

# **Verlust- und Verlustenergieabschätzung**

für das 380-kV-Leitungsbauvorhaben  
Wahle – Mecklar

in der Ausführung als Freileitung oder  
Drehstromkabelsystem

Prof. Dr.-Ing. habil. B. R. Oswald  
Universität Hannover

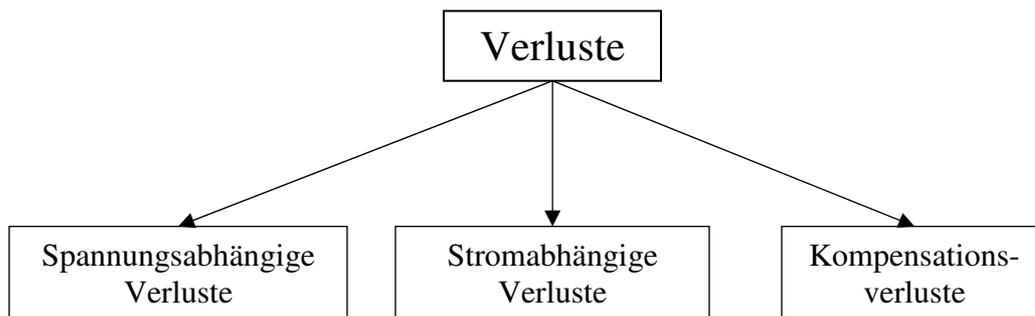
Hannover, 01.11.2007

# 1 Verluste auf Drehstromleitungssystemen

Beim Betrieb von Leitungssystemen entstehen Verluste. Die Verluste bestimmen den Wirkungsgrad der Übertragung und damit die Wirtschaftlichkeit während des Betriebes.

Nach Bild 1 unterscheidet man zwischen:

- Spannungsabhängigen Verlusten (auch als Leerlaufverluste bezeichnet)
- Stromabhängigen Verlusten (auch als Lastverluste bezeichnet)
- Kompensationsverluste



**Bild 1.** Verluste auf Leitungssystemen

Die **spannungsabhängigen Verluste** treten auf, sobald die Leitung unter Spannung gesetzt wird. Sie werden durch die „Durchlässigkeit“ der Isolierung verursacht. Die Berechnung erfolgt nach der Beziehung:

$$P_{VU} = n \cdot G' \cdot l \cdot U^2$$

$G'$  Ableitungsbelag pro km (Maß für die „Durchlässigkeit“ der Isolierung)

$l$  Leitungslänge

$n$  Anzahl der parallelen Leitungssysteme

$U$  Betriebsspannung (Leiter-Leiter-Spannung)

Der Ableitungsbelag ist bei Kabeln *größer* als bei Freileitungen. Demzufolge sind bei sonst gleichen Bedingungen die spannungsabhängigen Verluste von Kabeln größer als die von Freileitungen.

Die **stromabhängigen Verluste** sind lastabhängig. Sie entstehen an den ohmschen Widerständen der Leitungen. Die Berechnung erfolgt nach der Beziehung:

$$P_{VI} = \frac{1}{n} \cdot R' \cdot l \cdot \left( \frac{S}{U} \right)^2$$

$R'$  Widerstandsbelag pro km

$l$  Leitungslänge

$n$  Anzahl der parallelen Leitungssysteme

$U$  Betriebsspannung (Leiter-Leiter-Spannung)

$S$  übertragene Leistung

Der ohmsche Widerstand von Kabeln ist aufgrund des zwangsweise (wegen der schlechteren Wärmeableitung) größeren Leiterquerschnitts (und des Einsatzes von Kupfer) kleiner als der der Freileitung. Folglich sind bei sonst gleichen Bedingungen die stromabhängigen Verluste von Freileitungen *größer* als die von Kabeln.

In Kabelanlagen mit Blindleistungskompensation treten **Kompensationsverluste** auf. Bei 380-kV-Kabeln ist Blindleistungskompensation bereits ab etwa 20 km Länge erforderlich. In den dafür eingesetzten Blindleistungskompensationsspulen entstehen Verluste durch deren ohmsche Widerstände. Da die (oder ein Teil der Spulen) ständig eingeschaltet sind, treten die Kompensationsverluste auch ständig auf. Die Berechnung der Kompensationsverluste erfolgt nach der Beziehung:

$$P_{VK} = n \cdot (1 - g) \cdot k \cdot Q'_C \cdot l$$

- $Q'_C$  Kapazitive Ladeleistung des Kabels pro km
- $l$  Kabellänge
- $n$  Anzahl der parallelen Kabelsysteme
- $g$  Güte der Kompensationsspule
- $k$  Kompensationsgrad

Für das Leitungsbauvorhaben Wahle – Mecklar ergibt sich folgender Vergleich.

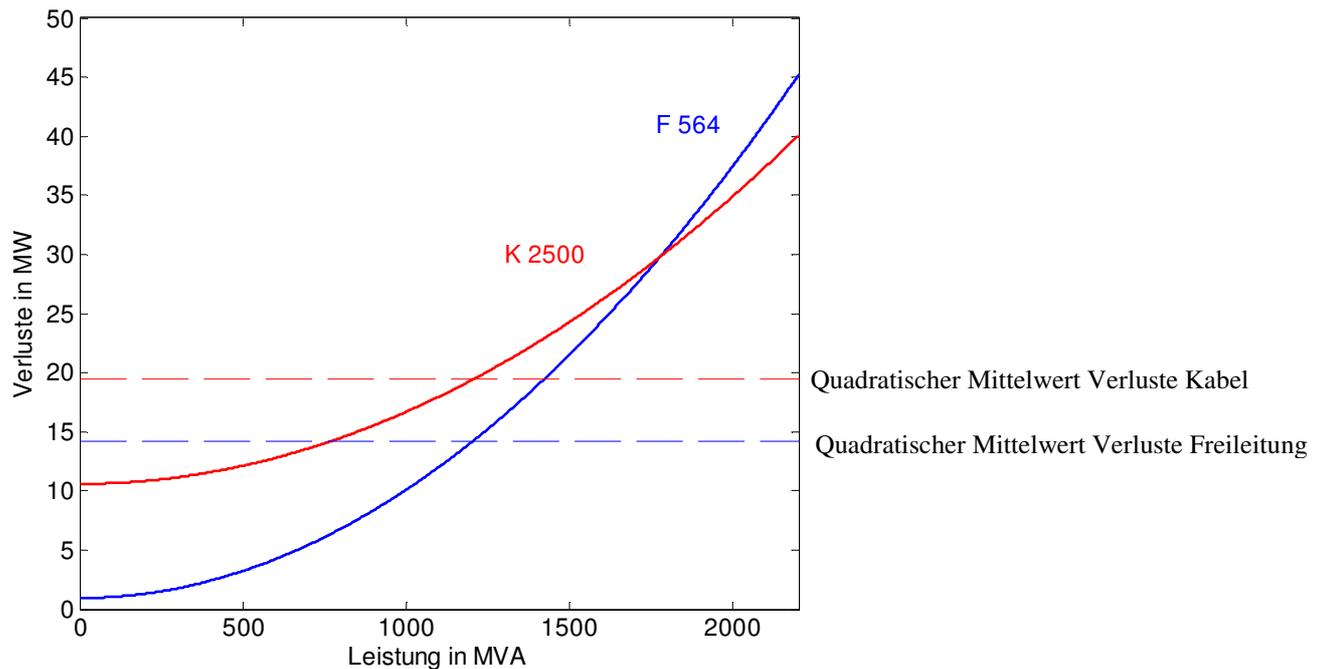
**Tabelle 1.** Vergleich der Leitungsparameter und der Verlustanteile

	<b>Freileitung 4×564/72 Al/St</b>	<b>Kabel 2XS(FL)2Y 1×2500RM</b>
Ableitungsbelag	17 nS/km	77,3 nS/km
Widerstandsbelag	13,9 mΩ/km	9,24 mΩ/km
Blindleistungsbelag	0,644 Mvar/km	11,16 MVar/km
Anzahl Systeme	2	2
Länge	190 km	190 km
Maximal erwartete Übertragungsleistung	2×1100 MW	2×1100 MW
spannungsabhängige Verluste	2×0,465 MW	2×2,12 MW
stromabhängige Verluste <sup>1)</sup>	2×22,1 MW	2×14,7 MW
Kompensationsverluste <sup>2)</sup>	0	2×3,2 MW

<sup>1)</sup> bei maximaler Leistung <sup>2)</sup> bei  $g = 0,9985$  und  $k = 1$

Das Bild 2 zeigt den Verlauf der Gesamtverluste für je 2 Systeme Freileitung 4er Bündel 564/72 und VPE- Kabel 3×2500 mm<sup>2</sup>. Bei der Leistung Null (Leerlauf) ist bei der Freileitung der Anteil der spannungsabhängigen Verluste und beim Kabel der Anteil der spannungsabhängigen Verluste sowie der Kompensationsverluste zu erkennen.

Die durchgezogenen gestrichelten Linien stellen die durchschnittlichen Verluste unter Berücksichtigung wechselnder Belastung dar (für  $\vartheta = 0,3$  s. Kapitel 2).



**Bild 2.** Gesamtverluste und mittlere Verluste Freileitung/Kabel (je 2 Systeme) in Abhängigkeit von der Leistung

## 2 Jahresverlustarbeit

Die Jahresverlustarbeit (oder Jahresverlustenergie) stellt die während eines Jahres (8760 h) entstehende Verlustarbeit dar. Da sich die Belastung der Leitungen während des Jahres ändert, ist für die stromabhängigen (lastabhängigen) Verluste ein quadratischer Mittelwert (ein Effektivwert) heranzuziehen. Der quadratische Mittelwert ergibt sich dadurch, dass die stromabhängigen Verluste vom Quadrat der Übertragungsleistung abhängen. Der quadratische Mittelwert wird Arbeitsverlustfaktor genannt. Er liegt bei normaler Leitungsauslastung in der Größenordnung von 0,3. Die mittlere stromabhängige Verlustarbeit ergibt sich dann aus den bei der maximalen Übertragungsleistung auftretenden Verlusten multipliziert mit dem Arbeitsverlustfaktor.

(Zur Verdeutlichung kann man die Ermittlung des durchschnittlichen Benzinverbrauchs von Autos heranziehen. Jeder Fahrer weiß, dass der Benzinverbrauch von der Fahrweise abhängt. Den mittleren Benzinverbrauch für eine Tankfüllung kann man einfach berechnen, indem man den Tankinhalt durch die gefahrenen km teilt. Beispiel: 75 L Tankinhalt bei gefahrenen 1000 km ergibt einen Durchschnittsverbrauch von 7,5 L/100 km. Geht man von dem maximalen momentanen Verbrauch während der gefahrenen Strecke aus (Bordcomputer moderner Autos halten diesen fest), so muss man diesen mit einem Faktor kleiner 1 multiplizieren, um auf den gleichen Durchschnittswert zu kommen. Betrag im Beispiel der momentane maximale Verbrauch 25 L/100 km, so ergibt  $25 \text{ L/100 km} \times 0,3 = 7,5 \text{ L/100 km}$ . Der Faktor 0,3 entspricht dem Arbeitsverlustfaktor)

Die gesamte jährliche Verlustarbeit berechnet sich aus:

$$W_a = (P_{VU} + \vartheta \cdot P_{VImax} + P_{VC}) \cdot T_a$$

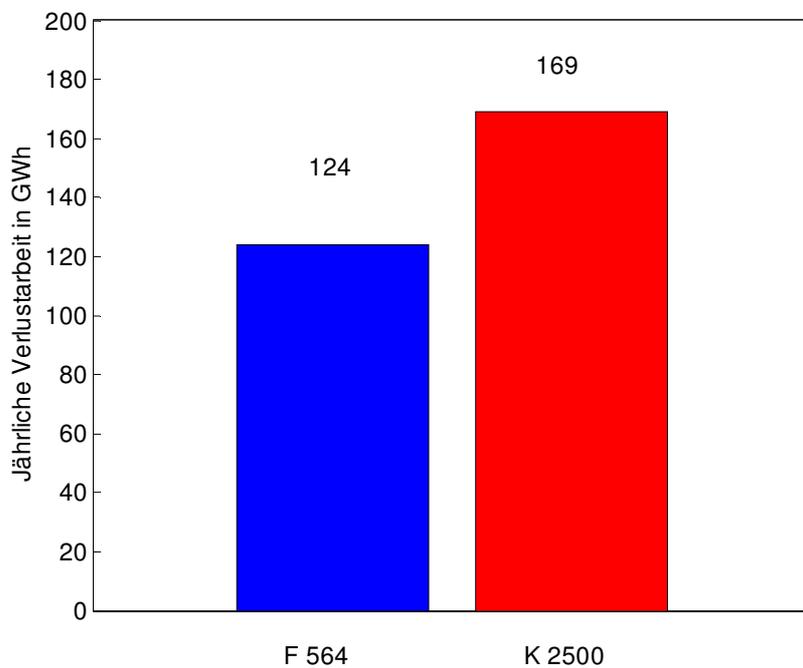
$\vartheta$  Arbeitsverlustfaktor  
 $T_a$  Dauer des Jahres

Für das Leitungsbauvorhaben Wahle – Mecklar ergibt sich mit den Werten aus Tabelle 1 folgender Vergleich.

**Tabelle 2.** Vergleich der Jahresverlustarbeit (Jahresverlustenergie) von Freileitung und Kabel in GWh

Jährliche Verlustarbeit bei 8760 h	<b>Freileitung 4×564/72 Al/St</b>	<b>Kabel 2XS(FL)2Y 1×2500RM</b>
spannungsabhängige Verlustarbeit	8	37
stromabhängige Verlustarbeit <sup>1)</sup>	116	77
Kompensationsverlustarbeit	0	55
<b>Gesamte jährliche Verlustarbeit</b>	<b>124</b>	<b>169</b>

1) bei Arbeitsverlustfaktor 0,3



**Bild 3.** Vergleich der jährlichen Verlustarbeit von Freileitung und Kabeln nach Tabelle 2