



Technische Universität Graz  
Dekanat für Bauingenieurwissenschaften



# **Verlegung von Kunststoff-Höchstspannungskabeln - Argumente zur Systemauswahl**

**Diplomarbeit  
von  
Barbara Trenkler**

Vorgelegt zur Erlangung des  
akademischen Grades einer Diplomingenieurin  
der Studienrichtung Wirtschaftsingenieur für Bauwesen

Verfasst am  
Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft  
betreut durch  
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.Peter Veit

in Zusammenarbeit mit dem  
Institut für Elektrische Anlagen  
betreut durch  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert

Graz, April 2010

**meiner Familie**

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, und die in den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form einer andern Prüfungsbehörde vorgelegt.

Graz, 17.03.2010

.....

Es genügt eben nicht, dass Technik gut funktioniert.  
Sie muss auch in die Welt passen.

Gero von Randow

## **Danksagung**

Ein herzliches Dankeschön gebührt meinen Betreuern, Prof. Fickert und Prof. Veit, welche mich bei der Bearbeitung mit großem Interesse und Engagement unterstützt haben.

Für die interessanten Gespräche im Bereich der bautechnischen Lösungen möchte ich mich bei den Professoren Heck, Schubert und Semprich bedanken.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Woschitz, welcher für meine Fragen zum Thema „Höchstspannungskabel“ immer ein offenes Ohr hatte.

Für die interessanten Gespräche zum Thema „Wärmeausbreitung im Boden“ möchte ich mich bei Herrn DI Leibniz (vm. Henoegl) bedanken.

Weiters bedanke ich mich bei den Unternehmen ÖBB und Energie Steiermark für die Auskünfte zum Thema „Grabenloses Bauen“.

Für die Bereitstellung der Studie „Machbarkeitsstudie 380 kV-Kabel für Salzburg“ möchte ich mich bei Herrn Dr. Hoffmann bedanken.

Herrn DI Marauli möchte ich für das aufschlussreiche Gespräch zum Thema „Querung von Straßen“ danken.

Besonderer Dank gebührt Herrn Ing. Weigl, Msc., welcher sich die Zeit nahm, um mir beim Thema "Kühlung von Höchstspannungskabeln" weiterzuhelfen.

## **Kurzfassung**

Die Thematik der Höchstspannungskabel ist durch die beiden strittigen 380-kV-Freileitungsprojekte (Steiermarkleitung & Salzburgleitung) in die Öffentlichkeit gerückt. Von Freileitungsgegnern vehement gefordert, werden sie von Seiten der Netzbetreiber mit dem Verweis auf die hohen Investitionskosten abgelehnt. Um die emotional geführte Diskussion auf eine unabhängige Basis zu stellen, beschäftigt sich diese Diplomarbeit eingehend mit dem Thema der Verlegung von Kunststoff-Höchstspannungskabeln. Dabei werden alle, aus bautechnischer Sicht relevanten Randbedingungen für die Verlegung erörtert. In weiterer Folge findet eine Aufstellung der derzeit möglichen Verlegungsarten statt. Betrachtet wird:

- die direkte Erdverlegung,
- die Verlegung in Schutzrohren,
- die Verlegung im oberflächennahen Tunnel sowie
- die Verlegung im tiefliegenden Tunnel.

Basierend auf einer Kostenschätzung, erfolgt die Beurteilung ausgewählter Varianten aus wirtschaftlicher Sicht. Anschließend wird der Einfluss der Kabellebensdauer auf die Kosten mittels Sensitivitätsanalyse untersucht. Zur Abrundung wird der Erlösentgang ermittelt, welcher bei direkter Erdverlegung notwendig ist, um die Variantenreihung zugunsten einer Tunnellösung zu kippen.

## **Abstract**

The issue of the high-voltage cable has become a public matter mainly because of the two controversial 380-kV Overhead line (Steiermarkleitung & Salzburgleitung) projects. The underground laying of the cable - demanded by opponents of overhead lines - is strictly refused by the Network operators due to high investment cost. In order to shift the emotionally dominated discussion towards a neutral basis, this thesis examines in detail the laying of polyethylene high-voltage cables and its structurally relevant conditions. The following laying forms are being discussed:

- the direct underground laying,
- laying in protective pipes,
- laying in tunnels near to the surface and
- laying in deep-set tunnels.

The evaluation of selected case studies is based on an estimation of expenses. The influence of the cable life cycle on the cost is additionally determined with a sensitivity analysis. Finally, the loss of proceeds is calculated in case the tunnel version is accepted as a preferable solution to the direct underground-laid cable.

## **Kurzdarstellung der Ergebnisse**

Bei der Untersuchung der möglichen Verlegevarianten hat sich herausgestellt, dass die Variante der direkten Erdverlegung mit Abstand die kostengünstigste Lösung darstellt. Weiters wurde aufgezeigt, dass die Verlegung von Leerrohren für einen späteren Einbau einer Kühleinrichtung, aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist.

Es konnte gezeigt werden, dass die Lebensdauer bei allen betrachteten Varianten einen Einfluss auf die Lebenszykluskosten der Kabelanlage hat. Ein Einfluss des kalkulatorischen Zinssatzes sowie der Störungshäufigkeit auf die Variantenreihung besteht nicht.

Unter Miteinbeziehung eines möglichen Erlösausfalles wurde ermittelt, dass sich eine Änderung der Reihung zugunsten eines Kabeltunnels bei reiner Kapitalwertbetrachtung erst ab einem Erlösentgang von 7,05 Mio € ergibt. Wird die variantenspezifische Übertragungsleistung der Entscheidung zu Grunde gelegt, kann eine Tunnellösung aus wirtschaftlicher Sicht nicht gerechtfertigt werden.

Abschließend bleibt anzumerken, dass die Systemauswahl nicht allein auf Basis von Wirtschaftlichkeitsrechnungen getroffen werden kann.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Energietransport</b> .....	<b>4</b>
2.1. Übertragungsarten.....	4
2.1.1. Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung (HDÜ).....	4
2.1.2. Einphasiger Wechselstrom.....	4
2.1.3. Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ).....	5
2.2. Ebenen der Energieübertragung .....	6
2.2.1. Höchstspannungsebene.....	6
2.2.2. Hochspannungsebene.....	6
2.2.3. Mittelspannungsebene .....	7
2.2.4. Niederspannungsebene .....	7
2.3. Netzformen.....	8
2.4. Leistungsübertragung im Drehstromnetz .....	8
2.4.1. Wirkleistung.....	9
2.4.2. Blindleistung .....	9
2.4.3. Scheinleistung.....	9
2.5. Übertragungsverluste im Drehstromnetz.....	9
2.5.1. Spannungsabhängige Verluste (Lastunabhängige Verluste).....	10
2.5.2. Stromabhängige Verluste (Lastabhängige Verluste).....	10
2.5.3. Blindleistungsverluste .....	10
2.6. Betriebsarten im Drehstromnetz.....	12
2.6.1. Natürlicher Betrieb .....	12
2.6.2. Übernatürlicher Betrieb .....	12
2.6.3. Unternatürlicher Betrieb.....	12
<b>3. Systemkomponenten der Drehstromübertragung</b> .....	<b>13</b>
3.1. Leitungen .....	13
3.1.1. Freileitungen.....	14
3.1.2. Kabelleitungen.....	15
3.2. Transformatoren .....	17
3.3. Schaltanlagen.....	18
3.4. Erdungsanlagen .....	19
3.4.1. Erdungswiderstand .....	20
3.4.2. Erderarten und deren Verlegung.....	20
3.5. Kompensationseinrichtungen in Drehstromnetzen .....	22

3.5.1.	Kompensation induktiver Blindleistung .....	22
3.5.2.	Kompensation kapazitiver Blindleistung.....	22
3.6.	Kabelspezifische Systemkomponenten .....	22
<b>4.</b>	<b>Das Kabel .....</b>	<b>24</b>
4.1.	Geschichtlicher Überblick.....	24
4.2.	Kunststoffkabel (VPE) .....	25
4.3.	Kabelgarnituren.....	28
4.3.1.	Verbindungs muffen.....	28
4.3.2.	Endverschlüsse .....	30
4.4.	Verluste, Übertragungsleistung und Betriebsart einer Kabelanlage.....	30
4.4.1.	Spannungsabhängige Kabelverluste .....	30
4.4.2.	Stromabhängige Kabelverluste .....	30
4.4.3.	Abschätzung der maximalen Übertragungsverluste einer Kabelanlage .....	32
4.4.4.	Blindleistungsverluste bei Kabelanlagen.....	36
4.4.5.	Übertragungsleistung eines Kabels.....	37
4.4.6.	Betriebsart eines Kabels.....	37
4.5.	Erwärmung des Kabels.....	38
4.5.1.	Kabelerwärmung bei direkter Erdverlegung.....	38
4.5.2.	Kabelerwärmung bei der Verlegung der Kabel im Tunnel.....	40
4.6.	Zwangskühlung der Kabelanlage .....	42
4.6.1.	Kühlung bei direkter Erdverlegung.....	42
4.6.2.	Kühlsysteme.....	44
4.6.3.	Kühlung der Muffen bei direkter Erdverlegung der Kabel .....	47
4.6.4.	Kühlung bei Verlegung der Kabel im Tunnel .....	49
4.7.	Erdung einer Kabelanlage .....	49
4.7.1.	Beidseitige Erdung der Endverschlüsse.....	49
4.7.2.	Ausgekreuzte Schirme bei beidseitiger Erdung der Endverschlüsse .....	50
4.8.	Elektromagnetische Felder bei Kabelanlagen .....	51
4.8.1.	Das elektrische Feld.....	51
4.8.2.	Das magnetische Feld.....	51
4.8.3.	Magnetische Flussdichte im flachverlegten Kabelsystem.....	52
4.8.4.	Magnetische Flussdichte des im Dreieck verlegten Kabelsystems.....	55
4.8.5.	Vergleich der Magnetischen Flussdichte von flach- und dreiecksverlegten Kabelsystemen .....	58
4.8.6.	Schirmung mittels zusätzlicher Maßnahmen.....	58

4.8.7. Arbeitstätigkeit im Nahbereich einer in Betrieb befindlichen Kabelanlage .....	60
4.9. Kabelversagen .....	61
4.9.1. Fehlerursachen .....	61
4.9.2. Fehlerart.....	62
4.9.3. Fehlerortung.....	63
4.9.4. Fehlerbehebung .....	64
4.10. Alterung, Lebensdauer und Zuverlässigkeit einer Kabelanlage.....	64
4.10.1. Alterung und Schädigung eines Kabels .....	64
4.10.2. Datenerfassung und Diagnose einer Kabelanlage.....	65
4.10.3. Lebensdauer eines Kabels.....	66
4.10.4. Zuverlässigkeit einer Kabelanlage .....	67
<b>5. Auswirkungen durch das Kabel.....</b>	<b>69</b>
5.1. Flächenbedarf .....	69
5.2. Ökologische Auswirkungen .....	69
5.2.1. Bodenaustrocknung.....	69
5.2.2. Auswirkungen auf das Grundwasser .....	70
5.2.3. Auswirkungen auf Flora & Fauna.....	70
5.3. Landwirtschaftliche Nutzung.....	70
<b>6. Bauwerke und Bauverfahren.....</b>	<b>71</b>
6.1. Verlegung der Leitung in Erde – Offene Bauweise .....	71
6.1.1. Sicherung der Baugrube mittels Böschung.....	72
6.1.2. Sicherung der Baugrube mittels Verbau .....	74
6.1.3. Einsatz von Kabelpflug und Grabenfräse .....	77
6.1.4. Thermisch stabilisiertes Bettungsmaterial.....	79
6.2. Verlegung der Leitung in Erde - Grabenloses Bauen .....	80
6.2.1. Bodenverdrängungsverfahren .....	81
6.2.2. Bodenentnahmeverfahren.....	83
6.2.3. Mantelrohre.....	84
6.3. Verlegung der Leitung im Tunnel .....	85
6.3.1. Kabeltunnel - Offene Bauweise .....	86
6.3.2. Kabeltunnel – Geschlossene Bauweise - Rohrvortrieb .....	88
6.3.3. Kabeltunnel – Geschlossene Bauweise – Bergmännischer Vortrieb.....	90
6.4. Kreuzungsbauwerke .....	92
6.5. Kabelverlegung.....	95
6.5.1. Antransport der Kabel.....	95

6.5.2.	Randbedingungen der Kabelverlegung .....	96
6.5.3.	Verlegung der Kabel in Erde.....	99
6.5.4.	Verlegung im Schutzrohr.....	99
6.5.5.	Verlegung der Kabel im Tunnel.....	100
6.5.6.	Inbetriebnahmeprüfung.....	101
6.6.	Baumaßnahmen im Schadensfall.....	101
<b>7.</b>	<b>Kosten einer Kabelanlage .....</b>	<b>103</b>
7.1.	Investitionskosten .....	104
7.1.1.	Kosten für Planung, Dienstbarkeiten, Umweltschutz, Projektabwicklung und Bauaufsicht .....	105
7.1.2.	Kosten der Elektrotechnischen Einrichtung.....	108
7.1.3.	Variante 1: Direkte Erdverlegung .....	112
7.1.4.	Alternativen zu Variante 1, Direkte Erdverlegung.....	113
7.1.5.	Variante 2: Verlegung im Schutzrohr .....	114
7.1.6.	Variante 3: Verlegung im Tunnel – oberflächennah - Fertigteilbauweise .....	115
7.1.7.	Alternative zu Variante 3, Verlegung im oberflächennahen Gewölbetunnel .....	117
7.1.8.	Variante 4: Verlegung im Tunnel - Rohrvortrieb .....	118
7.1.9.	Variante 5: Verlegung im Tunnel – Bergmännische Bauweise .....	120
7.1.10.	Muffenbauwerk.....	121
7.1.11.	Kühleinrichtung .....	121
7.1.12.	Übergangsbauwerke.....	122
7.1.13.	Aufstellung der Investitionskosten .....	122
7.2.	Instandhaltungskosten .....	125
7.3.	Entstörungskosten .....	126
7.4.	Betriebskosten.....	128
7.4.1.	Verlustkosten.....	128
7.4.2.	Inspektions- und Wartungskosten.....	131
7.4.3.	Aufstellung der Betriebskosten.....	131
<b>8.</b>	<b>Wirtschaftliche Gegenüberstellung der betrachteten Varianten.....</b>	<b>133</b>
8.1.	Grundlagen.....	133
8.2.	Gegenüberstellung der Kapitalwerte .....	134
8.3.	Gegenüberstellung der Kapitalwerte bezogen auf die Übertragungsleistung .....	137
8.4.	Exkurs zur Variante 1: Leerrohre - ja oder nein? .....	139
<b>9.</b>	<b>Sensitivitätsanalyse.....</b>	<b>141</b>
9.1.	Einfluss der Kabellebensdauer auf die Kosten.....	141

9.2.	Einfluss des Erlösentganges auf die Variantenreihung .....	144
<b>10.</b>	<b>Argumente zur Systemauswahl .....</b>	<b>146</b>
10.1.	Einsatzbereich der unterschiedlichen Varianten .....	146
10.2.	Auswahlkriterien.....	146
10.2.1.	Relevanz der Leitung.....	146
10.2.2.	Trassenlänge.....	147
10.2.3.	Übertragungsleistung .....	147
10.2.4.	Querungssituationen.....	147
10.2.5.	Auswirkungen auf die Umwelt .....	147
<b>11.</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>148</b>
<b>12.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>149</b>
12.1.	Kostenaufstellung .....	149
12.1.1.	Investitionskosten der betrachteten Varianten.....	149
12.1.2.	Ergänzende Darstellung zum Kapitel 7.1.13.....	157
12.1.3.	Laufende Kosten der betrachteten Varianten .....	158
12.2.	Kapitalwertermittlung.....	166
12.2.1.	Kapitalwertermittlung für eine Kabellebensdauer von 40 Jahren.....	166
12.2.2.	Kapitalwertermittlung für eine Kabellebensdauer von 50 Jahren – Sensitivität .....	174
12.2.3.	Kapitalwertermittlung für eine Kabellebensdauer von 40 Jahren - Sensitivität .....	182
12.2.4.	Kapitalwertermittlung für eine Kabellebensdauer von 30 Jahren - Sensitivität .....	190
12.2.5.	Kapitalwertermittlung für eine Kabellebensdauer von 20 Jahren - Sensitivität .....	198
12.3.	Unterlagen zur Berechnung des Erlösentganges .....	207
<b>13.</b>	<b>Verzeichnisse .....</b>	<b>210</b>
13.1.	Abkürzungsverzeichnis .....	210
13.2.	Abbildungsverzeichnis .....	211
13.3.	Tabellenverzeichnis .....	215
13.4.	Literaturverzeichnis.....	219

## 1. Einleitung

### Relevanz

Der Energiebedarf der westlichen Welt steigt von Jahr zu Jahr kontinuierlich an. Trotz der Bemühungen, die Effizienz in allen Bereichen (Erzeugung, Verteilung und Verbrauch) zu steigern, wird davon ausgegangen, dass dieser Trend anhält. Neben der Bestrebung, energieautark zu wirtschaften, ist ein übergeordnetes, versorgungssicheres Netz zum Austausch von Energie erforderlich. Die Liberalisierung des Strommarktes, sowie die Veränderungen aus umweltpolitischer Sicht schufen eine Situation der Investitionsunsicherheit. Anstehende Investitionen wurden hinausgezögert, die Netze höher belastet. Um unserer „Energiegesellschaft“ den gewohnten Standard weiterhin bieten zu können, ist daher der Ausbau der Netze erforderlich.

Bisher erfolgte der Netzausbau in Europa auf der Hoch- und Höchstspannungsebene weitgehend durch Freileitungen. Die ablehnende Haltung der ansässigen Bevölkerung gegenüber großen Infrastrukturprojekten, erschwert den Ausbau jedoch erheblich. Dadurch kommt es vermehrt zu Verzögerungen bei Genehmigungsverfahren und in weiterer Folge bei Bau und Inbetriebnahme.

Die Bedenken der Bevölkerung sind vielschichtig. In erster Linie wird die Beeinträchtigung der Gesundheit durch elektromagnetische Felder gefürchtet. Weiters steht die Bevölkerung dem Eingriff in die Natur, damit gleichbedeutend, in bestehende Ökosysteme, negativ gegenüber. Sie befürchtet eine Verschlechterung ihrer Lebensqualität. Der Bau von Hochspannungsfreileitungen bedingt aus Sicht der Betroffenen auch wirtschaftliche Auswirkungen auf Bürger und Gemeinden. So werden negative Auswirkungen bezüglich zukünftiger Siedlungsentwicklung und in weiterer Folge damit einhergehende Grundstücksentwertungen erwartet. Regionen, die vom Tourismus leben, fürchten Umsatzeinbußen durch die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes. Da es sich um Transportleitungen handelt, sehen die Anrainer keinen unmittelbaren Nutzen und zweifeln daher an der Notwendigkeit der Projekte.

Als Alternative zur Freileitung bietet sich die Energieübertragung mittels Kabel an. Aus dem Niederspannungsbereich nicht mehr wegzudenken, im Mittelspannungsbereich etabliert, erobern sie langsam auch die Hoch- und Höchstspannungsebene. In Kraftwerken und Stadtgebieten werden sie bereits aufgrund der beengten Platzverhältnisse eingesetzt. Die Verlegung im ländlichen Siedlungsraum wird jedoch von Seiten der Netzbetreiber aufgrund höherer Errichtungskosten abgelehnt.

### Forschungsfrage und Vorgehensweise

Den Baukosten wird ein erheblicher Anteil an den Investitionskosten zugeschrieben. In dieser Diplomarbeit sollen daher die möglichen Bauverfahren der Kabelverlegung aus Kostensicht untersucht werden. Dabei interessieren besonders die Investitionskosten der verschiedenen Bauwerke sowie die Lebenszykluskosten über die Kabelnutzungsdauer.

Weiters soll der Einfluss

- der Kabelnutzungsdauer,
- der Störungshäufigkeit und
- des kalkulatorischen Zinssatzes

auf die Lebenszykluskosten mittels Sensitivitätsanalyse ermittelt werden.

Zu Beginn werden in Kapitel 2 die elektrotechnischen Grundlagen des Energietransports erhoben. Im Anschluss an die Erläuterung zu den Übertragungsarten wird auf die Stromübertragung mittels Drehstrom näher eingegangen. Da die bautechnischen Randbedingungen Einfluss auf die Übertragungsfähigkeit der Leitung haben, wird ein Überblick über die auftretenden Verluste und die daraus resultierende übertragbare Leistung gegeben.

Kapitel 3 gibt einen Überblick über die Systemkomponenten einer Energieübertragungsanlage. Die wesentlichen Betriebsmittel werden kurz vorgestellt. Weiters wird aufgezeigt, dass eine Kabelanlage im Vergleich zu einer Freileitung zusätzliche Kompensationseinrichtungen benötigt.

Das Energiekabel als Übertragungsmedium wird in Kapitel 4 näher betrachtet. Nach einem kurzen Überblick über die Entstehung der Kabel liegt das Hauptaugenmerk auf den Kunststoffkabeln. Eingangs werden der Aufbau und die Verbindungstechnik erläutert. Anknüpfend an die Kapitel 2.4 bis 3.0 wird auf die Übertragungsleistung und die Verluste des Kabels eingegangen. Als Ergänzung zu Kap. 3.4 wird die Erdung der Kabelanlage vertieft behandelt. Die elektromagnetischen Felder einer Kabelanlage sind ebenfalls Gegenstand des Kapitels. Abschließend beschäftigt sich Kapitel 4 mit dem Versagen sowie der Lebensdauer einer Kabelanlage.

Kapitel 5 beschäftigt sich ausschließlich mit den Auswirkungen auf die Umgebung, die durch das Kabel hervorgerufen werden. Dabei liegt der Schwerpunkt auf den bleibenden Veränderungen, die sich durch die Errichtung der Kabelanlage für das Umfeld ergeben.

In Kapitel 6 werden die in Frage kommenden Bauverfahren erläutert. Betrachtet werden die direkte Erdverlegung, die Verlegung im Schutzrohr, die Verlegung im oberflächennahen Tunnel sowie die Verlegung im grabenlos hergestellten Tunnel.

Die Aufstellung der Kosten einer Kabelanlage erfolgt in Kapitel 7. Basierend auf fünf unterschiedlichen Bauverfahren werden die jeweiligen Investitions-, Instandhaltungs-, Entstörungs- sowie Betriebskosten ermittelt. Zusätzlich werden noch drei Alternativvarianten näher betrachtet.

In Kapitel 8 erfolgt die Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten für die in Kap. 7 definierten Varianten.

Mittels Sensitivitätsanalyse werden in Kapitel 9 die Einflussfaktoren auf die Kosten aufgezeigt. Dabei wird der Einfluss der Kabelnutzungsdauer, der Störungshäufigkeit und des kalkulatorischen Zinssatzes untersucht. Weiters soll die maximale Schadenshöhe bestimmt werden, bei welcher sich die Reihung der Varianten aus Kap.8 verändert.

Kapitel 10 beschäftigt sich mit den Argumenten zur Systemauswahl, denen kein wirtschaftlicher Aspekt zugrundeliegt.

Abschließend wird in Kapitel 11 ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und interessante Fragestellungen am Gebiet der Höchstspannungskabel gegeben.



## 2. Energietransport

Durch den ständig steigenden Strombedarf hat sich die Stromversorgung im Europäischen Raum von einer rein lokal begrenzten Versorgung zu einem länderübergreifenden Verbundnetz entwickelt. Die Erzeugungsschwerpunkte (z.B. große Wasserkraftwerke) entfernten sich mit der Zeit von den Verbrauchsschwerpunkten (Ballungszentren) und machten ein dementsprechend umfangreiches Versorgungsnetz notwendig. Durch die gesamtwirtschaftlich günstigere Energieerzeugung (bessere Ausnutzung der unterschiedlichen Kraftwerkstypen, Gewährleistung einer konstanten Netzfrequenz, erhöhte Versorgungssicherheit) wurde aber auch eine Anpassung des Netzes an die neuen Gegebenheiten erforderlich.

Zur Stromübertragung steht aus der historischen Entwicklung die Gleichstrom- oder die Wechselstromtechnik zur Verfügung. Im Anschluss werden die Übertragungsarten vorgestellt, die in Europa zur Anwendung kommen.

### 2.1. Übertragungsarten

Basierend auf den beiden Stromarten Gleichstrom und Wechselstrom unterscheidet man zwischen drei verschiedenen Arten der Stromübertragung.

#### 2.1.1. Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung (HDÜ)

Die bedeutendste Übertragungsart im Bereich der Energieverteilung stellt die Übertragung mittels dreiphasigem Wechselstrom, genannt Drehstrom, dar. Das Spannungsniveau beginnt bei 400 V und erreicht im österreichischen Stromnetz derzeit maximal 380 kV. International werden bei Bedarf auch Nennspannungen von über 1000 kV realisiert. In Europa beträgt die Übertragungsfrequenz 50 Hz. Die Anpassung der Energieübertragung an die Erfordernisse der Verbraucher kann durch Spannungsumformung mittels Transformatoren nahezu verlustlos bewerkstelligt werden. Ein Drehstromnetz besteht aus mehreren Teilnetzen mit unterschiedlichen Spannungsebenen. Näheres dazu siehe Kapitel 2.2.

#### 2.1.2. Einphasiger Wechselstrom

Die bekannteste Anwendung des Wechselstroms liegt im Bereich der Verbraucher auf der Niederspannungsebene. Dabei handelt es sich um Abnehmer mit kleinen Leistungen, wie z.B. Haushaltsgeräte, Werkzeuge und Beleuchtung. Die Spannung beträgt in diesen Fällen 230V. Weiters kommt der einphasige Wechselstrom in Österreich bei der Bahnstromversorgung zum Einsatz.<sup>1</sup> Es handelt sich dabei um eine zentrale Bahnenergieversorgung. In diesem Fall wird die Energie in eigenen Kraftwerken erzeugt und mittels bahneigenem Hochspannungsnetz (110 kV) verteilt. In den Unterwerken wird die Spannung auf 15 kV reduziert. Dabei beträgt die Nennfrequenz in beiden Fällen 16,7 Hz. Das Triebfahrzeug wird über die Fahrleitung mit elektrischer

---

<sup>1</sup> Bedingt durch die unterschiedliche historische Entwicklung in den einzelnen Ländern, hat sich eine Reihe von verschiedenen Bahnstromsystemen entwickelt. (Fendrich 2007, S. 395)

Energie versorgt (siehe Abb. 2.1). Die systembedingte Rückleitung der Energie erfolgt über die Schienen oder ein parallel verlegtes Erdseil. (Fendrich 2007, S. 395)

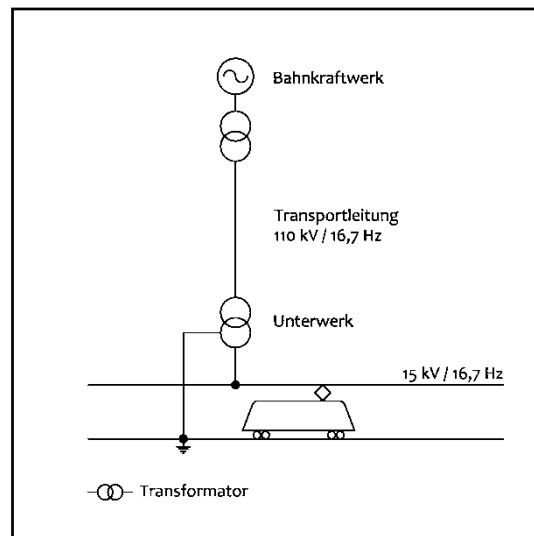


Abb. 2.1: Bahnstromversorgung (schematisch)  
(Fendrich 2007, S. 396)

### 2.1.3. Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)

Mit zunehmender Leitungslänge treten bei der Energieübertragung mittels Wechselstrom Schwierigkeiten im Hinblick auf die Stabilität der Energieübertragung auf. Da diese Probleme bei der Übertragung mittels Gleichstrom ausbleiben, geht man bei großen Entfernungen zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung über.

Ein weiteres Einsatzgebiet stellt die Anbindung von Offshore-Windparks mittels Gleichstrom-Seekabeln dar. Auch in Drehstromnetzen wird die HGÜ zur Kopplung von Netzen unterschiedlicher Frequenz oder Frequenztoleranzen eingesetzt. (Busch 2008, S.312)

Bei der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung handelt es sich um eine Zweipunktverbindung (siehe Abb. 2.2). Die im Drehstromnetz 1 vorhandene Spannung wird mittels Transformator hochtransformiert. Anschließend wird die Wechselspannung (AC) im Stromrichter auf Gleichspannung (DC) von bis zu 1000 kV gebracht. Über eine Leitung (Freileitung oder Kabel) wird die Energie zur Gegenstation transportiert. Dort wird die ankommende Gleichspannung wieder in eine Wechselspannung umgeformt und im Transformator auf die Netzspannung und Netzfrequenz des angeschlossenen Drehstromnetzes (Netz 2) gebracht. (Heuck et al. 2007, S. 76)

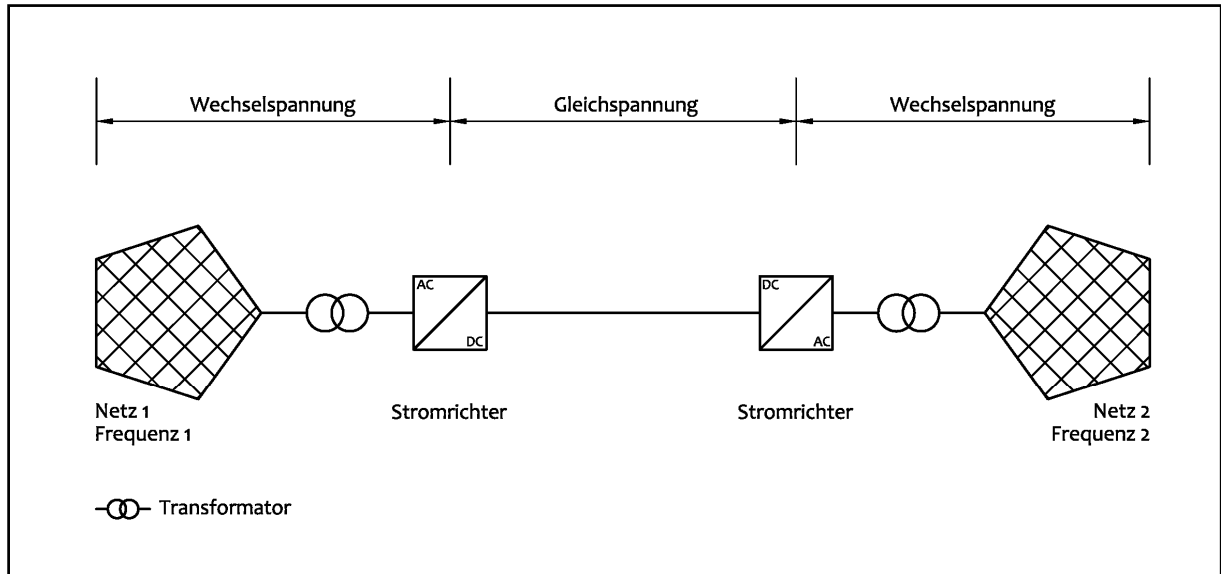


Abb. 2.2: Schema der Hochspannungsgleichstromübertragung  
(Heuck et al. 2007, S. 76)

Da sich diese Diplomarbeit mit der Übertragung von Energie im öffentlichen Netz mittels Erdkabeln beschäftigt, wird im weiteren nur noch auf die Aspekte der Drehstromübertragung eingegangen.

## 2.2. Ebenen der Energieübertragung

Bedingt durch die größeren Abstände zwischen Erzeugung und Verbrauch entstand die Notwendigkeit, den Strom über weite Strecken zu transportieren. Um die Wirkleistungsverluste beim Transport niedrig zu halten, wurde die Übertragungsspannung im Laufe der Zeit erhöht. Die Einteilung in die verschiedenen Spannungsebenen erfolgt über die Nennspannung. Im allgemeinen werden folgende Spannungsebenen (Abb. 2.3) unterschieden:

### 2.2.1. Höchstspannungsebene

Das Höchstspannungsnetz dient dem überregionalen Transport der elektrischen Energie, es handelt sich um ein reines Transportnetz. Auf dieser Spannungsebene erfolgt die Verbindung zu den angrenzenden Netzen und somit zum europäischen Verbundnetz. In Europa liegt die größte Übertragungsnennspannung derzeit bei 400 kV. Die Einspeisung in die Höchstspannungsebene erfolgt durch Großkraftwerke, es sind selten Verbraucher direkt angeschlossen. Auf der 220 kV Spannungsebene kann es zur Stromabnahme durch die Großindustrie oder spezielle Forschungseinrichtungen kommen. (Flosdorff & Hilgarth 2005, S.2) Bisher erfolgte der Netzausbau in der höchsten Spannungsebene praktisch ausschließlich durch Freileitungen. Aufgrund von Platzmangel wurden in Ballungszentren bereits Verkabelungen realisiert. Der Einsatz von Höchstspannungskabeln über Land steht derzeit zur Diskussion.

### 2.2.2. Hochspannungsebene

Die Hochspannungsebene dient der regionalen Verteilung der elektrischen Energie im Stadt- und Überlandbereich. Sie stellt die Verbindungsebene zwischen Stromverbund und örtlichem

Verteilungsnetz dar. Die Übertragungsnennspannung beträgt meist 110 kV. In dieser Spannungsebene kommt es zur Stromabnahme durch die Großindustrie und gegebenenfalls durch den Schienenverkehr.

Der Anteil der Kabel im Bereich der Hochspannungsebene lag im Jahr 2007 bei ca. 5% (E-Control 2007), steigt aber stetig an.

### 2.2.3. Mittelspannungsebene

Das Mittelspannungsnetz verteilt die Energie innerhalb der zu versorgenden Stadt- bzw. Landbezirke. Abhängig von der Übertragungsentfernung reicht der Bereich der Nennspannung auf der Mittelspannungsebene von 10 kV bis 30 kV. Die Einspeisung dezentraler Energieerzeuger (Windparks, Solarkraftwerke,..) kann auf dieser Spannungsebene erfolgen. Dem gegenüber stehen auf der Verbraucherseite die Großabnehmer der Industrie, Gewerbebetriebe sowie kleinere Gemeinden.

In städtischen Gebieten stellt die Verkabelung auf der Mittelspannungsebene die Regel dar, im ländlichen Raum wird sie in großem Ausmaß eingesetzt. (Heuck et al. 2007, S. 80ff)

### 2.2.4. Niederspannungsebene

Auf der Niederspannungsebene erfolgt die Endverteilung an die Verbraucher. Die üblichen Nennspannungen betragen 400 V für Drehstromabnehmer und 230 V für einphasige Abnehmer. Auch auf dieser Ebene können dezentrale Energieerzeuger einspeisen. Zu den Verbrauchern gehören Kleinverbraucher wie Wohnhäuser, Landwirtschaften und Haushalte. Auf der Niederspannungsebene werden hauptsächlich Kabel verlegt. (Heuck et al. 2007, S. 78ff)

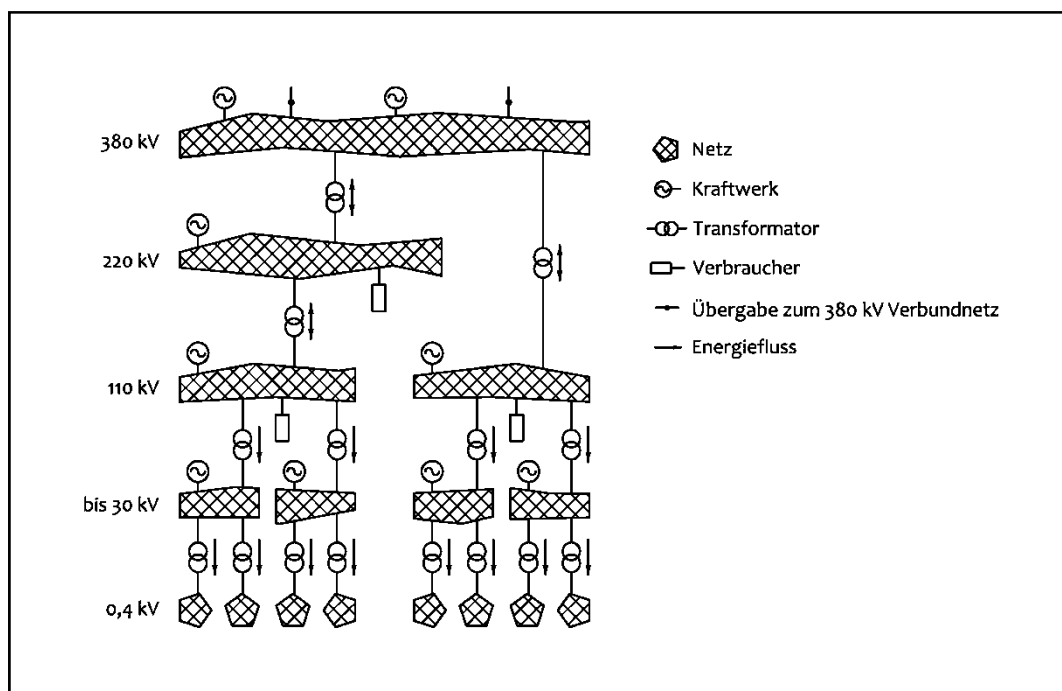


Abb. 2.3: Spannungsebenen der Energieverteilung (schematisch)  
(Heuck et al. 2007, S. 83)

Die Netzebenen sind über Transformatoren (Kap. 3.2) miteinander gekuppelt. In Europa beträgt die Übertragungsfrequenz 50 Hz.

### 2.3. Netzformen

Die einfachste Leitungsform ist die **Zweipunktverbindung**. Dabei wird der Strom vom Erzeuger, ohne Zwischenabzweiger, direkt zum Verbraucher (meist ein Umspannwerk zur weiteren Verteilung) transportiert. In **Strahlennetzen** (Abb. 2.4) verlaufen die Versorgungsleitungen als sogenannte Stickleitungen strahlenförmig von der Einspeisung zu den Verbrauchern und verzweigen sich dabei weiter. Die Speisung der Leitung erfolgt nur von einer Seite. Der bekannteste Einsatzbereich befindet sich in der Niederspannungsebene. Zur Erhöhung der Versorgungssicherheit werden die einzelnen Leitungen untereinander verbunden. Es entsteht ein **Ringnetz**. Wird ein Ringnetz mittels Querverbindungen verknüpft, sodass sich mehrere Maschen bilden, spricht man von einem **Maschennetz**. Zur Erhaltung der Netzstabilität werden große Netze im ungestörten Betrieb in kleine Netzgruppen aufgeteilt und voneinander getrennt versorgt. (Flosdorff & Hilgarth 2005, S. 3; Fickert 2007, S. 10)

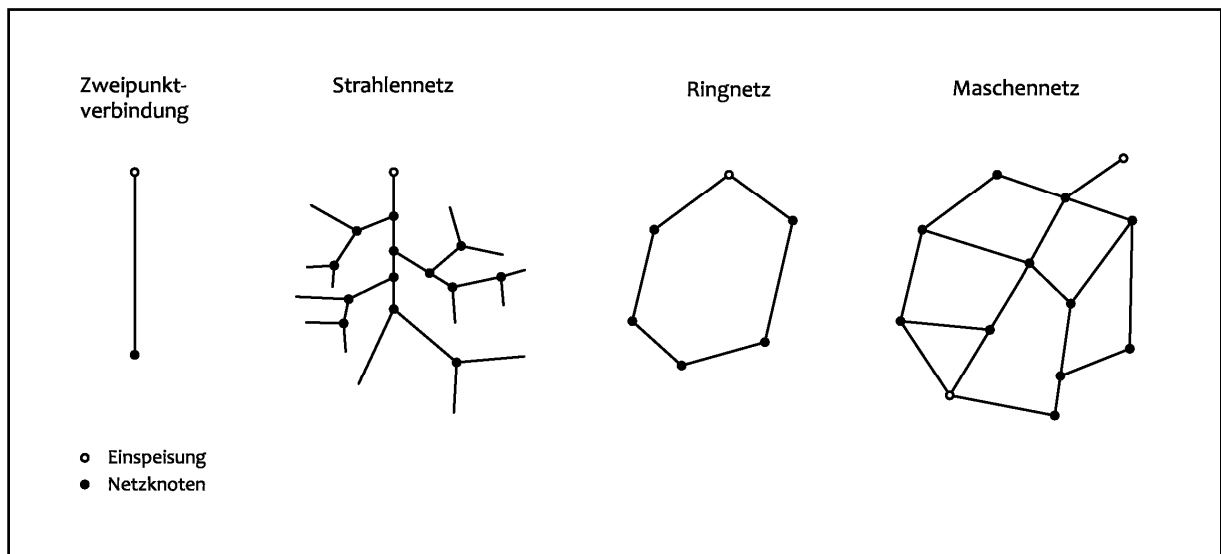


Abb. 2.4: Netzformen  
(Flosdorff & Hilgarth 2005, S. 3)

### 2.4. Leistungsübertragung im Drehstromnetz

Elektrische Energie kann nicht im Netz gespeichert werden. Dies bedeutet, dass die gesamte verbrauchte Leistung zu jedem Zeitpunkt der gesamten erzeugten Leistung entspricht.

Dies bedeutet, dass die gesamte erzeugte Leistung zu einem bestimmten Zeitpunkt der gesamten verbrauchten Leistung entspricht.

### 2.4.1. Wirkleistung

Die über eine Wechselstromleitung transportierte Leistung setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Der erste Anteil, die Wirkleistung, wird im Verbraucher umgewandelt (z.B. in Rotationsenergie), sie „bewirkt“ etwas. (Busch 2008, S. 108) Die Wirkleistung wird durch die Ohm'schen Verluste verringert. Diese Stromwärmeverluste können nicht kompensiert werden, sondern müssen aufgebracht (erzeugt) werden.

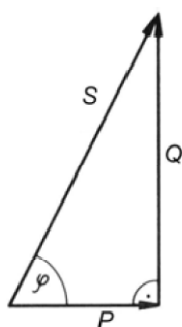
### 2.4.2. Blindleistung

Der zweite Anteil, die Blindleistung, ist ein Maß für die in elektrischen oder magnetischen Feldern gespeicherte Energie, sie entspricht der zwischen Erzeuger und Verbraucher pendelnden Energie. Diese Energie kann nicht verbraucht werden, weil sie dem Aufbau und Erhalt der elektrischen und magnetischen Felder dient. Da die Blindleistung auch ausgetauscht („transportiert“) werden muss, belastet sie die Leitung durch Erhöhung der Ohm'schen Verluste. (Weißgerber 2009, S. 146) Induktive Blindleistungsverluste bewirken einen Blindleistungsbedarf, welcher durch Kapazität (Kompensationseinrichtungen) kompensiert werden kann. (siehe dazu Kap. 2.5.3) Dasselbe gilt für kapazitive Blindleistungsverluste (z.B. von Kabeln). Sie werden durch Induktivität kompensiert.

### 2.4.3. Scheinleistung

Die Scheinleistung ist eine reine Rechengröße. Es handelt sich dabei um keine Leistung im physikalischen Sinn, sondern um ein Produkt aus Strom und Spannung. Sie dient der Ermittlung der Strombelastung von Anlagen. Diese Belastungsleistung wird als Scheinleistung bezeichnet, weil die Beanspruchung der Elemente des Versorgungssystems so groß ist, als würde scheinbar eine Wirkleistung dieser Größe übertragen. (Herold 2002, S. 259)

#### Leistungsdreieck



Scheinleistung:	$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$	[VA]
Wirkleistung:	$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$	[W]
Blindleistung:	$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi$	[var]
	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	

Um die verschiedenen Leistungsbegriffe besser auseinanderhalten zu können, wurden ihnen unterschiedliche Einheitsbezeichnungen gegeben.

## 2.5. Übertragungsverluste im Drehstromnetz

Im Falle einer idealen verlustfreien Leitung würde die Leistung sowie die Spannung in Betrag und Phase unverändert bleiben. Bei einer realen Leitung kommt es jedoch zu Verlusten und

Spannungsänderungen. Die technischen Netzverluste werden in spannungsabhängige und stromabhängige Verluste eingeteilt.

### **2.5.1. Spannungsabhängige Verluste (Lastunabhängige Verluste)**

Die spannungsabhängigen Verluste (auch Leerlaufverluste genannt) treten auf, sobald das Netz unter Spannung steht. Dabei macht es keinen Unterschied, ob das Netz belastet ist oder nicht. Verursacht werden sie durch Leerlaufverluste von Transformatoren, Isolations- und Ableitverluste sowie Verluste in Mess- und Sicherheitseinrichtungen.

#### **Ableitungswiderstand**

Unter Ableitungsverlusten versteht man einerseits Leckströme, die über die Isolatoroberflächen abfließen, und andererseits die bei Freileitungen auftretenden Koronaverluste. Da die Isolation der Kabel eine geringe Leitfähigkeit besitzt, kommt es zu einem zusätzlichen Verluststrom, der über das Dielektrikum abfließt. Ebenso können lokale Verdichtungen der Feldstärke (Spitzen) zu Teilentladungen<sup>2</sup> führen, die sich bei Freileitung und Kabeln unterschiedlich äußern. Durch Beschränkung der Feldstärken werden die Verluste gering gehalten. Der Ableitungswiderstand spielt eine gewisse Rolle bei Erwärmungs- und Wirkungsgradfragen. (Heuck et al. 2007, S. 250)

### **2.5.2. Stromabhängige Verluste (Lastabhängige Verluste)**

Stromabhängige Verluste treten zusätzlich zu den lastunabhängigen Verlusten auf, sobald das Netz belastet wird. Durch die Behinderung der Bewegung der freien Elektronen im Metallgitter entstehen Stromwärmeverluste. Die dadurch entstehende Leitererwärmung beschränkt unter anderem die maximal übertragbare Leistung der Leitung (Kap. 4.5). Der Ohm'sche Widerstand beschreibt die Eigenschaft des metallischen Leiters, dem elektrischen Strom einen Widerstand entgegenzusetzen. (Bastian et al. 1999, S. 24)

#### **Ohm'scher Widerstand<sup>3</sup>**

Der elektrische Widerstand eines metallischen Leiters hängt vom Leitermaterial, der Leitungslänge sowie dem Leiterquerschnitt ab. Je länger die Leitung und je kleiner der Querschnitt, desto größer fallen die Verluste aus. Zur Übertragung wird die Spannung in Umspannwerken, in Abhängigkeit von der Transportentfernung, erhöht.

### **2.5.3. Blindleistungsverluste**

Die Blindleistung ist ein Maß für die gespeicherte Energie in der Leitung. Diese Energie kann nicht verbraucht werden, weil sie dem Aufbau und Erhalt der elektrischen und magnetischen Felder (Kap. 4.8) dient. Die Leitungseigenschaften Induktivität und Kapazität belasten das System zusätzlich und verursachen Verluste.

---

<sup>2</sup> Wird die Durchschlagsfestigkeit der Isolierung (Luft bei Freileitungen) kurzfristig überschritten, kann es zu Entladungen kommen, die als Teilentladungen bezeichnet werden.

<sup>3</sup> Der Ohm'sche Widerstand wird auch als Wirkwiderstand, bzw. als Gleichstromwiderstand bezeichnet.

### Induktiver Widerstand

Sobald Strom durch eine Leitung fließt, entsteht ein magnetisches Feld (4.8.2). Bedingt durch den ständigen Wechsel von Auf- und Abbau des magnetischen Feldes, pendelt die sogenannte Blindenergie zwischen Verbraucher und Erzeuger hin und her. Magnetische Energie wird somit im System gespeichert. Im Gegensatz zum Ohm'schen Widerstand findet hier keine Umwandlung in Wärme statt. (Weißgerber 2009, S. 140)

Die Induktivität ist in erster Linie vom Leiterabstand abhängig. Je größer der Abstand, desto höher der induktive Widerstand der Leitung. Der induktive Widerstand, auch Reaktanz genannt steigt mit der Leitungslänge, der Frequenz und der Spannung an. Bei der üblichen Übertragungsfrequenz von 50 Hz ist die induktive Reaktanz jedoch praktisch unabhängig von der Übertragungsnennspannung. (Spring 2003, S. 156f) Wobei bei Freileitungen die Reaktanz dreimal so hoch wie bei Kabeln ist.

Durch die im System gespeicherte Energie wird die Übertragungskapazität der Leitung vermindert. Um die Belastung des Stromnetzes gering zu halten, wird der sogenannte Blindleistungsbedarf möglichst nahe am Verbraucher mittels Kompensationseinrichtungen (Kap. 3.5) gedeckt. (Steffen & Bausch 2007, S. 269)

Neben der Induktivität, die Blindleistung aufnimmt, gibt es noch die Kapazität, die Blindleistung abgibt.

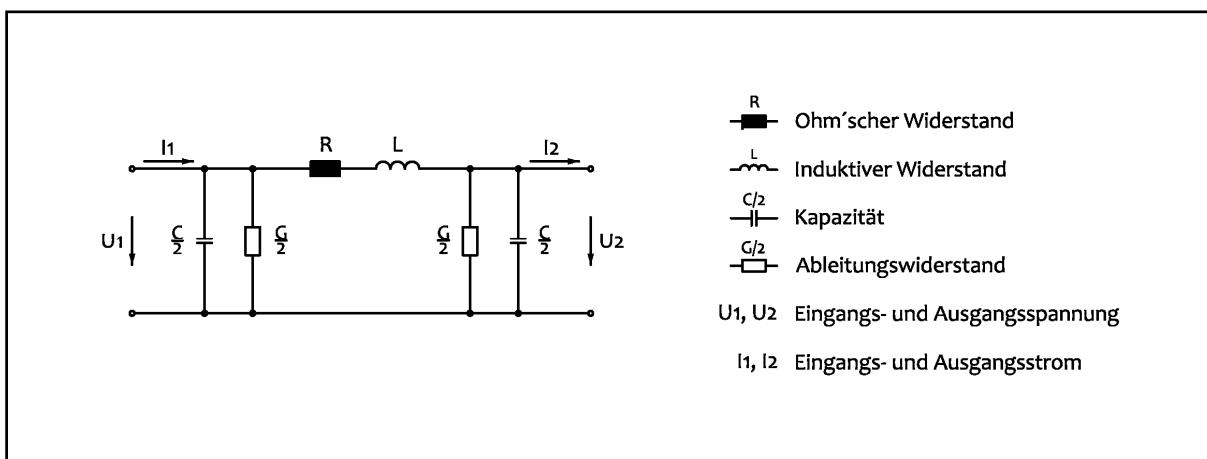


Abb. 2.5: Ersatzschaltbild einer Leitung (Heuck et al. 2007, S. 216)

### Kapazität

Die Kapazität der Leitung beschreibt die Eigenschaft, Energie in Form eines elektrischen Feldes zu speichern. Fließt Strom durch eine Leitung, entsteht aufgrund der anliegenden Spannung ein elektrostatisches Feld. Der dazu benötigte elektrische Strom (Ladestrom) wird aus dem Netz entnommen.

Die Kapazität einer Leitung hängt von der Leitungslänge und den Abständen der Leiter untereinander ab. Je länger die Leitung und je kleiner die Leiterabstände, desto größer ist die Kapazität. Weiters hängt die Kapazität von der Betriebsspannung ab. Bei steigender Nennspannung verringert sich der kapazitive Widerstand. (Spring 2003, S. 151ff)



Die Widerstände treten nicht konzentriert, sondern über die Leitungslänge verteilt auf. In diesem Fall spricht man von Leitungsbelägen. (Heuck et al. 2007, S. 215)

Durch die auftretenden Verluste reduziert sich die übertragbare Leistung einer Drehstromleitung.

## **2.6. Betriebsarten im Drehstromnetz**

### **2.6.1. Natürlicher Betrieb**

Beim natürlichen Betrieb einer Leitung kompensieren sich die (spannungsabhängigen) kapazitiven und (strom- / lastabhängigen) induktiven Blindleistungsströme zur Gänze. In diesem Fall treten die geringsten Verluste auf. (Bastian et al. 1999, S. 139) Da die Energieabnahme im Versorgungsnetz bedarfsbedingt schwankt, verändert sich auch die zu übertragende Leistung. Somit ist ein natürlicher Betrieb ohne zusätzliche Maßnahmen nicht möglich. Der Betrieb einer Leitung, abweichend von der natürlichen Leistung, gilt als ungünstig. Um die Übertragungsverluste so gering wie möglich zu halten, werden Kompensationseinrichtungen angeordnet. (Herold 2001, S. 271ff)

### **2.6.2. Übernatürlicher Betrieb**

Steigt bei einer nicht kompensierten Leitung der Ladestrom stark an, so erhöht sich mit ihm das Magnetfeld. Die Leitung wirkt nun induktiv und es kommt zu einem vom Blindstrom verursachten Spannungsabfall am Leitungsende. (Schwab 2006, S. 395) Beim übernatürlichen Betrieb wird eine größere Wirkleistung übertragen als im natürlichen Betrieb. Gleichzeitig muss jedoch die erhöhte Blindleistungsenergie „transportiert“ werden. Aufgrund dessen ist man bestrebt, die induktive Blindleistung zu kompensieren und die Leitung annähernd mit natürlicher Leistung zu betreiben.

### **2.6.3. Unternatürlicher Betrieb**

Im Gegensatz zum übernatürlichen Betrieb dominiert beim unternatürlichen Betrieb das kapazitive Verhalten der Leitung. Der Ladestrom und damit das Magnetfeld sind verhältnismäßig klein. Die elektrischen Felder üben einen größeren Einfluss aus. (Heuck et al. 2007, S. 233) Dadurch kann es resonanzbedingt zu Spannungserhöhungen am Leitungsende kommen. Zur Spannungserhaltung muss in diesem Fall die kapazitive Blindleistung kompensiert werden. (Schwab 2006, S. 394)

### **Grenzfall leerlaufende Leitung**

Als Grenzfall des unternatürlichen Betriebes gilt der Leerlauf. Dabei ist der Strom am Leitungsende gleich Null. Es findet keine Leistungsabnahme statt. (Herold 2001, S. 267) Auch im Leerlauf wird die Leitung mit einem relativ starken Strom belastet. Dieser kann zu unzulässigen Spannungserhöhungen führen. Der Betrieb von langen leerlaufenden Leitungen ist daher nicht erwünscht. (Heuck et al. 2007, S. 233f)

### 3. Systemkomponenten der Drehstromübertragung

Ein Drehstromnetz besteht in erster Linie aus Leitungen, Transformatoren und Schaltanlagen. Zusätzlich sind noch eine Reihe von Hilfs- und Schutzeinrichtungen erforderlich, um den sicheren und zuverlässigen Betrieb der gesamten Anlage gewährleisten zu können. Dabei handelt es sich um Netzschutz- und Erdungseinrichtungen, Kompensationseinrichtungen, Steuerungsanlagen sowie Überwachungsanlagen. In der nachfolgenden Darstellung (Abb. 3.1) sind die wesentlichen Betriebsmittel elektrischer Energieversorgungsnetze dargestellt.

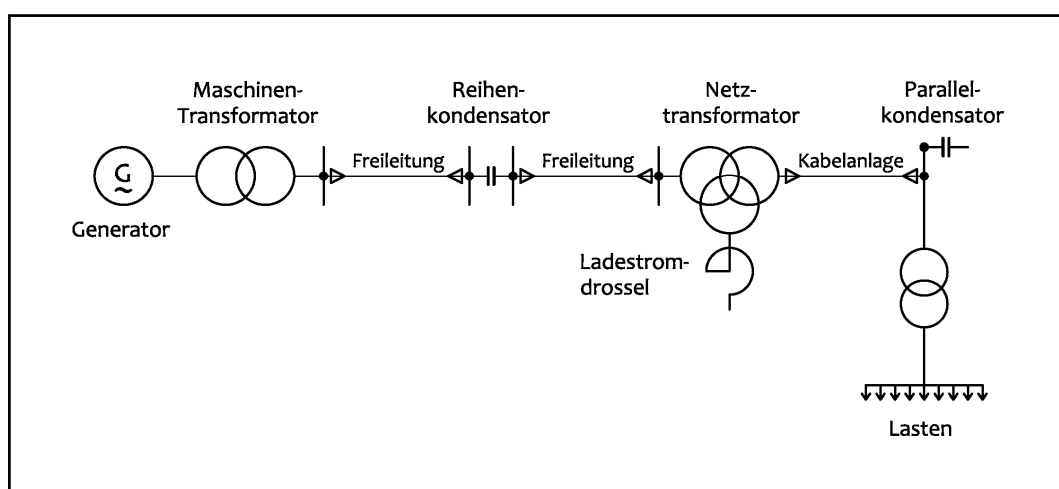


Abb. 3.1: Betriebsmittel elektrischer Energieversorgungsnetze (schematisch)  
Auszug (Herold 2002, S. 39)

Im Generator wird elektrische Energie erzeugt und über Maschinentransformatoren in das Netz eingespeist. Bei großen Leitungslängen kann die Anordnung von Kondensatoren<sup>4</sup> zur Blindleistungskompensation notwendig werden. (siehe dazu Kap. 3.5) Die sogenannten Netztransformatoren verbinden Übertragungs- und Verteilnetze unterschiedlicher Spannungen. Ladestromdrosseln werden zur Kompensation des Kapazitiven Ladestroms von Leitungen eingesetzt. Über den Transformator (in Abb. 3.1, rechts unten) wird eine untergeordnete Spannungsebene gespeist an der Lasten hängen. (Herold 2002, S. 39)

#### 3.1. Leitungen

Leitungen dienen dem Transport und der Verteilung elektrischer Energie. Die beiden wichtigsten Leitungsarten stellen Freileitungen und Kabel dar. In Tab. 3.1 werden die Trassen- und Systemlängen des österreichischen Hoch- und Höchstspannungsnetzes aufgeführt.

<sup>4</sup> Als Parallelkondensator wird ein Kondensator bezeichnet, der im Netz so angeordnet ist, dass an ihm die selbe Spannung anliegt wie an den angrenzenden Betriebsmitteln. Im Gegensatz dazu ist der Reihen-kondensator so positioniert, dass in ihm der selbe Strom fließt wie in den angeschlossenen Betriebsmitteln. (Bastian et al. 1999, S. 47ff)

Tab. 3.1: Trassen- und Systemlängen in Österreich

(VEÖ 2007)

2007					
Spannungsebenen	Freileitungen		Kabelleitungen (1)		Summe
	km	%	km	%	km
110 kV lines	6.179,5	93,1	456,3	6,9	6.635,8
220 kV lines	1.882,5	99,8	3,1	0,2	1.885,6
380 kV lines	1.245,5	97,9	27,0	2,1	1.272,5
<b>Trassenlänge</b>	<b>9.307,5</b>	<b>95,0</b>	<b>486,4</b>	<b>5,0</b>	<b>9.793,9</b>

Spannungsebenen	Freileitungen		Kabelleitungen (1)		Summe
	km	%	km	%	km
110 kV lines	10.461,7	94,8	573,5	5,2	11.035,2
220 kV lines	3.759,5	99,9	4,7	0,1	3.764,2
380 kV lines	2.481,3	97,9	54,0	2,1	2.535,3
<b>Systemlänge</b>	<b>16.702,5</b>	<b>96,4</b>	<b>632,2</b>	<b>3,6</b>	<b>17.334,7</b>

1) Grobe Abschätzung anhand der verwendeten Leitermaterialien.

### 3.1.1. Freileitungen

Freileitungen bestehen im wesentlichen aus Masten und Leiterseilen. Dabei können die Masten, abhängig von der Spannungsebene und der sich daraus ergebenden erforderlichen Masthöhe<sup>5</sup>, aus unterschiedlichen Materialien bestehen. Werden in der Nieder- und Mittelspannungsebene Holz- und Betonmasten verwendet, so kommen im Hoch- und Höchstspannungsbereich hauptsächlich Stahlgittermasten zum Einsatz. Aus statischer Sicht wird zwischen reinen Tragmasten und Abspannmasten unterschieden. Tragmasten dienen lediglich zum Tragen der Leiterseile und werden nur in geraden Streckenabschnitten eingesetzt.

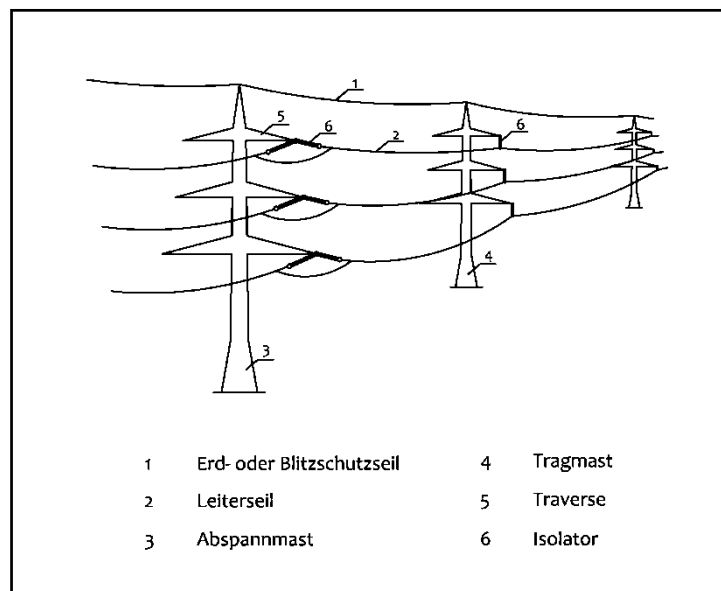


Abb. 3.2: Freileitung  
(Flosdorff & Hilgarth 2005, S. 21)

<sup>5</sup> Bedingt durch das Isolationsmedium Luft, werden im Hoch- und Höchstspannungsbereich große Abstände zu leitenden Teilen sowie zur Erdoberfläche notwendig.

Zur Aufnahme von horizontalen Lasten, die aus dem Seildurchhang und trassenbedingten Richtungsänderungen resultieren, werden in regelmäßigen Abständen sogenannte Abspannmasten situiert. Der Einsatz von Trag- bzw. Abspannmasten sowie deren Spannweite hängt von der Trassenführung und der Beschaffenheit des Geländes ab.

An den Masttraversen werden die Leiterseile, galvanisch vom Mast getrennt durch Isolatoren, befestigt. Als Leitermaterial kommen Aluminium oder Aluminiumlegierungen zum Einsatz. (Flosdorff & Hilgarth 2005, S. 20f; Crastan 2007, S. 169ff) Zum Schutz der Leitung vor Blitzschlägen werden die Masten an den Mastspitzen mit einem durchgehenden Erdseil verbunden.

### **3.1.2. Kabelleitungen**

Neben den Freileitungen werden auch Kabel zur Energieübertragung herangezogen. In der Nieder- und Mittelspannungsebene bereits etabliert, werden sie auch im Hochspannungsbereich und vereinzelt im Höchstspannungsbereich eingesetzt. Der Anteil der in Österreich verlegten Kabel im Bereich der Übertragungsnetze beträgt ca. 5 % (siehe Tab. 3.1).

Bei Kabeln im Höchstspannungsbereich handelt es sich um isolierte Leitungen, die in der Erde verlegt werden<sup>6</sup>. Besonders in Ballungsgebieten und größeren Städten mit schwierigen baulichen Verhältnissen, in denen die Realisierung einer Freileitung nicht möglich ist, kommen Kabel zum Einsatz.

Ein Kabel besteht im wesentlichen aus einem Leiter, einer Isolierung und einem leitenden Schirm. Kapitel 4 widmet sich, aus bautechnischer Sicht, ausführlich dem Kabel. Aus der vorhandenen Fachliteratur geht hervor, dass Kabel rein technisch gesehen auch in der Höchstspannungsebene erfolgreich eingesetzt werden können. Die Investitionskosten liegen aufgrund der aufwändigeren Tiefbauarbeiten über jenen für Freileitungen. Das Kostenniveau einer Kabelanlage hängt von der Verlegeart sowie der Anzahl der verlegten Kabelsysteme ab.

#### **Anzahl der verlegten Kabelsysteme**

Die Anzahl der verlegten Kabelsysteme hängt von der Relevanz der Leitung im Netz und der zu übertragenden Leistung ab. Aufgrund des geringen Kabelanteils im Übertragungsnetz (siehe Tab. 3.1) muss meist ein Anschluss an eine bestehende Freileitung realisiert werden. Da diese auf der Höchstspannungsebene grundsätzlich als Doppelsystem hergestellt werden, stellt sich die Frage nach adäquatem Anschluss.

Die naheliegendste Lösung stellt der Ersatz eines Freileitungssystems durch ein Kabelsystem dar (siehe Abb. 3.3).

---

<sup>6</sup> Der Begriff „Luftkabel“ wird für isolierte Freileitungen verwendet, die im Niederspannungsbereich zur Versorgung von Einfamilienhäusern vereinzelt eingesetzt werden. Er taucht auch im Zusammenhang mit Leitungen der Telekommunikation auf.

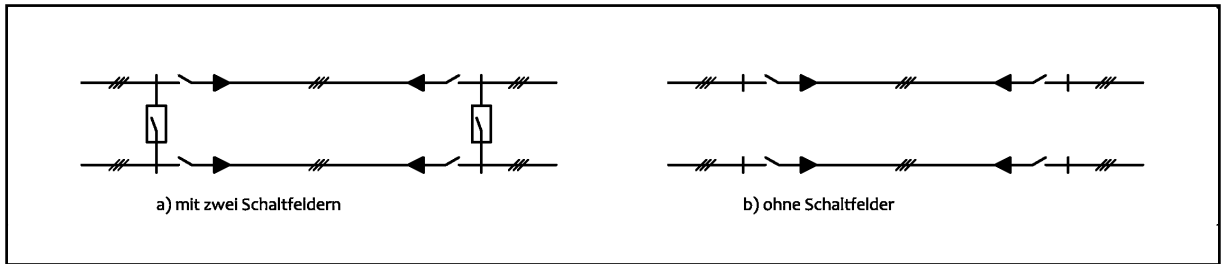


Abb. 3.3: Zwei Kabelsysteme als Ersatz für zwei Freileitungssysteme

Laut Oswald (2007, S. 30) stellt dies jedoch keine zufriedenstellende Lösung für eine Leitung im Verbundnetz dar. Die Versorgungssicherheit kann wegen der langen Ausfallszeiten im Störfall nicht gewährleistet werden ( $n - 1$  Kriterium wird nicht eingehalten). Als Versorgungsleitung einer Großstadt kann die Lösung mit einer Leitung bei entsprechend eng vermaschtem Netz realisiert werden.

Die Ausführung von drei Kabelsystemen (Abb. 3.4) zur Steigerung der Übertragungsleistung stellt einen erheblichen Mehraufwand am Gebiet der Schaltungstechnik dar und wird daher ebenso als ungünstig erachtet (Oswald 2007, S. 31).

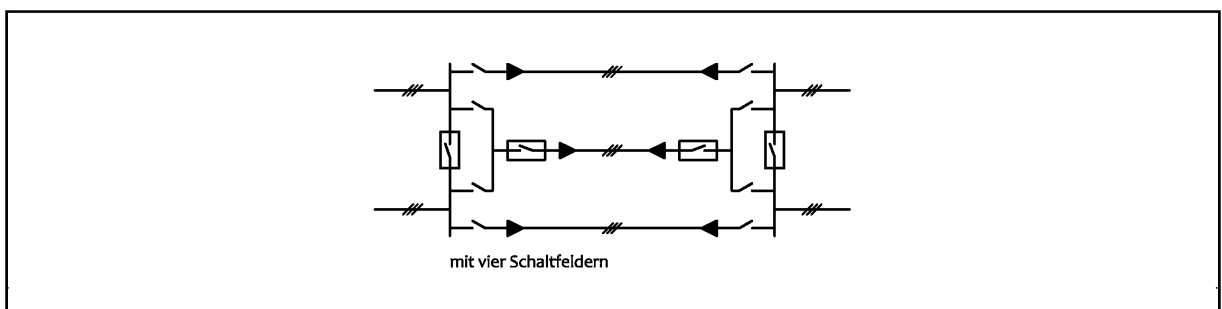


Abb. 3.4: Drei Kabelsysteme als Ersatz für zwei Freileitungssysteme  
(Oswald 2007, S. 31)

Erst der Einsatz von vier Kabelsystemen gewährleistet nach Oswald (2007, S. 32) die Versorgungssicherheit einer Verbundleitung. Werden die Kabelsysteme mittels Schalteinrichtungen untereinander verbunden (siehe Abb. 3.5 a), so erfolgt die Energieübertragung im Schadensfall über die drei funktionsfähigen Kabelsysteme.

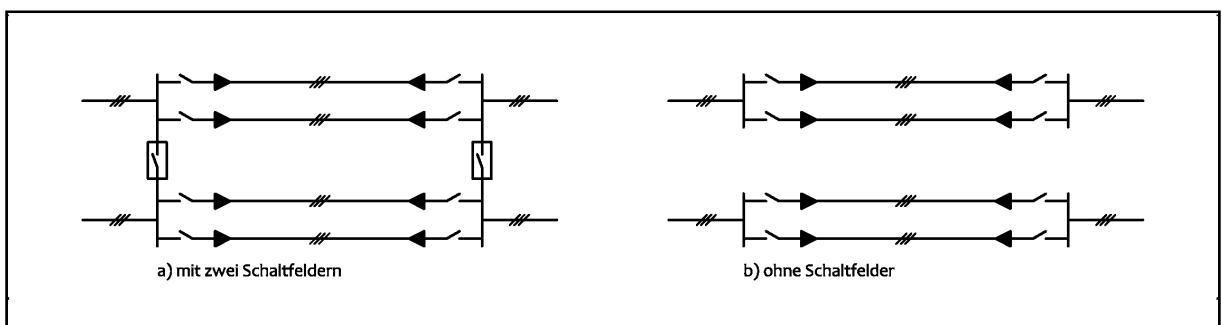


Abb. 3.5: Vier Kabelsysteme als Ersatz für zwei Freileitungssysteme  
(Oswald 2007, S. 31)

Wird hingegen auf eine Verbindung der Kabelsysteme verzichtet (siehe Abb. 3.5 b), so reduziert sich die übertragbare Leistung der gesamten Leitung auf die Übertragungsleistung eines Kabelsystems.

### Erhöhung der Versorgungssicherheit durch Einsatz eines Reserveleiters

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Versorgungssicherheit stellt die Anordnung eines vierten Leiters dar. Für eine Kraftwerksausleitung (Jahnke 1996, S. 1740) wurde der Einsatz eines Reserveleiters bereits untersucht. Im Fehlerfall eines Kabels soll der Reserveleiter einspringen und auf diese Weise die Versorgung, mit einer kurzen Unterbrechung durch den Schaltvorgang, sicherstellen (siehe Abb. 3.6).

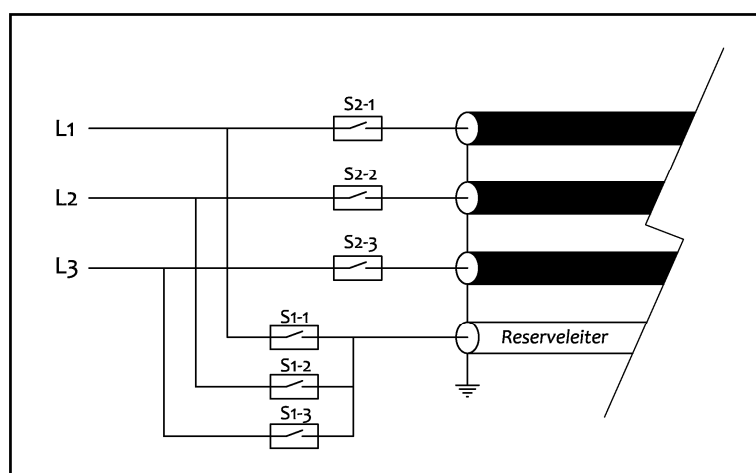


Abb. 3.6: Anordnung eines Reserveleiters zur Erhöhung der Versorgungssicherheit (Brakelmann & Jensen 2005, S. 39)

Zusätzlich erforderliche Trennschalter sowie Maßnahmen zum Schutz vor Überspannung sind in Abb. 3.6 nicht eingezeichnet. Um die Funktionsfähigkeit der Kabelanlage im Fehlerfall gewährleisten zu können, muss sichergestellt werden, dass es im Falle eines Kurzschlusses nicht zur Beschädigung der angrenzenden Kabel kommt. (siehe auch Kap. 4.9.2) Dies kann mittels Schutzblechen und Brandschutzplatten erfolgen (Jahnke 1996, S. 1737ff).

## 3.2. Transformatoren

Die Transformatoren, auch als Umspanner bezeichnet, stellen strategisch wichtige Komponenten im Drehstromnetz dar. Ihre Aufgabe besteht darin, die für den jeweiligen Verwendungszweck technisch und wirtschaftlich optimale Spannung bereitzustellen. Aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten haben sich verschiedene Bauformen entwickelt. In Hoch- und Höchstspannungsnetzen spielen die Transformatoren die Hauptrolle. Diese Netzkuppltransformatoren stellen die Verbindung zwischen zwei unterschiedlichen Netzebenen her. Um die Versorgungssicherheit (n-1 Prinzip)<sup>7</sup> gewährleisten zu können, werden meist zwei

<sup>7</sup> Das n-1 Prinzip besagt, dass die elektrische Versorgung auch dann gewährleistet sein muss, wenn eine Anlage bzw. Leitung ausfällt. (Bei extremen Ereignissen wie z.B. Katastrophen findet das n-1 Prinzip keine Anwendung.)

Transformatoren angeordnet. Im Vergleich zur transportierten Leistung sind die Verluste im Transformator sehr gering. (Tietz 2007, S. 101)

### 3.3. Schaltanlagen

Schaltanlagen dienen der Verteilung der elektrischen Energie. Sie repräsentieren Knotenpunkte im Netz, in denen mehrere Betriebsmittel zusammengefasst werden, um den Strom zu schalten, zu messen und zu regeln. Schaltanlagen setzen sich generell aus elektrotechnischen Betriebsmitteln (Schaltgeräte, Wandler, ...), maschinenbautechnischen Teilen (Gerüste, Sammelschienen, ...) sowie Geräten der Sekundärtechnik (Mess- und Schutzeinrichtungen) zusammen. Nach der Aufstellungsart wird zwischen Freiluft- und Innenraumschaltanlagen unterschieden. (Crastan 2007, S. 359ff) Freiluftschaltanlagen erfordern Grundflächen von beachtlicher Größe<sup>8</sup> und werden daher eher nicht im Nahbereich von Ballungszentren realisiert. Zum Einsatz kommen dann die kompakten Innenraumschaltanlagen. Alle spannungsführenden Teile befinden sich dabei in einer unter Druck stehenden Kapselung aus Metall. Als Isoliermedium kommt im Hoch- und Höchstspannungsbereich SF<sub>6</sub>-Gas<sup>9</sup> zum Einsatz. (Heuck et al. 2007, S. 287ff)

Zur besseren Veranschaulichung werden die Bauteile einer Schaltanlage am Beispiel einer Freiluftschaltanlage erläutert.

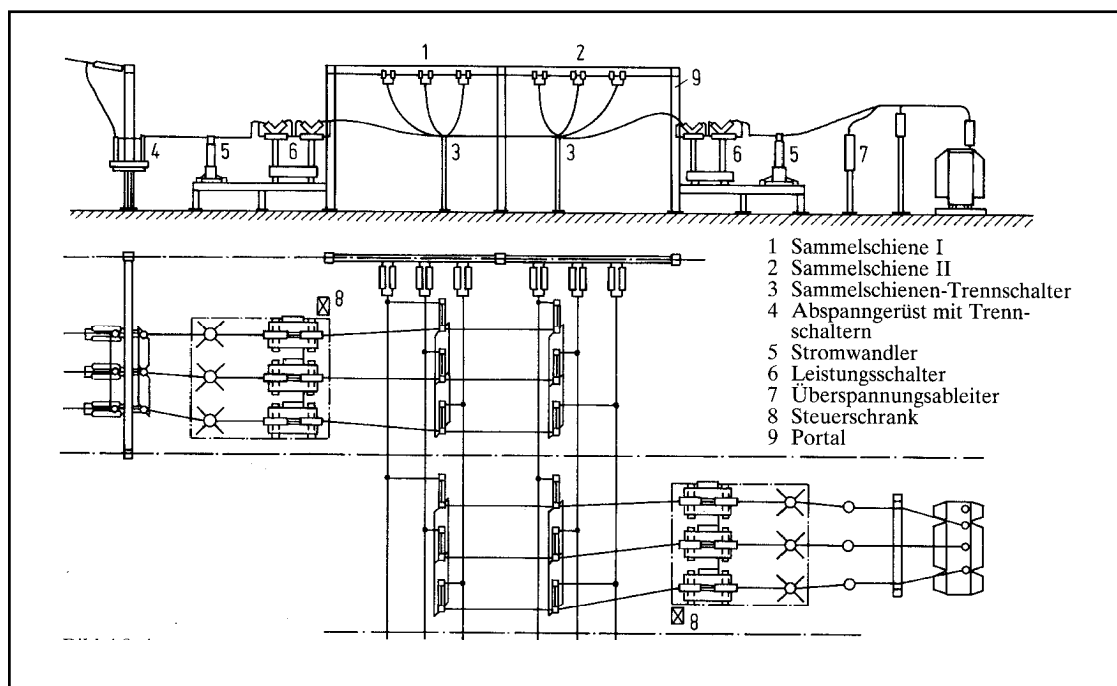


Abb. 3.7: Prinzip einer Hochspannung – Freiluftschaltanlage  
(Knies & Schierack 1998, S. 281)

<sup>8</sup> Laut Angabe der VERBUND-Austrian Power Grid (APG) wird das Umspannwerk Salzach neu ca. 30.000m<sup>2</sup> Grundstücksfläche beanspruchen. (KEMA 2008, S. 23)

<sup>9</sup> Reaktionsträges SF<sub>6</sub>-Gas (Schwefelhexafluorid) wird als Dielektrikum in Transformatoren, Hochspannungsanlagen und elektrischen Apparaten verwendet. Aus Gründen des Umweltschutzes und wirtschaftlichen Überlegungen wird heute vielfach ein Gemisch aus Stickstoff (80%) und SF<sub>6</sub> (20%) eingesetzt. (Heuck et al. 2007, S. 291)

**Sammelschienen** stellen die einfachste Möglichkeit dar, mehrere Leitungen eines elektrischen Energieversorgungsnetzes über Leistungsschalter miteinander zu verbinden. Sie verteilen die ankommende Leistung auf die abgehenden Leitungen. Dabei gibt es verschiedene Arten der Anordnung, die in dieser Diplomarbeit jedoch nicht weiter behandelt werden.

Schaltgeräte sind die wichtigsten Komponenten einer Schaltanlage. Je nach Erfordernis stellen sie Verbindungen zu Betriebsmitteln her oder trennen diese. Die Trennung von Sammelschienen erfolgt über **Leistungsschalter**. Sie besitzen die Fähigkeit, Schaltmaßnahmen auch im Fehlerfall (Kurzschluss) erfolgreich durchzuführen.

**Trennschalter** stellen nach dem Abschalten eine Trennstelle her und dienen damit der Sicherheit des Personals bei Wartungsarbeiten. Sie dürfen nur im stromlosen Zustand betätigt werden. Erdungs-Trenner dienen auch dazu, abgeschaltete Betriebsmittel zu erden.

In Hochspannungsanlagen ist die Strom- und Spannungsmessung nicht direkt möglich. Daher werden **Strom- und Spannungswandler** benötigt, um die Messgrößen in eine „bequem“ verarbeitbare Form auf niedrigem Potenzial umzuwandeln.

Durch Blitzeinschläge kann es kurzfristig zu hohen Spannungen im System kommen. Diese können die Betriebsmittel einer Schaltanlage gefährden. Zum Schutz der Anlage werden dafür **Überspannungsableiter** angeordnet. (Crastan 2007, S. 360ff; Heuck et al. 2007, S. 281ff)

Hochspannungsschaltanlagen stellen mittels Netzkupplungstransformatoren die Verbindung zwischen unterschiedlichen Spannungsebenen im Transportnetz her<sup>10</sup>. Zur reinen Verteil- und Netzkupplungsfunktion kommt hier noch die Durchleitungsfunktion hinzu.

Die Gestaltung einer Schaltanlage hängt neben den erforderlichen Betriebsmitteln und deren systematischer Anordnung auch von ihrer geografischen Lage sowie von der Anzahl der an- und abgehenden Leitungen ab. (Schwab 2006, S. 543ff)

### 3.4. Erdungsanlagen

Treten in elektrischen Energieanlagen ungeplante Stromflüsse, sogenannte Fehlerströme auf, so müssen diese gegen Erde abgeleitet werden, ohne dabei Schaden an Personen oder an den Anlagen anzurichten. Bei den Fehlern kann es sich um einfache Erdschlüsse, sogenannte Doppelerdschlüsse mit zwei örtlich getrennten Fußpunkten, Schaltüberspannungen oder Blitzeinschläge handeln. Die technische Einrichtung, die diese Aufgabe übernimmt, wird Erdungsanlage genannt. Um Personen vor zu hohen Berührungsspannungen zu schützen, wird unter anderem das Prinzip der Schutzerdung mit Potentialausgleich angewandt. Dabei werden alle nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden metallischen Anlagenteile (z.B. Gehäuse, Gerüste, Leitern,...) an die Erdungsanlage angeschlossen (geerdet) und miteinander verbunden. Dies entspricht dem Prinzip „Vögel auf Leitung“!

Parallel dazu werden bei der Betriebserdung jene Betriebsmittel an die Erdungsanlage angeschlossen, die diesen Anschluss für ihren ordnungsgemäßen Betrieb benötigen (wie z.B.

---

<sup>10</sup> Sind in einer Schaltanlage auch Transformatoren vorhanden, so spricht man im Bereich der Hoch- und Höchstspannung von Umspannwerken.



Überspannungsableiter). Grundsätzlich werden die Schutzerdung und die Betriebserdung an die gleiche Erdungsanlage angeschlossen.

Diese besteht aus Erdern und Erdungsleitungen. Die Erdungsleitungen verbinden die zu erdenden Betriebsmittel mit den Erdern. Erder sind metallische Leiter, die - eingebettet in das Erdreich - für die ordnungsgemäße Übertragung der Fehlerströme sorgen. (Flosdorff & Hilgarth 2005, S. 183ff) Bei der Planung von Erdungsanlagen steht die Einhaltung der zulässigen Berührspannung neben der thermischen Festigkeit im Vordergrund. Ein möglichst geringer Erdungswiderstand wird angestrebt. (Oeding & Oswald 2004, S. 722)

### 3.4.1. Erdungswiderstand

Der Erdungswiderstand wird von mehreren Faktoren beeinflusst. In erster Linie hängt er von der Art und der Beschaffenheit des Erdreichs ab. Wie in folgender Übersicht (Tab. 3.2) ersichtlich, streut der spezifische elektrische Widerstand<sup>11</sup> erheblich.

Tab. 3.2: Spezifische elektrische Widerstände von Böden

Auszug (Knödel et al. 2005, S. 98)

Material	Wertebereich (Ohmmeter)	
	Minimum	Maximum
Kies, Sand	50 (wassergesättigt)	> 10.000
Lehm	500	5000
Ton (erdfeucht)	3	30
Torf, Humus	15	25
Moorböden	10	150
Sandstein	< 50 (klüftig, feucht)	> 100.000 (kompakt)
Kalkstein	100 (klüftig, feucht)	> 100.000 (kompakt)
natürliche Wässer	10	300

Kiese und Sande besitzen im trockenen Zustand, bedingt durch das lockere Gefüge, einen sehr hohen elektrischen Widerstand. Die elektrische Leitfähigkeit steigt proportional mit dem Feuchtegehalt an. Die höchste Leitfähigkeit besitzen poröse Erdstoffpartikel in stehendem Grundwasser<sup>12</sup>. Im Gegensatz dazu stellt gefrorenes Erdreich einen sehr schlechten Stromleiter dar. (Herold 2001, S. 84f) Unabhängig von der Bodenart und deren Zustand, kann der wirksame Erdwiderstand durch leitende Einbauten wie Schienen und Rohrleitungen im Baugrund kleinere Werte annehmen. Zur Erderanlage gehören jedoch nur jene Einbauten, die bewusst und leitend mit den Erdern verbunden sind.

Der Erdungswiderstand hängt natürlich auch von der Art, den Abmessungen und der Anordnung der Erdungsanlage ab.

### 3.4.2. Erderarten und deren Verlegung

Es werden zwei Arten von Erdern unterschieden: Oberflächenerder und Tiefenerder. Die Verlegung von Oberflächenerdern erfolgt in geringer Tiefe (frostfrei in 0,5 bis 1,0m) parallel zur

<sup>11</sup> Der spezifische elektrische Widerstand ist der Widerstand eines Würfels (Erdreich) von 1m Kantenlänge, gemessen zwischen zwei gegenüberliegenden Flächen. (VDEW 1992, S. 25)

<sup>12</sup> Dazu ist anzumerken, dass organische Böden (Humus, Torf, Moorböden) aus bautechnischer Sicht als nicht tragfähig eingestuft werden.

Erdoberfläche.<sup>13</sup> Sie werden eingesetzt, wenn die oberen Schichten des Erdbodens eine bessere elektrische Leitfähigkeit aufweisen als der Untergrund. Je nach Anordnung der einzelnen Bänder unterscheidet man Strahlen-, Ring-, und Maschenerder. (VDEW 1992, S. 41ff)

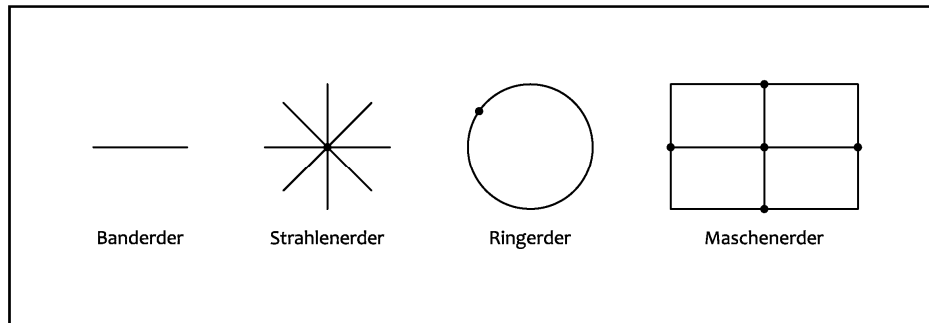


Abb. 3.8: Oberflächenerder  
(Knies & Schierack 1998, S. 380)

Tiefenerder sind lotrecht in den Boden eingebrachte Stäbe aus Rohren oder Profilstahl. Sie werden eingesetzt, wenn die tieferen Erdschichten deutlich besser leiten als die oberen. Ihre effektive Länge wird erst ab dem frostfreien Bereich gemessen. In der Praxis kommen meist Kombinationen aus Oberflächen- und Tiefenerdern zur Anwendung.

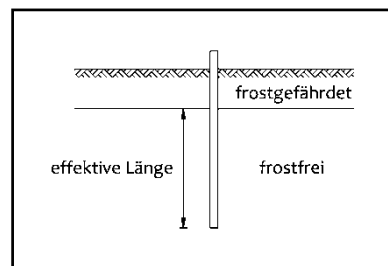


Abb. 3.9: Tiefenerder  
(Flosdorff & Hilgarth 2005, S. 186)

Wie bereits erwähnt, bestehen die Erder aus metallischen Leitern. Für Oberflächenerder kommen verzinkte Stahlbänder, Kupferbänder oder Kupferseile zum Einsatz. Als Tiefenerder kommen hauptsächlich Walzprodukte aus Stahl in Frage. Die Abmessungen sind so zu wählen, dass die Erder gegen korrodierende Einflüsse beständig mechanischen sowie thermischen Ansprüchen gewachsen sind. (Knies & Schierack 1998, S. 379; Flosdorff & Hilgarth 2005, S. 185)

Beim Anschluss an die Betriebsmittel dürfen keine Schalter, Sicherungen oder leicht lösbare Verbindungen in die Erder oder Erdungsleitungen eingebaut werden. Etwaige Schweiß- oder Austrittsstellen müssen gegen Korrosion geschützt werden. Im Bereich der Erder ist ein Auffüllen der Baugrube mittels Steinen oder Schotter zu vermeiden, da dadurch der Ausbreitungswiderstand erhöht und somit die Erdung verschlechtert wird. (Oeding & Oswald 2004, S. 722f; VDEW 1992, S. 262f)

<sup>13</sup> Zu den Oberflächenenerdern zählen auch die sogenannten Fundamenteerder. Eine Verlegung in Beton wirkt wegen dessen spezifischen Widerstands aus elektrotechnischer Sicht wie eine Verlegung direkt im Erdreich.

### **3.5. Kompensationseinrichtungen in Drehstromnetzen**

Wie schon im Kapitel 2.6.1 angesprochen, muss die Blindleistung für einen möglichst verlustarmen Betrieb der Leitung kompensiert werden. Der Blindleistungshaushalt ist geprägt vom Blindleistungsverbrauch der Lasten am Ende der Leitung und von der Blindlasterzeugung des Höchstspannungsnetzes. (Crastan 2007, S. 429) Wird die Leitung mit einer Leistung betrieben, die über der natürlichen Leistung liegt, so wird mehr Blindleistung verbraucht als erzeugt. Handelt es sich beim Netz aber z.B. um ein Kabelnetz bei nächtlicher Schwachlast, wird weniger Blindleistung verbraucht als bereitgestellt. Unter Blindleistungskompensation versteht man einerseits die Einspeisung von Blindleistung im Falle eines Blindleistungsbedarfs und andererseits die Entnahme im Falle eines Blindleistungsüberschusses. Durch die Minimierung des Blindleistungsflusses werden auch die vom Blindleistungsstrom verursachten Ohmschen Verluste verringert. (Spring 2003, S. 175)

#### **3.5.1. Kompensation induktiver Blindleistung**

Induktive Verbraucher (z.B. Transformatoren) nehmen induktive Blindleistung in Form ihres Magnetisierungsstroms auf. Zur Kompensation werden Kapazitäten (Kondensatoren) parallel oder in Reihe geschaltet. Der vom Verbraucher geforderte Blindstrom wird der zugeschalteten Kapazität durch ständiges Umladen entnommen. Dieser pendelt aufgrund der Positionierung nur zwischen Kondensator und Verbraucher und belastet die restliche Leitung daher nicht. In Hochspannungsnetzen wird die Parallelkompensation nicht eingesetzt, da sie wegen ihrer Lastabhängigkeit stabilitätsmindernd wirkt. Zum Einsatz kommt die Reihenkompensation. (Schwab 2006, S. 405ff)

#### **3.5.2. Kompensation kapazitiver Blindleistung**

In Hoch- und Höchstspannungsnetzen können bei Schwachlast oder bei leerlaufender Leitung, bedingt durch die kapazitive Ladeleistung, Spannungserhöhungen und Stabilitätsprobleme auftreten. Zur Kompensation dieser Effekte werden Paralleldrosseln eingesetzt. (Schwab 2006, S. 409)

In der Praxis reicht bei kurzen Leitungen eine Konzentration der Kompensationseinrichtungen am Leitungsende. Findet der Energietransport in beide Richtungen statt, kann die Kompensationsanlage auch in der Mitte angeordnet werden. Eine Leitung größerer Länge muss zur Anordnung von Kompensationseinrichtungen in mehrere Abschnitte gegliedert werden. (Oswald 2008, S. 21)

### **3.6. Kabelspezifische Systemkomponenten**

Grundsätzlich kommen die bereits erläuterten Systemkomponenten auch bei Kabelanlagen vor. Durch den hohen kapazitiven Ladestrom (siehe 2.5.3) werden jedoch umfangreiche Kompensationsmaßnahmen erforderlich. Kann die benötigte Blindleistung nicht vom Netz (Erzeuger der Lasten) bereitgestellt werden, muss dies mittels Kompensationsspulen erfolgen. Meist werden die Kompensationsspulen am Anfang und am Ende der Leitung angeordnet. Reicht

dies jedoch nicht aus, so wird die Leitung in mehrere Kompensationsabschnitte gegliedert. Dabei werden zusätzliche Endverschlüsse, Schalteinrichtungen sowie Überspannungsableiter notwendig.

Durch die Aufstellung von Kompensationsspulen kann es zu Geräuschen kommen, die insbesondere in Siedlungsgebieten mittels entsprechenden Schutzbauten zu minimieren sind. (KEMA 2008, S. 193)

Abhängig von der Art der Realisierung der Verkabelung (Voll- oder Teilverkabelung) und der Anzahl der Kabelsysteme ergeben sich wesentliche Unterschiede (Anzahl, Größe und Komplexität) bei der Realisierung von Schaltanlagen.

## 4. Das Kabel

Als Kabel werden Leitungen bezeichnet, die je nach Ausführung für die Verlegung im Erdboden, in Kabelkanälen oder im Wasser geeignet sind. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, hohe Übertragungsströme zu führen und auftretende Betriebs- und Überspannungen zu isolieren. Weiters müssen sie negativen Umwelteinflüssen, wie z.B. chemischem oder mechanischem Angriff, widerstehen können. (Küchler 2005, S. 427)

In dieser Diplomarbeit liegt das Hauptaugenmerk auf den Kunststoffkabeln, dennoch soll ein kurzer Überblick über die restlichen Kabelbauarten und ihre geschichtliche Entwicklung gegeben werden, da aufbauend auf diese, die vernetzten Polyethylen (VPE) - Kabel entstanden.

### 4.1. Geschichtlicher Überblick

Die ersten Kabel waren Gleichstromkabel und wurden zur Energieversorgung der Straßenbeleuchtung in Berlin im Jahre 1880 eingesetzt. Als Isoliermedium kam damals eingedickter Pflanzensaft (Guttapercha) zum Einsatz. Diese Art der Isolierung erwies sich als nicht ausreichend wärmebeständig. Die Weiterentwicklung des Isoliermaterials brachte getränkte Faserstoffe wie Jute oder Hanf hervor. Als Feuchtigkeitsschutz wurden die Leitungen Anfangs mit Metallrohren umhüllt, später kamen aufgespreste Bleimäntel zur Anwendung. Der Einsatz der Wechsel- bzw. Drehstromtechnik machte eine höhere Spannungsfestigkeit der Isolierung notwendig. Dazu wurden ab 1890 die Leiter mit getränkten, spiralförmig gewickelten Papierbahnen isoliert.

Bei papierisolierten Kabeln werden die Papierbänder gegeneinander versetzt aufgewickelt. Lücken zwischen den nebeneinanderliegenden Papierkanten gewährleisten die erforderliche Biegsamkeit. Im Anschluss an die Trocknung erfolgt die Tränkung der Papierbahnen. Werden diese mit einem hochviskosen Mittel (Mineralöl und Harz) getränkt, spricht man von Massekabeln. Bei Tränkung mittels dünnflüssigem Mineralöl handelt es sich um Ölkabel. Auf die Isolierung werden die weiteren zum Kabelaufbau gehörenden Schichten gewickelt, die an dieser Stelle nicht näher erläutert werden. Einleiter-Massekabel kommen wegen ihrer vorteilhaften elektrotechnischen Eigenschaften weiterhin bei HGÜ<sup>14</sup>-Seekabelanlagen zum Einsatz.

Der Umstand der steigenden Übertragungsspannung stellte immer höhere Anforderungen an die Spannungsfestigkeit der Isolierung. Bedingt durch Teilentladungen<sup>2</sup>, die durch Hohlräume in der Isolierung entstanden, kam es in den 30er Jahren zur Entwicklung teilentladungsfreier Kabel. Zu ihnen zählen Ölkabel und Druckrohrkabel. Bei Ölkabeln steht die Tränkmasse unter Druck, wodurch eine Hohlraumbildung in der Isolierung verhindert wird. Ölkabel werden zunehmend durch Kunststoffkabel vom Markt verdrängt, da sie bei Ölaustritt eine Gefahr für die Umwelt darstellen. Zu den Druckrohrkabeln zählen Gasaußen- und innendruckkabel. Im Gasinnendruckkabel werden die Hohlräume mittels Druckgas mit hoher elektrischer Festigkeit (z.B. Stickstoff) ausgefüllt. Bei Gasaußendruckkabeln wird ein Massekabel in einem Stahlrohr

---

<sup>14</sup> Siehe Kap. 2.1.3

verlegt. Die Isolierung ist durch einen Bleimantel vom Druckmittel getrennt. Die mögliche Hohlraumbildung wird durch äußeren Druck auf den Bleimantel verhindert.

Als Antwort auf die Forderung nach leichten, einfach zu montierenden und wartungsfreien Kabeln begann man 1940 Kunststoff als Isolierung einzusetzen. Bei den ersten Kunststoffkabeln wurde als Isolierung PVC verwendet. Auf der Niederspannungsebene noch heute im Gebrauch, wurden sie auf der Mittel- und Hochspannungsebene wegen hoher dielektrischer Verluste (siehe 2.5.1) durch Polyethylen (PE) ersetzt. Abermals wurde die geringe Beständigkeit der PE-Isolierung gegen Teilentladungen zum Problem. So entwickelte man vernetztes Polyethylen<sup>15</sup>, welches ab 1970 für Mittelspannungskabel eingesetzt wurde und mittlerweile erfolgreich für Hochspannungskabel eingesetzt wird. (Küchler 2005, S. 427ff; VDEW 2007, S. 15ff; Woschitz 2008/09, S. 1ff)

#### **4.2. Kunststoffkabel (VPE)**

Nach anfänglich ungewöhnlich hohen Ausfallsraten bei der ersten Generation kunststoffisolierter Mittelspannungskabel (um 1980), wurde das Herstellverfahren weiterentwickelt, die Reinheit der Isolierung erhöht und Langzeitprüfungen eingeführt. (VDEW 2007, S. 16f)

Kunststoffisolierte Kabel besitzen gegenüber Öl- und Gasdruckkabeln mehrere Vorteile. Elektrotechnisch punkten die VPE-Kabel durch eine geringere Ladeleistung und durch niedrigere dielektrische Verluste. (siehe 2.5.1 und 2.4.2) Das feste Dielektrikum macht keine Öl- oder Druckgassysteme zur Unterdrückung von Teilentladungen erforderlich. Kunststoffisolierte Kabel stellen daher auch keine direkte Gefahr für die Umwelt dar. Durch das geringere Gewicht vereinfachen sich die Verlegung und die Montage.

Bedingt durch die großen Leiterquerschnitte bei Hoch- und Höchstspannung werden ausschließlich Einleiterkabel eingesetzt. Dreileiterkabel wären nicht mehr biegsam und daher auch nicht mehr transportfähig.

Im Gegensatz zu den anderen Systemen, die im geschichtlichen Überblick kurz angeschnitten wurden, besitzen VPE – Kabel einen einfachen Aufbau.

##### **Aufbau eines VPE – Energiekabels**

Bei Höchstspannungskabeln kann sich der Käufer in Absprache mit dem Hersteller den Aufbau des Kabels selbst zusammenstellen. Dies liegt daran, dass der Kabelaufbau dieser Spannungsebene nicht standardisiert ist. Der Schichtenaufbau folgt jedoch einem Grundprinzip, welches nachfolgend erläutert wird.

Ein Kabel besteht im wesentlichen aus drei Elementen: dem Leiter, der Isolierung und dem Schutzmantel. Zusätzlich gibt es noch mehrere Schichten, die jeweils eine bestimmte elektrotechnische Aufgabe übernehmen.

---

<sup>15</sup> Der lineare Aufbau der thermoplastischen Polyethylene kann durch räumliches Vernetzen verändert werden. VPE schmilzt nicht mehr, sondern erweicht ähnlich wie ein Elastomer. Aus diesem Grund kann es thermisch hoch beansprucht werden. (Dominighaus et al. 2008, S. 224)

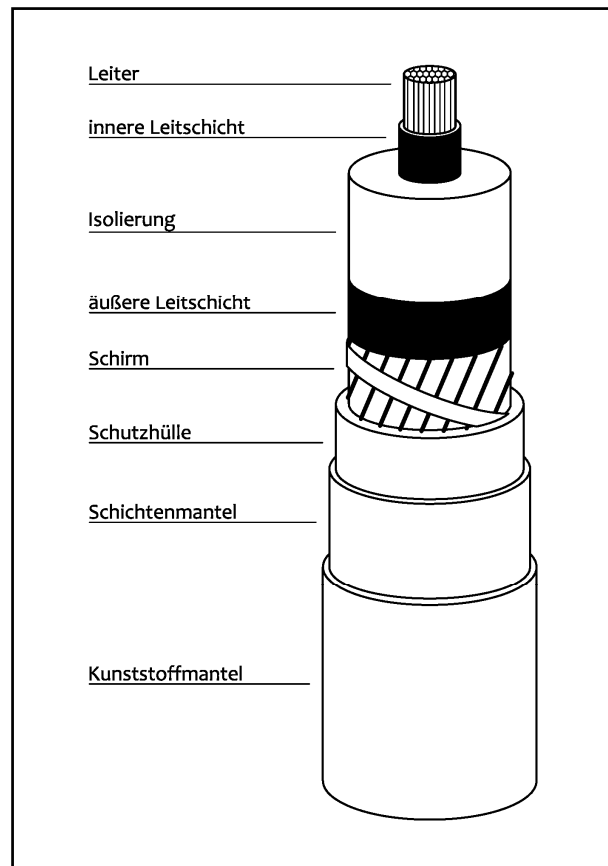


Abb. 4.1: Schematischer Aufbau eines Einleiterkabels  
(Küchler 2005, S. 429)

### Leiter

Der Leiter dient der Stromleitung, als Leitermaterial wird Kupfer oder Aluminium verwendet. Im Hoch- und Höchstspannungsbereich besteht der Leiter aus mehreren Drähten, die miteinander verseilt werden. Dabei werden die einzelnen Drähte verdichtet, um einen kleineren Durchmesser zu erzielen. Bei großen Querschnitten wird zur Verringerung des Wechselstromwiderstands<sup>16</sup> der Leiter aus gegeneinander isolierten Teileleitern aufgebaut (Millikenleiter, siehe Kap. 4.4.2). (VDEW 2007, S. 19ff) Als Leiterquerschnitt wird der elektrisch wirksame und nicht der geometrische Querschnitt angegeben.

### Innere Leitschicht

Auf den Leiter wird (durch Zusatz von Ruß) eine schwach leitende Schicht, die sogenannte innere Leitschicht, aufgebracht. Diese sorgt für eine glatte Grenzfläche, indem sie eventuelle Materialunebenheiten ausgleicht. Dadurch wird das elektrische Feld, das an der Leiteroberfläche den höchsten Wert annimmt, homogenisiert. Die innere Leitschicht verhindert Teilentladungen<sup>17</sup>, die zu Feldverdichtungen und in weiterer Folge zur Isolationsschädigung führen können. (Heuck et al. 2007, S. 241; VDEW 2007, S. 24)

<sup>16</sup> Der Wechselstromwiderstand setzt sich aus dem Ohm'schen Widerstand und aus dem Widerstand bedingt durch die Blindleistung zusammen.

<sup>17</sup> Unter Teilentladungen versteht man kurzfristige Überschreitungen der Durchschlagsfestigkeit der Isolierung. Kommt es, z.B. durch einen Materialfehler in der Isolierung, an einer Stelle öfters zu Teilentladungen, so kann dies in weiterer Folge einen Durchschlag, und somit den Ausfall des Kabels bedeuten.

### **Isolierung**

Die Isolierung dient dazu, den spannungsführenden Leiter gegen seine benachbarten Leiter bzw. gegen Erde zu isolieren. Bei VPE-Kabeln wird als Isolierung vernetztes Polyethylen eingesetzt. Dabei handelt es sich um einen thermoelastischen Kunststoff mit hervorragender elektrischer Festigkeit. Jedoch können sich kleine Inhomogenitäten in der Isolierung zu Fehlerstellen entwickeln, die im schlimmsten Fall zum Durchschlag und damit zum Versagen des Kabels führen. Es werden daher hohe Anforderungen an die Fertigungstechnik gestellt.

Die Dauertemperaturbeständigkeit von VPE liegt bei 90°C. Im Kurzschlussfall darf die Temperatur kurzfristig 250°C erreichen. Das Material gilt als brennbar. Bei Hoch- und Höchstspannungskabeln stellt die Nennspannung das maßgebende Kriterium für die Schichtdicke dar. (VDEW 2007, S. 24ff)

### **Äußere Leitschicht**

Die äußere Leitschicht entspricht technisch der inneren Leitschicht. Sie ist mit dem nachfolgend aufgetragenen Schirm leitend verbunden und sorgt dafür, dass der Isolierstoff elektrisch gleichmäßig belastet wird. Die drei Schichten (äußere- und innere Leitschicht, sowie die Isolierung) können mit modernen Anlagen in einem Arbeitsgang extrudiert<sup>18</sup> werden. Dadurch wird eine fehlerfreie Verbindung der Schichten gewährleistet. Um die Leitfähigkeit der äußeren und inneren Leitschichten herzustellen, wird dem Material Ruß beigemischt. (VDEW 2007, S. 39f)

### **Schirm**

Der elektrische Schirm eines Kabels besteht aus einer Kombination leitfähiger, metallener Schichten. Er setzt sich aus Kupferdrähten mit Querleitwendeln oder -bändern zusammen, die um die äußere Leitschicht gelegt sind. Durch die leitende Verbindung mit der äußeren Leitschicht und eventuell vorhandenen Polsterschichten erzwingt der Schirm in diesen Schichten Erdpotential. Damit sorgt er für die Begrenzung des elektrischen Feldes, es tritt nur noch zwischen innerer und äußerer Leitschicht auf. Weiters dient der Schirm der Fortleitung von Ableit- und Fehlerströmen, sowie dem elektrischen Berührungsschutz. (VDEW 2007, S. 40; Woschitz 2008/09, S. 5)

### **Bewehrung**

Grundsätzlich werden Kunststoffkabel ohne Bewehrung hergestellt. Bei Auftreten von größeren Zugspannungen, z.B. bei Verlegung in Rohrsystemen oder bei Seekabeln sind Bewehrungen aus Stahldrähten entsprechend der Beanspruchung vorzusehen. (VDEW 2007, S. 42f)

### **Schutzhülle**

Die Schutzhülle befindet sich zwischen Schirm und Mantel<sup>19</sup>. Sie dient bei Kunststoffkabeln als Abdichtung gegen Wasser. Um die Längswasserdichtheit des Kabels herzustellen, werden im Bereich des Schirms quellfähige Stoffe (Pulver oder Bänder) angeordnet. (VDEW 2007, S. 23 und S. 56)

---

<sup>18</sup> Als Extrusion bezeichnet man ein Verfahren zum Umformen von Kunststoffmassen. Das granulatförmige Ausgangsmaterial wird in einem Extruder homogenisiert, plastifiziert, verdichtet, erwärmt und durch die formgebende Düse des Spritzkopfes gepresst. (Brockhaus 2006)

<sup>19</sup> Bei bewehrten Kabeln unterscheidet man eine innere und eine äußere Schutzhülle. Die innere Schutzhülle befindet sich zwischen Bewehrung und Mantel, die äußere Schutzhülle liegt über der Bewehrung. (VDEW 2007, S. 43)



### **Schichtenmantel**

Anstelle eines Metallmantels, wie er z.B. bei papierisolierten Kabeln erforderlich ist, kann man bei Kunststoffkabeln einen sogenannten Schichtenmantel anordnen. Als Diffusionssperre sorgt er für die Quersperre des Kabels. Er besteht aus Aluminium oder Kupferfolie und wird mit dem Kunststoffmantel fest verklebt. (VDEW 2007, S. 41)

### **Kunststoffmantel**

Der Kunststoffmantel dient dem äußeren Schutz des Kabels vor mechanischer Beanspruchung und Feuchtigkeit. Da Kunststoff jedoch nicht diffusionsdicht ist, werden die eben genannten Schichten (Schutzhülle und Schichtenmantel) notwendig. Auf der Hoch- und Höchstspannungsebene besteht der Mantel meist aus Polyethylen (PE). (VDEW 2007, S. 42) Bei Kunststoffkabeln hat der Mantel einen beträchtlichen Einfluss auf die Lebensdauer des Kabels. (Woschitz 2008/09, S. 5)

## **4.3. Kabelgarnituren**

Als Garnituren bezeichnet man die Verbindungsmittel in der Kabeltechnik. Dabei wird bei den Kabeln im Hoch- und Höchstspannungsbereich zwischen Muffen und Endverschlüssen unterschieden.

### **4.3.1. Verbindungsmuffen**

Muffen stellen die Verbindung zwischen zwei Kabelstücken her. Die Produktionslänge der Kabel könnte, bedingt durch die Linienfertigung, theoretisch unendlich werden. Jedoch wird sie durch die Abmessungen, die die Kabeltrommeln für den Transport annehmen und das zulässige Transportgewicht bisher auf maximal 1000 m beschränkt.

Die Muffe muss bei der Verbindung der Kabelabschnitte gleichzeitig mehrere Funktionen erfüllen. Neben der Hauptaufgabe, die Leiter miteinander zu verbinden, muss sie diese auch gegen die benachbarten Leiter und gegen die Erde isolieren. Um die Kabel verbinden zu können, wird an beiden Enden der Schichtenaufbau bis zum Leiter entfernt. Im ungestörten Kabel stellt sich zwischen der inneren und der äußeren Leitschicht ein elektrisches Feld ein. Durch die Muffe wird diese homogene Verteilung gestört und muss durch spezielle Einbauten bestmöglich wieder hergestellt werden. Um Teilentladungen<sup>17</sup> in der Muffe zu verhindern, muss diese natürlich auch ausreichenden Schutz vor Feuchtigkeit bieten. (Herold 2001, S. 244; Woschitz 2008/09, S. 28f)

Generell wird auf der Hoch- und Höchstspannungsebene, bezogen auf die Schirmbehandlung, zwischen zwei Systemen unterschieden. Bei der konventionellen Verbindungsmuffe wird der Schirm durchverbunden. Im Gegensatz dazu kommt es bei der Cross-Bonding-Muffe zu einer Potenzialtrennung der Schirme. Der elektrotechnische Hintergrund beider Systeme wird im Kapitel 4.4.2 erläutert. Am Beispiel einer Aufschiebemuffe, die für beide Systeme geeignet ist, wird der technische Aufbau einer Muffe gezeigt.

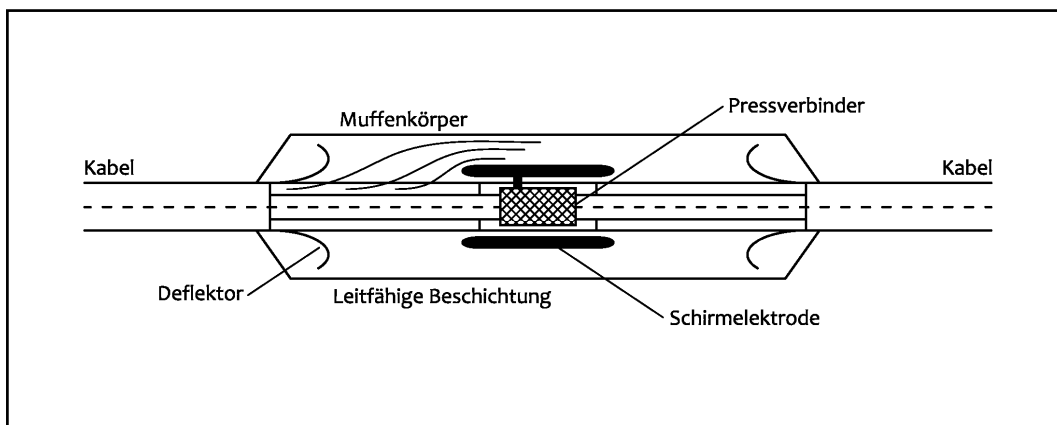


Abb. 4.2: Aufbau einer VPE – Aufschiebemuffe (schematisch)  
(Küchler 2005, S. 432)

Bei einer Aufschiebemuffe (siehe Abb. 4.2) muss zur Montage zuerst der vorgefertigte Muffenkörper zur Gänze über ein Kabelende geschoben werden. Die Leiter werden mittels Pressverbinder zugfest verbunden. Die zugfeste Verbindung erfordert den Einsatz von speziellen Verbindungsmitteln (je nach System z.B. Schrauben oder Bolzen). Diese wiederum führen durch ihre Form zu Unstetigkeitsstellen im elektrischen Feld, welche zu Teilentladungen und Durchschlägen führen können. Um dies zu verhindern, wird die Schirmelektrode über dem Pressverbinder angeordnet. Damit sich im Muffenbereich beherrschbare Feldstärken ausbilden, werden sogenannte Deflektoren eingesetzt. Beim Muffenhersteller werden diese bereits gemeinsam mit der Schirmelektrode in den Muffenkörper (bestehend aus leitfähigem Elastomer) eingegossen. Die äußere Leitschicht des Kabels wird durch eine leitfähige Beschichtung im Muffenkörper fortgesetzt. Als letzter Schritt wird der Muffenkörper über die Leiterverbindung geschoben. Dabei ist zu beachten, dass die Trennfuge zwischen der Kabelisolierung und dem Muffenkörper hoch belastet wird und dementsprechend sorgfältig ausgeführt werden muss. (Küchler 2005, S. 433)



Abb. 4.3: Steckverbindungsmuffe  
(Prysmian 2009)

Die Entwicklung am Gebiet der Verbindungstechnik geht beständig weiter in Richtung einfach und schnell zu montierender Muffen. Der Markt bietet unter anderem Steckverbindungen (siehe Abb. 4.3), deren kraftschlüssige Verbindung lediglich durch Einstecken der beiden Kabelenden erfolgt. Die Kabelenden werden bereits im Werk vorbereitet. (Prysmian 2009) Der technische

Aufbau entspricht dem in Abb. 4.2 zuvor erläuterten. (In Abb. 4.2 wird die mechanische Schutzhülle sowie die Verbindung der Schirme nicht dargestellt.)

Ein Einsatz von Übergangsmuffen findet auf der Hoch- und Höchstspannungsebene bisher nur zwischen unterschiedlichen Leitermaterialien (Aluminium und Kupfer) sowie zwischen verschiedenen Querschnitten statt. Abzweigemuffen werden in dieser Spannungsebene nicht angewandt. Grundsätzlich eignen sich die Muffen für eine direkte Erdverlegung. (KEMA 2008, S. 55f) Da Muffen zusätzlichen Aufwand und eine Schwachstelle im System darstellen, sollen so wenig wie möglich angeordnet werden. Durch alternierende Belastung der Kabel und der damit verbundenen Längsausdehnung kann es zu Schäden an den Muffen kommen. Diese gilt es durch geeignete Maßnahmen bei der Kabellegung zu verhindern. (KEMA 2008, S. 192)

#### 4.3.2. Endverschlüsse

Der Übergang vom Kabel auf oberirdische, elektrische Betriebsmittel, wie z.B. eine Schaltanlage oder eine Freileitung, wird mittels Endverschlüssen realisiert. Dabei müssen Endverschlüsse im Grunde dieselben Aufgaben (Feldsteuerung, Schutz der Kabelader, Isolierung gegenüber geerdeten Teilen,..) übernehmen können wie Muffen. Der Unterschied liegt darin, dass sie die sichere Durchführung von der festen Isolierung zur Isolierung mittels Luft herstellen müssen. (Herold 2001, S. 244) Da man auch bei Endverschlüssen mit vorgefertigten Isolierkörpern arbeitet und diese an Portalen befestigt werden, wird an dieser Stelle nicht näher auf den Aufbau eingegangen.

### 4.4. Verluste, Übertragungsleistung und Betriebsart einer Kabelanlage

Aufbauend auf dem Kapitel 2.4 soll an dieser Stelle näher auf die Verluste am Kabel und die daraus resultierende Übertragungsleistung eingegangen werden.

#### 4.4.1. Spannungsabhängige Kabelverluste

Im Gegensatz zu Freileitungen, bei denen der Ableitungsbelag (Kap. 2.5.1) eine untergeordnete Rolle spielt, muss er bei Kabelanlagen berücksichtigt werden. Die durch den Stromtransport erwärmte Leitung setzt den Verlustfaktor der Isolierung herab, dadurch kommt es zu einer Erhöhung der dielektrischen Verluste. Um dies zu verhindern und weiters die Lebensdauer des Kabels nicht herabzusetzen, dürfen die zulässigen Betriebstemperaturen nicht überschritten werden. (Heuck et al. 2007, S. 245) Bei VPE-Kabeln beträgt die dauerhaft zulässige Betriebstemperatur derzeit 90°C. Wird diese Temperatur eingehalten, kommt es zu keinem gravierenden Anstieg der dielektrischen Verluste. Die Gefahr der vorzeitigen Alterung des Isoliermaterials besteht eben so wenig. (Noack 2005, S. 19)

#### 4.4.2. Stromabhängige Kabelverluste

Bei großen Leiterquerschnitten (ab 1000 mm<sup>2</sup>) kann es zum Effekt der Stromverdrängung<sup>20</sup> im Leiter kommen. Dieser sogenannte **Skin-Effekt** bewirkt, dass bei einem von Wechselstrom

---

<sup>20</sup> Die Stromverdrängung wird durch auftretende Wirbelströme im Leiter hervorgerufen. Diese entstehen durch das zeitlich veränderliche Magnetfeld, bedingt durch den Wechselstrom. (Kindler & Haim 2006, S. 194)

durchflossenen Leiter die Stromdichte im äußeren Bereich des Leiters höher ist als im inneren. Da die Stromdichte über den Querschnitt nicht mehr konstant ist, erhöhen sich die Verluste. (Kindler & Haim 2006, S.194) Um die Verluste, bedingt durch den Skin-Effekt, zu verringern, werden bei großen Querschnitten sogenannte Millikenleiter eingesetzt. Diese bestehen aus gegeneinander isolierten Teilleitern, bei denen sich der Effekt der Stromverdrängung nicht so stark auswirken kann. (VDEW 2007, S. 21) Neben der Stromverdrängung im Leiter kann es auch zwischen benachbarten Leitern zur Stromverdrängung kommen, man spricht dann vom **Proximity-Effekt**. Um diesen Einfluss zu vermindern, sollen die Achsabstände der nebeneinander verlegten Systeme mindestens den doppelten Abstand der Leiterabstände haben. (Herold 2001, S. 304)

Zu den bereits bekannten Ohm'schen Verlusten, die vom Leiter abhängen, kommen beim Kabel noch die **Schirm-** bzw. die **Bewehrungsverluste** hinzu. Diese entstehen ebenfalls durch die Wirbelströme<sup>20</sup> im Leiter. Durch Auskreuzen der Schirme (Abb. 4.4) an den Kabelmuffen lassen sich die Schirmverluste herabsetzen. (Herold 2001, S. 303; Oeding & Oswald 2004, S. 335)

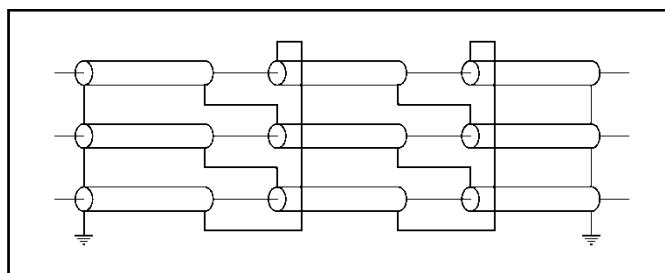


Abb. 4.4: Auskreuzungsstrecke (cross bonding)  
(Herold 2001, S. 304)

Das Auskreuzen der Kabelschirme muss mittels speziellen Muffen (cross-bonding-Muffen) erfolgen, die ein isoliertes Zwischenstück besitzen, um die Schirme elektrisch trennen zu können. Ein Auskreuzungsabschnitt wie in Abb. 4.4 dargestellt, besteht aus mindestens drei gleich langen Teilstrecken, die an beiden Enden geerdet sind. Längere Leitungen bestehen aus mehreren Auskreuzungsabschnitten, da diese durch die Fertigungslängen der Kabel beschränkt sind. Der Induktionsstrom im Schirm wird durch das Auskreuzen bis auf einen Reststrom unterdrückt, was zur Erhöhung der Übertragungsfähigkeit beiträgt. (VDEW 2007, S. 111)

Anmerkung: Auch bei der Verlegung eines Reserveleiters (siehe Kap. 3.1.2) können die Schirme ausgekreuzt werden. Näheres dazu siehe Brakelmann 2005, S. 39f.

#### 4.4.3. Abschätzung der maximalen Übertragungsverluste einer Kabelanlage

Zur Veranschaulichung werden die wesentlichen Verlustgrößen eines Kabels abgeschätzt. Als Datengrundlage dient aufgrund der Nachvollziehbarkeit das Benutzerhandbuch von ABB.

Tab. 4.1: Kabeldaten zur Verlustabschätzung

(ABB 2009, Oswald 2007, S. 12,16)

Kunststoffisoliertes Kabel 400 kV		
Einleiterkabel, Kupfer		
effektiver Leiterquerschnitt	Ad	2500 mm <sup>2</sup>
Leiterdurchmesser	d	66 mm
maximale Leitertemperatur	t	90°C
Betriebskapazität	C	0,24 µF/km
Nennspannung	U	380 kV
Betriebsfrequenz (Europa)	f	50 Hz
Verlustfaktor der VPE - Isolierung	tanδ	0,001
Resistanz bei 20°C Leitertemperatur	R	0,0072 Ω/km
Temperaturkoeffizient von Kupfer	α	0,00393 1/°C

#### Ohm'scher Widerstand

Der Ohm'sche Widerstand ist von der Leitertemperatur abhängig. Da im Betrieb Temperaturen von bis zu 90°C auftreten können, muss der angegebene Referenzwert umgerechnet werden. (Böge & Plaßmann 2007, S. 83)

$$R_t = R_{t_0} \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)] \quad [\Omega/\text{km}] \quad (4.1)$$

- t      aktuelle Temperatur [°C]
- t<sub>0</sub>    Bezugstemperatur [°C]
- R<sub>t</sub>    Widerstand bei der Temperatur t [Ω]
- R<sub>t<sub>0</sub></sub>    Widerstand bei der Bezugstemperatur t<sub>0</sub> [Ω]
- α      Temperaturkoeffizient [1/°C]

Für eine Leitertemperatur von 90°C ergibt sich aus Gleichung (4.1), basierend auf den Werten aus Tab. 4.1, bei einer Bezugstemperatur von 20°C der Ohm'sche Widerstand zu:

$$R_t = 0,0072 \cdot [1 + 0,00393 \cdot (90 - 20)]$$

$$R_t = 0,0092 \text{ [}\Omega/\text{km]}$$

#### Induktiver Widerstand

Der Induktive Widerstand ist von der Anordnung der Leiter und dem Leiterabstand abhängig. Der Induktivitätsbelag errechnet sich nach ABB (2009, S. 23) aus:

$$L = 0,05 + 0,2 \cdot \ln \left( \frac{K \cdot s}{r_c} \right) \quad [\text{mH/km}] \quad (4.2)$$

K Verlegungsfaktor [-]  
s Leiterachsenabstand [mm]  
r<sub>c</sub> Leiterradius [mm]

Bei flacher Verlegung der Kabel beträgt der Verlegungsfaktor K = 1,26, der Leiterabstand wird mit 400 mm angenommen. Der Induktivitätsbelag errechnet sich nach Gleichung (4.2) zu:

$$L = 0,05 + 0,2 \cdot \ln \left( \frac{1,26 \cdot 400}{33} \right)$$

$$L = 0,5952 \text{ [mH/km]}$$

In weiterer Folge errechnet sich der induktive Widerstand aus:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{L}{1000} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (4.3)$$

L Induktiver Leitungsbelag [mH/km]  
f Übertragungsfrequenz [Hz]

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \frac{0,5952}{1000}$$

$$X_L = 0,1870 \text{ [}\Omega/\text{km]}$$

### Kapazität

Die Betriebskapazität C wird vom Hersteller (ABB 2009, S. 22) mit **0,24 [μF/km]** übernommen.

### Ableitungswiderstand

Der Ableitungswiderstand hängt von der Übertragungsspannung und dem Verlustfaktor der Isolierung ab. Nach ABB (2009, S. 23) errechnet er sich aus:

$$G = \frac{U^2}{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \tan\delta \quad [\text{W/km}] \quad (4.4)$$

U Nennspannung [kV]  
f Übertragungsfrequenz [Hz]  
C Betriebskapazität [μF/km]  
tanδ Verlustfaktor [-]

Aus Gleichung (4.4) ergibt sich bei einem tanδ von 0,001 (Oswald 2007, S.12) der Ableitungswiderstand zu:

$$G = \frac{380^2}{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,24 \cdot 0,001$$

$$G = 3630 \text{ [W/km]}$$

Zusammenfassend werden alle auftretenden, das Kabel charakterisierenden Kennwerte in Tab. 4.2 angeführt.

Tab. 4.2: Kabelkennwerte als Grundlage für die Verlustabschätzung

Kunststoffisoliertes Kabel 400 kV Einleiterkabel, Kupfer	
Leiterquerschnitt	2500 mm <sup>2</sup>
ohm'scher Widerstand R	0,0092 Ω/km
induktiver Widerstand X <sub>L</sub>	0,1870 Ω/km
Betriebskapazität C <sub>L</sub>	0,24 μF/km
Ableitungsbelag G	3630 W/km

### Übertragungsstrom

Der Übertragungsstrom einer Kabelanlage wird von ABB (2009, S. 10) mit 1875 A angegeben. Dabei werden von ABB folgende Randbedingungen als Ausgangsbasis für die Abschätzung des Übertragungsstromes angegeben:

- 3 Einleiterkabel mit je 2500 mm<sup>2</sup> effektivem Leiterquerschnitt,
- flache Verlegung in Erde bei einer Umgebungstemperatur von 20°C,
- Verlegetiefe 1,00 m bei einem Wärmewiderstand von 1 mK/W,
- Achsabstand der Leiter: 210 mm (De + 70 mm),
- ausgekreuzte Kabelschirme (cross bonding),
- maximale Leitertemperatur von 90°C

Abweichungen von den Nennbedingungen werden durch Anpassungsfaktoren ( $f_t$ ,  $f_s$ ,  $f_a$ ) berücksichtigt (ABB 2009, S. 11f). Folgende Anpassungen werden vorgenommen:

- Erhöhung der Verlegetiefe auf 1,50 m ( $f_t = 0,95$ )
- Vergrößerung des Achsabstandes auf 400 mm ( $f_s = 1,11$ )
- Berücksichtigung eines zweiten Kabelsystems im Abstand von 2000 mm ( $f_a = 0,96$ )

Die Erhöhung der Verlegetiefe sowie die Anordnung eines zweiten Systems bewirken eine Reduktion des Übertragungsstromes. Wohingegen eine Vergrößerung der Achsabstände zu einer Steigerung führt. Der Übertragungsstrom lässt sich laut Hersteller mit  $1875 \cdot 0,95 \cdot 1,11 \cdot 0,96 = 1898$  A abschätzen.

### Thermische Grenzleistung des Kabels:

Aus systemtechnischen Gründen darf das Kabel im Betriebszustand 90°C Leitertemperatur nicht überschreiten. Diese Randbedingung beschränkt die übertragbare Leistung. Die thermische Grenzleistung errechnet sich aus:

$$S_{ges} = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \quad [\text{KVA}] \quad (4.5)$$

$S_{ges}$  thermische Grenzleistung [KVA]  
 $I$  Bemessungsstrom [A]  
 $U$  Nennspannung [kV]

Nach Gleichung (4.5) ergibt sich die thermische Grenzleistung zu:

$$S_{ges} = \sqrt{3} \cdot 1898 \cdot 380 \text{ KVA}$$

$$S_{ges} = 1249 \text{ [MVA]}$$

Die Berechnung der Verluste erfolgt für ein Kabelsystem:

#### Ohm'sche Verluste:

Die Ohm'schen Verluste errechnen sich aus:

$$P_{V_{max}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad [\text{W/km}] \quad (4.6)$$

$P_{V_{max}}$  Ohm'sche Verlustleistung [W/km]  
 $I$  Bemessungsstrom [A]  
 $R$  ohm'scher Widerstand [ $\Omega$ /km]

Nach Gleichung (4.6) errechnen sich die Ohm'schen Verluste zu:

$$P_{V_{max}} = 3 \cdot 1898^2 \cdot 0,0092 \text{ W/km}$$

$$P_{V_{max}} = 99,43 \text{ KW/km}$$

Die Ohm'schen Verluste betragen bei einer angenommenen Leitungslänge von 100 km **9,94 MW**. Im Vergleich zur thermischen Grenzleistung (1249 MVA) entspräche dies ca. **0,80 %**.

#### Dielektrische Verluste:

Basierend auf Tab. 4.2 errechnen sich die dielektrischen Verluste zu:

$$P_{V_{\delta}} = 3 \cdot 3630 \text{ W/km}$$

$P_{V_{\delta}}$  dielektrische Verlustleistung [W/m]

$$P_{V_{\delta}} = 10,89 \text{ KW/km}$$

Bei einer angenommenen Leitungslänge von 100 km betragen die dielektrischen Verluste **1,09 MW**. Im Vergleich zur thermischen Grenzleistung (1249 MVA) entspräche dies ca. **0,09 %**.

Die Ermittlung der Blindleistungsverluste erfolgt im nächsten Kapitel.



#### 4.4.4. Blindleistungsverluste bei Kabelanlagen

Der induktive Widerstand eines Kabels hängt von der Art der Verlegung und dem Leiterabstand ab. Bedingt durch die geringen Leiterabstände ist der induktive Widerstand eines Kabels niedriger als der einer Freileitung. Jedoch ergeben sich bei Kabeln große Kapazitätsbeläge, die durch die Isolierung zusätzlich erhöht werden.

##### Blindleistungsverluste:

Die induktive Blindleistung errechnet sich aus:

$$Q_L = 3 \cdot I^2 \cdot X_L \quad [\text{var/km}] \quad (4.7)$$

$Q_L$  induktive Blindleistung [var/km]

$I$  Bemessungsstrom [A]

$X_L$  induktiver Widerstand [ $\Omega$ /km]

Nach Gleichung (4.7) errechnen sich die Blindleistungsverluste bei Nennstrom (Voll-Last) zu:

$$Q_L = 3 \cdot 1898^2 \cdot 0,1870 \text{ var/km}$$

$$Q_L = 2,02 \text{ Mvar/km}$$

Die kapazitive Blindleistung bei Nennspannung errechnet sich aus:

$$Q_C = U_N^2 \cdot \omega \cdot C_L \quad [\text{var/km}] \quad (4.8)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$Q_C$  kapazitive Blindleistung [var/km]

$I$  Bemessungsstrom [A]

$C_L$  Kapazität [ $\mu$ F/km]

$\omega$  Kreisfrequenz

$$Q_C = 380^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,24 \cdot 10^{-6} \text{ Mvar/km}$$

$$Q_C = 10,89 \text{ Mvar/km}$$

Zusammenfassend werden die errechneten Verluste in Tab. 4.3 dargestellt.

Tab. 4.3: Aufstellung der Verluste

<b>Kunststoffisoliertes Kabel 400 kV</b>	
<b>Einleiterkabel, Kupfer</b>	
Leiterquerschnitt	2500 mm <sup>2</sup>
ohm'sche Verluste $P_{V_{max}}$	99,43 KW/km
Dielektrische Verluste $P_{V\delta}$	10,89 KW/km
induktive Blindleistung $Q_L$	2,02 Mvar/km
kapazitive Blindleistung $Q_C$	10,89 Mvar/km

### Kompensationsverluste

Anknüpfend an die Abschätzung der Übertragungsverluste wird an dieser Stelle überschlagsmäßig die erforderliche Kompensationsleistung im Falle der leerlaufenden Leitung erörtert. Sollte es zu einem Leerlauf der Leitung kommen, so muss die gesamte kapazitive Blindleistung kompensiert werden. Aufgerechnet auf eine 100 km lange Leitung beträgt die zu kompensierende Ladeleistung 1089 Mvar. Bei Einsatz von Spulen mit einer Kompensationsleistung von 200 Mvar, unter Einhaltung des  $n - 1$  Kriteriums, werden auf 100 km sechs Spulen notwendig. Tritt der volle Übertragungsstrom (1898 A) auf, reduziert sich die zu kompensierende Blindleistung auf 887 Mvar (kapazitiv).

Durch den Einsatz von Kompensationsspulen treten zusätzliche Verluste auf. Anknüpfend an die Abschätzung der Spulenzahl werden die Kompensationsverluste abgeschätzt:

Bei Wirkleistungsverlusten der Ladestromkompensationsspulen von 1,5 kW/Mvar (KEMA 2008, S. 185) ergeben sich (bei Leerlauf der Leitung) für die ermittelten sechs Spulen (je 200 Mvar) Kompensationsverluste von 1,8 MW. Tritt der Bemessungsstrom auf, so reduzieren sich die Kompensationsverluste auf 1,5 MW. Vergleicht man diesen Wert mit den gleichzeitig auftretenden Ohm'schen Verlusten (9,94 MW), betragen die Kompensationsverluste ca. 15 %. In Relation zur thermischen Grenzleistung (1249 MVA) betragen die Kompensationsverluste 0,12%.

#### 4.4.5. Übertragungsleistung eines Kabels

Im unternatürlichen Betrieb prägt sich das kapazitive Verhalten der Leitung besonders stark aus. Der Betrieb eines Kabels mit der (angestrebten) natürlichen Leistung (Kap. 2.6.1) die mit ca. 3000 MW bestimmt werden kann, ist aus thermischen Gründen ohne zusätzliche Maßnahmen nicht erreichbar. (Oswald 2007, S. 14) Die Übertragungsleistung wird durch die maximal erlaubte Betriebstemperatur begrenzt. Weiters hängt die Belastbarkeit des Kabels von der Verlegeart, den Umgebungsbedingungen und den Betriebsbedingungen ab.

#### 4.4.6. Betriebsart eines Kabels

Die Betriebsart eines Kabels wird durch dessen Belastung (Belastungsgrad) gekennzeichnet. Unterschieden wird zwischen dem Dauerbetrieb des Kabels und der sogenannten EVU-Last. Im Dauerbetrieb wird das Kabel durchgehend mit der Höchstlast betrieben, die Belastung liegt somit bei 100%. Die sogenannte EVU – Last wird als normale Betriebsart eines Kabels bezeichnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Kabel im Mittel eine Belastung von 70% der Maximallast erfährt. Der Belastungsgrad errechnet sich aus dem Verhältnis Durchschnittslast zu Maximallast.

Im Falle der EVU-Last ist  $m = 0,70$ , bei Dauerlast beträgt der Belastungsgrad 1,0. (Knies & Schierack 1999, S. 76)

## 4.5. Erwärmung des Kabels

Beim Betrieb einer Kabelanlage wird das nahe Umfeld durch Stromwärmeverluste beeinflusst. Hervorgerufen wird die Verlustwärme durch die Ohm'schen Verluste des Leiters (Kap. 2.5.2), die dielektrischen Verluste der Isolierung (Kap. 2.5.1), sowie durch Induktions- und Wirbelströme in den metallischen Kabelmänteln (Kap. 4.7.1).

Die Belastbarkeit des Kabels hängt wesentlich von der Abfuhr der Verlustwärme ab. Daher muss bei allen bautechnischen Maßnahmen besonders auf die gesicherte Wärmeabfuhr geachtet werden. Wie bereits im Kapitel 4.10.1 angeschnitten, spielt die Wärmeentwicklung der Kabel eine bedeutende Rolle für das Alterungsverhalten der Isolierung.

Die Übertragung der Wärme an die Umgebung hängt von der Art der Verlegung ab.

### 4.5.1. Kabelerwärmung bei direkter Erdverlegung

Bei direkter Erdverlegung der Kabel (Kap. 6.1) erfolgt der Transport der Verlustwärme durch Wärmeleitung im Erdreich. In Abb. 4.5 wird das entsprechende Wärmeersatzschaltbild dargestellt. Vom Leiter bis zur unbeeinflussten Umgebungstemperatur (Erdreich oder Luft) muss der Wärmefluss mehrere Schichten mit unterschiedlichen Wärmewiderständen überwinden (Knies 1998, S. 286f). Da der Schichtenaufbau der Kabel im Höchstspannungsbereich nicht standardisiert ist, können die Wärmeleitfähigkeiten der Kabel von unterschiedlichen Herstellern differieren. Der spezifische Wärmeleitwiderstand der VPE – Isolierung ( $\sigma_{VPE}$ ) wird mit 2,50 mK/W angegeben (Flosdorff 2005, S. 11). Aus dem Kehrwert des spezifischen Wärmeleitwiderstandes errechnet sich die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{VPE}$  zu 0,40 W/mK.

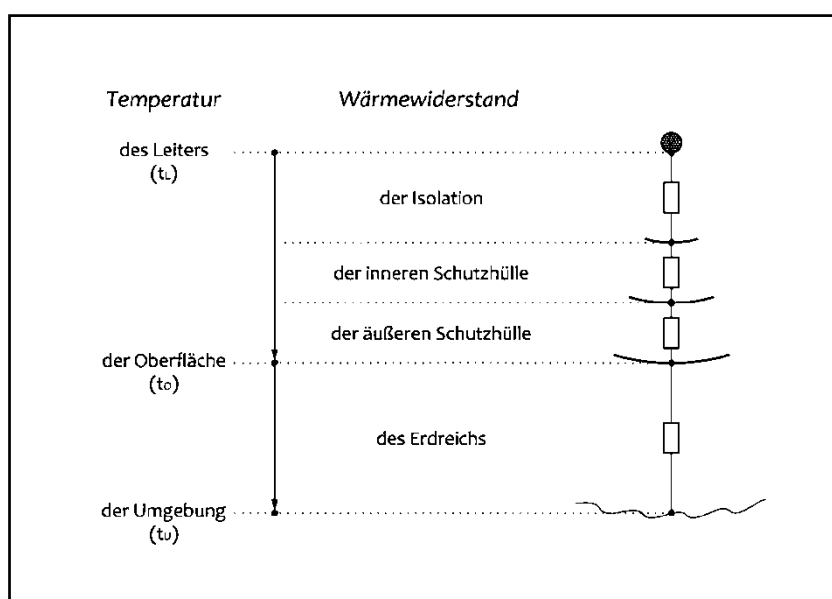


Abb. 4.5: Wärmeersatzschaltbild für ein erdverlegtes Kabel  
(Schlabach 2003, S. 211)

In Abb. 4.6 wird schematisch der Temperaturverlauf im Nahbereich eines Kabels gezeigt. Beschränkt durch das Materialverhalten der Isolierung, darf der Leiter eine Maximaltemperatur von 90°C nicht überschreiten. Die Temperatur des Kabelmantels kann, im Falle von Spitzenlasten, Werte von bis zu 75°C annehmen (Uther et al. 2009, S. 67).

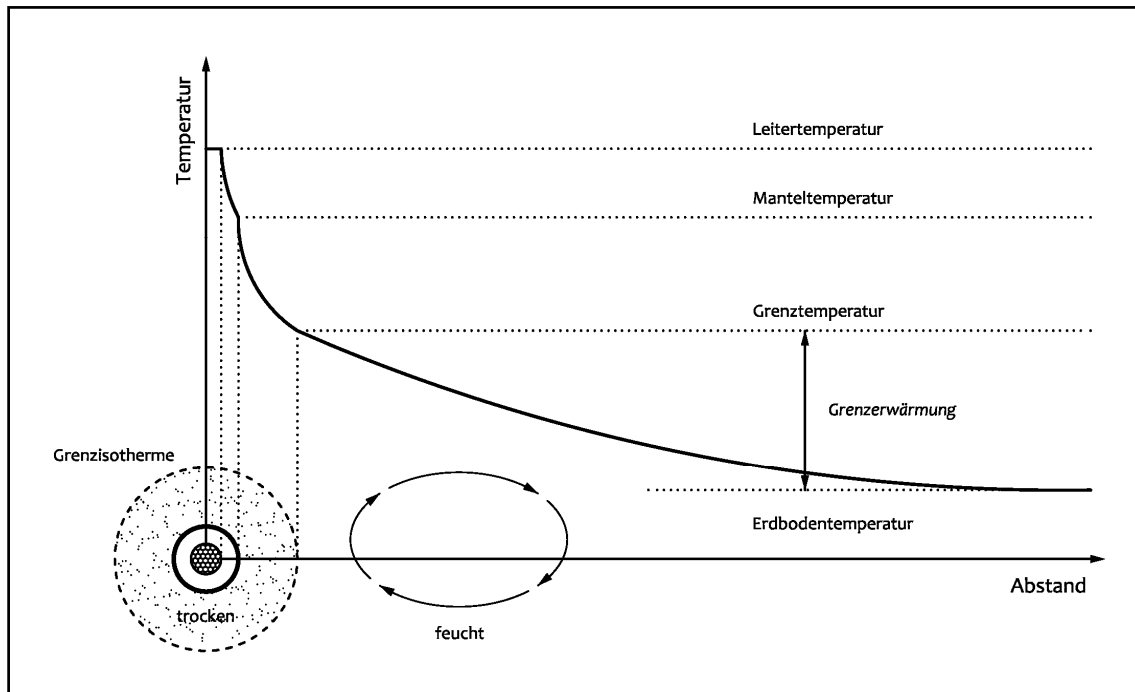


Abb. 4.6: Temperaturverlauf im Nahbereich des Kabels  
(Herold 2001, S. 312)

Wird das n-1 Prinzip (Verlegung von zumindest einem Doppelsystem) eingehalten, so treten laut Hoffmann & Noack (2007, S. 142) geringere Temperaturen auf. Die Manteltemperatur kann, abhängig von der Auslastung, auf 35 - 40°C sinken. Im Nahbereich des Kabels trocknet der Boden durch die thermische Belastung bis zur sogenannten Grensisotherme (siehe Abb. 4.6) aus. Dieser Bereich kann mittels folgender Formel abgeschätzt werden (Schlabach 2003, S. 212):

$$t_{gr} = t_E + [15^\circ\text{C} + (1 - m) \cdot 33,33^\circ\text{C}] \quad [^\circ\text{C}] \quad (4.9)$$

- $t_{gr}$  Temperatur der Grensisotherme [°C]  
 $t_E$  Temperatur des umgebenden Erdreichs [°C]  
 $m$  Belastungsgrad ( $m = 1$  bei Dauerlast,  $m = 0,70$  bei EVU-Last)

Bei einer Umgebungstemperatur von 15°C und einem Belastungsgrad (Kap. 4.4.6) von  $m = 1,00$  errechnet sich die Grensisotherme zu 30°C. Bis zur Grensisotherme sinkt die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs durch die Austrocknung auf ca.  $\lambda = 0,40$  W/mK.

Außerhalb der Grensisotherme erfolgt die Wärmeübertragung im feuchten Boden. Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs hängt von Porosität und Feuchtegehalt des vorliegenden Materials ab (VDI 2006, S. Ded 1). In Tab. 4.4 werden auszugsweise Kennwerte für die Wärmeleitfähigkeit von Böden angegeben. Da es sich beim Erdreich um inhomogenes Material

handelt, können die in der Tabelle angegebenen Kennwerte lediglich als Richtwerte zur Projektierung herangezogen werden. Im Zuge der fortgeschrittenen Planung einer Kabelanlage empfiehlt sich die Feststellung der Wärmeleitfähigkeiten der anstehenden Böden.

Tab. 4.4: Wärmeleitfähigkeit von Böden

Auszug aus (VDI 2006, S. Ded 12)

Wärmeleitfähigkeit	
Material	$\lambda$ [W/mK]
Erdreich: Ton, Schlick	1,50
Erdreich: Sand, Kies	2,00
Kalkstein	1,10 - 2,30
Sandstein	2,30
Granit	2,8
Basalt	3,5
Poröses Gestein z.B. Lava	0,55

Zur Verbesserung der Wärmeabfuhr können die Kabel in thermisch stabilisiertes Bettungsmaterial (TSB) (siehe Kapitel 6.1.4) gelegt werden. Die Wärmeleitfähigkeit des TSB ( $\lambda_{\text{TSB}}$ ) erreicht selbst im ausgetrockneten Zustand Werte zwischen 1,00 und 1,43 W/mK (Biewald et al. 1995, S. 699ff). Der Bereich des TSB muss bis zur Grenzisotherme reichen, um die Wirksamkeit gewährleisten zu können.

Laut Uther et al. (2009, S. 68) findet die Wärmeausbreitung bevorzugt im Bereich des Kabelgrabens statt. Dabei ist zu beachten, dass die vertikale Ausbreitung schneller stattfindet als die horizontale. Abhängig von der Jahreszeit und den Umgebungsbedingungen, stellt sich ein stationärer Zustand frühestens nach vier bis fünf Wochen ein. In einem Freilandexperiment konnte festgestellt werden, dass bei einer Rohrtemperatur von 70°C der Boden eine Verlustleistung von mehr als 100 W/m abführen kann. Bei der Verlegung in Erde werden die Temperaturverhältnisse im Bereich des Kabels aufgrund der großen Verlegetiefe durch die Temperaturschwankungen an der Erdoberfläche nicht beeinflusst (Uther et al. 2009, S. 67ff).

Kommt es aus Platzgründen zu einer Verdichtung der Kabel, erwärmt sich dieser Bereich stärker als der unverdichtete. Es kann zur Ausbildung sogenannter „Hot spots“ kommen, welche die Übertragungsleistung der gesamten Kabelanlage herabsetzen. Der Einsatz lokaler Kühleinrichtungen kann erforderlich werden. Unabhängig davon, kann die Übertragungsfähigkeit der gesamten Kabelanlage durch Verlegung eines Kühlsystems gesteigert werden. Näheres dazu siehe Kapitel 4.6.1.

#### 4.5.2. Kabelerwärmung bei der Verlegung der Kabel im Tunnel

Die von der Tunnelluft durch Strahlung und Konvektion (siehe Abb. 4.8) aufgenommene Wärme wird auf zwei Arten abgeführt. Ein Teil der Wärme geht auf die Tunnelauskleidung und in weiterer Folge auf das anliegende Erdreich über. (siehe Abb. 4.7)

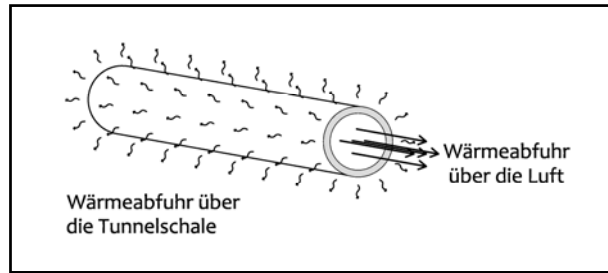


Abb. 4.7: Wärmeabfuhr bei Verlegung der Kabel im Tunnel

Der zweite Anteil wird über die strömende Luft über Lüftungsbauwerke an die Umgebung abgeführt. Dabei wird zwischen natürlicher Lüftung und Zwangslüftung unterschieden. Die natürliche Lüftung ergibt sich durch das im Tunnel vorhandene Temperaturgefälle. Stellt sich keine natürliche Lüftung ein (z.B. bei sehr langen Tunneln) oder wird zuwenig Wärme abgeführt, so kommt die Zwangslüftung zum Einsatz. Dabei sorgen regelbare Lüfter für die notwendige Luftströmung.

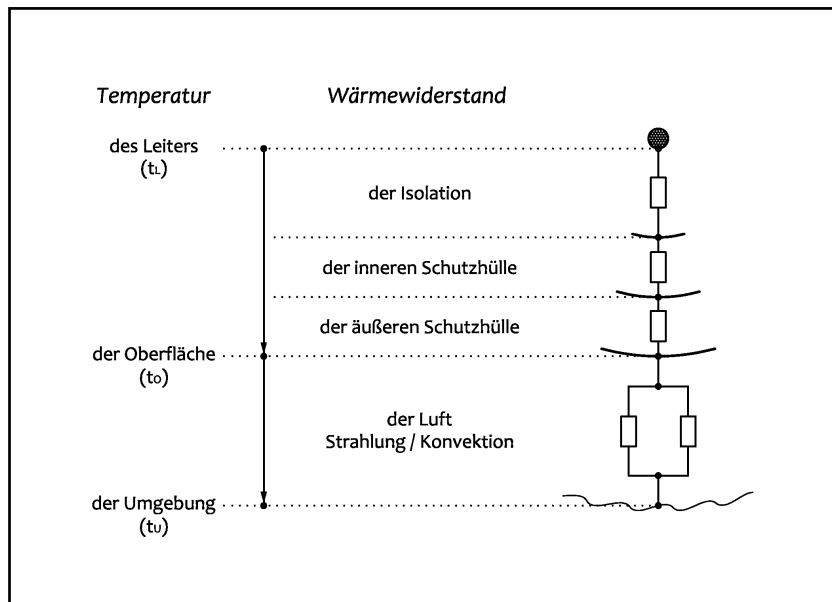


Abb. 4.8: Wärmeersatzschaltbild für ein Kabel in Luft (Herold 2001, S. 306)

Es sei angemerkt, dass die Belastbarkeit des Kabels bei natürlicher Wärmeabfuhr des Tunnels bereits über der Belastbarkeit erdverlegter Kabelanlagen liegt. Weiters bleibt auch der Effekt der Bodenaustrocknung aus (Biewald & Brakelmann 1995, S. 1870, 1873 und 1996, S. 1775). Da die Verlustwärme hauptsächlich über die Luft abgeführt wird, erwärmt sich der Tunnel, sowie das den Tunnel umgebende Erdreich nur sehr langsam. Man spricht in diesem Fall von hohen thermischen Zeitkonstanten der Bodenbereiche. Durch die langsame Erwärmung sind in den ersten Betriebsjahren höhere Kabelbelastbarkeiten möglich (Biewald & Brakelmann 1995, S. 1874). Die Investition in eine Belüftungsanlage kann stufenweise erfolgen, da die volle Ausbauleistung erst zu einem späteren Zeitpunkt erforderlich wird. (Anmerkung: Handelt es sich beim Tunnel um einen begehbaren Tunnel, so ist aus Betriebsgründen eine Belüftung vorzusehen.)

## 4.6. Zwangskühlung der Kabelanlage

Wie bereits erwähnt, wird die Leitungskühlung zur Steigerung der Übertragungsleistung angewandt. Der Einsatz einer Zwangskühlung macht Sinn, wenn der Mehraufwand für die Kühlung deutlich geringer ausfällt als die erzielbare Übertragungssteigerung. Als positive Nebeneffekte können die Vermeidung von Bodenaustrocknung, die Vergrößerung der Lebensdauer der Kabel sowie eine mögliche Abwärmenutzung entlang der Trasse genannt werden. Die Anordnung einer Kühlanlage bedingt jedoch höhere Investitions- und Betriebskosten. Abhängig von der Art der Kabelverlegung unterscheiden sich auch die Kühlkonzepte.

### 4.6.1. Kühlung bei direkter Erdverlegung

Zur Kühlung erdverlegter VPE-Kabel stehen zwei Systeme zur Verfügung, die direkte sowie die indirekte Kühlung.

#### Direkte Kühlung - Oberflächenkühlung

Bei der direkten Kühlung (Abb. 4.9) werden die Kabel einzeln in Mantelrohre (Kap.6.2.3) verlegt. Der Hohlraum zwischen Kabel und Kühlrohr wird von einem Kühlmedium (meist Wasser) durchflossen. Die Verlustwärme wird über die Kabeloberfläche an das Kühlmittel abgegeben.

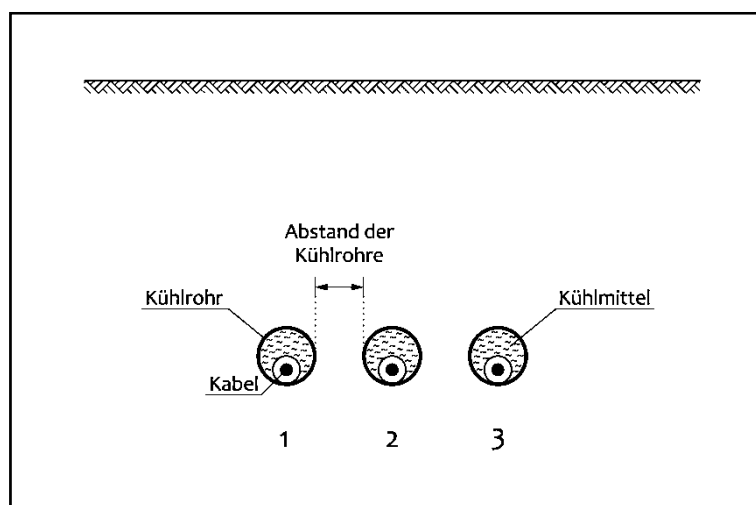


Abb. 4.9: Direkte Kühlung bei flacher Verlegung der Kabel

Bei der Festlegung des Kühlrohrdurchmessers sind neben den hydraulischen Gesichtspunkten auch die durch Temperaturänderungen hervorgerufenen Bewegungen des Kabels zu berücksichtigen (Luoni et al. 1981, S. 135). Der Abstand der Kühlrohre ergibt sich aus dem projektierten Phasenabstand der Kabel. Neben der flachen Verlegung können die Kabel auch übereinander oder im Dreieck verlegt werden.

Abhängig von der Temperatur des Kühlmittels kann die Übertragungsleistung der Leitung durch direkte Kühlung um das 2- 3 fache gesteigert werden (Nexans 2009, S. B10).

**Indirekte Kühlung - Lateralkühlung**

Bei der indirekten Kühlung werden eigene Kühlrohre parallel zu den Kabeln im Boden verlegt. Die Verlustwärme muss zusätzlich zu den Wärmewiderständen des Kabels noch einen Teil des Erdbodenwärmewiderstandes überwinden.

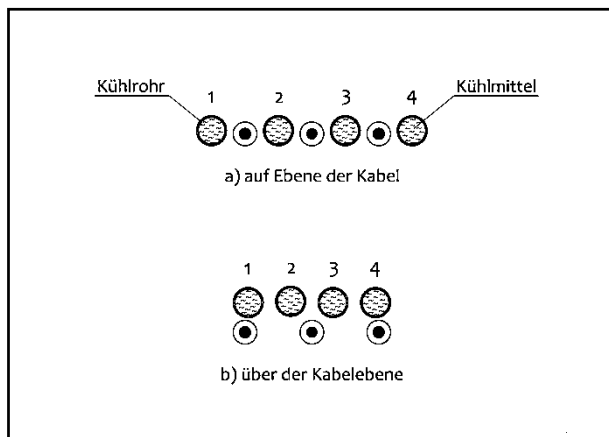


Abb. 4.10: Indirekte Kühlung bei flacher Anordnung der Kabel (Luoni et al. 1981, S. 130; Swaffield et al. 2009, S. 498)

Die Anordnung der von einem Kühlmittel durchströmten Kühlrohre kann flach oder U- förmig erfolgen. Abbildung 4.9 zeigt zwei Möglichkeiten der flachen Anordnung der Kühlrohre.

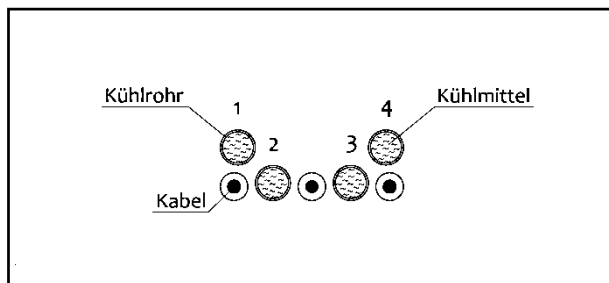


Abb. 4.11: Indirekte Kühlung bei U- förmiger Anordnung der Kabel (Luoni et al. 1981, S. 130)

In Abb. 4.11 ist die U- förmige Verlegung der Kühlrohre dargestellt. Laut Luoni (1981, S. 134) stellt die flache Anordnung der Kabel nach Abb. 4.10 Bild a im Vergleich zur U-förmigen Anordnung die effizientere Art der Kühlung dar. Die flache Anordnung der Kabel und Kühlrohre nach Abb. 4.10 a), erfordert jedoch auch die größere Grabenbreite.



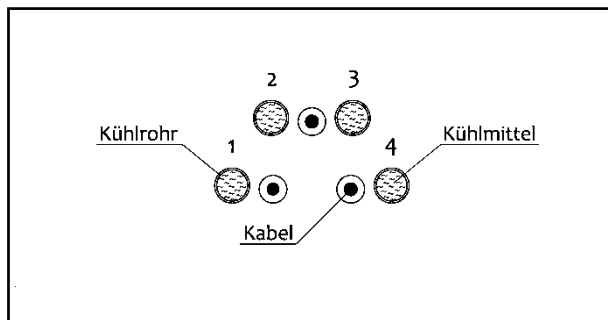


Abb. 4.12: Indirekte Kühlung bei dreiecksförmiger Anordnung der Kabel (Vavra & Wanda 2006, S. 547)

Bei Anordnung der Kabel im Dreieck können die Kühlrohre, wie in Abb. 4.12 gezeigt, verlegt werden. (Andere Situierungen sind ebenfalls denkbar.) Zu beachten ist der Abstand der Kühlrohre von den Einzelleitern. Der Abstand soll so groß gewählt werden, dass der Zwischenraum gut mit Bettungsmaterial ausgefüllt ist (Luoni et al. 1981, S. 135).

Je näher die Wärmesenke der Wärmequelle ist, umso größer ist die Steigerung der Übertragungsleistung<sup>21</sup>. Laut Nexans (2009, S. B11) kann diese um bis zu 80 % gesteigert werden.

#### 4.6.2. Kühlsysteme

Zur Abfuhr der durch das Kühlwasser aufgenommenen Wärme stehen zwei Systeme zur Verfügung. Unterschieden werden Durchlauf- und Umlaufkühlsysteme.

##### Durchlaufkühlsystem (DKS)

In Abb. 4.13 ist das Schema eines Durchlaufkühlsystems (DKS) dargestellt. Dabei wird aus einem Fließgewässer Frischwasser entnommen, zur Kühlung der Kabel verwendet und nach Gebrauch wieder in das Fließgewässer zurückgeleitet.

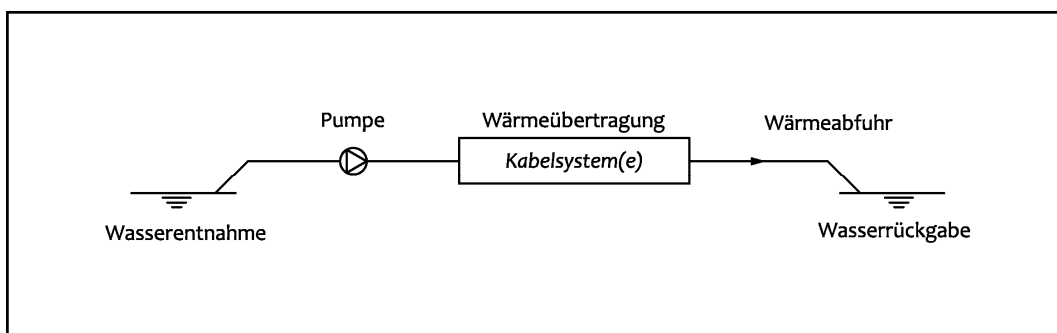


Abb. 4.13: Schema Durchlaufkühlsystem (Inhaltlich übernommen aus Aquaprox 2007, S. 57)

Da es durch die Einleitung des erwärmten Kühlwassers im Gewässer zu einer Temperaturerhöhung kommt, bedarf dieses Verfahren laut Wasserrechtsgesetz (WRG § 32 Abs. 2 lit. b) einer wasserrechtlichen Bewilligung<sup>22</sup>. Bedingt durch den hohen Wasserverbrauch und die

<sup>21</sup> Die Steigerung der Übertragungsleistung bedeutet ein gleichzeitiges Ansteigen der Verluste.

<sup>22</sup> Laut AAEV § 1 Abs. 3 Z 7 ist Kühlwasser als Abwasser anzusehen, da es durch Veränderung seiner Eigenschaften (Temperatur) in der Lage ist Gewässer in ihrer Beschaffenheit zu beeinträchtigen.

erhöhten Temperaturen im Einleitungsbereich des Gewässers wird dieses Verfahren immer seltener angewandt (Aquaprox 2007, S. 65).

### Umlaufkühlsystem (UKS) - Kreislaufkühlsystem

Ein Umlaufkühlsystem besteht aus zwei thermisch miteinander verbundenen Kühlkreisen. Der erste Kühlkreis ist für die Aufnahme der Verlustwärme des Kabels zuständig. Diese aufgenommene Wärme wird über den zweiten Kühlkreis an die Umgebung abgegeben. Das Kühlmittel (meist Wasser) wird somit abgekühlt und steht für eine weitere Erwärmung durch die Kabel zur Verfügung.

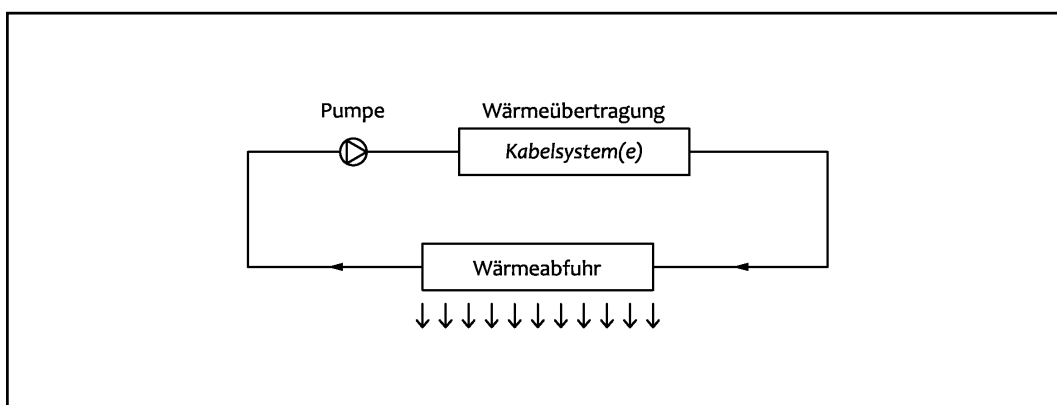


Abb. 4.14: Schema Umlaufkühlsystem  
(Inhaltlich übernommen aus Aquaprox 2007, S. 57)

Durch das umfangreiche Kühlsystem stellt dieses Verfahren das technisch aufwändigere dar. Bedingt durch den geschlossenen Wasserkreislauf stellt sich eine höhere Einlauftemperatur am Kabelkühlsystem ein.

### Rohrführung bei direkter Kühlung

Die Rohrführung bei Einsatz eines Durchlaufkühlsystems ist in Abb. 4.15 dargestellt.

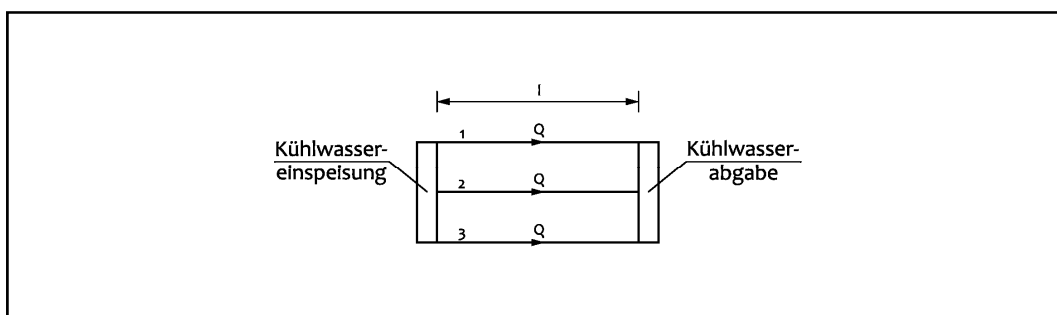


Abb. 4.15: Durchlaufkühlsystem bei direkter Kühlung

Abbildung 4.15 zeigt die Möglichkeiten bei Einsatz eines Umlaufkühlsystems. Wird für den Rücklauf des Kühlmittels das mittlere Rohr (Nr. 2) gewählt (siehe Abb. 4.16, Bild a.), so stellt sich in diesem ein Durchfluss ein, welcher doppelt so groß ist wie in den Rohren 1 und 3. Die höchste Temperatur erreicht das Kühlwasser bei dieser Anordnung in Rohr 2, kurz vor Übergabe an die Kühlstation (Vgl. Luoni et al. 1981, S. 137).

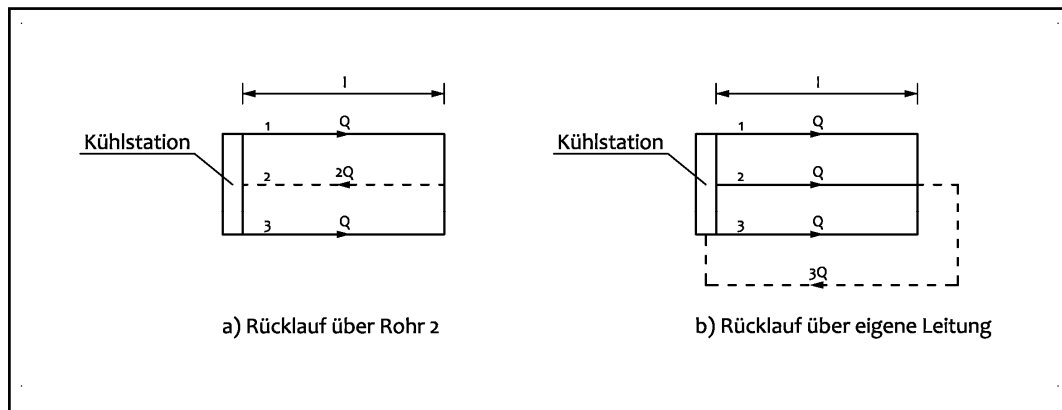


Abb. 4.16: Umlaufkühlsystem bei direkter Kühlung

Die Rückführung des Kühlwassers kann auch über eine eigene Leitung erfolgen (siehe Abb. 4.16 Bild b). Zur Kühlung der Garnituren (Kap. 4.3) sind bei der direkten Kühlung der Kabel besondere Maßnahmen erforderlich.

### Rohrführung bei indirekter Kühlung

Entsprechend der direkten Kühlung kann auch bei der indirekten Kühlung ein Durchlaufkühlsystem, wie in Abb. 4.15 dargestellt, realisiert werden.

Fällt die Entscheidung auf ein Umlaufkühlsystem, so stehen mehrere Möglichkeiten der Rohrführung (siehe Abb. 4.17) zur Verfügung. Die Fälle a bis f unterscheiden sich durch die Positionierung der Kühlwasserzufuhr sowie durch die Kopplung der Rohre untereinander. Nach Luoni et al. (1981) ändert sich die übertragbare Leistung durch die unterschiedliche Rohrleitungsführung nur um wenige Prozent. Mittels Simulation kann für ein konkretes Projekt die optimale Rohrleitungsführung ermittelt werden.

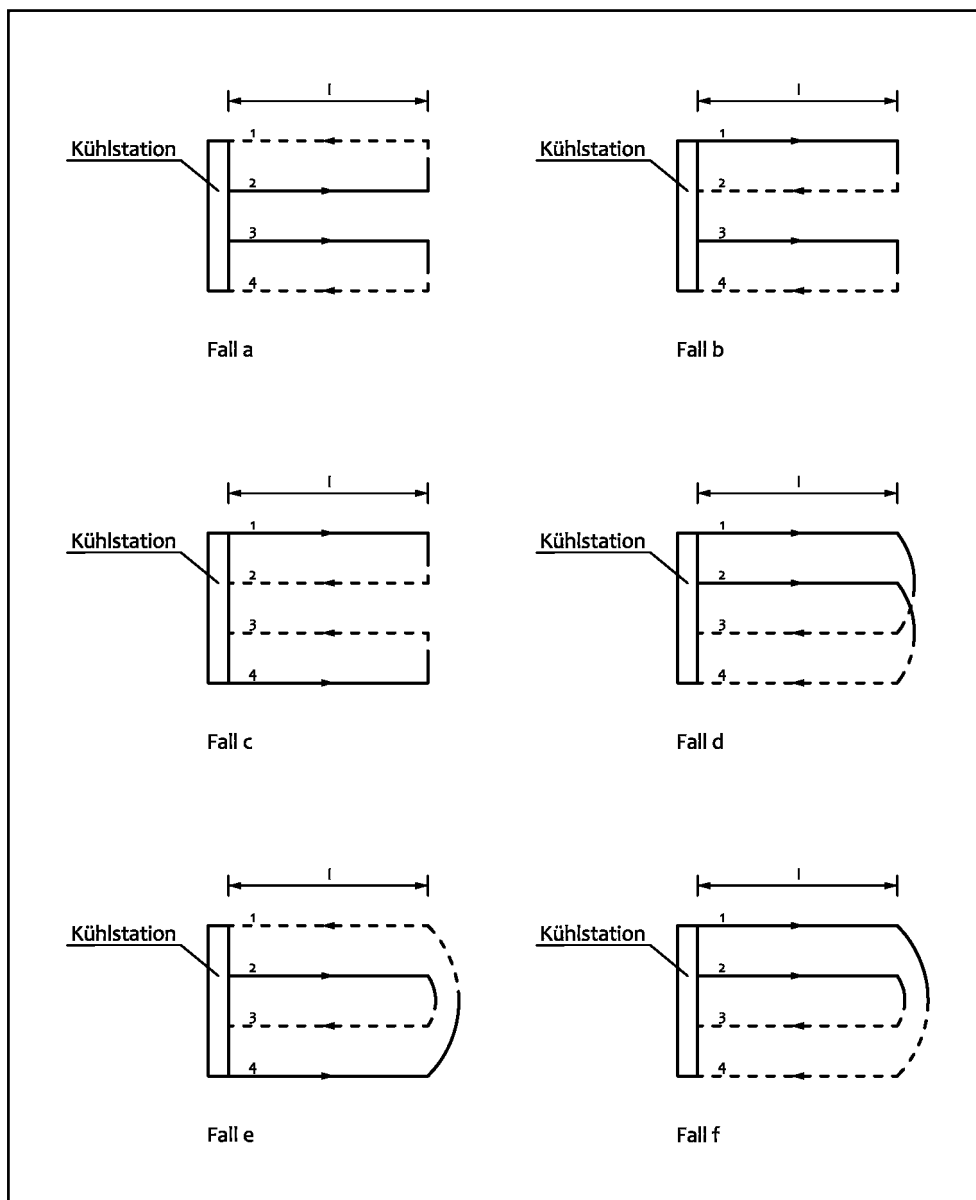


Abb. 4.17: Umlaufkühlsystem - Darstellung der möglichen Rohrführung (Luoni et al. 1981, S. 131)

Die Länge der Kühlleitung muss individuell auf die vorliegenden Umstände abgestimmt werden. Bei der Wiener Nordeinspeisung wurde z.B. ein Umlaufkühlsystem nach Fall c (Abb. 4.17) angeordnet, die Länge  $l$  beträgt 2600 m (Vavra & Wanda 2006, S. 547).

Aus bautechnischer Sicht sind in der Kühlleitung Hoch- und Tiefpunkte vorzusehen, um bei Bedarf die Rohrleitung entlüften oder entleeren zu können. Durch die Verlegung von parallelen Kühlrohren entsteht im Bereich der Garnituren (z.B. Muffen) kein Mehraufwand. Für eine bessere Wärmeabfuhr wird jedoch der Einsatz thermisch stabilisierten Bettungsmaterials erforderlich.

#### 4.6.3. Kühlung der Muffen bei direkter Erdverlegung der Kabel

Bei der direkten Kühlung der Kabel muss für den Bereich der Muffen eine spezielle Lösung gefunden werden. Es bietet sich die Möglichkeit der Anordnung eines Kühlwasserbypasses, wie in Abb. 4.18 gezeigt, an. Vor der Muffe wird das Kühlwasser ausgeleitet, parallel zur Muffe geführt,

um nach der Muffe wieder die direkte Kabelkühlung zu übernehmen. Die Zugänglichkeit der Muffe wird durch diese Anordnung sichergestellt. Als Verlegeart steht die Verlegung der Muffe direkt in Erde oder in einem Muffenbauwerk zur Auswahl.

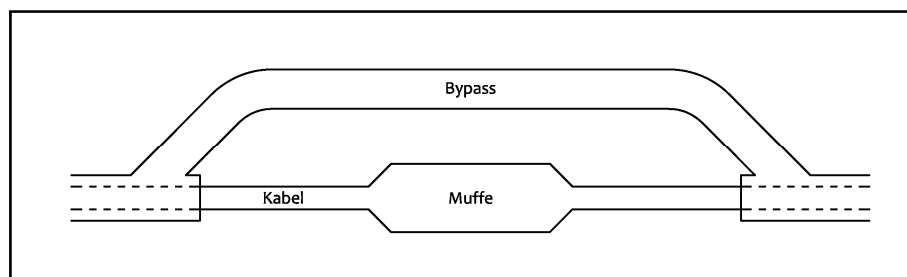


Abb. 4.18: Kühlwasserbypass im Bereich der Muffe

Im Falle der indirekten Kühlung können die Muffen ebenfalls direkt in Erde verlegt werden. Bei der Wärmeabfuhr ist dabei auf ausreichend große Abstände zwischen den Muffen zu achten. Sind die Kühlrohre nicht in der Lage, die Wärme im Bereich der Muffen abzuführen, so wird von Vavra & Wanda (2006, S. 548) eine Erhöhung der Muffenabstände untereinander vorgeschlagen.

Bei der Verlegung der Muffen in Muffenbauwerken können die Kühlrohre durch das Bauwerk geführt werden. Die Kabel werden in diesem Fall zwar nicht effektiv gekühlt, durch bewusste Anordnung der Kühlrohre wird jedoch eine Luftumwälzung im Muffenbauwerk gewährleistet. (Vavra & Wanda 2006, S. 548) Reicht die natürliche Kühlung des Muffenbauwerks zur Wärmeabfuhr nicht aus, so muss eine Zwangslüftung installiert werden.

### Effizienz der Kühlanlage

Nach Idicula & Davies (1991, S. 185) hängt die Effizienz einer Kabelkühlanlage von folgenden Einflussgrößen ab:

- Anzahl der Rohre
- Größe der Rohre
- Position der Rohre
- Temperatur des Kühlmittels

Der Druck im Kühlsystem hat keinen direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Kühlanlage. Zur Überwindung von Höhenunterschieden und damit zur Aufrechterhaltung des Wasserkreislaufes spielt er jedoch eine wichtige Rolle. (Weigl 2010)

Mittels Versuch konnte gezeigt werden, dass die Reduktion der Einlaufstemperatur des Kühlmittels effektiver ist als die Erhöhung der Durchflussmenge. Die Variation des Bettungsmaterials (Wärmeleitwiderstand 1,2 – 3,5 mK/W) zwischen Kabel und Kühlrohr ergab hingegen nur geringfügige Änderungen der Leitertemperatur (max. 2,2°C).<sup>23</sup> (Idicula & Davies 1991, S. 189f) Weiters konnte von Swaffield et al. (2009, S. 506) nachgewiesen werden, dass die

<sup>23</sup> Bei natürlich gekühlten Kabelanlagen (keine Zwangskühlung) spielt der Wärmeleitwiderstand des Bettungsmaterials eine größere Rolle. (siehe auch Biewald et al. 1995, S. 704)

Abhängigkeit der Wärmeübertragung von der Verlegetiefe durch den Einsatz einer Zwangskühlung aufgehoben wird.

Abschließend muss angemerkt werden, dass sich die Zwangskühlung einer Leitung nicht grundsätzlich in Vollbetrieb befindet. Abhängig von der Jahreszeit sowie der Witterung kann die Kühlanlage auch im Freecooling<sup>24</sup>-Betrieb laufen (Weigl 2010). Dadurch können die Betriebskosten reduziert werden. Bei geringen Außentemperaturen sowie schwacher Belastung kann die Kühlanlage auch ausgeschaltet werden.

#### **4.6.4. Kühlung bei Verlegung der Kabel im Tunnel**

Die Wärmeabfuhr beim Tunnel erfolgt über die Tunnelauskleidung (und das anliegende Erdreich) sowie über die strömende Luft. (siehe Kap. 4.5.2) Am Tunnelanfang wird Außenluft mit einer Strömungsgeschwindigkeit  $v$  zugeführt. Diese erwärmt sich<sup>25</sup> durch die Verlustwärme entlang des Tunnels und wird am Tunnel- oder Lüftungsabschnittsende an die Umgebung abgeführt.

Die an Sommertagen ungünstig warme Außenluft bedeutet laut Biewald & Brakelmann (1996, S. 1779) nur für schwach ausgelastete Tunnel Einschränkungen bei der Kabelbelastbarkeit. Bei tiefliegenden Tunneln erfolgt die Erwärmung des Bauwerks so langsam, dass auf eine Zwangskühlung in den ersten Betriebsjahren verzichtet werden kann. Die leichte Ausbaubarkeit der Kühlungseinrichtung stellt einen weiteren Vorteil dar.

### **4.7. Erdung einer Kabelanlage**

Im Kapitel 3.4 wurde bereits auf die Thematik der Erdung eingegangen. Aufbauend darauf wird in diesem Kapitel im speziellen die Erdung von Hoch- und Höchstspannungskabelanlagen betrachtet. Die einseitige Erdung findet hier keine Anwendung, da an den freien (nicht geerdeten) Enden hohe Spannungen auftreten. Sie wird daher an dieser Stelle nicht weiter behandelt. (Fickert 2007, S. 37) Somit wird nur noch zwischen zwei Möglichkeiten der Erdung unterschieden.

#### **4.7.1. Beidseitige Erdung der Endverschlüsse**

Wird das Kabel an beiden Enden geerdet, so verbessern sich die Erdungsverhältnisse im gesamten Netz. Im Kabelschirm wird dabei durch das Magnetfeld des aktiven Leiters eine Spannung induziert. Diese führt zu einem Stromfluss (Schirm - Erdung - leitendes Erdreich - Erdung) im Erdreich (siehe Abb. 4.19). Dadurch kommt es zu stromabhängigen Zusatzverlusten. Die Geometrie des Kabels, sowie die Art der Verlegung hat wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Verluste. (Fickert 2007, S. 37)

---

<sup>24</sup> Adiabate Kühlung (Verdunstungskühlung)

<sup>25</sup> Grundsätzlich ist auch eine Abkühlung der Außenluft möglich, verständlicher Weise jedoch nicht erwünscht.

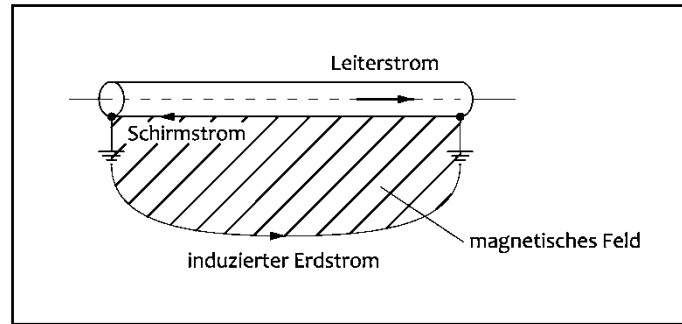


Abb. 4.19: Erdung beider Endverschlüsse  
(Heuck et al. 2007, S. 243)

#### 4.7.2. Ausgekreuzte Schirme bei beidseitiger Erdung der Endverschlüsse

Zur Verringerung der Zusatzverluste und der Schirm - Erde - Spannung kann man, wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben, die Kabelschirme auskreuzen (siehe Abb. 4.4). Im Idealfall führt diese Maßnahme zu stromlosen Schirmen. Bei flacher Verlegung der Kabel (in einer Ebene) ist eine vollständige Unterdrückung aufgrund der unterschiedlichen Leiter - Leiter - Impedanzen jedoch nicht möglich. Bedient man sich der zyklischen Vertauschung der Leiter (siehe Abb. 4.20), kann eine fast vollständige Kompensation erreicht werden. (KEMA 2008, S. 97)

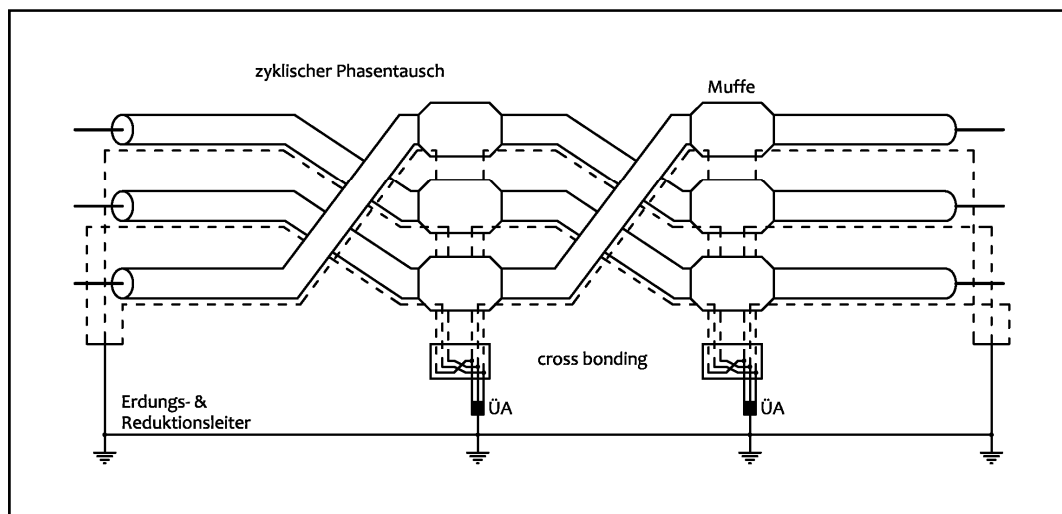


Abb. 4.20: Zyklischer Phasentausch der Leiter mit ausgekreuzten Schirmen  
(KEMA 2008, S. 98)

Das Auskreuzen der Kabelschirme erfolgt in eigens angeordneten Cross - Bonding - Boxen, die zwecks Inspektion zugänglich sein müssen. Die in den Muffen getrennten Schirme werden mittels Koaxialkabel in die Boxen geführt und dort zyklisch vertauscht. (Anmerkung: Die Muffen werden gegeneinander versetzt angeordnet, nicht wie in Abb. 4.20 einfachheitshalber nebeneinander dargestellt.) Geerdet werden die Kabelschirme über die Erdungsanlage der Zwischenstation bzw. über die Erdung des Kabelendmastes bei Anschluss an eine Freileitung oder eine Umspannstation. Zum Schutz vor Überspannungen werden Überspannungsableiter (ÜA) angeordnet. Diese werden mittels eigens mitgeführtem Erdungs- bzw. Reduktionsleiters geerdet. Zur Verbesserung

der Erdungswirkung können bei Bedarf Tiefenerder angeordnet werden. (KEMA 2008, S. 98; Oswald et al. 2005, S. 25)

## 4.8. Elektromagnetische Felder bei Kabelanlagen

Im Bereich elektrischer Anlagen entstehen durch die anliegende Spannung und den Stromfluss elektromagnetische Felder. Die Auswirkung auf den Menschen ist bis heute umstritten. Trotz der allgemeinen Annahme, dass die von den Anlagen ausgehenden elektromagnetischen Felder unbedenklich sind, hat der Gesetzgeber auch für Niederfrequenzanlagen Grenzwerte eingeführt. (Flosdorff & Hilgarth 2005, S. 102)

Laut VORNORM ÖVE/ÖNorm E 8850 (S.14f) sollen bei einer Frequenz von 50 Hz die Effektivwerte der elektrischen Feldstärke 5 kV/m und der magnetischen Flussdichte 100  $\mu\text{T}$  nicht dauerhaft überschreiten. Diese Werte gelten für die Allgemeinbevölkerung. Für Personen, die berufsbedingt elektromagnetischen Felder ausgesetzt sind, kommen höhere Grenzwerte zur Anwendung. Dabei sollen die Referenzwerte (Mittelwert eines Arbeitstages) der elektrischen Feldstärke 10 kV/m und der magnetischen Flussdichte 500  $\mu\text{T}$  nicht überschreiten.

### 4.8.1. Das elektrische Feld

Das elektrische Feld bei Hoch- und Höchstspannungskabeln entsteht durch die Potenzialdifferenz zwischen Leiter und geerdetem Schirm. Die Feldstärke hängt von der Spannungsdifferenz zwischen Leiter und Schirm ab. Es bildet sich daher auch aus, wenn kein Strom fließt (Huainig 2004, S. 35). Da der Kabelschirm Erdpotential besitzt, beschränkt sich der Bereich des elektrischen Feldes bei fachgerechter Erdung auf den Bereich der Isolation des Kabels. Aus diesem Grund kann es zu keiner Feldstärkenüberschreitung durch das Kabel kommen.

### 4.8.2. Das magnetische Feld

Jeder stromdurchflossene Leiter erzeugt durch die Bewegung der elektrischen Ladungen ein Magnetfeld. Bei von Wechselstrom durchflossenen Leitern wechselt auch das Magnetfeld, entsprechend dem Strom, ständig seine Richtung. Der Leiter wird von den kreisförmigen Feldlinien umschlossen. Die Richtung des Magnetfeldes hängt von der Stromrichtung ab. (Bastian et al. 1999, S. 77)

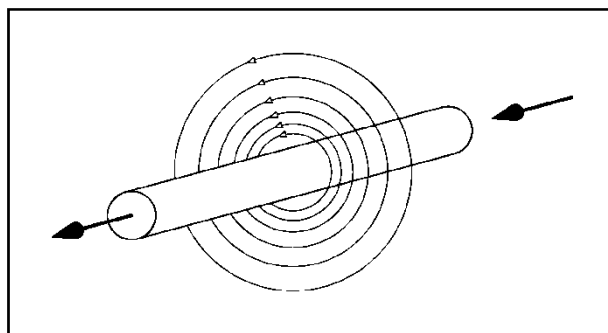


Abb. 4.21: Magnetfeld des durchflossenen Leiters  
(Bastian et al. 1999, S. 77)



Wie in Abb. 4.21 ersichtlich, sind die Feldlinien in sich geschlossen. Die Feldliniendichte nimmt mit zunehmendem Abstand vom Leiter ab. Der Rechtschraubregel folgend, laufen sie in Stromrichtung gesehen im Uhrzeigersinn um den Leiter herum. (Kindler & Haim 2006, S. 122f; Steffen & Bausch 2007, S. 144f)

Um das magnetische Feld messtechnisch erfassen zu können, wurde der Begriff der magnetischen Flussdichte eingeführt. (Wolfsperger 2008, S. 22) Zum Vergleich der magnetischen Flussdichte einer Kabelanlage mit den zulässigen Grenzwerten wird die Ersatzflussdichte (EFD) des Kabelsystems herangezogen. (VORNORM ÖVE/ÖNorm E 8850, S. 13)

Die EFD an der Erdoberfläche hängt von der Verlegetiefe, dem Phasenabstand und dem fließenden Strom ab. Große Verlegetiefen bedingen durch den Abstand niedrigere EFD - Werte an der Oberfläche. Wohingegen große Phasenabstände sowie höhere Ströme zu größeren Flussdichten führen. (Huainig 2004, S. 17ff)

#### 4.8.3. Magnetische Flussdichte im flachverlegten Kabelsystem

Unter Vernachlässigung von induzierten Strömen im Kabelschirm und der Annahme eines symmetrischen Drehstromsystems können folgende Formeln für die Ermittlung der Ersatzflussdichte eines flach verlegten Systems herangezogen werden (Huainig 2004, S. 22f; Kaune & Zaffanella 1992, S. 2086):

$$EFD = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10^{-1} \cdot \frac{s \cdot I}{r^2} \quad [\mu T] \quad (4.10)$$

$$r^2 = (h + d)^2 + x^2 \quad [m^2] \quad (4.11)$$

I	Übertragungsstrom [A]
s	Phasenabstand [m]
d	Verlegetiefe [m]
h	Referenzhöhe über der Erdoberfläche [m]
r	Abstand vom Schwerpunkt des Kabelsystems zum Berechnungspunkt [m]
x	horizontaler Abstand vom Schwerpunkt des Kabelsystems zum Berechnungspunkt [m]

Anmerkung: Die Formel ist nur dann gültig, wenn  $r > s$  gewählt wird. (Skizze siehe **Error! Reference source not found.**)

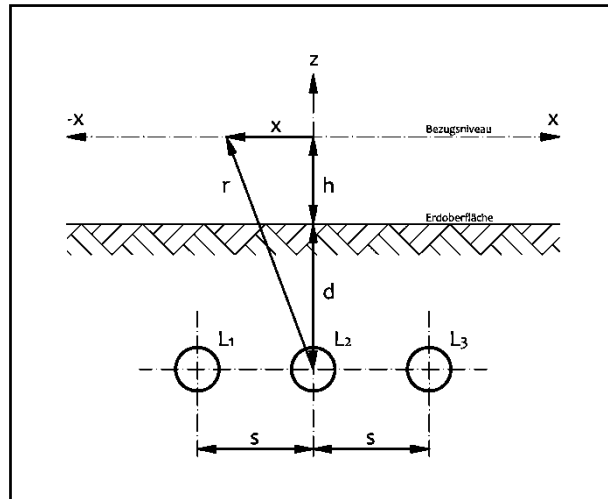


Abb. 4.22: Skizze - Flachverlegtes Kabelsystem (Huainig 2004, S. 23)

Für die gewählte Verlegetiefe von 1,50 m und den gewählten Phasenabstand  $s$  von 0,40 m ergeben sich bei Variation der Übertragungsströme folgende Ersatzflussdichten in einem Meter Höhe über der Erdoberfläche:

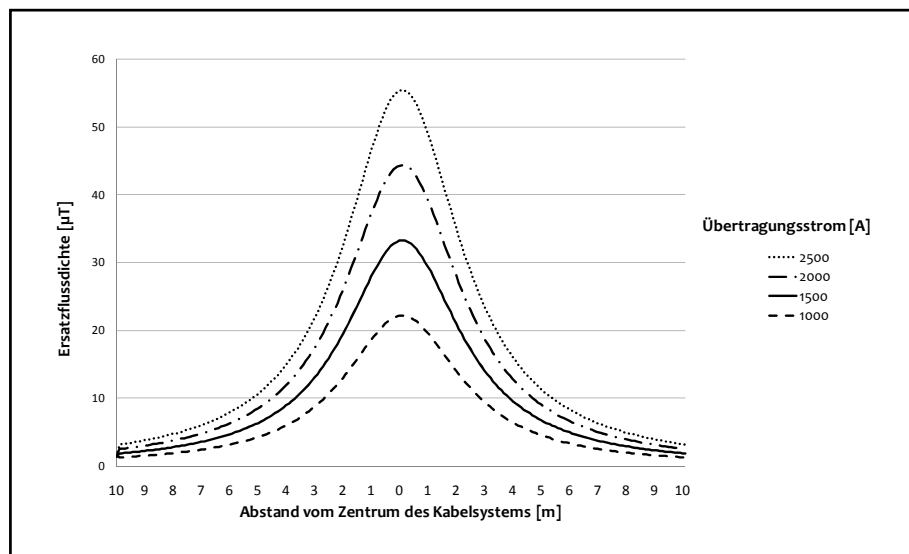


Abb. 4.23: Ersatzflussdichte eines flach verlegten Kabelsystems bei Variation des Übertragungsstromes ( $d = 1,50$  m,  $s = 0,40$  m,  $h = 1,00$  m)

In Abb. 4.23 ist die Abhängigkeit der Ersatzflussdichte von der Höhe des Übertragungsstromes feststellbar. Das Maximum der Flussdichte tritt über dem Mittelpunkt des Kabelsystems auf. Im Vergleich mit dem in der VORNORM ÖVE/ÖNorm E 8850 angegebenen Referenzwert (100 µT für die Allgemeinbevölkerung), ist ersichtlich, dass bei der vorgegebenen Geometrie die Referenzwerte der magnetischen Flussdichte bei allen Übertragungsströmen eingehalten werden.

In der folgenden Abbildung (Abb. 4.24) wird der Einfluss der Verlegetiefe bei einem Übertragungsstrom von 2000 A und einem Phasenabstand  $s$  von 0,40 m aufgezeigt.

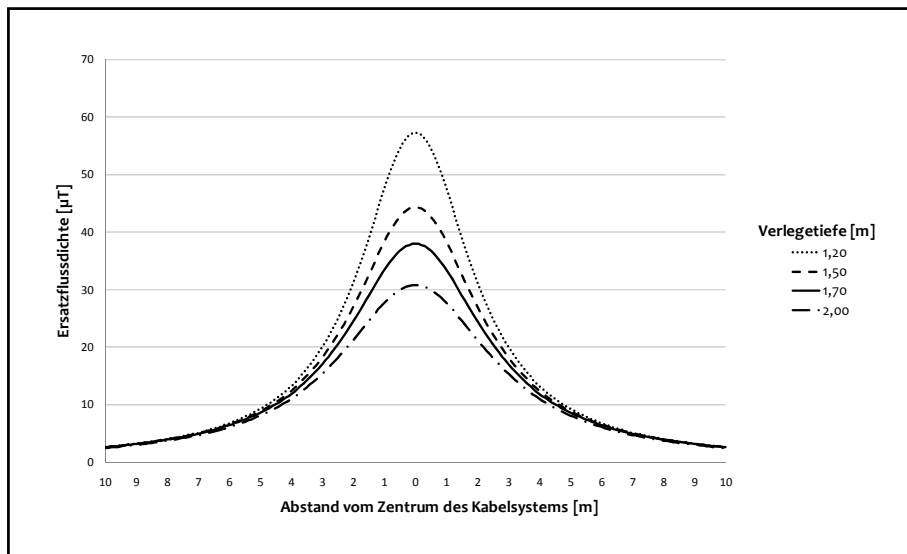


Abb. 4.24: Ersatzflussdichte eines flach verlegten Kabelsystems bei Variation der Verlegetiefe ( $I = 2000 \text{ A}$ ,  $s = 0,40 \text{ m}$ ,  $h = 1,00 \text{ m}$ )

Die Erhöhung der Verlegetiefe von 1,20 m auf 1,50 m ergibt eine Reduktion der Ersatzflussdichte um 22,5 %. Bei einer Erhöhung auf 2,00 m Tiefe ergibt sich eine Reduktion von 46 %.

Variiert man statt der Verlegetiefe den Phasenabstand, so stellen sich bei gleichbleibender Stromstärke (2000 A) und konstanter Kabeltiefe (1,50 m) folgende Ersatzflussdichten ein:

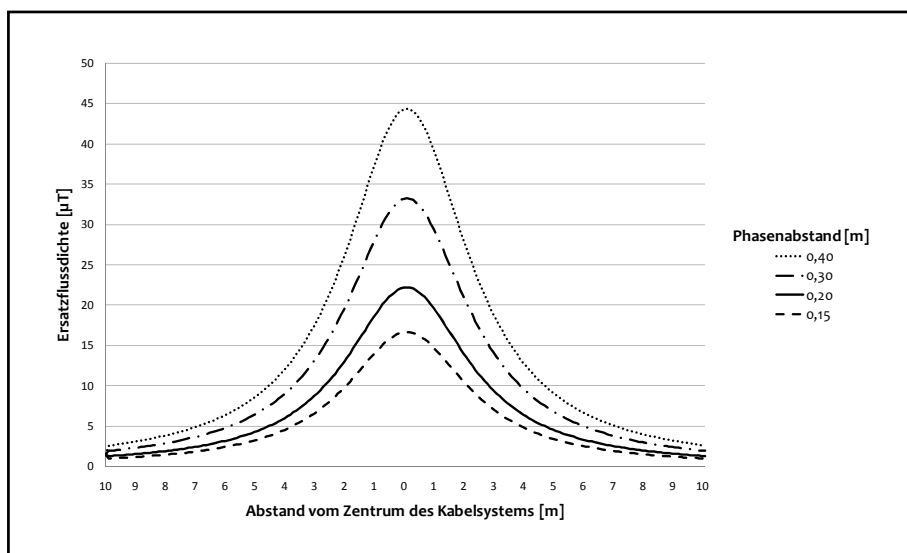


Abb. 4.25: Ersatzflussdichte für ein flach verlegtes Kabelsystem bei Variation der Phasenabstände ( $I = 2000 \text{ A}$ ,  $d = 1,50 \text{ m}$ ,  $h = 1,00 \text{ m}$ )

Aus Abb. 4.25 ist ersichtlich, dass die Ersatzflussdichte mit sinkendem Phasenabstand abnimmt. Eine Bündelung der Kabel (Phasenabstand  $s = 0,15 \text{ m}$ ) ist aufgrund der schlechteren Wärmeabfuhr und der daraus resultierenden geringeren Übertragungsleistung nicht erstrebenswert.

#### 4.8.4. Magnetische Flussdichte des im Dreieck verlegten Kabelsystems

Unter Vernachlässigung von induzierten Strömen im Kabelschirm können folgende Formeln für die Ermittlung der Ersatzflussdichte eines im Dreieck verlegten Systems herangezogen werden (Huainig 2004, S. 22f; Kaune & Zaffanella 1992, S. 2086):

$$EFD = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10^{-1}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{s \cdot I}{r^2} \quad [\mu T] \quad (4.12)$$

$$r^2 = \left( h + d + \frac{s}{4 \cdot \sqrt{3}} \right)^2 + x^2 \quad [m^2] \quad (4.13)$$

- I Übertragungsstrom [A]
- s Phasenabstand [m]
- d Verlegetiefe [m]
- h Referenzhöhe über der Erdoberfläche [m]
- r Abstand vom Schwerpunkt des Kabelsystems zum Berechnungspunkt [m]
- x horizontaler Abstand vom Schwerpunkt des Kabelsystems zum Berechnungspunkt [m]

Anmerkung: Die Formel ist nur dann gültig, wenn  $r > s$  gewählt wird.

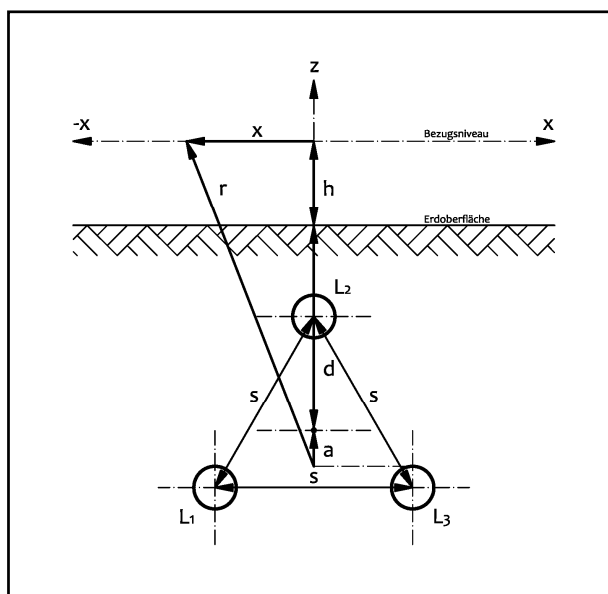


Abb. 4.26: Skizze - Im Dreieck verlegtes Kabelsystem  
(Huainig 2004, S. 27f)

Bei gleichem Bemessungsstrom (2000 A) wie in der eben betrachteten flachen Verlegung und gleichem Phasenabstand der Leiter ( $s = 0,40$  m) stellen sich bei der Dreiecksverlegung in einem Meter Höhe über der Erdoberfläche, abhängig von der Verlegungstiefe, folgende Ersatzflussdichten ein:

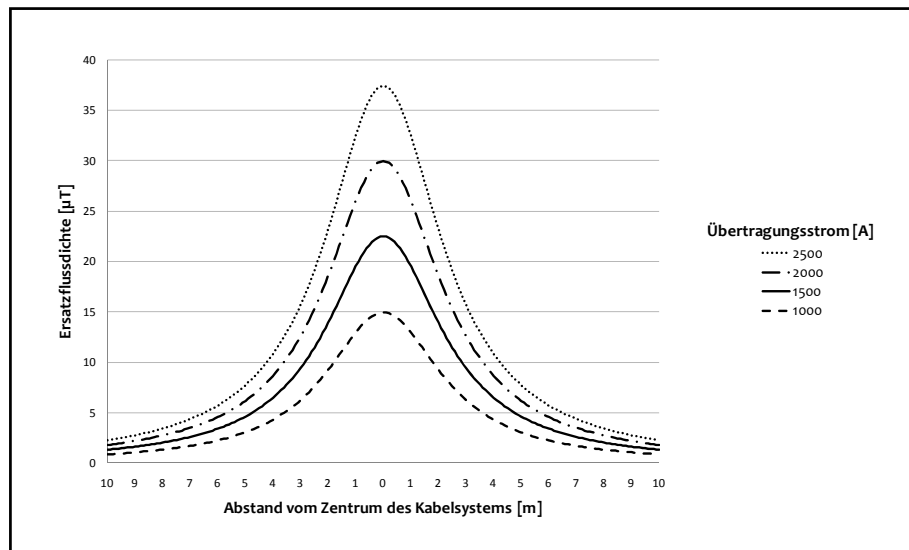


Abb. 4.27: Ersatzflussdichte eines im Dreieck verlegten Kabelsystems bei Variation des Übertragungsstromes  
 ( $d = 1,50 \text{ m}$ ,  $s = 0,40 \text{ m}$ ,  $h = 1,00 \text{ m}$ )

Wie in Abb. 4.27 ersichtlich, sinkt bei der Verlegung der Kabel im Dreieck die Ersatzflussdichte mit zunehmender Verlegungstiefe im gleichen Ausmaß wie bei der flachen Verlegung. Die absoluten Werte der Flussdichte sind im direkten Vergleich jedoch geringer. (siehe Abb. 4.30)

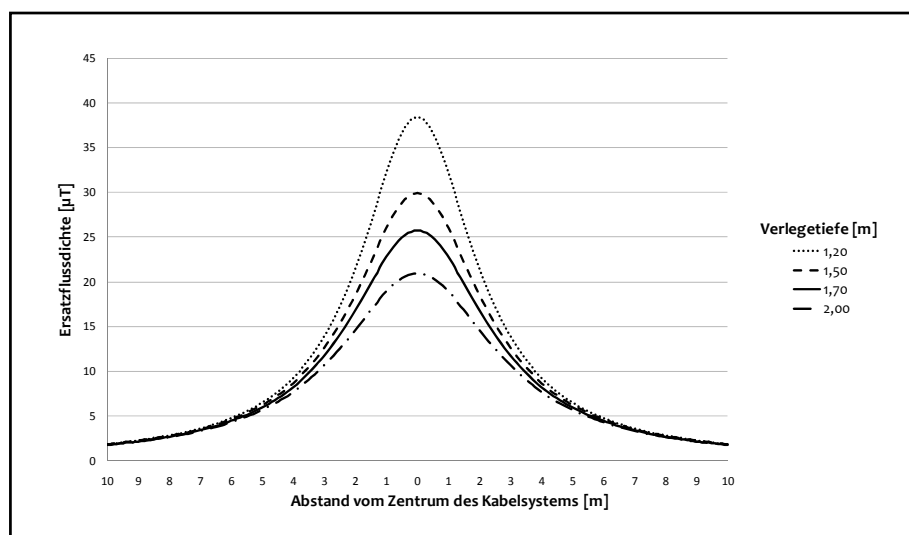


Abb. 4.28: Ersatzflussdichte eines im Dreieck verlegten Kabelsystems bei Variation der Verlegetiefe  
 ( $I = 2000 \text{ A}$ ,  $s = 0,40 \text{ m}$ ,  $h = 1,00 \text{ m}$ )

Bei der Verlegung im Dreieck reduziert sich die Ersatzflussdichte bei steigender Verlegetiefe in ähnlichem Ausmaß wie bei der flachen Verlegung (Abb. 4.28). Erhöht man die Verlegetiefe von 1,20 m auf 1,50 m, so reduziert sich die Flussdichte um 22 %. Bei weiterer Erhöhung auf 2,00 m Tiefe beträgt die Reduktion 45 %.

Vollständigkeitshalber wird in Abb. 4.29 der Einfluss des Phasenabstandes bei einer Verlegung der Kabel im Dreieck gezeigt.

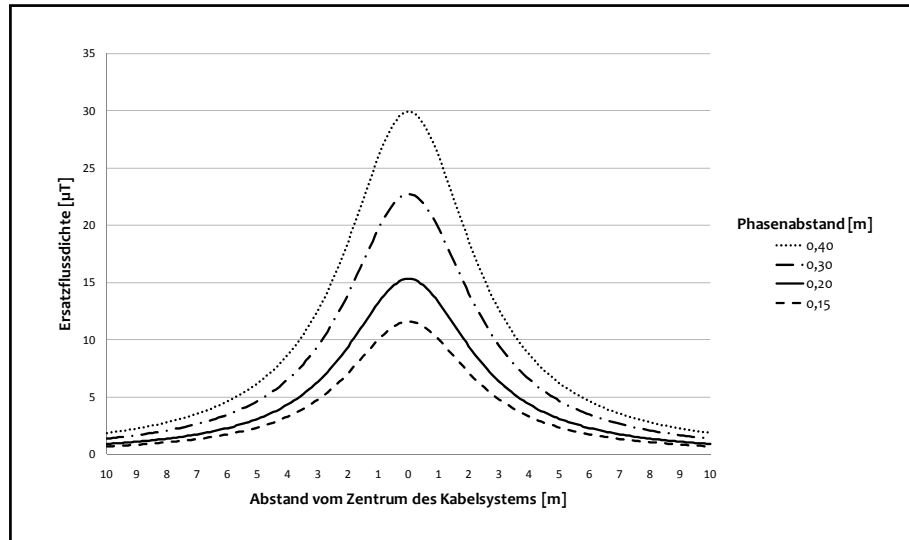


Abb. 4.29: Ersatzflussdichte eines im Dreieck verlegten Kabelsystems bei Variation der Phasenabstände  
( $I = 2000 \text{ A}$ ,  $d = 1,50 \text{ m}$ ,  $h = 1,00 \text{ m}$ )

Entsprechend den Ergebnissen aus Abb. 4.25 fallen die Werte für die Ersatzflussdichte bei Verlegung im Dreieck (Abb. 4.29) mit kleiner werdendem Phasenabstand ab. Da die Anordnung der Kabel im Dreieck geometrisch optimale Bedingungen für eine zusätzliche Kühlung mittels Begleitrohren schafft und die Problematik der Wärmeabfuhr auch hier besteht, wird von der Bündelung der Kabel (Phasenabstand  $s = 0,15 \text{ m}$ ) abgesehen.

#### 4.8.5. Vergleich der Magnetischen Flussdichte von flach- und dreiecksverlegten Kabelsystemen

Der direkte Vergleich zwischen einem flach verlegten und einem in Dreiecksform verlegten System wird in Abb. 4.30 ersichtlich:

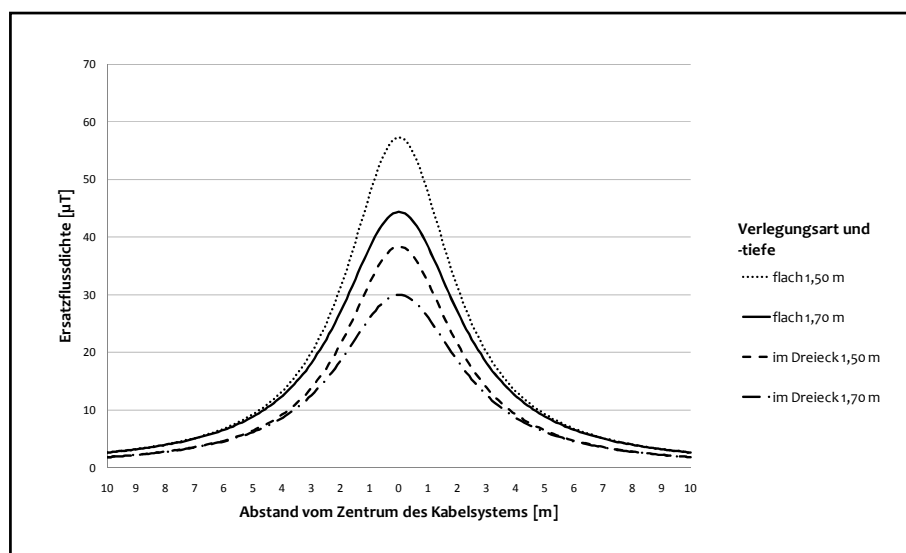


Abb. 4.30: Vergleich der Ersatzflussdichten von flach- und dreiecksverlegten Kabelsystemen ( $I = 2000 \text{ A}$ ,  $s = 0,40 \text{ m}$ ,  $h = 1,00 \text{ m}$ )

Die Werte der Ersatzflussdichte liegen beim im Dreieck verlegten System um ca. 33 % unter den Werten aus der flachen Verlegung.

#### 4.8.6. Schirmung mittels zusätzlicher Maßnahmen

Durch Einhaltung der elektrotechnischen Grundsätze sollen die magnetischen Felder in ihrer Höhe bereits in der Entstehung beschränkt werden. Gefordert wird ein sogenannter niederinduktiver Aufbau. Dabei liegen die Kabel so nah wie möglich nebeneinander. (Eingeschränkt wird dies durch das begrenzte Wärmeabfuhrvermögen der Anordnung.) Zusätzlich wird eine symmetrische Belastung der Kabel angestrebt. Das Magnetfeld wird vom Rückwirkungsfeld (gebildet durch den induzierten Strom im Schirm, Abb. 4.19) gedämpft. Diese Wirkung wird jedoch durch das Auskreuzen der Kabelschirme (Abb. 4.4) reduziert. Werden die geforderten Grenzwerte der magnetischen Flussdichte nicht eingehalten, müssen zusätzliche Maßnahmen getroffen werden. Die folgenden drei Arten zur Verringerung des magnetischen Feldes kommen zur Anwendung: (Fricke 1998, S. 39ff, Wolfesperger 2008, S. 102, 345f)

- Modifikation der Kabelanordnung
- Einsatz ferromagnetischer Schirmung
- Aktive Kompensation des magnetischen Feldes

#### Modifikation der Kabelanordnung

Wie in den vorangegangenen Abbildungen gezeigt, hängt die Flussdichte an der Erdoberfläche von der Verlegetiefe sowie der Anordnung der Kabel ab. Um das Magnetfeld durch Änderung der Kabellage zu verringern, stehen folgende Möglichkeiten zur Auswahl:

- Übergang von der Einebenenverlegung zur Dreiecksverlegung
- Verringerung des Phasenabstandes
- Vergrößerung der Verlegetiefe

Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese drei Möglichkeiten die Belastbarkeit der Kabelanlage durch Verschlechterung der Wärmeabfuhr verringern.<sup>26</sup>

### Einsatz ferromagnetischer Schirmung

Da das Magnetfeld Erdreich sowie Beton nahezu ungedämpft durchdringt, wird die abschirmende Wirkung durch Verlegung von Stahlplatten oberhalb des Kabelsystems oder durch Verlegung der Kabel im Stahlrohr erreicht. Dabei wird die Kabelbelastbarkeit durch Zusatzverluste herabgesetzt.

### Kompensation des magnetischen Feldes

Bei Verlegung von zwei Kabelsystemen (Doppelsystem) kann das magnetische Feld durch eine optimierte Phasenfolge verringert werden. Diese Maßnahme wirkt sich nicht negativ auf die Belastbarkeit der Kabelanlage aus. Wird nur ein System verlegt, so können Kompensationsleiter angeordnet werden. Bei dieser Variante kann es jedoch zur Reduktion der Belastbarkeit kommen.

### Schirmfaktor und Verringerung der Kabelbelastbarkeit

Die soeben angeführten Möglichkeiten zur Schirmung des Magnetfeldes können mittels Schirmfaktoren<sup>27</sup> klassifiziert werden. (siehe Tab. 4.5) Dabei ist jedoch zu beachten, dass mit der Reduktion des Magnetfeldes oft eine Reduktion der Übertragungsleistung einhergeht. In der Praxis muss daher ein Kompromiss gefunden werden.

Tab. 4.5: Auswirkungen der Methoden zur Schirmung des Magnetfeldes

(Orton 2008, zitiert in Wiznerowicz 2008, S. 86)

Methode	Schirmfaktor	Verminderung der Belastbarkeit [%]
beidseitige Erdung	1 bis 2	5 bis 50
Legung im Dreieck (statt in der Ebene)	1,40	0 bis 5
Kupferplatten	3 bis 8	1 bis 4
ferromagnetischer Kabelkanal	5 bis 40	2 bis 10
Stahlrohr	10 bis 100	4 bis 20
passive Leiterschleifen	2 bis 8	0 bis 2

<sup>26</sup> Die Vergrößerung der Legetiefe wirkt sich bei der Verlegung der Kabel im Tunnel nicht negativ auf die Wärmeabfuhr aus.

<sup>27</sup> Der Schirmfaktor entspricht dem Verhältnis der gedämpften zur ungedämpften Feldstärke.



#### 4.8.7. Arbeitstätigkeit im Nahbereich einer in Betrieb befindlichen Kabelanlage

Werden Kabel in zugänglichen Bauwerken verlegt (Muffenbauwerke, Kabeltunnel) so müssen im Betriebsfall bei Begehungen durch das Servicepersonal gewisse Sicherheitsabstände eingehalten werden, um den Referenzwert der magnetischen Flussdichte nicht zu überschreiten. Die nachfolgend angestellten Berechnungen beziehen sich auf den in Abb. 4.31 dargestellten Mindestabstand.

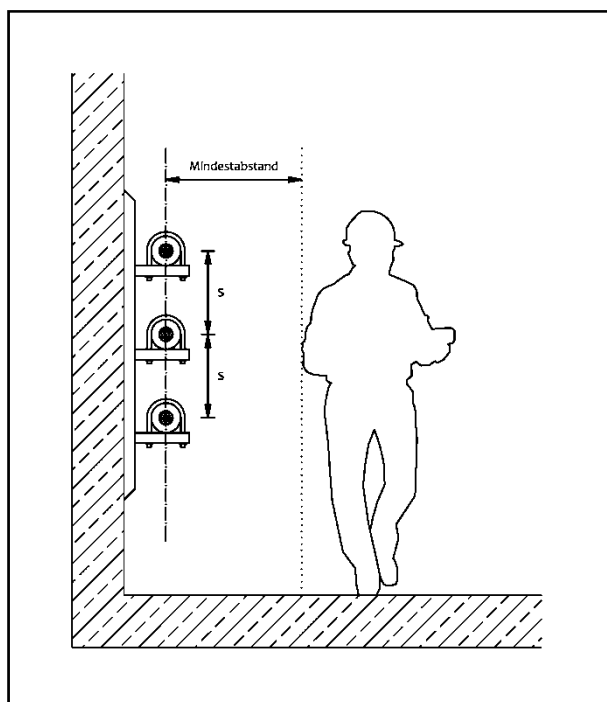


Abb. 4.31: Einzuhaltender Sicherheitsabstand bei Arbeitstätigkeit im Nahbereich luftverlegter, betriebener Kabel

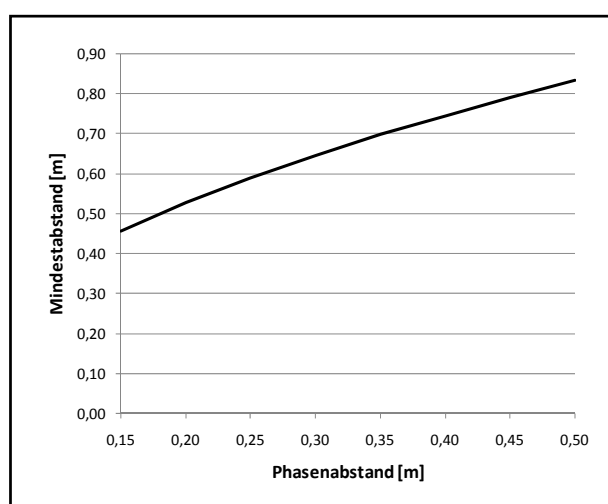


Abb. 4.32: Einzuhaltende Mindestabstände bei Begehung luftverlegter Kabel im Betriebsfall ( $I = 2000 \text{ A}$ ,  $EFD = 500 \mu\text{T}$ )

In Abb. 4.32 wird anhand eines Beispiels gezeigt, wie groß die seitlichen Mindestabstände bei einem Übertragungsstrom von 2000 A in Abhängigkeit vom Phasenabstand sein müssen, um die

maximal zulässige Flussdichte nicht zu überschreiten. Der Referenzwert der magnetischen Flussdichte beträgt für beruflich exponierte Personen  $500 \mu\text{T}$ . (Als Berechnungsgrundlage dient Gleichung 5.1 bei vertikaler Anordnung der Kabel.)

Um die Kosten der Bauwerke niedrig zu halten, sind die Platzverhältnisse oft sehr beengt. Ist es aus diesem Grund nicht möglich, die Sicherheitsabstände einzuhalten, so müssen die begehbaren Bereiche entsprechend geschirmt werden. Es besteht auch die Möglichkeit den Übertragungsstrom zu reduzieren, wenn die Kabelanlage durch das Betriebspersonal betreten wird.

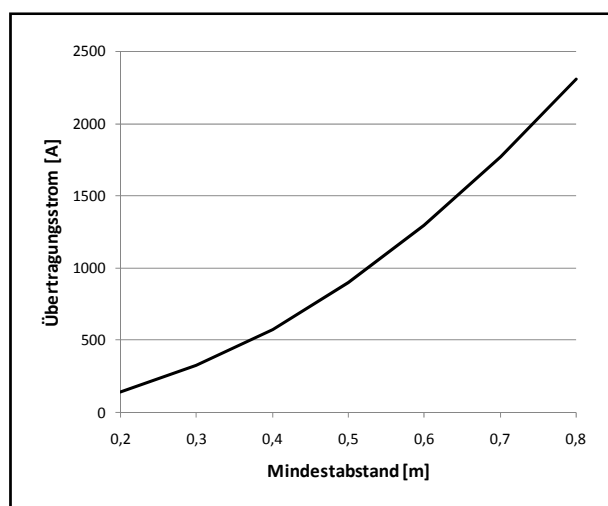


Abb. 4.33: Einzuhaltende Mindestabstände in Abhängigkeit vom Übertragungsstrom ( $s = 0,40 \text{ m}$ ,  $\text{EFD} = 500 \mu\text{T}$ )

In Abb. 4.33 wird für einen angenommenen Phasenabstand von  $0,40 \text{ m}$  gezeigt, wie groß der Übertragungsstrom für unterschiedliche Abstände vom Kabelsystem sein darf. (Als Berechnungsgrundlage dient wiederum Gleichung 4.10 bei vertikaler Anordnung der Kabel.)

## 4.9. Kabelversagen

Die hohe Zuverlässigkeit der VPE - Kabel und ihrer Komponenten kann ein Auftreten von Fehlern bei einer Kabelanlage nicht gänzlich ausschließen. Ein Kabelversagen kann sehr unterschiedliche Ursachen haben.

### 4.9.1. Fehlerursachen

#### Beschädigung bei der Errichtung der Kabelanlage

Ausgehend von einem fehlerfreien Kabel kommt es häufig bei der Errichtung der Kabelanlage zu Beschädigungen. Dies kann einerseits durch unsachgemäßen Transport geschehen, andererseits können Fehler bei der Kabellegung passieren (z.B. Überschreitung der zulässigen Zugkräfte des Kabels). Besondere Aufmerksamkeit muss auch der Montage der Kabelgarnituren (Muffen und Endverschlüsse) gewidmet werden. (VDEW 2007, S. 229) Durch Einsatz von geschultem Personal und strikter Einhaltung der Transport- und Verlegevorschriften (siehe auch Kap. 6.5) kann man diesen Fehlern vorbeugen.

### **Betriebsbedingte Schäden an den Kabeln**

Im Betrieb können Schäden durch thermische Überbeanspruchung oder Überspannungen entstehen. Durch Einhaltung der zulässigen Betriebstemperaturen (Kap. 4.4.1) und Anordnung von Überspannungsableitern (sowie deren regelmäßige Kontrolle) können Fehler dieser Art ausgeschlossen werden. Überspannungsableiter verhindern auch Schäden durch indirekte Blitzschläge, z.B. in an Kabel angeschlossene Freileitungen. Damit Blitzeinschläge im Nahbereich der Kabeltrasse (durch Potenzialanhebung des Erdreichs) nicht zum Durchschlag führen, werden oberhalb der Trasse zusätzliche Erdungsleiter angeordnet. (KEMA 2008, S. 174ff)

### **Schäden durch Funktionsverlust der Betriebsmittel**

Weiters können auch Schäden auftreten, die durch Funktionsverlust der Betriebsmittel hervorgerufen werden. Dabei liegt besonderes Augenmerk auf der Isolierung der VPE-Kabel, da es auf der Hoch- und Höchstspannungsebene noch keine empirischen Werte über die Lebensdauer (Kap. 4.10.3) gibt. Mittels Teilentladungsmessungen lassen sich mögliche zukünftige Fehlerstellen ermitteln. Eine Aussage zur Restlebensdauer kann dadurch zwar nicht getroffen werden, der Netzbetreiber erhält aber eine Grundlage zur Planung der Instandhaltungsmaßnahmen. (VDEW 2007, S. 273 und 282) Neben der Isolierung muss auch die Erdungsanlage regelmäßig kontrolliert werden. Korrosionsschäden könnten die Anlage unwirksam machen und zu großen Schäden an der Kabelanlage führen.

### **Schäden durch Dritte**

Bei Bauarbeiten im Nahbereich der Kabeltrasse kann es zu Beschädigungen durch Dritte kommen. Dabei ist die Gefahr der Schädigung einer erdverlegten Leitung um ein vielfaches größer als bei Verlegung der Leitung in einem Kabelkanal oder Tunnel. Im Hoch- und Höchstspannungsbereich darf, begründet durch die Relevanz, von einer ordnungsgemäßen Dokumentation der Kabelanlage ausgegangen werden. Das Risiko, ohne Kenntnis auf eine derartige Leitung zu stoßen, ist demnach bei vorschriftsmäßiger Erhebung der vorhandenen unterirdischen Einbauten gering. Selbst eine mit der Dokumentation exakt übereinstimmende Kabellage entbindet nicht von der Verantwortung, besonders sorgsam zu arbeiten.

### **Schäden durch Naturkatastrophen**

Naturkatastrophen wie z.B. Hangrutschungen können zum Verlust der Kabelanlage führen und diese, je nach Intensität des Ereignisses, für einen längeren Zeitraum außer Betrieb setzen. Um eine Kabelanlage Gefährdungen dieser Art nicht bewusst auszusetzen, gilt es, eine geeignete Trasse zu finden. Da man unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit nicht alle Problembereiche großräumig umfahren kann, können zur Sicherung der Anlage bauliche Schutzmaßnahmen erforderlich werden.

#### **4.9.2. Fehlerart**

Bei Kabelnetzen großer Übertragungsspannung wird die niederohmige Erdung angewandt. (Oeding & Oswald 2004, S. 688) Dabei wird bei einem Erdschluss die Leitung sofort abgeschaltet.

Da beim Kabel im Gegensatz zur Freileitung keine Selbstheilung<sup>28</sup> des Isoliermediums möglich ist, bedeutet jeder auftretende Fehler eine dauerhafte Abschaltung mit anschließender Reparatur. Die häufigste Fehlerart einer Kabelanlage stellt der Erdkurzschluss (Abb. 4.34) dar.

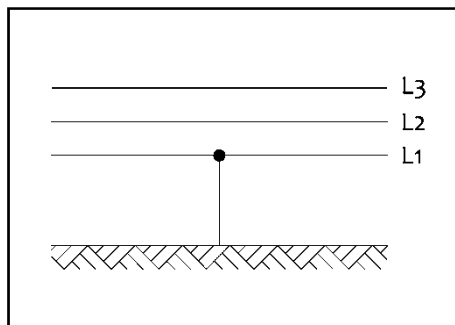


Abb. 4.34: Fehler - Einpoliger Kurzschluss  
(VDEW 2007, S. 238)

Dabei wird die Isolierung eines Kabels (oder einer Garnitur) aufgrund eines Durchschlages überbrückt, es kommt zu einer Verbindung des Leiters mit dem Erdpotential. Am schadhaften Leiter stellt sich nahezu das Potenzial Null ein, die fehlerlosen Leiter erleiden dabei keine größere Potenzialanhebung. Der Strom tritt an der Fehlerstelle in das Erdreich ein, breitet sich entlang der Trasse aus, um im Anschluss in den geerdeten Schaltanlagen wieder in das Netz zurück zu fließen. (Heuck et al. 2007, S. 596) Dabei kann es zu Schäden kommen. Die Leitung muss daher bei Auftreten eines Fehlers unverzüglich abgeschaltet werden.

Mehrpole Fehler können aufgrund des Kabelaufbaues und der Anordnung der Kabel (Verlegung mit Abstand, siehe Abb. 7.4) nahezu ausgeschlossen werden (Obst & Minke 2001, S.38)

Bei der Verlegung der Kabel im Tunnel (siehe Abb. 7.8) kann es im Fehlerfall zur Beschädigung der benachbarten Kabel kommen. Polyethylene (Kabelmantel und -isolierung) brennen wachsartig, tropfend ab (Domininghaus et al. 2008, S. 199). Dieses Abbrandverhalten kann zur Entzündung der unteren Kabel führen. Wird ein Brandschutzanstrich auf die Kabelmäntel aufgebracht, so können bei einem Kabelabstand von mindestens 0,45 m kritische Brände vermieden werden. (Obst & Minke 2001, S. 38)

#### 4.9.3. Fehlerortung

Nach Abschaltung der Leitung wird zunächst kontrolliert, ob der Fehler durch Einwirkung Dritter (z.B. Bauarbeiten) entstanden ist. Kann keine äußere Einwirkung festgestellt werden, wird die Fehlerart über Messung des Isolationswiderstandes und Durchganges bestimmt. Anschließend wird mittels Vorortung der Fehlerort ermittelt. Dabei hängt die Genauigkeit der Messung vom Messverfahren, den physikalischen Kabeleigenschaften sowie der Genauigkeit der Planunterlagen ab. Das Ergebnis liefert, mit einer Messtoleranz von  $\pm 5\%$ , die Entfernung des Fehlers vom Kabelanfang. Die so ermittelte Fehlerstelle wird in die Planunterlagen übernommen. Im

<sup>28</sup> Kommt dies bei einer Freileitung durch einen Fehler zu einem Überschlag, so wird diese kurz aus- und wieder eingeschaltet. Hat sich der Fehler durch den Lichtbogen (z.B. Abbrand der Verschmutzung an den Isolatoren) selbst behoben, so kann die Leitung weiterbetrieben werden, man spricht von „Selbstheilung“. Besteht der Fehler nach der Wiedereinschaltung weiter, kommt es zur Abschaltung der Leitung und zur Fehlersuche.

fehlerbehafteten Bereich der Kabellage wird im Anschluss die exakte Fehlerlage mittels Nachortung bestimmt und die Tiefenlage ermittelt. (VDEW 2007, S. 254)

#### 4.9.4. Fehlerbehebung

Ist der Ort des Fehlers sowie dessen Tiefenlage bekannt, kann mit den Reparaturarbeiten begonnen werden. Der Zeitaufwand hängt wesentlich von der Art der Verlegung ab. Bei einer Kanal- oder Tunnelverlegung kann (bei entsprechender Vorratshaltung) ein Muffentausch laut Herstellern in wenigen Tagen erfolgen. Im Falle eines erdverlegten Kabels verzögern sich die Reparaturarbeiten durch die erforderlichen Tiefbauarbeiten. (Noack 2005, S. 10) Handelt es sich um einen großräumigen Fehler, bei dem die Auswechslung einer Teilstrecke notwendig wird, nehmen die Reparaturzeiten entsprechende Ausmaße an.

### 4.10. Alterung, Lebensdauer und Zuverlässigkeit einer Kabelanlage

Die Netzbetreiber sind verpflichtet, das Übertragungsnetz sicher, zuverlässig und leistungsfähig zu betreiben und zu erhalten. Da bei Kabelnetzen im Höchstspannungsbereich die Erfahrungswerte bezüglich Zuverlässigkeit und Lebensdauer fehlen, bedient man sich hier geeigneter Diagnoseverfahren. Diese ermitteln den Zustand der Kabel und stellen somit die Entscheidungsgrundlage für weitere Maßnahmen zur Erhaltung der Versorgungssicherheit dar. Abgesehen von Beschädigungen durch Dritte (Kap. 4.9.1), wird die Lebensdauer der Kabel vom Alterungsverhalten und möglichen betriebsbedingten Schädigungen bestimmt.

#### 4.10.1. Alterung und Schädigung eines Kabels

Unter **Alterung** versteht man beim Kabel die Verminderung der elektrischen Festigkeit. Verursacht wird die Verschlechterung des Isoliervermögens durch gleichzeitige Belastung der Isolierung mit Feldstärke, Temperatur und gegebenenfalls Feuchtigkeit. (Schmidt & Kranz 2006) Die ursprünglichen Eigenschaften des Kabels werden bereits durch Verlegung und Montage beeinflusst. Weiters spielen die Beanspruchungen während des Betriebes sowie unbeeinflussbare Größen wie Überspannungen eine Rolle. Bei Kabeln äußert sich die Alterung in einer Verminderung der elektrischen Festigkeit. (Meurer & Stürmer 2002) Der Alterungszustand dient als Entscheidungsgrundlage für weitere Maßnahmen.

Als **Schädigung** bezeichnet man lokal auftretende Fehlerstellen am Kabel. Diese können durch unterschiedliche Fehlermechanismen hervorgerufen werden. (siehe Kap. 4.9) Durch mechanische, chemische und thermische Beanspruchung kann es zu einer Versprödung bzw. zur Bildung von Rissen in der Isolierung kommen. Von vorhandenen oder entstandenen Fehlstellen können sogenannte Electrical trees ausgehen. Dabei handelt es sich um Entladungskanäle, die durch schnelle Bewegung der Elektronen entstanden sind. Electrical trees stellen bleibende Schäden dar, die zum vollständigen Durchschlag führen können. Neben den Electrical trees gibt es Water trees, die unter Einfluss von Feuchtigkeit entstehen.

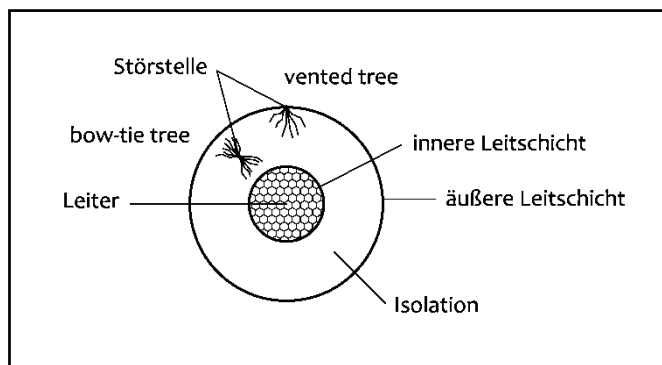


Abb. 4.35: Schematische Darstellung von watertree - Strukturen  
(Herold 2001, S. 240)

Dabei werden zwei Ausbildungsformen unterschieden. (siehe Abb. 4.35) Vented trees gehen von der Grenzfläche der Isolierung aus, wogegen sich bow - tie trees im Inneren der Isolierung bilden. Schäden durch Water trees ergeben sich erst, wenn diese sich entsprechend vergrößert haben und die Isolierstrecke überbrücken. Dann entwickeln sie sich zu Electrical trees und können somit zu einer Schädigung führen. (VDEW 2007, S. 32ff)

#### Alterungs- und Schädigungsprävention

Die Alterungsprävention beginnt bereits bei der Wahl der Produkte. Eine Schädigung durch Feuchtigkeit lässt sich durch Auswahl von Kabeln mit längs- und querwasserdichter Ausführung weitgehend vermeiden. Weiters gilt es besonders auf die Verlegung und Montage der fabriksneuen Leitung zu achten. Das Langzeitverhalten wird durch die Qualität der Montage stark beeinflusst. Damit es zu keinen Schädigungen durch den Betrieb kommt, darf die Leitung nicht über ihren zulässigen Grenzwerten betrieben werden. (Meurer & Stürmer 2002)

#### 4.10.2. Datenerfassung und Diagnose einer Kabelanlage

Aufgabe der Diagnose ist es, mögliche Schwachstellen am Kabel und an den Garnituren vor Eintritt eines Defektes aufzuzeigen. Abhängig von der Art des Betriebsmittels, der Relevanz für die Versorgungssicherheit und des Aufwandes, können die für die Diagnose erforderlichen Daten in gelegentlichen, periodischen oder permanenten Überprüfungen (Monitoring<sup>29</sup>) ermittelt werden. (Neumann 2006)

Der Alterungszustand kann mittels globalen Messverfahren (z.B. Verlustfaktormessung, Messung von Depolarisationsströmen) festgestellt werden. Die zerstörungsfreien dielektrischen Prüfverfahren ordnen den ermittelten Zustand der entsprechenden Alterungsklasse zu. Dabei wird bei der Verlustfaktormessung in die Klassen betriebssicher, teilweise geschädigt und stark geschädigt eingeteilt. (Borlinghaus 2006)

Mittels Teilentladungsmessung kann ermittelt werden, ob bei einem Kabel Teilentladungen auftreten. Wird auch der Ort der Schädigung lokalisiert, kann man von einer Diagnose sprechen. Da bei VPE der Zeitraum zwischen dem Auftreten der ersten Teilentladung und dem Durchschlag sehr kurz ist, spricht man ab der ersten Entladung vom Versagen der Isolierung. (Pinkert et al.

<sup>29</sup> Unter Monitoring versteht man die pausenlose Überwachung eines Betriebsmittels. Mittels Temperaturmonitoring kann die Übertragungsleistung eines Kabels bei Einhaltung der zulässigen Betriebstemperaturen maximiert werden. (Goehlich et al. 2002)

2006) Water trees (Kap. 4.10.1) gelten zwar als Alterungsindikatoren, lassen sich aber mit dieser Methode nicht lokalisieren. (Schmidt & Kranz 2006)

Um eine aussagekräftige Diagnose zu erhalten, reichen die reinen Messergebnisse oft nicht aus. Zur Abschätzung des Fehlerrisikos bedarf es umfangreicher Daten, die zum Vergleich herangezogen werden. Je mehr Daten über das zu betrachtende Kabel bzw. über baugleiche Kabel unter ähnlichen technischen und betrieblichen Umständen vorliegen, desto exakter wird die Prognose ausfallen.

### **Datenerfassung**

Zur lückenlosen Datenerfassung empfiehlt sich die Führung eines Kabel(tage)buches. Diese Datensammlung soll alle relevanten Informationen rund um das Kabel bzw. die Leitung enthalten. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit können dies Daten:

- zu den eingesetzten Produkten (Hersteller, Typ,...),
- zu den durchgeführten Materialuntersuchungen sowie Typ- und Fertigungsprüfungen,
- bezüglich der Verlegung (Pläne, spezielle Kennwerte,..) und der Montage (Wetter,...),
- zur Inbetriebnahmeprüfung,
- über die Belastungen im Betrieb,
- über Prüfergebnisse von Routineprüfungen,
- zu aufgetretenen Fehlern und den gesetzten Maßnahmen,
- über Baumaßnahmen im Nahbereich der Trasse,
- über die zerstörende Prüfung ausgewechselter Kabelabschnitte,
- aus permanenter Überwachung (Monitoring) des Kabels,
- über wissenschaftliche Erkenntnisse

sein.

Basierend auf umfangreichen Daten kann mittels Prognose die Lebensdauer eines Kabels abgeschätzt werden.

### **4.10.3. Lebensdauer eines Kabels**

Als Lebensdauer bezeichnet man die Zeit, während der ein Betriebsmittel technisch und wirtschaftlich sinnvoll genutzt werden kann. Statt Lebensdauer kann auch der Begriff technische Nutzungsdauer verwendet werden. Hier kommt besser zum Ausdruck, dass es sich bei der Nutzungsdauer nicht um einen reinen Zeitablauf handelt. Vielmehr hängt die Lebensdauer eines Kabels vom Alterungsverhalten und möglichen Schädigungen ab. (siehe Kap. 4.10.1). Mittels Diagnose (Kap. 4.10.2) kann man eine Aussage über die bereits verbrauchte Lebensdauer ( $T_V$ ) des Kabels machen. Die Lebensdauerkennlinie (Abb. 4.36) stellt das idealisierte, zeitabhängige Alterungsverhalten des Kabels dar.

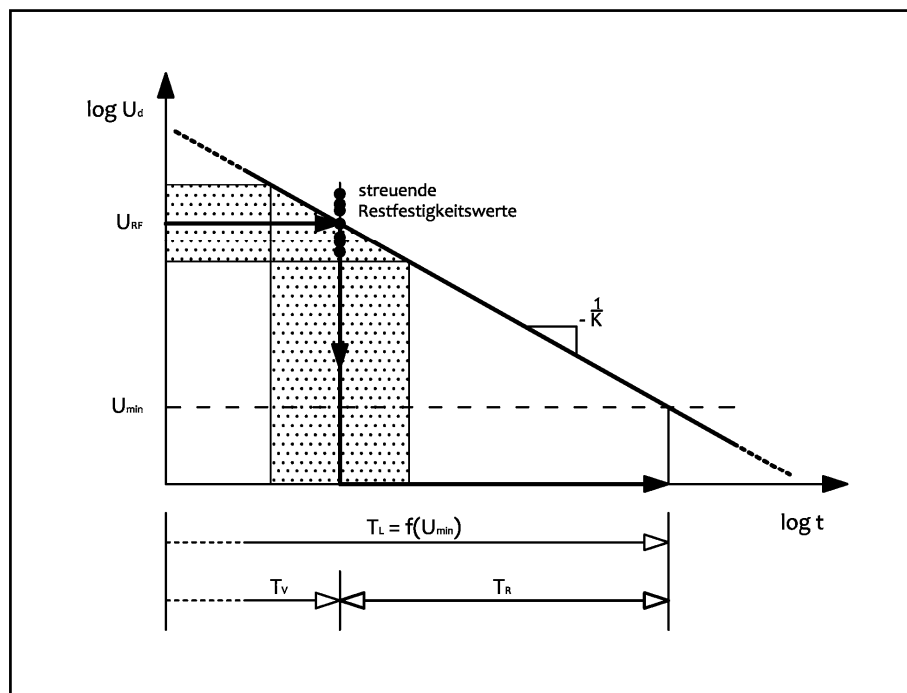


Abb. 4.36: Ideализierte Lebensdauer kennlinie des Kabels  
(Schmidt & Kranz 2006)

Die Festigkeitsabnahme der Isolierung (Abb. 4.36) wird durch den sogenannten Lebensdauerexponenten  $K$  beschrieben. Dieser ist in erster Linie vom Material abhängig und wird für VPE mit  $K = 11$  angegeben. Ausgehend von der momentanen Restfestigkeit  $U_{RF}$  lässt sich die Restlebensdauer  $T_R$  mathematisch ermitteln. Da der Lebensdauerexponent aber zusätzlich von den Betriebsbedingungen der Leitung abhängt, kann er sich im Laufe der Zeit verändern. Dies bedingt ein geändertes Alterungsverhalten und somit eine Änderung der Steigung der Lebensdauer kennlinie. Bei den Restfestigkeitswerten ( $U_{RF}$ ) handelt es sich um Momentaufnahmen, die mit statistischen Unsicherheiten behaftet sind und stark streuen. Die ermittelte Restlebensdauer ist daher großen Schwankungen unterworfen und lässt sich in der Praxis nicht ohne weiteres verwenden. (Schmidt & Kranz 2006) Die Bewertung des Zustandes in Hinblick auf Instandhaltungsmaßnahmen des Kabels kann daher nur durch den Netzbetreiber unter Zuhilfenahme der gesammelten Kabeldaten erfolgen.

In der Literatur wird für Hoch- und Höchstspannungskabel mit VPE – Isolierung eine Lebensdauer ( $T_L$ ) von zumindest 40 Jahren prognostiziert (Noack 2005, S. 10; Oswald 2007, S. 26).

#### 4.10.4. Zuverlässigkeit einer Kabelanlage

Die Zuverlässigkeit einer Kabelanlage beschreibt die Fähigkeit, die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen. Am Sektor der Energieübertragung wird bei vertretbarem wirtschaftlichen Aufwand, unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Auflagen, die größtmögliche Versorgungssicherheit angestrebt. Maßgebend für die Zuverlässigkeit ist die Verfügbarkeit einer Leitung. Ermittelt wird diese über die Häufigkeit und Dauer der Versorgungsunterbrechungen. Die Ausfalls- und Störungsstatistik stellt dafür die Grundlage dar. Österreicherweit werden alle Ausfälle und Störungen erhoben, die nicht auf extreme Ereignisse (wie Naturkatastrophen) zurückzuführen sind. (E-Control 2008) Da der Kabelanteil im Hoch- und



Höchstspannungsnetz bisher nur 5% beträgt, ist die Aussagekraft der Störungsstatistik im Bezug auf Kabel, speziell auf Kabelanlagen größerer Länge, unzureichend. In Deutschland kam man zur Erkenntnis, dass die Versorgungssicherheit im Mittelspannungsnetz durch die Zunahme des Verkabelungsgrades und den Einsatz zuverlässigerer Kabeltypen zugenommen hat. (Vennegeerts et al. 2008) In Tab. 4.6 werden die aktuellen Daten der CIGRE<sup>30</sup>-Ausfallstatistik zur Ausfallshäufigkeit von Höchstspannungskabeln angegeben.

Tab. 4.6: Ausfallraten von VPE-Höchstspannungskabeln  
(Bericht der zur Ausfallstatistik der CIGRE-Working Group B1-10,  
entnommen aus: Nkt 2009, S. 3)

Ausfallshäufigkeit - Interne Fehler:		220-550 kV
Kabel	Fehler / 100 System-km und Jahr	0,067
Muffe	Fehler / 100 Stk und Jahr	0,026
Endverschluss	Fehler / 100 Stk und Jahr	0,032
Ausfallshäufigkeit - Externe Fehler:		220-550 kV
Kabel	Fehler / 100 System-km und Jahr	0,067
Muffe	Fehler / 100 Stk und Jahr	0,022
Endverschluss	Fehler / 100 Stk und Jahr	0,018
Ausfallshäufigkeit - Fehler gesamt:		220-550 kV
Kabel	Fehler / 100 System-km und Jahr	0,134
Muffe	Fehler / 100 Stk und Jahr	0,048
Endverschluss	Fehler / 100 Stk und Jahr	0,050

Die Ausfalldauer hängt hauptsächlich von der Art der Verlegung ab. Da erdverlegte Kabel schlechter zugänglich sind, weisen sie höhere Ausfalldauern auf. (Heuck et al. 2007, S. 239) Laut Europacable (2009) liegt die Ausfalldauer durch einen kleinen Fehler bei fünf Tagen und durch große Fehler bei 20 Tagen. In dieser Diplomarbeit wird davon ausgegangen, dass es sich bei kleinen Fehlern um Fehler an Muffen und bei großen Fehlern um Fehler an Kabeln handelt.

<sup>30</sup> CIGRE: Conseil International des Grands Réseaux Électriques (International Council on large electric Systems)

## 5. Auswirkungen durch das Kabel

Eine Kabelanlage wirkt sich auf ihre Umgebung bei der Errichtung und in weiterer Folge durch den Betrieb aus. Die Auswirkungen während der Errichtung sind ähnlich wie bei der Errichtung anderer liniengebundener Infrastrukturbauwerke, z.B. Straßen oder Pipelines.

### 5.1. Flächenbedarf

Bei der Verlegung eines Kabelsystems in der Höchtsspannungsebene beträgt die Breite des Kabelgrabens<sup>31</sup>, abhängig vom Phasenabstand, ca. 2 m. Wird ein zweites System mitverlegt, so vergrößert sich die Breite des Kabelgrabens auf 5 m, da aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung größere Achsabstände der Systeme notwendig werden. (siehe auch Kap. 4.4.2) Dementsprechend erhöht sich die Grabenbreite bei drei verlegten Kabelsystemen auf 8 m, sowie auf 11 m bei der Verlegung von vier Systemen (Oswald 2007, S. 33f).

Da es sich um ein sogenanntes Linienbauwerk handelt, ist in der Bauphase eine durchgehende Baustraße notwendig. An den Muffenbauwerken (Einzugsstellen der Kabel) soll die Baustraße Schwertransportern (zwecks Anlieferung der Kabeltrommeln) die Zufahrt ermöglichen. Die Zugänglichkeit der Trasse muss auch während des Betriebes der Kabelanlage, z.B. im Falle einer Reparatur, gegeben sein. Die Notwendigkeit von Lagerflächen für den abzutragenden Mutterboden, sowie für den anfallenden Aushub sei an dieser Stelle nur angeschnitten, da die Lagerung nicht zwangsläufig entlang der Trasse erfolgen muss.

Die frei zu haltende Breite der Kabelanlage errechnet sich aus der Grabenbreite und dem Schutzbereich. Laut Brakelmann (2004, S. 45) beträgt der Schutzstreifen pro Seite 3 m. Die von Bewuchs freizuhaltende Trasse beträgt bei einem Doppelsystem demnach 11 m.

### 5.2. Ökologische Auswirkungen

Wie bei den meisten Bauwerken, kommt es auch bei Kabelanlagen zur Beeinflussung der Umwelt. Der Bau einer solchen Anlage stellt unbestritten einen großen Eingriff in die Natur dar. Da die Auswirkungen durch die Bautätigkeit im Vergleich zur Nutzungsdauer der Kabelanlage von kurzer Dauer sind, wird in dieser Diplomarbeit darauf nicht näher eingegangen. Von größerem Interesse sind die bleibenden Veränderungen, welche die Errichtung einer Kabelanlage mit sich bringt.

#### 5.2.1. Bodenaustrocknung

Durch die Verlustwärmeabgabe der Leitung kommt es im Nahbereich erdverlegter Kabel zur Bodenerwärmung. Abhängig von der Belastung der Kabel kann es auch zur Bodenaustrocknung kommen (siehe Kap. 4.5.1). Bedingt durch die Temperaturveränderung muss mit einer Verschiebung in der Artenzusammensetzung der Mikroorganismen im Boden gerechnet werden (Muhr & Woschitz 2001, S. 32). Der Einfluss der Bodenerwärmung beschränkt sich jedoch auf den unmittelbaren Nahbereich der Kabel (Hoffmann & Noack 2007, S. 142). Bei der Verlegung der

---

<sup>31</sup> Die Breite des Kabelgrabens wird an der Sohle angegeben, zusätzlicher Platzbedarf für Sicherungsmaßnahmen der Böschung ist in diesen Werten nicht inkludiert.

Kabel in einem Tunnel kann eine Austrocknung des Bodens aufgrund der günstigeren Wärmeabfuhr ausgeschlossen werden. (siehe Kap. 4.5.2)

### **5.2.2. Auswirkungen auf das Grundwasser**

Die Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt sind laut Uther et al. (2009, S. 70) aus ökologischer Sicht nicht relevant. In einem Versuch wurde festgestellt, dass sich die Bodenfeuchte, dem erwarteten Jahresgang der Niederschläge entsprechend, nur geringfügig verändert. (Ausgenommen davon sei der Nahbereich der Kabel, in dem es zur Bodenaustrocknung kommen kann.)

Abhängig von der Bodenart kann es durch den Kabelgraben zu einer ungewollten Drainagewirkung kommen. Diese kann jedoch durch bautechnische Maßnahmen (z.B. Anordnung eines Lehmschlages) entschärft werden. (Hoffmann & Noack 2007, S. 149)

### **5.2.3. Auswirkungen auf Flora & Fauna**

Durch die erforderliche Freihaltung der Trasse von Tiefwurzeln ergibt sich entlang der Kabeltrasse eine Veränderung der Vegetation. Dies betrifft besonders Waldquerungen, bei denen sich durch den niedrigeren Bewuchs eine bleibende Trennwirkung einstellt. Um die Auswirkungen auf Flora und Fauna so gering wie möglich zu halten, soll bei der Bauzeitplanung Rücksicht auf die Vegetationsphasen genommen werden. Weiters ist die Querung von Schutzgebieten nach Möglichkeit zu vermeiden. (Hoffmann & Noack 2007, S. 147)

## **5.3. Landwirtschaftliche Nutzung**

Abhängig von der Jahreszeit, kann es bei der Errichtung der Kabelanlage einmalig zu einem Ernteausfall im Bereich der Trasse kommen. Bei der Wiederverfüllung des Kabelgrabens ist darauf zu achten, dass es im Bereich landwirtschaftlich genutzter Flächen nicht zu unzulässigen Verdichtungen (z.B. durch Baufahrzeuge) des Bodens kommt. (Hoffmann & Noack 2007, S. 141)

Im Betriebsfall können die landwirtschaftlichen Flächen uneingeschränkt bearbeitet werden. In Hampicke (2005, S. 48) wird die maximale Bearbeitungstiefe (bei Unterbodenbearbeitung) mit 0,80 m angegeben. Die Verlegetiefe der Kabel beträgt jedoch mehr als 1,20 m, da andernfalls die Grenzwerte der magnetischen Beeinflussung nicht eingehalten werden können. (siehe Kap.4.8.2). Als einzige Einschränkung kann die Freihaltung der Trasse von Tiefwurzeln genannt werden. (Brakelmann 2004, S. 45)

Ob es durch die Bodenerwärmung zum vorzeitigen Auftauen des Bodens und damit zu einem verfrühten Austreiben der Vegetation kommt, wird zur Zeit noch untersucht. Dies könnte an empfindlichen Pflanzen zu Spätfrostschäden führen (Uther et al. 2009, S. 74).

## 6. Bauwerke und Bauverfahren

Bei der Auswahl der Bauweise für eine Kabelleitung müssen mehrere Faktoren in Betracht gezogen werden. Die Relevanz der zu verlegenden Übertragungsleitung spielt dabei die Hauptrolle.

Der Schutz vor Beschädigung sowie die Zugänglichkeit im Schadensfall kann, neben der Forderung nach geringen Investitionskosten, ausschlaggebend sein. Aus elektrotechnischer Sicht muss das Bauwerk in der Lage sein, die entstehende Verlustwärme abzuführen, um die projektierte Übertragungsleistung gewährleisten zu können (siehe Kap. 4.5). Abhängig von der Umgebung der Kabeltrasse können auch ökologische Auswirkungen Einfluss auf die Verfahrenswahl nehmen (siehe Kap. 5.2).

Die Verlegung von Kabeln kann auf verschiedene Weise erfolgen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen der Verlegung in Erde und der Verlegung der Kabel in Luft (Tunnel).

### 6.1. Verlegung der Leitung in Erde – Offene Bauweise

Die offene Bauweise stellt das Standardverfahren bei der Leitungsverlegung dar. Bei der direkten Erdverlegung erfolgt die Legung der Kabel (ähnlich der Rohrverlegung im Kanalbau) in einem offenen Kabelgraben (Künette). Im Anschluss an die Leitungsverlegung wird das Grabenprofil verfüllt, die Kabel haben nach der Wiederverfüllung direkten Erdkontakt.

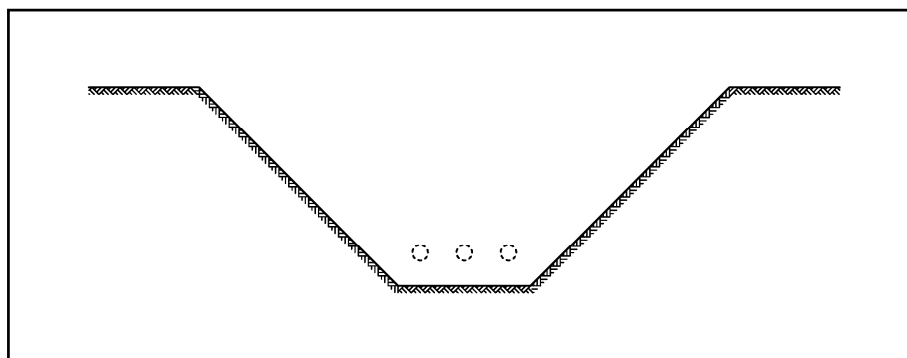


Abb. 6.1: Querschnitt - geböschter Kabelgraben

Da durch die Grabungsarbeiten der Gleichgewichtszustand im Boden gestört wird, müssen laut § 48 Abs. 2 der Bauarbeiterschutzverordnung (BauV) ab einer Grabentiefe von 1,25 m Maßnahmen zum Schutz der Arbeiter getroffen werden. Zur Sicherung der Baugrube können zwei Bauweisen angewendet werden, die Ausbildung einer Böschung sowie die Sicherung durch einen Grabenverbau. Aufgabe der Böschungssicherung ist die Aufnahme und Ableitung aller auftretenden Lasten (Erddruck, Lasten aus Bebauung und Verkehr) sowie der Schutz der Arbeiter. Nachfolgend wird auf die beiden Bauverfahren näher eingegangen.

### 6.1.1. Sicherung der Baugrube mittels Böschung

Grundsätzlich wird zuerst untersucht, ob die Baugrube durch Herstellung einer Böschung gesichert werden kann, da dies die wirtschaftlichste Lösung bei flachen Baugruben darstellt (Maybaum et al. 2009, S. 58). Dabei werden folgende Umstände betrachtet:

- Bodenverhältnisse
- Platzverhältnisse
- Umfeld der Kabeltrasse

#### Bodenverhältnisse

Durch den Grabenaushub wird der Gleichgewichtszustand im Boden gestört. Für alle Arbeiten unter der Erdoberfläche ist daher die Kenntnis der vorherrschenden Bodenverhältnisse erforderlich. Ausschlaggebend für die Standsicherheit der Böschung ist die Scherfestigkeit<sup>32</sup> des Bodens. Sie setzt sich aus Reibungs- und Haftkräften zusammen und ist abhängig von der Art des Bodens. Eingeteilt werden die Böden in nichtbindige und bindige Böden.<sup>33</sup> Unter nichtbindigen Böden versteht man Böden mit geringem Feinkornanteil wie z.B. Sand oder Kies. Die Kraftübertragung erfolgt bei nichtbindigen Böden ausschließlich über die Kontaktflächen der einzelnen Körner. Unter bindigen Böden versteht man Böden mit plastischen Eigenschaften und hohem Feinstkornanteil wie z.B. Ton oder Lehm. Die Kraftübertragung erfolgt über Reibung und Kohäsion. Die Kohäsion, auch Haftfestigkeit genannt, beruht auf der Wirkung der Oberflächenkräfte feinsten Bodenteilchen. Sie hängt von der Art des Tonminerals, vom Tonanteil und vom Wassergehalt des Bodens ab. (Simmer 1994, S.30f, S.129ff)

Die **Neigung der Böschung** richtet sich nach den mechanischen Eigenschaften des Bodens unter Berücksichtigung der wirkenden Einflüsse. Weiters spielt die Grabentiefe sowie die voraussichtliche Standzeit der Böschung (kurzfristig oder langfristig) eine Rolle für die Böschungsneigung. Im Regelfall darf der Böschungswinkel gemäß § 50 des Bauarbeiterschutzverordnungsgesetzes (BauV)

- 45° bei nichtbindigen oder weich bindigen Böden,
- 60° bei steifen oder halbfest bindigen Böden bzw.
- 80° bei leichtem Fels bzw. 90° bei schwerem Fels betragen.

Wird die Stabilität der Böschung durch Austrocknen, eindringendes Wasser, Frost oder andere Einflüsse gefährdet, so müssen die Böschungsneigungen verringert oder zusätzliche Schutzmaßnahmen getroffen werden. Liegt eine Schichtung des Bodens vor, ist die Böschungsneigung anhand des ungünstigsten Materials zu wählen. Sollen steilere Böschungen ausgeführt werden als in der Bauarbeiterschutzverordnung zugelassen, muss ein rechnerischer

---

<sup>32</sup> Die Scherfestigkeit ist der größte Widerstand, den ein Boden einer Schub- (Scher-)beanspruchung entgegensetzen kann.

<sup>33</sup> Eine weitere Klasse stellt die Klasse der organischen Böden (z.B. Torf) dar. Da die Querung dieser aufgrund der unzureichenden Tragfähigkeit zu meiden ist, wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen.

Nachweis der Standsicherheit geführt werden. Geböschte Baugruben werden im allgemeinen nur oberhalb des Grundwasserspiegels angeordnet (Maybaum et al. 2009, S. 58).

### Platzverhältnisse

Der Platzbedarf des geböschten Kabelgrabens ergibt sich aus den Böschungsneigungen. Diese wiederum sind abhängig von den Bodeneigenschaften sowie der erforderlichen Tiefe und Breite der Baugrube. Die elektrotechnischen Randbedingungen spielen dabei eine große Rolle. So wird die Verlegetiefe der Kabel maßgeblich durch die elektromagnetischen Felder bestimmt (siehe Kap. 4.8.6). Der in Abb. 6.2 eingetragene Bereich für die Kabelbettung dient dem Einbau thermisch stabilisierten Bettungsmaterials zur besseren Abfuhr der Verlustwärme und wird vom Planer der Kabelanlage festgelegt. Die Breite des Kabelgrabens hängt von der Anzahl der nebeneinander verlegten Übertragungssysteme ab. Sie ergibt sich aus dem System- und Legeabstand der Kabel<sup>34</sup>, welche unter Berücksichtigung der elektrotechnischen Aspekte, wie Übertragungsleistung und Wärmeabfuhr, festgelegt werden (siehe Kap. 4.5).

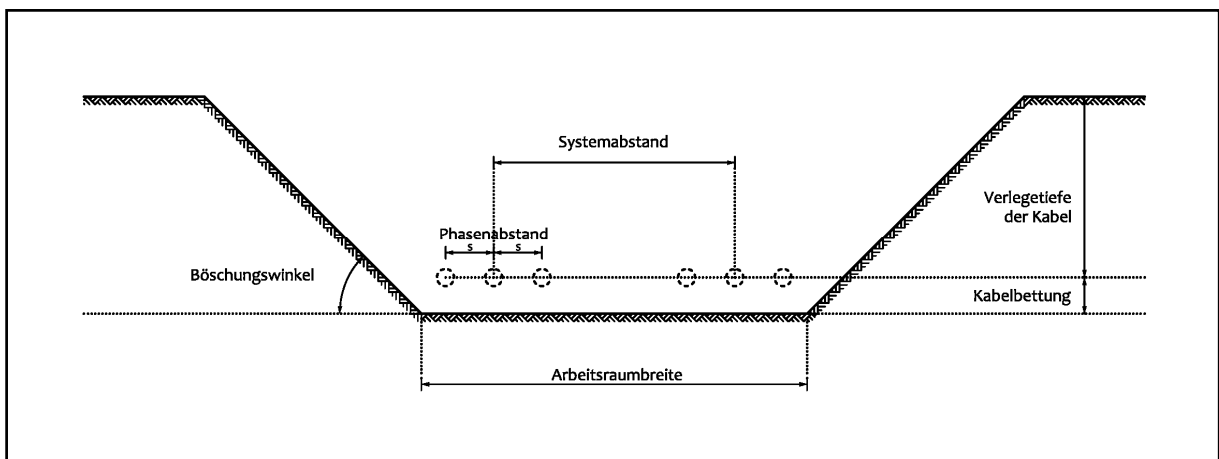


Abb. 6.2: Wesentliche Abmessungen der geböschten Baugrube

Die Mindestarbeitsraumbreite ist entsprechend § 49 der Bauarbeiterschutzverordnung einzuhalten. Bei Künetten mit geböschten Wänden wird sie von Böschungsfuß zu Böschungsfuß gemessen. Die Arbeitsraumbreite beträgt bei einer Böschungsneigung von maximal 80° mindestens 40 cm. Werden in der Künette Tätigkeiten in gebückter Haltung durchgeführt (Korrektur der Kabellage, Montage der Muffen,...), so muss die Arbeitsraumbreite mindestens 60 cm betragen. Bei der Ausbildung einer Böschung mit lotrechten Wänden (90°) beträgt sie mindestens 60 cm. Die Messung der Arbeitsraumbreite erfolgt dabei von Erdwand zu Erdwand.

Weiters ist zu berücksichtigen, dass für die Verfuhr des Aushubmaterials und die Kabellegung eine (möglichst) durchgehende Baustraße parallel zur Kabeltrasse anzuordnen ist. (Oswald 2008, S. 58)

<sup>34</sup> Der Legeabstand der Kabel wird in der Elektrotechnik als Phasenabstand (s) bezeichnet.

### **Umfeld der Kabeltrasse**

Neben dem Platzbedarf ist auch das nähere Umfeld der Kabeltrasse zu berücksichtigen. Dabei wird in erster Linie auf die Nutzung und Bebauung der angrenzenden Flächen geachtet. Gebäude im Nahbereich der Trasse führen zu einer Erhöhung des Erddrucks, von einer Sicherung des Kabelgrabens mittels Böschung wird daher oft abgesehen. Stellt der Kabelgraben eine Gefährdung für die Standsicherheit der Nachbarbebauung dar, so kommen andere Verfahren zur Böschungssicherung zum Einsatz.

Zusätzliche Lasten können auch durch den Verkehr entstehen. Unabhängig von der Art des Verkehrs kommt es meist zu Erschütterungen, die von der Baugrubensicherung aufzunehmen und ohne Beschädigung abzuleiten sind.

Die Berücksichtigung der Umgebung beschränkt sich nicht nur auf die oberirdischen Gegebenheiten. Vorhandene unterirdische Einbauten sowie Leitungen (Wasser, Kanal, Strom, Fernwärme,...) müssen in die Überlegungen zur Baugrubensicherung miteinbezogen werden.

### **Vor- und Nachteile geböschter Kabelgräben**

Die Herstellung der Baugrubensicherung mittels Böschung erfolgt über Hydraulikbagger und erfordert daher keinen Einsatz von Spezialgeräten. Weiters kann auf Verbaumaterialien verzichtet werden, solange die Baugrube über dem Grundwasserspiegel liegt. Bei der Sicherung mittels Böschung handelt es sich um eine verhältnismäßig lärmarme und erschütterungsfreie Bauweise. Ein wesentlicher Vorteil stellt der unverbaute Querschnitt dar, der den Einsatz von Großgeräten ermöglicht und die Arbeiten bei der Kabelverlegung erleichtert.

Als Nachteil gilt der große Platzbedarf und das mit größerer Tiefe zunehmende Aushubvolumen. (Maybaum et al. 2009, S. 67)

### **6.1.2. Sicherung der Baugrube mittels Verbau**

Die Böschungssicherung mittels Verbau kommt zur Anwendung, wenn die Ausbildung einer Böschung nicht möglich ist. Grundsätzlich wird zwischen rückbaubarem und nicht rückbaubarem Verbau unterschieden. Unter rückbaubaren Verbauten versteht man Verkleidungs- und Aussteifungskonstruktionen, die nach Abschluss der Bautätigkeit wieder entfernt werden können. Im Gegenzug dazu verbleiben die nicht rückbaubaren Verbauten teilweise oder zur Gänze im Boden. Ihr Einsatz ist im Leitungsbau auf Spezialfälle beschränkt und wird daher an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt.

Die historische Entwicklung am Gebiet des Tiefbaus hat eine Vielzahl an Verbaumöglichkeiten hervorgebracht. Anschließend wird auf die gängigsten rückbaubaren Verbauten im Leitungsbau eingegangen.

#### **Waagrechter Verbau**

Beim waagrechten Verbau wird die lotrechte Böschung durch waagrechte Hölzer bzw. Kanaldielen verkleidet und durch lotrechte Brusthölzer und Steifen abgestützt. Der Einbau erfolgt von oben nach unten und erfordert zumindest vorübergehend standfestes Material, um die Hölzer einsetzen zu können.

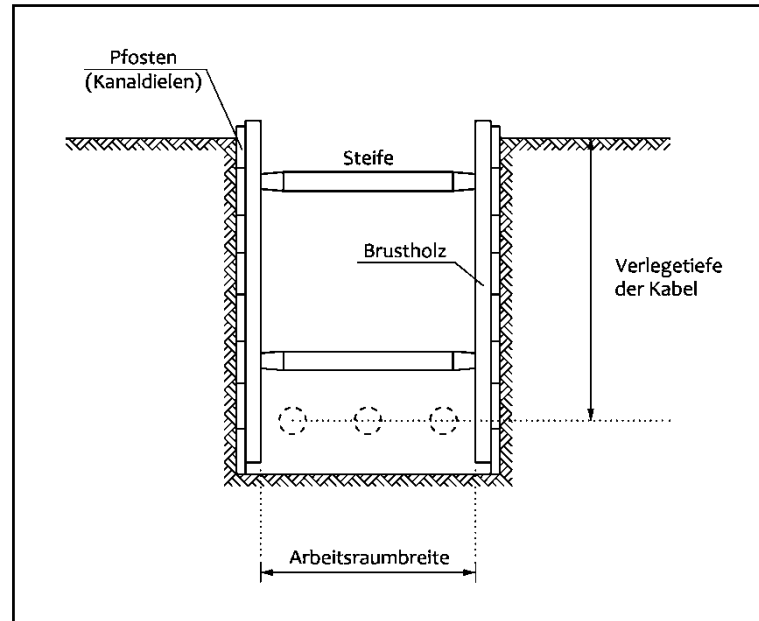


Abb. 6.3: Waagrechter Verbau  
(Kainz et al. 2002, S. 189; Stein 2003, S. 600)

Der waagrechte Verbau (Abb. 6.3) zeichnet sich durch leichte Verbauelemente aus, die sich bei entsprechender Behandlung oft wiederverwenden lassen. Leitungskreuzungen lassen sich durch die gute Anpassungsfähigkeit realisieren. Durch den ebenfalls schrittweisen Rückbau kann das Verfüllmaterial gegen den anstehenden Boden gut verdichtet werden. Da der waagrechte Verbau nicht maschinell hergestellt werden kann, gilt er als sehr lohn- und zeitintensiv. Wie bereits erwähnt, ist er nur in vorübergehend standfesten Böden realisierbar. Der Einsatz im Bereich des Grundwasserspiegels ist ohne Wasserhaltungsmaßnahmen nicht möglich, da der waagrechte Verbau keine abdichtende Wirkung besitzt. Die Bewegungsfreiheit im Graben wird durch den geringen Steifenabstand eingeschränkt.

Eingesetzt wird der waagrechte Verbau bei Grabentiefen von 3,0 bis 5,0 m. (Stein 2003, S.599f)

### Senkrechter Verbau

Beim senkrechten Verbau (siehe Abb. 6.4) werden die Hölzer oder Kanaldielen lotrecht mit dem Aushub fortschreitend eingebaut. Zeitgleich erfolgt der Einbau der waagrechten Gurthölzer und Steifen. Dieses Verfahren stellt keine Mindestansprüche an die Standfestigkeit des Bodens. Im Vergleich zum waagrechten Verbau werden weniger Steifen benötigt, die Bewegungsfreiheit ist somit größer. Das Bauverfahren besitzt einen höheren Mechanisierungsgrad, welcher systembedingt zu Lärmbelästigung und Erschütterungen beim Rammen und Ziehen der Bohlen führt. Die höheren Anforderungen an das Verbaumaterial (Rammfähigkeit) und die Geräte bedingen höhere Kosten. Eingesetzt wird der senkrechte Verbau nur oberhalb des (gegebenenfalls abgesenkten) Grundwassers bis zu einer Tiefe von 5,0 m. Im Gegensatz zum waagrechten Verbau entstehen beim Rückbau des senkrechten Verbaus Hohlräume beim Ziehen der Pfosten oder Kanaldielen. (Stein 2003, S. 604)



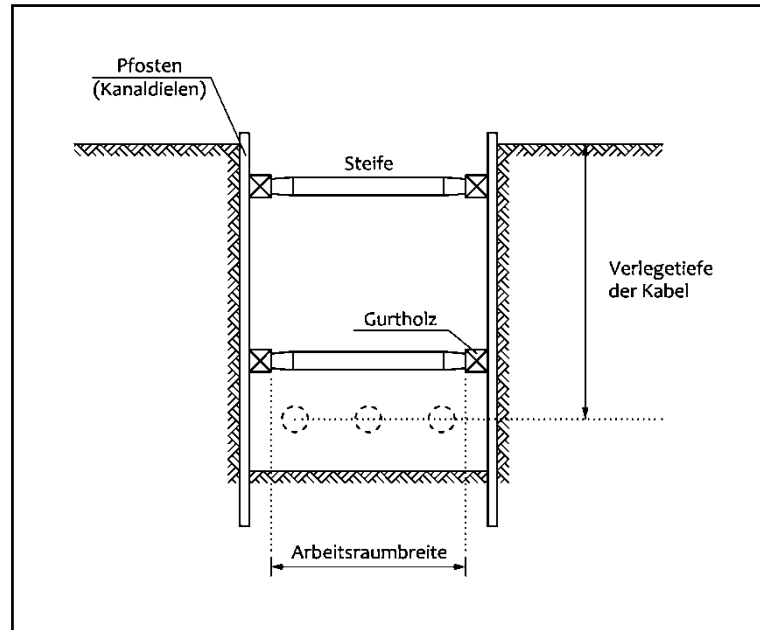


Abb. 6.4: Senkrechter Verbau  
(Kainz et al. 2002, S. 189; Stein 2003, S. 605)

### Böschungssicherung mit Grabenverbauplatten

Um die Grabensicherung mittels Verbau wirtschaftlicher durchführen zu können, wurden Verbaueinheiten entwickelt (Abb. 6.5). Eine Verbaueinheit besteht aus zwei großflächigen Wandelementen (meist aus Stahl), die über Gurte und Streben rahmenartig miteinander verbunden sind.

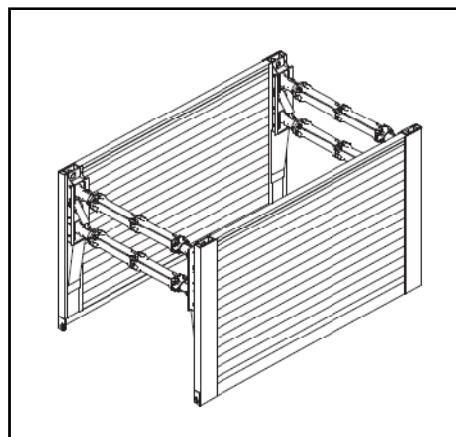


Abb. 6.5: Grabenverbaueinheit (Randgestützt)  
(ES-Verbau 2009, S. 3)

Grundsätzlich werden zwei Einbauverfahren unterschieden, das Einstellverfahren und das Absenkverfahren.<sup>35</sup> Beim Einstellverfahren wird der Aushub getätigt und im Anschluss die Verbaueinheit eingehoben. Dieses Verfahren erfordert senkrechte Grabenwände, welche auf Länge der Verbaueinheit die gleiche Grabenbreite und vorübergehend standfestes Material

<sup>35</sup> Aufgrund der Vielzahl der am Markt befindlichen Verbausysteme ist die Eignung des Verbaus für das gewählte Einbauverfahren im Einzelfall zu überprüfen.

aufweisen müssen. Kann die Standsicherheit des Bodens nicht garantiert werden, so wird das Absenkverfahren angewendet. Dabei wird die Verbaueinheit im Wechsel mit dem Aushub abgesenkt. Durch die erforderliche Dicke der Verbauplatten bleibt beim Ziehen der Elemente ein Spalt zwischen gewachsenem Baugrund und Verfüllung, der während des Ziehvorgangs verfüllt werden muss. Die Anwendung von Verbaugeräten zeichnet sich durch kurze Einbauzeiten und mehrfachen Einsatz ohne Umrüstung aus. Es treten kaum Erschütterungen und nur geringe Lärmemissionen auf. Verbaugeräte sind in fast allen Bodenarten anwendbar, jedoch beschränkt sich der Einsatz auf den grundwasserfreien Boden. In stark gekrümmten Trassenabschnitten sowie im Bereich kreuzender Leitungen müssen Zusatzmaßnahmen (konventioneller Verbau) getroffen werden. Mit Verbaugeräten können Grabentiefen von bis zu 6,0 m realisiert werden. (Simmer 1999, S. 42ff; Stein 2003, S. 611ff)

#### **Arbeitsraumbreiten bei lotrechten Wänden**

Die Arbeitsraumbreite hängt bei Gräben mit lotrechten Wänden von der Grabentiefe ab. Bei Gräben mit einer maximalen Aushubtiefe von 1,75 m beträgt die Mindestarbeitsraumbreite 60 cm. Im Bereich zwischen 1,75 m und 4,0 m Aushubtiefe muss die Arbeitsraumbreite mindestens 70 cm betragen. Alle Aushubtiefen über 4,0 m erfordern einen Arbeitsraum von mindestens 90 cm Breite.

#### **Böschungssicherung bei höheren Anforderungen**

Werden an die Böschungssicherung höhere Anforderungen gestellt, wie z.B.:

- größere Baugrubentiefen bzw. -abmessungen,
- Beschränkung der Verformungen im Nahbereich der Trasse,
- Bauen im Grundwasser,

so kommen andere Bauverfahren zum Einsatz. Dabei handelt es sich meist um kostenintensive, nicht rückbaubare Verbauarten, deren Ausführung auf die konkrete Problemstellung individuell abgestimmt werden muss. Sie werden daher an dieser Stelle nicht weiter behandelt.

### **6.1.3. Einsatz von Kabelpflug und Grabenfräse**

Zur Verlegung von Kabeln steht neben den konventionellen Methoden auch der Einsatz eines Kabelpfluges oder einer Grabenfräse zur Auswahl. Voraussetzung für beide Verfahren ist eine Trasse die weitgehend frei von anderen Leitungen bzw. Einbauten ist. Diese Verfahren konzentrieren sich daher auf einen Einsatz im Freiland. Im Bereich von Leitungskreuzungen oder anderen Infrastruktureinrichtungen (wie z.B. Muffenbauwerken) müssen konventionelle Bauverfahren angewandt werden. (VDEW 2007, S. 148ff)

#### **Kabelpflug**

Bei der Kabelverlegung mittels Pflug wird in einem Arbeitsgang der Boden geöffnet, das Kabel sowie die Trassenwarnbänder eingebracht und der Boden im Anschluss wieder verschlossen.

Den schematischen Aufbau eines Kabelpfluges zeigt Abb. 6.6. Durch das Verdrängerteil (g) wird unter Einsatz eines Vibrators (e) der Boden aufgeweitet. Über Leiteinrichtungen (c, f) gelangt das

Kabel zum Verlegegehäuse (h). Das Kabel kann, wie in der Abbildung gezeigt, über eine Kabeltrommel oder über ein eigenes Fahrzeug bereitgestellt werden. Zeitgleich mit der Verlegung der Kabel können diese bei Verwendung eines Anbautrichters (nicht dargestellt) auch eingesandet werden.

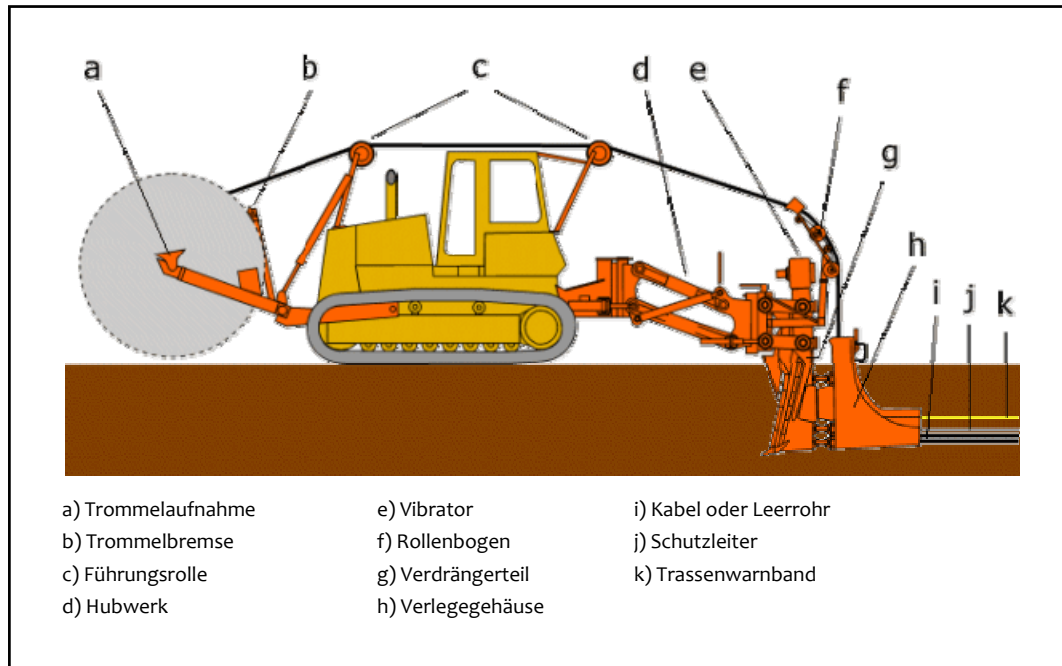


Abb. 6.6: Schematischer Aufbau eines Kabelpfluges  
(Lancier 2009)

Vorraussetzung für den Einsatz eines Kabelpfluges ist ein verdräng- und pflügbare Boden. Es können Kabel und Rohre mit Durchmessern bis 225 mm in Tiefen von maximal 1,50 m verlegt werden (Föckersperger 2009, S. 7).

Durch die Aufweitung mittels Verdrängerteil findet keine Durchmischung unterschiedlicher Bodenarten statt, es treten nur geringe Flurschäden auf. Grundsätzlich handelt es sich bei der Verlegung mittels Kabelpflug um eine schnelle, kostengünstige Legetechnik, die jedoch bei felsigen Böden oder befestigten Oberflächen an ihre Grenzen stößt. (VDEW 2007, S. 153)

### Grabenfräse

Die Grabenfräse kann auch bei felsigen Böden und befestigten Flächen eingesetzt werden. Anders als beim Kabelpflug, kommt es zur Entnahme von Bodenmaterial. Dieses wird seitlich über Schnecken oder Förderbänder entlang der Trasse ausgetragen und steht dort für die Wiederverfüllung zur Verfügung (König 2008, S.268). Die Frästiefe ist von der Länge des Fräsbalkens abhängig, die Schnittbreite kann mittels Anbaukomponenten variiert werden. Laut Vermeer (2009) können Frästiefen bis 5,50 m, bei maximalen Grabenbreiten von 1,22 m, realisiert werden.



Abb. 6.7: Grabenfräse, T858 Commander III  
(Vermeer 2009)

Mit der Grabenfräse in Abb. 6.7 können Tiefen von bis zu 2,40 m gefräst werden. Bei sehr steinigen oder felsigen Böden ist die Fräse dem Pflug überlegen, im unbefestigten Freiland stellt jedoch der Kabelpflug das kostengünstigere Bauverfahren dar. (VDEW 2007, S. 149)

#### 6.1.4. Thermisch stabilisiertes Bettungsmaterial

Dem Bettungsmaterial kommt die Aufgabe zu, das Kabel vor Verletzungen zu schützen. Weiters soll es in der Lage sein, die Verlustwärme abführen zu können. Als Bettungsmaterial kommen

- Sand oder steinfreies Erdreich,
- Sand-Gemische oder
- Sand- Gemische mit Zuschlagsstoffen wie Zement oder Bentonit

zur Anwendung. Wie bereits in Kapitel 4.5.1 angeschnitten, kann der Wärmewiderstand der Kabelumgebung durch Einsatz von thermisch stabilisiertem Bettungsmaterial herabgesetzt und damit die Übertragungsleistung gesteigert werden. (Biewald et al. 1995b, S. 699)

#### Kabelbettungssand

Sieht man von der Bettung in steinfreiem Erdreich ab, so wird im Nahbereich der Kabel oft Kabelbettungssand verwendet. Abhängig vom Fördergebiet und damit von der dort vorherrschenden Geologie, können durch die Materialzusammensetzung und die Kornverteilung erhebliche Unterschiede bei der Wärmeleitfähigkeit auftreten. Für Kabelsand (UK4) aus dem Grazer-Feld wird von Henoegl (2009) eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 1,3 W/mK bei einer Proctordichte<sup>36</sup> von 1,56 g/cm<sup>3</sup> angegeben.<sup>37</sup>

<sup>36</sup> Unter Proctordichte versteht man die höchste, erreichbare Dichte eines Bodens, welche bei einem genormten Versuch (Proctorversuch) ermittelt wird.

<sup>37</sup> Die Angabe bezieht sich auf einen Wassergehalt von 5 %.

### **Sand- Gemische**

In einer von der Bewag in Zusammenarbeit mit der TU-Berlin erstellten Studie (im weiteren bezeichnet als Bewag-Studie) wird ein Vorschlag für die Zusammensetzung thermisch stabilisierten Bettungsmaterials gemacht. Laut Biewald et al. (1995b, S. 702) soll optimales Kabelbettungsmaterial aus einem Gemisch von Kies, Sand und überwiegend quarzitischem Schluff ( $12 \% \pm 2 \%$ ) bestehen. Die anzustrebende Proctordichte wird mit mindestens  $1,93 \text{ g/cm}^3$  angegeben.<sup>38</sup> Bezogen auf die Bewag- Studie wird von Biewald et al. (1995a, S. 453) eine höhere Strombelastbarkeit von 10 % bei einem Finanzmehrbedarf von unter 3 % angeführt.

In jedem Fall kann davon ausgegangen werden, dass bei Kabelsand eine Beimischung von Recyclingmaterial in Form von Ziegelsplitt zu einer Erhöhung des Wärmewiderstandes führt, welche es zu verhindern gilt.

### **Sand- Gemische mit Zuschlagsstoffen**

Untersuchungsgegenstand der Bewag- Studie war neben dem Einsatz von Sand- Gemischen auch die Anwendung von Zuschlagsstoffen wie Zement oder Bentonit. Die in der Praxis angewandten Mischungsverhältnisse (Sand – Zement von 14:1 bis 30:1) erweisen sich durch die starke Aushärtung des Materials als nachteilig. Dies äußert sich, wenn im Reparaturfall das Bettungsmaterial entfernt werden muss. Aus diesem Grund wurden in der Bewag-Studie Mischungsverhältnisse von 40:1 und 50:1 untersucht. Der Zusatz von Zuschlagsstoffen führte bei den eben genannten Mischungsverhältnissen zu keiner Verringerung des spezifischen Wärmewiderstandes. Die Aushärtung des Materials ließ ein händisches freilegen nicht zu. (Biewald et al. 1995b, S. 701)

## **6.2. Verlegung der Leitung in Erde - Grabenloses Bauen**

Als grabenlosen Leitungsbau bezeichnet man die Verlegung von Leitungen (Ver- und Entsorgungsleitungen, Mantelrohre,...) ohne Herstellung von Gräben.<sup>39</sup> Grabenlose Bauverfahren kommen zum Einsatz, wenn die offene Bauweise zu unzumutbaren Behinderungen im Nahbereich der Trasse führt. Dies ist speziell dann der Fall, wenn Bahnstrecken oder vielbefahrene Straßen gequert werden müssen. Das Verfahren bietet sich auch an um hochwertige Oberflächen (z.B. Pflaster) oder Schutzgebiete ohne Beeinträchtigung zu unterqueren.

Durch die grabenlose Verlegung von Leitungen kommt es zu einer Reduktion der Erdbewegungen und dadurch zur Schonung der Anrainer und der Umwelt. Weiters kann durch diese Technik (abhängig vom Verfahren) auf Grundwasserabsenkungen verzichtet werden. Die grabenlose Bauweise kann bei stark belegten Trassen jedoch nicht eingesetzt werden. (Lehmann 1999, S. 44ff)

---

<sup>38</sup> Weitere Angaben: Ungleichförmigkeitszahl > 10, Verdichtungsgrad > 94 %

<sup>39</sup> Dabei muss erwähnt werden, dass auf die offene Bauweise nicht ganz verzichtet werden kann. Sie kommt zum Einsatz bei der Herstellung der Start- und Zielschächte, sowie für die Herstellung der für die Leitungsanlage benötigten Zusatzbauwerke (wie z.B. Muffenkammern).

Es stehen zwei unterschiedliche Bauverfahren zur Auswahl:

- Bodenverdrängungsverfahren und
- Bodenentnahmeverfahren.

Beide Verfahren werden weiters in steuerbare und nicht steuerbare Verfahren unterteilt. Da bei nicht steuerbaren Verfahren die Starteinstellungen während des Vortriebs nicht korrigiert werden können, ist ihre Anwendung auf kürzere Strecken begrenzt.

### 6.2.1. Bodenverdrängungsverfahren

Beim Bodenverdrängungsverfahren wird der Boden im Bereich der Mantelrohre nicht entfernt, sondern in die unmittelbare Umgebung des angrenzenden Baugrundes verdrängt. Voraussetzung dafür ist ein verdrängungsfähiger Boden und eine ausreichende Mindestüberdeckung, um Hebungen an der Erdoberfläche zu vermeiden.

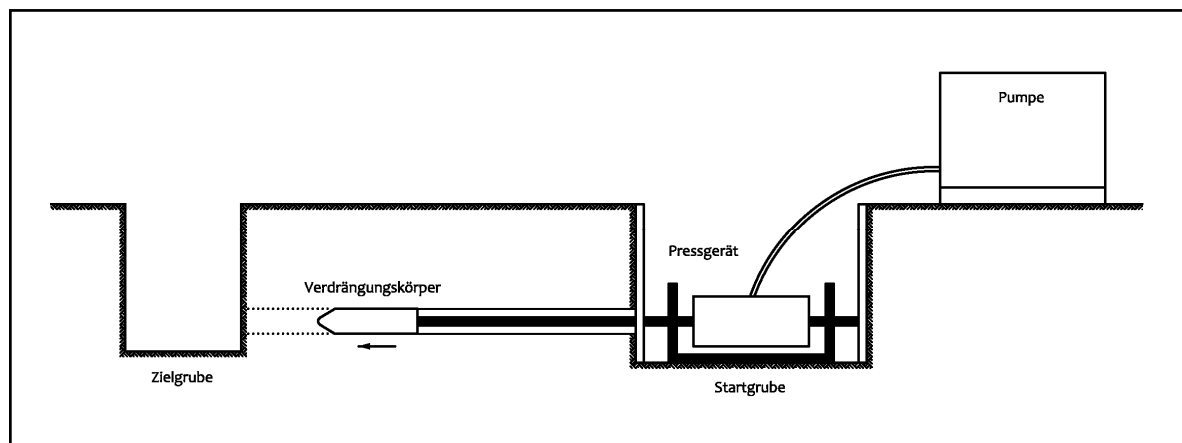


Abb. 6.8: Schematische Darstellung des statisch-hydraulischen Bodenverdrängungsverfahrens (Buja 2001, S. 974)

Zur Verdrängung des Bodens stehen statisch-hydraulische sowie dynamisch-pneumatische Systeme zur Verfügung. In Abb. 6.8 ist schematisch ein statisch-hydraulisches Verdrängungsverfahren dargestellt. Ausgehend von einer Startgrube wird mittels Pressgerät ein Verdrängungskörper in den Boden vorgetrieben. Die Leitung kann direkt im Anschluss an den Verdrängungskörper oder in einem eigenen Arbeitsschritt eingezogen werden.

Bei dynamisch-pneumatischen Systemen (Abb. 6.9) erfolgt das Verdrängen des Erdreichs durch einen druckluftbetriebenen Erdverdrängungshammer<sup>40</sup>.

<sup>40</sup> Der Verdrängungshammer wird auch als Erdrakete bezeichnet.

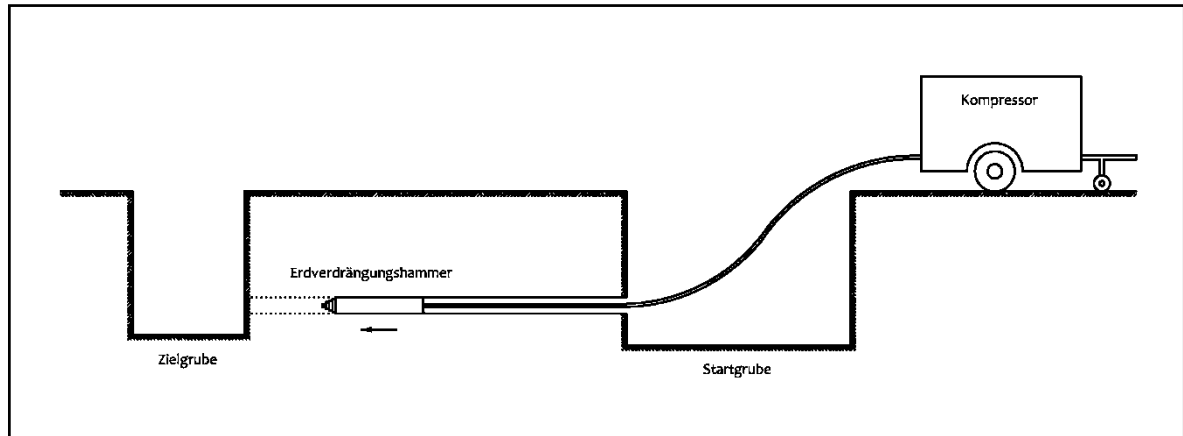


Abb. 6.9: Schematische Darstellung des dynamisch- pneumatischen Bodenverdrängungsverfahrens (Buja 2001, S. 975)

Abhängig von der Standfestigkeit des Bohrlochs erfolgt der Einzug der Leitung zeitgleich mit der Aufweitung oder im Anschluss daran. Die realisierbaren Verdrängungsdurchmesser und Vortriebslängen sind Tab. 6.1 zu entnehmen.

Tab. 6.1: Erfahrungswerte für den Anwendungsbereich der Bodenverdrängungsverfahren

(Stein 2003, S. 224f & S. 282f)

Nicht steuerbare Verfahren	Bohrlochdurchmesser	Vortriebslänge	Mindestüberdeckungshöhe
Verfahren mit Verdrängungshammer	45 mm bis 180 mm (bis 300 mm mit Aufweitungshülse)	l.d.R. ≤ 25 m	l.d.R. 10 x Außendurchmesser
Verfahren mit Horizontalramme und geschlossenem vorderen Rohrende	≤ 150 mm	≤ 20 m	12 x Außendurchmesser
Horizontal-Pressbohrverfahren mit Aufweitungsteil	≤ 100 mm	≤ 15 m	10 x Außendurchmesser, jedoch mind. 1,0 m
Steuerbare Verfahren	Bohrlochdurchmesser	Vortriebslänge	Mindestüberdeckungshöhe
Verfahren mit steuerbarem Verdrängungshammer	63 mm, 90 mm	≤ 55 m	10 x Außendurchmesser
Horizontal-Bohrverfahren mit Verdrängungshammer	≤ 250 mm	≤ 100 m	10 x Außendurchmesser
Pilotvortrieb mit Bodenverdrängung	300 mm, 400 mm Innendurchmesser für Einpressen, 300 mm Außendurchmesser für Einziehen	≤ 100 m	≥ 2 m
Mikrotunnelbau mit Bodenverdrängung	252 mm bis 665 mm	≤ 250 m	K.A.

Die Mindestüberdeckungshöhe<sup>41</sup> hängt vom eingesetzten Verfahren und dem anstehenden Boden ab. Zusätzliche Informationen zu den Bodenverdrängungsverfahren können bei Stein (2003, S. 223ff & 279ff) nachgelesen werden.

### 6.2.2. Bodenentnahmeverfahren

Bodenentnahmeverfahren werden angewandt, wenn der Einsatz von Verdrängungsverfahren nicht möglich ist, oder Bodenverschiebungen aufgrund benachbarter Bauten oder Leitungen nicht erwünscht sind. Ausgehend von einer Startgrube werden offene Vortriebsrohre statisch oder dynamisch in den Boden vorgetrieben (siehe Abb. 6.10).

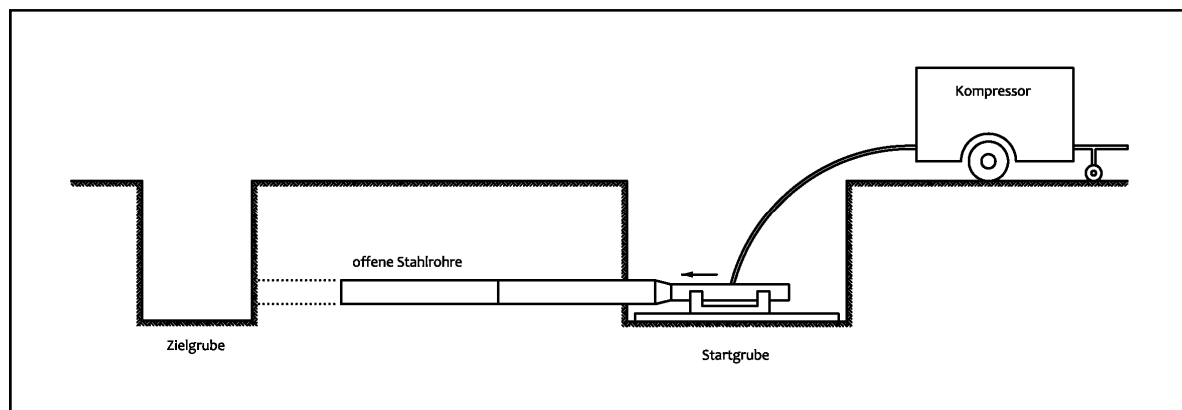


Abb. 6.10: Schematische Darstellung des Bodenentnahmeverfahrens  
(Stein 2003, S. 240)

Das bei der Bohrung im Vortriebsrohr anfallende Material wird, abhängig vom Verfahren, kontinuierlich oder nach Abschluss des Vortriebs aus dem Bohrohr entfernt.

Die realisierbaren Bohrdurchmesser und Vortriebslängen sind Tab. 6.2 zu entnehmen.

<sup>41</sup> Bei Unterquerungen von Bahn- oder Straßenanlagen können vom Betreiber höhere Mindestüberdeckungen vorgeschrieben werden, welche im Einzelfall zu berücksichtigen sind.



Tab. 6.2: Erfahrungswerte für den Anwendungsbereich der Bodenentnahmeverfahren  
(Stein 2003, S. 240f & S. 280)

Nicht steuerbare Verfahren	Bohrlochdurchmesser	Vortriebslänge	Mindestüberdeckungshöhe
Verfahren mit Horizontalramme und offenem Rohr	≤ 2000 mm	≤ 100 m	l.d.R 2 x Außendurchmesser, jedoch mind. 1,0 m
Horizontal-Erdbohrverfahren (Schneckenbohrung ohne Verrohrung)	bis 220 mm	≤ 20 m	1,0 m
Horizontal-Pressbohrverfahren	≤ 1600 mm Innendurchmesser	≤ 100 m	l.d.R 2 x Außendurchmesser, jedoch mind. 0,8 m
Hammerbohrung	≤ 1080 mm	≤ 100 m (in Ausnahmefällen bis 300 m)	K.A.
Horizontal-Pressbohrverfahren mit Räumer	l.d.R. 150 mm - 400 mm	≤ 80 m	1 x Außendurchmesser, jedoch mind. 1,0 m
Steuerbare Verfahren	Bohrlochdurchmesser	Vortriebslänge	Mindestüberdeckungshöhe
Pilotrohrvortrieb	150 mm - 800 mm (max. 1220 mm Außendurchmesser)	≤ 80 m	1 x Außendurchmesser, jedoch mind. 1,0 m
Mikrotunnelbau	≤ 1200 mm Innendurchmesser	≤ 500 m	1 x Außendurchmesser, jedoch mind. 1,0 m
Spülbohrverfahren	≤ 1800 mm	≤ 1800 m	10 - 15 x Außendurchmesser

Die Mindestüberdeckungshöhe<sup>41</sup> hängt vom eingesetzten Verfahren und dem anstehenden Boden ab. Zusätzliche Informationen zu den Bodenentnahmeverfahren können bei Stein (2003, S. 240ff & Kap. 7 bis Kap. 10) nachgelesen werden.

### 6.2.3. Mantelrohre

Grundsätzlich ist es möglich, Produktrohre<sup>42</sup> beim Verlegevorgang direkt in das Erdreich einzubringen. Da jedoch die mechanische Beschädigung des Kabelmantels unter allen Umständen verhindert werden muss, ist ein direktes Einziehen der Höchstspannungskabel in den Boden nicht möglich (Lehmann 1999, S. 44). Die Kabel werden daher in sogenannten Schutz- bzw. Mantelrohren verlegt. Das Mantelrohr wird mittels grabenlosem Bauverfahren in den Boden eingebracht<sup>43</sup> und schützt in weiterer Folge das Kabel vor äußeren Beanspruchungen. Bei der Auswahl des Werkstoffes für die Mantelrohre ist die Eignung für das gewählte Bauverfahren zu berücksichtigen. In Tab. 6.3 werden die möglichen Einbaumethoden für die gängigsten Rohrwerkstoffe angeführt.

<sup>42</sup> Als Produktrohre werden Rohre zur Weiterleitung der zu befördernden Medien bezeichnet (Gas, Wasser,..)

<sup>43</sup> Die Mantelrohre können auch über einen offenen Graben (z.B. als Leerverrohrung für einen späteren Ausbau) eingebracht werden. Die Verlegung erfolgt dann in gleicher Weise wie die direkte Erdverlegung (Kap. 6.1) der Kabel und wird daher nicht gesondert betrachtet.

Tab. 6.3: Geeignete Einbaumethoden in Abhängigkeit vom Rohrwerkstoff  
(Auszug aus Stein 2003, S. 674)

Werkstoff	Einziehen	Einschieben	Einpressen	Einrammen
Beton, Stahlbeton und Stahlfaserbeton		x	x	
Stahl	x	x	x	x
Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK (UP-GF))		x	x	
Polymerbeton (PRC)		x	x	
Polyethylen (PE, PE-X)	x			
Polypropylen (PP)	x	x	x	
Polyvinylchlorid (PVC-U)	x	x	x	

Ein Einsatz von Stahlrohren bedingt eine Reduktion der Übertragungsleistung von bis zu 20 % (siehe Tab. 4.5) und ist daher zwingend mit den Planern der Kabelanlage abzuklären.

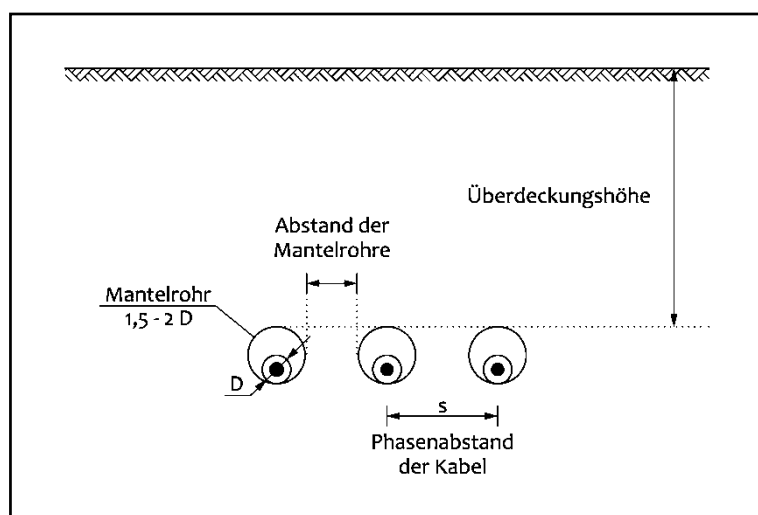


Abb. 6.11: Querschnitt - Verlegung im Mantelrohr

Der Durchmesser der Mantelrohre soll dem 1,5 – 2fachen Wert der Kabelaußendurchmesser entsprechen (ABB 2009, S. 12; Schneebeili 1995, S. 1536; VDEW 2007, S. 128) In Abhängigkeit vom Bauverfahren und dem projektierten Phasenabstand ergibt sich der Abstand der Mantelrohre.

### 6.3. Verlegung der Leitung im Tunnel

Die Verlegung der Kabel im Tunnel<sup>44</sup> stellt besonders in Ballungsgebieten eine Alternative zur Erdverlegung dar. Mittels Kabeltunnel können bei geschlossener Bauweise Störungen der Infrastruktur (z.B. wichtige Verkehrsverbindungen) und Schäden an der Oberfläche (oder an bestehenden Leitungseinbauten) verhindert werden.

<sup>44</sup> Im Tunnelbau wird für Querschnitte kleiner 25 m<sup>2</sup> der Fachausdruck „Stollen“ verwendet. In dieser Diplomarbeit wird jedoch weiter vom Tunnel bzw. Kabeltunnel gesprochen.

Weiters können durch die Anordnung eines Kabeltunnels folgende Vorteile genützt werden:

- Minimierung der Trassenlänge
- Entkopplung der Baumaßnahme von der Kabellegung
- Schutz der Kabel vor Beschädigung durch Dritte
- Begehbarkeit der Trasse zu Reparaturzwecken (witterungsunabhängig)
- Höhere Kabelbelastbarkeit durch günstigere Wärmeabfuhr

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, im Kabeltunnel andere Leitungen mitzuführen (Biewald & Brakelmann 1995, S. 1870 und 1996 S. 1775; Stein 2002, S. 3f), als nachteilig werden die hohen Investitionskosten genannt.

Betrachtet man die Tunnelbauverfahren, so kann man zwei Arten unterscheiden, die offene und die geschlossene Bauweise. Die offene Bauweise kommt bei oberflächennahen Bauwerken zum Einsatz, wohingegen die geschlossene Bauweise bei größeren Tiefen (bzw. Überdeckungshöhen) angewendet wird.

### 6.3.1. Kabeltunnel - Offene Bauweise

Bei Anwendung der offenen Bauweise wird das Tunnelbauwerk in einer Baugrube erstellt. Dabei muss die Oberfläche aufgegraben und die Baugrube (entsprechend den Ausführungen in Kapitel 6.1.1) gesichert werden. Ist eine Sicherung mittels Böschung nicht möglich (z.B. aus Platzmangel) kommen bedingt durch die größere Tiefe andere, kostenintensivere Verfahren (Spundwand, Schlitzwand, Bohrpfahlwand,..) zum Einsatz. Nach Errichtung des Bauwerks wird die Baugrube mit geeignetem Material (idealerweise mit dem Material des Aushubs) wieder verfüllt. Entsprechend der direkten Erdverlegung erfordert diese Bauweise eine durchgehende Baustraße entlang der Trasse.

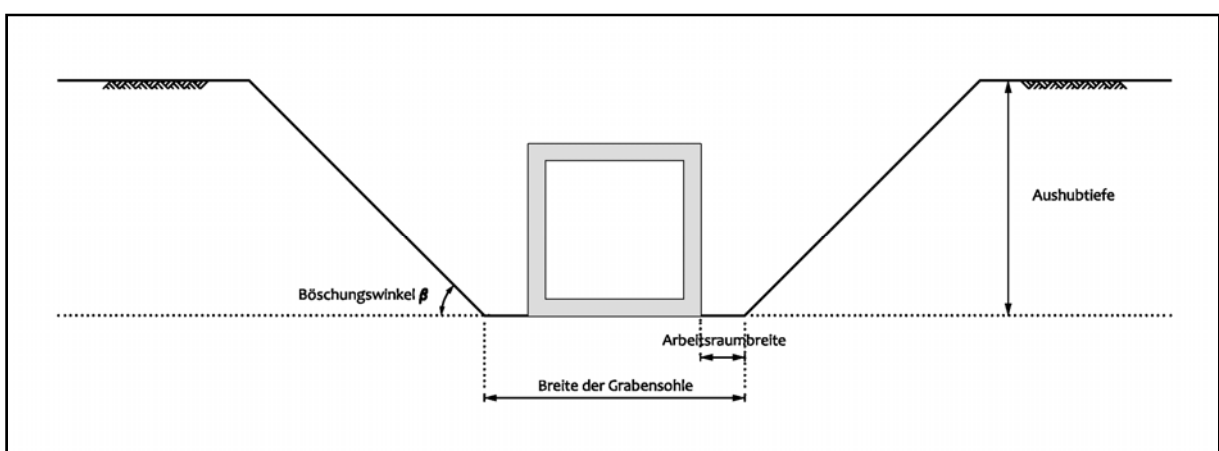


Abb. 6.12: Querschnitt - Kabeltunnel in offener Bauweise

Als Werkstoff für den Kabeltunnel stehen folgende Materialien zur Verfügung:

- Stahlbeton
- Glasfaserkunststoff
- Stahl

### **Stahlbetontunnel**

Die Herstellung eines Stahlbetontunnels kann mittels Ortbetonbauweise oder Fertigteilbauweise erfolgen. Bei der Ortbetonbauweise wird das Bauwerk vor Ort hergestellt. Die Arbeitsschritte gliedern sich in Schalen, Bewehren, Betonieren und Ausschalen nach dem Erhärten des Betons.<sup>45</sup> Mittels Ortbetonbauweise kann flexibel auf örtliche Gegebenheiten reagiert werden. Das Bauverfahren gilt als zeit- und kostenintensiv. Der Arbeitsablauf lässt sich durch den Einsatz großflächiger Systemschalungen beschleunigen. Im Gegensatz zur Ortbetonbauweise kommen bei der Fertigteilbauweise vorgefertigte Stahlbetonelemente zum Einsatz. Diese werden im Werk unter gleichbleibenden Bedingungen gefertigt und zur Baustelle transportiert. Die Abmessungen orientieren sich demnach an den zur Verfügung stehenden Transportgeräten. Auf der Baustelle angekommen, können die Fertigteile sofort verbaut und belastet werden. Die verfahrensbedingten Montagefugen müssen sorgfältig abgedichtet werden. Es besteht auch die Möglichkeit, beide Verfahren anzuwenden. In diesem Fall spricht man von der Mischbauweise. So können z.B. Fertigteile auf eine Ortbetonsohle aufgesetzt werden. (Stein 2002, S. 65ff)

### **Tunnel aus Glasfaserkunststoff (GFK)**

Bekannt durch den Einsatz im Kraftwasserbau sowie in der Abwasserversorgung, können GFK-Rohre auch für die Verlegung von Höchstspannungskabeln eingesetzt werden. Alle notwendigen Zusatzbauteile wie Einstiegsöffnungen und Schächte stehen als Standardbauteile zur Verfügung. (Hoffmann & Noack 2007, S. 25) Bedingt durch das geringere Gewicht im Vergleich zu Stahlbetonfertigteilen, ergeben sich Vorteile beim Transport und der Verlegung. Der Werkstoff gilt als wasserdicht und ist beständig gegen Chemikalien<sup>46</sup>. Als nachteilig gilt die Brennbarkeit des Materials.

### **Tunnel aus Wellstahlrohren**

Der Kabeltunnel kann auch mittels Wellstahlrohren realisiert werden. Dabei wird aus verzinkten, gewellten und gebogenen Stahlplatten ein geschlossener Querschnitt (Kreis-, Maulprofil,...) hergestellt. Die Verbindung der Elemente erfolgt mit Schrauben. Vor Ort lassen sich die Montagearbeiten aufgrund der vorgefertigten Elemente ohne Einsatz von Großgerät rasch durchführen. Als nachteilig gilt die Korrosionsempfindlichkeit von Stahl. (Stein 2002, S. 76ff) Die Größe des Querschnitts steht in engem Zusammenhang mit der Überschüttungshöhe. So beträgt der Einflussbereich über dem Rohr einen Meter bei einer Spannweite von drei Metern (Dantube 2009, S. 24). Dies kann größere Verlegetiefen erfordern, welche sich in den Investitionskosten

---

<sup>45</sup> Auf die notwendigen Vorbereitungsarbeiten (Verdichten des Untergrundes, Herstellen einer Sauberkeitsschicht,...) wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

<sup>46</sup> Die Beständigkeit gegen Chemikalien ist von Relevanz, wenn der Kabeltunnel mit „aggressiven Wässern“ in Berührung kommt. Von aggressivem Wasser wird gesprochen, wenn der pH-Wert unter 7 liegt.

niederschlagen. Weiters kann die Verlegung von Höchstspannungskabeln in Stahlrohren zu einer Verringerung der Übertragungsleistung führen (siehe Tab. 4.5)

### 6.3.2. Kabeltunnel – Geschlossene Bauweise - Rohrvortrieb

Bei der geschlossenen Bauweise wird der Kabeltunnel unterirdisch hergestellt. Ausgehend von einem Startschacht werden Rohre mit Hilfe einer Pressstation in den Untergrund gepresst (Abb. 6.13). Vor dem ersten Rohr wird je nach Art des Bodens ein Schneidschuh oder ein Schild angeordnet. An der Ortsbrust wird das Bodenmaterial abgebaut und über die bereits vorgetriebenen Rohre sowie den Startschacht an die Oberfläche gefördert. (Stein 2003, S. 387)

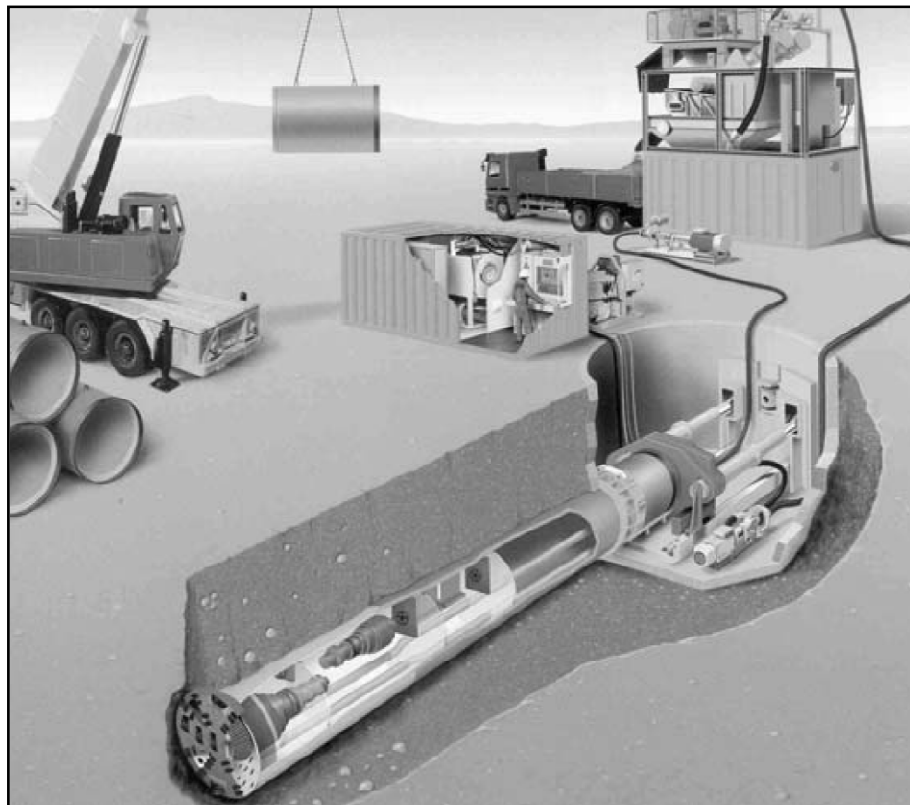


Abb. 6.13: Schematische Darstellung einer Rohrverpressung  
(Kolymbas 2007, S. 440)

Die Technik des Rohrvortriebes kann in Böden mit wechselnden Bodenverhältnissen sowie unter dem Grundwasserspiegel eingesetzt werden. Auch bei technisch schwierigen Bedingungen (Vortrieb im Festgestein, Realisierung gekrümmter Trassen,...) kann das Verfahren angewendet werden. Aus Sicht der Wirtschaftlichkeit sind dem Rohrvortrieb im Hinblick auf die Länge der Vortriebsstrecke jedoch Grenzen gesetzt. Bei einem Durchmesser von DN 3000 liegt die optimale Vortriebslänge zwischen 150 m und 200 m. (Schad et al. 2008, S. 13)

### Gesteinsabtrag

Im Laufe der Zeit haben sich unterschiedliche Abbautechniken entwickelt. Beim Rohrvortrieb werden hauptsächlich Schildmaschinen<sup>47</sup> eingesetzt. Diese werden unterteilt in Maschinen für Teilflächenabbau und Maschinen für Vollflächenabbau.

Das Einsatzgebiet von Teilschnittmaschinen liegt im Bereich der Lockergesteine wo sie zum Lösen bindiger Böden eingesetzt werden. Bei der Teilschnittmaschine in Abb. 6.14 erfolgt der Abbau durch Andrücken des rotierenden Längsschneidkopfes (1) bei gleichzeitigem Verfahren des Maschinenarms. Das Haubenschild (2) lässt sich durch die Steuerpressen (3) bewegen, dadurch können Radien aufgefahren und Lagekorrekturen vorgenommen werden. Das Förderband (4) sorgt im Pendelbetrieb für den Abtransport des Ausbruchmaterials. Im Schutz des Maschinenrohres (5) ist das Hydraulikaggregat (6) für die Abbaueinheit angeordnet. Der Vorschub der Rohre erfolgt über die Presseinrichtung im Schachtbauwerk (siehe auch Abb. 6.13). (Schad et al. 2008, S. 79f)

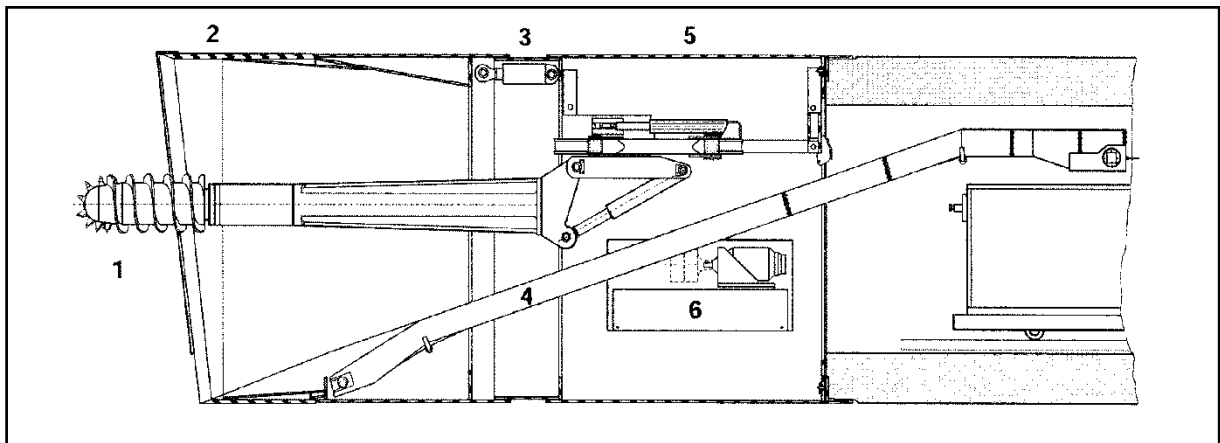


Abb. 6.14: Teilschnittmaschine mit Längsschneidkopf  
(Schad et al. 2008, S. 79)

Abhängig vom Maschinentyp ist der Umbau zum Excavator (Bagger mit Geräteausleger), der Anbau eines Reißzahnes oder der Anschluss eines Hydraulikhammers möglich. In Abb. 6.15 ist der Excavator links im Bild zu sehen. Bei der rechten Darstellung handelt es sich um einen Längsschneidkopf, rechts oben ist die Aufnahmevorrichtung für diese Anbaugeräte abgebildet.

<sup>47</sup> Der Name Schildmaschine leitet sich von der Konstruktion ab. Die Vortriebseinheit wird von einem durchgehenden Stahlrohr, einem „Schild“ umgeben, welches die Tunnelaibung abstützt.

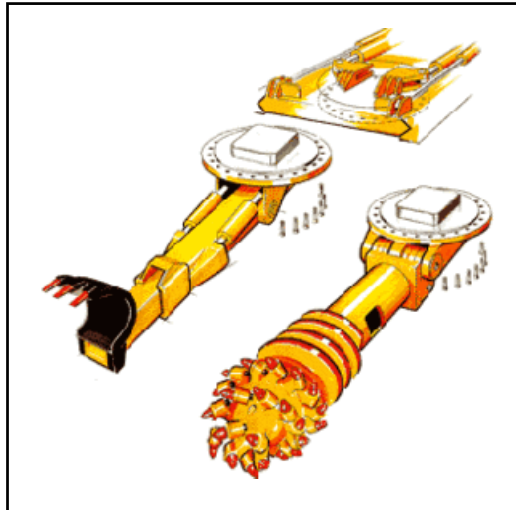


Abb. 6.15: Excavator und Längsschneidkopf einer Teilschnittmaschine  
([www.herrenknecht.de](http://www.herrenknecht.de))

Darüber hinaus gibt es noch verschiedene Spezialkonstruktionen für den Vortrieb bei besonders schwierigen Trassenverhältnissen (z.B. unter Grundwassereinfluss). Nähere Informationen können unter Stein (2003, S., 390ff) nachgelesen werden.

Vollschnittmaschinen bauen das Gestein durch ein rotierendes Schneidrad kontinuierlich ab. Im Kapitel 6.3.3 wird die Arbeitsweise einer Schildmaschine erklärt. Im Unterschied zum bergmännischen Vortrieb stützt sich die Schildmaschine beim Rohrvortrieb an den eingepressten Rohren ab.

### Rohre

Zurzeit werden hauptsächlich Vortriebsrohre aus Stahlbeton mit Kreisquerschnitt eingesetzt.<sup>48</sup> Die Rohre erfüllen zwei wesentliche Funktionen, einerseits erfolgt durch sie die Stützung der Ausbruchslaibung, andererseits stellen sie das Leitungsbauwerk dar. Da das Anfangsrohr den längsten Weg im Baugrund zurücklegt und sich die Vortriebsmaschine darauf abstützt, werden kürzere Rohre eingesetzt, um ein seitliches Ausweichen zu verhindern (Schad et al. 2008, S. 32f).

### 6.3.3. Kabeltunnel – Geschlossene Bauweise – Bergmännischer Vortrieb

Im Vergleich zum Rohrvortrieb besteht bei der bergmännischen Bauweise keine Einschränkung der Längenausdehnung. Es stehen verschiedene Vortriebsverfahren zur Verfügung, welche sich in zwei Gruppen einteilen lassen. Unterschieden wird zwischen dem Konventionellen Vortrieb und dem Vortrieb mittels Tunnelvortriebsmaschinen.

<sup>48</sup> Es können mittlerweile auch Kunststoffrohre vorgetrieben werden. Rohrvortriebe dieser Art wurden von Hobas bereits durchgeführt. (Hobas CC-GRP Jacking Pipe System, [www.hobas.com](http://www.hobas.com))

Als Grundlage für die Wahl des effizientesten Verfahrens sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen (Girmscheid 2008, S. 67f):

- Das Gebirge (Gesteinsart und -struktur, Überlagerungshöhe, Wasservorkommen,...),
- sowie die sich daraus ergebenden möglichen Abbaugeräte und
- erforderlichen Sicherungsmaßnahmen,
- der Querschnitt, die Länge und das Gefälle des Tunnels,
- die Ausbauart, sowie
- wirtschaftliche Gesichtspunkte (wie z.B. die gewünschte Vortriebsgeschwindigkeit).

### **Konventioneller Vortrieb**

Zum Konventionellem Vortrieb gehören der Sprengvortrieb sowie der maschinelle Vortrieb. Der Sprengvortrieb wird charakterisiert durch sich ständig wiederholende, diskontinuierliche Arbeitszyklen. Ein Durchlauf gliedert sich in Bohren (der Sprenglöcher), Laden (Füllen der Sprenglöcher mit Sprengstoff und Zündmittel), Sprengen, Lüften, Sichern (Verbesserung der Eigen tragfähigkeit des Gebirges) und Schuttern (Abtransport des Materials).

Beim maschinellen Vortrieb erfolgt der Materialabbau mittels Teilschnittmaschinen (TSM) oder Baggern.

Laut Professor Schubert wird der konventionelle Vortrieb bei verhältnismäßig kleinen Durchmessern (DN 3000) und großen zu realisierenden Längen aufgrund der beengten Platzverhältnisse kaum angewendet (Schubert 2010). Dieses Verfahren wird daher nicht weiter betrachtet.

### **Vortrieb mittels Tunnelvortriebsmaschinen (TVM)**

Für den wirtschaftlichen Einsatz einer Tunnelbohrmaschine (TBM) ist in Abhängigkeit vom Maschinendurchmesser eine Mindestprojektlänge von ca. zwei Kilometer erforderlich (Girmscheid 2008, S. 393). Tunnelbohrmaschinen eignen sich für einen Einsatz bei Gestein mittlerer bis hoher Festigkeit. Der Vortrieb kann mittels Schildmaschine (TBM-S) erfolgen.<sup>49</sup>

In Abb. 6.16 ist eine Schildmaschine mit Schneidrad dargestellt. Die Funktionsweise soll kurz erklärt werden:

Für den Vortriebsvorgang stützt sich die Schildmaschine (1) an den bereits eingebauten Tübbing ab.<sup>50</sup> Der Bohrvorgang startet durch Anpressen des mit Schneidmeißeln (4) bestückten, rotierenden Schneidrades (3) an das Gestein. Angetrieben wird das Schneidrad über einen Antriebsmotor (5), welcher ebenfalls im Schild situiert ist. Die Vorpresslänge eines Durchganges ist durch die maximale Hublänge der Vorschubzylinder (2) beschränkt. Ist diese erreicht, so müssen die Zylinder nachgezogen werden. Im Anschluss daran erfolgt der Ausbau des Tunnels mit Tübbing. Diese werden mittels Bereitstellungsband (8) an die Einbaustelle geliefert

---

<sup>49</sup> Der Einsatzbereich von Grippermaschinen (die Abstützung erfolgt hierbei über das Gebirge und nicht über die Auskleidung) beginnt laut Herrenknecht erst bei einem Vortriebsdurchmesser von mehr als vier Meter. ([www.herrenknecht.de](http://www.herrenknecht.de))

<sup>50</sup> Beim Start des Tunnelvortriebs muss eine Abstützvorrichtung (z.B. über die gegenüberliegende Schachtwand) die Vortriebskräfte aufnehmen.



und mit der Verlegeeinrichtung (7) eingebaut. Das beim Bohren anfallende Material wird kontinuierlich per Bandfördereinrichtung (6) durch die Schildmaschine nach hinten zum Abtransport gefördert. Durch den Lenkzylinder (9) ist es möglich, die Schildmaschine „auf Kurs“ zu halten sowie Radien aufzufahren.

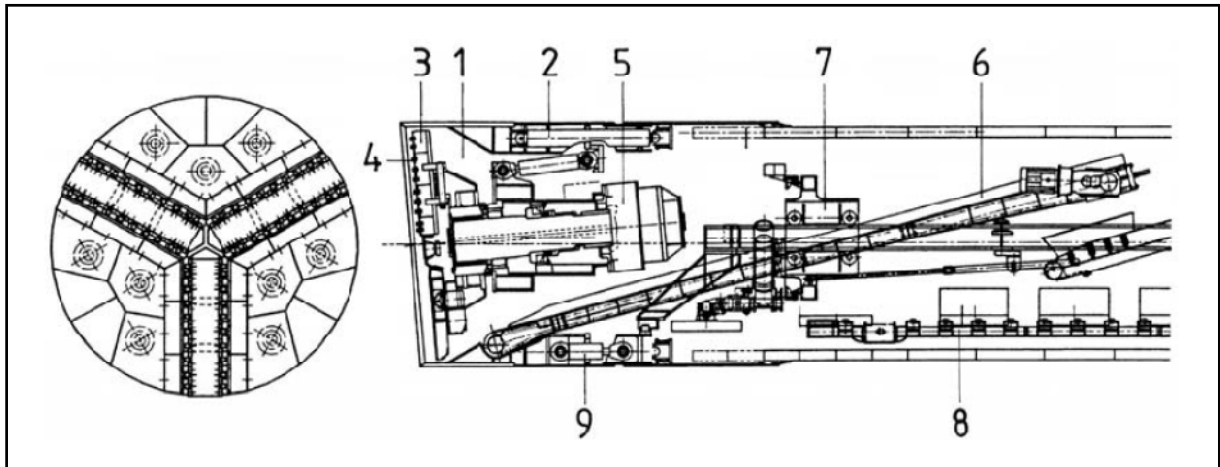


Abb. 6.16: Schildvortrieb mit Schneirad im Trockenabbau  
(König 2008, S. 320)

Auf dem Markt steht eine Vielzahl von verschiedenen Schildmaschinen zur Verfügung. Sie unterscheiden sich durch die Art der Stützung des Erd- und gegebenenfalls Wasserdrucks, sowie durch die Methode des Materialabbaus an der Ortsbrust. Unter Stein (2003, S. 391f) ist eine ausführliche Übersicht aufgelistet.

#### 6.4. Kreuzungsbauwerke

Kreuzungsbauwerke werden überall dort notwendig, wo sich Konfliktpunkte mit anderen technischen Einrichtungen (z.B. Leitungen) oder Gegebenheiten der Natur (z.B. Flüsse) ergeben, welche nicht umfahren werden können.

Einrichtungen der Infrastruktur (besonders Leitungen) sollen bevorzugt in öffentlichem Grund verlegt werden (ÖNORM B 2533, S. 5). Daher sind die Straßenquerschnitte im verbauten Siedlungsraum meist dicht belegt. In ÖNORM B 2533 werden Mindestabstände für die Querung von Energiekabeln über 30 kV angegeben. Diese werden vollständigshalber in Tab. 6.4 angeführt. Es ist jedoch naheliegend, dass diese Bestimmungen für 400-kV-Kabel nicht übernommen werden können.

Tab. 6.4: Mindestabstände von Energiekabeln über 30 kV  
(ÖNORM B 2533, S. 12f)

Horizontale lichte Mindestabstände von Energiekabeln (über 30 kV) bei Parallelführung [m]		Vertikale lichte Mindestabstände von Energiekabeln (über 30 kV) bei Querungen [m]	
Telekommunikationskabel	0,5	Telekommunikationskabel	0,5
Erdungsanlagen (ausgenommen Blitzschutz)	0,3	Erdungsanlagen (ausgenommen Blitzschutz)	0,3
Maste, Tragwerksfundamente	0,8	Maste, Tragwerksfundamente	-
Gasleitung aus metallischen Werkstoffen	0,5	Gasleitung aus metallischen Werkstoffen	0,5
Gasleitung aus nichtmetallischen Werkstoffen	0,5	Gasleitung aus nichtmetallischen Werkstoffen	0,5
Wasserleitung	0,4	Wasserleitung	0,5
Fernwärmeleitung	1,0	Fernwärmeleitung	1,0
Abwasserleitung	0,5	Abwasserleitung	0,5

In jedem Fall muss bei der Querung von unterirdischen Einbauten der betroffene Leitungsbetreiber (Einbautenträger) informiert und in die Planung mit eingebunden werden.

### Ausbildung von Querungen

Querungen können mittels offener Baugrube (Kap. 6.1) oder grabenlosem Bauverfahren (Kap. 6.2) ausgeführt werden.

Die Beeinträchtigung der Umgebung bei Realisierung einer offenen Baugrube macht dieses Verfahren oft unanwendbar. Vorstellbar ist der Einsatz bei kleinen Fließgewässern (z.B. bei Bächen mit geringer Abflussmenge) oder bei Gemeindestraßen von geringer Verkehrsbedeutung (bzw. Umleitungsmöglichkeit).

Querungen mittels grabenlosem Bauverfahren können mit kleinem Querschnitt (nicht begehbar, siehe Kap. 6.2) oder mit großem Querschnitt (begehbar, siehe Kap. 6.3.2) ausgeführt werden. Die notwendige Querungslänge sowie die Anzahl der zu verlegenden Kabel spielen dabei eine Rolle.

### Querung von Straßen

Die Querung von Straßen soll nach Möglichkeit im rechten Winkel erfolgen, schleifende Schnitte sind zu vermeiden. Dabei sollen die Kabel in geeigneten Schutzrohren geführt werden, welche den auftretenden Verkehrslasten standhalten. Bei verkehrsreichen Kreuzungen sind die Kabel nach Möglichkeit zu verrohren. (ÖNORM B 2533, S. 6)

### Querung von Eisenbahntrassen

Querungen von Eisenbahntrassen müssen grundsätzlich normal zur Gleisachse durchgeführt werden. Die Anordnung von Schutzrohren ist zwingend. Dabei muss das Schutzrohr mindestens 1,20 m über die Gleisanlage (gemessen von der nächstgelegenen Schiene) hinausreichen. Als Mindestüberdeckung werden 0,8 m genannt. Diese wird zwischen der Schienenoberkante und der Oberkante der Schutzrohre gemessen. (ÖNORM B 2533, S. 9f)

Anzumerken sei, dass von Seiten der Bahngesellschaft spezielle Vorschriften gemacht werden können (z.B. zum Bauverfahren). Daher empfiehlt es sich auch hier, alle Beteiligten bereits in den Planungsprozess mit einzubeziehen.

### Querung von Gewässern und besonders geschützten Gebieten

Ausgedehnte Gewässer (Seen) sowie große, zusammenhängende geschützte Gebiete werden meist großräumig umfahren. Sollte dies nicht möglich sein, muss die Bautätigkeit mit den

zuständigen Behörden abgestimmt werden. Das Queren von sensiblen Gebieten kann umfangreiche Schutz- und Ausgleichsmaßnahmen erforderlich machen. Weiters muss mit erhöhtem Widerstand aus der Bevölkerung gerechnet werden.

Flussquerungen können auf zwei Arten realisiert werden. Einerseits können (wenn möglich) bestehende oder geplante Brückentragwerke verwendet werden, auf der anderen Seite besteht die Möglichkeit mittels grabenloser Bauverfahren (Kap. 6.2 bzw. 6.3.2) den Fluss zu unterqueren. Unter der Voraussetzung, dass das Kabelgewicht von der Konstruktion problemlos abgetragen werden kann, ist bei der Mitbenutzung von Brücken besonders auf die Längenänderungen der Bauwerke durch Temperaturunterschiede zu achten. Dem kann begegnet werden, indem man die Kabel beweglich auf Rollen lagert.

### Kabelverlegung im Bereich geschützter Gehölze

Grundsätzlich ist die Querung im Bereich besonders geschützter Gehölze zu vermeiden. Ist dies nicht möglich, sind die Vorschriften der ÖNORM L 1121 einzuhalten.

Für besonders zu schützende Gehölze wird abhängig vom Standort und von der Art des Gehölzes ein Schutzbereich festgelegt. Dieser ist nur beschränkt nutzbar. Der Schutzbereich umfasst die von der Kronentraufe<sup>51</sup> eingeschlossene Fläche zuzüglich 1,5 m Radius (bei Säulenform zuzüglich dem 5fachen Kronendurchmesser).

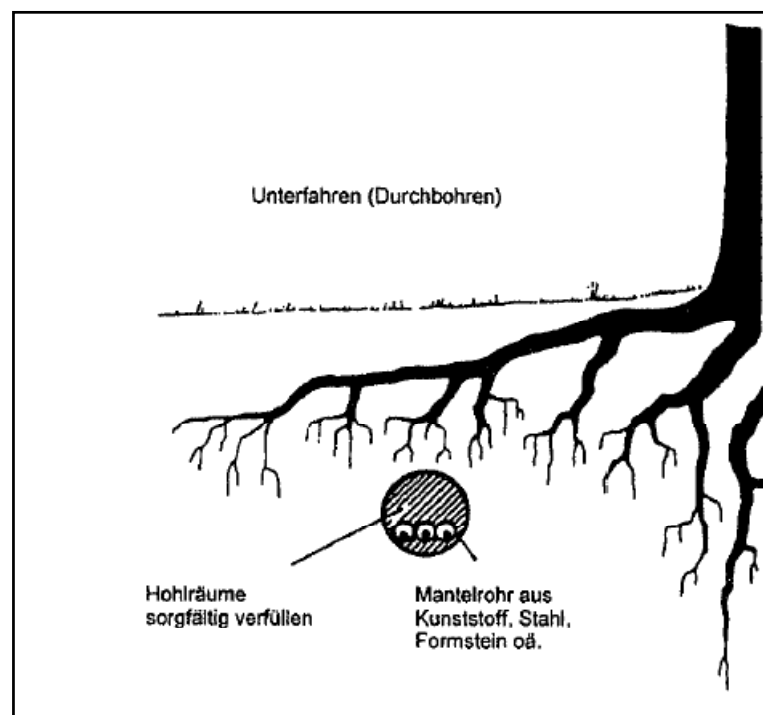


Abb. 6.17: Unterfahren geschützter Bäume mittels grabenlosem Bauverfahren (ÖNORM L 1121, S. 12)

<sup>51</sup> Als Kronentraufe wird die vertikale Projektion des Kronenumfanges auf den Boden bezeichnet.

Mittels grabenloser Bauweise können geschützte Bäume unterfahren werden (Abb. 6.17). Dabei muss für Schutzrohre bis 300 mm Durchmesser eine Mindestüberdeckung von 0,80 m eingehalten werden. Für größere Rohre erhöht sich diese auf 1,0 m. (ÖNORM L 1121, S. 11)

Die Mindestabstände bei offener Bauweise werden an dieser Stelle nicht behandelt, da die Kabeltrasse generell von Bewuchs frei zu halten ist, und somit der Schutzbereich des Kabels maßgebend wird.

## **6.5. Kabelverlegung**

Die angestrebten großen Kabeillängen, das hohe Gewicht der Kabel, sowie die nötige Sorgfalt bei der Montage stellen hohe Anforderungen an die Monteure und die Baustelle. In den folgenden Kapiteln wird erläutert, was bei der Verlegung zu berücksichtigen ist, um Beschädigungen beim Einbau der Kabel zu vermeiden.

Bautechnische Vorschriften (z.B. zur Verdichtung des Verfüllmaterials, bzw. zur Wiederherstellung der Oberfläche) sowie sicherheitstechnische Vorschriften (z.B. zur Unfallverhütung, bzw. zur Verkehrssicherung) werden in dieser Diplomarbeit nicht behandelt. Es wird auf die geltenden Rechtsvorschriften sowie einschlägige Literatur verwiesen.

Die grundsätzliche Möglichkeit der Mitführung von Kabeln auf Brücken, z.B. zur Überquerung von Flüssen, wird ebenso nicht behandelt.

### **6.5.1. Antransport der Kabel**

Bedingt durch den min. zulässigen Biegeradius und das hohe Gewicht der Kabel (max. 35 kg/m) können die zu transportierenden Spulen einen Durchmesser von 4,50 Meter sowie ein Gesamtgewicht von über 30 Tonnen annehmen. (Grube et al. 2001, S. 34) Da Spulen ab einem Durchmesser von einem Meter stehend (mit waagrechter Spulenachse) transportiert werden müssen (VDEW 2007, S. 132), ist klar erkennbar, dass es sich bei einem solchen Transport um einen Sondertransport handelt.

#### **Auf der Strecke**

Bereits im Vorfeld muss erhoben werden, ob die Lieferung zur Einbaustelle möglich ist. Dabei spielt die bestehende Infrastruktur der Umgebung eine bedeutende Rolle. Es gilt abzuklären, ob die vorhandenen Straßen und Brücken der hohen Gewichtsbelastung standhalten. Weiters müssen die vorhandenen Unterführungen (Brücken, Freileitungen,...) auf Passierbarkeit (Durchfahrthöhe und -breite) überprüft werden.

Ergeben sich aus den eben genannten Randbedingungen Schwierigkeiten, so müssen Ersatzrouten oder andere Einbaustellen gefunden, bzw. wenn dies nicht möglich ist, die Kabeillängen reduziert werden. Da die Reduktion der Kabeillänge einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten hat (Erhöhung der Anzahl der benötigten Muffen und Muffenbauwerke) muss der Logistik bereits während der Vorplanung ausreichend Aufmerksamkeit geschenkt werden.

### Vor Ort

Da in den seltensten Fällen auf bestehenden Straßen bis zum Einbauort vorfahren werden kann, müssen Baustraßen errichtet werden, welche das Befahren durch den Kabeltransporter bis zur Einbaustelle ermöglichen. Am Einbauort angekommen, muss ausreichend Platz für die Ausrüstung (Kabeltransporter, Kabelverlegewagen,...) sowie Arbeitsraum für Verladetätigkeiten vorhanden sein.

### 6.5.2. Randbedingungen der Kabelverlegung

Bei der Kabelverlegung muss bei 400-kV-Kabeln ein Kabelgewicht von bis zu 35 kg/m (ABB, 2009, S. 22) unter Einhaltung der Verlegerichtlinien der Hersteller gehandhabt werden. Diese sollen sicherstellen, dass es bei der Verlegung der Kabel nicht zu Beschädigungen kommt, welche in weiterer Folge zum Ausfall des Kabels und somit zu hohen Folgekosten führen können.

Grundsätzlich darf das Kabel beim Verlegevorgang nicht am Boden dahin geschliffen oder über scharfe Kanten gezogen werden. Um dies zu verhindern und gleichzeitig die Reibung herabzusetzen, werden Kabellaufrollen (Abb. 6.18) in regelmäßigen Abständen eingesetzt.



Abb. 6.18: Kabelrolle zur Kabelverlegung  
(Lancier Cable GmbH, [www.lancier-cable.de](http://www.lancier-cable.de))

### Zulässige Biegeradien

Um Beschädigungen an der Isolierung und dem Mantel zu verhindern, dürfen die minimal zulässigen Biegeradien nicht unterschritten werden. Da die Kabelaufbauten in der Höchstspannungsebene stark differieren, müssen die Angaben des Herstellers beachtet werden. Als Anhaltswert wird für Kunststoffkabel im Kabelhandbuch ein minimaler Biegeradius von  $25 \cdot D$  angegeben, wobei  $D$  für den Außendurchmesser des Kabels steht (VDEW 2007, S. 130f). Gegebenenfalls können durch den Hersteller, abhängig vom Kabelaufbau (Art des Schirmes) geringere Biegeradien zugelassen werden.

Beim Hersteller ABB sind in der endgültigen Lage kleinere Biegeradien zulässig als während der Kabellegung. So darf der Biegeradius beim Standarddesign (Kabel mit Kupferdrahtschirm) während der Verlegung  $15 \cdot D$  betragen, wohingegen in der endgültigen Lage sogar  $10 \cdot D$  erlaubt ist.

Zur Einhaltung der zulässigen Biegeradien werden beim Verlegevorgang Umlenkrollen (Eckrollen) positioniert (Abb. 6.19 & Abb. 6.20).

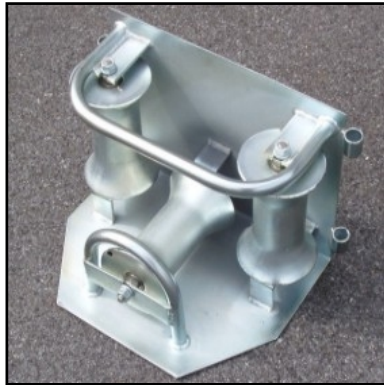


Abb. 6.19: Eckrolle zur Kabelverlegung  
(Lancier Cable GmbH, www.lancier-cable.de)



Abb. 6.20: Aneinanderreihung von Eckrollen  
(Lancier Cable GmbH, www.lancier-cable.de)

Die Eckrollen müssen aufgrund der hohen Abtriebskräfte verankert werden.

### Zulässige Zugkräfte

Während des Ziehvorganges dürfen die maximal zulässigen Zugkräfte des Kabels nicht überschritten werden. Die zulässigen Zugkräfte hängen:

- vom Aufbau der Kabel,
- dem Kraftschluss zwischen den Bauelementen, sowie der
- Art der Zugkraftübertragung

ab. (VDEW 2007, S. 144) Wie aus Tab. 6.5 ersichtlich, muss für die zulässige Zugkraft die Herstellerangabe sowie das Leitermaterial berücksichtigt werden.

Tab. 6.5: Zulässige Zugspannungen am Leiter in Abhängigkeit vom Hersteller

maximale Zugspannung:	ABB 2009	Nexans 2009
	[N/mm <sup>2</sup> ]	
Kupferleiter	70	50
Aluminiumleiter	40	30

Um die Einhaltung der zul. Zugkräfte sicherzustellen, empfiehlt es sich, die auftretenden Zugkräfte zu protokollieren. (Stein 2003, S. 87; VDEW 2007, S. 139)

Die aufzubringende Zugkraft hängt:

- Vom Kabelgewicht,
- von der Anzahl der Kabelrollen, sowie
- von der Anzahl der Bögen in der Trasse

ab (VDEW 2007, S. 139).

Mittels einfacher Formel kann die aufzubringende Zugkraft abgeschätzt werden (Nexans 2009, S. M2):

$$F = \mu \cdot G \cdot l \cdot 10 \quad [\text{N}] \quad (6.1)$$

F Zugkraft [N]  
 $\mu$  Reibungskoeffizient [-]  
 G Kabelgewicht [kg/m]  
 l Kabellänge [m]

Folgende Werte werden für den Reibungskoeffizienten angegeben:

Tab. 6.6: Reibungskoeffiziente für die Verlegung von Kabeln  
 (Nexans 2009, M2)

Verlegeart:	Reibungskoeffizient [ $\mu$ ]
gezogen über Verlegerollen	0,10 - 0,15
gezogen durch Plastikrohre	0,15 - 0,25
gezogen durch Betonrohre	0,30 - 0,40

Für die Verlegung in Erde (mittels Kabelrollen) errechnet sich die erforderliche Zugkraft für ein Kupferkabel (Leiterquerschnitt: 2500 mm<sup>2</sup>, 35 kg/m), bei einer Kabellänge von 900 m, zu:

$$F = 0,15 \cdot 35 \cdot 900 \cdot 10 \text{ [N]}$$

$$F = 47,25 \text{ [KN]}$$

Soll das Kabel im Kunststoff-Schutzrohr verlegt werden, so errechnet sich die erforderliche Zugkraft zu:

$$F = 0,25 \cdot 35 \cdot 900 \cdot 10 \text{ [N]}$$

$$F = 78,75 \text{ [KN]}$$

Die maximal zulässige Zugkraft für ein Kabel mit Kupferleiter bei einem (effektiven) Leiterquerschnitt von 2500 mm<sup>2</sup> beträgt laut ABB 175 KN und nach Nexans 125 KN (siehe Tab. 6.5). Diese Werte gelten bei gerader Trasse. Im Normalfall müssen mit dem Kabel Bögen durchfahren werden, welche die erforderliche Zugkraft erhöhen.

Das Verdrehen des Kabels in Längsrichtung (Torsionsbeanspruchung) soll durch Einsatz eines Drallfängers verhindert werden.

### Zulässiger Seitendruck

Der zulässige Seitendruck hängt vom Aufbau des Kabels ab. Beim Hersteller ABB wird der zul. Seitendruck für die Verlegung in Erde mit 5 KN/m und für die Verlegung im Tunnel mit 7,5 KN/m angegeben (ABB 2009, S. 15). Abhängig von den Installationsbedingungen können auch höhere Werte zugelassen werden, wie z.B. jener von Nexans mit 10 KN/m (Nexans 2009, M1).

### Zulässige Kabeltemperatur

Bei der Verlegung der Kabel soll die zulässige Kabeltemperatur laut dem Hersteller Nexans  $-5^{\circ}\text{C}$  nicht unterschreiten.<sup>52</sup> (Nexans 2009, S. M1)

### 6.5.3. Verlegung der Kabel in Erde

Werden die Kabel in einem offenen Kabelgraben verlegt, kommen die unter Kap. 6.5.2 beschriebenen Kabelrollen zum Einsatz. Mittels Zieheinrichtung werden die Kabel in Position gebracht. Anschließend erfolgt, unter Berücksichtigung des Phasenabstandes, die (händische) Legung auf die vorbereitete Bettungsschicht. Nach Kontrolle der Lage kann der Graben (mit Bettungsmaterial und im Anschluss mit geeignetem Aushub) verfüllt werden. Dabei sind in ausreichend großem Sicherheitsabstand Warneinrichtungen einzulegen. Abhängig von der Relevanz der Leitung können dies Warnbänder, -netze oder massive Betonplatten sein.

Die Muffen (Kap. 4.3.1) werden in eigens errichteten Muffenbauwerken verlegt. Die Abmessungen dieser Muffenbauwerke richten sich nach den erforderlichen Einrichtungen (Muffen, Überspannungsableiter,...), die darin Platz finden sollen und betragen ca. 8 m x 4 m x 3 m (Länge x Breite x Tiefe). Alle Kabel müssen mittels geeigneten Wanddurchführungen in die Muffenbauwerke eingeleitet werden. Dabei darf es zu keinen Beschädigungen am Kabel kommen. Im Muffenbauwerk werden die Kabel unter sauberen Bedingungen sowie mit der nötigen Sorgfalt miteinander verbunden.

Die Muffenbauwerke müssen zwecks Kontrollmöglichkeit ständig zugänglich sein. Dies wird über Einstiegsschächte realisiert, welche zur besseren Wärmeabfuhr Lüftungsöffnungen besitzen.

### 6.5.4. Verlegung im Schutzrohr

In diesem Fall wird das Kabel in die bereits verlegten Schutzrohre eingezogen. Bei längeren Strecken empfiehlt sich der Einsatz von Gleitmitteln. (siehe Zugkraftabschätzung unter Kap. 6.5.2) Vor dem Einziehvorgang muss geprüft werden, ob der erforderliche freie Querschnitt eingehalten wurde. Dies kann mittels Kalibriergerät erfolgen, welches zur Kontrolle durchgezogen wird.

An den Schutzrohröffnungen sind Einführungstrichter (siehe Abb. 6.21) anzuordnen, welche eine Beschädigung des Mantels verhindern sollen.

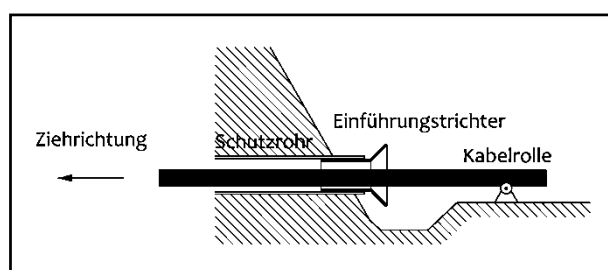


Abb. 6.21: Querschnitt - Verlegung im Schutzrohr  
(VDEW 2007, S. 139)

<sup>52</sup> Im Kabelhandbuch wird mit Bezug auf die DIN VDE 0276 für VPE-Kabel mit PE-Mantel eine Mindesttemperatur von minus  $20^{\circ}\text{C}$  angegeben.



Weiters empfiehlt es sich, vor den Schutzrohren eine Vertiefung auszuheben (falls nicht bereits vorhanden), um ein Einbringen von Erdreich und Steinen in das Schutzrohr zu verhindern.

Bezüglich der Muffenverlegung gelten dieselben Ausführungen wie im vorhergehenden Kapitel. Zu beachten ist, dass die Einstiege der Muffenbauwerke ein Einfädeln der Kabel ermöglichen. Die Wanddurchführung wird mittels Schutzrohr realisiert, wobei darauf zu achten ist, dass das Kabel nicht auf einer scharfen Kante zu liegen kommt.<sup>53</sup>

### 6.5.5. Verlegung der Kabel im Tunnel

Bei der Verlegung der Kabel im Tunnel gelten dieselben Grundsätze wie bei der Verlegung in Erde oder im Schutzrohr. Um Beschädigungen zu vermeiden, müssen auch hier geeignete Umlenkrollen angeordnet werden.

Handelt es sich beim Tunnel um ein tief liegendes Bauwerk, welches nur über Schächte erreicht werden kann, so müssen für die Verlegung Bremsvorrichtungen angeordnet werden um einen Absturz des Kabels bzw. zu große Zugkräfte zu verhindern. (Grube et al. 2001, S. 34)

Der Anschluss eines Einfädelschachtes an den Tunnel muss so ausgeführt werden, dass bei der Verlegung der Kabel die zulässigen Biegeradien eingehalten werden. Die Ausführung von Ausrundungsbereichen kann erforderlich werden.

Bei oberflächennahen Tunneln kann für die Erstverlegung die Deckelbauweise angewandt werden (Abb. 6.22). Dabei werden U-förmige (oben offene) Fertigteile an ihrem Bestimmungsort versetzt (1).

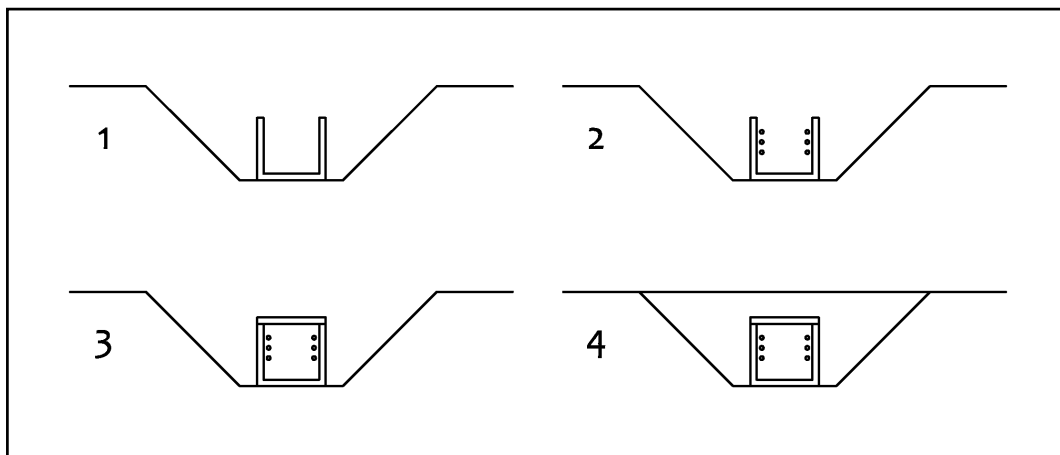


Abb. 6.22: Arbeitsschritte - Verlegung der Kabel im offenen Fertigteil

Im nächsten Arbeitsschritt werden die Kabel im offenen Kabeltunnel verlegt (2). Abschließend wird der Tunnel mittels Fertigteildeckel zugedeckt und abgedichtet (3). (Woschitz 2010) Als nachteilig erweist sich die fehlende Entkoppelung der Kabellegung von der Bautätigkeit, in welcher es zur Beschädigung der bereits montierten Kabelleitung kommen kann.

Unabhängig von der Art des Tunnelbauwerks müssen die Kabel im Tunnel befestigt werden. Die Unterbringung an der Wand bietet Platz für zwei Systeme pro Tunnel. Dabei werden die Kabel in

<sup>53</sup> Weiters ist die Wasserdichtheit des Anschlusses zu gewährleisten.

regelmäßigen Abständen (5 - 8 m) auf Konsolen befestigt. Die Befestigung ist notwendig, da es im Kurzschlussfall zu großen dynamischen Kräften zwischen den Leitern kommen kann. (Heuck 2007 ,S. 449)

$$F = \frac{0,2}{s} \cdot I_{\text{peak}}^2 \quad [\text{N/m}] \quad (6.2)$$

$$I_{\text{peak}} = 2,50 \cdot I_{\text{sh}} \quad [\text{kA}] \quad (6.3)$$

F        maximale Kraft [N/m]  
s        Phasenabstand [m]  
I<sub>sh</sub>    Erdkurzschlussstrom [kA]

Bei einem Erdkurzschlussstrom von 50 kA (Obst & Minke 2001, S. 38) errechnet sich die maximale Kraft zu:

$$I_{\text{peak}} = 125 \text{ [kA]}$$

$$F = \frac{0,2}{0,40} \cdot 125^2 \text{ [N/m]}$$

$$F = 7812,5 \text{ [N/m]}$$

Zwischen den Konsolen stellt sich ein freier Durchhang (snaking) ein. Bei größeren Konsolenabständen empfiehlt sich die Anordnung eines Abstandhalters in Feldmitte. (Grube et al. 2001, S. 35)

Die Anordnung der Muffen erfolgt im Tunnel, es wird kein eigenes Muffenbauwerk benötigt. Zur besseren Unterbringung werden die Muffen gegeneinander versetzt, entlang der Tunnelwand angeordnet. Dabei muss auch Platz für die CB-Kästen und Überspannungsableiter vorgesehen werden.

### 6.5.6. Inbetriebnahmeprüfung

Nach erfolgter Legung der Kabel sowie Montage der Garnituren und Zusatzeinrichtungen (Überspannungsableiter, Messeinrichtungen,...) wird die Kabelanlage der so genannten Inbetriebnahmeprüfung unterzogen. Die Prüfung soll sicherstellen, dass es bei Transport und Verlegung zu keiner Beschädigung gekommen ist und die Montage der Garnituren ordnungsgemäß erfolgte.

## 6.6. Baumaßnahmen im Schadensfall

Tritt ein Schaden auf, so muss die Fehlerstelle zunächst lokalisiert werden (siehe Kap. 4.9.3). Ist dies geschehen, können die Baumaßnahmen starten. Wie bereits in Kapitel 4.10.4 angeführt, hängt die Dauer der Reparatur von der Art des Fehlers (Kabelfehler oder Fehler an einer Muffe) sowie von der Art der Verlegung ab.

Betrachtet man die Baumaßnahmen im Schadensfall, so müssen drei Grundvarianten unterschieden werden. Die direkte Erdverlegung, die Verlegung der Kabel im Schutzrohr, sowie die Verlegung der Kabel im Tunnel.

Bei der Verlegung der Kabel in Erde muss im Schadensfall das Kabel ausgegraben und die fehlerhafte Stelle ersetzt werden. Zur Behebung des Fehlers wird daher wieder eine Bautätigkeit notwendig. In das schadhafte Kabel wird ein neues Kabelstück eingebaut, welches über Muffen mit dem Bestand verbunden wird. Da die Kabelkosten verhältnismäßig hoch sind, wird vom Austausch des gesamten Kabelteilstücks abgesehen (siehe Kap. 7.1.2). Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die Muffen direkt in Erde zu verlegen. Ist dies nicht erwünscht, so müssen zwei zusätzliche Muffenbauwerke errichtet werden.

Die Verlegung im Schutzrohr bietet den Vorteil, im Schadensfall nicht aufgraben zu müssen, da die Schutzrohre über die Muffenbauwerke zugänglich sind. Im Vorfeld muss sichergestellt werden, dass ein Austausch der Kabel unter Einhaltung der Verlegebedingungen (siehe Kap. 6.5.2) möglich ist (z.B. Abmessung der Einstiegsöffnung). Als nachteilig muss angesehen werden, dass im Schadensfall nur die gesamte Teillänge des Kabels ausgetauscht werden kann.

Die Verlegung im Tunnel zeichnet sich im Schadensfall durch die unproblematische Zugänglichkeit bei allen Witterungsverhältnissen aus. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass im Reparaturfall das zweite System aufgrund der hohen magnetischen Felder abgeschaltet bzw. gedrosselt werden muss.

## 7. Kosten einer Kabelanlage

In diesem Kapitel erfolgt die Aufstellung der Kosten einer Kabelleitung. Ausgehend von publizierten Studien, Angaben in der Literatur sowie Aussagen von Fachleuten werden, basierend auf den zu untersuchenden Varianten, die Kosten abgeschätzt.

*„Wer Kosten nennt, muss sich der Gefahr aussetzen, dass die Daten angezweifelt werden, dass sie – bei geringfügigen Änderungen der Annahmen – widerlegt werden können. Daher sind klare Definitionen und tiefgründiges Kostenwissen erforderlich, wenn verbindliche Kostendaten genannt werden.“ (Bronner 2008, S. 21)*

Bezugnehmend auf die Aussage von Bronner sei angemerkt, dass es sich bei der folgenden Betrachtung um eine Kostenschätzung und nicht um eine Kostenberechnung handelt. Die Kostenschätzung soll neben den projektspezifischen Randbedingungen als Basis für die generelle Systementscheidung dienen.

Die in dieser Diplomarbeit beschriebenen Kosten werden wie in Abb. 7.1 ersichtlich, definiert.

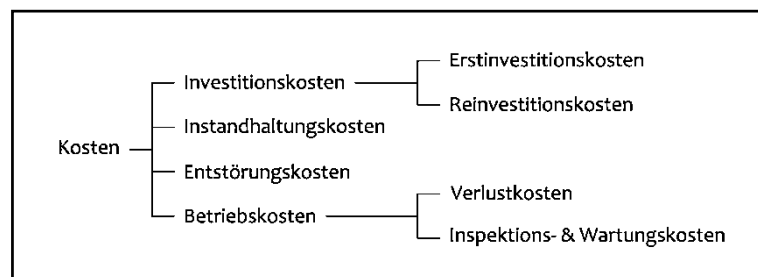


Abb. 7.1: Gliederung der Kosten als Grundlage für die weitere Bearbeitung

### Investitionskosten

Unter den Investitionskosten werden ausnahmslos nur jene Kosten verstanden, welche bei der Erstinvestition oder nach Ablauf der Anlagennutzungsdauer bei einer Reinvestition entstehen.

### Instandhaltungskosten

Die Reinvestition (Neuanschaffung oder Generalüberholung) von Komponenten, welche eine geringere Nutzungsdauer als die gesamte Anlage besitzen (< 40 Jahre), wird den Instandhaltungskosten zugeordnet. Als Beispiel kann die Erneuerung der Kühlanlage genannt werden.

### Entstörungskosten

Darunter werden jene Kosten verstanden, die auftreten, um eine ausgefallene Leitung wieder in Betrieb nehmen zu können.

## Betriebskosten

Die Betriebskosten setzen sich aus den Verlustkosten und den Kosten für Inspektion und Wartung zusammen. Bei den Verlustkosten handelt es sich um Kosten, welche durch den Stromtransport sowie den Spannungserhalt entstehen. Unter Instandhaltungs- und Wartungskosten werden Kosten verstanden, die durch regelmäßige Kontrollen sowie Reparaturarbeiten geringen Umfangs (z.B. Anziehen einer Schelle an einer Konsole) anfallen. Dabei ist es jedoch noch zu keinem Ausfall der Betriebsmittel gekommen.

## Untersuchte Varianten

Betrachtet werden fünf unterschiedliche Varianten der Verlegung. Variante eins (Kap. 7.1.3) entspricht der klassischen Erdverlegung. Die zweite Variante, die Verlegung im Schutzrohr (Kap. 7.1.5), findet ihre Anwendung häufig bei der Querung von Straßen- oder Bahnanlagen. Verlegevariante Nummer drei, die Verlegung im oberflächennahen Tunnel (Kap. 7.1.6), bietet sich als Alternative zur Erdverlegung an. Als Lösung in Ballungsgebieten bereits realisiert, stellen die Varianten vier und fünf tief liegende Tunnelbauwerke dar. Dabei wird in Variante vier die Tunnelherstellung mittels Rohrvortrieb (Kap. 7.1.8), und in Variante fünf die Errichtung mittels bergmännischer Bauweise (Kap. 7.1.9) untersucht.

Folgende Randbedingungen gelten für alle Varianten:

- Die Leitung wird als Neubau errichtet.
- Als Nennspannung werden 400 kV projektiert.
- Bei allen untersuchten Varianten werden zwei Kabelsysteme verlegt.
- Der effektive Leiterquerschnitt der Kabel beträgt 2500 mm<sup>2</sup>.
- Alle Muffen werden zwecks Zugänglichkeit in Muffenbauwerken verlegt.
- Die vom Gesetzgeber festgelegten Grenzwerte für Elektromagnetische Felder müssen eingehalten werden.

Im Zuge der Ermittlung der Investitionskosten (Kap. 7.1.3 bis Kap. 7.1.9) werden die verschiedenen Varianten näher beschrieben.

## 7.1. Investitionskosten

Wie in Abb. 7.1 dargestellt, werden unter den Investitionskosten nur jene Kosten verstanden, die bei der Erstinvestition oder bei einer Folgeinvestition (nach Ablauf der Anlagenlebensdauer) entstehen. Da es sich bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung um einen Vergleich von Kabelvarianten handelt (die Freileitung wird nicht berücksichtigt), kann davon ausgegangen werden, dass die Kosten für Schalt- und Erdungsanlagen in etwa gleich hoch sind. Sie werden daher beim Kostenvergleich nicht berücksichtigt.

### **7.1.1. Kosten für Planung, Dienstbarkeiten, Umweltschutz, Projektabwicklung und Bauaufsicht**

Die Kosten für die Planung und Trassierung sowie alle zusätzlichen Kosten, welche eine erfolgreiche Umsetzung des Projektes erst möglich machen, werden nachfolgend betrachtet.

#### **Planung**

Bei der Realisierung eines Linienbauwerks fallen zu Beginn die Kosten für die Planung und Trassierung des Bauwerks an. Im Falle eines Leitungsbauwerks muss die Querschnittsbildung sowie die Linienführung festgelegt werden. Dabei spielen verschiedene Randbedingungen eine Rolle. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit können dies:

- geologische und hydrologische Verhältnisse,
- Platz- und Nutzungsverhältnisse (Freiland, Wohngebiet,...) der zu querenden Grundstücke, sowie
- notwendige Querungen von Straßen, Bahnanlagen oder Flüssen, beziehungsweise
- politische Gründe (bezüglich der Trassenwahl) sein.

Unter dem Begriff Trassierungskosten werden in Anlehnung an die Angaben der Machbarkeitsstudie von Hoffmann & Noack (2007, S. 158) folgende Kosten zusammengefasst:

- Kosten für die Projektierung (technische Planung) und Optimierung der Anlage,
- Genehmigungskosten (Verfahrens- und Verhandlungskosten),
- Kosten für notwendige, umweltrelevante Untersuchungen,
- Kosten für die Ausschreibung sowie
- Kosten für die Öffentlichkeitsarbeit.

Die betrachteten Varianten gliedern sich in zwei Gruppen, in oberflächennahe und in tiefliegende Bauwerke. Werden bei tiefliegenden Tunneln aufwändige geologische Erkundungsmaßnahmen<sup>54</sup> erforderlich, so ergibt sich bei oberflächennahen Bauwerken ein Mehraufwand bei der Erhebung der im Untergrund befindlichen Einbauten (Leitungen, Fundamente, ...).

Da dieser Diplomarbeit kein konkretes Projekt zu Grunde liegt, werden für alle betrachteten Varianten Trassierungskosten in der Höhe von **70 €/m** angesetzt.

#### **Grunddienstbarkeit**

Erfolgt die Verlegung der Leitung auf privatem Grund, so muss der Leitungsbetreiber für die dauerhafte Nutzung<sup>55</sup> des benötigten Trassenstreifens dem Grundstückseigentümer ein Entgelt bezahlen. Damit verpflichtet sich der Grundstückseigentümer zur Duldung der Kabelleitung.

---

<sup>54</sup> Schwierige geologische Verhältnisse (häufig wechselnde, zerklüftete Gesteinsarten) erfordern eine höhere Dichte an Erkundungsmaßnahmen und sind dementsprechend teurer.

<sup>55</sup> Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Leitungsbetreiber zur schonenden Ausübung seiner Rechte verpflichtet ist.

Die Höhe des Entgelts hängt von der Nutzung des Grundstücks ab. Zur Abschätzung der Entschädigungskosten wird folgende Nutzungsverteilung angenommen:

- 60 % Landwirtschaftliche Nutzfläche
- 15 % Wald
- 25 % Wohngebiet

Das zu entrichtende Entgelt errechnet sich aus den Kostensätzen, welche in Tab. 7.1 angeführt werden. Für landwirtschaftliche Nutzflächen wird ein Entgelt in der Höhe von 2 € pro m<sup>2</sup> angesetzt, quert die Kabeltrasse einen Wald, so erhöht es sich auf 4 € pro m<sup>2</sup> (Hoffmann & Noack 2007, S. 158; Niemand & Schwermer 1999, S. 56). Für die Inanspruchnahme von bewohntem Gebiet lässt sich ohne Vorliegen eines konkreten Projektes das Entgelt nur schwer bestimmen. Daher wurde es in der Höhe von **100 € pro m<sup>2</sup>** angenommen.

Tab. 7.1: Kostensätze für Grunddienstbarkeiten

Nutzung	Entgelt	Quelle
Landwirtschaftliche Nutzfläche	2 €/m <sup>2</sup>	Niemand & Schwermer (1999, S. 56); Hoffmann & Noack (2007, S. 158)
Wald	4 €/m <sup>2</sup>	Hoffmann & Noack (2007, S. 158)
bewohntes Gebiet	100 €/m <sup>2</sup>	eigene Annahme

Es wird davon ausgegangen, dass das Entgelt entsprechend Tab. 7.2 auch bei sehr großer Erdüberdeckung (z.B. bei einem bergmännisch vorgetriebenen Tunnel oder bei einem Rohrvortrieb) zur Auszahlung kommt.

Der berücksichtigte Schutzbereich ergibt sich aus der erforderlichen Zugänglichkeit der Trasse zu jedem Zeitpunkt. Abhängig von der Verlegungsvariante ergeben sich unterschiedliche Breiten.

Tab. 7.2: Entgelt für die Grunddienstbarkeit der betrachteten Varianten

Varianten		Schutz- bereich [m <sup>2</sup> /lfm]	Landwirtschaftliche Nutzfläche [60 %]	Wald [15 %]	Wohngebiet [25 %]	Summe:
			2,00	4,00	100,00	[€/lfm]
[€/m <sup>2</sup> ]						
Erdverlegung	Var 1	9,00	10,80	5,40	225,00	<b>241,20</b>
Verlegung im Schutzrohr	Var 2	9,00	10,80	5,40	225,00	<b>241,20</b>
Tunnel - oberflächennah	Var 3	5,00	6,00	3,00	125,00	<b>134,00</b>
Tunnel - Rohrvortrieb	Var 4	5,50	6,60	3,30	137,50	<b>147,40</b>
Tunnel - bergmännischer Vortrieb	Var 5	5,50	6,60	3,30	137,50	<b>147,40</b>

Bei den in Erde verlegten Kabeln (Var 1 & Var 2) muss links und rechts der Trasse ein zusätzlicher Schutzbereich von drei Metern Breite freigehalten werden (Brakelmann 2004, S. 45). Da die Kabel bei der Verlegung im Tunnel (Var 3, Var 4 und Var 5) vor mechanischer Beschädigung geschützt

sind, wird der Schutzbereich auf einen Meter Breite links und rechts der Trasse reduziert. (Die Beschreibung der Varianten erfolgt ab Kap. 7.1.3)

### Umweltschutz

Durch die Errichtung einer Kabelleitung kommt es zu Auswirkungen auf die Umwelt, welche in Kapitel 5 bereits betrachtet wurden. Um die negativen Folgen auf den Lebensraum im Bereich der Trasse möglichst gering zu halten, werden Ausgleichsmaßnahmen, z.B. die Bereitstellung von Ersatzflächen, angeordnet. Diese Kosten werden zu den Investitionskosten gezählt. Da die Kosten der Ersatzmaßnahmen hauptsächlich von den vorherrschenden Bedingungen sowie der Trassenführung abhängen, werden die Kosten nachfolgend abgeschätzt. Als Basis dienen ausgeführte Straßenbauprojekte in Österreich, welche vom Rechnungshof hinsichtlich der Aufwendungen im Bereich Umweltschutz geprüft wurden.

Tab. 7.3: Kosten für die Umweltschutzmaßnahmen realisierter Straßenbauprojekte in Österreich (Rechnungshofbericht 2009, S. 39 & 57)

Straßenbezeichnung:	Einheit	A8	S31	S1
		Wels - Stättledt	Neutal - Oberpullendorf	Vösendorf - Schwechat
Bauabschnitt:				
Länge Haupttrasse:	[km]	11,05	7,30	16,20
Gesamtkosten :	[Mill. €]	154,58	28,36	436,95
<i>davon für</i>				
ökologische Ausgleichsmaßnahmen:	[Mill. €]	15,69	4,38	27,68
Gewässerschutz:	[Mill. €]	0,72	0,39	2,38
Summe der Kosten für Umweltschutz:	[Mill. €]	16,41	4,77	30,06
	[Mill. € / km]	1,49	0,65	1,86
Anteil der Umweltschutzkosten an den Gesamtkosten:	[%]	10,62	16,82	6,88
<b>Umlegung der Kosten auf einen Quadratmeter Trasse:</b>				
Flächenbedarf je Straßen-Kilometer:	[m <sup>2</sup> /km]	150000,00	104000,00	111000,00
Kosten für Umweltschutzmaßnahmen:	[€/m <sup>2</sup> ]	9,90	6,28	16,72

Die Umweltschutzkosten der betrachteten Projekte liegen zwischen 6 €/m<sup>2</sup> und 17 €/m<sup>2</sup> (siehe Tab. 7.3). Für die in dieser Diplomarbeit betrachteten, oberflächennahen Verlegungsvarianten (1 & 3) werden Umweltschutzkosten in der Höhe von 10 €/m<sup>2</sup> angesetzt. Bei einer angenommenen Trassenbreite von maximal 20 m<sup>56</sup> während der Errichtung, ergeben sich für diese beiden Varianten somit Kosten von **200 €/m**.

Da bei den Varianten 2, 4 und 5 die Oberfläche nicht durchgehend aufgedrungen wird, werden die Kosten für den Umweltschutz um 80 % reduziert, sie werden demnach mit **40 €/m** angesetzt.

### Projektentwicklung

Die bei der Projektausführung anfallenden Kosten für die Abwicklung werden für alle Varianten, basierend auf den Angaben von Brakelmann (2004, S. 95) und Hoffmann & Noack (2007, S. 158), mit **35 €/m** angenommen.

### Bauaufsicht

<sup>56</sup> Hoffmann & Noack (2007, S. 149) geben als maximale Trassenbreite 15 m an.



Unter den Kosten für die Bauaufsicht werden in Anlehnung an Hoffmann & Noack (2007, S. 158) die technische und ökologische Aufsicht sowie notwendige Beweissicherungsmaßnahmen inklusive Nachkontrolle verstanden. Die Kosten für die Bauaufsicht werden für alle untersuchten Varianten mit **15 €/m** festgelegt. (Hoffmann & Noack 2007, S. 158)

### 7.1.2. Kosten der Elektrotechnischen Einrichtung

Die Kosten der Elektrotechnischen Ausrüstung umfassen alle für die Leitung notwendigen Einrichtungen, wie:

- Kabel,
- Muffen,
- Überspannungsableiter,
- Übergangsbauwerke und Endverschlüsse sowie
- Kompensationseinrichtungen

Weiters werden in diesem Kapitel die Kosten der Verlegung und Montage sowie der Innbetriebnahmeprüfung betrachtet. Auch die Permanentüberwachung der Anlage in Form eines Monitoringsystems wird berücksichtigt. Wie Eingangs erklärt, werden Schalt- und Erdungsanlagen von der Betrachtung ausgenommen.

#### Kabel

Die zur Stromübertragung eingesetzten Kabel weisen für alle Varianten einen effektiven Leiterquerschnitt von 2500 mm<sup>2</sup> auf. Bei Kabeln dieser Spannungsebene handelt es sich nicht um Lagerware. Sie werden nach Bedarf gefertigt. Selbst der Aufbau der Kabel (siehe Kapitel 4.2) ist nicht einheitlich, er wird mit dem Auftraggeber auf dessen Anforderungen abgestimmt, die Kosten können daher stark differieren. Weiters hängen die Kosten der Kabel von den Rohstoffpreisen (Kupfer und Aluminium) ab. Diese werden vom Markt bestimmt. Der letzte Bericht der „International Copper Study Group“ (ICSG) prognostiziert für das Jahr 2010 ein Sinken des Kupferverbrauches um 0,7% weltweit. Für das Jahr 2011 wird eine Stabilisierung des Kupfermarktes erwartet. (ICSG 2009)

Tab. 7.4: Zusammenfassung der Kabelkosten aus diversen Studien

Kabel-Querschnitt [mm <sup>2</sup> ]	Jahr	Staat	Kosten [€/m]	Quelle
2500	2005	D	300	Oswald et al. 2005, S. 63
2500	2007	Ö	300 - 385	Oswald 2007, S. 49
2500	2007	Ö	400 - 450	Hoffmann & Noack 2007, S. 156
2500	2007	Ö	500	Kema 2008, S. 179
2000	2007	Ö	500	Haubrich 2007, S. 31
2000	2008	D	400	Oswald 2008, S. 53

In Tab. 7.4 wird ein Überblick über die Kabelpreise gegeben, welche in verschiedenen Studien zur Wirtschaftlichkeitsberechnung herangezogen wurden.

Basierend auf der Vorhersage der ICSG sowie den Werten aus Tab. 7.4, werden die Kosten für das Kabel mit **500 €/Kabelmeter** bei einer Kabellieferlänge von 900 m (Oswald 2007, S. 36) angenommen.

Die Kosten für die Kabelverlegung belaufen sich laut Oswald (2008, S. 53) auf **15 €/Kabelmeter**.

### Exkurs:

Statt der in dieser Diplomarbeit verwendeten Kupferleiter können auch Aluminiumleiter eingesetzt werden. Diese zeichnen sich durch ein geringeres Gewicht sowie geringere Kosten (30 – 40 %) aus. (Hoffmann & Noack 2007, S. 19) Aus den Unterlagen von ABB ist jedoch ersichtlich, dass die elektrische Stromstärke bei Aluminiumkabeln geringer ist als bei Kupferkabeln. (ABB 2009, S. 10)

Tab. 7.5: Gegenüberstellung der Thermischen Grenzleistung von Aluminium- und Kupferkabeln

Leitermaterial	Leiterquerschnitt	Erde	Tunnel	Einheit
Höchstnennstrom				
Kupfer	2000 mm <sup>2</sup>	1705	1425	A
Aluminium	2000 mm <sup>2</sup>	1275	1250	A
Kupfer	2500 mm <sup>2</sup>	1875	1515	A
Thermische Grenzleistung				
Kupfer	2000 mm <sup>2</sup>	1122,20	937,91	MVA
Aluminium	2000 mm <sup>2</sup>	839,18	822,72	MVA
Kupfer	2500 mm <sup>2</sup>	1234,09	997,14	MVA

Aus Tab. 7.5 ist nachvollziehbar, dass die Thermische Grenzleistung von Aluminiumkabeln bei einem Leiterquerschnitt von 2000 mm<sup>2</sup> bei Verlegung in Erde um 25 % und bei Verlegung in Luft um 12 % geringer ist.

Der maximale Leiterquerschnitt von Aluminiumkabeln wird von ABB mit 2000 mm<sup>2</sup> angegeben, wohingegen der maximale Kupferquerschnitt bei 2500 mm<sup>2</sup> liegt. Im direkten Vergleich bedeutet dies, dass die Thermische Grenzleistung von Kupferkabeln in Erdverlegung, bei Einsatz der größtmöglichen Durchmesser um 32 % sowie bei der Verlegung in Luft um 17 % höher ist.

Aus diesem Grund wird in dieser Diplomarbeit den Kupferkabeln der Vorzug gegeben.

### Muffen, Überspannungsableiter, Cross-Bonding-Anlage und Endverschlüsse

Die Anordnung der Muffen findet wie in Abb. 7.2 dargestellt statt. Die Länge eines Cross-Bonding-Abschnitts beträgt 8,10 km und gliedert sich in drei Teilbereiche zu je 2,70 km. Diese Teilabschnitte werden mittels Cross-Bonding-Muffen (CB-Muffen) verbunden. Innerhalb der Teilabschnitte werden die Kabel (je 900 m) mit Verbindungsmuffen gekoppelt.

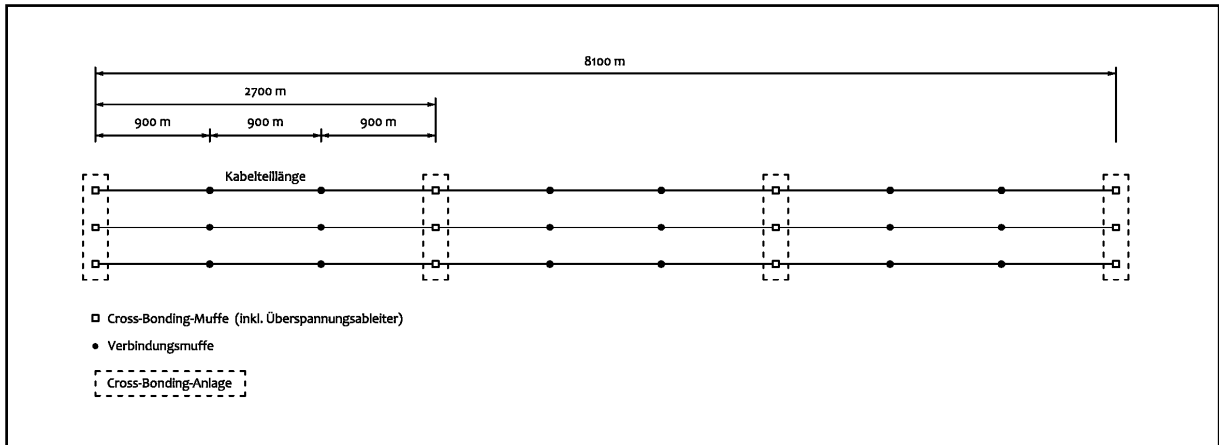


Abb. 7.2: Ausbildung eines Cross-Bonding-Abschnittes (in Anlehnung an Oswald 2007, S. 49)

Alle CB-Muffen werden mit Überspannungsableitern ausgerüstet. Einer Cross-Bonding-Anlage (CB-Anlage), hier findet die Auskreuzung der Schirme statt, werden jeweils drei CB-Muffen zugeordnet.

Zur Ermittlung der elektrotechnischen Einrichtungen (ET-Einrichtungen) pro Meter wird eine Projektlänge von 10 km angenommen.<sup>57</sup> Daraus wird die notwendige Anzahl der Muffen, Überspannungsableiter,... pro Meter errechnet (siehe Tab. 7.6). Dadurch soll verhindert werden, dass es durch die Anzahl der Endverschlüsse (steigt anteilig bei kürzeren Strecken) zu einer Verzerrung kommt.

Tab. 7.6: Anzahl der benötigten ET-Einrichtungen pro Systemmeter

Anzahl	ET-Einrichtung bei einer Projektlänge von	
	10 km für ein System [Stk/10 km]	1 m für ein System [Stk/m]
CB-Muffen	12	0,0012
Überspannungsableiter	12	0,0012
CB-Anlagen	4	0,0004
VB-Muffen	24	0,0024
Endverschlüsse	6	0,0006

Die Kosten für die ET-Einrichtungen werden, basierend auf den Angaben von Oswald (2008, S. 53), laut Tab. 7.7 angenommen. Die angegebenen Kosten verstehen sich inklusive Montage.

Tab. 7.7: Kosten der ET-Einrichtung (Oswald 2008, S. 53)

ET-Einrichtung	Kosten [€/Stk]
CB-Muffen	42.000
Überspannungsableiter	8.000
CB-Anlagen	5.000
VB-Muffen	40.000
Endverschlüsse	70.000

<sup>57</sup> Betrachtet man die Längen der in Europa realisierten VPE-Kabelverbindungen (London 2005: 20,6 km, Madrid 2003: 13,4 km, Berlin 1997, 1998, 1999: je ca. 6,0 km (KEMA 2008, S. 38)) so liegt die Annahme von 10 km im Mittelfeld.

Bei der ET-Einrichtung wurden die Messeinrichtungen (inkl. Stromwandler) nicht berücksichtigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Aufwand bei allen Verlegungsvarianten gleich hoch ist.

**Aufstellung der Kosten für die Elektrotechnische Einrichtung**

In Tab. 7.8 werden die Kosten der ET-Einrichtung bei Anordnung von zwei Kabelsystemen zusammengestellt. Dabei fällt auf, dass das Kabel mit einem Anteil von 86 % kostenbestimmend wirkt. Bei den restlichen 14 % entfallen 8 % auf die Muffen, 3 % auf Überspannungsableiter, CB-Anlage und Endverschlüsse sowie 3 % auf das Monitoringsystem und die Inbetriebnahmeprüfung. Die Kabelkosten werden wesentlich durch den Materialpreis der Leiter (Kupfer, Aluminium) bestimmt (Hoffmann & Noack 2007, S. 156; Oswald 2008, S. 53). Aus diesem Grund lässt sich behaupten, dass die Kosten der elektrotechnischen Einrichtung hauptsächlich vom Rohstoffpreis des internationalen Marktes abhängig sind. Bei zukünftigen Kostenschätzungen muss diese Abhängigkeit berücksichtigt werden.

Tab. 7.8: Auflistung der Kosten für die Elektrotechnische Einrichtung

Elektrotechnische Einrichtung		
Kabel	3000,00	[€/m]
Kabelverlegung	90,00	
CB-Muffen	100,80	
Überspannungsableiter	19,20	
CB-Anlagen	4,00	
VB-Muffen	192,00	
Endverschlüsse	84,00	
Kompensationsanlage	152,46	
Monitoringsystem	90,00	
Inbetriebnahmeprüfung	20,00	
<b>Summe:</b>	<b>3752,46</b>	

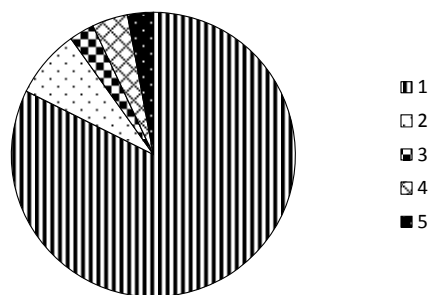


Abb. 7.3: Kostengliederung der Elektrotechnischen Einrichtung

Legende:

- 1 Kabel inkl. Verlegung (82 %)
- 2 Muffen (CB & VB) (8 %)
- 3 Überspannungsabl., CB-Anlage und Endverschl.
- 4 Kompensationsanlage (4 %)
- 5 Monitoringsystem und Inbetriebnahmeprüfung

**Kompensationsanlage**

Die Anlage zur Kompensation der Blindleistung wird nach Brakelmann 2004 (S. 31) mit 7000 €/Mvar angesetzt. Bei einer maximal zu kompensierenden Blindleistung von 10,89 Mvar/km, errechnen sich die Investitionskosten der Kompensationsanlage zu **76,23 €/m und System.**

**Monitoringanlage**

Zur Überwachung der Kabelleitung wird in allen untersuchten Varianten ein Monitoringsystem angeordnet. Die Kosten belaufen sich auf 900.000 € für zwei verlegte Systeme (Hoffmann & Noack 2007, S. 158). Basierend auf der angenommenen Projektlänge von 10 km, ergeben sich Kosten in der Höhe von **90 €/m für zwei Systeme.**

## Inbetriebnahmeprüfung

Die Inbetriebnahmeprüfung (Kap. 6.5.6) wird nach Oswald (2008, S. 53) mit 100.000 € pro System festgelegt. Bei der angenommenen Projektlänge von 10 km bedeuten dies Kosten von **10 €/m und System**.

### 7.1.3. Variante 1: Direkte Erdverlegung

Die Verlegung der Kabel in Erde stellt die gängigste Variante dar. Dabei werden die Kabel direkt in das Erdreich gebettet (Näheres siehe Kap. 6.1). Bei der betrachteten Variante wird eine indirekte Kühlung angeordnet. Dabei handelt es sich um ein Umlaufkühlsystem (siehe auch Kap. 4.6.1). Die Anordnung der Kühlrohre kann Abb. 7.4 entnommen werden. Bei einer Trassenlänge von 10 km wird die Strecke in vier Abschnitte geteilt. Die Standorte der Kühlanlagen sind in Abb. 7.12 ersichtlich. Weiters erfolgt die Anwendung von thermisch stabilisiertem Bettungsmaterial (siehe auch Kap. 6.1.4).

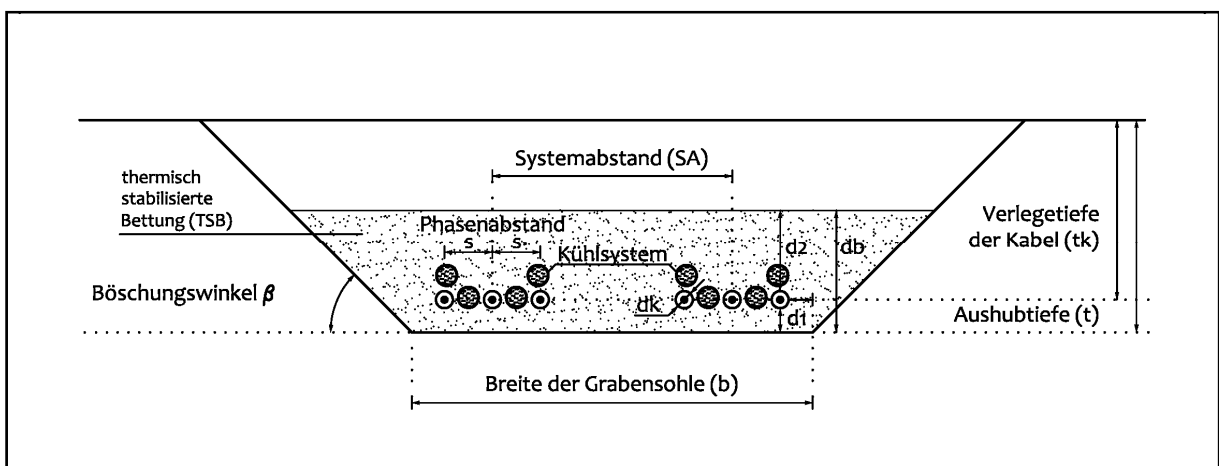


Abb. 7.4: Geometrie der Variante 1, Direkte Erdverlegung

Die Kostenschätzung basiert auf dem gewählten Querschnitt in Abb. 7.4 sowie den dazugehörigen Abmessungen aus Tab. 7.9. Die Böschung wurde bewusst unter  $45^\circ$  angenommen um einen ungünstigen Fall (schlechteres Material) zu berücksichtigen. Können steilere Böschungen ausgeführt werden, so reduzieren sich die Aushubmengen und gleichzeitig die Kosten. Bei einer Verlegetiefe von 1,50 m stellt sich in einer Bezugshöhe von einem Meter über der Erdoberfläche eine Ersatzflussdichte von unter  $50 \mu\text{T}$  ein. Die Forderung nach Einhaltung der Grenzwerte gilt somit als erfüllt.

Tab. 7.9: Abmessungen der Variante 1

## Direkte Erdverlegung

Abmessung:	Kurzzeichen:	Betrag:	Einheit:
Kabeldurchmesser	dK	0,14	m
Phasenabstand	s	0,40	m
Systemabstand	SA	2,00	m
Verlegetiefe der Kabel	tk	1,50	m
Dicke der thermisch stabilisierten Bettungsschicht (TSB)	db	1,09	m
	d1	0,20	m
	d2	0,75	m
Kühlrohrdurchmesser (ID)		0,15	m
Aushubtiefe	t	1,77	m
Breite der Grabensohle	b	3,34	m
Böschungswinkel	$\beta$	45	°
Grabenbreite an der Erdoberfläche	B	6,88	m

Das Aushubvolumen bei Verlegung der Leitung in Erde beträgt für zwei Systeme ca. 9 m<sup>3</sup>/m Trasse. Dabei muss beachtet werden, dass ca. die Hälfte des Aushubs nicht wiederverwendet werden kann, da thermisch stabilisiertes Bettungsmaterial (TSB) zum Einsatz kommt. Die Kosten für den Kabelgraben beinhalten:

- den Humusabtrag in einer Schichtstärke von 0,25 m über die gesamte Trassenbreite (inkl. dem Bereich der Baustraßen und Aushubdeponien),
- den Offenen Abtrag des Erdreiches durch Hydraulikbagger sowie die Sicherung der Baugrube mittels Böschung,
- das Verfüllen des Kabelgrabens mit 50 % TSB und 50 % Aushubmaterial,
- die Deponiekosten für 50 % des Aushubs, welcher durch Einsatz von TSB nicht wiederverwendet werden kann. (Für die Kostenschätzung wird von nicht kontaminiertem Erdreich ausgegangen)
- den Einsatz von thermisch stabilisiertem Bettungsmaterial.

Die Grabenkosten belaufen sich, basierend auf den eben genannten berücksichtigten Leistungen, auf **200 €/m**. Wird eine Sicherung der Böschung mittels Pölung notwendig (siehe Kap. 6.1.2), so erhöhen sich die Kosten auf 300 €/m.

#### 7.1.4. Alternativen zu Variante 1, Direkte Erdverlegung

Da die Investitionskosten eine große Rolle bei der Verlegung von Kabeln spielen, stellt sich die Frage nach dem Einsatz von Kühlanlagen. Bei der Variante der direkten Erdverlegung muss bereits in der Planungsphase entschieden werden, ob Vorrichtungen (Kühlrohre) für den eventuellen Ausbau der Übertragungsleistung zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen werden sollen. Daher werden im folgenden die Varianten 1A und 1B näher betrachtet.

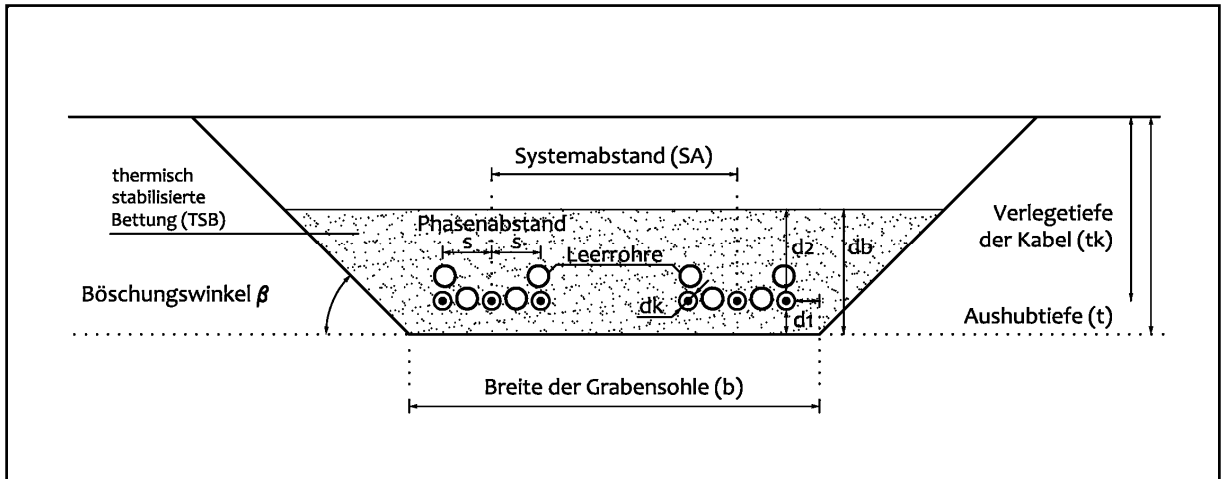


Abb. 7.5: Geometrie der Variante 1A, Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - mit Leerrohren

In Variante 1A (Abb. 7.5) wird die Anordnung von Kühlrohren berücksichtigt, nicht jedoch die Anschaffung einer Kühlanlage. Diese kann bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt nachgerüstet werden. Im Gegensatz dazu stellt die Variante 1B eine Lösung gänzlich ohne Kühleinrichtung dar. Dabei wird selbst auf die Legung von Kühlrohren verzichtet. Die Abmessungen beider Varianten orientieren sich an den Abmessungen der Basisvariante 1 (Tab. 7.9).

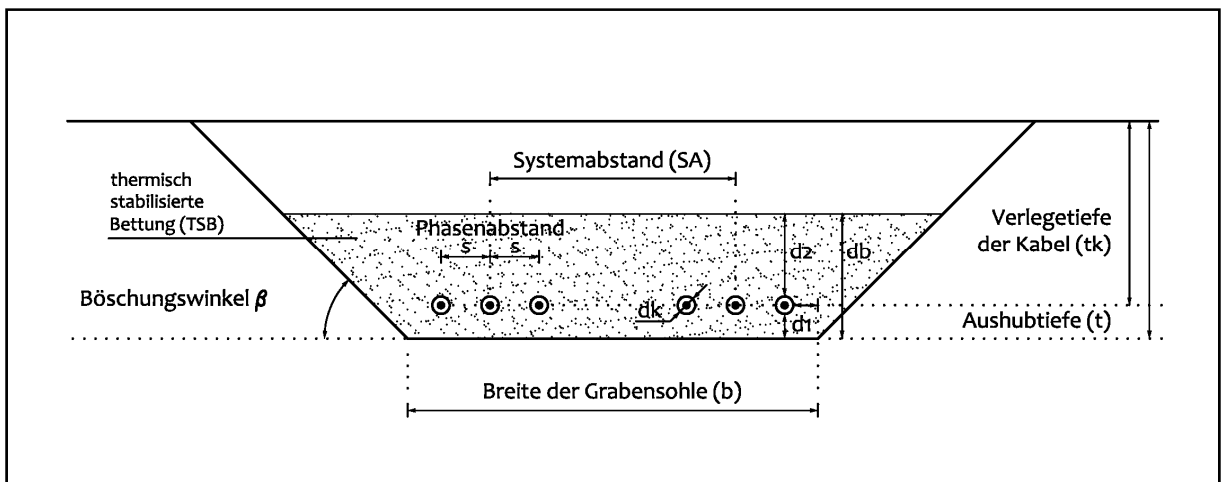


Abb. 7.6: Geometrie der Variante 1B, Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - ohne Leerrohre

### 7.1.5. Variante 2: Verlegung im Schutzrohr

Als zweite Variante wird die Verlegung im Schutzrohr (siehe auch Kap. 6.2) betrachtet. Dabei muss vorausgeschickt werden, dass sich diese Art der Verlegung nicht uneingeschränkt anwenden lässt. Laut ABB (2009, S. 12) muss die Schutzrohrlänge kürzer sein als 10 % der Abschnittslänge zwischen zwei Erdungspunkten, um den von ABB angegebenen Wert für den Höchstnennstrom zu erreichen. Somit ist die Realisierungslänge bei einem Cross-Bonding-Abschnitt von 2,70 km Länge auf unter 270 m beschränkt (siehe auch Abb. 7.2).

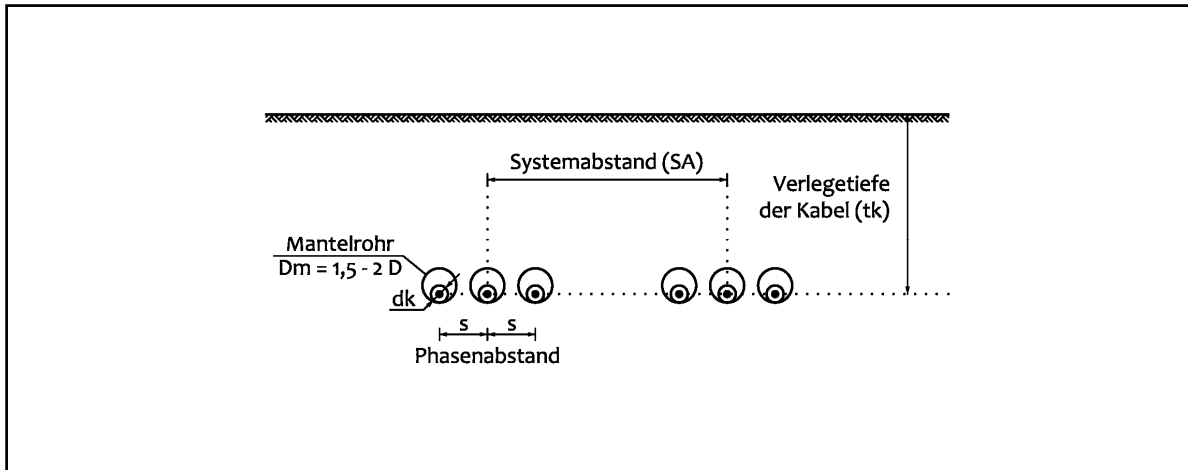


Abb. 7.7: Geometrie der Variante 2, Verlegung im Schutzrohr

Die Abmessungen der untersuchten Variante 2 sind, basierend auf den Angaben aus Abb. 7.7, der Tab. 7.10 zu entnehmen. Für die angenommenen Abmessungen errechnet sich eine Ersatzflussdichte von unter 40  $\mu\text{T}$ , welche unter dem Grenzwert von 100  $\mu\text{T}$  liegt.

Tab. 7.10: Abmessungen der Variante 2

Verlegung im Schutzrohr

Abmessung:	Kurzzeichen:	Betrag:	Einheit:
Kabeldurchmesser	dK	0,14	m
Phasenabstand	s	0,40	m
Systemabstand	SA	2,00	m
Verlegetiefe der Kabel	tk	1,50	m
Anzahl der Mantelrohre		6,00	Stk
Durchmesser der Mantelrohre	Dm	0,30	m

Die Kosten für die grabenlose Verlegung von Schutzrohren werden mit **650 €/m** angesetzt. Dies entspricht ca. der Angabe von Stein (2003, S. 1009), welche durch die Unternehmen ÖBB sowie Energie Steiermark in ihrer Größenordnung bestätigt werden konnte. Dabei wurden als Kosten für die beiden Schachtbauwerke, unter der Annahme einer Straßen- oder Bahnquerung, 5000 € angesetzt. Werden tiefere Verpressungen oder Bohrungen notwendig, so muss der Kostensatz erhöht werden, da der Aufwand für die Schachtbauwerke dementsprechend steigt.

Für die einzubringenden Schutzrohre werden nach Oswald (2005, S. 63) Kosten von **40 €/m** angesetzt.

### 7.1.6. Variante 3: Verlegung im Tunnel – oberflächennah - Fertigteilbauweise

Bei der Variante 3 erfolgt die Legung der Kabel in einem oberflächennahen Tunnel, welcher mittels rechtwinkligen Fertigteilen im Kastenformat<sup>58</sup> realisiert wird (siehe Abb. 7.8). Die in Kap. 6.5.5 angesprochene Möglichkeit, U-förmige Fertigteile zu versetzen und die Erstverlegung der

<sup>58</sup> Durch die senkrechten Wände lassen sich die Konsolen für die Aufnahme der Kabel einfach an den Wänden anbringen. Der Einsatz von Fertigteilen mit Kreisprofil brächte neben dem großen Platzbedarf noch erhöhten Aufwand bei der Verlegung sowie dem Transport mit sich.



Kabel über den offenen Bereich (Decke) vorzunehmen (Abb. 6.22), wird aufgrund der genannten Nachteile nicht angewendet. Die Kabel werden demnach in das fertige Bauwerk über Einstiegsschächte eingezogen und verlegt.

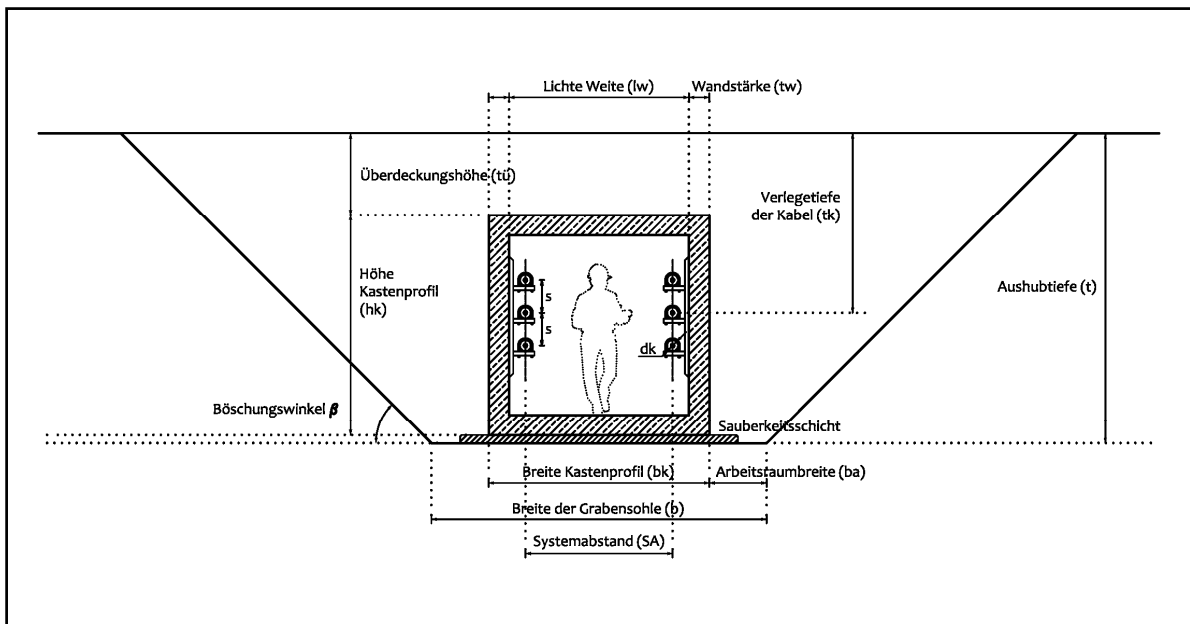


Abb. 7.8: Geometrie der Variante 3, Verlegung im oberflächennahen Tunnel – Fertigteilbauweise

Auch in dieser Variante wurde der ungünstigste Fall, die Böschung mit 45° Neigung zur Horizontalen, angenommen. Die Abmessungen für die Variante 3 sind in Tab. 7.11 ersichtlich. Für die Ersatzflussdichte errechnet sich bei der Anordnung der Kabel in 2,20 m Tiefe ein Wert von unter 30 µT.

Tab. 7.11: Abmessungen der Variante 3

Verlegung im oberflächennahen Tunnel - Fertigteilbauweise

Abmessung:	Kurzzeichen:	Betrag:	Einheit:
Kabeldurchmesser	dK	0,14	m
Phasenabstand	s	0,40	m
Systemabstand	SA	1,80	m
Verlegetiefe der Kabel	tk	2,20	m
Lichte Weite Kastenprofil	lw	2,20	m
Wandstärke	tw	0,25	m
Breite & Höhe Kastenprofil (Außen)	bk, hk	2,70	m
Arbeitsraumbreite	ba	0,70	m
Breite der Grabensohle	b	4,10	m
Überdeckungshöhe	tü	1,00	m
Aushubtiefe	t	3,70	m
Böschungswinkel	$\beta$	45,00	°
Grabenbreite an der Erdoberfläche	B	11,50	m

Die Kosten für die verwendeten Kastenprofile belaufen sich laut Nok (2004, S. 31) auf **2380 €/m**. Für die Kabelbefestigung im Tunnel wird ein Kostensatz von **100 €/m** (Stein 2002, S. 288) angenommen.

### 7.1.7. Alternative zu Variante 3, Verlegung im oberflächennahen Gewölbetunnel

Als Alternative zur Verlegung von Fertigteilen besteht die Möglichkeit, den Kabeltunnel in Ortbeton herzustellen. Im allgemeinen kann man davon ausgehen, dass Ortbetonlösungen teurer sind als die Realisierung mit Fertigteilen. Es wurde jedoch eine Form gefunden, mit der es möglich ist, auf Bewehrung zu verzichten. Dies bedingt somit auch die Herstellung vor Ort, da Fertigteile für den Transport stets bewehrt werden müssen.

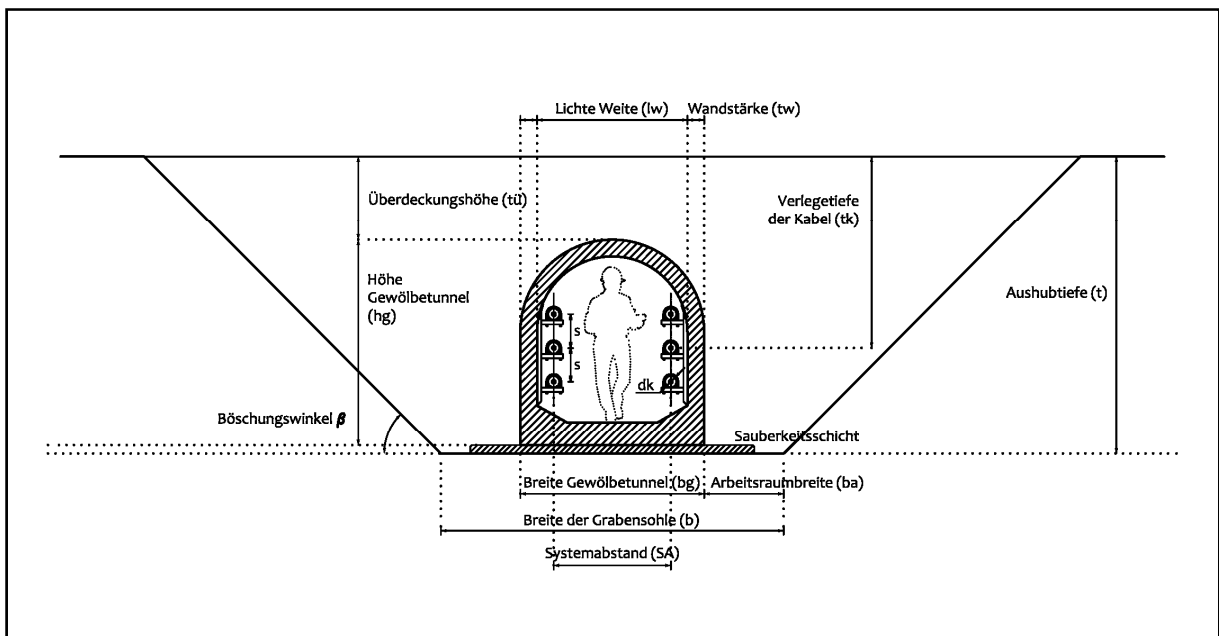


Abb. 7.9: Geometrie der Variante 3A-G, Verlegung im oberflächennahen Gewölbetunnel

(Querschnitt in Anlehnung an Dupré (2007))

Das Bauwerk wird mittels verfahrbarer Stahlschalung (Außen- und Innenschalung) betoniert. Besonderes Augenmerk erfordert die Betontechnologie sowie die Nachbehandlung. Um Risse während des Aushärtungsprozesses zu vermeiden, werden Fasern dem Beton beigemischt (Faserbewehrung ohne Tragfunktion). Die Abdichtung der Anschlussstellen (ein Betonierabschnitt misst maximal 17 m) erfolgt mittels Fugenband. Nähere Informationen können unter Dupré (2007) nachgelesen werden.

Die Abmessungen aus Tab. 7.12 wurden aus den Angaben von Dupré (2007) abgeleitet.

Tab. 7.12: Abmessungen der Variante 3A-G

Verlegung im oberflächennahen Gewölbetunnel

Abmessung:	Kurzzeichen:	Betrag:	Einheit:
Durchmesser Kabel	dK	0,14	m
Phasenabstand	s	0,40	m
Systemabstand	SA	1,40	m
Verlegetiefe der Kabel	tk	2,50	m
Lichte Weite Gewölbetunnel	lw	1,80	m
Wandstärke	tw	0,20	m
Breite Gewölbetunnel	bg	2,20	m
Höhe Gewölbetunnel	hg	2,45	m
Arbeitsraumbreite	ba	0,70	m
Breite der Grabensohle	b	3,60	m
Überdeckungshöhe	tü	1,00	m
Aushubtiefe	t	3,20	m
Böschungswinkel	$\beta$	45	°
Grabenbreite an der GOK	B	11,20	m

Die Ersatzflussdichte liegt bei dieser Variante unter 25  $\mu\text{T}$  und somit weit unter dem Grenzwert. Für das Wartungspersonal müssen andere Grenzwerte eingehalten werden, welche bereits in Kap. 4.8.7 erläutert wurden.

Als Kosten werden von Brakelmann (2009b, S. 14) **700 €/m** angegeben. Dabei handelt es sich um eine Herstellerangabe, welche alle Erdarbeiten, Einstiegsbauwerke und Belüftungsschächte für ein Bauwerk größerer Länge berücksichtigt. Für die Kabelbefestigung im Tunnel wird (wie für alle Tunnelvarianten) ein Kostensatz von **100 €/m** (Stein 2002, S. 288) angenommen.

#### 7.1.8. Variante 4: Verlegung im Tunnel - Rohrvortrieb

Variante 4 berücksichtigt die Verlegung der Kabel in einem Tunnel, welcher mittels Rohrvortrieb hergestellt wird. Das Verfahren wurde bereits in Kap. 6.3.2 erläutert. Die Verlegetiefe (tk) der betrachteten Variante beträgt mehr als 10 m (Abb. 7.10). Da die Kosten bei größeren Tiefen durch die tieferen und somit aufwendigeren Schachtbauwerke steigen, wird die Anwendung durch die Wirtschaftlichkeit beschränkt. Bedingt durch den Kreisquerschnitt rücken die verlegten Systeme in Vergleich zum Kastenprofil etwas auseinander, der Systemabstand vergrößert sich.

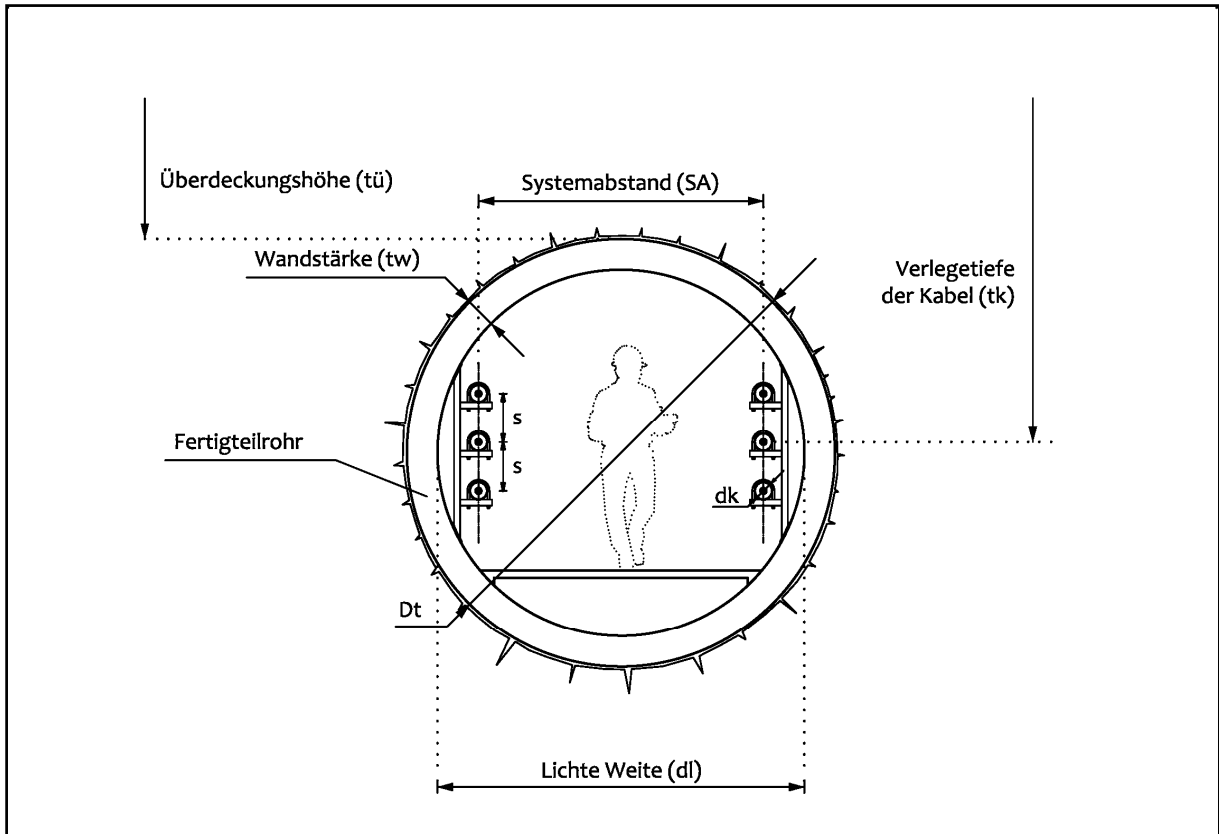


Abb. 7.10: Geometrie der Variante 4, Verlegung im Tunnel – Rohrvortrieb

Die der Kostenschätzung zugrundeliegenden Abmessungen werden in Tab. 7.13 aufgelistet.

Tab. 7.13: Abmessungen der Variante 4

Verlegung im Tunnel - Rohrvortrieb

Abmessung:	Kurzzeichen:	Betrag:	Einheit:
Kabeldurchmesser	dK	0,14	m
Phasenabstand	s	0,40	m
Systemabstand	SA	2,30	m
Verlegetiefe der Kabel	tk	> 10,00	m
Überdeckungshöhe	tü	> 10,00	m
Lichte Weite Tunnel	dl	3,00	m
Wandstärke der Fertigteiltröhre	tw	0,25	m
Aussendurchmesser des Tunnels	Dt	3,50	m

Durch die große Verlegetiefe stellen die magnetischen Felder für die Allgemeinbevölkerung kein Problem dar. Wie im letzten Abschnitt erwähnt, müssen für das Wartungspersonal andere Grenzwerte eingehalten werden.

Laut Hoffmann & Noack (2007, S.158) fallen für einen Rohrvortrieb inklusive Verlegung Kosten von **2700 €/m** an. Für die Kabelbefestigung im Tunnel wird (wie für alle Tunnelvarianten) ein Kostensatz von **100 €/m** (Stein 2002, S. 288) angenommen.

### 7.1.9. Variante 5: Verlegung im Tunnel – Bergmännische Bauweise

Variante 5 stellt die kostenintensivste Variante dar, die bergmännische Bauweise. (Näheres dazu siehe Kap. 7.1.9) Da bei kleinem Durchmesser kein konventioneller Vortrieb und somit kein Ausbau mittels Spritzbeton möglich ist, muss der Ausbau mit Tübbingen erfolgen. In Abb. 7.11 wird der ausgebaute Querschnitt gezeigt. Die Verlegetiefe ist bei dieser Variante nahezu unbegrenzt.

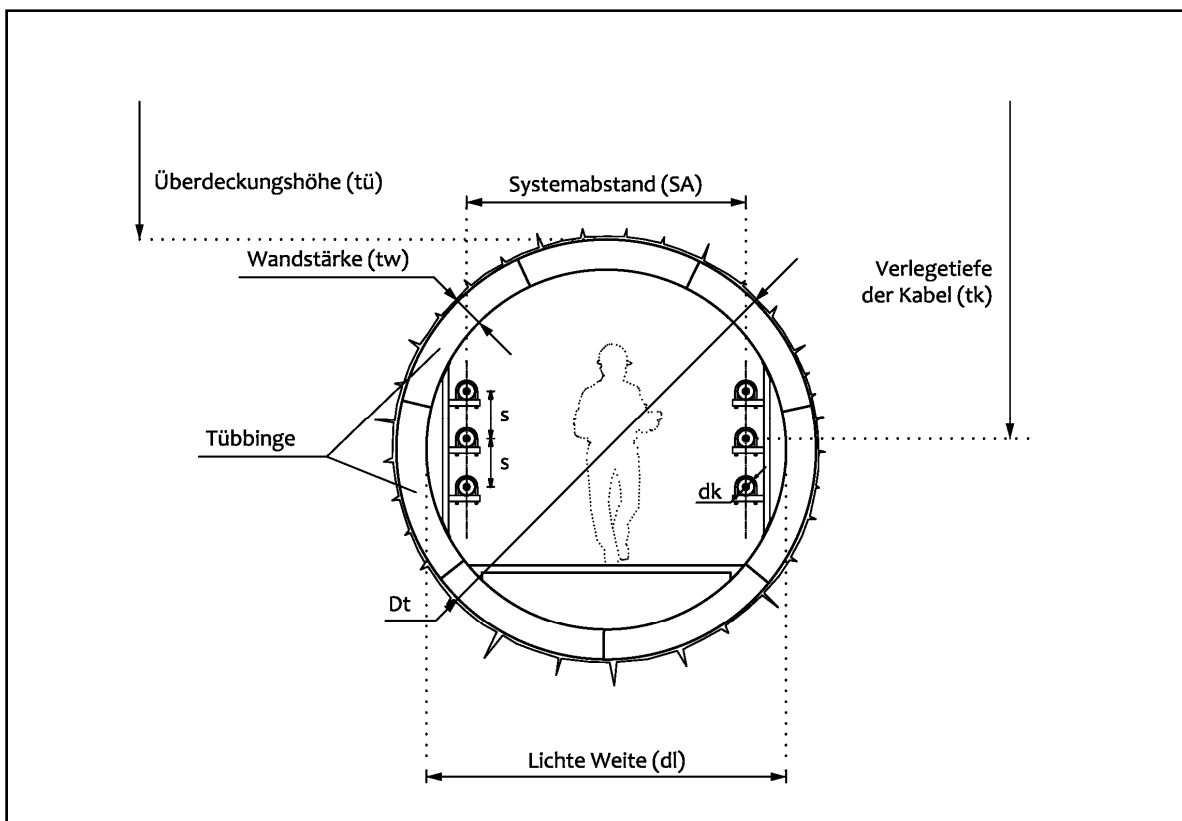


Abb. 7.11: Geometrie der Variante 5, Verlegung im Tunnel - Bergmännische Bauweise

Die Abmessungen werden in Tab. 7.14 aufgelistet.

Tab. 7.14: Abmessungen der Variante 5

Verlegung im Tunnel - Bergmännische Bauweise

Abmessung:	Kurzzeichen:	Betrag:	Einheit:
Kabeldurchmesser	dK	0,14	m
Phasenabstand	s	0,40	m
Systemabstand	SA	2,30	m
Verlegetiefe der Kabel	tk	>> 10,00	m
Überdeckungshöhe	tü	>> 10,00	m
Lichte Weite Tunnel	dl	3,00	m
Wandstärke der Tübbinge	tw	0,25	m
Aussendurchmesser des Tunnels	Dt	3,50	m

Die Kosten belaufen sich beim Ausbau des Tunnels mit Tübbing, laut Aussage von Herrn Prof. Schubert (2010), auf **5000 €/m**. Für die Kabelbefestigung im Tunnel wird (wie für alle Tunnelvarianten) ein Kostensatz von **100 €/m** (Stein 2002, S. 288) angenommen.

### 7.1.10. Muffenbauwerk

Wie bereits erwähnt, werden in den untersuchten Varianten alle Muffen (Vb- und CB-Muffen) in Muffenbauwerken verlegt. Bei einer Projektlänge von 10 km werden 12 Muffenbauwerke erforderlich (0,0012 Stk/m). Die Kosten für ein Muffenbauwerk belaufen sich laut Oswald (2007, S. 49) auf **42.000 €**.

### 7.1.11. Kühleinrichtung

#### Indirekte Kühlung

Bei der Verlegung der Kabel in Erde (Variante 1) wird eine indirekte Kühlung (Kap. 4.6.1) bei beiden Systemen angeordnet. Zu diesem Zweck werden wie in Abb. 7.4 gezeigt, PE-Kühlrohre im Bereich der Kabel angeordnet. Die Kosten der PE-Rohre inklusive Armaturen und Installation belaufen sich laut Zhang (2009, S. 111) auf **50 €/m je System**.

Bei einer Projektlänge von 10 km werden für die Variante der Erdverlegung vier Kühlstationen angeordnet. In Anlehnung an Abb. 4.16, Fall a, wird in jedem Teilabschnitt ein Umkehrpunkt angeordnet. Betrachtet man Abb. 7.4, so erfolgt der Vorlauf über die beiden Kühlrohre zwischen den Leitern, der Rücklauf liegt über den äußeren beiden Kabeln. Das Kühlwasser legt demnach eine Strecke von 5 km zurück, bevor es in der Kühlstation wieder auf die projektierte Einlauftemperatur abgekühlt wird.

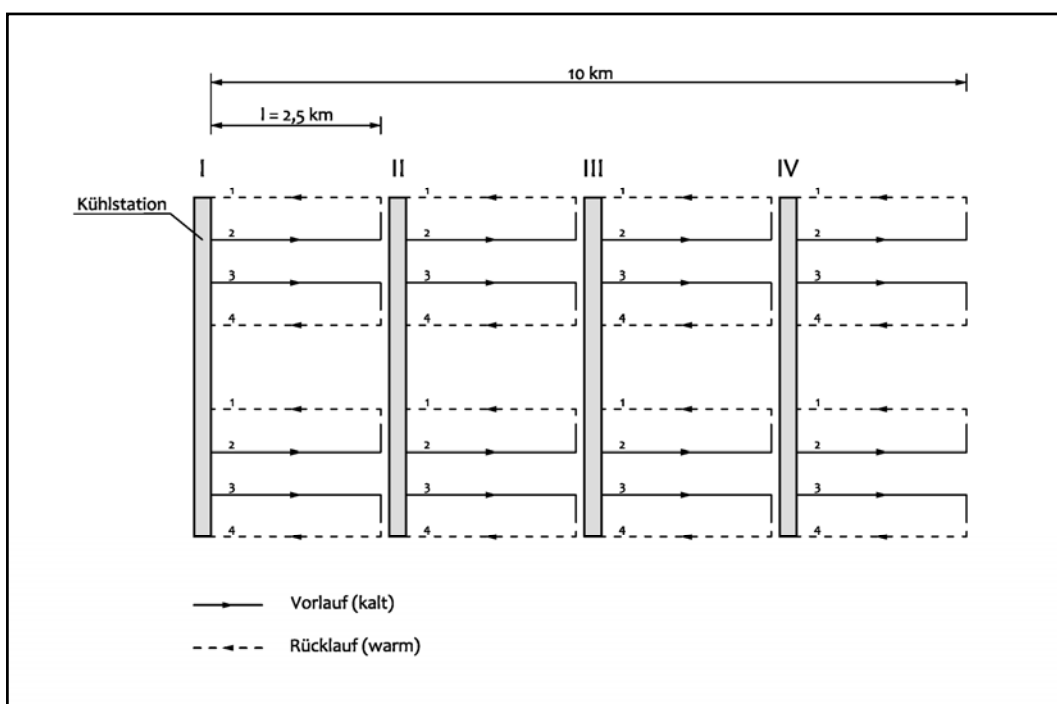


Abb. 7.12: Anordnung der Kühlstationen in Variante 1

Die Kosten für die vier in Abb. 7.12 situierten Kühlstationen werden inklusive Pumpen und zusätzliche bautechnische Maßnahmen auf **200 €/m** für zwei Kabelsysteme geschätzt.

### **Kühleinrichtung im Tunnel**

Die Zwangskühlung im Tunnel erfolgt mit Lüftern, wie sie auch im Straßen- oder U-Bahntunnel eingesetzt werden. Die mittlere Lufttemperatur kann beim belüfteten Tunnel nach Biewald & Brakelmann (1996, S. 1777) mit 10°C angenommen werden.

Laut Hoffman & Noack (2007, S. 158) belaufen sich die Investitionskosten der Lüftungsanlage auf **100 €/m**.

### **7.1.12. Übergangsbauwerke**

Basierend auf der Annahme, dass die zwei Kabelsysteme von zwei Freileitungssystemen gespeist werden und nach 10 km wieder auf zwei Freileitungssysteme übergehen, werden vier Übergangsbauwerke notwendig (0,0004 Stk/m). Die Kosten für ein Übergangsbauwerk werden laut Oswald (2008, S. 49) mit **2.000.000 €/Stk** angesetzt.

### **7.1.13. Aufstellung der Investitionskosten**

#### **Bautechnik**

In Tab. 7.15 werden die Kostensätze aufgelistet und nach Anfall den jeweiligen Varianten zugeordnet. Zur besseren Übersicht werden die Gesamtsummen der einzelnen Varianten in Abb. 7.13 dargestellt. Erwartungsgemäß weist die Variante der Direkten Erdverlegung (Var. 1) die geringsten und die Tunnelvariante bei bergmännischem Vortrieb (Var. 5) die höchsten Investitionskosten auf. Die Kosten der Varianten 1A und 1B unterschreiten die der Variante 1, da auf die Anordnung einer Kühleinrichtung sowie auf die Einlegung von Leerrohren (nur bei Var. 1B) verzichtet wird.

Tab. 7.15: Zusammenstellung der Kosten aus dem Bereich Bautechnik<sup>59</sup>

Bautechnik	Var. 1	Var. 1A-OK-MR	Var. 1B-OK-OR	Var. 2	Einheit
	Direkte Erdverlegung	Erdverlegung, ohne Kühlung, mit Rohren	Erdverlegung, ohne Kühlung, ohne Rohre	Verlegung im Schutzrohr	
Übergangsbauwerke	800,00	800,00	800,00	800,00	[€/m]
Kabelgraben - OBW, Böschung, inkl. TSB	200,00	200,00	200,00	-	
Muffenbauwerk	50,40	50,40	50,40	50,40	
Kühleinrichtung - indirekte Kühlung	200,00	-	-	-	
Kühlrohre aus PE	100,00	100,00	-	-	
Schutzrohrverlegung, DN 300, inkl. Schächte	-	-	-	650,00	
Schutzrohre	-	-	-	240,00	
<b>Summe:</b>	<b>1350,40</b>	<b>1150,40</b>	<b>1050,40</b>	<b>1740,40</b>	
Bautechnik	Var. 3	Var. 3A-G	Var. 4	Var. 5	Einheit
	Tunnel - oberflächennah - Fertigteil	Gewölbetunnel - oberflächennah	Tunnel - Rohrvortrieb	Tunnel - bergmännischer Vortrieb	
Übergangsbauwerke	800,00	800,00	800,00	800,00	[€/m]
Kabeltunnel - offene Bauweise	2380,00	-	-	-	
Kabeltunnel - OBW - Gewölbetunnel	-	700,00	-	-	
Kabeltunnel - Rohrvortrieb	-	-	2700,00	-	
Kabeltunnel - Bergmännisch	-	-	-	5000,00	
Kabelbefestigungen - Konsolen	100,00	100,00	100,00	100,00	
Kühleinrichtung - Lüftung	100,00	100,00	100,00	100,00	
<b>Summe:</b>	<b>3380,00</b>	<b>1700,00</b>	<b>3700,00</b>	<b>6000,00</b>	

Die angegebenen Investitionskosten für den Kabeltunnel der Variante 3A erscheinen gering für eine Ortbetonlösung und müssen für weitere Betrachtungen (konkrete Projekte) unbedingt geprüft werden.

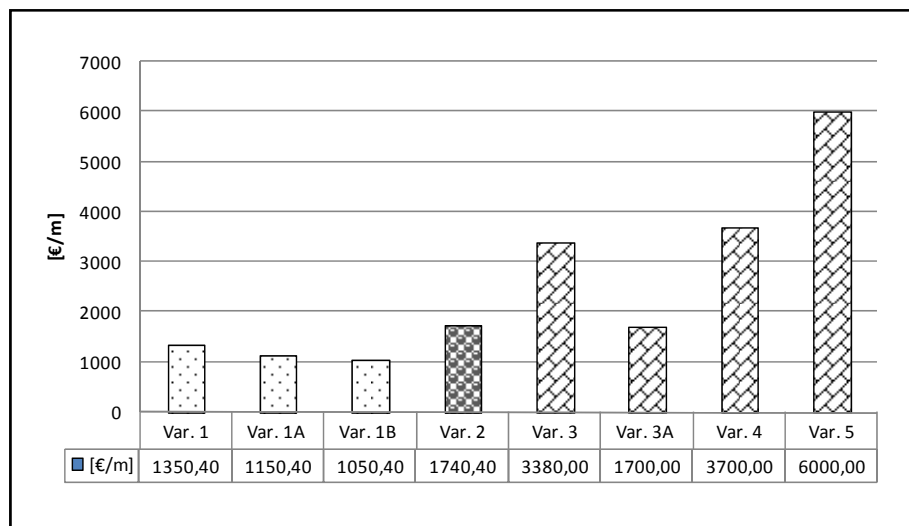


Abb. 7.13: Gegenüberstellung der Investitionskosten – Bereich Bautechnik

Nachfolgend werden die gesamten Investitionskosten aufgelistet. Wie aus Tab. 7.16 ersichtlich ist, begründet sich die Kostendifferenz zwischen den Varianten auf den unterschiedlichen Bauverfahren, welche zur Anwendung kommen. Geringe Differenzen (im Vergleich zu den Gesamtkosten) bestehen bei den Kosten für Planung, Entschädigung und Abwicklung. Die Kosten für die Elektrotechnische Ausrüstung wurden für alle Varianten in der gleichen Höhe angesetzt.

<sup>59</sup> Unter der Abkürzung OBW wird Offene Bauweise verstanden



Tab. 7.16: Zusammenstellung der Investitionskosten

Investitionskosten	Var. 1	Var. 1A-OK-MR	Var. 1B-OK-OR	Var. 2	Einheit
	Direkte Erdverlegung	Erdverlegung, ohne Kühlung, mit Rohren	Erdverlegung, ohne Kühlung, ohne Rohre	Verlegung im Schutzrohr	
Planung, Entschädigung, Abwicklung	561,20	561,20	561,20	401,20	[€/m]
Elektrotechnische Ausrüstung	3752,46	3752,46	3752,46	3752,46	
Bautechnik	1350,40	1150,40	1050,40	1740,40	
<b>Summe</b>	<b>5664,06</b>	<b>5464,06</b>	<b>5364,06</b>	<b>5894,06</b>	
Investitionskosten	Var. 3	Var. 3A-G	Var. 4	Var. 5	Einheit
	Tunnel - oberflächennah - Fertigteil	Gewölbetunnel - oberflächennah	Tunnel - Rohrvortrieb	Tunnel - bergmännischer Vortrieb	
Planung, Entschädigung, Abwicklung	454,00	454,00	307,40	307,40	[€/m]
Elektrotechnische Ausrüstung	3752,46	3752,46	3752,46	3752,46	
Bautechnik	3380,00	1700,00	3700,00	6000,00	
<b>Summe</b>	<b>7586,46</b>	<b>5906,46</b>	<b>7759,86</b>	<b>10059,86</b>	

In Abb. 7.14 erfolgt die grafische Darstellung der Investitionskosten. Im Anhang (Abb. 12.1) wird die Kostenverteilung zur besseren Veranschaulichung in Tortenform dargestellt.

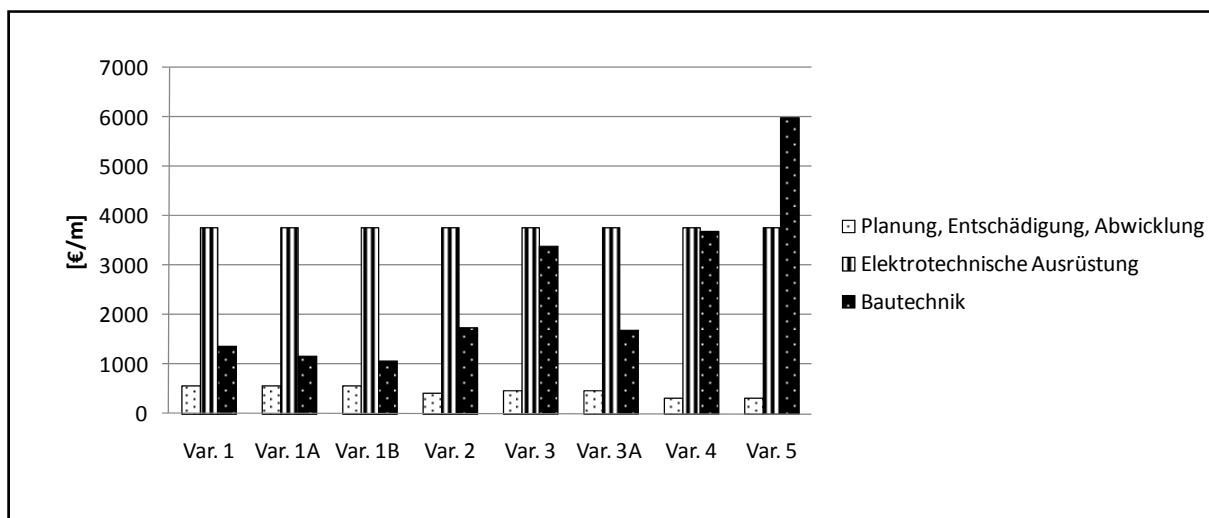


Abb. 7.14: Gegenüberstellung der Investitionskosten

Der Anteil der Baukosten an den Gesamtkosten liegt bei den Erdverlegten Varianten (Var.1, Var. 1A & Var. 1B) zwischen 20 % und 25 %. Bei den Varianten 2 und 3A betragen die Baukosten 30 %. Betrachtet man die Tunnelvarianten, so liegen die Baukosten zwischen 45 % (Var. 3) und 60 % (Var. 5). Aus Abb. 7.14 ist ersichtlich, dass die Kabelkosten und die Kosten für die Bautechnik bei Variante 4 annähernd gleich hoch sind.

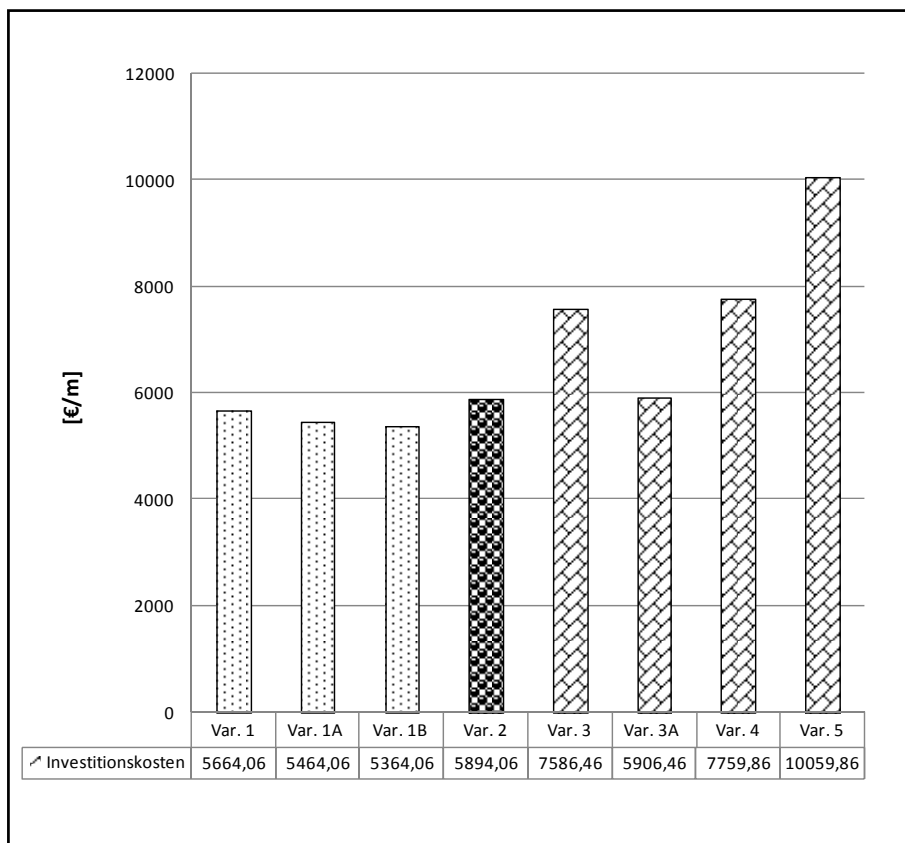


Abb. 7.15: Gegenüberstellung der Investitionskosten (kumuliert)

In Abb. 7.15 werden die Investitionskosten der Varianten einander gegenübergestellt. Jene Varianten, bei welchen die Erdverlegung zur Anwendung kommt, weisen die niedrigsten Investitionskosten auf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei Variante 1A auf die Kühlanlage und bei Variante 1B zusätzlich auf Leerrohre verzichtet wird (siehe auch Kap. 7.1.4). Unter Vernachlässigung der Varianten 1A und 1B ergibt sich bei der Betrachtung der Investitionskosten folgende Variantenreihung:

1. Variante 1
2. Variante 2
3. Variante 3A

Im Anschluss werden die laufenden Kosten einer Kabelanlage betrachtet.

## 7.2. Instandhaltungskosten

Unter den Instandhaltungskosten werden alle Kosten zusammengefasst, die durch Erneuerung oder Generalüberholung von Betriebsmitteln anfallen. Dabei werden all jene Investitionen berücksichtigt, welche eine kürzere Nutzungsdauer als die Kabelanlage aufweisen.

### Monitoringsystem

Es wird in dieser Diplomarbeit davon ausgegangen, dass das installierte Monitoringsystem nach drei Jahren ein Service in der Höhe von 3 % der Investitionskosten benötigt. Dabei wird der Austausch von Hardware in der Überwachungsstation ebenso berücksichtigt wie etwaige Softwareupdates. Die Kosten belaufen sich somit bei allen Varianten auf **2,70 €/m und Jahr**.

### Kühlanlage – indirekte Kühlung

Die Lebensdauer der Kühlanlage beträgt laut Herrn Ing. Weigl, Msc. (2010) 20 Jahre und muss somit nach Ablauf der Nutzungsdauer erneuert werden. Dies wird mit dem Kostensatz „Reinvestition Kühlanlage“ berücksichtigt. Für die Reinvestition der Kühlanlage werden **200 €/m nach 20 Jahren** angesetzt. Für die Instandhaltung der Pumpen sowie eine Überprüfung der Kühlanlage fallen **nach 10 Jahren 100 €/m** für die „Generalüberholung Kühlanlage“ an.

### Kühlanlage – Lüftung

Die Investitionskosten der Kühlanlage für Kabeltunnel (Lüfter) liegen unter jenen der indirekten Kühlung bei Erdverlegung. Daher fallen bei einer angenommenen Lebensdauer von 20 Jahren geringere Kosten für die Instandhaltung an. Diese liegen für eine Reinvestition bei **100 €/m**. Für die Generalüberholung nach 10 Jahren werden **50 €/m** angesetzt.

### Austellung der Instandhaltungskosten

Tab. 7.17: Aufstellung der Instandhaltungskosten

Instandhaltungskosten		
Monitoringsystem	2,70	[€/m a]
Generalüberholung indirekte Kühlung	100,00	
Reinvestition indirekte Kühlung	200,00	
Generalüberholung Kühlung - Tunnel	50,00	
Reinvestition Kühlung - Tunnel	100,00	

## 7.3. Entstörungskosten

Störungen bei Kabelanlagen können durch interne oder externe Fehler ausgelöst werden. Interne Fehler treten am Kabel durch fortgeschrittenes Alter oder Überlastungen im Betrieb auf. (siehe Kap. 4.9) Externe Fehler stellen Beschädigungen durch Dritte (z.B. durch Bautätigkeit) dar. In der Tab. 7.18 wird die Ausfallhäufigkeit von Kabeln und Garnituren angegeben.

Tab. 7.18: Ausfallhäufigkeit von Kabeln (pro Meter) und Garnituren (pro Stk)

(Grundlage: Tab. 4.6)

Ausfallshäufigkeit - Interne Fehler:		220-550 kV
Kabel	Fehler / System-m und Jahr	6,70E-07
Muffe	Fehler / Stk und Jahr	2,60E-04
Endverschluss	Fehler / Stk und Jahr	3,20E-04
Ausfallshäufigkeit - Externe Fehler:		220-550 kV
Kabel	Fehler / System-m und Jahr	6,70E-07
Muffe	Fehler / Stk und Jahr	2,20E-04
Endverschluss	Fehler / Stk und Jahr	1,80E-04
Ausfallshäufigkeit - Fehler gesamt:		220-550 kV
Kabel	Fehler / System-m und Jahr	1,34E-06
Muffe	Fehler / Stk und Jahr	4,80E-04
Endverschluss	Fehler / Stk und Jahr	5,00E-04

Für die Varianten 1, 1A, 1B sowie Var. 2 werden die Schadenshäufigkeiten der Internen und Externen Fehler angesetzt, da diese durch Dritte (z.B. Baggararbeiten) beschädigt werden können. Bei der Verlegung im Tunnel (Varianten 3 bis 5) kann dies nicht geschehen, daher werden nur die Schadenshäufigkeiten der Internen Fehler berücksichtigt. (Diese Annahme wird von Brakelmann (2009a, S. 5) bestätigt.)

### Fehler am Kabel

Ausgehend von den in Kap 7.1.2 genannten Kosten werden die Kosten für einen Kabelschaden abgeschätzt.

Bei einer angenommenen Tauschlänge des Kabels von 10 m, fallen inklusive Verlegung Kabelkosten von 5150 € an. Zum Anschluss des Tauschstückes werden zwei VB-Muffen notwendig, welche inklusive Montage 80000 € kosten. Da es sich um ein Reparaturereignis handelt, werden 15 Prozent für erhöhten Aufwand aufgeschlagen. Die Kosten für einen Kabelschaden (10 m) betragen demnach **100.000 €**.

### Fehler an einer Muffe

Basierend auf den Erstverlegungskosten aus Kap. 7.1.2 werden für einen Muffentausch erhöhte Kosten von **50000 €** angenommen.

### Fehler an einem Endverschluss

Die Kosten für einen Tausch eines Endverschlusses belaufen sich (basierend auf den Erstverlegungskosten plus Zuschlag) auf **80.000 €**.

Unter Berücksichtigung der Ausfallshäufigkeit (Tab. 7.18) ergeben sich (in Abhängigkeit von der Variante) laufende Kosten, welche in Tab. 7.19 aufgelistet werden.

Tab. 7.19: Aufstellung der Entstörungskosten

Entstörungskosten		
Externe & Interne Fehler bei Var. 1 - 3		
Fehler am Kabel	0,27	[€/m a]
Fehler an einer Muffe	0,09	
Fehler an einem Endverschluss	0,02	
<b>Summe:</b>	<b>0,38</b>	
Nur Interne Fehler bei Var. 3 - 5		
Fehler am Kabel	0,13	[€/m a]
Fehler an einer Muffe	0,05	
Fehler an einem Endverschluss	0,02	
<b>Summe:</b>	<b>0,20</b>	

## 7.4. Betriebskosten

Die Betriebskosten setzen sich aus den Verlustkosten sowie den Inspektions- und Wartungskosten zusammen (siehe auch Abb. 7.1).

### 7.4.1. Verlustkosten

Als Verlustkosten werden all jene Kosten bezeichnet, welche durch Verluste beim Stromtransport anfallen. In Tab. 7.20 wird die Ermittlung des Höchstnennstromes für alle Varianten durchgeführt. Die Daten zur Ermittlung (Basisübertragungsstrom und Anpassungsfaktoren) wurden den Unterlagen von ABB (2009) entnommen. Dabei wurde bei der Variante 1 eine Steigerung der Übertragungsleistung durch Zwangskühlung von 60 %, basierend auf der Angabe von Weigl (2009, S. 11), angenommen.

Tab. 7.20: Ermittlung des Höchstnennstromes aller Varianten

<b>Randbedingungen als Ausgangsbasis für die Abschätzung des Basisübertragungsstromes:</b>					
3 Einleiterkabel mit je 2500 mm <sup>2</sup> effektivem Leiterquerschnitt					
flache Verlegung in Erde bei einer Umgebungstemperatur von 20°C					
Verlegetiefe 1,00 m bei einem Wärmewiderstand von 1 mK/W					
Achsabstand der Leiter: 210 mm (De + 70 mm)					
ausgekrenzte Kabelschirme (cross bonding)					
maximale Leitertemperatur: 90°C					
<b>Basisübertragungsstrom bei der Verlegung in Erde:</b>				<b>1875</b>	<b>A</b>
<b>Berücksichtigung der Anpassungsfaktoren für die Abschätzung des Höchstnennstromes:</b>					
Faktoren zur Berücksichtigung der Abweichungen von der Ausgangsbasis	Var. 1	Var. 1A-OK-MR	Var. 1B-OK-OR	Var. 2	Einheit
	Direkte Erdverlegung	Erdverlegung, ohne Kühlung, mit Rohren	Erdverlegung, ohne Kühlung, ohne Rohre	Verlegung im Schutzrohr	
Phasenabstand 400 mm	1,11	1,11	1,11	1,11	[-]
Verlegetiefe 1500 mm	0,93	0,93	0,93	0,93	[-]
2 Systeme, Systemabstand	2000	2000	2000	2000	[mm]
	0,96	0,96	0,96	0,96	[-]
Bodentemperatur 15°C	1,04	1,04	1,04	1,04	[-]
Wärmewiderstand von 1 mK/W	1,00	1,00	1,00	1,00	[-]
Kabel im Schutzrohr	-	-	-	0,90	[-]
Kabel im Tunnel bei 10°C Lufttemperatur	-	-	-	-	[-]
<b>Höchstnennstrom der einzelnen Varianten:</b>	<b>3092</b>	<b>1932</b>	<b>1932</b>	<b>1739</b>	<b>A</b>
Verlegetiefe der Kabel:	1,50	1,50	1,50	1,50	[m]
<b>Randbedingungen als Ausgangsbasis für die Abschätzung des Basisübertragungsstromes:</b>					
3 Einleiterkabel mit je 2500 mm <sup>2</sup> effektivem Leiterquerschnitt					
Lufttemperatur von 35°C					
Achsabstand der Leiter: 210 mm (De + 70 mm)					
ausgekrenzte Kabelschirme (cross bonding)					
maximale Leitertemperatur: 90°C					
<b>Basisübertragungsstrom bei der Verlegung im Tunnel:</b>				<b>1515</b>	<b>A</b>
<b>Berücksichtigung der Anpassungsfaktoren für die Abschätzung des Höchstnennstromes:</b>					
Faktoren zur Berücksichtigung der Abweichungen von der Ausgangsbasis	Var. 3	Var. 3A-G	Var. 4	Var. 5	Einheit
	Tunnel - oberflächennah - Fertigteil	Gewölbetunnel - oberflächennah	Tunnel - Rohrvortrieb	Tunnel - bergmännischer Vortrieb	
Phasenabstand 400 mm	1,11	1,11	1,11	1,11	[-]
Verlegetiefe 1500 mm	-	-	-	-	[-]
2 Systeme, Systemabstand	1800	1400	2300	2300	[mm]
	0,95	0,93	0,97	0,97	[-]
Bodentemperatur 15°C	-	-	-	-	[-]
Wärmewiderstand von 1 mK/W	-	-	-	-	[-]
Kabel im Schutzrohr	-	-	-	-	[-]
Kabel im Tunnel bei 10°C Lufttemperatur	1,24	1,24	1,24	1,24	[-]
<b>Höchstnennstrom der einzelnen Varianten:</b>	<b>2575</b>	<b>2521</b>	<b>2629</b>	<b>2629</b>	<b>A</b>
Verlegetiefe der Kabel:	2,20	2,50	> 10	>> 10	[m]

Für die Verlegung im Tunnel mit Zwangsbelüftung wird eine Steigerung der Übertragungsleistung von 30 %, in Anlehnung an die Angaben von Biewald und Brakelmann (1996, S. 1780), angesetzt.<sup>60</sup> Basierend auf den Angaben zum Höchstnennstrom erfolgt in Tab. 7.21 die Ermittlung der Verlustkosten.

Tab. 7.21: Ermittlung der Verlustkosten für alle Varianten

Verlustkostenermittlung Var. 1 - 2	Var. 1	Var. 1A-OK-MR	Var. 1B-OK-OR	Var. 2	Einheit
	Direkte Erdverlegung	Erdverlegung, ohne Kühlung, mit Rohren	Erdverlegung, ohne Kühlung, ohne Rohre	Verlegung im Schutzrohr	
Höchstnennstrom der einzelnen Varianten:	3092	1932	1932	1739	A
stromabhängige Verluste:	263,86	103,07	103,07	83,49	KW/km
stromunabhängige Verluste:					
<i>Dielektrische Verluste</i>	10,89	10,89	10,89	10,89	KW/km
<i>Verluste in den Kompensationsspulen</i>	15,00	15,00	15,00	15,00	KW/km
<b>Summe der Verluste:</b>	<b>289,75</b>	<b>128,96</b>	<b>128,96</b>	<b>109,38</b>	<b>KW/km</b>
<i>Stunden pro Jahr:</i>	<i>8760</i>	<i>8760</i>	<i>8760</i>	<i>8760</i>	<i>h</i>
Verluste pro Jahr:	2538,20	1129,69	1129,69	958,14	MWh/km
<b>Verlustkosten (bei 0,067 Cent/kWh):</b>	<b>1700,60</b>	<b>756,89</b>	<b>756,89</b>	<b>641,95</b>	<b>€/km a</b>
Verlustkostenermittlung Var. 3 - 5	Var. 3	Var. 3A-G	Var. 4	Var. 5	Einheit
	Tunnel - oberflächennah - Fertigteil	Gewölbetunnel - oberflächennah	Tunnel - Rohrvortrieb	Tunnel - bergmännischer Vortrieb	
Höchstnennstrom der einzelnen Varianten:	2575	2521	2629	2629	A
stromabhängige Verluste:	183,04	175,42	190,83	190,83	KW/km
stromunabhängige Verluste:					
<i>Dielektrische Verluste</i>	10,89	10,89	10,89	10,89	KW/km
<i>Verluste in den Kompensationsspulen</i>	15,00	15,00	15,00	15,00	KW/km
<b>Summe der Verluste:</b>	<b>208,93</b>	<b>201,31</b>	<b>216,72</b>	<b>216,72</b>	<b>KW/km</b>
<i>Stunden pro Jahr:</i>	<i>8760</i>	<i>8760</i>	<i>8760</i>	<i>8760</i>	<i>h</i>
Verluste pro Jahr:	1830,27	1763,47	1898,49	1898,49	MWh/km
<b>Verlustkosten (bei 0,067 Cent/kWh):</b>	<b>1226,28</b>	<b>1181,52</b>	<b>1271,99</b>	<b>1271,99</b>	<b>€/km a</b>

Für die Ermittlung der Verlustkosten wird der Dauerbetrieb der Leitung (Belastungsgrad  $m = 1$ ) angenommen. Die demnach in Tab. 7.21 angeführten Verlustkosten entsprechen den maximal möglichen. Die Verlustkosten werden mit **0,067 Cent/kWh** angesetzt. Dieser Kostensatz wurde der Systemnutzungstarifverordnung (SNT-VO 2010) entnommen.

### Verluste der Kühlanlage

Bei einer angenommenen Verlustleistung von durchschnittlich einem MW und Beschaffungskosten von 0,035 €/kWh (Haubrich 2007, S. 24) ergeben sich die Verlustkosten zu **30,66 €/m a**. In Ermangelung konkreter Daten, werden für die Tunnelbelüftung die Verlustkosten in gleicher Höhe angesetzt.

(Die Varianten 1A, 1B sowie Variante 2 werden nicht gekühlt, daher fallen keine Verluste durch Kühlung an.)

<sup>60</sup> Bei der Interpretation der Angaben von ABB (2009) wurde angenommen, dass zwar die Umgebungsluft im Tunnel 10°C beträgt, eine Zwangslüftung bei den Anpassungsfaktoren jedoch nicht berücksichtigt wurde. Aus diesem Grund erfolgt die Erhöhung der Übertragungsleistung um 30 %.

#### 7.4.2. Inspektions- und Wartungskosten

Nachfolgend werden die Inspektions- und Wartungskosten für die Kabelanlage, die zusätzlichen Einrichtungen sowie für die Bauwerke angegeben.

##### Kabel

Kabel gelten generell als wartungsfrei. Daher beschränkt sich die Wartung am Kabel auf die Überspannungsableiter und Endverschlüsse. Die Wartungsarbeiten werden pro System laut KEMA (2008, S. 183) mit **1 €/m a** angesetzt.

##### Kompensationsanlage

Die Instandhaltungskosten der Kompensationseinrichtungen für ein System werden mit **0,25 €/m und Jahr** abgeschätzt. (Fickert 2010)

##### Monitoring

Basierend auf den Angaben von Hoffmann und Noack (2007, S. 161) werden für den Betrieb der Monitoringanlage 5000 €/a bei erdverlegten Kabeln sowie 7000 €/a für tunnelverlegte Kabel angesetzt. Bei einer Projektlänge von 10 km ergeben sich somit **0,50 €/m a** bzw. **0,70 €/m a**.

##### Kühlanlage

Die Wartungskosten der Kühlanlage betragen laut Zhang (2009, S. 112) 1% der Errichtungskosten (200 €/m) und belaufen sich daher auf **2 €/m a**. Für die Kühleinrichtung im Tunnel wird vom selben Prozentsatz ausgegangen, bei Investitionskosten von 100 €/m ergeben sich Wartungskosten von **1 €/m a**.

##### Bauwerk

Bei den Varianten 1, 1A und 1B sowie 2 beschränkt sich die Kontrolle des Bauwerks auf die regelmäßige Begehung der Trasse. Diese soll sicherstellen, dass es im Schutzbereich zu keiner unzulässigen Bautätigkeit kommt. Die Inspektionskosten für die Begehung der Trasse werden mit **0,50 €/m a** abgeschätzt.

Die Wartungskosten für das Tunnelbauwerk werden mit **5 €/m a** angesetzt. (Dies entspricht ca. der Angabe von Stein (2002, S. 288), welcher für die Wartung eines Infrastrukturkanals mit mehreren unterschiedlichen Leitungen 6 €/m a angibt.) Dabei werden neben der Kontrolle des Bauwerks (z.B. auf Wassereintritt) die Konsolen für die Befestigung der Kabel kontrolliert.

#### 7.4.3. Aufstellung der Betriebskosten

Abschließend werden die Betriebskosten der verschiedenen Varianten aufgelistet. In Tab. 7.22 wurden bereits die Kosten von zwei Kabelsystemen berücksichtigt.



Tab. 7.22: Aufstellung der Betriebskosten für zwei Kabelsysteme

Betriebskosten	Var. 1	Var. 1A	Var. 1B	Var. 2	Einheit	
	Direkte Erdverlegung	Erdverlegung, ohne Kühlung, mit Rohren	Erdverlegung, ohne Kühlung, ohne Rohre	Verlegung im Schutzrohr		
Verlustkosten						
Kabelanlage	3,40	1,51	1,51	1,28	[€/m a]	
Kühlungsanlage	30,66	0,00	0,00	0,00		
<b>Zwischensumme:</b>	<b>34,06</b>	<b>1,51</b>	<b>1,51</b>	<b>1,28</b>		
Inspektions- und Wartungskosten						
Kabelanlage	2,00	2,00	2,00	2,00		
Kompensationsanlage	0,50	0,50	0,50	0,50		
Monitoring	0,50	0,50	0,50	0,50		
Kühlungsanlage - indirekte Kühlung	2,00	0,00	0,00	0,00		
Bauwerk	0,50	0,50	0,50	0,50		
<b>Zwischensumme:</b>	<b>5,50</b>	<b>3,50</b>	<b>3,50</b>	<b>3,50</b>		
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>	<b>39,56</b>	<b>5,01</b>	<b>5,01</b>	<b>4,78</b>		
Betriebskosten	Var. 3	Var. 3A	Var. 4	Var. 5	Einheit	
	Tunnel - oberflächennah - Fertigteil	Gewölbetunnel - oberflächennah	Tunnel - Rohrvortrieb	Tunnel - bergmännischer Vortrieb		
Verlustkosten						
Kabelanlage	2,45	2,36	2,54	2,54	[€/m a]	
Kühlungsanlage	30,66	30,66	30,66	30,66		
<b>Zwischensumme:</b>	<b>33,11</b>	<b>33,02</b>	<b>33,20</b>	<b>33,20</b>		
Inspektions- und Wartungskosten						
Kabelanlage	2,00	2,00	2,00	2,00		
Kompensationsanlage	0,50	0,50	0,50	0,50		
Monitoring	0,70	0,70	0,70	0,70		
Kühlungsanlage - indirekte Kühlung	1,00	1,00	1,00	1,00		
Bauwerk	5,00	5,00	5,00	5,00		
<b>Zwischensumme:</b>	<b>9,20</b>	<b>9,20</b>	<b>9,20</b>	<b>9,20</b>		
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>	<b>42,31</b>	<b>42,22</b>	<b>42,40</b>	<b>42,40</b>		

Aus Tab. 7.22 ist ersichtlich, dass die Varianten ohne Kühleinrichtung (Var. 1A, 1B und Var. 2) die geringsten Betriebskosten aufweisen. Da die Kosten der Kühlung auf einer Schätzung basieren, besteht bei diesen Kostensätzen Konkretisierungspotenzial.

## 8. Wirtschaftliche Gegenüberstellung der betrachteten Varianten

In diesem Kapitel erfolgt die Gegenüberstellung der Kosten. Aufgrund der langen Nutzungsdauer einer Kabelanlage kommt ein dynamisches Investitionsrechenverfahren zur Anwendung. Dieses berücksichtigt, im Gegensatz zu den statischen Verfahren, die Zeitpunkte der Ein- und Auszahlungen und somit den Aspekt der Kapitalbindung. Auf die Berücksichtigung der Inflation wird aufgrund der schwierigen Vorhersehbarkeit für die gesamte, verhältnismäßig lange Nutzungsdauer verzichtet.

### 8.1. Grundlagen

Zum Einsatz kommt die Kapitalwertmethode, dabei werden in Ermangelung verwertbarer Angaben zu den erzielbaren Einnahmen nur die Ausgaben durch die Leitung berücksichtigt. Als Grundlage für die weitere Betrachtung werden zunächst die wirtschaftlichen Begriffe angeführt:

#### Kapitalwert

Unter dem Kapitalwert wird der auf den Bezugszeitpunkt abgezinst bzw. aufgezinste Wert aller Einnahmen und Ausgaben verstanden. Werden nur Auszahlungen gegenübergestellt, so ist aus monetärer Sicht jene Variante zu favorisieren, welche den geringsten Kapitalwert aufweist. (Lücke 1991, S. 218)

#### Barwert

Der Barwert entspricht dem Wert, den eine künftig anfallende Auszahlung (oder Einzahlung) zum Zeitpunkt der Investition besitzt. Die Auszahlung (bzw. Einzahlung) wird demnach auf den Bezugszeitpunkt abgezinst. (Lücke 1991, S. 21)

#### Abzinsungsfaktor

Um den Barwert einer Auszahlung zu erhalten, muss der Nominalbetrag mit dem Abzinsungsfaktor multipliziert werden. (Lücke 1991, S. 4)

$$K_0 = K_n \cdot q^{-n} \quad [€] \quad (8.1)$$

$K_0$  Barwert [€]  
 $K_n$  Nominalbetrag der Ein- oder Auszahlung [€]  
 $q^{-n}$  Abzinsungsfaktor [-]

$$q^{-n} = \frac{1}{(1+i)^n} \quad [-] \quad (8.2)$$

$i$  Zinssatz [%]

### Kalkulationszinssatz

Als Kalkulationszinssatz wird jener Zinssatz bezeichnet, der für die Auf- oder Abzinsung aller Auszahlungen und Einzahlungen gewählt wird. (Lücke 1991, S. 424)

Für die nachfolgende Kostenbetrachtung wird das Jahr 0 als Jahr der Investition sowie als Bezugszeitpunkt festgelegt. Im Jahr 0 fallen noch keine Instandhaltungs-, Entstörungs- oder Betriebskosten an.

Der Betrachtungszeitraum beträgt 50 Jahre. Dadurch kommt es im Jahr 40 zu einer Reinvestition der Kabelanlage (Abb. 8.1). Um den Restwert der Anlage zu berücksichtigen, wird dieser im Jahr 50 als „Einzahlung“ in die Barwertermittlung aufgenommen.

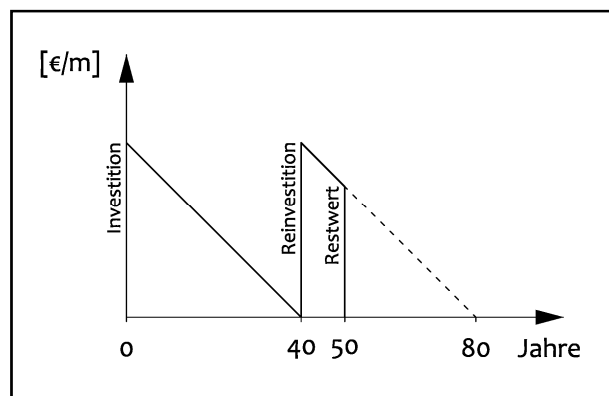


Abb. 8.1: Schema der Restwertermittlung bei einer Nutzungsdauer von 40 Jahren

Der kalkulatorische Zinssatz wird mit 6 Prozent angenommen. Wie bereits in Kap. 4.10.3 besprochen, wird die Kabelnutzungsdauer mit 40 Jahren angesetzt. (Eine Variation der Nutzungsdauer sowie deren Auswirkung wird in Kap. 9.1 betrachtet.)

Da für das Störungsverhalten der Kabel im letzten Lebensabschnitt (30. – 40. Jahr) keine Erfahrungswerte für die Störungshäufigkeit vorliegen, wird in dieser Diplomarbeit eine Steigerung von 10 % (aufgeteilt auf 10 Jahre) angenommen.

## 8.2. Gegenüberstellung der Kapitalwerte

Die Gegenüberstellung der Barwerte in Tab. 8.1 macht die Dominanz der Investitionskosten sichtbar (Abb. 8.2). Bei den betrachteten Varianten betragen die Investitionskosten zwischen 88 und 98 % der Gesamtkosten.

Tab. 8.1: Aufstellung der ermittelten Kapitalwerte

Kapitalwerte der betrachteten Varianten	Var. 1	Var. 1A-OK-MR	Var. 1B-OK-OR	Var. 2	Einheit
	Direkte Erdverlegung	Erdverlegung, ohne Kühlung, mit Rohren	Erdverlegung, ohne Kühlung, ohne Rohre	Verlegung im Schutzrohr	
Investitionskosten	5959,98	5765,41	5659,76	6213,19	[€/m]
Instandhaltungskosten	173,45	12,96	12,96	12,96	
Entstörungskosten	5,99	5,99	5,99	5,99	
Betriebskosten	623,56	79,03	79,03	75,40	
<b>Kapitalwerte</b>	<b>6762,97</b>	<b>5863,38</b>	<b>5757,73</b>	<b>6307,54</b>	
Kapitalwerte der betrachteten Varianten	Var. 3	Var. 3A-G	Var. 4	Var. 5	Einheit
	Tunnel - oberflächennah - Fertigteil	Gewölbetunnel - oberflächennah	Tunnel - Rohrvortrieb	Tunnel - bergmännischer Vortrieb	
Investitionskosten	7784,46	6150,07	7949,18	10186,75	[€/m]
Instandhaltungskosten	93,20	93,20	93,20	93,20	
Entstörungskosten	3,10	3,10	3,10	3,10	
Betriebskosten	666,92	665,51	668,37	668,37	
<b>Kapitalwerte</b>	<b>8547,70</b>	<b>6911,89</b>	<b>8713,85</b>	<b>10951,42</b>	

Es lässt sich daher die Aussage treffen, dass die Investitionskosten als Grundlage für den Systemscheid eine hohe Relevanz besitzen.

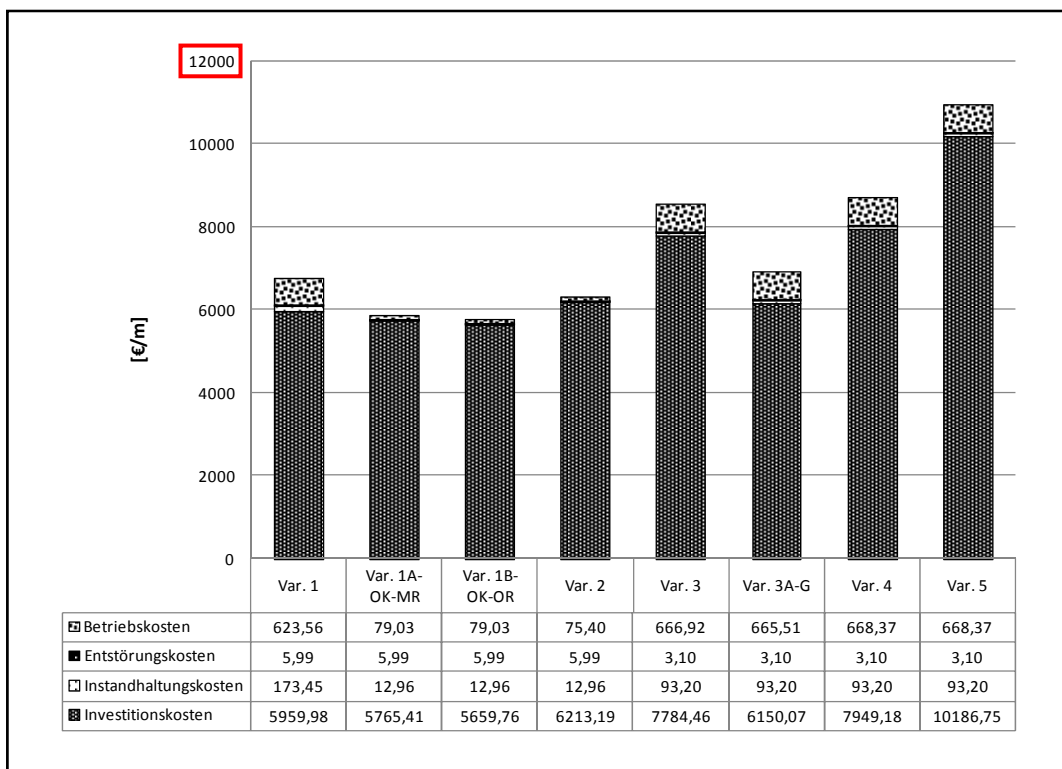


Abb. 8.2: Barwerte der Ausgaben - alle Varianten

Unter Vernachlässigung der Varianten 1A und 1B, verändert sich die Reihung der Varianten im Vergleich zur reinen Kostengegenüberstellung aus Abb. 7.15:

1. Variante 2
2. Variante 1
3. Variante 3A

Dies wird bedingt durch den Umstand, dass bei Variante 2 auf die Kühlung der Kabel verzichtet wird und daher die Instandhaltungskosten auf ein Minimum sinken. In Abb. 8.3 werden die Instandhaltungskosten der untersuchten Varianten einander gegenübergestellt. Dabei ist im Vergleich zu den Investitionskosten zwingend auf die Skalierung zu achten! (Faktor 30)

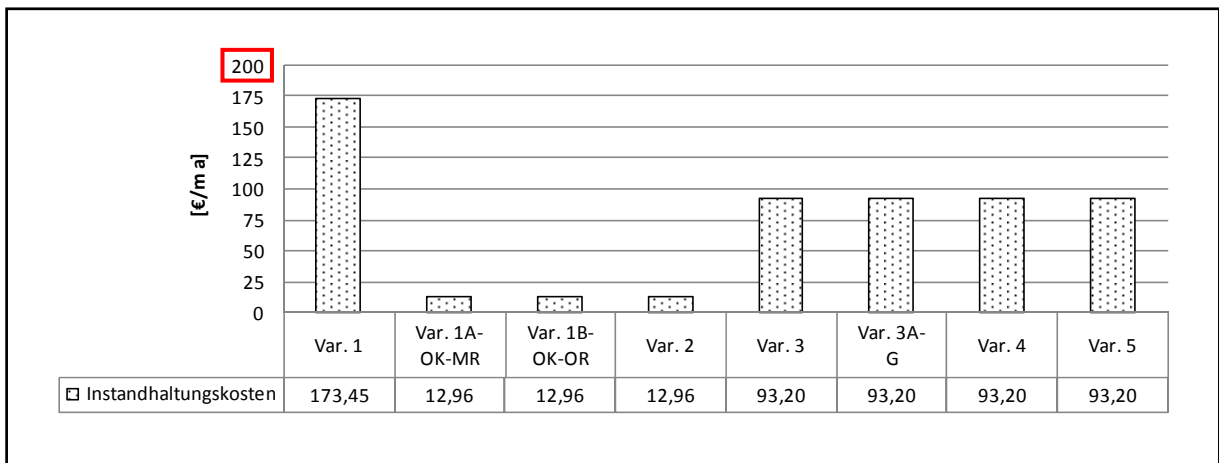


Abb. 8.3: Barwerte der Instandhaltungskosten

Aus Abb. 8.3 ist ersichtlich, dass die Variante 1 (Erdverlegung mit indirekter Kühlung) die höchsten Instandhaltungskosten aufweist. Dies wird bedingt durch den Umstand, dass zur Kühlung ein umfangreicheres Kühlsystem notwendig ist als bei der Kühlung der Kabel im Tunnel mittels Lüfter (Var. 3 – 5). Bei den Varianten 1A, 1B und 2 wird auf eine Kühlung verzichtet.

In Abb. 8.4 werden die Barwerte der Entstörungskosten gegenübergestellt. Dabei wird der Umstand abgebildet, dass die erdverlegten Varianten (Var. 1 – 2) aufgrund der möglichen Beschädigung durch Dritte stärker gefährdet sind als im Tunnel verlegte Kabel (siehe auch Kap. 7.3). Die Größenordnung der Entstörungskosten im Vergleich zu den Investitions- und Instandhaltungskosten ist auch hier zu berücksichtigen!

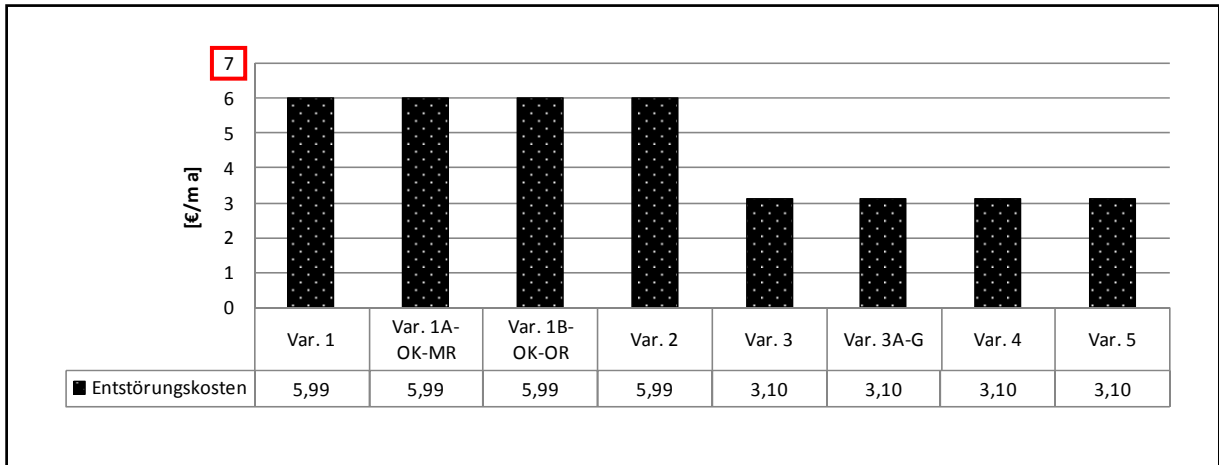


Abb. 8.4: Barwerte der Entstörungskosten

In Abb. 8.5 werden die Betriebskosten gegenübergestellt. Auch in diesem Bereich zeichnet sich der Einfluss der Kühlanlage ab. Die Kosten der gekühlten Varianten (Var. 1, sowie Var. 3 – 5) liegen in der selben Größenordnung, da mangels konkreter Angaben die Betriebskosten im gleichen Umfang angenommen wurden. (siehe auch Kap. 7.4)

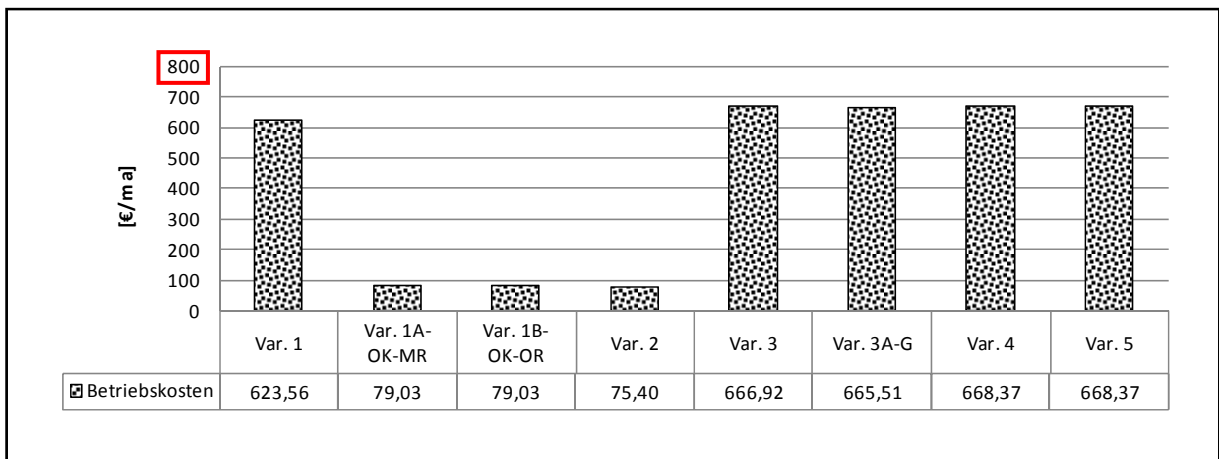


Abb. 8.5: Barwerte der Betriebskosten

### 8.3. Gegenüberstellung der Kapitalwerte bezogen auf die Übertragungsleistung

Abschließend wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die Übertragungsleistung der Kabelanlage von der Art der Verlegung abhängt. Daher werden die Kapitalwerte im nächsten Schritt auf die Übertragungsleistung (TWh) des Betrachtungszeitraumes umgelegt.

Die Berechnung erfolgt für eine Auslastung der Leitung von 70 %. Demnach wird ein Belastungsgrad von  $m = 0,70$  angesetzt<sup>61</sup> (siehe dazu Kap. 4.4.6). In Tab. 8.2 wird, basierend auf der Ermittlung des Höchstnennstromes aus Tab. 7.20, die Übertragungsleistung der Kabel,

<sup>61</sup> Die Umlage der Barwerte für einem Belastungsgrad von  $m = 1,0$  ergibt geringere Kosten pro TWh, an der Reihung der Varianten ändert dies nichts.

bezogen auf die Varianten der Verlegung, ermittelt. Dabei sei angemerkt, dass es sich bei den Angaben zum Höchstnennstrom und damit auch zur Übertragungsleistung um eine Abschätzung auf Basis von Herstellerangaben (ABB) handelt.

Tab. 8.2: Aufstellung der Übertragungsleistung

Kapitalwerte der betrachteten Varianten bezogen auf die Übertragungsleistung	Var. 1	Var. 1A-OK-MR	Var. 1B-OK-OR	Var. 2	Einheit
	Direkte Erdverlegung	Erdverlegung, ohne Kühlung, mit Rohren	Erdverlegung, ohne Kühlung, ohne Rohre	Verlegung im Schutzrohr	
Investitionskosten	5.959,98	5.765,41	5.659,76	6.213,19	[€/m]
Instandhaltungskosten	173,45	12,96	12,96	12,96	
Entstörungskosten	5,99	5,99	5,99	5,99	
Betriebskosten	623,56	79,03	79,03	75,40	
<b>Kapitalwert</b>	<b>6.762,97</b>	<b>5.863,38</b>	<b>5.757,73</b>	<b>6.307,54</b>	
Übertragungsleistung pro Jahr bei m = 1,00	35.653,64	22.283,03	22.283,03	20.054,55	[GWh/a]
Übertragungsleistung in 50 Jahren	1.782.681,96	1.114.151,35	1.114.151,35	1.002.727,60	[GWh]
Bezogener Kapitalwert	3,79	5,26	5,17	6,29	[€/m TWh]
Übertragungsleistung pro Jahr bei m = 0,70	24.957,55	15.598,12	15.598,12	14.038,19	[GWh/a]
Übertragungsleistung in 50 Jahren	1.247.877,37	779.905,94	779.905,94	701.909,32	[GWh]
<b>Bezogener Kapitalwert</b>	<b>5,42</b>	<b>7,52</b>	<b>7,38</b>	<b>8,99</b>	<b>[€/m TWh]</b>
Kapitalwerte der betrachteten Varianten bezogen auf die Übertragungsleistung	Var. 3	Var. 3A-G	Var. 4	Var. 5	Einheit
	Tunnel-oberflächennah - Fertigteil	Gewölbetunnel-oberflächennah	Tunnel-Rohrvortrieb	Tunnel-bergmännischer Vortrieb	
Investitionskosten	7.784,46	6.150,07	7.949,18	10.186,75	[€/m]
Instandhaltungskosten	93,20	93,20	93,20	93,20	
Entstörungskosten	3,10	3,10	3,10	3,10	
Betriebskosten	666,92	665,51	668,37	668,37	
<b>Kapitalwert</b>	<b>8.547,70</b>	<b>6.911,89</b>	<b>8.713,85</b>	<b>10.951,42</b>	
Übertragungsleistung pro Jahr bei m = 1,00	29.695,70	29.070,50	30.320,90	30.320,90	[GWh/a]
Übertragungsleistung in 50 Jahren	1.484.785,18	1.453.525,24	1.516.045,10	1.516.045,10	[GWh]
Bezogener Kapitalwert	5,76	4,76	5,75	7,22	[€/m TWh]
Übertragungsleistung pro Jahr bei m = 0,70	20.786,99	20.349,35	21.224,63	21.224,63	[GWh/a]
Übertragungsleistung in 50 Jahren	1.039.349,63	1.017.467,67	1.061.231,57	1.061.231,57	[GWh]
<b>Bezogener Kapitalwert</b>	<b>8,22</b>	<b>6,79</b>	<b>8,21</b>	<b>10,32</b>	<b>[€/m TWh]</b>

Wie schon in Kap. 7.4.1 angesprochen, wurde bei Variante 1 eine Steigerung der Übertragungsleistung von 60 % durch Zwangskühlung (Weigl 2009, S. 11) angenommen. Bei der Verlegung im Tunnel (Var. 3 – 5) wurde eine Steigerung um 30 % angesetzt (Brakelmann 1996, S. 1780).

Unter Berücksichtigung der Übertragungsleistung ergibt sich eine veränderte Reihung gegenüber der reinen Kapitalwertbetrachtung aus Abb. 8.2 (Die Varianten 1A und 1B werden wiederum nicht betrachtet):

1. Variante 1
2. Variante 3A
3. Variante 3 bzw. Variante 4

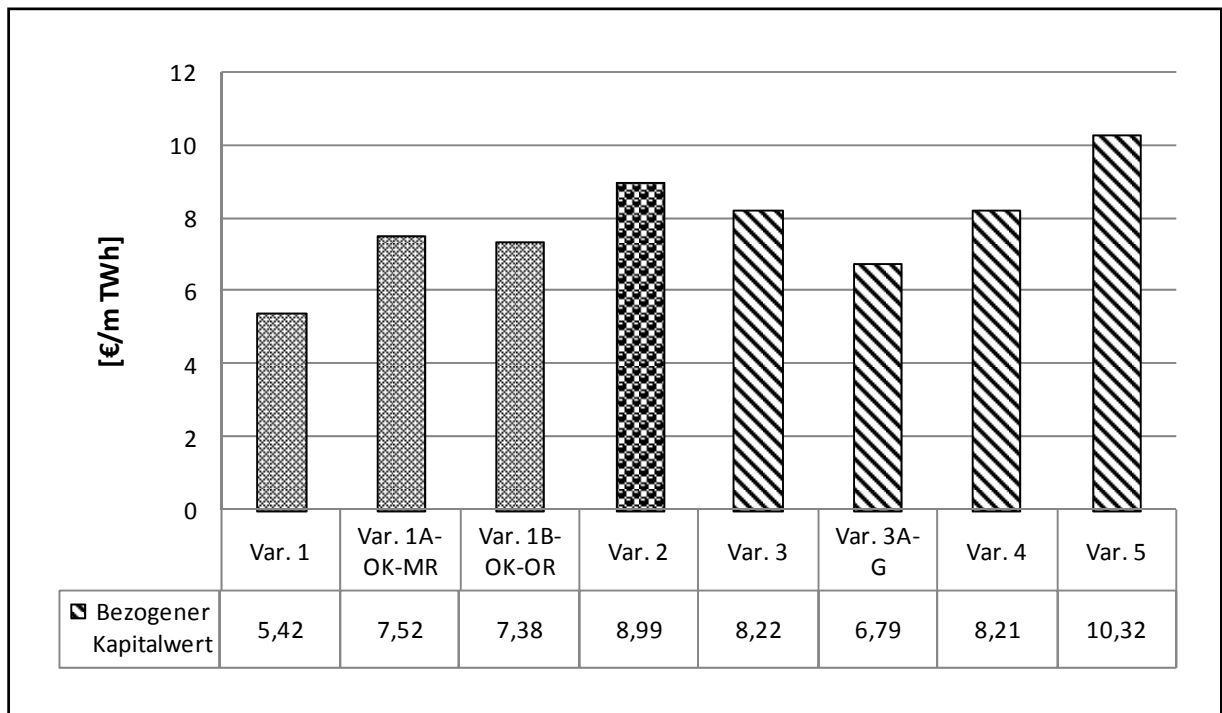


Abb. 8.6: Darstellung der Kapitalwerte bezogen auf die Übertragungsleistung im Betrachtungszeitraum

Die geringsten Kosten weist Variante 1 mit 5,42 €/m TWh auf. Bei Kosten von 6,79 €/m TWh liegt Variante 3A (Verlegung der Kabel im Gewölbetunnel) um 25 % höher als Var. 1.

Aus Abb. 8.6 wird ersichtlich, dass durch die geringe Übertragungsleistung von Variante 2 die bezogenen Kosten deutlich höher ausfallen als bei Variante 1. Das selbe gilt für die Varianten 1A und 1B, welche nachfolgend näher betrachtet werden.

#### 8.4. Exkurs zur Variante 1: Leerrohre - ja oder nein?

Bereits im Jahr 1979 wurden von Seiten der Wienstrom bei der 380-kV-Südeinspeisung Leerrohre für eine spätere Kühlung der Leitung vorgesehen (Oppermann & Wenzel 1979). Dies hat sich 30 Jahre später als weise Entscheidung herausgestellt. Durch Anordnung einer Kühleinrichtung sowie Verwendung der bereits verlegten Leerrohre wurde eine Leistungssteigerung erzielt, welche eine Neuerrichtung der Kabelverbindung erst in 20 Jahren erforderlich macht. (Weigl 2009) Trotzdem überlegen laut Weigl (2010) viele Netzbetreiber, ob sie überhaupt Leerrohre verlegen sollen. Diese Frage soll nachfolgend beantwortet werden.



Wie bereits unter Kap. 7.1.4 beschrieben, werden bei der Errichtung der Kabelanlage in Variante 1A Leerrohre mitverlegt. Im Gegensatz dazu werden in Variante 1B keine Leerrohre vorgesehen.

Tab. 8.3: Auszug - Investitionskosten der Varianten 1, 1A und 1B

Investitionskosten	Var. 1	Var. 1A-OK-MR	Var. 1B-OK-OR	Einheit
	Direkte Erdverlegung	Erdverlegung, ohne Kühlung, mit Rohren	Erdverlegung, ohne Kühlung, ohne Rohre	
Planung, Entschädigung, Abwicklung	561,20	561,20	561,20	[€/m]
Elektrotechnische Ausrüstung	3752,46	3752,46	3752,46	
Bautechnik	1350,40	1150,40	1050,40	
<b>Summe</b>	<b>5664,06</b>	<b>5464,06</b>	<b>5364,06</b>	

Wie aus Tab. 8.3 ersichtlich, unterscheiden sich die drei Varianten nur durch die Kosten im Bereich der Bautechnik. (Die genaue Aufstellung der Kosten findet im Anhang statt.)

Tab. 8.4: Auszug - Kapitalwerte der Varianten 1, 1A und 1B

Aufstellung der Barwerte	Var. 1	Var. 1A-OK-MR	Var. 1B-OK-OR	Einheit
	Direkte Erdverlegung	Erdverlegung, ohne Kühlung, mit Rohren	Erdverlegung, ohne Kühlung, ohne Rohre	
Investitionskosten	5959,98	5765,41	5659,76	[€/m]
Instandhaltungskosten	173,45	12,96	12,96	
Entstörungskosten	5,99	5,99	5,99	
Betriebskosten	623,56	79,03	79,03	
<b>Kapitalwert</b>	<b>6762,97</b>	<b>5863,38</b>	<b>5757,73</b>	

Wird auf die Legung von Kühlrohren verzichtet (Vergleich Var. 1A mit Var. 1B), so entsteht bei Betrachtung der Barwerte eine Kostenersparnis von 1,8 %.

Die Frage „Leerrohre - ja oder nein?“, kann, basierend auf dem geringen Kostenunterschied, eindeutig mit „ja“ beantwortet werden. Es wird daher jedem Netzbetreiber nahegelegt, bei der Verlegung der Kabel in Erde, Leerrohre für einen späteren Einsatz einer Kühlanlage vorzusehen. Diese Aussage deckt sich auch mit der Aussage von Weigl (2010) welcher vorschlägt, die Leerrohre mit Wasser statt mit Gas zu füllen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, durch Anordnung und Betrieb von Pumpen (keine Kühlung, nur Umwälzung) Hot Spots entlang der Leitung zu entschärfen.

## 9. Sensitivitätsanalyse

Mittels Sensitivitätsanalyse sollen die Einflussparameter auf die Kosten ermittelt werden. Ursprünglich war geplant, den Einfluss des kalkulatorischen Zinssatzes sowie die Störungshäufigkeit zu untersuchen. Da die Investitionskosten aller betrachteten Varianten im Vergleich zu den Gesamtkosten dominieren (siehe Abb. 8.2) und in voller Höhe bereits im Jahr 0 anfallen, stellt sich eine Variation des kalkulatorischen Zinssatzes als nicht sinnvoll heraus.

Die Variation der Störungshäufigkeit wird nicht näher untersucht, da die Entstörungskosten einen Anteil von maximal 0,1 % der Gesamtkosten (siehe Tab. 8.1) einnehmen. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass es durch eine Variation zu keiner Änderung der Variantenreihung kommt.

Da die von Seiten der Hersteller erwartete Lebensdauer der Kabel in der Praxis noch nicht erreicht wurde, wird im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersucht, welche monetären Auswirkungen durch eine kürzere bzw. längere Lebensdauer zu erwarten sind.

Weiters wird betrachtet, wie hoch ein etwaiger Erlösentgang bei Verlegung der Kabel in Erde ausfallen müsste, um die Realisierung eines Kabeltunnels aus rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu rechtfertigen.

### 9.1. Einfluss der Kabellebensdauer auf die Kosten

Basierend auf der erwarteten Kabellebensdauer von 40 Jahren wird untersucht, wie sich eine verkürzte Lebensdauer von 30 oder sogar nur 20 Jahren auf die Kosten der Kabelanlage auswirkt. Auf der anderen Seite wird auch die Möglichkeit einer längeren Lebensdauer (50 Jahre) in Betracht gezogen.

Zur Berechnung der Kapitalwerte erfolgt die Ermittlung der Restwerte nach dem in Abb. 9.1 gezeigten Schema.

Der Ermittlung der Restwerte liegt die Annahme eines linearen Wertverlustes zugrunde. Die Reinvestition wird (abhängig von der Art der Variante) in annähernd gleicher Höhe wie die Erstinvestition angesetzt. Details können den im Anhang beigefügten Kalkulationsblättern entnommen werden.

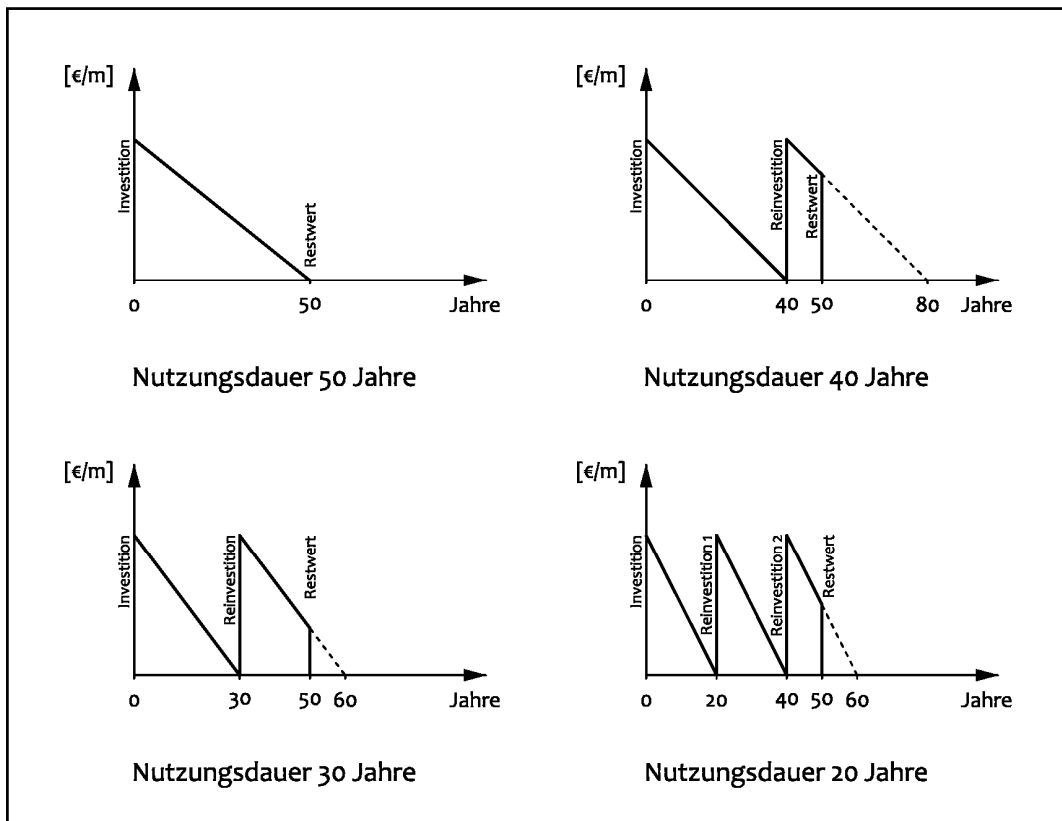


Abb. 9.1: Schema der Restwertermittlung bei unterschiedlichen Nutzungsdauern

In Tab. 9.1 werden die errechneten Kapitalwerte, bezogen auf die Übertragungsleistung aufgelistet. Dabei ist ersichtlich, dass bei fallender Lebensdauer die Kosten ansteigen und umgekehrt.

Tab. 9.1: Gegenüberstellung der Kapitalwerte bei verschiedenen Kabellebensdauern

Kabellebensdauer in Jahren	Var. 1	Var. 1A-OK-MR	Var. 1B-OK-OR	Var. 2	Einheit
	Direkte Erdverlegung	Erdverlegung, ohne Kühlung, mit Rohren	Erdverlegung, ohne Kühlung, ohne Rohre	Verlegung im Schutzrohr	
20	6,54	9,31	9,13	10,77	[€/m TWh]
30	5,76	8,06	7,91	9,53	
40	5,42	7,52	7,38	8,99	
50	5,18	7,13	7,00	8,53	
Kabellebensdauer in Jahren	Var. 3	Var. 3A	Var. 4	Var. 5	Einheit
	Tunnel - oberflächennah - Fertigteil	Gewölbetunnel - oberflächennah	Tunnel - Rohrvortrieb	Tunnel - bergmännischer Vortrieb	
20	9,41	8,00	9,37	11,48	[€/m TWh]
30	8,59	7,16	8,57	10,67	
40	8,22	6,79	8,21	10,32	
50	7,97	6,53	7,96	10,07	

Nachfolgend werden jene Varianten graphisch dargestellt und verglichen, welche sich bei der Betrachtung der Kapitalwerte (bezogen auf die Übertragungsleistung, Kap. 8.3) als die kostengünstigsten herausgestellt haben.

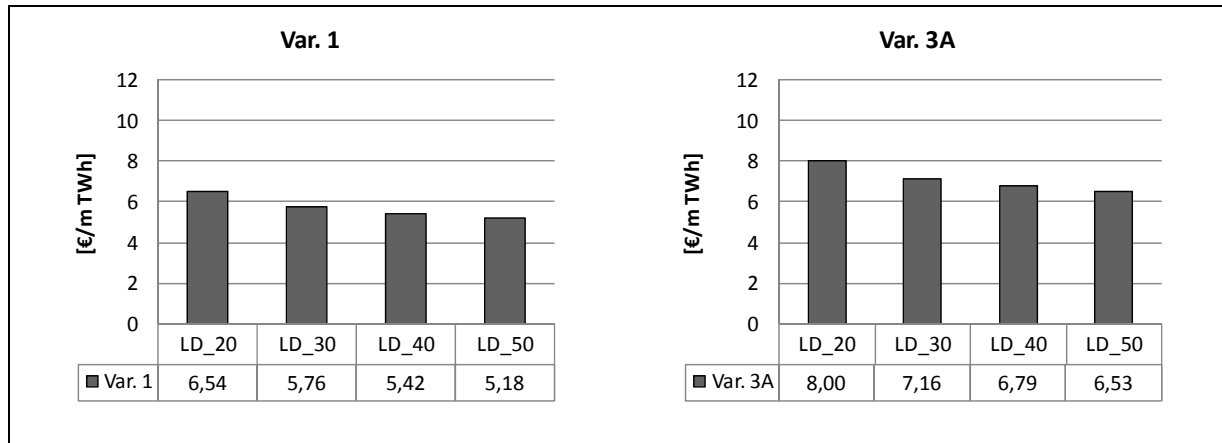


Abb. 9.2: Kapitalwerte der Varianten 1 und 3A unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kabellebensdauern

Aus Tab. 9.2 ist ersichtlich, dass sich eine verkürzte Lebensdauer von 20 Jahren bei Realisierung der Variante 1 mit einer Erhöhung der Kosten um 21 % abzeichnet. Variante 3A reagiert auf die selbe Verkürzung der Lebensdauer mit einer Erhöhung um 18 %.

Tab. 9.2: Veränderung der Kapitalwerte ausgedrückt in Prozent

Kabellebensdauer in Jahren	Var. 1	Var. 1A-OK-MR	Var. 1B-OK-OR	Var. 2	Einheit
	Direkte Erdverlegung	Erdverlegung, ohne Kühlung, mit Rohren	Erdverlegung, ohne Kühlung, ohne Rohre	Verlegung im Schutzrohr	
20	121	124	124	120	[%]
30	106	107	107	106	
40	100	100	100	100	
50	96	95	95	95	
Kabellebensdauer in Jahren	Var. 3	Var. 3A-G	Var. 4	Var. 5	Einheit
	Tunnel - oberflächennah - Fertigteil	Gewölbetunnel - oberflächennah	Tunnel - Rohrvortrieb	Tunnel - bergmännischer Vortrieb	
20	114	118	114	111	[%]
30	104	105	104	103	
40	100	100	100	100	
50	97	96	97	98	

Dieser „geringe“ Kostenvorteil von 3 % der Variante 3A gegenüber Variante 1 basiert auf dem Umstand, dass bei der Betrachtung der Kosten Auswirkungen durch etwaige Erlösentgänge nicht berücksichtigt wurden. Der Vorteil der kürzeren Reparaturdauer bei Verlegung der Kabel im Tunnel wird somit in dieser Betrachtung nicht abgebildet.

## 9.2. Einfluss des Erlösentganges auf die Variantenreihung

In diesem Kapitel wird die Schadenssumme durch Erlösentgang ermittelt, bei welcher sich die Reihung aus Kap. 8.3 ändert.

Zu diesem Zweck wird der Kategorie Entstörungskosten der Unterpunkt Erlösentgang hinzugefügt. (Tab. 12.57) Als Schadensart wird ein Kabelschaden (großer Schaden) angenommen. Die Schadenshäufigkeit für den Erlösentgang wird entsprechend der Schadenshäufigkeit für den Kabelschaden angenommen.

### Untersuchung der Kapitalwerte

Bei der Untersuchung der Kapitalwerte stellt sich heraus, dass bei einem Erlösentgang von 7.051.320 € die Reihung kippt (siehe Abb. 9.3). Ab diesem Betrag ist die Verlegung im Gewölbetunnel (Var. 3A) vorteilhafter als die Verlegung in Erde (Var. 1).

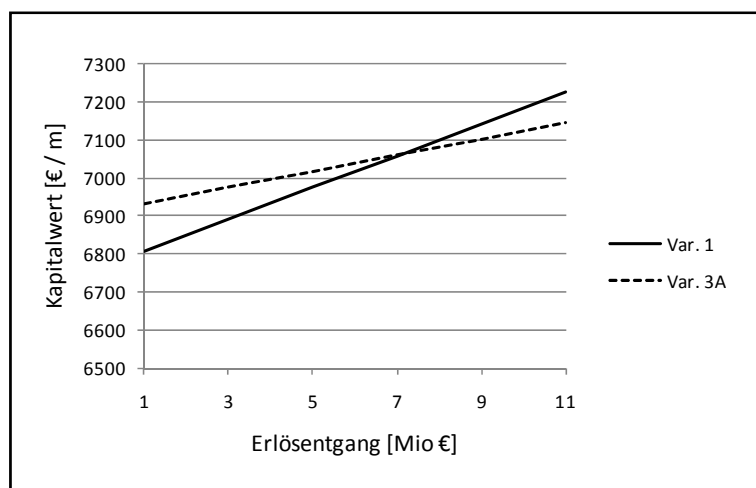


Abb. 9.3: Kapitalwertentwicklung bei Variation des Erlösentganges

Zur Abgrenzung wird untersucht, ab welchem Erlösentgang Variante 3 vorteilhafter wird als Variante 1. Dies ist bei einem Erlösentgang von 78.148.134 € der Fall<sup>62</sup>. (Tab. 12.58)

### Untersuchung der Kapitalwerte bezogen auf die Übertragungsleistung

Wird die selbe Untersuchung unter Berücksichtigung der Übertragungsleistung durchgeführt, so ergibt sich ein verändertes Bild. Die Reihung kippt bei einem Erlösentgang von 104.918.260 €<sup>62</sup>.

<sup>62</sup> Zum Vergleich: Der Kapitalwert einer 10 km langen 2 systemigen Leitung bei direkter Erdverlegung beträgt 67,6 Mio Euro.

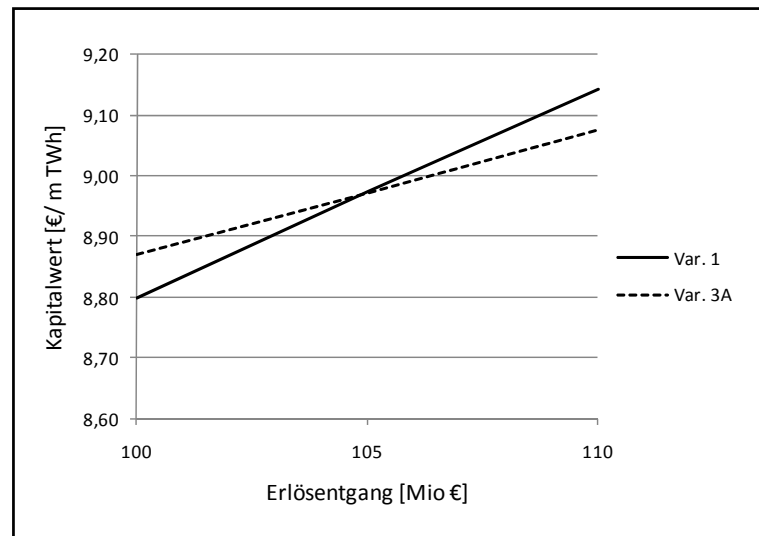


Abb. 9.4: Kapitalwertentwicklung bei Variation des Erlösentganges unter Berücksichtigung der Übertragungsleistung

Dieser Umstand ergibt sich durch die unterschiedliche Übertragungsleistung der beiden Varianten. Die Übertragungsleistung der Var. 1 liegt um 22,7 % höher als bei Var. 3A.

Auch ohne genaue Kenntnis des tatsächlichen Erlösentganges einer Leitung kann die Aussage getroffen werden, dass sich die Realisierung einer Tunnellösung aus rein wirtschaftlicher Sicht nicht rechnet.

## 10. Argumente zur Systemauswahl

In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedene Möglichkeiten der Verlegung von Kabeln aufgezeigt und untersucht. An dieser Stelle ist der Hinweis notwendig, dass diese Varianten nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden können. Die Einsatzbereiche differieren sehr stark.

### 10.1. Einsatzbereich der unterschiedlichen Varianten

Die in Kap. 6 und 7.1 beschriebenen Arten der Verlegung können in vier Kategorien unterteilt werden.

- Direkte Erdverlegung
- Verlegung im Schutzrohr
- Verlegung im oberflächennahen Tunnel
- Verlegung im tiefen Tunnel

Die direkte Verlegung wird bevorzugt im freien Feld angewendet. Um den Kostenvorteil ausspielen zu können (Sicherung der Baugrube mittels Böschung), muss ausreichend Platz vorhanden sein. Diesen benötigt auch die Verlegung im oberflächennahen Tunnel. Wobei der Bereich über dem Bauwerk jedoch mit anderen Leitungen belegt werden darf. Die Linienführung muss sich durch die Nähe zur Oberfläche an den örtlichen Gegebenheiten orientieren.

Bei Querungen wird die Verlegung im Schutzrohr angewendet. Schutzrohre kommen auch in Bereichen zum Einsatz, in denen die Kabel besonders gefährdet sind. Durch die schlechte Wärmeabfuhr wird diese Variante nur für kurze Abschnitte angeordnet. Die Verlegung im tiefliegenden Tunnel kommt im dicht verbauten, städtischen Gebiet zur Anwendung. Dabei kann, bedingt durch die große Verlegetiefe, unabhängig von den Gegebenheiten an der Oberfläche, eine kurze Verbindung realisiert werden. Die Anordnung eines tiefliegenden Tunnels kann auch durch die vorherrschende Geologie erforderlich werden. Zu beachten ist, dass beim tiefliegenden Tunnel die wirtschaftliche Mindestlänge nicht unterschritten werden soll (siehe Kap. 6.3.3).

Die betrachteten Verlegearten können grundsätzlich untereinander kombiniert werden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass bei der Verbindung von Varianten unterschiedlicher Tiefenlage aufwendige Übergangsbauwerke (Schächte) notwendig werden können.

### 10.2. Auswahlkriterien

#### 10.2.1. Relevanz der Leitung

Als Hauptauswahlkriterium kann die Relevanz der Leitung genannt werden. Bei Leitungen von großer Wichtigkeit kann durch die Anordnung der Kabel im Tunnel die Verfügbarkeit durch kürzere Reparaturdauern erhöht, und somit die Erlösentgänge minimiert werden. Im

vermaschten Netz besteht die Möglichkeit, den Strom über eine andere Leitung zu transportieren. Dann kann die Leitung bei gegebenen Platzverhältnissen direkt in Erde verlegt werden.

### **10.2.2. Trassenlänge**

Wie bereits unter Kap. 10.1 erwähnt, spielen die Platzverhältnisse im Bereich der Trasse eine bedeutende Rolle für die Systemauswahl. Oberflächennahe Bauwerke müssen sich in der Linienführung an gegebenen öffentlichen Flächen wie z.B. Straßenzügen orientieren. Dadurch verlängern sich die Trassen im Vergleich zu tiefliegenden Bauwerken. Bei konkreten Projekten werden meist Varianten unterschiedlicher Trassenlänge gegenübergestellt. In diesen Fällen kann eine vermeintlich teure, aber kurze Variante in Konkurrenz zu einer günstigen, langen Variante treten. Der Kostenvergleich in Euro pro Meter aus Kapitel 8 berücksichtigt dies verständlicherweise nicht.

### **10.2.3. Übertragungsleistung**

Da die Kapazität der verschiedenen Varianten unterschiedlich ist, stellt die übertragbare Leistung ein wichtiges Kriterium dar. In diesem Zusammenhang werden auch die Möglichkeiten zur Belastungssteigerung relevant.

### **10.2.4. Querungssituationen**

Querungssituationen können Auswirkung auf die Wahl der Verlegungsart haben, wenn in einem Abschnitt mehrere Querungen hintereinander erfolgen sollen. Abhängig von der Länge kann die Realisierung eines Kabeltunnels sinnvoll werden, da häufige Systemwechsel zu Kostensteigerungen führen können.

### **10.2.5. Auswirkungen auf die Umwelt**

Die betrachteten Varianten weisen Unterschiede bei der Beeinträchtigung der Umwelt auf. Durch die offene Bauweise fallen bei der oberflächennahen Verlegung große Mengen an Aushub an. Bei beengten Platzverhältnissen kann die notwendige Verfuhr des Aushubes zu erhöhtem Verkehrsaufkommen führen. Grabenlose Bauverfahren weisen dagegen nur punktuelle Beeinträchtigungen an der Ein- und Austrittsstelle auf.

Die Querung von Waldstücken bleibt auch bei der Verlegung von Kabeln nicht unbemerkt. Da der Bewuchs auf einer direkt in Erde verlegten Leitung beschränkt werden muss, wird eine Schneise sichtbar. Durch Anordnung eines Tunnelbauwerkes mit ausreichender Erdüberdeckung kann dies verhindert werden.



## 11. Ausblick

Am Sektor der Energietechnik wird es Weiterentwicklungen bei VPE-Kabeln geben, welche auf die Fertigung größerer Längen (inkl. Lösung des Transportproblems) abzielen (Nkt 2009). Damit wird gleichzeitig die Fehlerhäufigkeit gesenkt, da die Anzahl der Muffen reduziert wird.

Parallel dazu wird am Gebiet der Gasisolierten Leiter (GIL) sowie bei den Supraleitern geforscht. Diese zwei Technologien besitzen das Potenzial, in ferner Zukunft die VPE-Kabel abzulösen. So ist denkbar, dass zum Zeitpunkt der Reinvestition der Kabelanlage über diese Technologien diskutiert wird.

Betrachtet man den Bereich der Bautechnik, so besteht die Möglichkeit der Nutzung vorhandener Infrastruktur. Dabei sind in erster Linie Straßen- und Bahntunnels angesprochen, welche neuralgische Punkte verbinden. Interessante Fragestellungen ergeben sich dabei im Bereich der technischen Ausführung in Hinblick auf Querschnittsgestaltung (Platzverhältnisse), Anordnung der Kabel, Wärmeabfuhr und Brandschutzmaßnahmen. Auf der anderen Seite besteht die Möglichkeit der Mitführung von Telekommunikationsleitungen oder der abschnittsweisen Mitführung anderer Medien im Höchstspannungskabeltunnel.

Aus wirtschaftlicher Sicht werfen beide Möglichkeiten interessante Fragestellungen auf.

## 12. Anhang

### 12.1. Kostenaufstellung

#### 12.1.1. Investitionskosten der betrachteten Varianten

Tab. 12.1: Investitionskosten der Variante 1

Variante 1									
INVESTITIONSKOSTEN					Direkte Erdverlegung				
Bezeichnung:	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter [€/m]	Kosten pro Systemmeter [€/m]	Kosten der Investition (2-Systeme) [€/m]	Nutzungs- dauer [a]	Kosten der Reinvestition im Jahr 40 [€/m]	Restwert im Jahr 50 [€/m]	
Planung, Entschädigung, Abwicklung									
Planung - Trassierung					70,00				
Entgelt - Dienstbarkeiten					241,20				
Umweltschutz - Ausgleichsmaßnahmen					200,00	40	200,00		
Projektentwicklung					35,00	40	35,00		
Bauaufsicht					15,00	40	15,00		
<b>Zwischensumme:</b>					<b>561,20</b>		<b>250,00</b>		
Elektrotechnische Ausrüstung									
Kabel			500,00	1500,00	3000,00	40	3000,00	2250,00	
Kabelverlegung			15,00	45,00	90,00	40	90,00	67,50	
CB-Muffen	0,0012	42000		50,40	100,80	40	100,80	75,60	
Überspannungsableiter	0,0012	8000		9,60	19,20	40	19,20	14,40	
CB-Anlagen	0,0004	5000		2,00	4,00	40	4,00	3,00	
VB-Muffen	0,0024	40000		96,00	192,00	40	192,00	144,00	
Enderschlüsse	0,0006	70000		42,00	84,00	40	84,00	63,00	
Kompensationsanlage				76,23	152,46	40	152,46	114,35	
Monitoringsystem					90,00	40	90,00	67,50	
Inbetriebnahmeprüfung				10,00	20,00	40	20,00	15,00	
<b>Zwischensumme:</b>					<b>3752,46</b>		<b>3752,46</b>	<b>2814,35</b>	
Bautechnik									
Kabelgraben - OBW/Böschung, inkl. TSB					200,00	40	200,00	150,00	
Muffenbauwerk	0,0012	42000			50,40	40	50,40	37,80	
Kühlrohre aus PE				50,00	100,00	40	100,00	75,00	
Kühleinrichtung - indirekte Kühlung					200,00	20	*	100,00	
Übergangsbauelemente	0,0004	2000000			800,00	40	800,00	600,00	
<b>Zwischensumme:</b>					<b>1350,40</b>		<b>1150,40</b>	<b>962,80</b>	
<b>Gesamtsumme INVESTITIONSKOSTEN:</b>					<b>5664,06</b>				
<b>Gesamtsumme Reinvestitionskosten</b>							<b>5152,86</b>		
<b>Gesamtsumme Restwert</b>								<b>3777,15</b>	

\* die Reinvestition der Kühlanlage wird unter den Instandhaltungskosten angeführt

Tab. 12.2: Investitionskosten der Variante 1A

Variante 1A - OK - MR									
Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - mit Kühlrohren									
INVESTITIONSKOSTEN									
Bezeichnung:	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter		Kosten pro Systemmeter [€/m]	Kosten der Investition (2 Systeme) [€/m]	Nutzungs-dauer [a]	Kosten der Reinvestition im Jahr 40 [€/m]	Restwert im Jahr 50 [€/m]
			[€/m]	[€/m]					
Planung, Entschädigung, Abwicklung									
Planung - Trassierung						70,00			
Entgelt - Dienstbarkeiten						241,20			
Umweltschutz - Ausgleichsmaßnahmen						200,00	40	200,00	
Projektentwicklung						35,00	40	35,00	
Baufaufsicht						15,00	40	15,00	
<b>Zwischensumme:</b>						<b>561,20</b>		<b>250,00</b>	
Elektrotechnische Ausrüstung									
Kabel				500,00	1500,00	3000,00	40	3000,00	2250,00
Kabelverlegung				15,00	45,00	90,00	40	90,00	67,50
CB-Muffen	0,0012	42000			50,40	100,80	40	100,80	75,60
Überspannungsableiter	0,0012	8000			9,60	19,20	40	19,20	14,40
CB-Anlagen	0,0004	5000			2,00	4,00	40	4,00	3,00
VB-Muffen	0,0024	40000			96,00	192,00	40	192,00	144,00
Endverschlüsse	0,0006	70000			42,00	84,00	40	84,00	63,00
Kompensationsanlage					76,23	152,46	40	152,46	114,35
Monitoringsystem						90,00	40	90,00	67,50
Inbetriebnahmeprüfung					10,00	20,00	40	20,00	15,00
<b>Zwischensumme:</b>						<b>3752,46</b>		<b>3752,46</b>	<b>2814,35</b>
Bautechnik									
Kabelgraben - OBW, Böschung, inkl. TSB						200,00	40	200,00	150,00
Muffenbauwerk	0,0012	42000			50,40	100,80	40	100,80	75,60
Kühlrohre aus PE					50,00	100,00	40	100,00	75,00
Übergangsbauwerke	0,0004	2000000			800,00	1600,00	40	1600,00	1200,00
<b>Zwischensumme:</b>						<b>1150,40</b>		<b>1150,40</b>	<b>862,80</b>
<b>Gesamtsumme INVESTITIONSKOSTEN:</b>						<b>5464,06</b>			
<b>Gesamtsumme Reinvestitionskosten</b>								<b>5152,86</b>	
<b>Gesamtsumme Restwert</b>									<b>3677,15</b>

Tab. 12.3: Investitionskosten der Variante 1B

Variante 1B - OK - OR										
Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - ohne Kühlrohre										
INVESTITIONSKOSTEN										
Bezeichnung:	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter		Kosten der Investition (2 Systeme)	Nutzungsdauer [a]	Kosten der Reinvestition im Jahr 40		Restwert im Jahr 50 [€/m]	
			€/m	€/m			€/m	€/m		
Planung, Entscheidung, Abwicklung										
Planung - Trassierung					70,00					
Entgelt - Dienstbarkeiten					241,20					
Umweltschutz - Ausgleichsmaßnahmen					200,00	40		200,00		
Projektentwicklung					35,00	40		35,00		
Baufaufsicht					15,00	40		15,00		
<b>Zwischensumme:</b>					<b>561,20</b>			<b>250,00</b>		
Elektrotechnische Ausrüstung										
Kabel			500,00	1500,00	3000,00	40		3000,00		2250,00
Kabelverlegung			15,00	45,00	90,00	40		90,00		67,50
CB-Muffen	0,0012	42000		50,40	100,80	40		100,80		75,60
Überspannungsableiter	0,0012	8000		9,60	19,20	40		19,20		14,40
CB-Anlagen	0,0004	5000		2,00	4,00	40		4,00		3,00
VB-Muffen	0,0024	40000		96,00	192,00	40		192,00		144,00
Endverschlüsse	0,0006	70000		42,00	84,00	40		84,00		63,00
Kompensationsanlage				76,23	152,46	40		152,46		114,35
Monitoringsystem					90,00	40		90,00		67,50
Inbetriebnahmeprüfung				10,00	20,00	40		20,00		15,00
<b>Zwischensumme:</b>					<b>3752,46</b>			<b>3752,46</b>		<b>2814,35</b>
Bautechnik										
Kabelgraben - OBW, Böschung, inkl. TSB					200,00	40		200,00		150,00
Muffenbauwerk	0,0012	42000			50,40	40		50,40		37,80
Übergangsbauwerke	0,0004	2000000			800,00	40		800,00		600,00
<b>Zwischensumme:</b>					<b>1050,40</b>			<b>1050,40</b>		<b>787,80</b>
<b>Gesamtsumme INVESTITIONSKOSTEN:</b>					<b>5364,06</b>					
<b>Gesamtsumme Reinvestitionskosten</b>								<b>5052,86</b>		
<b>Gesamtsumme Restwert</b>										<b>3602,15</b>

Tab. 12.4: Investitionskosten der Variante 2

Variante 2									
INVESTITIONSKOSTEN					Verlegung im Schutzrohr				
Bezeichnung:	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro		Kosten der Investition (2 Systeme) [€/m]	Nutzungs- dauer [a]	Kosten der Reinvestition im Jahr 40 [€/m]	Restwert im Jahr 50 [€/m]	
			Kabelmeter	Systemmeter					
Planung, Entschädigung, Abwicklung									
Planung - Trassierung					70,00				
Entgelt - Dienstbarkeiten					241,20				
Umweltschutz - Ausgleichsmaßnahmen					40,00	40	40,00		
Projektentwicklung					35,00	40	35,00		
Baueinsicht					15,00	40	15,00		
<b>Zwischensumme:</b>					<b>401,20</b>		<b>90,00</b>		
Elektrotechnische Ausrüstung									
Kabel			500,00	1500,00	3000,00	40	3000,00	2250,00	
Kabelverlegung			15,00	45,00	90,00	40	90,00	67,50	
CB-Muffen	0,0012	42000		50,40	100,80	40	100,80	75,60	
Überspannungsableiter	0,0012	8000		9,60	19,20	40	19,20	14,40	
CB-Anlagen	0,0004	5000		2,00	4,00	40	4,00	3,00	
VB-Muffen	0,0024	40000		96,00	192,00	40	192,00	144,00	
Endverschlüsse	0,0006	70000		42,00	84,00	40	84,00	63,00	
Kompensationsanlage				76,23	152,46	40	152,46	114,35	
Monitoringsystem					90,00	40	90,00	67,50	
Inbetriebnahmeprüfung				10,00	20,00	40	20,00	15,00	
<b>Zwischensumme:</b>					<b>3752,46</b>		<b>3752,46</b>	<b>2814,35</b>	
Bautechnik									
Schutzrohrverlegung, DN 300, inkl. Schächte					650,00	40	650,00	487,50	
Schutzrohre			40	120,00	240,00	40	240,00	180,00	
Muffenbauwerk	0,0012	42000			50,40	40	50,40	37,80	
Übergangsbauwerke	0,0004	2000000			800,00	40	800,00	600,00	
<b>Zwischensumme:</b>					<b>1740,40</b>		<b>1740,40</b>	<b>1305,30</b>	
<b>Gesamtsumme INVESTITIONSKOSTEN:</b>					<b>5894,06</b>				
<b>Gesamtsumme Reinvestitionskosten</b>							<b>5582,86</b>		
<b>Gesamtsumme Restwert</b>								<b>4119,65</b>	

Tab. 12.5: Investitionskosten der Variante 3

Variante 3										
Verlegung im oberflächennahen Tunnel - Fertigteil										
INVESTITIONSKOSTEN										
Bezeichnung:	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter		Kosten pro Systemmeter [€/m]	Kosten der Investition (2 Systeme) [€/m]	Nutzungsdauer [a]	Kosten der Reininvestition im Jahr 40 [€/m]	Restwert im Jahr 50 [€/m]	
			€/m	€/m						
Planung, Entscheidung, Abwicklung										
Planung - Trassierung					70,00					
Entgelt - Dienstbarkeiten					134,00					
Umweltschutz - Ausgleichsmaßnahmen					200,00					
Projektentwicklung					35,00	40	17,50			
Bauaufsicht					15,00	40	7,50			
<b>Zwischensumme:</b>					<b>454,00</b>		<b>25,00</b>			
Elektrotechnische Ausrüstung										
Kabel				500,00	1500,00	40	3000,00	2250,00		
Kabelverlegung				15,00	45,00	40	90,00	67,50		
CB-Muffen	0,0012	42000			50,40	40	100,80	75,60		
Überspannungsableiter	0,0012	8000			9,60	40	19,20	14,40		
CB-Anlagen	0,0004	5000			2,00	40	4,00	3,00		
VB-Muffen	0,0024	40000			96,00	40	192,00	144,00		
Enderschlüsse	0,0006	70000			42,00	40	84,00	63,00		
Kompensationsanlage					76,23	40	152,46	114,35		
Monitoringsystem						40	90,00	67,50		
Inbetriebnahmeprüfung					10,00	40	20,00	15,00		
<b>Zwischensumme:</b>					<b>3752,46</b>		<b>3752,46</b>	<b>2814,35</b>		
Bautechnik										
Kabeltunnel - OBW - Fertigteil					2380,00	100	0,00	1190,00		
Kabelbefestigungen - Konsolen					100,00	40	100,00	75,00		
Kühleinrichtung - Lüftung					100,00	20	*	50,00		
Übergangsbauwerke	0,0004	2000000			800,00	40	800,00	600,00		
<b>Zwischensumme:</b>					<b>3380,00</b>		<b>900,00</b>	<b>1915,00</b>		
<b>Gesamtsumme INVESTITIONSKOSTEN:</b>					<b>7586,46</b>					
<b>Gesamtsumme Reininvestitionskosten</b>							<b>4677,46</b>			
<b>Gesamtsumme Restwert</b>								<b>4729,35</b>		

\* die Reininvestition der Kühlanlage wird unter den Instandhaltungskosten angeführt

Tab. 12.6: Investitionskosten der Variante 3A

Variante 3A-G										
Verlegung im Gewölbetunnel										
Bezeichnung:	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter [€/m]	Kosten pro Systemmeter [€/m]	Kosten der Investition (2-Systeme) [€/m]	Nutzungsdauer [a]	Kosten der Reinvestition im Jahr 40 [€/m]	Restwert im Jahr 50 [€/m]	INVESTITIONSKOSTEN	
									Gesamtsumme	Zwischensumme
Planung, Entschädigung, Abwicklung										
Planung - Trassierung					70,00					
Entgelt - Dienstbarkeiten					134,00					
Umweltschutz - Ausgleichsmaßnahmen					200,00					
Projektabwicklung					35,00	40	17,50			
Baueufsicht					15,00	40	7,50			
<b>Zwischensumme:</b>					<b>454,00</b>		<b>25,00</b>			
Elektrotechnische Ausrüstung										
Kabel			500,00	1500,00	3000,00	40	3000,00			2250,00
Kabelverlegung			15,00	45,00	90,00	40	90,00			67,50
CB-Muffen	0,0012	42000		50,40	100,80	40	100,80			75,60
Überspannungsableiter	0,0012	8000		9,60	19,20	40	19,20			14,40
CB-Anlagen	0,0004	5000		2,00	4,00	40	4,00			3,00
VB-Muffen	0,0024	40000		96,00	192,00	40	192,00			144,00
Endverschlüsse	0,0006	70000		42,00	84,00	40	84,00			63,00
Kompensationsanlage				76,23	152,46	40	152,46			114,35
Monitoringsystem					90,00	40	90,00			67,50
Inbetriebnahmeprüfung				10,00	20,00	40	20,00			15,00
<b>Zwischensumme:</b>					<b>3752,46</b>		<b>3752,46</b>			<b>2814,35</b>
Bautechnik										
Kabeltunnel - offene Bauweise					700,00	100	0,00			350,00
Kabelbefestigungen - Konsolen					100,00	40	100,00			75,00
Kühleinrichtung - Lüftung					100,00	20	*			50,00
Übergangsbauwerke	0,0004	2000000			800,00	40	800,00			600,00
<b>Zwischensumme:</b>					<b>1700,00</b>		<b>900,00</b>			<b>1075,00</b>
<b>Gesamtsumme INVESTITIONSKOSTEN:</b>					<b>5906,46</b>					
<b>Gesamtsumme Reinvestitionskosten</b>							<b>4677,46</b>			
<b>Gesamtsumme Restwert</b>										<b>3889,35</b>

\* die Reinvestition der Kühlanlage wird unter den Instandhaltungskosten angeführt

Tab. 12.7: Investitionskosten der Variante 4

Verlegung im Tunnel - Rohrvortrieb										
Variante 4										
INVESTITIONSKOSTEN										
Bezeichnung:	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter		Kosten pro Systemmeter [€/m]	Kosten der Investition (2 Systeme) [€/m]	Nutzungsdauer [a]	Kosten der Reininvestition im Jahr 40 [€/m]	Restwert im Jahr 50 [€/m]	
			€/m	€/m						
Planung, Entscheidung, Abwicklung										
Planung - Trassierung					70,00					
Entgelt - Dienstbarkeiten					147,40					
Umweltschutz - Ausgleichsmaßnahmen					40,00					
Projektentwicklung					35,00		40	17,50		
Bauaufsicht					15,00		40	7,50		
<b>Zwischensumme:</b>					<b>307,40</b>			<b>25,00</b>		
Elektrotechnische Ausrüstung										
Kabel				500,00	1500,00	3000,00	40	3000,00	2250,00	
Kabelverlegung				15,00	45,00	90,00	40	90,00	67,50	
CB-Muffen	0,0012	42000			50,40	100,80	40	100,80	75,60	
Überspannungsableiter	0,0012	8000			9,60	19,20	40	19,20	14,40	
CB-Anlagen	0,0004	5000			2,00	4,00	40	4,00	3,00	
VB-Muffen	0,0024	40000			96,00	192,00	40	192,00	144,00	
Enderschlüsse	0,0006	70000			42,00	84,00	40	84,00	63,00	
Kompensationsanlage					76,23	152,46	40	152,46	114,35	
Monitoringsystem						90,00	40	90,00	67,50	
Inbetriebnahmeprüfung					10,00	20,00	40	20,00	15,00	
<b>Zwischensumme:</b>					<b>3752,46</b>	<b>3752,46</b>		<b>3752,46</b>	<b>2814,35</b>	
Bautechnik										
Kabeltunnel - Rohrvortrieb					2700,00		100	0,00	1350,00	
Kabelbefestigungen - Konsolen					100,00		40	100,00	75,00	
Kühleinrichtung - Lüftung					100,00		20	*	50,00	
Übergangsbauwerke	0,0004	2000000			800,00		40	800,00	600,00	
<b>Zwischensumme:</b>					<b>3700,00</b>			<b>900,00</b>	<b>2075,00</b>	
<b>Gesamtsumme INVESTITIONSKOSTEN:</b>					<b>7759,86</b>					
<b>Gesamtsumme Reininvestitionskosten</b>								<b>4677,46</b>		
<b>Gesamtsumme Restwert</b>									<b>4889,35</b>	

\* die Reininvestition der Kühlanlage wird unter den Instandhaltungskosten angeführt



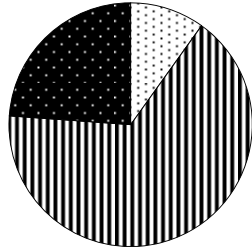
Tab. 12.8: Investitionskosten der Variante 5

Verlegung im Tunnel - Bergmännischer Vortrieb										
Bezeichnung:	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter [€/m]	Kosten pro Systemmeter [€/m]	Kosten der Investition (2 Systeme) [€/m]	Nutzungsdauer [a]	Kosten der Reinvestition im Jahr 40 [€/m]	Restwert im Jahr 50 [€/m]	INVESTITIONSKOSTEN	
									Zwischensumme:	Gesamtsumme Investitionskosten
Planung, Entschädigung, Abwicklung										
Planung - Trassierung					70,00					
Entgelt - Dienstbarkeiten					147,40					
Umweltschutz - Ausgleichsmaßnahmen					40,00					
Projektentwicklung					35,00	40	17,50			
Bauaufsicht					15,00	40	7,50			
<b>Zwischensumme:</b>					<b>307,40</b>		<b>25,00</b>			
Elektrotechnische Ausrüstung										
Kabel			500,00	1500,00	3000,00	40	3000,00			2250,00
Kabelverlegung			15,00	45,00	90,00	40	90,00			67,50
CB-Muffen	0,0012	42000		50,40	100,80	40	100,80			75,60
Überspannungsableiter	0,0012	8000		9,60	19,20	40	19,20			14,40
CB-Anlagen	0,0004	5000		2,00	4,00	40	4,00			3,00
VB-Muffen	0,0024	40000		96,00	192,00	40	192,00			144,00
Endverschlüsse	0,0006	70000		42,00	84,00	40	84,00			63,00
Kompensationsanlage				76,23	152,46	40	152,46			114,35
Monitoringsystem					90,00	40	90,00			67,50
Inbetriebnahmeprüfung				10,00	20,00	40	20,00			15,00
<b>Zwischensumme:</b>					<b>3752,46</b>		<b>3752,46</b>			<b>2814,35</b>
Bautechnik										
Kabeltunnel - Bergmännisch					5000,00	100	0,00			2500,00
Kabelbefestigungen - Konsolen					100,00	40	100,00			75,00
Kühleinrichtung - Lüftung					100,00	20	*			50,00
Übergangsbauwerke	0,0004	2000000			800,00	40	800,00			600,00
<b>Zwischensumme:</b>					<b>6000,00</b>		<b>900,00</b>			<b>3225,00</b>
<b>Gesamtsumme INVESTITIONSKOSTEN:</b>					<b>10059,86</b>					
<b>Gesamtsumme Reinvestitionskosten</b>							<b>4677,46</b>			
<b>Gesamtsumme Restwert</b>										<b>6039,35</b>

\* die Reinvestition der Kühlanlage wird unter den Instandhaltungskosten angeführt

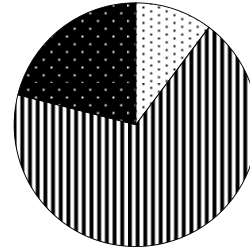
### 12.1.2. Ergänzende Darstellung zum Kapitel 7.1.13

Variante 1



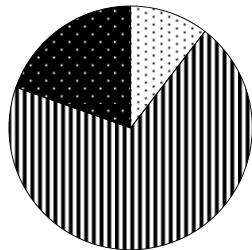
- 1
- ▨ 2
- 3

Variante 1A



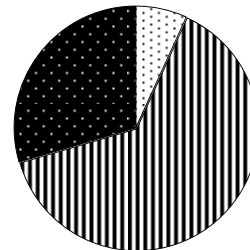
- 1
- ▨ 2
- 3

Variante 1B



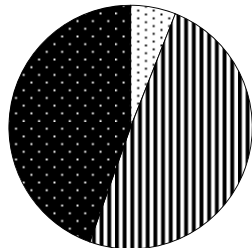
- 1
- ▨ 2
- 3

Variante 2



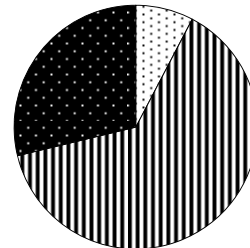
- 1
- ▨ 2
- 3

Variante 3



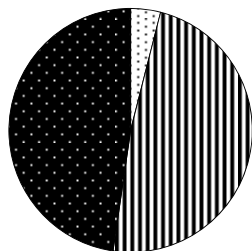
- 1
- ▨ 2
- 3

Variante 3A



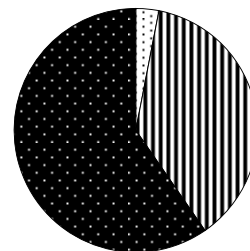
- 1
- ▨ 2
- 3

Variante 4



- 1
- ▨ 2
- 3

Variante 5



- 1
- ▨ 2
- 3

**Legende:**

- 1 Planung, Entschädigung, Abwicklung
- 2 Elektrotechnische Ausrüstung
- 3 Bautechnik

Abb. 12.1: Verteilung der Investitionskosten

12.1.3. Laufende Kosten der betrachteten Varianten

Tab. 12.9: Laufende Kosten der Variante 1

<b>Variante 1</b>				<b>Direkte Erdverlegung</b>		
<b>INSTANDHALTUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Intervall [Jahre]	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Monitoringsystem	3					2,70
Generalüberholung Kühlanlage (Pumpen)	10					100,00
Reinvestition der Kühlanlage	20					200,00
<b>ENTSTÖRUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Fehler	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Fehler am Kabel (Fehler/Systemmeter)	1,34E-06		100000		0,13	0,27
Fehler an einer Muffe (Fehler/Stk)	4,80E-04	0,0036	50000			0,09
Fehler an einem Endverschluss (Fehler/Stk)	5,00E-04	0,0006	80000			0,02
<b>Gesamtsumme ENTSTÖRUNGSKOSTEN:</b>						<b>0,38</b>
<b>BETRIEBSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:		[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
<b>Verlustkosten</b>						
Kabelanlage					1,70	3,40
Kühlungsanlage						30,66
<b>Zwischensumme:</b>						<b>34,06</b>
<b>Inspektions- und Wartungskosten</b>						
Kabelanlage					1,00	2,00
Kompensationsanlage					0,25	0,50
Monitoring						0,50
Kühlungsanlage - indirekte Kühlung						2,00
Bauwerk						0,50
<b>Zwischensumme:</b>						<b>5,50</b>
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>						<b>39,56</b>

Tab. 12.10: Laufende Kosten der Variante 1A

<b>Variante 1A - OK - MR</b>		<b>Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - mit Kühlrohren</b>				
<b>INSTANDHALTUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Intervall [Jahre]	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Monitoringsystem	3					2,70
<b>ENTSTÖRUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Fehler	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Fehler am Kabel (Fehler/Systemmeter)	1,34E-06		100000		0,13	0,27
Fehler an einer Muffe (Fehler/Stk)	4,80E-04	0,0036	50000			0,09
Fehler an einem Endverschluss (Fehler/Stk)	5,00E-04	0,0006	80000			0,02
<b>Gesamtsumme ENTSTÖRUNGSKOSTEN:</b>						<b>0,38</b>
<b>BETRIEBSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:		[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
<b>Verlustkosten</b>						
Kabelanlage					0,76	1,51
<b>Zwischensumme:</b>						<b>1,51</b>
<b>Inspektions- und Wartungskosten</b>						
Kabelanlage					1,00	2,00
Kompensationsanlage					0,25	0,50
Monitoring						0,50
Bauwerk						0,50
<b>Zwischensumme:</b>						<b>3,50</b>
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>						<b>5,01</b>

Tab. 12.11: Laufende Kosten der Variante 1B

<b>Variante 1A - OK - OR</b>			<b>Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - ohne Kühlrohre</b>			
<b>INSTANDHALTUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Intervall [Jahre]	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Monitoringsystem	3					2,70
<b>ENTSTÖRUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Fehler	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Fehler am Kabel (Fehler/Systemmeter)	1,34E-06		100000		0,13	0,27
Fehler an einer Muffe (Fehler/Stk)	4,80E-04	0,0036	50000			0,09
Fehler an einem Endverschluss (Fehler/Stk)	5,00E-04	0,0006	80000			0,02
<b>Gesamtsumme ENTSTÖRUNGSKOSTEN:</b>						<b>0,38</b>
<b>BETRIEBSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:		[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
<b>Verlustkosten</b>						
Kabelanlage					0,76	1,51
<b>Zwischensumme:</b>						<b>1,51</b>
<b>Inspektions- und Wartungskosten</b>						
Kabelanlage					1,00	2,00
Kompensationsanlage					0,25	0,50
Monitoring						0,50
Bauwerk						0,50
<b>Zwischensumme:</b>						<b>3,50</b>
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>						<b>5,01</b>

Tab. 12.12: Laufende Kosten der Variante 2

<b>Variante 2</b>				<b>Verlegung im Schutzrohr</b>		
<b>INSTANDHALTUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Intervall [Jahre]	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Monitoringsystem	3					2,70
<b>ENTSTÖRUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Fehler	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Fehler am Kabel (Fehler/Systemmeter)	1,34E-06		100000		0,13	0,27
Fehler an einer Muffe (Fehler/Stk)	4,80E-04	0,0036	50000			0,09
Fehler an einem Endverschluss (Fehler/Stk)	5,00E-04	0,0006	80000			0,02
<b>Gesamtsumme ENTSTÖRUNGSKOSTEN:</b>						<b>0,38</b>
<b>BETRIEBSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:		[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
<b>Verlustkosten</b>						
Kabelanlage					0,64	1,28
<b>Zwischensumme:</b>						<b>1,28</b>
<b>Inspektions- und Wartungskosten</b>						
Kabelanlage					1,00	2,00
Kompensationsanlage					0,25	0,50
Monitoring						0,50
Bauwerk						0,50
<b>Zwischensumme:</b>						<b>3,50</b>
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>						<b>4,78</b>

Tab. 12.13: Laufende Kosten der Variante 3

<b>Variante 3</b>							<b>Verlegung im oberflächennahen Tunnel - Fertigteil</b>		
<b>INSTANDHALTUNGSKOSTEN</b>									
Bezeichnung:	Intervall [Jahre]	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)			
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]			
Monitoringsystem	3							2,70	
Generalüberholung Kühlanlage (Pumpen)	10							50,00	
Reinvestition der Kühlanlage - Lüftung	20							100,00	
<b>ENTSTÖRUNGSKOSTEN</b>									
Bezeichnung:	Fehler	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)			
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]			
Fehler am Kabel (Fehler/Systemmeter)	6,70E-07		100000		0,07			0,13	
Fehler an einer Muffe (Fehler/Stk)	2,60E-04	0,0036	50000					0,05	
Fehler an einem Endverschluss (Fehler/Stk)	3,20E-04	0,0006	80000					0,02	
<b>Gesamtsumme ENTSTÖRUNGSKOSTEN:</b>									<b>0,20</b>
<b>BETRIEBSKOSTEN</b>									
Bezeichnung:		[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)			
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]			
<b>Verlustkosten</b>									
Kabelanlage						1,23		2,45	
Kühlungsanlage - Lüftung								30,66	
<b>Zwischensumme:</b>									<b>33,11</b>
<b>Inspektions- und Wartungskosten</b>									
Kabelanlage						1,00		2,00	
Kompensationsanlage						0,25		0,50	
Monitoring								0,70	
Kühlungsanlage - Lüftung								1,00	
Bauwerk								5,00	
<b>Zwischensumme:</b>									<b>9,20</b>
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>									<b>42,31</b>

Tab. 12.14: Laufende Kosten der Variante 3A

<b>Variante 3A-G</b>				<b>Verlegung im Gewölbetunnel</b>		
<b>INSTANDHALTUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Intervall [Jahre]	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Monitoringsystem	3					2,70
Generalüberholung Kühlanlage (Pumpen)	10					50,00
Reinvestition der Kühlanlage - Lüftung	20					100,00
<b>ENTSTÖRUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Fehler	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Fehler am Kabel (Fehler/Systemmeter)	6,70E-07		100000		0,07	0,13
Fehler an einer Muffe (Fehler/Stk)	2,60E-04	0,0036	50000			0,05
Fehler an einem Endverschluss (Fehler/Stk)	3,20E-04	0,0006	80000			0,02
<b>Gesamtsumme ENTSTÖRUNGSKOSTEN:</b>						<b>0,20</b>
<b>BETRIEBSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:		[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
<b>Verlustkosten</b>						
Kabelanlage					1,18	2,36
Kühlungsanlage - Lüftung						30,66
<b>Zwischensumme:</b>						<b>33,02</b>
<b>Inspektions- und Wartungskosten</b>						
Kabelanlage					1,00	2,00
Kompensationsanlage					0,25	0,50
Monitoring						0,70
Kühlungsanlage - Lüftung						1,00
Bauwerk						5,00
<b>Zwischensumme:</b>						<b>9,20</b>
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>						<b>42,22</b>



Tab. 12.15: Laufende Kosten der Variante 4

<b>Variante 4</b>							<b>Verlegung im Tunnel - Rohrvortrieb</b>		
<b>INSTANDHALTUNGSKOSTEN</b>									
Bezeichnung:	Intervall [Jahre]	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)			
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]			
Monitoringsystem	3					2,70			
Generalüberholung Kühlanlage (Pumpen)	10					50,00			
Reinvestition der Kühlanlage - Lüftung	20					100,00			
<b>ENTSTÖRUNGSKOSTEN</b>									
Bezeichnung:	Fehler	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)			
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]			
Fehler am Kabel (Fehler/Systemmeter)	6,70E-07		100000		0,07	0,13			
Fehler an einer Muffe (Fehler/Stk)	2,60E-04	0,0036	50000			0,05			
Fehler an einem Endverschluss (Fehler/Stk)	3,20E-04	0,0006	80000			0,02			
<b>Gesamtsumme ENTSTÖRUNGSKOSTEN:</b>						<b>0,20</b>			
<b>BETRIEBSKOSTEN</b>									
Bezeichnung:		[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)			
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]			
<b>Verlustkosten</b>									
Kabelanlage					1,27	2,54			
Kühlungsanlage - Lüftung						30,66			
<b>Zwischensumme:</b>						<b>33,20</b>			
<b>Inspektions- und Wartungskosten</b>									
Kabelanlage					1,00	2,00			
Kompensationsanlage					0,25	0,50			
Monitoring						0,70			
Kühlungsanlage - Lüftung						1,00			
Bauwerk						5,00			
<b>Zwischensumme:</b>						<b>9,20</b>			
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>						<b>42,40</b>			

Tab. 12.16: Laufende Kosten der Variante 5

<b>Variante 5</b>							<b>Verlegung im Tunnel - Bergmännischer Vortrieb</b>		
<b>INSTANDHALTUNGSKOSTEN</b>									
Bezeichnung:	Intervall [Jahre]	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)			
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]			
Monitoringsystem	3					2,70			
Generalüberholung Kühlanlage (Pumpen)	10					50,00			
Reinvestition der Kühlanlage - Lüftung	20					100,00			
<b>ENTSTÖRUNGSKOSTEN</b>									
Bezeichnung:	Fehler	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)			
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]			
Fehler am Kabel (Fehler/Systemmeter)	6,70E-07		100000		0,07	0,13			
Fehler an einer Muffe (Fehler/Stk)	2,60E-04	0,0036	50000			0,05			
Fehler an einem Endverschluss (Fehler/Stk)	3,20E-04	0,0006	80000			0,02			
<b>Gesamtsumme ENTSTÖRUNGSKOSTEN:</b>						<b>0,20</b>			
<b>BETRIEBSKOSTEN</b>									
Bezeichnung:		[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)			
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]			
<b>Verlustkosten</b>									
Kabelanlage					1,27	2,54			
Kühlungsanlage - Lüftung						30,66			
<b>Zwischensumme:</b>						<b>33,20</b>			
<b>Inspektions- und Wartungskosten</b>									
Kabelanlage					1,00	2,00			
Kompensationsanlage					0,25	0,50			
Monitoring						0,70			
Kühlungsanlage - Lüftung						1,00			
Bauwerk						5,00			
<b>Zwischensumme:</b>						<b>9,20</b>			
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>						<b>42,40</b>			

## 12.2. Kapitalwertermittlung

### 12.2.1. Kapitalwertermittlung für eine Kabellebensdauer von 40 Jahren

Tab. 12.17: Kapitalwert - LD 40 - Variante 1

Variante 1 - Direkte Erdverlegung					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte				Barwerte				
		Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Kosten der Infrastruktur				Barwert der Kosten
		Investitionskosten	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten		Investitionskosten	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten	Betriebskosten	
[€/m]	[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]	[€/m]	[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]	[€/m]		
0	Erstinvestition	5664,06	-	-	-	5664,06	-	-	-	5664,06
1				0,38	39,56	0,00	0,00	0,36	37,32	37,68
2				0,38	39,56	0,00	0,00	0,34	35,21	35,55
3	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	2,27	0,32	33,22	35,80
4				0,38	39,56	0,00	0,00	0,30	31,34	31,64
5				0,38	39,56	0,00	0,00	0,28	29,56	29,85
6	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,90	0,27	27,89	30,06
7				0,38	39,56	0,00	0,00	0,25	26,31	26,56
8				0,38	39,56	0,00	0,00	0,24	24,82	25,06
9	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,60	0,22	23,42	25,24
10	Generalüberholung Kühlanlage		100,00	0,38	39,56	0,00	55,84	0,21	22,09	78,14
11				0,38	39,56	0,00	0,00	0,20	20,84	21,04
12	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,34	0,19	19,66	21,19
13				0,38	39,56	0,00	0,00	0,18	18,55	18,73
14				0,38	39,56	0,00	0,00	0,17	17,50	17,67
15	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,13	0,16	16,51	17,79
16				0,38	39,56	0,00	0,00	0,15	15,57	15,72
17				0,38	39,56	0,00	0,00	0,14	14,69	14,83
18	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,95	0,13	13,86	14,94
19				0,38	39,56	0,00	0,00	0,13	13,08	13,20
20	Reinvestition Kühlanlage		200,00	0,38	39,56	0,00	62,36	0,12	12,34	74,81
21	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,79	0,11	11,64	12,54
22				0,38	39,56	0,00	0,00	0,11	10,98	11,08
23				0,38	39,56	0,00	0,00	0,10	10,36	10,46
24	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,67	0,09	9,77	10,53
25				0,38	39,56	0,00	0,00	0,09	9,22	9,31
26				0,38	39,56	0,00	0,00	0,08	8,70	8,78
27	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,56	0,08	8,20	8,84
28				0,38	39,56	0,00	0,00	0,07	7,74	7,81
29				0,38	39,56	0,00	0,00	0,07	7,30	7,37
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		102,70	0,38	39,56	0,00	17,88	0,07	6,89	24,83
31				0,38	39,56	0,00	0,00	0,06	6,50	6,56
32				0,39	39,56	0,00	0,00	0,06	6,13	6,19
33	SM		2,70	0,39	39,56	0,00	0,39	0,06	5,78	6,23
34				0,39	39,56	0,00	0,00	0,05	5,46	5,51
35				0,40	39,56	0,00	0,00	0,05	5,15	5,20
36	SM		2,70	0,40	39,56	0,00	0,33	0,05	4,86	5,24
37				0,40	39,56	0,00	0,00	0,05	4,58	4,63
38				0,41	39,56	0,00	0,00	0,04	4,32	4,37
39				0,41	39,56	0,00	0,00	0,04	4,08	4,12
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	5152,86	200,00	0,42	39,56	500,97	19,44	0,04	3,85	524,30
41				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,63	3,66
42				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,42	3,46
43	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,22	0,03	3,23	3,48
44				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,05	3,08
45				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	2,87	2,90
46	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,19	0,03	2,71	2,92
47				0,38	39,56	0,00	0,00	0,02	2,56	2,58
48				0,38	39,56	0,00	0,00	0,02	2,41	2,44
49	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,16	0,02	2,28	2,45
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-3777,15	100,00	0,38	39,56	-205,06	5,43	0,02	2,15	-197,46
<b>Barwerte</b>		5959,98	173,45	5,99	623,56	<b>6762,97</b>				
<b>Kapitalwert</b>										<b>6762,97</b>

Tab. 12.18: Kapitalwert - LD 40 - Variante 1A

Variante 1A-OK-MR - Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - mit Kühlrohren											Kalkulationszinssatz: 6,00 %	
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte				Barwerte						
		Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Barwert der Kosten		
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]				
0	Erstinvestition	5464,06	-	-	-	5464,06	-	-	-	5464,06		
1				0,38	5,01	0,00	0,00	0,36	4,73	5,09		
2				0,38	5,01	0,00	0,00	0,34	4,46	4,80		
3	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	2,27	0,32	4,21	6,79		
4				0,38	5,01	0,00	0,00	0,30	3,97	4,27		
5				0,38	5,01	0,00	0,00	0,28	3,75	4,03		
6	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,90	0,27	3,53	5,70		
7				0,38	5,01	0,00	0,00	0,25	3,33	3,59		
8				0,38	5,01	0,00	0,00	0,24	3,15	3,38		
9	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,60	0,22	2,97	4,79		
10				0,38	5,01	0,00	0,00	0,21	2,80	3,01		
11				0,38	5,01	0,00	0,00	0,20	2,64	2,84		
12	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,34	0,19	2,49	4,02		
13				0,38	5,01	0,00	0,00	0,18	2,35	2,53		
14				0,38	5,01	0,00	0,00	0,17	2,22	2,38		
15	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,13	0,16	2,09	3,38		
16				0,38	5,01	0,00	0,00	0,15	1,97	2,12		
17				0,38	5,01	0,00	0,00	0,14	1,86	2,00		
18	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,95	0,13	1,76	2,84		
19				0,38	5,01	0,00	0,00	0,13	1,66	1,78		
20				0,38	5,01	0,00	0,00	0,12	1,56	1,68		
21	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,79	0,11	1,47	2,38		
22				0,38	5,01	0,00	0,00	0,11	1,39	1,50		
23				0,38	5,01	0,00	0,00	0,10	1,31	1,41		
24	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,67	0,09	1,24	2,00		
25				0,38	5,01	0,00	0,00	0,09	1,17	1,26		
26				0,38	5,01	0,00	0,00	0,08	1,10	1,19		
27	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,56	0,08	1,04	1,68		
28				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,98	1,05		
29				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,93	1,00		
30	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,47	0,07	0,87	1,41		
31				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,82	0,89		
32				0,39	5,01	0,00	0,00	0,06	0,78	0,84		
33	SM		2,70	0,39	5,01	0,00	0,39	0,06	0,73	1,18		
34				0,39	5,01	0,00	0,00	0,05	0,69	0,75		
35				0,40	5,01	0,00	0,00	0,05	0,65	0,70		
36	SM		2,70	0,40	5,01	0,00	0,33	0,05	0,62	1,00		
37				0,40	5,01	0,00	0,00	0,05	0,58	0,63		
38				0,41	5,01	0,00	0,00	0,04	0,55	0,59		
39				0,41	5,01	0,00	0,00	0,04	0,52	0,56		
40	Reinvestition Anlage	5152,86		0,42	5,01	500,97	0,00	0,04	0,49	501,50		
41				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,46	0,49		
42				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,43	0,47		
43	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,22	0,03	0,41	0,66		
44				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,39	0,42		
45				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,36	0,39		
46	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,19	0,03	0,34	0,55		
47				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,32	0,35		
48				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,31	0,33		
49	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,16	0,02	0,29	0,47		
50	Restwert Kabelanlage	-3677,15		0,38	5,01	-199,63	0,00	0,02	0,27	-199,33		

Barwerte	5765,41	12,96	5,99	79,03	5863,38
Kapitalwert					5863,38

Tab. 12.19: Kapitalwert - LD 40 - Variante 1B

Variante 1B-OK-OR - Direkte Erdverlegung - Ohne Kühlung - ohne Kühlrohre					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte				Barwerte				
		Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5364,06	-	-	-	5364,06	-	-	-	5364,06
1				0,38	5,01	0,00	0,00	0,36	4,73	5,09
2				0,38	5,01	0,00	0,00	0,34	4,46	4,80
3	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	2,27	0,32	4,21	6,79
4				0,38	5,01	0,00	0,00	0,30	3,97	4,27
5				0,38	5,01	0,00	0,00	0,28	3,75	4,03
6	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,90	0,27	3,53	5,70
7				0,38	5,01	0,00	0,00	0,25	3,33	3,59
8				0,38	5,01	0,00	0,00	0,24	3,15	3,38
9	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,60	0,22	2,97	4,79
10				0,38	5,01	0,00	0,00	0,21	2,80	3,01
11				0,38	5,01	0,00	0,00	0,20	2,64	2,84
12	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,34	0,19	2,49	4,02
13				0,38	5,01	0,00	0,00	0,18	2,35	2,53
14				0,38	5,01	0,00	0,00	0,17	2,22	2,38
15	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,13	0,16	2,09	3,38
16				0,38	5,01	0,00	0,00	0,15	1,97	2,12
17				0,38	5,01	0,00	0,00	0,14	1,86	2,00
18	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,95	0,13	1,76	2,84
19				0,38	5,01	0,00	0,00	0,13	1,66	1,78
20				0,38	5,01	0,00	0,00	0,12	1,56	1,68
21	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,79	0,11	1,47	2,38
22				0,38	5,01	0,00	0,00	0,11	1,39	1,50
23				0,38	5,01	0,00	0,00	0,10	1,31	1,41
24	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,67	0,09	1,24	2,00
25				0,38	5,01	0,00	0,00	0,09	1,17	1,26
26				0,38	5,01	0,00	0,00	0,08	1,10	1,19
27	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,56	0,08	1,04	1,68
28				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,98	1,05
29				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,93	1,00
30	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,47	0,07	0,87	1,41
31				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,82	0,89
32				0,39	5,01	0,00	0,00	0,06	0,78	0,84
33	SM		2,70	0,39	5,01	0,00	0,39	0,06	0,73	1,18
34				0,39	5,01	0,00	0,00	0,05	0,69	0,75
35				0,40	5,01	0,00	0,00	0,05	0,65	0,70
36	SM		2,70	0,40	5,01	0,00	0,33	0,05	0,62	1,00
37				0,40	5,01	0,00	0,00	0,05	0,58	0,63
38				0,41	5,01	0,00	0,00	0,04	0,55	0,59
39				0,41	5,01	0,00	0,00	0,04	0,52	0,56
40	Reinvestition Anlage	5052,86		0,42	5,01	491,25	0,00	0,04	0,49	491,78
41				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,46	0,49
42				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,43	0,47
43	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,22	0,03	0,41	0,66
44				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,39	0,42
45				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,36	0,39
46	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,19	0,03	0,34	0,55
47				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,32	0,35
48				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,31	0,33
49	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,16	0,02	0,29	0,47
50	Restwert Kabelanlage	-3602,15		0,38	5,01	-195,55	0,00	0,02	0,27	-195,26

Barwerte	5659,76	12,96	5,99	79,03	5757,73
Kapitalwert					5757,73

Tab. 12.20: Kapitalwert - LD 40 - Variante 2

Variante 2 - Verlegung im Schutzrohr		Kalkulationszinssatz: 6,00 %								
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte				Barwerte				
		Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5894,06	-	-	-	5894,06	-	-	-	5894,06
1				0,38	4,78	0,00	0,00	0,36	4,51	4,87
2				0,38	4,78	0,00	0,00	0,34	4,26	4,59
3	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	2,27	0,32	4,02	6,60
4				0,38	4,78	0,00	0,00	0,30	3,79	4,09
5				0,38	4,78	0,00	0,00	0,28	3,57	3,86
6	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,90	0,27	3,37	5,54
7				0,38	4,78	0,00	0,00	0,25	3,18	3,43
8				0,38	4,78	0,00	0,00	0,24	3,00	3,24
9	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,60	0,22	2,83	4,65
10				0,38	4,78	0,00	0,00	0,21	2,67	2,88
11				0,38	4,78	0,00	0,00	0,20	2,52	2,72
12	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,34	0,19	2,38	3,91
13				0,38	4,78	0,00	0,00	0,18	2,24	2,42
14				0,38	4,78	0,00	0,00	0,17	2,12	2,28
15	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,13	0,16	2,00	3,28
16				0,38	4,78	0,00	0,00	0,15	1,88	2,03
17				0,38	4,78	0,00	0,00	0,14	1,78	1,92
18	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,95	0,13	1,68	2,75
19				0,38	4,78	0,00	0,00	0,13	1,58	1,71
20				0,38	4,78	0,00	0,00	0,12	1,49	1,61
21	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,79	0,11	1,41	2,31
22				0,38	4,78	0,00	0,00	0,11	1,33	1,43
23				0,38	4,78	0,00	0,00	0,10	1,25	1,35
24	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,67	0,09	1,18	1,94
25				0,38	4,78	0,00	0,00	0,09	1,11	1,20
26				0,38	4,78	0,00	0,00	0,08	1,05	1,13
27	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,56	0,08	0,99	1,63
28				0,38	4,78	0,00	0,00	0,07	0,94	1,01
29				0,38	4,78	0,00	0,00	0,07	0,88	0,95
30	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,47	0,07	0,83	1,37
31				0,38	4,78	0,00	0,00	0,06	0,79	0,85
32				0,39	4,78	0,00	0,00	0,06	0,74	0,80
33	SM		2,70	0,39	4,78	0,00	0,39	0,06	0,70	1,15
34				0,39	4,78	0,00	0,00	0,05	0,66	0,71
35				0,40	4,78	0,00	0,00	0,05	0,62	0,67
36	SM		2,70	0,40	4,78	0,00	0,33	0,05	0,59	0,97
37				0,40	4,78	0,00	0,00	0,05	0,55	0,60
38				0,41	4,78	0,00	0,00	0,04	0,52	0,57
39				0,41	4,78	0,00	0,00	0,04	0,49	0,54
40	Reinvestition Anlage	5582,86		0,42	4,78	542,78	0,00	0,04	0,47	543,28
41				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,44	0,47
42				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,41	0,45
43	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,22	0,03	0,39	0,64
44				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,37	0,40
45				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,35	0,38
46	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,19	0,03	0,33	0,54
47				0,38	4,78	0,00	0,00	0,02	0,31	0,33
48				0,38	4,78	0,00	0,00	0,02	0,29	0,31
49	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,16	0,02	0,28	0,45
50	Restwert Kabelanlage	-4119,65		0,38	4,78	-223,65	0,00	0,02	0,26	-223,37

Barwerte	6213,19	12,96	5,99	75,40	6307,54
Kapitalwert					6307,54

Tab. 12.21: Kapitalwert - LD 40 - Variante 3

Variante 3 - Verlegung im oberflächennahen Tunnel - Fertigteil					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte				Barwerte				
		Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	7586,46	-	-	-	7586,46	-	-	-	7586,46
1				0,20	42,31	0,00	0,00	0,19	39,92	40,10
2				0,20	42,31	0,00	0,00	0,17	37,66	37,83
3	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	2,27	0,16	35,53	37,96
4				0,20	42,31	0,00	0,00	0,16	33,52	33,67
5				0,20	42,31	0,00	0,00	0,15	31,62	31,76
6	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,90	0,14	29,83	31,87
7				0,20	42,31	0,00	0,00	0,13	28,14	28,27
8				0,20	42,31	0,00	0,00	0,12	26,55	26,67
9	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,60	0,12	25,04	26,76
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,31	0,00	27,92	0,11	23,63	51,66
11				0,20	42,31	0,00	0,00	0,10	22,29	22,39
12	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,34	0,10	21,03	22,47
13				0,20	42,31	0,00	0,00	0,09	19,84	19,93
14				0,20	42,31	0,00	0,00	0,09	18,71	18,80
15	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,13	0,08	17,66	18,86
16				0,20	42,31	0,00	0,00	0,08	16,66	16,73
17				0,20	42,31	0,00	0,00	0,07	15,71	15,79
18	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,95	0,07	14,82	15,84
19				0,20	42,31	0,00	0,00	0,06	13,98	14,05
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,31	0,00	31,18	0,06	13,19	44,43
21	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,79	0,06	12,45	13,30
22				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	11,74	11,80
23				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	11,08	11,13
24	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,67	0,05	10,45	11,17
25				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	9,86	9,90
26				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	9,30	9,34
27	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,56	0,04	8,77	9,37
28				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	8,28	8,32
29				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	7,81	7,85
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		52,70	0,20	42,31	0,00	9,18	0,03	7,37	16,58
31				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	6,95	6,98
32				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	6,56	6,59
33	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,39	0,03	6,19	6,61
34				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	5,84	5,86
35				0,21	42,31	0,00	0,00	0,03	5,51	5,53
36	SM		2,70	0,21	42,31	0,00	0,33	0,03	5,19	5,55
37				0,21	42,31	0,00	0,00	0,02	4,90	4,92
38				0,21	42,31	0,00	0,00	0,02	4,62	4,65
39				0,21	42,31	0,00	0,00	0,02	4,36	4,38
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4677,46	100,00	0,22	42,31	454,75	9,72	0,02	4,11	468,61
41				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,88	3,90
42				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,66	3,68
43	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,22	0,02	3,45	3,69
44				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,26	3,27
45				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	3,07	3,09
46	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,19	0,01	2,90	3,10
47				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	2,58	2,59
49	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,16	0,01	2,43	2,60
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-4729,35	50,00	0,20	42,31	-256,75	2,71	0,01	2,30	-251,73

Barwerte	7784,46	93,20	3,10	666,92	8547,70
Kapitalwert					8547,70

Tab. 12.22: Kapitalwert - LD 40 - Variante 3A

Variante 3A - Verlegung im Gewölbetunnel					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5906,46	-	-	-	5906,46	-	-	-	5906,46
1				0,20	42,22	0,00	0,00	0,19	39,83	40,02
2				0,20	42,22	0,00	0,00	0,17	37,58	37,75
3	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	2,27	0,16	35,45	37,88
4				0,20	42,22	0,00	0,00	0,16	33,44	33,60
5				0,20	42,22	0,00	0,00	0,15	31,55	31,70
6	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,90	0,14	29,77	31,81
7				0,20	42,22	0,00	0,00	0,13	28,08	28,21
8				0,20	42,22	0,00	0,00	0,12	26,49	26,61
9	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,60	0,12	24,99	26,71
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,22	0,00	27,92	0,11	23,58	51,61
11				0,20	42,22	0,00	0,00	0,10	22,24	22,35
12	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,34	0,10	20,98	22,42
13				0,20	42,22	0,00	0,00	0,09	19,80	19,89
14				0,20	42,22	0,00	0,00	0,09	18,68	18,76
15	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,13	0,08	17,62	18,83
16				0,20	42,22	0,00	0,00	0,08	16,62	16,70
17				0,20	42,22	0,00	0,00	0,07	15,68	15,75
18	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,95	0,07	14,79	15,81
19				0,20	42,22	0,00	0,00	0,06	13,96	14,02
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,22	0,00	31,18	0,06	13,17	44,41
21	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,79	0,06	12,42	13,27
22				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	11,72	11,77
23				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	11,05	11,11
24	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,67	0,05	10,43	11,14
25				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	9,84	9,88
26				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	9,28	9,32
27	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,56	0,04	8,76	9,36
28				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	8,26	8,30
29				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	7,79	7,83
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		52,70	0,20	42,22	0,00	9,18	0,03	7,35	16,56
31				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	6,94	6,97
32				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	6,54	6,57
33	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,39	0,03	6,17	6,60
34				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	5,82	5,85
35				0,21	42,22	0,00	0,00	0,03	5,49	5,52
36	SM		2,70	0,21	42,22	0,00	0,33	0,03	5,18	5,54
37				0,21	42,22	0,00	0,00	0,02	4,89	4,91
38				0,21	42,22	0,00	0,00	0,02	4,61	4,64
39				0,21	42,22	0,00	0,00	0,02	4,35	4,37
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4677,46	100,00	0,22	42,22	454,75	9,72	0,02	4,11	468,60
41				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,87	3,89
42				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,65	3,67
43	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,22	0,02	3,45	3,68
44				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,25	3,27
45				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	3,07	3,08
46	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,19	0,01	2,89	3,09
47				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	2,73	2,74
48				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	2,58	2,59
49	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,16	0,01	2,43	2,60
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-3889,35	50,00	0,20	42,22	-211,15	2,71	0,01	2,29	-206,13

Barwerte	6150,07	93,20	3,10	665,51	6911,89
Kapitalwert					6911,89



Tab. 12.23: Kapitalwert - LD 40 - Variante 4

Variante 4 - Verlegung im Tunnel - Rohrvortrieb					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	7759,86	-	-	-	7759,86	-	-	-	7759,86
1				0,20	42,40	0,00	0,00	0,19	40,00	40,19
2				0,20	42,40	0,00	0,00	0,17	37,74	37,91
3	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	2,27	0,16	35,60	38,03
4				0,20	42,40	0,00	0,00	0,16	33,59	33,74
5				0,20	42,40	0,00	0,00	0,15	31,69	31,83
6	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,90	0,14	29,89	31,93
7				0,20	42,40	0,00	0,00	0,13	28,20	28,33
8				0,20	42,40	0,00	0,00	0,12	26,60	26,73
9	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,60	0,12	25,10	26,81
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,40	0,00	27,92	0,11	23,68	51,71
11				0,20	42,40	0,00	0,00	0,10	22,34	22,44
12	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,34	0,10	21,07	22,51
13				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	19,88	19,97
14				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	18,76	18,84
15	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,13	0,08	17,69	18,90
16				0,20	42,40	0,00	0,00	0,08	16,69	16,77
17				0,20	42,40	0,00	0,00	0,07	15,75	15,82
18	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,95	0,07	14,86	15,87
19				0,20	42,40	0,00	0,00	0,06	14,02	14,08
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,40	0,00	31,18	0,06	13,22	44,46
21	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,79	0,06	12,47	13,33
22				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,77	11,82
23				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,10	11,15
24	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,67	0,05	10,47	11,19
25				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	9,88	9,93
26				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	9,32	9,36
27	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,56	0,04	8,79	9,39
28				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	8,30	8,33
29				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	7,83	7,86
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		52,70	0,20	42,40	0,00	9,18	0,03	7,38	16,59
31				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,97	7,00
32				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,57	6,60
33	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,39	0,03	6,20	6,62
34				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,85	5,88
35				0,21	42,40	0,00	0,00	0,03	5,52	5,54
36	SM		2,70	0,21	42,40	0,00	0,33	0,03	5,20	5,56
37				0,21	42,40	0,00	0,00	0,02	4,91	4,93
38				0,21	42,40	0,00	0,00	0,02	4,63	4,66
39				0,21	42,40	0,00	0,00	0,02	4,37	4,39
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4677,46	100,00	0,22	42,40	454,75	9,72	0,02	4,12	468,62
41				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,89	3,91
42				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,67	3,69
43	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,22	0,02	3,46	3,70
44				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,27	3,28
45				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	3,08	3,09
46	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,19	0,01	2,91	3,10
47				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,59	2,60
49	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,16	0,01	2,44	2,61
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-4889,35	50,00	0,20	42,40	-265,43	2,71	0,01	2,30	-260,41

Barwerte	7949,18	93,20	3,10	668,37	8713,85
Kapitalwert					8713,85

Tab. 12.24: Kapitalwert - LD 40 - Variante 5

Variante 5 - Verlegung im Tunnel - Bergmännischer Vortrieb					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	10059,86	-	-	-	10059,86	-	-	-	10059,86
1				0,20	42,40	0,00	0,00	0,19	40,00	40,19
2				0,20	42,40	0,00	0,00	0,17	37,74	37,91
3	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	2,27	0,16	35,60	38,03
4				0,20	42,40	0,00	0,00	0,16	33,59	33,74
5				0,20	42,40	0,00	0,00	0,15	31,69	31,83
6	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,90	0,14	29,89	31,93
7				0,20	42,40	0,00	0,00	0,13	28,20	28,33
8				0,20	42,40	0,00	0,00	0,12	26,60	26,73
9	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,60	0,12	25,10	26,81
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,40	0,00	27,92	0,11	23,68	51,71
11				0,20	42,40	0,00	0,00	0,10	22,34	22,44
12	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,34	0,10	21,07	22,51
13				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	19,88	19,97
14				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	18,76	18,84
15	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,13	0,08	17,69	18,90
16				0,20	42,40	0,00	0,00	0,08	16,69	16,77
17				0,20	42,40	0,00	0,00	0,07	15,75	15,82
18	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,95	0,07	14,86	15,87
19				0,20	42,40	0,00	0,00	0,06	14,02	14,08
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,40	0,00	31,18	0,06	13,22	44,46
21	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,79	0,06	12,47	13,33
22				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,77	11,82
23				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,10	11,15
24	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,67	0,05	10,47	11,19
25				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	9,88	9,93
26				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	9,32	9,36
27	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,56	0,04	8,79	9,39
28				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	8,30	8,33
29				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	7,83	7,86
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		52,70	0,20	42,40	0,00	9,18	0,03	7,38	16,59
31				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,97	7,00
32				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,57	6,60
33	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,39	0,03	6,20	6,62
34				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,85	5,88
35				0,21	42,40	0,00	0,00	0,03	5,52	5,54
36	SM		2,70	0,21	42,40	0,00	0,33	0,03	5,20	5,56
37				0,21	42,40	0,00	0,00	0,02	4,91	4,93
38				0,21	42,40	0,00	0,00	0,02	4,63	4,66
39				0,21	42,40	0,00	0,00	0,02	4,37	4,39
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4677,46	100,00	0,22	42,40	454,75	9,72	0,02	4,12	468,62
41				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,89	3,91
42				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,67	3,69
43	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,22	0,02	3,46	3,70
44				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,27	3,28
45				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	3,08	3,09
46	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,19	0,01	2,91	3,10
47				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,59	2,60
49	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,16	0,01	2,44	2,61
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-6039,35	50,00	0,20	42,40	-327,87	2,71	0,01	2,30	-322,84

Barwerte	10186,75	93,20	3,10	668,37	10951,42
Kapitalwert					10951,42

12.2.2. Kapitalwertermittlung für eine Kabellebensdauer von 50 Jahren – Sensitivität

Tab. 12.25: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 1

Variante 1 - Direkte Erdverlegung					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte				
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Investitionskosten	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten		Investitionskosten	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten		
€/m	€/m	€/m a	€/m	€/m	€/m a	€/m				
0	Erstinvestition	5664,06	-	-	-	5664,06	-	-	-	5664,06
1				0,38	39,56	0,00	0,00	0,36	37,32	37,68
2				0,38	39,56	0,00	0,00	0,34	35,21	35,55
3	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	2,27	0,32	33,22	35,80
4				0,38	39,56	0,00	0,00	0,30	31,34	31,64
5				0,38	39,56	0,00	0,00	0,28	29,56	29,85
6	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,90	0,27	27,89	30,06
7				0,38	39,56	0,00	0,00	0,25	26,31	26,56
8				0,38	39,56	0,00	0,00	0,24	24,82	25,06
9	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,60	0,22	23,42	25,24
10	Generalüberholung Kühlanlage		100,00	0,38	39,56	0,00	55,84	0,21	22,09	78,14
11				0,38	39,56	0,00	0,00	0,20	20,84	21,04
12	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,34	0,19	19,66	21,19
13				0,38	39,56	0,00	0,00	0,18	18,55	18,73
14				0,38	39,56	0,00	0,00	0,17	17,50	17,67
15	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,13	0,16	16,51	17,79
16				0,38	39,56	0,00	0,00	0,15	15,57	15,72
17				0,38	39,56	0,00	0,00	0,14	14,69	14,83
18	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,95	0,13	13,86	14,94
19				0,38	39,56	0,00	0,00	0,13	13,08	13,20
20	Reinvestition Kühlanlage		200,00	0,38	39,56	0,00	62,36	0,12	12,34	74,81
21	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,79	0,11	11,64	12,54
22				0,38	39,56	0,00	0,00	0,11	10,98	11,08
23				0,38	39,56	0,00	0,00	0,10	10,36	10,46
24	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,67	0,09	9,77	10,53
25				0,38	39,56	0,00	0,00	0,09	9,22	9,31
26				0,38	39,56	0,00	0,00	0,08	8,70	8,78
27	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,56	0,08	8,20	8,84
28				0,38	39,56	0,00	0,00	0,07	7,74	7,81
29				0,38	39,56	0,00	0,00	0,07	7,30	7,37
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		102,70	0,38	39,56	0,00	17,88	0,07	6,89	24,83
31				0,38	39,56	0,00	0,00	0,06	6,50	6,56
32				0,38	39,56	0,00	0,00	0,06	6,13	6,19
33	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,39	0,06	5,78	6,23
34				0,38	39,56	0,00	0,00	0,05	5,46	5,51
35				0,38	39,56	0,00	0,00	0,05	5,15	5,20
36	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,33	0,05	4,86	5,23
37				0,38	39,56	0,00	0,00	0,04	4,58	4,62
38				0,38	39,56	0,00	0,00	0,04	4,32	4,36
39	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,28	0,04	4,08	4,39
40	Reinvestition Kühlanlage		200,00	0,38	39,56	0,00	19,44	0,04	3,85	23,33
41				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,63	3,66
42	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,23	0,03	3,42	3,69
43				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,23	3,26
44				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,05	3,08
45	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,20	0,03	2,87	3,10
46				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	2,71	2,74
47				0,38	39,56	0,00	0,00	0,02	2,56	2,58
48	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,16	0,02	2,41	2,60
49				0,38	39,56	0,00	0,00	0,02	2,28	2,30
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-100,00	100,00	0,38	39,56	-5,43	5,43	0,02	2,15	2,17

SM: Service Monitoring

Barwerte	5658,63	173,76	5,96	623,56	6461,91
Kapitalwert					6461,91

Tab. 12.26: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 1A

Variante 1A-OK-MR - Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - mit Kühlrohren					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5464,06	-	-	-	5464,06	-	-	-	5464,06
1				0,38	5,01	0,00	0,00	0,36	4,73	5,09
2				0,38	5,01	0,00	0,00	0,34	4,46	4,80
3	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	2,27	0,32	4,21	6,79
4				0,38	5,01	0,00	0,00	0,30	3,97	4,27
5				0,38	5,01	0,00	0,00	0,28	3,75	4,03
6	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,90	0,27	3,53	5,70
7				0,38	5,01	0,00	0,00	0,25	3,33	3,59
8				0,38	5,01	0,00	0,00	0,24	3,15	3,38
9	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,60	0,22	2,97	4,79
10				0,38	5,01	0,00	0,00	0,21	2,80	3,01
11				0,38	5,01	0,00	0,00	0,20	2,64	2,84
12	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,34	0,19	2,49	4,02
13				0,38	5,01	0,00	0,00	0,18	2,35	2,53
14				0,38	5,01	0,00	0,00	0,17	2,22	2,38
15	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,13	0,16	2,09	3,38
16				0,38	5,01	0,00	0,00	0,15	1,97	2,12
17				0,38	5,01	0,00	0,00	0,14	1,86	2,00
18	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,95	0,13	1,76	2,84
19				0,38	5,01	0,00	0,00	0,13	1,66	1,78
20				0,38	5,01	0,00	0,00	0,12	1,56	1,68
21	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,79	0,11	1,47	2,38
22				0,38	5,01	0,00	0,00	0,11	1,39	1,50
23				0,38	5,01	0,00	0,00	0,10	1,31	1,41
24	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,67	0,09	1,24	2,00
25				0,38	5,01	0,00	0,00	0,09	1,17	1,26
26				0,38	5,01	0,00	0,00	0,08	1,10	1,19
27	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,56	0,08	1,04	1,68
28				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,98	1,05
29				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,93	1,00
30	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,47	0,07	0,87	1,41
31				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,82	0,89
32				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,78	0,84
33	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,39	0,06	0,73	1,18
34				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,69	0,74
35				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,65	0,70
36	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,33	0,05	0,62	0,99
37				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,58	0,62
38				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,55	0,59
39	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,28	0,04	0,52	0,83
40				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,49	0,52
41				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,46	0,49
42	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,23	0,03	0,43	0,70
43				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,41	0,44
44				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,39	0,42
45	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,20	0,03	0,36	0,59
46				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,34	0,37
47				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,32	0,35
48	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,16	0,02	0,31	0,49
49				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,29	0,31
50	Restwert Kabelanlage	0,00		0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,27	0,29

SM: Service Monitoring

Barwerte	5464,06	13,27	5,96	79,03	5562,32
Kapitalwert					5562,32

Tab. 12.27: Kaptialwert - LD 50 SENS - Variante 1B

Variante 1B-OK-OR - Direkte Erdverlegung - Ohne Kühlung - ohne Kühlrohre					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5364,06	-	-	-	5364,06	-	-	-	5364,06
1				0,38	5,01	0,00	0,00	0,36	4,73	5,09
2				0,38	5,01	0,00	0,00	0,34	4,46	4,80
3	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	2,27	0,32	4,21	6,79
4				0,38	5,01	0,00	0,00	0,30	3,97	4,27
5				0,38	5,01	0,00	0,00	0,28	3,75	4,03
6	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,90	0,27	3,53	5,70
7				0,38	5,01	0,00	0,00	0,25	3,33	3,59
8				0,38	5,01	0,00	0,00	0,24	3,15	3,38
9	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,60	0,22	2,97	4,79
10				0,38	5,01	0,00	0,00	0,21	2,80	3,01
11				0,38	5,01	0,00	0,00	0,20	2,64	2,84
12	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,34	0,19	2,49	4,02
13				0,38	5,01	0,00	0,00	0,18	2,35	2,53
14				0,38	5,01	0,00	0,00	0,17	2,22	2,38
15	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,13	0,16	2,09	3,38
16				0,38	5,01	0,00	0,00	0,15	1,97	2,12
17				0,38	5,01	0,00	0,00	0,14	1,86	2,00
18	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,95	0,13	1,76	2,84
19				0,38	5,01	0,00	0,00	0,13	1,66	1,78
20				0,38	5,01	0,00	0,00	0,12	1,56	1,68
21	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,79	0,11	1,47	2,38
22				0,38	5,01	0,00	0,00	0,11	1,39	1,50
23				0,38	5,01	0,00	0,00	0,10	1,31	1,41
24	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,67	0,09	1,24	2,00
25				0,38	5,01	0,00	0,00	0,09	1,17	1,26
26				0,38	5,01	0,00	0,00	0,08	1,10	1,19
27	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,56	0,08	1,04	1,68
28				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,98	1,05
29				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,93	1,00
30	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,47	0,07	0,87	1,41
31				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,82	0,89
32				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,78	0,84
33	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,39	0,06	0,73	1,18
34				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,69	0,74
35				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,65	0,70
36	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,33	0,05	0,62	0,99
37				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,58	0,62
38				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,55	0,59
39	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,28	0,04	0,52	0,83
40				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,49	0,52
41				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,46	0,49
42	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,23	0,03	0,43	0,70
43				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,41	0,44
44				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,39	0,42
45	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,20	0,03	0,36	0,59
46				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,34	0,37
47				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,32	0,35
48	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,16	0,02	0,31	0,49
49				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,29	0,31
50	Restwert Kabelanlage	0,00		0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,27	0,29

SM: Service Monitoring

Barwerte	5364,06	13,27	5,96	79,03	5462,32
Kaptialwert					5462,32

Tab. 12.28: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 2

Variante 2 - Verlegung im Schutzrohr					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5894,06	-	-	-	5894,06	-	-	-	5894,06
1				0,38	4,78	0,00	0,00	0,36	4,51	4,87
2				0,38	4,78	0,00	0,00	0,34	4,26	4,59
3	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	2,27	0,32	4,02	6,60
4				0,38	4,78	0,00	0,00	0,30	3,79	4,09
5				0,38	4,78	0,00	0,00	0,28	3,57	3,86
6	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,90	0,27	3,37	5,54
7				0,38	4,78	0,00	0,00	0,25	3,18	3,43
8				0,38	4,78	0,00	0,00	0,24	3,00	3,24
9	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,60	0,22	2,83	4,65
10				0,38	4,78	0,00	0,00	0,21	2,67	2,88
11				0,38	4,78	0,00	0,00	0,20	2,52	2,72
12	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,34	0,19	2,38	3,91
13				0,38	4,78	0,00	0,00	0,18	2,24	2,42
14				0,38	4,78	0,00	0,00	0,17	2,12	2,28
15	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,13	0,16	2,00	3,28
16				0,38	4,78	0,00	0,00	0,15	1,88	2,03
17				0,38	4,78	0,00	0,00	0,14	1,78	1,92
18	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,95	0,13	1,68	2,75
19				0,38	4,78	0,00	0,00	0,13	1,58	1,71
20				0,38	4,78	0,00	0,00	0,12	1,49	1,61
21	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,79	0,11	1,41	2,31
22				0,38	4,78	0,00	0,00	0,11	1,33	1,43
23				0,38	4,78	0,00	0,00	0,10	1,25	1,35
24	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,67	0,09	1,18	1,94
25				0,38	4,78	0,00	0,00	0,09	1,11	1,20
26				0,38	4,78	0,00	0,00	0,08	1,05	1,13
27	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,56	0,08	0,99	1,63
28				0,38	4,78	0,00	0,00	0,07	0,94	1,01
29				0,38	4,78	0,00	0,00	0,07	0,88	0,95
30	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,47	0,07	0,83	1,37
31				0,38	4,78	0,00	0,00	0,06	0,79	0,85
32				0,38	4,78	0,00	0,00	0,06	0,74	0,80
33	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,39	0,06	0,70	1,15
34				0,38	4,78	0,00	0,00	0,05	0,66	0,71
35				0,38	4,78	0,00	0,00	0,05	0,62	0,67
36	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,33	0,05	0,59	0,97
37				0,38	4,78	0,00	0,00	0,04	0,55	0,60
38				0,38	4,78	0,00	0,00	0,04	0,52	0,56
39	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,28	0,04	0,49	0,81
40				0,38	4,78	0,00	0,00	0,04	0,47	0,50
41				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,44	0,47
42	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,23	0,03	0,41	0,68
43				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,39	0,42
44				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,37	0,40
45	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,20	0,03	0,35	0,57
46				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,33	0,35
47				0,38	4,78	0,00	0,00	0,02	0,31	0,33
48	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,16	0,02	0,29	0,48
49				0,38	4,78	0,00	0,00	0,02	0,28	0,30
50	Restwert Kabelanlage	0,00		0,38	4,78	0,00	0,00	0,02	0,26	0,28

SM: Service Monitoring

Barwerte	5894,06	13,27	5,96	75,40	5988,70
Kapitalwert					5988,70

Tab. 12.29: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 3

Variante 3 - Verlegung im oberflächennahen Tunnel - Fertigteil					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	7586,46	-	-	-	7586,46	-	-	-	7586,46
1				0,20	42,31	0,00	0,00	0,19	39,92	40,10
2				0,20	42,31	0,00	0,00	0,17	37,66	37,83
3	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	2,27	0,16	35,53	37,96
4				0,20	42,31	0,00	0,00	0,16	33,52	33,67
5				0,20	42,31	0,00	0,00	0,15	31,62	31,76
6	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,90	0,14	29,83	31,87
7				0,20	42,31	0,00	0,00	0,13	28,14	28,27
8				0,20	42,31	0,00	0,00	0,12	26,55	26,67
9	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,60	0,12	25,04	26,76
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,31	0,00	27,92	0,11	23,63	51,66
11				0,20	42,31	0,00	0,00	0,10	22,29	22,39
12	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,34	0,10	21,03	22,47
13				0,20	42,31	0,00	0,00	0,09	19,84	19,93
14				0,20	42,31	0,00	0,00	0,09	18,71	18,80
15	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,13	0,08	17,66	18,86
16				0,20	42,31	0,00	0,00	0,08	16,66	16,73
17				0,20	42,31	0,00	0,00	0,07	15,71	15,79
18	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,95	0,07	14,82	15,84
19				0,20	42,31	0,00	0,00	0,06	13,98	14,05
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,31	0,00	31,18	0,06	13,19	44,43
21	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,79	0,06	12,45	13,30
22				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	11,74	11,80
23				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	11,08	11,13
24	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,67	0,05	10,45	11,17
25				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	9,86	9,90
26				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	9,30	9,34
27	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,56	0,04	8,77	9,37
28				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	8,28	8,32
29				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	7,81	7,85
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		52,70	0,20	42,31	0,00	9,18	0,03	7,37	16,58
31				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	6,95	6,98
32				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	6,56	6,59
33	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,39	0,03	6,19	6,61
34				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	5,84	5,86
35				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	5,51	5,53
36	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,33	0,02	5,19	5,55
37				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	4,90	4,92
38				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	4,62	4,64
39	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,28	0,02	4,36	4,66
40	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,31	0,00	9,72	0,02	4,11	13,86
41				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,88	3,90
42	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,23	0,02	3,66	3,91
43				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,45	3,47
44				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,26	3,27
45	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,20	0,01	3,07	3,28
46				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	2,90	2,91
47				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,16	0,01	2,58	2,76
49				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	2,43	2,45
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-1240,00	50,00	0,20	42,31	-67,32	2,71	0,01	2,30	-62,30

SM: Service Monitoring

Barwerte	7519,14	93,52	3,09	666,92	8282,67
Kapitalwert					8282,67

Tab. 12.30: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 3A

Variante 3A - Verlegung im Gewölbetunnel					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5906,46	-	-	-	5906,46	-	-	-	5906,46
1				0,20	42,22	0,00	0,00	0,19	39,83	40,02
2				0,20	42,22	0,00	0,00	0,17	37,58	37,75
3	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	2,27	0,16	35,45	37,88
4				0,20	42,22	0,00	0,00	0,16	33,44	33,60
5				0,20	42,22	0,00	0,00	0,15	31,55	31,70
6	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,90	0,14	29,77	31,81
7				0,20	42,22	0,00	0,00	0,13	28,08	28,21
8				0,20	42,22	0,00	0,00	0,12	26,49	26,61
9	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,60	0,12	24,99	26,71
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,22	0,00	27,92	0,11	23,58	51,61
11				0,20	42,22	0,00	0,00	0,10	22,24	22,35
12	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,34	0,10	20,98	22,42
13				0,20	42,22	0,00	0,00	0,09	19,80	19,89
14				0,20	42,22	0,00	0,00	0,09	18,68	18,76
15	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,13	0,08	17,62	18,83
16				0,20	42,22	0,00	0,00	0,08	16,62	16,70
17				0,20	42,22	0,00	0,00	0,07	15,68	15,75
18	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,95	0,07	14,79	15,81
19				0,20	42,22	0,00	0,00	0,06	13,96	14,02
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,22	0,00	31,18	0,06	13,17	44,41
21	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,79	0,06	12,42	13,27
22				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	11,72	11,77
23				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	11,05	11,11
24	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,67	0,05	10,43	11,14
25				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	9,84	9,88
26				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	9,28	9,32
27	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,56	0,04	8,76	9,36
28				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	8,26	8,30
29				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	7,79	7,83
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		52,70	0,20	42,22	0,00	9,18	0,03	7,35	16,56
31				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	6,94	6,97
32				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	6,54	6,57
33	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,39	0,03	6,17	6,60
34				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	5,82	5,85
35				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	5,49	5,52
36	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,33	0,02	5,18	5,54
37				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	4,89	4,91
38				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	4,61	4,63
39	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,28	0,02	4,35	4,65
40	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,22	0,00	9,72	0,02	4,11	13,85
41				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,87	3,89
42	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,23	0,02	3,65	3,90
43				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,45	3,46
44				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,25	3,27
45	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,20	0,01	3,07	3,28
46				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	2,89	2,91
47				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	2,73	2,74
48	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,16	0,01	2,58	2,75
49				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	2,43	2,44
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-400,00	50,00	0,20	42,22	-21,72	2,71	0,01	2,29	-16,70

SM: Service Monitoring

Barwerte	5884,74	93,52	3,09	665,51	6646,87
Kapitalwert					6646,87



Tab. 12.31: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 4

Variante 4 - Verlegung im Tunnel - Rohrvortrieb					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	7759,86	-	-	-	7759,86	-	-	-	7759,86
1				0,20	42,40	0,00	0,00	0,19	40,00	40,19
2				0,20	42,40	0,00	0,00	0,17	37,74	37,91
3	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	2,27	0,16	35,60	38,03
4				0,20	42,40	0,00	0,00	0,16	33,59	33,74
5				0,20	42,40	0,00	0,00	0,15	31,69	31,83
6	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,90	0,14	29,89	31,93
7				0,20	42,40	0,00	0,00	0,13	28,20	28,33
8				0,20	42,40	0,00	0,00	0,12	26,60	26,73
9	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,60	0,12	25,10	26,81
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,40	0,00	27,92	0,11	23,68	51,71
11				0,20	42,40	0,00	0,00	0,10	22,34	22,44
12	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,34	0,10	21,07	22,51
13				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	19,88	19,97
14				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	18,76	18,84
15	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,13	0,08	17,69	18,90
16				0,20	42,40	0,00	0,00	0,08	16,69	16,77
17				0,20	42,40	0,00	0,00	0,07	15,75	15,82
18	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,95	0,07	14,86	15,87
19				0,20	42,40	0,00	0,00	0,06	14,02	14,08
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,40	0,00	31,18	0,06	13,22	44,46
21	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,79	0,06	12,47	13,33
22				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,77	11,82
23				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,10	11,15
24	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,67	0,05	10,47	11,19
25				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	9,88	9,93
26				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	9,32	9,36
27	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,56	0,04	8,79	9,39
28				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	8,30	8,33
29				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	7,83	7,86
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		52,70	0,20	42,40	0,00	9,18	0,03	7,38	16,59
31				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,97	7,00
32				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,57	6,60
33	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,39	0,03	6,20	6,62
34				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,85	5,88
35				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,52	5,54
36	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,33	0,02	5,20	5,56
37				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,91	4,93
38				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,63	4,65
39	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,28	0,02	4,37	4,67
40	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,40	0,00	9,72	0,02	4,12	13,86
41				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,89	3,91
42	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,23	0,02	3,67	3,92
43				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,46	3,48
44				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,27	3,28
45	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,20	0,01	3,08	3,29
46				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,91	2,92
47				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,16	0,01	2,59	2,76
49				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,44	2,45
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-1400,00	50,00	0,20	42,40	-76,00	2,71	0,01	2,30	-70,98

SM: Service Monitoring

Barwerte	7683,86	93,52	3,09	668,37	8448,83
Kapitalwert					8448,83

Tab. 12.32: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 5

Variante 5 - Verlegung im Tunnel - Bergmännischer Vortrieb					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	10059,86	-	-	-	10059,86	-	-	-	10059,86
1				0,20	42,40	0,00	0,00	0,19	40,00	40,19
2				0,20	42,40	0,00	0,00	0,17	37,74	37,91
3	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	2,27	0,16	35,60	38,03
4				0,20	42,40	0,00	0,00	0,16	33,59	33,74
5				0,20	42,40	0,00	0,00	0,15	31,69	31,83
6	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,90	0,14	29,89	31,93
7				0,20	42,40	0,00	0,00	0,13	28,20	28,33
8				0,20	42,40	0,00	0,00	0,12	26,60	26,73
9	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,60	0,12	25,10	26,81
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,40	0,00	27,92	0,11	23,68	51,71
11				0,20	42,40	0,00	0,00	0,10	22,34	22,44
12	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,34	0,10	21,07	22,51
13				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	19,88	19,97
14				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	18,76	18,84
15	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,13	0,08	17,69	18,90
16				0,20	42,40	0,00	0,00	0,08	16,69	16,77
17				0,20	42,40	0,00	0,00	0,07	15,75	15,82
18	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,95	0,07	14,86	15,87
19				0,20	42,40	0,00	0,00	0,06	14,02	14,08
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,40	0,00	31,18	0,06	13,22	44,46
21	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,79	0,06	12,47	13,33
22				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,77	11,82
23				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,10	11,15
24	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,67	0,05	10,47	11,19
25				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	9,88	9,93
26				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	9,32	9,36
27	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,56	0,04	8,79	9,39
28				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	8,30	8,33
29				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	7,83	7,86
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		52,70	0,20	42,40	0,00	9,18	0,03	7,38	16,59
31				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,97	7,00
32				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,57	6,60
33	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,39	0,03	6,20	6,62
34				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,85	5,88
35				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,52	5,54
36	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,33	0,02	5,20	5,56
37				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,91	4,93
38				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,63	4,65
39	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,28	0,02	4,37	4,67
40	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,40	0,00	9,72	0,02	4,12	13,86
41				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,89	3,91
42	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,23	0,02	3,67	3,92
43				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,46	3,48
44				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,27	3,28
45	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,20	0,01	3,08	3,29
46				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,91	2,92
47				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,16	0,01	2,59	2,76
49				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,44	2,45
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-2550,00	50,00	0,20	42,40	-138,44	2,71	0,01	2,30	-133,41

SM: Service Monitoring

Barwerte	9921,42	93,52	3,09	668,37	10686,40
Kapitalwert					10686,40

12.2.3. Kapitalwertermittlung für eine Kabellebensdauer von 40 Jahren - Sensitivität

Tab. 12.33: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 1

Variante 1 - Direkte Erdverlegung					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte				
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Investitionskosten	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten		Investitionskosten	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten		
€/m	€/m	€/m a	€/m	€/m	€/m a	€/m	€/m			
0	Erstinvestition	5664,06	-	-	-	5664,06	-	-	-	5664,06
1				0,38	39,56	0,00	0,00	0,36	37,32	37,68
2				0,38	39,56	0,00	0,00	0,34	35,21	35,55
3	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	2,27	0,32	33,22	35,80
4				0,38	39,56	0,00	0,00	0,30	31,34	31,64
5				0,38	39,56	0,00	0,00	0,28	29,56	29,85
6	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,90	0,27	27,89	30,06
7				0,38	39,56	0,00	0,00	0,25	26,31	26,56
8				0,38	39,56	0,00	0,00	0,24	24,82	25,06
9	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,60	0,22	23,42	25,24
10	Generalüberholung Kühlanlage		100,00	0,38	39,56	0,00	55,84	0,21	22,09	78,14
11				0,38	39,56	0,00	0,00	0,20	20,84	21,04
12	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,34	0,19	19,66	21,19
13				0,38	39,56	0,00	0,00	0,18	18,55	18,73
14				0,38	39,56	0,00	0,00	0,17	17,50	17,67
15	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,13	0,16	16,51	17,79
16				0,38	39,56	0,00	0,00	0,15	15,57	15,72
17				0,38	39,56	0,00	0,00	0,14	14,69	14,83
18	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,95	0,13	13,86	14,94
19				0,38	39,56	0,00	0,00	0,13	13,08	13,20
20	Reinvestition Kühlanlage		200,00	0,38	39,56	0,00	62,36	0,12	12,34	74,81
21	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,79	0,11	11,64	12,54
22				0,38	39,56	0,00	0,00	0,11	10,98	11,08
23				0,38	39,56	0,00	0,00	0,10	10,36	10,46
24	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,67	0,09	9,77	10,53
25				0,38	39,56	0,00	0,00	0,09	9,22	9,31
26				0,38	39,56	0,00	0,00	0,08	8,70	8,78
27	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,56	0,08	8,20	8,84
28				0,38	39,56	0,00	0,00	0,07	7,74	7,81
29				0,38	39,56	0,00	0,00	0,07	7,30	7,37
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		102,70	0,38	39,56	0,00	17,88	0,07	6,89	24,83
31				0,38	39,56	0,00	0,00	0,06	6,50	6,56
32				0,38	39,56	0,00	0,00	0,06	6,13	6,19
33	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,39	0,06	5,78	6,23
34				0,38	39,56	0,00	0,00	0,05	5,46	5,51
35				0,38	39,56	0,00	0,00	0,05	5,15	5,20
36	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,33	0,05	4,86	5,23
37				0,38	39,56	0,00	0,00	0,04	4,58	4,62
38				0,38	39,56	0,00	0,00	0,04	4,32	4,36
39				0,38	39,56	0,00	0,00	0,04	4,08	4,12
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	5152,86	200,00	0,38	39,56	500,97	19,44	0,04	3,85	524,30
41				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,63	3,66
42				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,42	3,46
43	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,22	0,03	3,23	3,48
44				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,05	3,08
45				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	2,87	2,90
46	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,19	0,03	2,71	2,92
47				0,38	39,56	0,00	0,00	0,02	2,56	2,58
48				0,38	39,56	0,00	0,00	0,02	2,41	2,44
49	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,16	0,02	2,28	2,45
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-3777,15	100,00	0,38	39,56	-205,06	5,43	0,02	2,15	-197,46

<b>Barwerte</b>	5959,98	173,45	5,96	623,56	6762,95
<b>Kapitalwert</b>					<b>6762,95</b>

Tab. 12.34: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 1A

Variante 1A-OK-MR - Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - mit Kühlrohren					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5464,06	-	-	-	5464,06	-	-	-	5464,06
1				0,38	5,01	0,00	0,00	0,36	4,73	5,09
2				0,38	5,01	0,00	0,00	0,34	4,46	4,80
3	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	2,27	0,32	4,21	6,79
4				0,38	5,01	0,00	0,00	0,30	3,97	4,27
5				0,38	5,01	0,00	0,00	0,28	3,75	4,03
6	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,90	0,27	3,53	5,70
7				0,38	5,01	0,00	0,00	0,25	3,33	3,59
8				0,38	5,01	0,00	0,00	0,24	3,15	3,38
9	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,60	0,22	2,97	4,79
10				0,38	5,01	0,00	0,00	0,21	2,80	3,01
11				0,38	5,01	0,00	0,00	0,20	2,64	2,84
12	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,34	0,19	2,49	4,02
13				0,38	5,01	0,00	0,00	0,18	2,35	2,53
14				0,38	5,01	0,00	0,00	0,17	2,22	2,38
15	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,13	0,16	2,09	3,38
16				0,38	5,01	0,00	0,00	0,15	1,97	2,12
17				0,38	5,01	0,00	0,00	0,14	1,86	2,00
18	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,95	0,13	1,76	2,84
19				0,38	5,01	0,00	0,00	0,13	1,66	1,78
20				0,38	5,01	0,00	0,00	0,12	1,56	1,68
21	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,79	0,11	1,47	2,38
22				0,38	5,01	0,00	0,00	0,11	1,39	1,50
23				0,38	5,01	0,00	0,00	0,10	1,31	1,41
24	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,67	0,09	1,24	2,00
25				0,38	5,01	0,00	0,00	0,09	1,17	1,26
26				0,38	5,01	0,00	0,00	0,08	1,10	1,19
27	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,56	0,08	1,04	1,68
28				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,98	1,05
29				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,93	1,00
30	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,47	0,07	0,87	1,41
31				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,82	0,89
32				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,78	0,84
33	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,39	0,06	0,73	1,18
34				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,69	0,74
35				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,65	0,70
36	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,33	0,05	0,62	0,99
37				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,58	0,62
38				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,55	0,59
39				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,52	0,56
40	Reinvestition Anlage	5152,86		0,38	5,01	500,97	0,00	0,04	0,49	501,50
41				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,46	0,49
42				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,43	0,47
43	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,22	0,03	0,41	0,66
44				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,39	0,42
45				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,36	0,39
46	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,19	0,03	0,34	0,55
47				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,32	0,35
48				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,31	0,33
49	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,16	0,02	0,29	0,47
50	Restwert Kabelanlage	-3677,15		0,38	5,01	-199,63	0,00	0,02	0,27	-199,33

Barwerte	5765,41	12,96	5,96	79,03	5863,36
Kapitalwert					5863,36

Tab. 12.35: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 1B

Variante 1B-OK-OR - Direkte Erdverlegung - Ohne Kühlung - ohne Kühlrohre										Kalkulationszinssatz: 6,00 %	
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte				Barwerte					
		Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Barwert der Kosten	
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]			
0	Erstinvestition	5364,06	-	-	-	5364,06	-	-	-	5364,06	
1				0,38	5,01	0,00	0,00	0,36	4,73	5,09	
2				0,38	5,01	0,00	0,00	0,34	4,46	4,80	
3	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	2,27	0,32	4,21	6,79	
4				0,38	5,01	0,00	0,00	0,30	3,97	4,27	
5				0,38	5,01	0,00	0,00	0,28	3,75	4,03	
6	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,90	0,27	3,53	5,70	
7				0,38	5,01	0,00	0,00	0,25	3,33	3,59	
8				0,38	5,01	0,00	0,00	0,24	3,15	3,38	
9	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,60	0,22	2,97	4,79	
10				0,38	5,01	0,00	0,00	0,21	2,80	3,01	
11				0,38	5,01	0,00	0,00	0,20	2,64	2,84	
12	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,34	0,19	2,49	4,02	
13				0,38	5,01	0,00	0,00	0,18	2,35	2,53	
14				0,38	5,01	0,00	0,00	0,17	2,22	2,38	
15	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,13	0,16	2,09	3,38	
16				0,38	5,01	0,00	0,00	0,15	1,97	2,12	
17				0,38	5,01	0,00	0,00	0,14	1,86	2,00	
18	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,95	0,13	1,76	2,84	
19				0,38	5,01	0,00	0,00	0,13	1,66	1,78	
20				0,38	5,01	0,00	0,00	0,12	1,56	1,68	
21	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,79	0,11	1,47	2,38	
22				0,38	5,01	0,00	0,00	0,11	1,39	1,50	
23				0,38	5,01	0,00	0,00	0,10	1,31	1,41	
24	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,67	0,09	1,24	2,00	
25				0,38	5,01	0,00	0,00	0,09	1,17	1,26	
26				0,38	5,01	0,00	0,00	0,08	1,10	1,19	
27	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,56	0,08	1,04	1,68	
28				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,98	1,05	
29				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,93	1,00	
30	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,47	0,07	0,87	1,41	
31				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,82	0,89	
32				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,78	0,84	
33	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,39	0,06	0,73	1,18	
34				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,69	0,74	
35				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,65	0,70	
36	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,33	0,05	0,62	0,99	
37				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,58	0,62	
38				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,55	0,59	
39				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,52	0,56	
40	Reinvestition Anlage	5052,86		0,38	5,01	491,25	0,00	0,04	0,49	491,77	
41				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,46	0,49	
42				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,43	0,47	
43	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,22	0,03	0,41	0,66	
44				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,39	0,42	
45				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,36	0,39	
46	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,19	0,03	0,34	0,55	
47				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,32	0,35	
48				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,31	0,33	
49	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,16	0,02	0,29	0,47	
50	Restwert Kabelanlage	-3602,15		0,38	5,01	-195,55	0,00	0,02	0,27	-195,26	

Barwerte	5659,76	12,96	5,96	79,03	5757,71
Kapitalwert					5757,71

Tab. 12.36: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 2

Variante 2 - Verlegung im Schutzrohr					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5894,06	-	-	-	5894,06	-	-	-	5894,06
1				0,38	4,78	0,00	0,00	0,36	4,51	4,87
2				0,38	4,78	0,00	0,00	0,34	4,26	4,59
3	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	2,27	0,32	4,02	6,60
4				0,38	4,78	0,00	0,00	0,30	3,79	4,09
5				0,38	4,78	0,00	0,00	0,28	3,57	3,86
6	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,90	0,27	3,37	5,54
7				0,38	4,78	0,00	0,00	0,25	3,18	3,43
8				0,38	4,78	0,00	0,00	0,24	3,00	3,24
9	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,60	0,22	2,83	4,65
10				0,38	4,78	0,00	0,00	0,21	2,67	2,88
11				0,38	4,78	0,00	0,00	0,20	2,52	2,72
12	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,34	0,19	2,38	3,91
13				0,38	4,78	0,00	0,00	0,18	2,24	2,42
14				0,38	4,78	0,00	0,00	0,17	2,12	2,28
15	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,13	0,16	2,00	3,28
16				0,38	4,78	0,00	0,00	0,15	1,88	2,03
17				0,38	4,78	0,00	0,00	0,14	1,78	1,92
18	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,95	0,13	1,68	2,75
19				0,38	4,78	0,00	0,00	0,13	1,58	1,71
20				0,38	4,78	0,00	0,00	0,12	1,49	1,61
21	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,79	0,11	1,41	2,31
22				0,38	4,78	0,00	0,00	0,11	1,33	1,43
23				0,38	4,78	0,00	0,00	0,10	1,25	1,35
24	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,67	0,09	1,18	1,94
25				0,38	4,78	0,00	0,00	0,09	1,11	1,20
26				0,38	4,78	0,00	0,00	0,08	1,05	1,13
27	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,56	0,08	0,99	1,63
28				0,38	4,78	0,00	0,00	0,07	0,94	1,01
29				0,38	4,78	0,00	0,00	0,07	0,88	0,95
30	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,47	0,07	0,83	1,37
31				0,38	4,78	0,00	0,00	0,06	0,79	0,85
32				0,38	4,78	0,00	0,00	0,06	0,74	0,80
33	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,39	0,06	0,70	1,15
34				0,38	4,78	0,00	0,00	0,05	0,66	0,71
35				0,38	4,78	0,00	0,00	0,05	0,62	0,67
36	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,33	0,05	0,59	0,97
37				0,38	4,78	0,00	0,00	0,04	0,55	0,60
38				0,38	4,78	0,00	0,00	0,04	0,52	0,56
39				0,38	4,78	0,00	0,00	0,04	0,49	0,53
40	Reinvestition Anlage	5582,86		0,38	4,78	542,78	0,00	0,04	0,47	543,28
41				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,44	0,47
42				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,41	0,45
43	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,22	0,03	0,39	0,64
44				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,37	0,40
45				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,35	0,38
46	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,19	0,03	0,33	0,54
47				0,38	4,78	0,00	0,00	0,02	0,31	0,33
48				0,38	4,78	0,00	0,00	0,02	0,29	0,31
49	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,16	0,02	0,28	0,45
50	Restwert Kabelanlage	-4119,65		0,38	4,78	-223,65	0,00	0,02	0,26	-223,37

Barwerte	6213,19	12,96	5,96	75,40	6307,52
Kapitalwert					6307,52

Tab. 12.37: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 3

Variante 3 - Verlegung im oberflächennahen Tunnel - Fertigteil					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte				Barwerte				
		Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	7586,46	-	-	-	7586,46	-	-	-	7586,46
1				0,20	42,31	0,00	0,00	0,19	39,92	40,10
2				0,20	42,31	0,00	0,00	0,17	37,66	37,83
3	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	2,27	0,16	35,53	37,96
4				0,20	42,31	0,00	0,00	0,16	33,52	33,67
5				0,20	42,31	0,00	0,00	0,15	31,62	31,76
6	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,90	0,14	29,83	31,87
7				0,20	42,31	0,00	0,00	0,13	28,14	28,27
8				0,20	42,31	0,00	0,00	0,12	26,55	26,67
9	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,60	0,12	25,04	26,76
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,31	0,00	27,92	0,11	23,63	51,66
11				0,20	42,31	0,00	0,00	0,10	22,29	22,39
12	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,34	0,10	21,03	22,47
13				0,20	42,31	0,00	0,00	0,09	19,84	19,93
14				0,20	42,31	0,00	0,00	0,09	18,71	18,80
15	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,13	0,08	17,66	18,86
16				0,20	42,31	0,00	0,00	0,08	16,66	16,73
17				0,20	42,31	0,00	0,00	0,07	15,71	15,79
18	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,95	0,07	14,82	15,84
19				0,20	42,31	0,00	0,00	0,06	13,98	14,05
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,31	0,00	31,18	0,06	13,19	44,43
21	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,79	0,06	12,45	13,30
22				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	11,74	11,80
23				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	11,08	11,13
24	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,67	0,05	10,45	11,17
25				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	9,86	9,90
26				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	9,30	9,34
27	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,56	0,04	8,77	9,37
28				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	8,28	8,32
29				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	7,81	7,85
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		52,70	0,20	42,31	0,00	9,18	0,03	7,37	16,58
31				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	6,95	6,98
32				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	6,56	6,59
33	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,39	0,03	6,19	6,61
34				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	5,84	5,86
35				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	5,51	5,53
36	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,33	0,02	5,19	5,55
37				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	4,90	4,92
38				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	4,62	4,64
39				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	4,36	4,38
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4677,46	100,00	0,20	42,31	454,75	9,72	0,02	4,11	468,61
41				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,88	3,90
42				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,66	3,68
43	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,22	0,02	3,45	3,69
44				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,26	3,27
45				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	3,07	3,09
46	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,19	0,01	2,90	3,10
47				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	2,58	2,59
49	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,16	0,01	2,43	2,60
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-4729,35	50,00	0,20	42,31	-256,75	2,71	0,01	2,30	-251,73

SM: Service Monitoring

Barwerte	7784,46	93,20	3,09	666,92	8547,68
Kapitalwert					8547,68

Tab. 12.38: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 3A

Variante 3A - Verlegung im Gewölbetunnel					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5906,46	-	-	-	5906,46	-	-	-	5906,46
1				0,20	42,22	0,00	0,00	0,19	39,83	40,02
2				0,20	42,22	0,00	0,00	0,17	37,58	37,75
3	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	2,27	0,16	35,45	37,88
4				0,20	42,22	0,00	0,00	0,16	33,44	33,60
5				0,20	42,22	0,00	0,00	0,15	31,55	31,70
6	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,90	0,14	29,77	31,81
7				0,20	42,22	0,00	0,00	0,13	28,08	28,21
8				0,20	42,22	0,00	0,00	0,12	26,49	26,61
9	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,60	0,12	24,99	26,71
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,22	0,00	27,92	0,11	23,58	51,61
11				0,20	42,22	0,00	0,00	0,10	22,24	22,35
12	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,34	0,10	20,98	22,42
13				0,20	42,22	0,00	0,00	0,09	19,80	19,89
14				0,20	42,22	0,00	0,00	0,09	18,68	18,76
15	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,13	0,08	17,62	18,83
16				0,20	42,22	0,00	0,00	0,08	16,62	16,70
17				0,20	42,22	0,00	0,00	0,07	15,68	15,75
18	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,95	0,07	14,79	15,81
19				0,20	42,22	0,00	0,00	0,06	13,96	14,02
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,22	0,00	31,18	0,06	13,17	44,41
21	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,79	0,06	12,42	13,27
22				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	11,72	11,77
23				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	11,05	11,11
24	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,67	0,05	10,43	11,14
25				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	9,84	9,88
26				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	9,28	9,32
27	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,56	0,04	8,76	9,36
28				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	8,26	8,30
29				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	7,79	7,83
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		52,70	0,20	42,22	0,00	9,18	0,03	7,35	16,56
31				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	6,94	6,97
32				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	6,54	6,57
33	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,39	0,03	6,17	6,60
34				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	5,82	5,85
35				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	5,49	5,52
36	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,33	0,02	5,18	5,54
37				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	4,89	4,91
38				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	4,61	4,63
39				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	4,35	4,37
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4677,46	100,00	0,20	42,22	454,75	9,72	0,02	4,11	468,60
41				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,87	3,89
42				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,65	3,67
43	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,22	0,02	3,45	3,68
44				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,25	3,27
45				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	3,07	3,08
46	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,19	0,01	2,89	3,09
47				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	2,73	2,74
48				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	2,58	2,59
49	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,16	0,01	2,43	2,60
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-3889,35	50,00	0,20	42,22	-211,15	2,71	0,01	2,29	-206,13

SM: Service Monitoring

Barwerte	6150,07	93,20	3,09	665,51	6911,88
Kapitalwert					6911,88



Tab. 12.39: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 4

Variante 4 - Verlegung im Tunnel - Rohrvortrieb					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	7759,86	-	-	-	7759,86	-	-	-	7759,86
1				0,20	42,40	0,00	0,00	0,19	40,00	40,19
2				0,20	42,40	0,00	0,00	0,17	37,74	37,91
3	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	2,27	0,16	35,60	38,03
4				0,20	42,40	0,00	0,00	0,16	33,59	33,74
5				0,20	42,40	0,00	0,00	0,15	31,69	31,83
6	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,90	0,14	29,89	31,93
7				0,20	42,40	0,00	0,00	0,13	28,20	28,33
8				0,20	42,40	0,00	0,00	0,12	26,60	26,73
9	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,60	0,12	25,10	26,81
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,40	0,00	27,92	0,11	23,68	51,71
11				0,20	42,40	0,00	0,00	0,10	22,34	22,44
12	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,34	0,10	21,07	22,51
13				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	19,88	19,97
14				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	18,76	18,84
15	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,13	0,08	17,69	18,90
16				0,20	42,40	0,00	0,00	0,08	16,69	16,77
17				0,20	42,40	0,00	0,00	0,07	15,75	15,82
18	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,95	0,07	14,86	15,87
19				0,20	42,40	0,00	0,00	0,06	14,02	14,08
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,40	0,00	31,18	0,06	13,22	44,46
21	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,79	0,06	12,47	13,33
22				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,77	11,82
23				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,10	11,15
24	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,67	0,05	10,47	11,19
25				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	9,88	9,93
26				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	9,32	9,36
27	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,56	0,04	8,79	9,39
28				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	8,30	8,33
29				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	7,83	7,86
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		52,70	0,20	42,40	0,00	9,18	0,03	7,38	16,59
31				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,97	7,00
32				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,57	6,60
33	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,39	0,03	6,20	6,62
34				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,85	5,88
35				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,52	5,54
36	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,33	0,02	5,20	5,56
37				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,91	4,93
38				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,63	4,65
39				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,37	4,39
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4677,46	100,00	0,20	42,40	454,75	9,72	0,02	4,12	468,62
41				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,89	3,91
42				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,67	3,69
43	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,22	0,02	3,46	3,70
44				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,27	3,28
45				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	3,08	3,09
46	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,19	0,01	2,91	3,10
47				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,59	2,60
49	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,16	0,01	2,44	2,61
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-4889,35	50,00	0,20	42,40	-265,43	2,71	0,01	2,30	-260,41

SM: Service Monitoring

Barwerte	7949,18	93,20	3,09	668,37	8713,84
Kapitalwert					8713,84

Tab. 12.40: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 5

Variante 5 - Verlegung im Tunnel - Bergmännischer Vortrieb					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	10059,86	-	-	-	10059,86	-	-	-	10059,86
1				0,20	42,40	0,00	0,00	0,19	40,00	40,19
2				0,20	42,40	0,00	0,00	0,17	37,74	37,91
3	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	2,27	0,16	35,60	38,03
4				0,20	42,40	0,00	0,00	0,16	33,59	33,74
5				0,20	42,40	0,00	0,00	0,15	31,69	31,83
6	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,90	0,14	29,89	31,93
7				0,20	42,40	0,00	0,00	0,13	28,20	28,33
8				0,20	42,40	0,00	0,00	0,12	26,60	26,73
9	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,60	0,12	25,10	26,81
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,40	0,00	27,92	0,11	23,68	51,71
11				0,20	42,40	0,00	0,00	0,10	22,34	22,44
12	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,34	0,10	21,07	22,51
13				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	19,88	19,97
14				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	18,76	18,84
15	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,13	0,08	17,69	18,90
16				0,20	42,40	0,00	0,00	0,08	16,69	16,77
17				0,20	42,40	0,00	0,00	0,07	15,75	15,82
18	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,95	0,07	14,86	15,87
19				0,20	42,40	0,00	0,00	0,06	14,02	14,08
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,40	0,00	31,18	0,06	13,22	44,46
21	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,79	0,06	12,47	13,33
22				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,77	11,82
23				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,10	11,15
24	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,67	0,05	10,47	11,19
25				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	9,88	9,93
26				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	9,32	9,36
27	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,56	0,04	8,79	9,39
28				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	8,30	8,33
29				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	7,83	7,86
30	Generalüberholung Kühlanlage, SM		52,70	0,20	42,40	0,00	9,18	0,03	7,38	16,59
31				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,97	7,00
32				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,57	6,60
33	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,39	0,03	6,20	6,62
34				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,85	5,88
35				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,52	5,54
36	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,33	0,02	5,20	5,56
37				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,91	4,93
38				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,63	4,65
39				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,37	4,39
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4677,46	100,00	0,20	42,40	454,75	9,72	0,02	4,12	468,62
41				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,89	3,91
42	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,23	0,02	3,67	3,92
43				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,46	3,48
44				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,27	3,28
45	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,20	0,01	3,08	3,29
46				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,91	2,92
47				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,16	0,01	2,59	2,76
49				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,44	2,45
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-6039,35	50,00	0,20	42,40	-327,87	2,71	0,01	2,30	-322,84

SM: Service Monitoring

Barwerte	10186,75	93,24	3,09	668,37	10951,44
Kapitalwert					10951,44

12.2.4. Kapitalwertermittlung für eine Kabellebensdauer von 30 Jahren - Sensitivität

Tab. 12.41: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 1

Variante 1 - Direkte Erdverlegung					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte				
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Investitionskosten	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten		Investitionskosten	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten		
€/m	€/m a	€/m a	€/m	€/m a	€/m a	€/m				
0	Erstinvestition	5664,06	-	-	-	5664,06	-	-	-	5664,06
1				0,38	39,56	0,00	0,00	0,36	37,32	37,68
2				0,38	39,56	0,00	0,00	0,34	35,21	35,55
3	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	2,27	0,32	33,22	35,80
4				0,38	39,56	0,00	0,00	0,30	31,34	31,64
5				0,38	39,56	0,00	0,00	0,28	29,56	29,85
6	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,90	0,27	27,89	30,06
7				0,38	39,56	0,00	0,00	0,25	26,31	26,56
8				0,38	39,56	0,00	0,00	0,24	24,82	25,06
9	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,60	0,22	23,42	25,24
10	Generalüberholung Kühlanlage		100,00	0,38	39,56	0,00	55,84	0,21	22,09	78,14
11				0,38	39,56	0,00	0,00	0,20	20,84	21,04
12	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,34	0,19	19,66	21,19
13				0,38	39,56	0,00	0,00	0,18	18,55	18,73
14				0,38	39,56	0,00	0,00	0,17	17,50	17,67
15	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,13	0,16	16,51	17,79
16				0,38	39,56	0,00	0,00	0,15	15,57	15,72
17				0,38	39,56	0,00	0,00	0,14	14,69	14,83
18	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,95	0,13	13,86	14,94
19				0,38	39,56	0,00	0,00	0,13	13,08	13,20
20	Reinvestition Kühlanlage		200,00	0,38	39,56	0,00	62,36	0,12	12,34	74,81
21	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,79	0,11	11,64	12,54
22				0,38	39,56	0,00	0,00	0,11	10,98	11,08
23				0,38	39,56	0,00	0,00	0,10	10,36	10,46
24	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,67	0,09	9,77	10,53
25				0,38	39,56	0,00	0,00	0,09	9,22	9,31
26				0,38	39,56	0,00	0,00	0,08	8,70	8,78
27	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,56	0,08	8,20	8,84
28				0,38	39,56	0,00	0,00	0,07	7,74	7,81
29				0,38	39,56	0,00	0,00	0,07	7,30	7,37
30	Reinvest. Anlage, GÜ Kühlanlage, SM	4302,46	102,70	0,38	39,56	749,10	17,88	0,07	6,89	773,94
31				0,38	39,56	0,00	0,00	0,06	6,50	6,56
32				0,38	39,56	0,00	0,00	0,06	6,13	6,19
33	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,39	0,06	5,78	6,23
34				0,38	39,56	0,00	0,00	0,05	5,46	5,51
35				0,38	39,56	0,00	0,00	0,05	5,15	5,20
36	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,33	0,05	4,86	5,23
37				0,38	39,56	0,00	0,00	0,04	4,58	4,62
38				0,38	39,56	0,00	0,00	0,04	4,32	4,36
39	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,28	0,04	4,08	4,39
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	850,40	200,00	0,38	39,56	82,68	19,44	0,04	3,85	106,01
41				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,63	3,66
42	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,23	0,03	3,42	3,69
43				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,23	3,26
44				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,05	3,08
45	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,20	0,03	2,87	3,10
46				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	2,71	2,74
47				0,38	39,56	0,00	0,00	0,02	2,56	2,58
48	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,16	0,02	2,41	2,60
49				0,38	39,56	0,00	0,00	0,02	2,28	2,30
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-2088,62	100,00	0,38	39,56	-113,39	5,43	0,02	2,15	-105,79

SM: Service Monitoring

Barwerte	6382,45	173,76	5,96	623,56	7185,73
Kapitalwert					7185,73

Tab. 12.42: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 1A

Variante 1A-OK-MR - Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - mit Kühlrohren					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5464,06	-	-	-	5464,06	-	-	-	5464,06
1				0,38	5,01	0,00	0,00	0,36	4,73	5,09
2				0,38	5,01	0,00	0,00	0,34	4,46	4,80
3	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	2,27	0,32	4,21	6,79
4				0,38	5,01	0,00	0,00	0,30	3,97	4,27
5				0,38	5,01	0,00	0,00	0,28	3,75	4,03
6	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,90	0,27	3,53	5,70
7				0,38	5,01	0,00	0,00	0,25	3,33	3,59
8				0,38	5,01	0,00	0,00	0,24	3,15	3,38
9	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,60	0,22	2,97	4,79
10				0,38	5,01	0,00	0,00	0,21	2,80	3,01
11				0,38	5,01	0,00	0,00	0,20	2,64	2,84
12	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,34	0,19	2,49	4,02
13				0,38	5,01	0,00	0,00	0,18	2,35	2,53
14				0,38	5,01	0,00	0,00	0,17	2,22	2,38
15	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,13	0,16	2,09	3,38
16				0,38	5,01	0,00	0,00	0,15	1,97	2,12
17				0,38	5,01	0,00	0,00	0,14	1,86	2,00
18	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,95	0,13	1,76	2,84
19				0,38	5,01	0,00	0,00	0,13	1,66	1,78
20				0,38	5,01	0,00	0,00	0,12	1,56	1,68
21	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,79	0,11	1,47	2,38
22				0,38	5,01	0,00	0,00	0,11	1,39	1,50
23				0,38	5,01	0,00	0,00	0,10	1,31	1,41
24	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,67	0,09	1,24	2,00
25				0,38	5,01	0,00	0,00	0,09	1,17	1,26
26				0,38	5,01	0,00	0,00	0,08	1,10	1,19
27	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,56	0,08	1,04	1,68
28				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,98	1,05
29				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,93	1,00
30	Reinvestition Anlage, SM	4302,46	2,70	0,38	5,01	749,10	0,47	0,07	0,87	750,51
31				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,82	0,89
32				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,78	0,84
33	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,39	0,06	0,73	1,18
34				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,69	0,74
35				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,65	0,70
36	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,33	0,05	0,62	0,99
37				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,58	0,62
38				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,55	0,59
39	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,28	0,04	0,52	0,83
40	Reinvestition Anlage	850,40		0,38	5,01	82,68	0,00	0,04	0,49	83,20
41				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,46	0,49
42	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,23	0,03	0,43	0,70
43				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,41	0,44
44				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,39	0,42
45	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,20	0,03	0,36	0,59
46				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,34	0,37
47				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,32	0,35
48	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,16	0,02	0,31	0,49
49				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,29	0,31
50	Restwert Kabelanlage	-1988,62		0,38	5,01	-107,96	0,00	0,02	0,27	-107,67

SM: Service Monitoring

Barwerte	6187,88	13,27	5,96	79,03	6286,14
Kapitalwert					6286,14

Tab. 12.43: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 1B

Variante 1B-OK-OR - Direkte Erdverlegung - Ohne Kühlung - ohne Kühlrohre					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5364,06	-	-	-	5364,06	-	-	-	5364,06
1				0,38	5,01	0,00	0,00	0,36	4,73	5,09
2				0,38	5,01	0,00	0,00	0,34	4,46	4,80
3	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	2,27	0,32	4,21	6,79
4				0,38	5,01	0,00	0,00	0,30	3,97	4,27
5				0,38	5,01	0,00	0,00	0,28	3,75	4,03
6	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,90	0,27	3,53	5,70
7				0,38	5,01	0,00	0,00	0,25	3,33	3,59
8				0,38	5,01	0,00	0,00	0,24	3,15	3,38
9	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,60	0,22	2,97	4,79
10				0,38	5,01	0,00	0,00	0,21	2,80	3,01
11				0,38	5,01	0,00	0,00	0,20	2,64	2,84
12	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,34	0,19	2,49	4,02
13				0,38	5,01	0,00	0,00	0,18	2,35	2,53
14				0,38	5,01	0,00	0,00	0,17	2,22	2,38
15	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,13	0,16	2,09	3,38
16				0,38	5,01	0,00	0,00	0,15	1,97	2,12
17				0,38	5,01	0,00	0,00	0,14	1,86	2,00
18	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,95	0,13	1,76	2,84
19				0,38	5,01	0,00	0,00	0,13	1,66	1,78
20				0,38	5,01	0,00	0,00	0,12	1,56	1,68
21	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,79	0,11	1,47	2,38
22				0,38	5,01	0,00	0,00	0,11	1,39	1,50
23				0,38	5,01	0,00	0,00	0,10	1,31	1,41
24	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,67	0,09	1,24	2,00
25				0,38	5,01	0,00	0,00	0,09	1,17	1,26
26				0,38	5,01	0,00	0,00	0,08	1,10	1,19
27	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,56	0,08	1,04	1,68
28				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,98	1,05
29				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,93	1,00
30	Reinvestition Anlage, SM	4202,46	2,70	0,38	5,01	731,69	0,47	0,07	0,87	733,10
31				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,82	0,89
32				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,78	0,84
33	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,39	0,06	0,73	1,18
34				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,69	0,74
35				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,65	0,70
36	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,33	0,05	0,62	0,99
37				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,58	0,62
38				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,55	0,59
39	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,28	0,04	0,52	0,83
40	Reinvestition Anlage	850,40		0,38	5,01	82,68	0,00	0,04	0,49	83,20
41				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,46	0,49
42	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,23	0,03	0,43	0,70
43				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,41	0,44
44				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,39	0,42
45	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,20	0,03	0,36	0,59
46				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,34	0,37
47				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,32	0,35
48	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,16	0,02	0,31	0,49
49				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,29	0,31
50	Restwert Kabelanlage	-1955,29		0,38	5,01	-106,15	0,00	0,02	0,27	-105,86

SM: Service Monitoring

Barwerte	6072,28	13,27	5,96	79,03	6170,54
Kapitalwert					6170,54

Tab. 12.44: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 2

Variante 2 - Verlegung im Schutzrohr					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5894,06	-	-	-	5894,06	-	-	-	5894,06
1				0,38	4,78	0,00	0,00	0,36	4,51	4,87
2				0,38	4,78	0,00	0,00	0,34	4,26	4,59
3	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	2,27	0,32	4,02	6,60
4				0,38	4,78	0,00	0,00	0,30	3,79	4,09
5				0,38	4,78	0,00	0,00	0,28	3,57	3,86
6	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,90	0,27	3,37	5,54
7				0,38	4,78	0,00	0,00	0,25	3,18	3,43
8				0,38	4,78	0,00	0,00	0,24	3,00	3,24
9	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,60	0,22	2,83	4,65
10				0,38	4,78	0,00	0,00	0,21	2,67	2,88
11				0,38	4,78	0,00	0,00	0,20	2,52	2,72
12	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,34	0,19	2,38	3,91
13				0,38	4,78	0,00	0,00	0,18	2,24	2,42
14				0,38	4,78	0,00	0,00	0,17	2,12	2,28
15	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,13	0,16	2,00	3,28
16				0,38	4,78	0,00	0,00	0,15	1,88	2,03
17				0,38	4,78	0,00	0,00	0,14	1,78	1,92
18	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,95	0,13	1,68	2,75
19				0,38	4,78	0,00	0,00	0,13	1,58	1,71
20				0,38	4,78	0,00	0,00	0,12	1,49	1,61
21	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,79	0,11	1,41	2,31
22				0,38	4,78	0,00	0,00	0,11	1,33	1,43
23				0,38	4,78	0,00	0,00	0,10	1,25	1,35
24	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,67	0,09	1,18	1,94
25				0,38	4,78	0,00	0,00	0,09	1,11	1,20
26				0,38	4,78	0,00	0,00	0,08	1,05	1,13
27	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,56	0,08	0,99	1,63
28				0,38	4,78	0,00	0,00	0,07	0,94	1,01
29				0,38	4,78	0,00	0,00	0,07	0,88	0,95
30	Reinvestition Anlage, SM	3842,46	2,70	0,38	4,78	669,01	0,47	0,07	0,83	670,38
31				0,38	4,78	0,00	0,00	0,06	0,79	0,85
32				0,38	4,78	0,00	0,00	0,06	0,74	0,80
33	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,39	0,06	0,70	1,15
34				0,38	4,78	0,00	0,00	0,05	0,66	0,71
35				0,38	4,78	0,00	0,00	0,05	0,62	0,67
36	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,33	0,05	0,59	0,97
37				0,38	4,78	0,00	0,00	0,04	0,55	0,60
38				0,38	4,78	0,00	0,00	0,04	0,52	0,56
39	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,28	0,04	0,49	0,81
40	Reinvestition Anlage	1740,40		0,38	4,78	169,21	0,00	0,04	0,47	169,71
41				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,44	0,47
42	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,23	0,03	0,41	0,68
43				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,39	0,42
44				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,37	0,40
45	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,20	0,03	0,35	0,57
46				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,33	0,35
47				0,38	4,78	0,00	0,00	0,02	0,31	0,33
48	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,16	0,02	0,29	0,48
49				0,38	4,78	0,00	0,00	0,02	0,28	0,30
50	Restwert Kabelanlage	-2556,12		0,38	4,78	-138,77	0,00	0,02	0,26	-138,49
SM: Service Monitoring					<b>Barwerte</b>	6593,51	13,27	5,96	75,40	6688,15
					<b>Kapitalwert</b>					<b>6688,15</b>

Tab. 12.45: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 3

Variante 3 - Verlegung im oberflächennahen Tunnel - Fertigteil					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	7586,46	-	-	-	7586,46	-	-	-	7586,46
1				0,20	42,31	0,00	0,00	0,19	39,92	40,10
2				0,20	42,31	0,00	0,00	0,17	37,66	37,83
3	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	2,27	0,16	35,53	37,96
4				0,20	42,31	0,00	0,00	0,16	33,52	33,67
5				0,20	42,31	0,00	0,00	0,15	31,62	31,76
6	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,90	0,14	29,83	31,87
7				0,20	42,31	0,00	0,00	0,13	28,14	28,27
8				0,20	42,31	0,00	0,00	0,12	26,55	26,67
9	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,60	0,12	25,04	26,76
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,31	0,00	27,92	0,11	23,63	51,66
11				0,20	42,31	0,00	0,00	0,10	22,29	22,39
12	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,34	0,10	21,03	22,47
13				0,20	42,31	0,00	0,00	0,09	19,84	19,93
14				0,20	42,31	0,00	0,00	0,09	18,71	18,80
15	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,13	0,08	17,66	18,86
16				0,20	42,31	0,00	0,00	0,08	16,66	16,73
17				0,20	42,31	0,00	0,00	0,07	15,71	15,79
18	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,95	0,07	14,82	15,84
19				0,20	42,31	0,00	0,00	0,06	13,98	14,05
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,31	0,00	31,18	0,06	13,19	44,43
21	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,79	0,06	12,45	13,30
22				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	11,74	11,80
23				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	11,08	11,13
24	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,67	0,05	10,45	11,17
25				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	9,86	9,90
26				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	9,30	9,34
27	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,56	0,04	8,77	9,37
28				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	8,28	8,32
29				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	7,81	7,85
30	Reinvest. Anlage, GÜ Kühlanlage, SM	3777,46	52,70	0,20	42,31	657,69	9,18	0,03	7,37	674,27
31				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	6,95	6,98
32				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	6,56	6,59
33	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,39	0,03	6,19	6,61
34				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	5,84	5,86
35				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	5,51	5,53
36	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,33	0,02	5,19	5,55
37				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	4,90	4,92
38				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	4,62	4,64
39	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,28	0,02	4,36	4,66
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	900,00	100,00	0,20	42,31	87,50	9,72	0,02	4,11	101,35
41				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,88	3,90
42	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,23	0,02	3,66	3,91
43				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,45	3,47
44				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,26	3,27
45	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,20	0,01	3,07	3,28
46				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	2,90	2,91
47				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,16	0,01	2,58	2,76
49				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	2,43	2,45
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-3165,82	50,00	0,20	42,31	-171,87	2,71	0,01	2,30	-166,85

SM: Service Monitoring

Barwerte	8159,79	93,52	3,09	666,92	8923,32
Kapitalwert					8923,32

Tab. 12.46: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 3A

Variante 3A - Verlegung im Gewölbetunnel					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5906,46	-	-	-	5906,46	-	-	-	5906,46
1				0,20	42,22	0,00	0,00	0,19	39,83	40,02
2				0,20	42,22	0,00	0,00	0,17	37,58	37,75
3	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	2,27	0,16	35,45	37,88
4				0,20	42,22	0,00	0,00	0,16	33,44	33,60
5				0,20	42,22	0,00	0,00	0,15	31,55	31,70
6	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,90	0,14	29,77	31,81
7				0,20	42,22	0,00	0,00	0,13	28,08	28,21
8				0,20	42,22	0,00	0,00	0,12	26,49	26,61
9	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,60	0,12	24,99	26,71
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,22	0,00	27,92	0,11	23,58	51,61
11				0,20	42,22	0,00	0,00	0,10	22,24	22,35
12	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,34	0,10	20,98	22,42
13				0,20	42,22	0,00	0,00	0,09	19,80	19,89
14				0,20	42,22	0,00	0,00	0,09	18,68	18,76
15	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,13	0,08	17,62	18,83
16				0,20	42,22	0,00	0,00	0,08	16,62	16,70
17				0,20	42,22	0,00	0,00	0,07	15,68	15,75
18	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,95	0,07	14,79	15,81
19				0,20	42,22	0,00	0,00	0,06	13,96	14,02
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,22	0,00	31,18	0,06	13,17	44,41
21	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,79	0,06	12,42	13,27
22				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	11,72	11,77
23				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	11,05	11,11
24	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,67	0,05	10,43	11,14
25				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	9,84	9,88
26				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	9,28	9,32
27	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,56	0,04	8,76	9,36
28				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	8,26	8,30
29				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	7,79	7,83
30	Reinvest. Anlage, GÜ Kühlanlage, SM	3777,46	52,70	0,20	42,22	657,69	9,18	0,03	7,35	674,26
31				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	6,94	6,97
32				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	6,54	6,57
33	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,39	0,03	6,17	6,60
34				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	5,82	5,85
35				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	5,49	5,52
36	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,33	0,02	5,18	5,54
37				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	4,89	4,91
38				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	4,61	4,63
39	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,28	0,02	4,35	4,65
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	900,00	100,00	0,20	42,22	87,50	9,72	0,02	4,11	101,35
41				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,87	3,89
42	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,23	0,02	3,65	3,90
43				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,45	3,46
44				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,25	3,27
45	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,20	0,01	3,07	3,28
46				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	2,89	2,91
47				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	2,73	2,74
48	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,16	0,01	2,58	2,75
49				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	2,43	2,44
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-2325,82	50,00	0,20	42,22	-126,26	2,71	0,01	2,29	-121,25

SM: Service Monitoring

Barwerte	6525,39	93,52	3,09	665,51	7287,51
Kapitalwert					7287,51



Tab. 12.47: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 4

Variante 4 - Verlegung im Tunnel - Rohrvortrieb					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	7759,86	-	-	-	7759,86	-	-	-	7759,86
1				0,20	42,40	0,00	0,00	0,19	40,00	40,19
2				0,20	42,40	0,00	0,00	0,17	37,74	37,91
3	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	2,27	0,16	35,60	38,03
4				0,20	42,40	0,00	0,00	0,16	33,59	33,74
5				0,20	42,40	0,00	0,00	0,15	31,69	31,83
6	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,90	0,14	29,89	31,93
7				0,20	42,40	0,00	0,00	0,13	28,20	28,33
8				0,20	42,40	0,00	0,00	0,12	26,60	26,73
9	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,60	0,12	25,10	26,81
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,40	0,00	27,92	0,11	23,68	51,71
11				0,20	42,40	0,00	0,00	0,10	22,34	22,44
12	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,34	0,10	21,07	22,51
13				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	19,88	19,97
14				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	18,76	18,84
15	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,13	0,08	17,69	18,90
16				0,20	42,40	0,00	0,00	0,08	16,69	16,77
17				0,20	42,40	0,00	0,00	0,07	15,75	15,82
18	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,95	0,07	14,86	15,87
19				0,20	42,40	0,00	0,00	0,06	14,02	14,08
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,40	0,00	31,18	0,06	13,22	44,46
21	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,79	0,06	12,47	13,33
22				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,77	11,82
23				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,10	11,15
24	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,67	0,05	10,47	11,19
25				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	9,88	9,93
26				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	9,32	9,36
27	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,56	0,04	8,79	9,39
28				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	8,30	8,33
29				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	7,83	7,86
30	Reinvest. Anlage, GÜ Kühlanlage, SM	3777,46	52,70	0,20	42,40	657,69	9,18	0,03	7,38	674,29
31				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,97	7,00
32				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,57	6,60
33	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,39	0,03	6,20	6,62
34				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,85	5,88
35				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,52	5,54
36	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,33	0,02	5,20	5,56
37				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,91	4,93
38				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,63	4,65
39	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,28	0,02	4,37	4,67
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	900,00	100,00	0,20	42,40	87,50	9,72	0,02	4,12	101,36
41				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,89	3,91
42	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,23	0,02	3,67	3,92
43				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,46	3,48
44				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,27	3,28
45	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,20	0,01	3,08	3,29
46				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,91	2,92
47				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,16	0,01	2,59	2,76
49				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,44	2,45
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-3325,82	50,00	0,20	42,40	-180,55	2,71	0,01	2,30	-175,53

SM: Service Monitoring

Barwerte	8324,50	93,52	3,09	668,37	9089,47
Kapitalwert					9089,47

Tab. 12.48: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 5

Variante 5 - Verlegung im Tunnel - Bergmännischer Vortrieb					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	10059,86	-	-	-	10059,86	-	-	-	10059,86
1				0,20	42,40	0,00	0,00	0,19	40,00	40,19
2				0,20	42,40	0,00	0,00	0,17	37,74	37,91
3	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	2,27	0,16	35,60	38,03
4				0,20	42,40	0,00	0,00	0,16	33,59	33,74
5				0,20	42,40	0,00	0,00	0,15	31,69	31,83
6	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,90	0,14	29,89	31,93
7				0,20	42,40	0,00	0,00	0,13	28,20	28,33
8				0,20	42,40	0,00	0,00	0,12	26,60	26,73
9	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,60	0,12	25,10	26,81
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,40	0,00	27,92	0,11	23,68	51,71
11				0,20	42,40	0,00	0,00	0,10	22,34	22,44
12	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,34	0,10	21,07	22,51
13				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	19,88	19,97
14				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	18,76	18,84
15	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,13	0,08	17,69	18,90
16				0,20	42,40	0,00	0,00	0,08	16,69	16,77
17				0,20	42,40	0,00	0,00	0,07	15,75	15,82
18	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,95	0,07	14,86	15,87
19				0,20	42,40	0,00	0,00	0,06	14,02	14,08
20	Reinvestition Kühlanlage		100,00	0,20	42,40	0,00	31,18	0,06	13,22	44,46
21	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,79	0,06	12,47	13,33
22				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,77	11,82
23				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,10	11,15
24	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,67	0,05	10,47	11,19
25				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	9,88	9,93
26				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	9,32	9,36
27	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,56	0,04	8,79	9,39
28				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	8,30	8,33
29				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	7,83	7,86
30	Reinvest. Anlage, GÜ Kühlanlage, SM	3777,46	52,70	0,20	42,40	657,69	9,18	0,03	7,38	674,29
31				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,97	7,00
32				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,57	6,60
33	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,39	0,03	6,20	6,62
34				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,85	5,88
35				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,52	5,54
36	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,33	0,02	5,20	5,56
37				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,91	4,93
38				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,63	4,65
39	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,28	0,02	4,37	4,67
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	900,00	100,00	0,20	42,40	87,50	9,72	0,02	4,12	101,36
41				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,89	3,91
42	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,23	0,02	3,67	3,92
43				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,46	3,48
44				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,27	3,28
45	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,20	0,01	3,08	3,29
46				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,91	2,92
47				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,16	0,01	2,59	2,76
49				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,44	2,45
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-4475,82	50,00	0,20	42,40	-242,98	2,71	0,01	2,30	-237,96

SM: Service Monitoring

Barwerte	10562,07	93,52	3,09	668,37	11327,04
Kapitalwert					11327,04

12.2.5. Kapitalwertermittlung für eine Kabellebensdauer von 20 Jahren - Sensitivität

Tab. 12.49: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 1

Variante 1 - Direkte Erdverlegung					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte				
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Investitionskosten	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten		Investitionskosten	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten		
€/m		€/m a		€/m		€/m a		€/m		
0	Erstinvestition	5664,06	-	-	-	5664,06	-	-	-	5664,06
1				0,38	39,56	0,00	0,00	0,36	37,32	37,68
2				0,38	39,56	0,00	0,00	0,34	35,21	35,55
3	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	2,27	0,32	33,22	35,80
4				0,38	39,56	0,00	0,00	0,30	31,34	31,64
5				0,38	39,56	0,00	0,00	0,28	29,56	29,85
6	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,90	0,27	27,89	30,06
7				0,38	39,56	0,00	0,00	0,25	26,31	26,56
8				0,38	39,56	0,00	0,00	0,24	24,82	25,06
9	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,60	0,22	23,42	25,24
10	Generalüberholung Kühlanlage		100,00	0,38	39,56	0,00	55,84	0,21	22,09	78,14
11				0,38	39,56	0,00	0,00	0,20	20,84	21,04
12	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,34	0,19	19,66	21,19
13				0,38	39,56	0,00	0,00	0,18	18,55	18,73
14				0,38	39,56	0,00	0,00	0,17	17,50	17,67
15	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	1,13	0,16	16,51	17,79
16				0,38	39,56	0,00	0,00	0,15	15,57	15,72
17				0,38	39,56	0,00	0,00	0,14	14,69	14,83
18	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,95	0,13	13,86	14,94
19				0,38	39,56	0,00	0,00	0,13	13,08	13,20
20	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4302,46	200,00	0,38	39,56	1341,53	62,36	0,12	12,34	1416,34
21				0,38	39,56	0,00	0,00	0,11	11,64	11,75
22				0,38	39,56	0,00	0,00	0,11	10,98	11,08
23	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,71	0,10	10,36	11,16
24				0,38	39,56	0,00	0,00	0,09	9,77	9,86
25				0,38	39,56	0,00	0,00	0,09	9,22	9,31
26	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,59	0,08	8,70	9,37
27				0,38	39,56	0,00	0,00	0,08	8,20	8,28
28				0,38	39,56	0,00	0,00	0,07	7,74	7,81
29	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,50	0,07	7,30	7,87
30	Generalüberholung Kühlanlage		100,00	0,38	39,56	0,00	17,41	0,07	6,89	24,36
31				0,38	39,56	0,00	0,00	0,06	6,50	6,56
32	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,42	0,06	6,13	6,61
33				0,38	39,56	0,00	0,00	0,06	5,78	5,84
34				0,38	39,56	0,00	0,00	0,05	5,46	5,51
35	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,35	0,05	5,15	5,55
36				0,38	39,56	0,00	0,00	0,05	4,86	4,90
37				0,38	39,56	0,00	0,00	0,04	4,58	4,62
38	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,29	0,04	4,32	4,66
39				0,38	39,56	0,00	0,00	0,04	4,08	4,12
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	5152,86	200,00	0,38	39,56	500,97	19,44	0,04	3,85	524,30
41				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,63	3,66
42				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,42	3,46
43	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,22	0,03	3,23	3,48
44				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	3,05	3,08
45				0,38	39,56	0,00	0,00	0,03	2,87	2,90
46	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,19	0,03	2,71	2,92
47				0,38	39,56	0,00	0,00	0,02	2,56	2,58
48				0,38	39,56	0,00	0,00	0,02	2,41	2,44
49	SM		2,70	0,38	39,56	0,00	0,16	0,02	2,28	2,45
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-2764,03	100,00	0,38	39,56	-150,05	5,43	0,02	2,15	-142,46

SM: Service Monitoring

Barwerte	7356,51	173,09	5,96	623,56	8159,12
Kapitalwert					8159,12

Tab. 12.50: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 1A

Variante 1A-OK-MR - Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - mit Kühlrohren										Kalkulationszinssatz: 6,00 %	
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte				Barwerte					
		Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Barwert der Kosten	
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]			
0	Erstinvestition	5464,06	-	-	-	5464,06	-	-	-	5464,06	
1				0,38	5,01	0,00	0,00	0,36	4,73	5,09	
2				0,38	5,01	0,00	0,00	0,34	4,46	4,80	
3	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	2,27	0,32	4,21	6,79	
4				0,38	5,01	0,00	0,00	0,30	3,97	4,27	
5				0,38	5,01	0,00	0,00	0,28	3,75	4,03	
6	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,90	0,27	3,53	5,70	
7				0,38	5,01	0,00	0,00	0,25	3,33	3,59	
8				0,38	5,01	0,00	0,00	0,24	3,15	3,38	
9	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,60	0,22	2,97	4,79	
10				0,38	5,01	0,00	0,00	0,21	2,80	3,01	
11				0,38	5,01	0,00	0,00	0,20	2,64	2,84	
12	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,34	0,19	2,49	4,02	
13				0,38	5,01	0,00	0,00	0,18	2,35	2,53	
14				0,38	5,01	0,00	0,00	0,17	2,22	2,38	
15	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,13	0,16	2,09	3,38	
16				0,38	5,01	0,00	0,00	0,15	1,97	2,12	
17				0,38	5,01	0,00	0,00	0,14	1,86	2,00	
18	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,95	0,13	1,76	2,84	
19				0,38	5,01	0,00	0,00	0,13	1,66	1,78	
20	Reinvestition Anlage	4302,46		0,38	5,01	1341,53	0,00	0,12	1,56	1343,21	
21				0,38	5,01	0,00	0,00	0,11	1,47	1,59	
22				0,38	5,01	0,00	0,00	0,11	1,39	1,50	
23	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,71	0,10	1,31	2,12	
24				0,38	5,01	0,00	0,00	0,09	1,24	1,33	
25				0,38	5,01	0,00	0,00	0,09	1,17	1,26	
26	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,59	0,08	1,10	1,78	
27				0,38	5,01	0,00	0,00	0,08	1,04	1,12	
28				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,98	1,05	
29	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,50	0,07	0,93	1,49	
30				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,87	0,94	
31				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,82	0,89	
32	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,42	0,06	0,78	1,25	
33				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,73	0,79	
34				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,69	0,74	
35	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,35	0,05	0,65	1,05	
36				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,62	0,66	
37				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,58	0,62	
38	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,29	0,04	0,55	0,88	
39				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,52	0,56	
40	Reinvestition Anlage	5152,86		0,38	5,01	500,97	0,00	0,04	0,49	501,50	
41				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,46	0,49	
42				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,43	0,47	
43	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,22	0,03	0,41	0,66	
44				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,39	0,42	
45				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,36	0,39	
46	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,19	0,03	0,34	0,55	
47				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,32	0,35	
48				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,31	0,33	
49	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,16	0,02	0,29	0,47	
50	Restwert Kabelanlage	-2664,03		0,38	5,01	-144,63	0,00	0,02	0,27	-144,33	

SM: Service Monitoring

Barwerte	7161,93	12,61	5,96	79,03	7259,53
Kapitalwert					7259,53

Tab. 12.51: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 1B

Variante 1B-OK-OR - Direkte Erdverlegung - Ohne Kühlung - ohne Kühlrohre					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5364,06	-	-	-	5364,06	-	-	-	5364,06
1				0,38	5,01	0,00	0,00	0,36	4,73	5,09
2				0,38	5,01	0,00	0,00	0,34	4,46	4,80
3	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	2,27	0,32	4,21	6,79
4				0,38	5,01	0,00	0,00	0,30	3,97	4,27
5				0,38	5,01	0,00	0,00	0,28	3,75	4,03
6	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,90	0,27	3,53	5,70
7				0,38	5,01	0,00	0,00	0,25	3,33	3,59
8				0,38	5,01	0,00	0,00	0,24	3,15	3,38
9	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,60	0,22	2,97	4,79
10				0,38	5,01	0,00	0,00	0,21	2,80	3,01
11				0,38	5,01	0,00	0,00	0,20	2,64	2,84
12	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,34	0,19	2,49	4,02
13				0,38	5,01	0,00	0,00	0,18	2,35	2,53
14				0,38	5,01	0,00	0,00	0,17	2,22	2,38
15	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	1,13	0,16	2,09	3,38
16				0,38	5,01	0,00	0,00	0,15	1,97	2,12
17				0,38	5,01	0,00	0,00	0,14	1,86	2,00
18	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,95	0,13	1,76	2,84
19				0,38	5,01	0,00	0,00	0,13	1,66	1,78
20	Reinvestition Anlage	4202,46		0,38	5,01	1310,35	0,00	0,12	1,56	1312,03
21				0,38	5,01	0,00	0,00	0,11	1,47	1,59
22				0,38	5,01	0,00	0,00	0,11	1,39	1,50
23	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,71	0,10	1,31	2,12
24				0,38	5,01	0,00	0,00	0,09	1,24	1,33
25				0,38	5,01	0,00	0,00	0,09	1,17	1,26
26	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,59	0,08	1,10	1,78
27				0,38	5,01	0,00	0,00	0,08	1,04	1,12
28				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,98	1,05
29	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,50	0,07	0,93	1,49
30				0,38	5,01	0,00	0,00	0,07	0,87	0,94
31				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,82	0,89
32	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,42	0,06	0,78	1,25
33				0,38	5,01	0,00	0,00	0,06	0,73	0,79
34				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,69	0,74
35	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,35	0,05	0,65	1,05
36				0,38	5,01	0,00	0,00	0,05	0,62	0,66
37				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,58	0,62
38	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,29	0,04	0,55	0,88
39				0,38	5,01	0,00	0,00	0,04	0,52	0,56
40	Reinvestition Anlage	5052,86		0,38	5,01	491,25	0,00	0,04	0,49	491,77
41				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,46	0,49
42				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,43	0,47
43	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,22	0,03	0,41	0,66
44				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,39	0,42
45				0,38	5,01	0,00	0,00	0,03	0,36	0,39
46	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,19	0,03	0,34	0,55
47				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,32	0,35
48				0,38	5,01	0,00	0,00	0,02	0,31	0,33
49	SM		2,70	0,38	5,01	0,00	0,16	0,02	0,29	0,47
50	Restwert Kabelanlage	-2614,03		0,38	5,01	-141,91	0,00	0,02	0,27	-141,62

SM: Service Monitoring

Barwerte	7023,75	12,61	5,96	79,03	7121,34
Kapitalwert					7121,34

Tab. 12.52: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 2

Variante 2 - Verlegung im Schutzrohr		Kalkulationszinssatz: 6,00 %								
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte				Barwerte				
		Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Kosten der Infrastruktur			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5894,06	-	-	-	5894,06	-	-	-	5894,06
1				0,38	4,78	0,00	0,00	0,36	4,51	4,87
2				0,38	4,78	0,00	0,00	0,34	4,26	4,59
3	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	2,27	0,32	4,02	6,60
4				0,38	4,78	0,00	0,00	0,30	3,79	4,09
5				0,38	4,78	0,00	0,00	0,28	3,57	3,86
6	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,90	0,27	3,37	5,54
7				0,38	4,78	0,00	0,00	0,25	3,18	3,43
8				0,38	4,78	0,00	0,00	0,24	3,00	3,24
9	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,60	0,22	2,83	4,65
10				0,38	4,78	0,00	0,00	0,21	2,67	2,88
11				0,38	4,78	0,00	0,00	0,20	2,52	2,72
12	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,34	0,19	2,38	3,91
13				0,38	4,78	0,00	0,00	0,18	2,24	2,42
14				0,38	4,78	0,00	0,00	0,17	2,12	2,28
15	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	1,13	0,16	2,00	3,28
16				0,38	4,78	0,00	0,00	0,15	1,88	2,03
17				0,38	4,78	0,00	0,00	0,14	1,78	1,92
18	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,95	0,13	1,68	2,75
19				0,38	4,78	0,00	0,00	0,13	1,58	1,71
20	Reinvestition Anlage	3842,46		0,38	4,78	1198,10	0,00	0,12	1,49	1199,71
21			2,70	0,38	4,78	0,00	0,79	0,11	1,41	2,31
22				0,38	4,78	0,00	0,00	0,11	1,33	1,43
23	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,71	0,10	1,25	2,06
24				0,38	4,78	0,00	0,00	0,09	1,18	1,27
25				0,38	4,78	0,00	0,00	0,09	1,11	1,20
26	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,59	0,08	1,05	1,73
27				0,38	4,78	0,00	0,00	0,08	0,99	1,07
28				0,38	4,78	0,00	0,00	0,07	0,94	1,01
29	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,50	0,07	0,88	1,45
30				0,38	4,78	0,00	0,00	0,07	0,83	0,90
31				0,38	4,78	0,00	0,00	0,06	0,79	0,85
32	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,42	0,06	0,74	1,22
33				0,38	4,78	0,00	0,00	0,06	0,70	0,75
34				0,38	4,78	0,00	0,00	0,05	0,66	0,71
35	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,35	0,05	0,62	1,02
36				0,38	4,78	0,00	0,00	0,05	0,59	0,63
37				0,38	4,78	0,00	0,00	0,04	0,55	0,60
38	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,29	0,04	0,52	0,86
39				0,38	4,78	0,00	0,00	0,04	0,49	0,53
40	Reinvestition Anlage	5582,86		0,38	4,78	542,78	0,00	0,04	0,47	543,28
41				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,44	0,47
42				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,41	0,45
43	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,22	0,03	0,39	0,64
44				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,37	0,40
45				0,38	4,78	0,00	0,00	0,03	0,35	0,38
46	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,19	0,03	0,33	0,54
47				0,38	4,78	0,00	0,00	0,02	0,31	0,33
48				0,38	4,78	0,00	0,00	0,02	0,29	0,31
49	SM		2,70	0,38	4,78	0,00	0,16	0,02	0,28	0,45
50	Restwert Kabelanlage	-3181,53		0,38	4,78	-172,72	0,00	0,02	0,26	-172,44

SM: Service Monitoring

Barwerte	7462,22	13,40	5,96	75,40	7556,98
Kapitalwert					7556,98

Tab. 12.53: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 3

Variante 3 - Verlegung im oberflächennahen Tunnel - Fertigteil					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	7586,46	-	-	-	7586,46	-	-	-	7586,46
1				0,20	42,31	0,00	0,00	0,19	39,92	40,10
2				0,20	42,31	0,00	0,00	0,17	37,66	37,83
3	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	2,27	0,16	35,53	37,96
4				0,20	42,31	0,00	0,00	0,16	33,52	33,67
5				0,20	42,31	0,00	0,00	0,15	31,62	31,76
6	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,90	0,14	29,83	31,87
7				0,20	42,31	0,00	0,00	0,13	28,14	28,27
8				0,20	42,31	0,00	0,00	0,12	26,55	26,67
9	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,60	0,12	25,04	26,76
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,31	0,00	27,92	0,11	23,63	51,66
11				0,20	42,31	0,00	0,00	0,10	22,29	22,39
12	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,34	0,10	21,03	22,47
13				0,20	42,31	0,00	0,00	0,09	19,84	19,93
14				0,20	42,31	0,00	0,00	0,09	18,71	18,80
15	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	1,13	0,08	17,66	18,86
16				0,20	42,31	0,00	0,00	0,08	16,66	16,73
17				0,20	42,31	0,00	0,00	0,07	15,71	15,79
18	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,95	0,07	14,82	15,84
19				0,20	42,31	0,00	0,00	0,06	13,98	14,05
20	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	3777,46	100,00	0,20	42,31	1177,83	31,18	0,06	13,19	1222,26
21				0,20	42,31	0,00	0,00	0,06	12,45	12,50
22				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	11,74	11,80
23	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,71	0,05	11,08	11,84
24				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	10,45	10,50
25				0,20	42,31	0,00	0,00	0,05	9,86	9,90
26	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,59	0,04	9,30	9,94
27				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	8,77	8,81
28				0,20	42,31	0,00	0,00	0,04	8,28	8,32
29	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,50	0,04	7,81	8,34
30	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,31	0,00	8,71	0,03	7,37	16,11
31				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	6,95	6,98
32	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,42	0,03	6,56	7,01
33				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	6,19	6,21
34				0,20	42,31	0,00	0,00	0,03	5,84	5,86
35	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,35	0,03	5,51	5,88
36				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	5,19	5,22
37				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	4,90	4,92
38	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,29	0,02	4,62	4,94
39				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	4,36	4,38
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4677,46	100,00	0,20	42,31	454,75	9,72	0,02	4,11	468,61
41				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,88	3,90
42				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,66	3,68
43	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,22	0,02	3,45	3,69
44				0,20	42,31	0,00	0,00	0,02	3,26	3,27
45				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	3,07	3,09
46	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,19	0,01	2,90	3,10
47				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48				0,20	42,31	0,00	0,00	0,01	2,58	2,59
49	SM		2,70	0,20	42,31	0,00	0,16	0,01	2,43	2,60
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-3791,23	50,00	0,20	42,31	-205,82	2,71	0,01	2,30	-200,80

SM: Service Monitoring

Barwerte	9013,22	92,85	3,09	666,92	9776,09
Kapitalwert					9776,09

Tab. 12.54: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 3A

Variante 3A - Verlegung im Gewölbetunnel					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Betriebskosten	Barwert der Kosten
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	5906,46	-	-	-	5906,46	-	-	-	5906,46
1				0,20	42,22	0,00	0,00	0,19	39,83	40,02
2				0,20	42,22	0,00	0,00	0,17	37,58	37,75
3	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	2,27	0,16	35,45	37,88
4				0,20	42,22	0,00	0,00	0,16	33,44	33,60
5				0,20	42,22	0,00	0,00	0,15	31,55	31,70
6	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,90	0,14	29,77	31,81
7				0,20	42,22	0,00	0,00	0,13	28,08	28,21
8				0,20	42,22	0,00	0,00	0,12	26,49	26,61
9	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,60	0,12	24,99	26,71
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,22	0,00	27,92	0,11	23,58	51,61
11				0,20	42,22	0,00	0,00	0,10	22,24	22,35
12	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,34	0,10	20,98	22,42
13				0,20	42,22	0,00	0,00	0,09	19,80	19,89
14				0,20	42,22	0,00	0,00	0,09	18,68	18,76
15	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	1,13	0,08	17,62	18,83
16				0,20	42,22	0,00	0,00	0,08	16,62	16,70
17				0,20	42,22	0,00	0,00	0,07	15,68	15,75
18	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,95	0,07	14,79	15,81
19				0,20	42,22	0,00	0,00	0,06	13,96	14,02
20	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	3777,46	100,00	0,20	42,22	1177,83	31,18	0,06	13,17	1222,24
21				0,20	42,22	0,00	0,00	0,06	12,42	12,48
22				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	11,72	11,77
23	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,71	0,05	11,05	11,81
24				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	10,43	10,48
25				0,20	42,22	0,00	0,00	0,05	9,84	9,88
26	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,59	0,04	9,28	9,92
27				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	8,76	8,80
28				0,20	42,22	0,00	0,00	0,04	8,26	8,30
29	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,50	0,04	7,79	8,33
30	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,22	0,00	8,71	0,03	7,35	16,09
31				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	6,94	6,97
32	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,42	0,03	6,54	6,99
33				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	6,17	6,20
34				0,20	42,22	0,00	0,00	0,03	5,82	5,85
35	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,35	0,03	5,49	5,87
36				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	5,18	5,21
37				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	4,89	4,91
38	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,29	0,02	4,61	4,93
39				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	4,35	4,37
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4677,46	100,00	0,20	42,22	454,75	9,72	0,02	4,11	468,60
41				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,87	3,89
42				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,65	3,67
43	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,22	0,02	3,45	3,68
44				0,20	42,22	0,00	0,00	0,02	3,25	3,27
45				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	3,07	3,08
46	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,19	0,01	2,89	3,09
47				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	2,73	2,74
48				0,20	42,22	0,00	0,00	0,01	2,58	2,59
49	SM		2,70	0,20	42,22	0,00	0,16	0,01	2,43	2,60
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-2951,23	50,00	0,20	42,22	-160,22	2,71	0,01	2,29	-155,20

SM: Service Monitoring

Barwerte	7378,83	92,85	3,09	665,51	8140,28
Kapitalwert					8140,28



Tab. 12.55: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 4

Variante 4 - Verlegung im Tunnel - Rohrvortrieb					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	7759,86	-	-	-	7759,86	-	-	-	7759,86
1				0,20	42,40	0,00	0,00	0,19	40,00	40,19
2				0,20	42,40	0,00	0,00	0,17	37,74	37,91
3	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	2,27	0,16	35,60	38,03
4				0,20	42,40	0,00	0,00	0,16	33,59	33,74
5				0,20	42,40	0,00	0,00	0,15	31,69	31,83
6	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,90	0,14	29,89	31,93
7				0,20	42,40	0,00	0,00	0,13	28,20	28,33
8				0,20	42,40	0,00	0,00	0,12	26,60	26,73
9	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,60	0,12	25,10	26,81
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,40	0,00	27,92	0,11	23,68	51,71
11				0,20	42,40	0,00	0,00	0,10	22,34	22,44
12	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,34	0,10	21,07	22,51
13				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	19,88	19,97
14				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	18,76	18,84
15	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,13	0,08	17,69	18,90
16				0,20	42,40	0,00	0,00	0,08	16,69	16,77
17				0,20	42,40	0,00	0,00	0,07	15,75	15,82
18	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,95	0,07	14,86	15,87
19				0,20	42,40	0,00	0,00	0,06	14,02	14,08
20	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	3777,46	100,00	0,20	42,40	1177,83	31,18	0,06	13,22	1222,29
21				0,20	42,40	0,00	0,00	0,06	12,47	12,53
22				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,77	11,82
23	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,71	0,05	11,10	11,86
24				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	10,47	10,52
25				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	9,88	9,93
26	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,59	0,04	9,32	9,96
27				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	8,79	8,83
28				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	8,30	8,33
29	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,50	0,04	7,83	8,36
30	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,40	0,00	8,71	0,03	7,38	16,12
31				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,97	7,00
32	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,42	0,03	6,57	7,02
33				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,20	6,23
34				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,85	5,88
35	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,35	0,03	5,52	5,89
36				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	5,20	5,23
37				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,91	4,93
38	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,29	0,02	4,63	4,95
39				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,37	4,39
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4677,46	100,00	0,20	42,40	454,75	9,72	0,02	4,12	468,62
41				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,89	3,91
42				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,67	3,69
43	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,22	0,02	3,46	3,70
44				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,27	3,28
45				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	3,08	3,09
46	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,19	0,01	2,91	3,10
47				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,59	2,60
49	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,16	0,01	2,44	2,61
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-3951,23	50,00	0,20	42,40	-214,51	2,71	0,01	2,30	-209,48

SM: Service Monitoring

Barwerte	9177,94	92,85	3,09	668,37	9942,24
Kapitalwert					9942,24

Tab. 12.56: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 5

Variante 5 - Verlegung im Tunnel - Bergmännischer Vortrieb					Kalkulationszinssatz: 6,00 %					
Jahr	Bemerkung	Zeitwerte			Betriebskosten	Barwerte			Barwert der Kosten	
		Kosten der Infrastruktur				Kosten der Infrastruktur				
		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		Investitionskosten [€/m]	Instandhaltungskosten	Entstörungskosten [€/m a]		
0	Erstinvestition	10059,86	-	-	-	10059,86	-	-	-	10059,86
1				0,20	42,40	0,00	0,00	0,19	40,00	40,19
2				0,20	42,40	0,00	0,00	0,17	37,74	37,91
3	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	2,27	0,16	35,60	38,03
4				0,20	42,40	0,00	0,00	0,16	33,59	33,74
5				0,20	42,40	0,00	0,00	0,15	31,69	31,83
6	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,90	0,14	29,89	31,93
7				0,20	42,40	0,00	0,00	0,13	28,20	28,33
8				0,20	42,40	0,00	0,00	0,12	26,60	26,73
9	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,60	0,12	25,10	26,81
10	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,40	0,00	27,92	0,11	23,68	51,71
11				0,20	42,40	0,00	0,00	0,10	22,34	22,44
12	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,34	0,10	21,07	22,51
13				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	19,88	19,97
14				0,20	42,40	0,00	0,00	0,09	18,76	18,84
15	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	1,13	0,08	17,69	18,90
16				0,20	42,40	0,00	0,00	0,08	16,69	16,77
17				0,20	42,40	0,00	0,00	0,07	15,75	15,82
18	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,95	0,07	14,86	15,87
19				0,20	42,40	0,00	0,00	0,06	14,02	14,08
20	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	3777,46	100,00	0,20	42,40	1177,83	31,18	0,06	13,22	1222,29
21				0,20	42,40	0,00	0,00	0,06	12,47	12,53
22				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	11,77	11,82
23	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,71	0,05	11,10	11,86
24				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	10,47	10,52
25				0,20	42,40	0,00	0,00	0,05	9,88	9,93
26	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,59	0,04	9,32	9,96
27				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	8,79	8,83
28				0,20	42,40	0,00	0,00	0,04	8,30	8,33
29	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,50	0,04	7,83	8,36
30	Generalüberholung Kühlanlage		50,00	0,20	42,40	0,00	8,71	0,03	7,38	16,12
31				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,97	7,00
32	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,42	0,03	6,57	7,02
33				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	6,20	6,23
34				0,20	42,40	0,00	0,00	0,03	5,85	5,88
35	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,35	0,03	5,52	5,89
36				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	5,20	5,23
37				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,91	4,93
38	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,29	0,02	4,63	4,95
39				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	4,37	4,39
40	Reinvestition Anlage & Kühlanlage	4677,46	100,00	0,20	42,40	454,75	9,72	0,02	4,12	468,62
41				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,89	3,91
42				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,67	3,69
43	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,22	0,02	3,46	3,70
44				0,20	42,40	0,00	0,00	0,02	3,27	3,28
45				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	3,08	3,09
46	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,19	0,01	2,91	3,10
47				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,74	2,75
48				0,20	42,40	0,00	0,00	0,01	2,59	2,60
49	SM		2,70	0,20	42,40	0,00	0,16	0,01	2,44	2,61
50	GÜ Kühlanlage, Restwert Kabelanlage	-5101,23	50,00	0,20	42,40	-276,94	2,71	0,01	2,30	-271,91

SM: Service Monitoring

Barwerte	11415,51	92,85	3,09	668,37	12179,81
Kapitalwert					12179,81

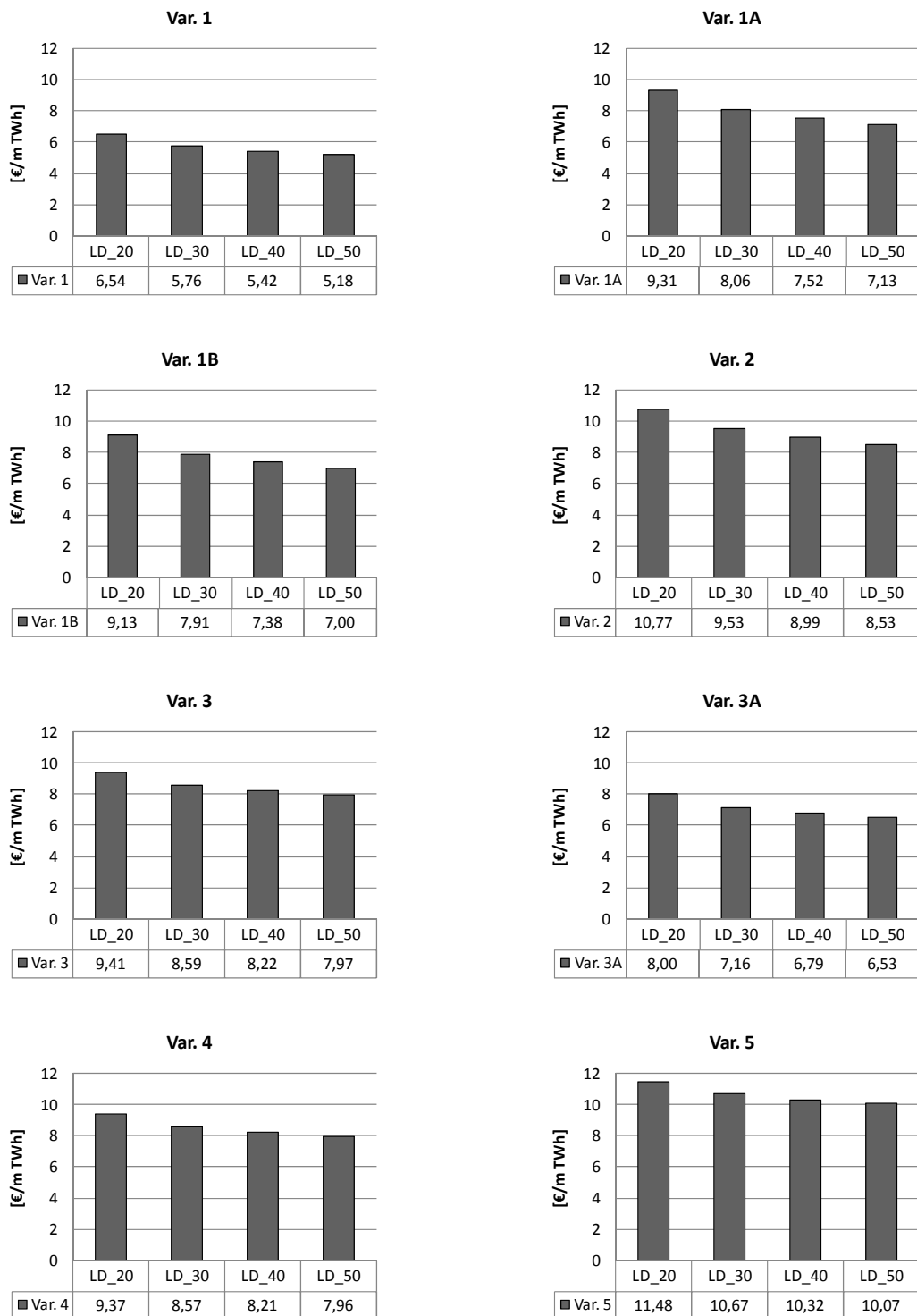


Abb. 12.2: Graphische Darstellung der Kapitalwerte bezogen auf die Übertragungsleistung in Abhängigkeit von der Kabelnutzungsdauer

## 12.3. Unterlagen zur Berechnung des Erlösentganges

Tab. 12.57: Erlösentgang bei Kapitalwertbetrachtung, Var. 1 – Var. 3A

<b>Variante 1</b>				<b>Direkte Erdverlegung</b>		
<b>INSTANDHALTUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Intervall [Jahre]	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Monitoringsystem	3					2,70
Generalüberholung Kühlanlage (Pumpen)	10					100,00
Reinvestition der Kühlanlage	20					200,00
<b>ENTSTÖRUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Fehler	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Fehler am Kabel (Fehler/Systemmeter)	1,34E-06		100000		0,13	0,27
Fehler an einer Muffe (Fehler/Stk)	4,80E-04	0,0036	50000			0,09
Fehler an einem Endverschluss (Fehler/Stk)	5,00E-04	0,0006	80000			0,02
Erlösentgang bei Kabelfehler	1,34E-06		7.051.319,78		9,45	18,90
<b>Gesamtsumme ENTSTÖRUNGSKOSTEN:</b>						<b>19,28</b>
<b>BETRIEBSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:		[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
<b>Verlustkosten</b>						
Kabelanlage					1,70	3,40
Kühlungsanlage						30,66
<b>Zwischensumme:</b>						<b>34,06</b>
<b>Inspektions- und Wartungskosten</b>						
Kabelanlage					1,00	2,00
Kompensationsanlage					0,25	0,50
Monitoring						0,50
Kühlungsanlage - indirekte Kühlung						2,00
Bauwerk						0,50
<b>Zwischensumme:</b>						<b>5,50</b>
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>						<b>39,56</b>

Tab. 12.58: Erlösentgang bei Kapitalwertbetrachtung, Var.1 – Var.3

<b>Variante 1</b>				<b>Direkte Erdverlegung</b>		
<b>INSTANDHALTUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Intervall [Jahre]	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Monitoringsystem	3					2,70
Generalüberholung Kühlanlage (Pumpen)	10					100,00
Reinvestition der Kühlanlage	20					200,00
<b>ENTSTÖRUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Fehler	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Fehler am Kabel (Fehler/Systemmeter)	1,34E-06		100000		0,13	0,27
Fehler an einer Muffe (Fehler/Stk)	4,80E-04	0,0036	50000			0,09
Fehler an einem Endverschluss (Fehler/Stk)	5,00E-04	0,0006	80000			0,02
Erlösentgang bei Kabelfehler	1,34E-06		78.148.134,47		104,72	209,44
<b>Gesamtsumme ENTSTÖRUNGSKOSTEN:</b>						<b>209,82</b>
<b>BETRIEBSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:		[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
<b>Verlustkosten</b>						
Kabelanlage					1,70	3,40
Kühlungsanlage						30,66
<b>Zwischensumme:</b>						<b>34,06</b>
<b>Inspektions- und Wartungskosten</b>						
Kabelanlage					1,00	2,00
Kompensationsanlage					0,25	0,50
Monitoring						0,50
Kühlungsanlage - indirekte Kühlung						2,00
Bauwerk						0,50
<b>Zwischensumme:</b>						<b>5,50</b>
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>						<b>39,56</b>

Tab. 12.59: Erlösentgang bei Betrachtung der bezogenen Kapitalwerte, Var.1 - Var.3A

<b>Variante 1</b>				<b>Direkte Erdverlegung</b>		
<b>INSTANDHALTUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Intervall [Jahre]	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Monitoringsystem	3					2,70
Generalüberholung Kühlanlage (Pumpen)	10					100,00
Reinvestition der Kühlanlage	20					200,00
<b>ENTSTÖRUNGSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:	Fehler	[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
Fehler am Kabel (Fehler/Systemmeter)	1,34E-06		100000		0,13	0,27
Fehler an einer Muffe (Fehler/Stk)	4,80E-04	0,0036	50000			0,09
Fehler an einem Endverschluss (Fehler/Stk)	5,00E-04	0,0006	80000			0,02
Erlösentgang bei Kabelfehler	1,34E-06		104.918.259,85		140,59	281,18
<b>Gesamtsumme ENTSTÖRUNGSKOSTEN:</b>						<b>281,56</b>
<b>BETRIEBSKOSTEN</b>						
Bezeichnung:		[Stk/m]	[€/Stk]	Kosten pro Kabelmeter	Kosten pro Systemmeter	Kosten der Investition (2 Systeme)
				[€/m a]	[€/m a]	[€/m a]
<b>Verlustkosten</b>						
Kabelanlage					1,70	3,40
Kühlungsanlage						30,66
<b>Zwischensumme:</b>						<b>34,06</b>
<b>Inspektions- und Wartungskosten</b>						
Kabelanlage					1,00	2,00
Kompensationsanlage					0,25	0,50
Monitoring						0,50
Kühlungsanlage - indirekte Kühlung						2,00
Bauwerk						0,50
<b>Zwischensumme:</b>						<b>5,50</b>
<b>Gesamtsumme BETRIEBSKOSTEN:</b>						<b>39,56</b>

## 13. Verzeichnisse

### 13.1. Abkürzungsverzeichnis

AC	(engl.: <u>A</u> lternating <u>C</u> urrent) Wechselstrom
APG	<u>A</u> ustrian <u>P</u> ower <u>G</u> rid
BDEW	<u>B</u> undesverband <u>d</u> er <u>E</u> nergie- und <u>W</u> asserwirtschaft
CIGRE	<u>C</u> onseil <u>I</u> nternational des <u>G</u> rands <u>R</u> eseaux <u>É</u> lectriques (International Council on large electric Systems)
DC	(engl.: <u>D</u> irect <u>C</u> urrent) Gleichstrom
EFD	<u>E</u> rsatzflussdichte
GIL	<u>G</u> asisolierte <u>L</u> eitung
HDÜ	<u>H</u> ochspannungs- <u>D</u> rehstrom- <u>Ü</u> bertragung
HGÜ	<u>H</u> ochspannungs- <u>G</u> leichstrom- <u>Ü</u> bertragung
ICSG	<u>I</u> nternational <u>C</u> opper <u>S</u> tudy <u>G</u> roup
VDEW	<u>V</u> erband <u>d</u> er <u>E</u> lektrizitäts <u>w</u> irtschaft (Seit 2007 eingegliedert im BDEW)
VEÖ	<u>V</u> erband der <u>E</u> lektrizitätsunternehmen <u>Ö</u> sterreichs
VPE	<u>V</u> ernetztes <u>P</u> olyethylen

## 13.2. Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Bahnstromversorgung (schematisch) .....	5
Abb. 2.2: Schema der Hochspannungsgleichstromübertragung.....	6
Abb. 2.3: Spannungsebenen der Energieverteilung (schematisch) .....	7
Abb. 2.4: Netzformen.....	8
Abb. 2.5: Ersatzschaltbild einer Leitung.....	11
Abb. 3.1: Betriebsmittel elektrischer Energieversorgungsnetze (schematisch).....	13
Abb. 3.2: Freileitung .....	14
Abb. 3.3: Zwei Kabelsysteme als Ersatz für zwei Freileitungssysteme .....	16
Abb. 3.4: Drei Kabelsysteme als Ersatz für zwei Freileitungssysteme .....	16
Abb. 3.5: Vier Kabelsysteme als Ersatz für zwei Freileitungssysteme.....	16
Abb. 3.6: Anordnung eines Reserveleiters zur Erhöhung der Versorgungssicherheit.....	17
Abb. 3.7: Prinzip einer Hochspannungs – Freiluftschaltanlage .....	18
Abb. 3.8: Oberflächenerder .....	21
Abb. 3.9: Tiefenerder .....	21
Abb. 4.1: Schematischer Aufbau eines Einleiterkabels.....	26
Abb. 4.2: Aufbau einer VPE – Aufschiebemuffe (schematisch).....	29
Abb. 4.3: Steckverbindungsmuffe.....	29
Abb. 4.4: Auskreuzungsstrecke (cross bonding) .....	31
Abb. 4.5: Wärmeersatzschaltbild für ein erdverlegtes Kabel .....	38
Abb. 4.6: Temperaturverlauf im Nahbereich des Kabels .....	39
Abb. 4.7: Wärmeabfuhr bei Verlegung der Kabel im Tunnel .....	41
Abb. 4.8: Wärmeersatzschaltbild für ein Kabel in Luft .....	41
Abb. 4.9: Direkte Kühlung bei flacher Verlegung der Kabel .....	42
Abb. 4.10: Indirekte Kühlung bei flacher Anordnung der Kabel .....	43
Abb. 4.11: Indirekte Kühlung bei U- förmiger Anordnung der Kabel .....	43
Abb. 4.12: Indirekte Kühlung bei dreiecksförmiger Anordnung der Kabel .....	44
Abb. 4.13: Schema Durchlaufkühlsystem .....	44
Abb. 4.14: Schema Umlaufkühlsystem.....	45



---

Abb. 4.15: Durchlaufkühlsystem bei direkter Kühlung .....	45
Abb. 4.16: Umlaufkühlsystem bei direkter Kühlung .....	46
Abb. 4.17: Umlaufkühlsystem - Darstellung der möglichen Rohrführung.....	47
Abb. 4.18: Kühlwasserbypass im Bereich der Muffe .....	48
Abb. 4.19: Erdung beider Endverschlüsse .....	50
Abb. 4.20: Zyklischer Phasentausch der Leiter mit ausgekreuzten Schirmen .....	50
Abb. 4.21: Magnetfeld des durchflossenen Leiters .....	51
Abb. 4.22: Skizze - Flachverlegtes Kabelsystem .....	53
Abb. 4.23: Ersatzflussdichte eines flach verlegten Kabelsystems bei Variation des Übertragungsstromes .....	53
Abb. 4.24: Ersatzflussdichte eines flach verlegten Kabelsystems bei Variation der Verlegetiefe...	54
Abb. 4.25: Ersatzflussdichte für ein flach verlegtes Kabelsystem bei Variation der Phasenabstände .....	54
Abb. 4.26: Skizze - Im Dreieck verlegtes Kabelsystem.....	55
Abb. 4.27: Ersatzflussdichte eines im Dreieck verlegten Kabelsystems bei Variation des Übertragungsstromes .....	56
Abb. 4.28: Ersatzflussdichte eines im Dreieck verlegten Kabelsystems bei Variation der Verlegetiefe.....	56
Abb. 4.29: Ersatzflussdichte eines im Dreieck verlegten Kabelsystems bei Variation der Phasenabstände .....	57
Abb. 4.30: Vergleich der Ersatzflussdichten von flach- und dreiecksverlegten Kabelsystemen .....	58
Abb. 4.31: Einzuhaltender Sicherheitsabstand bei Arbeitstätigkeit im Nahbereich luftverlegter, betriebener Kabel .....	60
Abb. 4.32: Einzuhaltende Mindestabstände bei Begehung luftverlegter Kabel im Betriebsfall .....	60
Abb. 4.33: Einzuhaltende Mindestabstände in Abhängigkeit vom Übertragungsstrom .....	61
Abb. 4.34: Fehler - Einpoliger Kurzschluss .....	63
Abb. 4.35: Schematische Darstellung von watertree - Strukturen .....	65
Abb. 4.36: Idealisierte Lebensdauer kennlinie des Kabels.....	67
Abb. 6.1: Querschnitt - geböschter Kabelgraben .....	71
Abb. 6.2: Wesentliche Abmessungen der geböschten Baugrube .....	73
Abb. 6.3: Waagrechter Verbau .....	75
Abb. 6.4: Senkrechter Verbau .....	76
Abb. 6.5: Grabenverbaueinheit (Randgestützt).....	76

---

Abb. 6.6: Schematischer Aufbau eines Kabelpfluges .....	78
Abb. 6.7: Grabenfräse, T858 Commander III .....	79
Abb. 6.8: Schematische Darstellung des statisch-hydraulischen Bodenverdrängungsverfahrens ..	81
Abb. 6.9: Schematische Darstellung des dynamisch- pneumatischen Bodenverdrängungsverfahrens.....	82
Abb. 6.10: Schematische Darstellung des Bodenentnahmeverfahrens.....	83
Abb. 6.11: Querschnitt - Verlegung im Mantelrohr .....	85
Abb. 6.12: Querschnitt - Kabeltunnel in offener Bauweise .....	86
Abb. 6.13: Schematische Darstellung einer Rohrverpressung.....	88
Abb. 6.14: Teilschnittmaschine mit Längsschneidkopf .....	89
Abb. 6.15: Excavator und Längsschneidkopf einer Teilschnittmaschine .....	90
Abb. 6.16: Schildvortrieb mit Schneidrad im Trockenabbau .....	92
Abb. 6.17: Unterfahren geschützter Bäume mittels grabenlosem Bauverfahren .....	94
Abb. 6.18: Kabelrolle zur Kabelverlegung.....	96
Abb. 6.19: Eckrolle zur Kabelverlegung .....	97
Abb. 6.20: Aneinanderreihung von Eckrollen.....	97
Abb. 6.21: Querschnitt - Verlegung im Schutzrohr .....	99
Abb. 6.22: Arbeitsschritte - Verlegung der Kabel im offenen Fertigteil .....	100
Abb. 7.1: Gliederung der Kosten als Grundlage für die weitere Bearbeitung .....	103
Abb. 7.2: Ausbildung eines Cross-Bonding-Abschnittes.....	110
Abb. 7.3: Kostengliederung der Elektrotechnischen Einrichtung .....	111
Abb. 7.4: Geometrie der Variante 1, Direkte Erdverlegung.....	112
Abb. 7.5: Geometrie der Variante 1A, Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - mit Leerrohren .....	114
Abb. 7.6: Geometrie der Variante 1B, Direkte Erdverlegung - ohne Kühlung - ohne Leerrohre .....	114
Abb. 7.7: Geometrie der Variante 2, Verlegung im Schutzrohr.....	115
Abb. 7.8: Geometrie der Variante 3, Verlegung im oberflächennahen Tunnel – Fertigteilbauweise .....	116
Abb. 7.9: Geometrie der Variante 3A-G, Verlegung im oberflächennahen Gewölbetunnel.....	117
Abb. 7.10: Geometrie der Variante 4, Verlegung im Tunnel – Rohrvortrieb.....	119
Abb. 7.11: Geometrie der Variante 5, Verlegung im Tunnel - Bergmännische Bauweise .....	120
Abb. 7.12: Anordnung der Kühlstationen in Variante 1.....	121
Abb. 7.13: Gegenüberstellung der Investitionskosten – Bereich Bautechnik .....	123

Abb. 7.14: Gegenüberstellung der Investitionskosten .....	124
Abb. 7.15: Gegenüberstellung der Investitionskosten (kumuliert).....	125
Abb. 8.1: Schema der Restwertermittlung bei einer Nutzungsdauer von 40 Jahren.....	134
Abb. 8.2: Barwerte der Ausgaben - alle Varianten.....	135
Abb. 8.3: Barwerte der Instandhaltungskosten .....	136
Abb. 8.4: Barwerte der Entstörungskosten.....	137
Abb. 8.5: Barwerte der Betriebskosten .....	137
Abb. 8.6: Darstellung der Kapitalwerte bezogen auf die Übertragungsleistung im Betrachtungszeitraum.....	139
Abb. 9.1: Schema der Restwertermittlung bei unterschiedlichen Nutzungsdauern.....	142
Abb. 9.2: Kapitalwerte der Varianten 1 und 3A unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kabellebensdauern.....	143
Abb. 9.3: Kapitalwertentwicklung bei Variation des Erlösentganges .....	144
Abb. 9.4: Kapitalwertentwicklung bei Variation des Erlösentganges unter Berücksichtigung der Übertragungsleistung .....	145
Abb. 12.1: Verteilung der Investitionskosten.....	157
Abb. 12.2: Graphische Darstellung der Kapitalwerte bezogen auf die Übertragungsleistung in Abhängigkeit von der Kabelnutzungsdauer .....	206

### 13.3. Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Trassen- und Systemlängen in Österreich .....	14
Tab. 3.2: Spezifische elektrische Widerstände von Böden.....	20
Tab. 4.1: Kabeldaten zur Verlustabschätzung.....	32
Tab. 4.2: Kabelkennwerte als Grundlage für die Verlustabschätzung .....	34
Tab. 4.3: Aufstellung der Verluste .....	37
Tab. 4.4: Wärmeleitfähigkeit von Böden .....	40
Tab. 4.5: Auswirkungen der Methoden zur Schirmung des Magnetfeldes .....	59
Tab. 4.6: Ausfallraten von VPE-Höchstspannungskabeln .....	68
Tab. 6.1: Erfahrungswerte für den Anwendungsbereich der Bodenverdrängungsverfahren .....	82
Tab. 6.2: Erfahrungswerte für den Anwendungsbereich der Bodenentnahmeverfahren.....	84
Tab. 6.3: Geeignete Einbaumethoden in Abhängigkeit vom Rohrwerkstoff.....	85
Tab. 6.4: Mindestabstände von Energiekabeln über 30 kV .....	93
Tab. 6.5: Zulässige Zugspannungen am Leiter in Abhängigkeit vom Hersteller.....	97
Tab. 6.6: Reibungskoeffiziente für die Verlegung von Kabeln .....	98
Tab. 7.1: Kostensätze für Grunddienstbarkeiten .....	106
Tab. 7.2: Entgelt für die Grunddienstbarkeit der betrachteten Varianten .....	106
Tab. 7.3: Kosten für die Umweltschutzmaßnahmen realisierter Straßenbauprojekte in Österreich .....	107
Tab. 7.4: Zusammenfassung der Kabelkosten aus diversen Studien .....	108
Tab. 7.5: Gegenüberstellung der Thermischen Grenzleistung von Aluminium- und Kupferkabeln	109
Tab. 7.6: Anzahl der benötigten ET-Einrichtungen pro Systemmeter.....	110
Tab. 7.7: Kosten der ET-Einrichtung .....	110
Tab. 7.8: Auflistung der Kosten für die Elektrotechnische Einrichtung .....	111
Tab. 7.9: Abmessungen der Variante 1 .....	113
Tab. 7.10: Abmessungen der Variante 2 .....	115
Tab. 7.11: Abmessungen der Variante 3 .....	116
Tab. 7.12: Abmessungen der Variante 3A-G.....	118
Tab. 7.13: Abmessungen der Variante 4 .....	119

---

Tab. 7.14: Abmessungen der Variante 5 .....	120
Tab. 7.15: Zusammenstellung der Kosten aus dem Bereich Bautechnik .....	123
Tab. 7.16: Zusammenstellung der Investitionskosten .....	124
Tab. 7.17: Aufstellung der Instandhaltungskosten .....	126
Tab. 7.18: Ausfallhäufigkeit von Kabeln (pro Meter) und Garnituren (pro Stk) .....	127
Tab. 7.19: Aufstellung der Entstörungskosten.....	128
Tab. 7.20: Ermittlung des Höchstnennstromes aller Varianten .....	129
Tab. 7.21: Ermittlung der Verlustkosten für alle Varianten.....	130
Tab. 7.22: Aufstellung der Betriebskosten für zwei Kabelsysteme .....	132
Tab. 8.1: Aufstellung der ermittelten Kapitalwerte .....	135
Tab. 8.2: Aufstellung der Übertragungsleistung .....	138
Tab. 8.3: Auszug - Investitionskosten der Varianten 1, 1A und 1B .....	140
Tab. 8.4: Auszug - Kapitalwerte der Varianten 1, 1A und 1B .....	140
Tab. 9.1: Gegenüberstellung der Kapitalwerte bei verschiedenen Kabellebensdauern .....	142
Tab. 9.2: Veränderung der Kapitalwerte ausgedrückt in Prozent .....	143
Tab. 12.1: Investitionskosten der Variante 1 .....	149
Tab. 12.2: Investitionskosten der Variante 1A.....	150
Tab. 12.3: Investitionskosten der Variante 1B.....	151
Tab. 12.4: Investitionskosten der Variante 2 .....	152
Tab. 12.5: Investitionskosten der Variante 3 .....	153
Tab. 12.6: Investitionskosten der Variante 3A.....	154
Tab. 12.7: Investitionskosten der Variante 4 .....	155
Tab. 12.8: Investitionskosten der Variante 5 .....	156
Tab. 12.9: Laufende Kosten der Variante 1 .....	158
Tab. 12.10: Laufende Kosten der Variante 1A .....	159
Tab. 12.11: Laufende Kosten der Variante 1B .....	160
Tab. 12.12: Laufende Kosten der Variante 2.....	161
Tab. 12.13: Laufende Kosten der Variante 3 .....	162
Tab. 12.14: Laufende Kosten der Variante 3A.....	163
Tab. 12.15: Laufende Kosten der Variante 4 .....	164
Tab. 12.16: Laufende Kosten der Variante 5 .....	165
Tab. 12.17: Kapitalwert - LD 40 - Variante 1 .....	166

---

Tab. 12.18: Kapitalwert - LD 40 - Variante 1A .....	167
Tab. 12.19: Kapitalwert - LD 40 - Variante 1B.....	168
Tab. 12.20: Kapitalwert - LD 40 - Variante 2 .....	169
Tab. 12.21: Kapitalwert - LD 40 - Variante 3.....	170
Tab. 12.22: Kapitalwert - LD 40 - Variante 3A.....	171
Tab. 12.23: Kapitalwert - LD 40 - Variante 4 .....	172
Tab. 12.24: Kapitalwert - LD 40 - Variante 5 .....	173
Tab. 12.25: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 1 .....	174
Tab. 12.26: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 1A .....	175
Tab. 12.27: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 1B.....	176
Tab. 12.28: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 2 .....	177
Tab. 12.29: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 3 .....	178
Tab. 12.30: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 3A.....	179
Tab. 12.31: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 4.....	180
Tab. 12.32: Kapitalwert - LD 50 SENS - Variante 5.....	181
Tab. 12.33: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 1.....	182
Tab. 12.34: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 1A .....	183
Tab. 12.35: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 1B .....	184
Tab. 12.36: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 2 .....	185
Tab. 12.37: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 3 .....	186
Tab. 12.38: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 3A.....	187
Tab. 12.39: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 4 .....	188
Tab. 12.40: Kapitalwert - LD 40 SENS - Variante 5 .....	189
Tab. 12.41: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 1 .....	190
Tab. 12.42: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 1A .....	191
Tab. 12.43: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 1B.....	192
Tab. 12.44: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 2 .....	193
Tab. 12.45: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 3 .....	194
Tab. 12.46: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 3A.....	195
Tab. 12.47: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 4 .....	196
Tab. 12.48: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 5 .....	197
Tab. 12.49: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 1.....	198

Tab. 12.50: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 1A .....	199
Tab. 12.51: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 1B .....	200
Tab. 12.52: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 2.....	201
Tab. 12.53: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 3.....	202
Tab. 12.54: Kapitalwert - LD 30 SENS - Variante 3A.....	203
Tab. 12.55: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 4 .....	204
Tab. 12.56: Kapitalwert - LD 20 SENS - Variante 5 .....	205
Tab. 12.57: Erlösentgang bei Kapitalwertbetrachtung, Var. 1 – Var. 3A.....	207
Tab. 12.58: Erlösentgang bei Kapitalwertbetrachtung, Var.1 – Var.3.....	208
Tab. 12.59: Erlösentgang bei Betrachtung der bezogenen Kapitalwerte, Var.1 - Var.3A.....	209

### 13.4. Literaturverzeichnis

ABB, 2009, (Hrsg.), „XLPE Underground Cable Systems. User's guide“, rev.3, ABB, [www.abb.com/cables](http://www.abb.com/cables)

Aquaprox, 2007, (Hrsg.), „Kühlwasserbehandlung“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Bastian, Peter, Bumiller, H., Eichler, W., Huber, F., Jaufmann, N., Manderla, J., Spielvogel, O., Stricker, F.-D., Tkotz, K., Winter, U., 1999, „Fachkunde Elektrotechnik“, 22. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten

Biewald, Hartmut, Henschl, M., Ringler, J., 1995a, „Übertragungsfähigkeit von Kabeln in Standardtrassen der Bewag“, Elektrizitätswirtschaft (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW), Jg. 94 (1995), Heft 8, Seiten 450 – 454

Biewald, Hartmut, Hänisch, L., Honarmand, H., Hopp, A., 1995b, „Untersuchung über thermisch stabilisierte Kabelbettungsmaterialien“, Elektrizitätswirtschaft (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW), Jg. 94 (1995), Heft 12, Seiten 699 – 704

Biewald, Hartmut, Brakelmann, H., 1995, „Kabelbelastbarkeit im unbelüfteten Tunnel“, Elektrizitätswirtschaft (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW), Jg. 94 (1995), Heft 26, Seiten 1870 – 1874

Biewald, Hartmut, Brakelmann, H., 1996, „Belastbarkeit von Hochleistungskabeln im zwangsbelüfteten Tunnel“, Elektrizitätswirtschaft (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW), Jg. 95 (1996), Heft 26, Seiten 1775 - 1780

Borlinghaus, Andreas, 2006, „Anwendung und Nutzen der Kabeldiagnostik“, EGT Fachbericht 104: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Kassel

Böge, Wolfgang, Pläßmann, W. (Hrsg.), Döring, E., Döring, P., Gierens, H., Kemnitz, A., Liebenstein, R., Steffen, H., Wellenreuther, G., Zastrow, D., 2007, „Formeln und Tabellen Elektrotechnik“, Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden

Brakelmann, Heinrich, 2004, Studie, „Netzverstärkungs- Trassen zur Übertragung von Windenergie: Freileitung oder Kabel?“, Institut für Energietransport und –speicherung, Universität Duisburg – Essen, Rheinberg



- Brakelmann, Heinrich, Jensen, M., 2005, „Redundantes Drehstrom – Einleiterkabelsystem mit Schirmspannungs – Kompensation“, Elektrizitätswirtschaft (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW), Jg. 104 (2005), Heft 4, Seiten 38 – 47
- Brakelmann, Heinrich, 2007, „Bipolare HVAC- und HVDC- Hochleistungsübertragungssysteme mit VPE-isolierten See- und Landkabeln“, Elektrizitätswirtschaft (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW), Jg. 106 (2007), Heft 10, Seiten 26 – 36
- Brakelmann, Heinrich, 2009a, „Interpretation der neuen CIGRE-Ausfallstatistik von VPE-Kabeln“, Studie im Auftrag von nkt cables, Institut für Energietransport und –speicherung, Universität Duisburg – Essen, Rheinberg
- Brakelmann, Heinrich, 2009b, Gutachten, „Begutachtung der NOK-Studie: Umbau 220-kV-Leitung Beznau-Birr auf 380/220 kV Teilverkabelung Riniken“, im Auftrag der Gemeindeverwaltung Riniken (Schweiz), Institut für Energietransport und –speicherung, Universität Duisburg – Essen, Rheinberg
- Brockhaus, 2006, „Brockhaus Enzyklopädie - Online“, <http://www.brockhaus-encyklopaedie.de>, (Extrusion) Abfrage Juli 2009
- Bronner, 2008, „Angebots- und Projektkalkulation. Leitfaden für Praktiker“, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Buja, Heinrich, 2001, „Handbuch des Spezialtiefbaus – Geräte und Verfahren“, 2. Auflage, Werner Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf
- Busch, Rudolf, 2008, „Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker“, 5. Auflage, Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- Crastan, Valentin, 2007, „Elektrische Energieversorgung 1. Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik“, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Dantube, 2009, (Hrsg.), „Stahlrohrdurchlässe / Wellstahlrohre. Stahl für alle Wege“ MPS- Multi Plate System, voestalpine Krems Finaltechnik, Ausgabe 1209, <http://www.voestalpine.com/finaltechnik/de/products/sections/roadsafety/steelpipeculverts.html>
- Domininghaus, Hans, Elsner, P. (Hrsg.), Eyerer, P., Hirth, T., 2008, „Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendung“, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

- Dupré, Frank, 2007, Abschlußbericht, „Ökologische und ökonomische Bilanzierung einer optimierten Leitungshülle (begehbarer Querschnitt) als monolithischer Ortbetontunnel am Beispiel eines Infrastrukturkanals für Medienkabel und –leitungen in der Stadt Speyer“, Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt, Speyer
- E-Control, 2007, „Trassen- und Systemlängen 2007“, [http://www2.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL\\_HOME/STROM/ZAHLENDATENFAKTEN/NETZ\\_UND\\_KW/NETZ/](http://www2.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL_HOME/STROM/ZAHLENDATENFAKTEN/NETZ_UND_KW/NETZ/), Abfrage März 2009
- E-Control, 2008, „Ausfalls- und Störungsstatistik für Österreich - Ergebnisse 2008“, <http://www.e-control.at/de/econtrol/news/aktuelle-meldungen/ausfall-und-stoerstatistik-2008>, Abfrage August 2009
- Europacable, 2009, Informationen auf der Homepage, Abfrage vom Februar 2010, [http://www.europacable.com/default.aspx?ident\\_id=73&rubrikID=6](http://www.europacable.com/default.aspx?ident_id=73&rubrikID=6)
- ES-Verbau, 2009, „Verwendungsanleitung. Randgestützte Verbausysteme E+S“, Emunds + Staudinger und Krings Verbau, [www.es-verbau.com](http://www.es-verbau.com), Abfrage November 2009
- Fendrich, Lothar. (Hrsg.), 2007, „Handbuch Eisenbahninfrastruktur“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Fickert, Lothar, WS 2007, Vorlesungsskript „Energienetze. Teil 1: Elektrische Energienetze“, Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, Graz
- Fickert, Lothar, 2010, Gespräch zum Thema Kosten der Kabelanlage, Leiter des Institutes für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, Graz
- Flosdorff, Rene, Hilgarth, G., 2005, „Elektrische Energieverteilung“, 9. Auflage, B.G. Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- Föckersperger, 2009, Prospekt „Save time and money with the latest pipe and cable plow technique“, Frank Föckersperger GmbH, [www.spiderplow.de](http://www.spiderplow.de)
- Fricke, Winfried, 1998, „Netzfrequente magnetische Felder von Hochspannungskabelanlagen“, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 97 (1998), Heft 26, Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW, Frankfurt am Main
- Girmscheid, Gerhard, 2008, „Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau“, 2. Auflage, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co KG, Berlin

- Goehlich,Lothar, Donazzi,F., Gaspari,R., Pax,L., 2002, „Monitoring von VPE-isolierten Hochspannungskabeln. RTTR-Temperaturmonitoring und Wassermonitoring optimieren den Kabelbetrieb“, EGT Fachbericht 87: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin
- Grube,Siegfried, Polster,K., Müller,K.-B., Schroth,R., Steinbrink,D., Plath,R., 2001, „Erfahrungen mit der neuen Übertragungstechnik 380-kV-VPE-Kabel“, Elektrizitätswirtschaft, Jg.100 (2001), Heft 26, Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW, Frankfurt am Main
- Haubrich,H.-J., 2007, „Abtransport der in den Kraftwerken Kopswerk I & II und Rotundwerk II der Vorarlberger Illwerke AG erzeugten elektrischen Energie“, Wissenschaftliche Studie im Auftrag der Vorarlberger Illwerke AG, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Forschungsgesellschaft Energie (FGE), Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), Aachen
- Hampicke,Ulrich, Litterski,B., Wichtmann,W. (Hrsg.), 2005, „Ackerlandschaften. Nachhaltigkeit und Naturschutz auf ertragsschwachen Standorten“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Henoegl,Otto, Leonhardt,R., Riedler,E., Honarmand,H., 2009, „Thermal propagation around heat supply pipes – Determining thermal conductivity of soil specimens“, Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Ägypten, 5-9.10.2009, Vol. 2, 1036-1040
- Herold,Gerhard, 2001, „Elektrische Energieversorgung II. Parameter elektrischer Stromkreise, Leitungen, Transformatoren“, J. Schlembach Fachverlag, Weil der Stadt
- Herold,Gerhard, 2002, „Elektrische Energieversorgung I. Drehstromsysteme, Leistungen, Wirtschaftlichkeit“, J.Schlembach Fachverlag, Weil der Stadt
- Heuck,Klaus, Dettman,K.-D., Schulz,D., 2007, „Elektrische Energieversorgung. Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis“, 7.Auflage, Friedr.Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- Hoffmann,Markus, Noack,F., 2007, „Machbarkeitsstudie 380 kV – Kabel für Salzburg. Mit besonderem Augenmerk auf den 1. Teilabschnitt in Salzburg“, ARGE Hoffmann – Noack, Graz & Ilmenau
- Huainig,Michael, 2004, Diplomarbeit, „Magnetische Felder von erdverlegten Kabelanlagen“, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, Graz
- ICSG, 2009, „Forecast 2009 – 2010“, International Copper Study Group, 34<sup>th</sup> Regular Meeting of its Statistical Committee (06.10.2009), Lisbon Portugal

- Idicula,G., Davies,A.E., 1991, Paper, „The probabilistic rating of separate pipe cooled cables“, Third International Conference on Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems, London
- Jahnke,Bernd, Speck,D., Weck,K.-H., 1996, „380-kV-VPE-Kabelanlage für einen Kraftwerksanschluß“, Elektrizitätswirtschaft (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW), Jg. 95 (1996), Heft 26, Seiten 1736 – 1743
- Kainz,Harald, Kauch,P., Renner,H., 2002, „Siedlungswasserbau und Abfallwirtschaft“, Manz Verlag Schulbuch GmbH, Wien
- Kaune, W.T., Zaffanella, L.E., 1992, „Analysis of magnetic fields produced far from electric power lines“ IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York
- KEMA, 2008, Studie, „Machbarkeitsuntersuchung zur Gesamt- oder Teilverkabelung der 380-kV-Leitung "St.Peter - Tauern" im Bundesland Salzburg“ Bericht-Nr.: 07-42746.01-C, Zillmer, Jörg, Thiem, St., Fromme, J., Ellersdorfer, I. , KEMA IEV - Ingenieurunternehmen für Energieversorgung GmbH, Dresden
- Kindler,Herbert, Haim,K.-D., 2006, „Grundzusammenhänge der Elektrotechnik. Ladungen – Felder – Netzwerke“, Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- Knies,Wilfried, Schierack,K., 1998, „Elektrische Anlagentechnik. Kraftwerke, Netze, Schaltanlagen, Schutzeinrichtungen“, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien
- Knödel,Klaus, Krummel,H., Lange,G. (Hrsg.), 2005, „Geophysik“, 2.Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Kolymbas,Dimitrios, 2007, „Geotechnik. Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau“, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- König,Horst, 2008, „Maschinen im Baubetrieb. Grundlagen und Anwendung“, 2. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- Küchler,Andreas, 2005, „Hochspannungstechnik. Grundlagen - Technologie - Anwendungen“, 2.Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Lancier, 2009, „Erdkabelverlegung – Kabelpflug KV 15“, Lancier Cable GmbH, <http://www.lancier-cable.de/lc/produkte/erdkabelverlegung/kabelpflugkv15.html>, Abfrage November 2009

- Lehmann,Sven, 1999, „Erfahrungen mit neuen Techniken im wirtschaftlichen Vergleich“, Elektrizitätswirtschaft (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW), Jg. 98 (1999), Heft 23, Seiten 44 – 46
- Luoni,G., Morello,A., Crockett,A., 1981, “Continuous current rating for external and surface cooled cable systems”, Generation, Transmission & Distribution, Volume 128, May 1981, Issue 3, Pages 129 – 139
- Lücke,Wolfgang, 1991, (Hrsg.), „Investitionslexikon“, 2. Auflage, Verlag Franz Vahlen GmbH, München
- Maybaum,Georg, Mieth,P., Oltmanns,W., Vahland,R., 2009, „Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau. Baugrund – Baugruben – Baugrundverbesserung – Pfahlgründungen – Grundwasserhaltung“, Vieweg & Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- Meurer,D., Stürmer,M., 2002, „Kabelsysteme für Mittel- und Hochspannung. Alterungsdiagnose: notwendig und hilfreich?“, EGT Fachbericht 87: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin
- Muhr,Michael, Woschitz,R., 2001, Kurzfassung zur Studie, „Teilverkabelung der 380 kV – Leitung Zwaring – Rotenturm“, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, Graz
- Neumann,Claus, 2006, „Monitoring und Diagnose als Werkzeug des Assetmanagements“, EGT Fachbericht 104: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Kassel
- Nexans, 2009, (Hrsg.), „High Voltage Catalogue. High Voltage Cables for Power Transmission – Accessories – Installation and Engineering“, Nexans Energy Networks Germany, [www.nexans.de](http://www.nexans.de)
- Niemand,Thomas, Schwermer,F., 1999, „Auswirkungen externer Vorgaben auf die Kabellegung eines EVU“, Elektrizitätswirtschaft (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW), Jg. 98 (1999), Heft 23, Seiten 52 – 57
- Noack,Friedhelm, 2005, Studie, „Gutachten zur Bewertung der 380 kV-Steiermark-Leitung aus energietechnischer Sicht“, Institut für Elektrische Energie- und Steuerungstechnik, TU Ilmenau, Ilmenau
- Nok, 2004, Studie, „Umbau 220-kV-Leitung Beznau – Birr auf 380/220 kV. Studie Teilverkabelung Riniken“, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Baden, [www.nok.ch](http://www.nok.ch)

- Obst, Dietmar, Minke, K.-H., 2001, „Sicherheitskonzept zur Betriebsführung einer 380 – kV – Kabel – Tunnelanlage“, Elektrizitätswirtschaft (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW), Jg. 100 (2001), Heft 26, Seiten 38 - 41
- Oeding, Dietrich, Oswald, B., 2004, „Elektrische Kraftwerke und Netze“, 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Oppermann, Gerhard, Wenzel, J.D., 1979, „Projektierung und Bau einer 380-kV-Kabelverbindung mit indirekter Kühlung“, AEG-Kabel, Technische Mitteilungen, Heft 2/79
- Oswald, Bernd, Müller, A., Krämer, M., 2005, „Vergleichende Studie zu Stromübertragungstechniken im Höchstspannungsnetz. Technische, betriebswirtschaftliche und umweltfachliche Beurteilung von Freileitung, VPE-Kabel und GIL am Beispiel der 380-kV-Trasse Ganderkesse – St.Hülfe“, ForWind Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Oldenburg und Hannover, Oldenburg & Hannover
- Oswald, Bernd, 2007, Studie, „380-kV-Salzburgleitung. Auswirkungen der möglichen (Teil)Verkabelung des Abschnittes Tauern-Salzach neu“, Gutachten im Auftrag von E-Control GmbH Wien, Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik Universität Hannover, Hannover
- Oswald, Bernd, 2008, „Gutachten zu Stromübertragungstechniken im Höchstspannungsnetz für die 380-kV-Leitung Schwerin/Görries nach Krümmel (Abschnitt Mecklenburg-Vorpommern) sowie zu dem Ringschluss des 110-kV-Leitungsnetzes Teilstrecken Görries-Gammelin und Wittenburg-Zarrentin. Teil 2 Vergleichende Bewertung von Freileitungen und Kabeln nach technischen betrieblichen und wirtschaftlichen Kriterien“, Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern, Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Leibniz Universität Hannover, Hannover
- Pinkert, Kyrre, Reinicke, U., Obrecht, H., Peier, D., 2006, „Dauerprüfanlage für elektrisch-thermisch-mechanisch belastete Kabel“, EGT Fachbericht 104: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Kassel
- Prysmian (Hrsg.), 2009, „Click-Fit® Joints. Accessories for high voltage polymeric cables“, www.prysmian.com, Abfrage August 2009
- Rechnungshof, 2009, „Maßnahmen zum Schutz der Umwelt und der Gesundheit im Straßenbau in Österreich“, Bericht Bund 2009/1 Band 3, <http://www.rechnungshof.gv.at/berichte>
- Schad, Hermann, Bräutigam, T., Bramm, S., 2008, „Rohrvortrieb. Durchpressung begehrter Leitungen“, 2. Auflage, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin

- Schlabbach, Jürgen, 2003, „Elektroenergieversorgung. Betriebsmittel, Netze, Kennzahlen und Auswirkungen der elektrischen Energieversorgung“, 2. Auflage, Vde – Verlag GmbH, Berlin
- Schmidt, Guido, Kranz, H.-G., 2006, „Alterungs- und Schädigungsdiagnose an künstlich geschädigten und nach DIN gealterten polymerisolierten Mittelspannungskabeln“, EGT Fachbericht 104: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Kassel
- Schneebeli, Heinz, 1995, „Der Bau von Kabel-Schutzrohranlagen in der Schweiz und die damit verbundene Optimierung von Kabelkonstruktionen“, Elektrizitätswirtschaft (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW), Jg. 94 (1995), Heft 23, Seiten 1532 – 1537
- Schubert, Wulf, O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont., 2010, Gespräch vom 18.01.2010 zum Thema Tunnelbau und Kosten., Leiter des Institutes für Felsmechanik und Tunnelbau an der TU Graz, Graz
- Schwab, Adolf J., 2006, „Elektroenergiesysteme. Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Simmer, Konrad, 1994, „Grundbau Teil 1. Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen“, 19. Auflage, B.G. Teubner, Stuttgart
- Simmer, Konrad, 1999, „Grundbau Teil 2. Baugruben und Gründungen“, 18. Auflage, B.G. Teubner, Stuttgart
- Spring, Eckhard, 2003, „Elektrische Energienetze. Energieübertragung und -verteilung“, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach
- Steffen, Horst, Bausch, H., 2007, „Elektrotechnik. Grundlagen“, 6. Auflage, B.G. Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- Stein, Dietrich, 2002, „Der begehbare Leitungsgang“, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co. KG, Berlin
- Stein, Dietrich, 2003, „Grabenloser Leitungsbau“, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co. KG, Berlin
- Swaffield, D.J., Lewin, P.L., Payne, D., Larsen, S.T., 2009, „Effects of modeling assumptions on the rating calculation for externally forced cooled high-voltage cables“, IET Generation, Transmission & Distribution, Volume 3, Issue 5, Pages 496 - 507
- Tietz, Hans-Peter, 2007, „Systeme der Ver- und Entsorgung“, B.G. Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden

- Uther,Dirk, Brakelmann,H., Stammen,J., Aldinger,E., Trüby,P., 2009, „Wärmeemission bei Hoch- und Höchstspannungskabeln“, Elektrizitätswirtschaft, Jg.108 (2009), Heft 10, Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW, Frankfurt am Main
- Vavra,J., Wanda,M., 2006, „The Vienna 400 kV north input“, Elektrotechnik & Informationstechnik (e & i), Jg.123 (2006), Heft 12, Springer-Verlag, Wien
- VDI, 2006, Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) „VDI – Wärmetlas“, 10.Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- VDEW, 1992, „Erdung in Starkstromnetzen“, 3.Auflage, Brunner, Winfried, Cichowski, R., Dietenhauser, E., Gröber, R., Kiefer, G., Passarge, K., Paul, H.-U., Völker, H., Weinmann, T., Zeuschel, H., VDEW-Verlag, Frankfurt am Main
- VDEW, 2007, „Kabelhandbuch“, 7. Auflage, Fischer, Matthias, Roth, H., VDEW Energieverlag GmbH, Frankfurt am Main
- Vennegeerts,Hendrik, Schubert,St., Quadflieg,D., 2008, „Erkenntnisse aus der FNN – Störungsstatistik“, [http://www.fgh.rwth-aachen.de/www/cms/front\\_content.php?idcat=149](http://www.fgh.rwth-aachen.de/www/cms/front_content.php?idcat=149) VDE-Kongress - Fachtagung Versorgungsqualität, München
- VEÖ, 2007, Faltblatt „Strom in Österreich 2007“, Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreichs in Zusammenarbeit mit E-Control, Wien
- Vermeer, 2009, „Grabenfräsen“, Vermeer Deutschland GmbH, <http://www.vermeer.de/produkte/fraesen/grabenfraesen>, Abfrage November 2009
- Wiznerowicz,Fred, 2008, „Kabeltechnik auf der Cigre 2008 in Paris“, ew (Elektrizitätswirtschaft), Jg.107 (2008), Heft 25-26, Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW, Frankfurt am Main
- Weigl,Roman, Ing. Msc, 2009, „Strom – eine heiße Sache!“, Zeitschrift, readING. Info der Ingenieurbüros , Ausgabe 33, Mai 2009, S. 11 - 12
- Weigl,Roman, Ing. Msc, 2010, Gespräch zum Thema Kühlanlagen und Kosten, rew Consulting, <http://www.rewconsulting.at/>
- Weißgerber,Wilfried, 2009, „Elektrotechnik für Ingenieure 2. Wechselstromtechnik, Ortskurven, Transformator, Mehrphasensysteme, Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium“, 7.Auflage, Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden



Wolfesperger, Hans, 2008, „Elektromagnetische Schirmung. Theorie und Praxisbeispiele“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Woschitz, Rudolf, WS 2008/09, Vorlesungsskript „Hochspannungsleitungen“, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, Graz

Zhang, Dongping, 2009, Dissertation, „Optimierung zwangsgekühlter Energiekabel durch dreidimensionale FEM-Simulation“, Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen, Duisburg Essen

### **Gesetze und Verordnungen:**

AAEV, „Allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen“, (AAEV), BGBl 186/1996

BauV, „Verordnung des Bundesministers für Arbeit und Soziales über Vorschriften zum Schutz des Lebens, der Gesundheit und der Sittlichkeit der Arbeitnehmer bei Ausführung von Bauarbeiten“ (Bauarbeiterschutzverordnung – BauV)“, BGBl 340/1994, <http://www.ris.bka.gv.at>

SNT-VO 2010, „Verordnung der Energie-Control Kommission, mit der die Tarife für die Systemnutzung bestimmt werden“, Systemnutzungstarife-Verordnung 2010

WRG, „Wasserrechtsgesetz 1959“, (WRG), BGBl 123/2006

### **Normen:**

VORNORM ÖVE ÖNORM E 8850, Februar 2006, „Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz – Beschränkung der Exposition von Personen“

ÖNORM L 1121, April 2003, „Schutz von Gehölzen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen“

ÖNORM B 2533, Februar 2004, „Koordinierung unterirdischer Einbauten – Planungsrichtlinien“