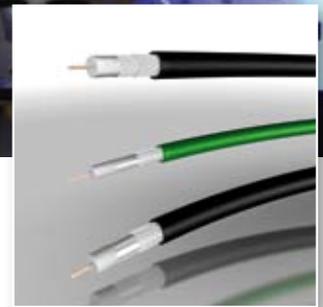




# Draka



Einsatz von Koaxialkabeln  
im HD-Studio

# Einsatz von Koaxialkabeln im HD-Studio

Aus Sicht eines Kabelherstellers wird das Augenmerk auf die Eigenschaften von Videokabeln und deren Einfluss auf die Bildübertragung gelenkt. Im Studio, wo die Signale erzeugt werden, ist es besonders wichtig, alle Einflüsse, die die Erzeugung der Signale und deren Übertragung beeinträchtigen könnten, entweder ganz auszuschließen oder zumindest zu minimieren. Im Beitrag werden Berechnungen und Erläuterungen der relevanten Standards gegeben.

## Einleitung

Welche physikalischen und elektrischen Eigenschaften sind für die Übertragung von Videosignalen einflussreich und daher ausschlaggebend für die Qualität einer Übertragung?

Im Beitrag werden folgende Parameter, Produktions- und Umwelteinflüsse betrachtet:

- Wellenwiderstand,
- Reflexion,
- Dämpfung
- Schirmdämpfung

Bei der Herstellung von Studiokabeln müssen die mechanischen Toleranzen so gering wie möglich gehalten werden. Mechanische Abweichungen des Innenleiters, der Isolierung (**Dielektrikum**) und des Außenleiters führen zu Reflexionen,

entweder zu örtlichen oder im schlimmsten Fall zu frequenzabhängigen Reflexionsspitzen (**Rückflussdämpfung**), wenn sie in regelmäßigem Abstand auftreten. Im Studio werden die Signale erzeugt und dort können diese Abweichungen fatale Folgen für die Übertragungseigenschaften haben. Mechanische Abweichungen führen zu Abweichungen vom Wellenwiderstand und damit zu einem unangepassten Übertragungsweg. Im angepassten Zustand sind die Verluste durch das Übertragungsmedium am geringsten.

Ein nicht unwesentlicher Punkt ist die Wahl der richtigen Stecker. Diese müssen unbedingt auf die Kabel abgestimmt sein. Entsprechende Informationen und Referenzlisten sind beim Kabel- und Steckerhersteller beziehbar.



## Wellenwiderstand

Wie ist der Wellenwiderstand definiert? Der Wellenwiderstand  $Z$  stellt das Verhältnis der in einer Richtung fortschreitenden Spannungswelle zu der in gleicher Richtung fortschreitenden Stromwelle dar und hat an jeder Stelle  $x$  der Leitung den gleichen Wert (nicht längenabhängig):

$$U_{(x)} = Z \cdot I_{(x)}$$

Beim Abschluss eines Kabels mit seinem Wellenwiderstand  $Z$  hat es seine günstigsten Übertragungseigenschaften:

- größte Leistungsübertragung
- geringste Verluste und
- keine Energiereflexion am Kabelende

Wovon ist der Wellenwiderstand eines Koaxialkabels abhängig?

1. Von seinen physikalischen Abmessungen, das heißt, dem Durchmesser des Innenleiters und des Außenleiters
2. vom Dielektrikum
3. von der Frequenz

Oberhalb von etwa 5 MHz hat der Wellenwiderstand einen konstanten reellen Wert:

$$Z \xrightarrow{f \rightarrow \infty} \text{Re}(Z)$$

Wie bereits zuvor erwähnt, wird der Wellenwiderstand des Kabels vom Innenleiterdurchmesser  $d$  und Außendurchmesser  $D$ , gemessen über Dielektrikum, sowie von der Wahl des Dielektrikums, bei verzellten Dielektrika auch von der Verschäumung  $s$  bestimmt:

$$Z \approx 60 \Omega \ln \frac{D/d}{\sqrt{e^{(1-s)\ln(\epsilon_r, PE)}}}$$

Bei der Kabelherstellung bedeutet das, alle Parameter müssen gleichzeitig konstant gehalten werden, um geringste Toleranzen bei der Wellenwiderstandsabweichung im Kabel zu erreichen. Um das zu gewährleisten, ist ein exaktes Zusammenspiel von Drahtvorheizung, Stickstoff- und Materialzufuhr, Temperaturführung, Drehzahlregelung der Extruder und Regelung der Ab- und Aufwickler notwendig. Dazu kommen hohe An-

forderungen an die Gleichmäßigkeit der Liniengeschwindigkeit und an einen genau definierten Abkühlvorgang. Ebenfalls ist die Verhinderung von Schwingungen des Innenleiters bei der Einführung in den Extruder zu gewährleisten. Wenn diese Parameter eingehalten werden, kann eine Wellenwiderstandsgenauigkeit von  $75\Omega \pm 1\%$  erreicht werden.

## Wie sind die Begriffe Rückflussdämpfung, örtliche Reflexion, Reflexionsfaktor definiert?

Der Rückfluss ist ein Maß für die Homogenität des Kabels. Üblicherweise das Spannungsverhältnis  $a$  von hin- zu rücklaufender Welle als Rückflussdämpfung in dB angegeben ( $20 \log|a|$ ). Dabei gilt für den Frequenzbereich bis 1 GHz größenordnungsmäßig:

- 17 dB schlechter Wert
- 30 dB guter Wert



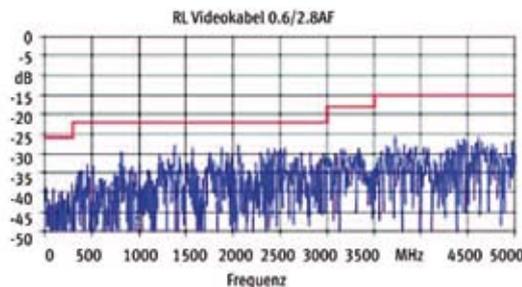


Bild 1 Rückflussdämpfungsmessprotokoll

Der Rückfluss stellt die Überlagerung aller reflektierten Wellen dar, die an Stoßstellen der Übertragungsstrecke (Abweichung vom Wellenwiderstand) reflektiert werden.

Der Mitfluss ist folgendermaßen zu verstehen: Wird der Rückfluss von einer Stoßstelle nochmals reflektiert, so entsteht ein Wellenanteil, der mit geringer Verzögerung in der Richtung des Hauptflusses läuft.

Die örtliche Reflexion ist die Reflexion an einer zufällig auftretenden Stoßstelle (Wellenwiderstandsinhomogenität).

Der Reflexionsfaktor  $r$  ist das Amplitudenverhältnis der rücklaufenden Welle zur hinlaufenden Welle. Der Reflexionsfaktor  $r$  liegt damit zwischen  $-1 \leq r \leq 1$ . Es gelten folgende Sonderfälle für einen Leitungsabschluss mit  $Z_x$ :

$r = 0$	Anpassung	$Z_x = Z_0$
$r = 1$	Leerlauf	$Z_x = \infty$
$r = -1$	Kurzschluss	$Z_x = 0$

Veränderungen der Abmessungen bei der Fertigung von HF-Kabeln stellen Inhomogenitäten dar (Abweichungen vom Wellenwiderstand). Periodisch kleine Wellenwiderstandsunregelmäßigkeiten - also Störstellen im gleichen Abstand - führen zu einer Addition von Reflexionen.

Die Folgen sind:

- Resonanzen bei bestimmten Frequenzen
- Welligkeiten in der Dämpfungscharakteristik

Die Inhomogenitäten sind klein und deshalb nicht erkennbar mit dem Impuls-Echoverfahren.

Das Erkennen dieser Wellenwiderstandsabweichungen wird deshalb mit der frequenzabhängigen Rückflussdämpfungsmessung vorgenommen [dB]. Je höher der Wert der Rückflussdämpfung ist, desto gleichmäßiger ist das Kabel gefertigt (Bild 1).

Statistisch verteilte Wellenwiderstandsabweichungen kleiner Größe haben Reflexionen zur Folge, die ich nicht phasenrichtig addieren und somit praktisch keinen Einfluss auf die Rückflussdämpfung haben.

Örtliche Fehler werden mit dem Time-Domain-Reflektometer gemessen. Es wird von einer TDR-Messung gesprochen. Sowohl periodisch wiederkehrende als auch statistisch verteilte Fehler können als Reflexionsfaktor ausgedrückt werden. Gebräuchlich ist es, bei der TDR-Messung den Reflexionsfaktor in % anzugeben.

### Fehlanpassung

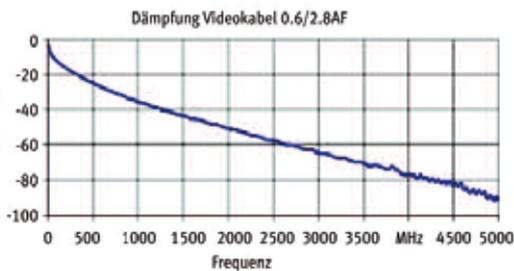
Eine Abweichung vom Wellenwiderstand bedeutet immer eine Fehlanpassung, die zu Reflexionen führt. Ein klassisches Beispiel für Reflexion und Fehlanpassung sowie deren Auswirkungen kann mit einem Studiomonitor simuliert werden. Dazu wird ein Monitor mit schaltbarem  $75 \Omega$  Eingangswiderstand benötigt. Wird hier der Eingang des Monitors nicht abgeschlossen, können am Monitor die Auswirkungen einer Fehlanpassung betrachtet werden (Fehlinterpretationen des Monitors bezüglich Farbart und Luminanz usw.).

Örtliche Abweichungen des Wellenwiderstands im Kabel, die in regelmäßigem Abstand auftreten, sind ebenfalls gefährlich und unerwünscht. Fallen zum Beispiel diese frequenzabhängigen Abweichungen (Reflexionsspitzen) in sogenannte Schlüsselfrequenzen, können diese erhebliche Auswirkungen haben. Speziell bei Triaxkabeln sind spezielle Schlüsselfrequenzen für die Übertragung von besonderer Bedeutung.

### Dämpfung „ $\alpha$ “

Was ist der Unterschied zwischen Wellendämpfung und Betriebsdämpfung?

Unter Wellendämpfung wird das Verhältnis von  $U_e/U_a$  bei Abschluss der Leitung mit ihrem Wellenwiderstand verstanden. Die Betriebsdämpfung beschreibt die Verhältnisse bei nicht ganz homo-



**Bild 2** Dämpfungsverlauf eines Koaxialkabels

genen Kabeln, bei denen der Wellenwiderstand nicht überall an jeder Stelle gleich ist. Sie umfasst und enthält auch die Stoßdämpfungen, die durch sogenannte Stoßstellen auf dem Kabel hervorgerufen werden (Reflexionen). Ferner sind auch Abweichungen zwischen dem Wellenwiderstand des Kabels und der sendenden und empfangenden Geräte von Bedeutung. Die Dämpfung (**Bild 2**) eines Koaxialkabels ist ein Maß für die auftretenden Verluste. Sie setzt sich zusammen aus:

1. Widerstandsdämpfung B: Herrührend von den Widerstandsverlusten der Leiter. Der Dämpfungsanteil, herrührend von den Leitern, verhält sich aufgrund des Skineffekts umgekehrt proportional zu dem Leiterdurchmesser und steigt ab etwa 800 kHz mit der Wurzel aus der Frequenz an.

2. Ableitungsdämpfung A: Durch Verluste im Dielektrikum aus Menge und Verlustwinkel  $\tan \delta$  (Reibungsverluste bei der Umausrichtung polarer Bestandteile im Wechselfeld). Die Ableitungsdämpfung steigt proportional mit der Frequenz.

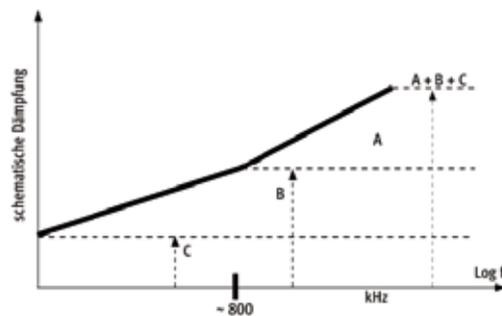
3. Faktorgrunddämpfung C: Durch die rein ohmschen Verluste verursacht. Im **Bild 3** werden die Verhältnisse dargestellt:

- A = Ableitungsdämpfung
- B = Widerstandsdämpfung
- C = Faktorgrunddämpfung

#### Dämpfung bei Kabeln und ihre Einsatzlängen

Die maximale Einsatzlänge hängt im Wesentlichen bei Kabeln von den Dämpfungswerten bei den zu betrachtenden Frequenzen ab.

Bei Videokabeln werden die Dämpfungswerte bestimmt durch:



**Bild 3** Verhältnis von Ableitungs- (A), Widerstands- (B) und Faktorhintergrunddämpfung (C)

- Innenleiterabmessung und -aufbau
- Geflecht (Geflechtswinkel, Drahtstärke im Verhältnis zum Durchmesser des Dielektrikums),
- Folienaufbau, Al-Schichtdicke
- dielektrische Verluste im hohen Frequenzbereich (Verlustfaktor  $\tan \delta$ ).

#### Maximale Einsatzlänge

Anlässlich der WM2006 und des damals geforderten HDTV-Signals 1080i wurden bezüglich der Einsatzlänge eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt (Kabelhersteller, Gerätehersteller, Übertragungswagenbauer usw.).

#### Messaufbau zur Ermittlung der maximalen HD-Einsatzlänge

Für die Ermittlung der maximalen Einsatzlänge wurden folgende Geräte benutzt:

- Taktgeber/Signalgenerator: Tektronix TG 2000, alternativ TG700
- Waveform-Monitor: Tektronix WFM 700, alternativ WFM 8300

Bei diesen Messungen galten ganz bestimmte Bedingungen:

- Laborbedingungen (konstante geringe Feuchtigkeit, stabile Raumtemperaturen, usw.)
- neuer, optimaler Zustand der konfektionierten Kabel
- Kabel und Stecker sind aufeinander abgestimmt

Ein unabhängiges Institut untersuchte ebenfalls die Einsatzlänge und bezifferte den maximalen Wert des bekannten 0.6/2.8AF auf 90 m. Sind

diese physikalischen Bedingungen bei unterschiedlichen Herstellern tatsächlich gleich, so sind die elektrischen Eigenschaften ebenfalls gleich. Sehr häufig werden dünne Innenleiter mit dicken Innenleitern verglichen. Das ist nicht zulässig, es müssen immer gleiche Abmessungen verglichen werden. Diese Messungen (Tabelle 1) sind sogenannte praktische Einsatzlängen. Hier werden konfektionierte Kabel unter Laborbedingungen gemessen und bewertet.

Kabeltyp	maximale Kabellänge bei HD 1080i gessen
0.6/2.8AF	90 m
0.8/3.7AF	120 m
1.0/4.8AF	140 m
1.4/6.6AF	200 m
1.6/7.3AF	240 m

Kabeltyp	maximale Kabellänge bei HD 1080p gessen
0.6/2.8AF	80 m
0.8/3.7AF	110 m
1.0/4.8AF	130 m
1.4/6.6AF	170 m
1.6/7.3AF	210 m

**Tabelle 1** Gemessene maximale Einsatzlängen

### Equalizer und maximale Einsatzlängen

Die gemessenen maximalen Einsatzlängen (siehe Tabelle 1) können je nach Endgerät und Endgerätehersteller variieren. Ursache ist die unterschiedliche Hardware, insbesondere unterschiedliche Equalizergenerationen. Zum Teil können in einem Gerät auch unterschiedliche Equalizer zur Verwendung kommen.

### SMPTE contra praktische maximale Einsatzlänge

Die SMPTE beschreibt einen anderen Weg.

#### SMPTE 292M

War es bei SDI (SMPTE 259M) noch 30 dB maximale Dämpfung bei halber Clock-Frequenz, ist es bei HDTV (SMPTE 292M) 20 dB maximale Dämpfung (Tabelle 2) - Norm: SMPTE 292M, Signal: 1080i und 720p (1,5 Gbit/s).

Die Vorgabe aus der Norm lautet: 20 dB maximale Dämpfung bei halber Clock-Frequenz (1,5 Gbit/s → 0,750 GHz)

$$\alpha = Af + B\sqrt{f} + C$$

$$L_{\max} = \frac{20\text{dB}/100\text{m}}{\alpha_{750\text{MHz}}[\text{dB}/100\text{m}]} \cdot 100$$

Standard Kabeltyp	kalkulierte Kabellänge Dra-ka Comtec
0.6/2.8AF	66 m
0.8/3.7AF	91 m
1.0/4.8AF	112 m
1.4/6.6AF	144 m
1.6/7.3AF	161 m

**Tabelle 2** kalkulierte maximale Einsatzlängen nach SMPTE 292M

#### SMPTE 424M

Wie beim 1,5-Gbit/s-Signal (SMPTE 292M) sind die Vorgaben bei 3 Gbit/s (SMPTE 424M) identisch. Die maximale Übertragungslänge für 3 Gbit/s nach SMPTE 424M (kalkulatorische Einsatzlängen) wird in Tabelle 3 dargestellt (Norm: SMPTE 424M, Signal: 1080p/50 und 1080p/60 für 3 Gbit/s HD). Die Vorgabe aus der Norm lautet: 20 dB maximale Dämpfung bei halber Clock-Frequenz (3 Gbit/s → 1,5 GHz)

$$L_{\max} = \frac{20\text{dB}/100\text{m}}{\alpha_{750\text{MHz}}[\text{dB}/100\text{m}]} \cdot 100$$



Bleibt nun noch die Frage, welche maximale Einsatzlänge ist die richtige. Ist es die kalkulierte maximale Einsatzlänge nach SMPTE oder die Einsatzlänge durch Probieren?

Typ	Dämpfung bei 1,5 GHz in dB aus Datenblatt	kalkulierte Einsatzlänge in m gemäß SMPTE 424M
0.6/2.8AF	43,2	47
0.8/3.7AF	31,3	64
1.0/4.8AF	24,9	80
1.4/6.6AF	19,6	102
1.6/7.3AF	16,9	119

**Tabelle 3** kalkulierte maximale Einsatzlänge nach SMPTE 424M

### Temperatureinfluss auf die Dämpfung

In der Praxis kommen klimatisch bedingte Temperatur- und Feuchtigkeitsabweichung, sowie Alterung und andere Einflüsse zum Tragen. Die Dämpfung ist temperaturabhängig und die Hersteller geben die Dämpfung ihrer Kabel bei 20 °C an (siehe Datenblatt). Mit steigender Temperatur nimmt die Dämpfung mit etwa 0,2 %/°C zu (bei chemisch verzelltem PE bis maximal 0,27 %/°C).

### Equalizer und Hardware

Ferner können nun noch bedingt durch die Equalizer der unterschiedlichen Gerätehersteller - aber auch bei unterschiedlichen Generationen eines einzigen Herstellers - unterschiedliche Einsatzlängen erreicht werden. Die richtige auf den Anwender zugeschnittene Einsatzlänge wird durch viele Faktoren bestimmt. Es sind zum einen die Geräte mit unterschiedlicher Hardware, die zum Einsatz kommen, zum anderen die Kabel mit den entsprechenden Abmessungen und den passenden Steckern. Werden noch die nicht zu vernachlässigenden Effekte wie Feuchtigkeit, Alterung und Temperatureinflüsse berücksichtigt, bleibt nur die durch die SMPTE definierte Einsatzlänge als Alternative.

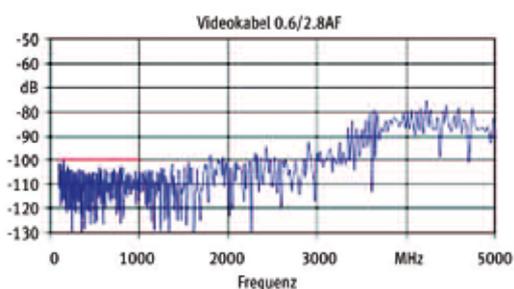
### Schirmdämpfung

Elektromagnetische Störungen, die von außen auf das Übertragungssystem einwirken, beeinflussen im Wesentlichen das räumlich ausgedehnteste Übertragungselement, das Kabel. Überlagern Störsignale das Nutzsignal, können Signalverfälschungen oder sogar eine Unterbrechung des Signalfusses die Folge sein. Werden bei analogen Signalen von außen einwirkende Störungen als Dropouts und zu lange Videoübertragungstrecken als Signalpegeländerung im Bild erkannt, gibt es bei der digitalen Übertragung nur die Zustände Bild oder kein Bild.

Je höher die Schirmdämpfung (**Bild 4**), desto besser ist die Störsicherheit. Eine Abschirmung aus einer Aluminium-Doppelverbundfolie plus Geflecht weist im Frequenzbereich um 135 MHz (Clock-Frequenz von SDI) eine um bis zu 30 dB bessere Schirmdämpfung gegenüber einem Kabel mit Doppelgeflecht auf, gegenüber einem Kabel mit Einfachgeflecht sogar um 40 dB. Bei HDTV ist das ein entscheidender Unterschied. Mit dem Blick auf die Störsicherheit bei Videokabeln sollte deshalb die Schirmdämpfung >100 dB liegen.

### Schlussbemerkung

Generell kann gesagt werden, dass mit der zunehmenden Verbreitung von 1080i- bzw. 1080p-Signalen auch die Anforderungen an die Studioverkabelung wachsen. Nicht zu vernachlässigen sind dabei die natürlichen Verluste von hochfrequenten Signalen auf Leitungslängen von über 60 m und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Signalqualität. Aber auch Steckverbindungen müssen als Fehlerquellen in Erwägung gezogen werden, um einen reibungs- und verlustfreien Studiobetrieb zu gewährleisten.



**Bild 4** Schirmdämpfung

# Zukunftsorientierte Verkabelungslösungen

Draka Communications verfügt über Büros und Produktionsstätten auf der ganzen Welt. Um mit uns in Kontakt zu treten und um herauszufinden, wie wir Ihnen helfen können Ihre Netzwerke aufzubauen, besuchen Sie unsere Website unter [www.draka.com/communications](http://www.draka.com/communications) oder kontaktieren Sie uns.

## Denmark

Priorparken 833,  
DK-2605 Broendby  
Phone: +45 43 48 20 50  
Telefax: +45 43 48 26 59  
[br.info@draka.com](mailto:br.info@draka.com)

## Germany

Friedrichshagener Strasse 29-36  
D - 12555 Berlin  
Phone: +49 30 65 485 760  
Telefax: +49 30 65 485 602  
[berlin.info@draka.com](mailto:berlin.info@draka.com)

## Germany\*

Piccolomini Strasse 2  
D - 51063 Cologne  
Phone: +49 221 67 70  
Telefax: +49 221 67 73 890  
[koeln.info@draka.com](mailto:koeln.info@draka.com)  
\*) including: Switzerland

## Finland\*

Kimmeltie  
1 FIN - 02110 Espoo  
Phone: +358 10 56 61  
Telefax: +358 10 56 63 394  
[fi-info@draka.com](mailto:fi-info@draka.com)  
\*) including: The Baltic, Poland, Ukraine, Belarus, Georgia and Armenia.

## France

Le Sophocle - Parc de Algorithmes  
9, Avenue du Marais 95100 Argenteuil  
Phone: +33 1 34 34 41 30  
Telefax: +33 1 30 76 40 12  
[dcf.sales@drakacomteq.com](mailto:dcf.sales@drakacomteq.com)

## Netherlands

(HQ - Comteq Cable Division)  
De Boelelaan 7 - Building Officia I  
NL-1083 HJ Amsterdam  
Phone: +31 20 56 89 865  
Telefax: +31 20 56 89 409  
[comteq.info@draka.com](mailto:comteq.info@draka.com)

## Netherlands

(HQ - Comteq Fibre Division)  
Zwaanstraat 1  
NL-5651 CA Eindhoven  
Phone: +31 40 295 87 00  
Telefax: +31 40 295 87 10  
[fibresales@draka.com](mailto:fibresales@draka.com)

## Netherlands\*

Zuidelijk Halfroond 11  
NL-2801 DD Gouda  
Phone: +31 182 59 21 00  
Telefax: +31 182 59 22 00  
[nl.dct.info@draka.com](mailto:nl.dct.info@draka.com)  
\*) including: Belgium and Luxembourg

## Norway\*

Kjerraten 16  
3013 Drammen  
Phone: +47 32 24 90 00  
Telefax: +47 32 24 91 16  
\*) including: Sweden and Iceland

## Austria\*

Trillergasse 8  
A-1210 Wien  
Phone: +43 1 294 0095 16  
Telefax: +43 1 294 0095 97  
[brigitte.leitner@draka.com](mailto:brigitte.leitner@draka.com)  
\*) including: Hungary, Czech Republic, Slovakia, Slovenia, Albania, Macedonia, Romania and Bulgaria.

## Romania\*

Draka Iberica Plant  
Romanian Representative Office  
Calea Floreasca, nr 169A, Floor 4  
Regus Biz Center, code 014472  
Sector 1, Bucharest  
Phone: +40 3 18 60 22 65  
Telefax: +40 3 18 60 21 00  
[vladimiro.doicaru@draka.com](mailto:vladimiro.doicaru@draka.com)  
\*) including: Greece and Moldavia

## Russia

Neva Cables Ltd.  
8th Verkhny pereulok, 10,  
RUS-St. Petersburg, 194292  
Phone: +7 812 592 84 79  
Telefax: +7 812 592 77 79  
[office@nevacables.ru](mailto:office@nevacables.ru)

## Spain

Av. de Bilbao 72  
E-39.600 Maliaño - Cantabria  
Phone: +34 942 24 71 00  
Telefax: +34 942 24 71 14  
[ana.sierra@draka.com](mailto:ana.sierra@draka.com)

## Spain\*

Can Vinyalets núm. 2  
E-08130 Sta. Perpetua de la Mogoda  
Barcelona  
Phone: +34 935 74 83 83  
Telefax: +34 935 60 13 42  
[josep.cabrera@draka.com.es](mailto:josep.cabrera@draka.com.es)  
\*) including: Portugal and Italy

## Turkey\*

Cumhuriyet Cad. Yedek Reis Sok.  
No. 9 Ergun Plaza K.4 Kavacik  
34810 Beykoz Istandbul  
Phone: +90 216 682 80 01  
Telefax: +90 216 537 66 73  
[mea-info@draka.com](mailto:mea-info@draka.com)  
\*) including: All other countries in Africa and Middle East

## United Kingdom\*

Crowther Road,  
Crowther Industrial Estate,  
Washington, Tyne and Wear,  
NE38 0AQ  
Phone: +44 191 415 50 00  
Telefax: +44 191 415 82 78  
[comtequk@draka.com](mailto:comtequk@draka.com)  
\*) including: Ireland



# Draka

