Richtungen gleich ist, werden für die einzelnen Leuchten Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) aufgenommen und in den Herstellerprospekten angegeben. Um die Lichtstärkeverteilungskurven verschiedener Leuchten vergleichen zu können, sind sie üblicherweise auf 1 000 lm bezogen. Die Lichtstärke wird in **Candela (cd)** gemessen und kann z. B. bei einer 100-W-Glühlampe 110 cd betragen und bei einer 40-W-Leuchtstofflampe 250 cd.

Es gilt:

$$I_V = \frac{\Phi_V}{\Omega} \quad (10.2)$$

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (10.3)$$

Die Gl. (10.3) gilt für eine Kugel mit A als Kugeloberflächenausschnitt und r als Kugelradius.

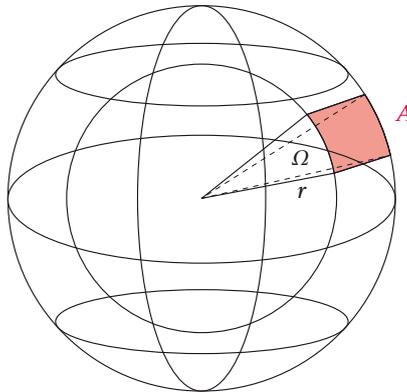


Bild 10.1 Raumwinkel Ω

Beleuchtungsstärke E_V

Die Beleuchtungsstärke ist das Verhältnis von Lichtstrom Φ_V zur beleuchteten Fläche A . Sie ist ein Maß für das Beleuchtungsniveau und ist deshalb für die Berechnung von Beleuchtungsanlagen von großer Bedeutung. Sie wird in **Lux (lx)** gemessen und ist das Verhältnis lm/m^2 .

Als Beispiele für die Beleuchtungsstärke findet man 1 lx für Mondlicht, 1 000 lx für gute Arbeitsplatzbeleuchtung und 100 000 lx für einen sonnigen Tag im Freien.

11.3.2 Windkraftanlagen

Die Bewegungsenergie der Luftmassen ist die Windenergie, die seit der Antike durch den Menschen nutzbar gemacht wird. Windmühlen wurden und werden noch zum Mahlen von Getreide, als Säge- und Ölmühle oder wie in Holland zur Entwässerung eingesetzt. Durch Segel auf Schiffen und Booten wird die Windenergie zur Fortbewegung oder zur sportlichen Freizeitbeschäftigung genutzt.

Schon zum Ende des 19. Jahrhunderts wurden erste Versuchsanlagen zur Stromerzeugung durch Windenergie errichtet. Moderne Windkraftanlagen gewinnen Strom aus der Kraft des Windes. Sie nutzen den Auftrieb, den der Wind beim Vorbeiströmen an den Rotorblättern erzeugt. Die Windenergie zählt zu den erneuerbaren Energien.

In Deutschland waren Ende des Jahres 2014 etwa 25 700 Windenergieanlagen installiert, die mit etwa 39 500 MW Windenergieleistung sauberen Strom für Unternehmen und Haushalte produzierten.

Die Windenergie an Land, auch Onshore-Windenergie genannt, ist unter den erneuerbaren Energien die kostengünstigste. Windenergieanlagen auf hoher See, auch Offshore-Windenergie genannt, sind durch starke und stetig wehende Seewinde interessant.

Das Potential der Windenergie ist noch nicht ausgeschöpft. Dabei bietet auch der Austausch älterer Anlagen durch modernere, leistungsfähigere Anlagen Perspektiven (Repowering) für den weiteren Ausbau.

Funktionsprinzip der Windkraftanlagen

Die Energieumwandlung erfolgt weitgehend direkt, indem die Flügel eines Windrads (Rotoren) durch den Wind in Drehung versetzt werden. Die entstehende Bewegungsenergie wird in einem angeschlossenen Generator zu elektrischem Strom umgewandelt. Die Übertragung der Windenergie an den Generator kann entweder mit einem zwischengeschalteten Getriebe oder getriebeelos erfolgen. Der Rotordurchmesser der Anlagen liegt im Mittel bei etwa 100 m, die Nabenhöhe bei etwa 115 m. Der Netzanschluss erfolgt bei den getriebelosen Anlagen über einen Gleichspannungszwischenkreis-Umrichter. Der durch den Generator erzeugte drehzahlabhängige und damit in der Frequenz schwankende Wechselstrom kann so passend zur Netzfrequenz ins Netz eingespeist werden. Bei den Anlagen mit Getriebe muss die Drehzahl des Generators zunächst auf die Netzfrequenz synchronisiert werden. Eine Beispielanlage zeigt Bild 11.12.

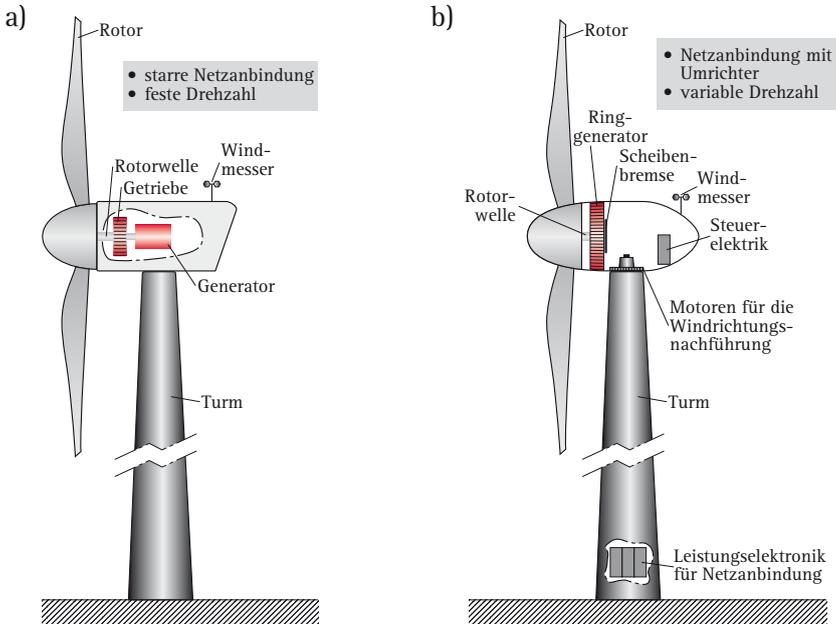


Bild 11.12 Prinzipieller Aufbau einer Windkraftanlage

Die durch die Luftströmung erzeugte Leistung beträgt:

$$P = 0,5 \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 = 0,5 \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (11.23)$$

$$\rho_{\text{Luft}} = 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (11.24)$$

Der Generator der E-126 EP4 von ENERCON ist ausgeführt als fremderregter Ringgenerator – bestehend aus Rotor und Stator. Die Nennleistung dieser Anlage beträgt 4,2 MW bei einem Rotordurchmesser von 127 m und einer Nabenhöhe von 135 m. Ab einer Windgeschwindigkeit von etwa 12 m/s steht die Leistung zur Verfügung, siehe Bild 11.13.

Die erzeugte mittlere elektrische Jahresenergie in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit für zwei Windkraftanlagen kleinerer Leistung ist in Bild 11.14 dargestellt.