



Power over Ethernet

Daten und Energie nutzen Twisted-Pair-Verbindungen gemeinsam

Die Idee, ein Medium zu mehreren Zwecken zu nutzen, ist nicht neu. Man denke an das gute alte Telefon. In seinen Anfangszeiten wurde es noch mit einer eingebauten Batterie für den Sprechstrom der Kohlemikrofonkapsel und einem Kurbelinduktor zur Erzeugung des Signalisierungsstroms betrieben. Schon sehr früh verlagerte man Batterie und Induktor aus dem Telefon in die Vermittlungsstelle. Das steigerte die Zuverlässigkeit der Funktion und vereinfachte die Bedienung. Die Zweidrahtverbindung mit dem Amt hatte seit dieser Zeit die Aufgabe, sowohl Daten (Sprechströme) als auch Betriebs- und Rufenergie zu transportieren. Weitere Beispiele sind der Drahtfunk (Radio über Stromleitungen) und PLC (Power Line Communication: Ethernet über Stromleitungen). Vor diesem Hintergrund scheint die Doppelnutzung von Ethernet-Leitungen für Daten und Strom nur konsequent. Der Artikel informiert über Technik, Vorteile und Zukunftsperspektiven von Power over Ethernet (PoE).

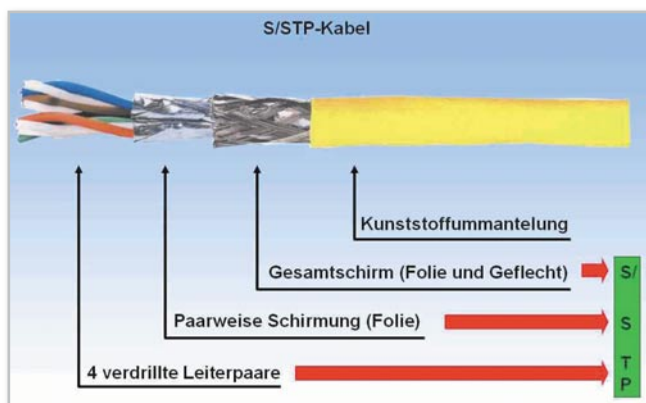


Bild 1: Ein Ethernet-Kabel der höchsten Leistungskategorie Cat 7 besteht aus 4 foliengeschirmten Adernpaaren, die als Bündel abermals geschirmt sind.

Grundlagen

Moderne Ethernet-Vernetzungssysteme verwenden sogenannte Twisted-Pair-Kabel (TP), die in der hochwertigen Variante aus vier jeweils mit Aluminiumfolie geschirmten verdrehten Adernpaaren (PIMF: Pairs in Metal Foil) bestehen. Werden diese geschirmten Adernpaare verseilt und von einer weiteren Schirmfolie umhüllt, spricht man von S/STP-Kabeln (Shielded Twisted Pair) der Kategorien 6 oder 7 (Abbildung 1). Für Ethernet-Zwecke hat sich das im Standard ISO/IEC 11801 definierte RJ45-Stecksystem mit 8 Kontakten durchgesetzt (Abbildung 2, Abbildung 3). Für die Farbgebung der Adernpaarisolierung ist blau/weiß-blau, grün/weiß-grün, orange/weiß-orange und braun/weiß-braun üblich. Die Zuordnung der Farben zu den Kontaktpins ist leider nicht ganz einheitlich. Es finden die Normen TIA/EIA 568A und TIA/EIA 568B Anwendung (Abbildung 4). Für durchgängige Kabel (straight cable) ist die Farbzuordnung eigentlich gleichgültig, sie muss nur an beiden Kabelenden gleich erfolgen. Allerdings ist die Belegung rechts in Abbildung 4 (T568B) erheblich häufiger in der Praxis anzutreffen. Sie unterscheidet sich von der links (T568A) durch die Vertauschung der Paare 3 (grün/weiß-grün) und 2 (orange/weiß-orange). Wird an einem Ende nach dem Schema T568A und am anderen nach T568B aufgelegt, ergibt sich ein gekreuztes Kabel (crossover cable). Die Kreuzung bewirkt, dass die Sende- und Empfangspins auf beiden Seiten einander richtig zugeordnet werden (senden links \leftrightarrow empfangen rechts, senden rechts \leftrightarrow empfangen links). Weil die Zusammenschaltung von Ethernet-Strecken in der Regel über „Switches“ oder „Hubs“ erfolgt, in denen die Kreuzung intern erfolgt, werden gekreuzte Kabel nur zur Herstellung einer direkten Datenverbindung z. B. zwischen zwei PCs benötigt.

Seit 2003 ist Power over Ethernet durch die Norm IEEE 802.3af „Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specification. Amendment: Data Terminal Equipment (DTE) Power via Media Dependent Interface“ definiert. Als Ergänzung zum damals bereits bestehenden Ethernet-Standard legt sie fest, wie der Transport von Energie über ein Datenkabel zu erfolgen hat, ohne die Datenintegrität und die Netzwerksicherheit zu beeinträchtigen.

Grundsätzlich sind speisende Geräte (Power Sourcing Equipment PSE = Quellen) und gespeiste Geräte (Powered Device PD = Senken, Verbraucher) zu unterscheiden. Mit anderen Worten: Jedes PoE-Gerät gehört einer der beiden Kategorien PSE oder PD an. Besonders die IP-Telefonie hat zum Wachstum von PoE beigetragen. Sie baut im großen Stil auf kombinierten Daten- und Sprachnetzen mit gemeinsamer Infrastruktur auf und hilft dem Anwender dadurch Kosten zu sparen.

Prognosen

In stark steigendem Maß sind inzwischen PoE-fähige WLAN-Access-Points, IP-Kameras und Printserver erhältlich. Die in Abbildung 5 dargestellte Prognose über das Wachstum des PoE-Marktes ist wahrscheinlich recht konservativ. Die Auswirkungen ständig steigender Energieeffizienz in der Elektronik und die Leistungserweiterungen durch PoE plus werden in Zukunft auch Laptops, Touchscreens usw. PoE-fähig werden lassen. Diese können dann dank ihres niedrigen Energieverbrauchs ohne eigenes Netzteil am Ethernet betrieben werden. Zudem lässt sich mit entsprechender Intelligenz in den PSEs (z. B. den Switches) die Energieabgabe über den betreffenden Port an den Bedarf des Endgeräts anpassen. So kann PoE mit dem Potenzial zu beträchtlichen Energieeinsparungen eine wichtige Rolle in zukünftigen Nachhaltigkeitsszenarien spielen.

Mid- und Endspan

Die Energie zur Speisung des PDs kann entweder individuell über sogenannte PoE-Injektoren (Midspan) oder im Switch (Endspan) auf seine Ethernet-Leitung eingekoppelt werden (Abbildung 6). PoE-fähige Geräte greifen sie intern hinter ihrem Ethernet-Port ab. Aber auch die Möglichkeit zum Auskoppeln der Speiseenergie zur Versorgung nicht-PoE-fähiger Endgeräte über deren DC-Buchse durch sogenannte Power-Extraktoren besteht. Es ist dann kein externes Steckernetzteil erforderlich. Falls man in einem Ethernet ohne PoE nur ein einzelnes PD betreiben will, ist ein einzelner Power-Injector als einfachster Midspan-Power-Injector die günstigste Lösung (Abbildung 7).

Midspan-Lösungen verwenden zwei ungenutzte Adernpaare des Ethernet-Kabels (Abbildung 8 unten), die nur bei Übertragungsgeschwindigkeiten mit 10 oder 100 Mbit/s (10BaseT, 100BaseT) zur Verfügung stehen. Allerdings lassen sich über derart genutzte Kabel keine zwei PoE-Verbindungen mehr herstellen – Cable-Sharing ist also nicht möglich. Diesem

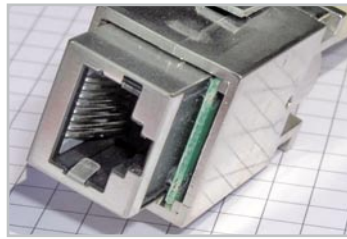


Bild 2: Deutlich sind die 8 Kontaktfedern in der RJ45-Buchse einer Standard-Ethernet-Steckverbindung zu erkennen.



Bild 3: 8 Schleifkontakte im RJ45-Stecker gleiten beim Einstecken über die korrespondierenden Kontaktfedern der Buchse.

Nachteil steht als Vorteil gegenüber, dass die Netzwerkgeräte nicht erst umgerüstet werden müssen. Für zukünftige Netze mit Datenraten von 1000 Mbit/s (1000BaseT, Gigabit-Ethernet) und mehr ist die Midspan-Lösung ohnehin nicht mehr möglich.

Endspan-Lösungen erfordern den Austausch normaler Switches gegen PoE-taugliche, d. h. solche mit integrierter Einspeisung. Dabei werden die Signaldernpaare 2 und 3 nach Art einer Phantomspeisung gleichzeitig zum Transport der Speiseenergie verwendet (Abbildung 8 oben). Die bei 10/100BaseT-Systemen ungenutzten Adernpaare 1 und 4 stehen also für einen vollständigen Ethernet-Kanal mit oder ohne Endspan-PoE zur Verfügung.

Eine kleine Zusammenfassung der Vor- und Nachteile von PoE-Mid- und -Endspan-Verkabelungen gibt Abbildung 9. Ein typisches Beispiel für einen größeren Workgroup-PoE-Switch mit 52 Ports und Managementfunktionen zeigt Abbildung 10.

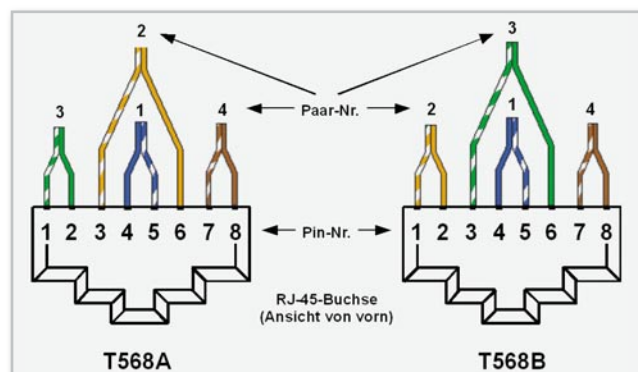


Bild 4: Zwei Zuordnungen der Adernpaare zu den RJ45-Kontakten sind üblich, die rechte (T568B) ist weitaus häufiger anzutreffen.

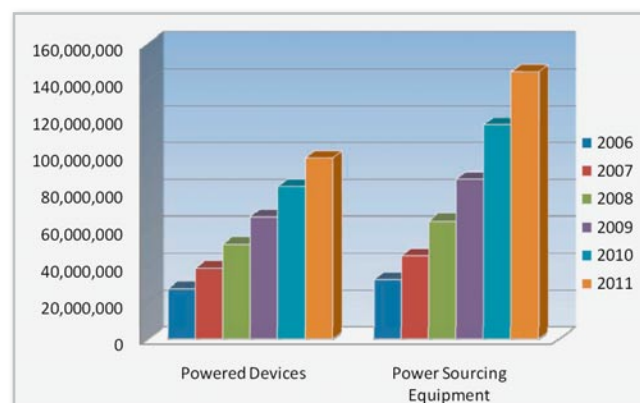


Bild 5: PoE wird ein starkes Wachstum vorausgesagt. (Quelle: Dell'Oro Group)

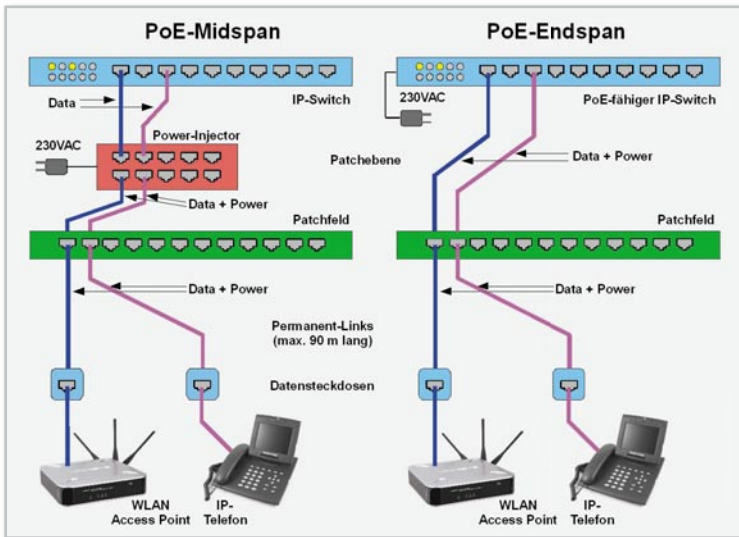


Bild 6: Bei Midspan-Lösungen wird die Leistung in das Kabel eingeschleift, die Switches können bleiben. Endspan-Lösungen benötigen PoE-fähige Switches, die auch die Aufgabe der Stromversorgung übernehmen.

Elektrische Kennwerte

Seit Mitte 2003 spezifiziert der PoE-Standard IEEE 802.3af unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften des Querschnitts des TP-Kabels und der Kontaktflächen in den RJ45-Steckverbindungen die maximal zulässige Stromstärke von 0,35 A bei einer für den Menschen unbedenklichen „Schutzkleinspannung“ zwischen 44 und 57 V_{DC}. Für ein 100 m langes TP-Kabel wird ein Schleifenwiderstand von 20 Ohm angenommen. Wegen des daraus resultierenden Spannungsfalls von 7 V im Kabel stehen dem Verbraucher minimal $(44-7) \text{ V} = 37 \text{ V}$ zur Verfügung, was einer Leistung von $37 \text{ V} \times 0,35 \text{ A} = 12,95 \text{ W}$ entspricht. Damit lässt sich bereits eine Vielzahl von Endgeräten betreiben: IP-Kameras, WLAN-Access-Points, IP-Telefone, Printserver, Magnetkarten-, Barcode- und RFID-Leser usw.

Für den Betrieb eines Notebooks, eines Flachbildschirms zur Wiedergabe von IP-Videostreams oder eines POS-Terminals

(Supermarktkasse mit Scanner) ist dies trotz ständig steigender Energieeffizienz nicht ausreichend. Hier soll der neue, kurz vor der endgültigen Verabschiedung stehende Standard 802.3at für „PoE plus“ Abhilfe schaffen. Ihn kompatibel zum Standard 802.3af zu gestalten, hat einige Erweiterungen erfordert. Die wichtigsten Kennwerte beider Standards zeigt Abbildung 11.

PoE-Betrieb

Im Standard 802.3af sind fünf Leistungsklassen für das PD definiert. Das PSE ermittelt diese und stellt sein Leistungsangebot an die PDs entsprechend ein (Abbildung 11). Das sichert den energiesparenden Betrieb eines an dem betreffenden Port angeschlossenen PDs und stellt mehr Leistung zum Betrieb der PDs an den anderen Ports zur Verfügung. Um die Zerstörung eines nicht PoE-fähigen Endgerätes durch Anlegen einer Versorgungsspannung auszuschließen, führt das PSE beim Herstellen der Verbindung oder beim ersten Einschalten eine Reihe komplexer Tests durch. Damit wird das Endgerät identifiziert (Signature) und im Falle eines PDs seiner Leistungsklasse zugeordnet (Classification). Das Signalisierungsprotokoll bei 802.3af zur Erkennung von Leitungszustand und Leistungsbedarf der angeschlossenen

Bild 7: Wenn in einem Ethernet ohne PoE nur ein oder wenige PoE-Endgeräte betrieben werden sollen, ist ein Single-Power-Injector die billigste Lösung. (Foto: Laird Technologies)



Endgeräte ist in Abbildung 12 detailliert dargestellt. Im Wesentlichen werden fünf Abschnitte (periods) unterschieden: **Erkennen.** Durch Anlegen von zwei Spannungsrampen mit 2,8 und 10,1 V Scheitelspannung misst das PSE den dadurch hervorgerufenen Strom (sequence signature detection). Er gibt Aufschluss darüber, ob ein PD angeschlossen ist. Wenn ja, beginnt die Klassifizierungsphase. Wenn nein (also kein Gerät oder ein Nicht-PoE-Gerät), bleibt die Spannungsversorgung über das Ethernet-Kabel abgeschaltet.

Klassifizieren. In dieser Phase durchfährt das PSE einen Spannungsbereich von 14,5 bis 20,5 V und wertet die Antwort des PDs in Form eines Signaturstroms als Information über seine Leistungsklasse nach Abbildung 13 aus. Ein PoE-plus-PD würde von einem PoE-plus-PSE zweimal in dieser Phase angefragt und im Gegensatz zu einem Standard-PoE-Gerät zweimal mit einem Strom von 44 mA antworten. Damit hätte es seine Zugehörigkeit zur Klasse 4 offengelegt.

Start und Betrieb. Wenn sich das angeschlossene Gerät als PD identifizieren ließ, wird seine Versorgungsspannung angeschaltet und beständig überwacht.

Trennen. Durch das Herausziehen des Ethernet-Steckers wird die Stromaufnahme unterbrochen. Fällt der Strom unter einen Wert von 5–10 mA erfolgt augenblicklich die Abschalt-

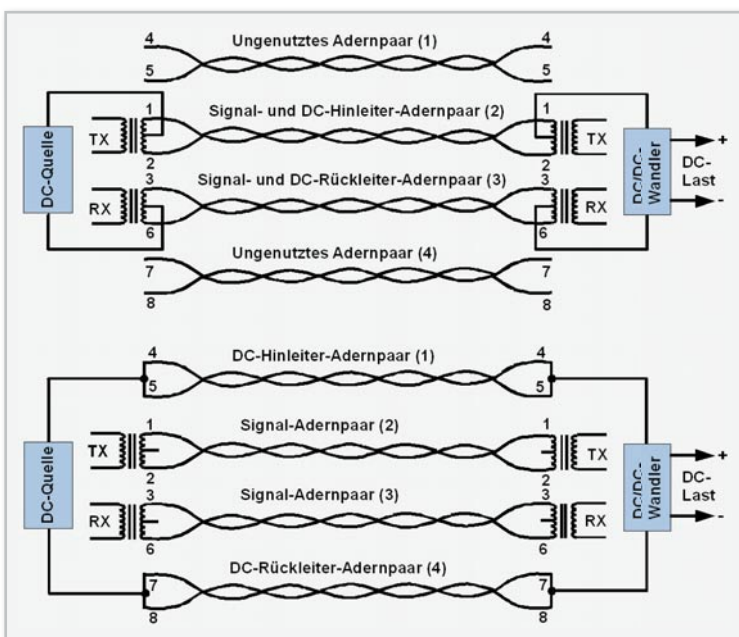


Bild 8: PoE-Midspan und PoE-Endspan im Vergleich.

Vor- und Nachteile eines PoE-Verkabelungssystems

	PoE-Midspans	PoE-Switches
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - unabhängig vom Switch-Hersteller - längere Nutzung des Switches (kostengünstiger) - volle Leistung für Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - Platz sparend - nur ein Patchkabel pro Channel - einfache Installation
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - erhöhter Platzbedarf - zusätzliche Patchkabel 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Leistung (für Full Power an jedem Port) - bei Switchwechsel wird für PoE mitbezahlt

Bild 9: Ein Rechenexempel: Midspan oder Endspan. Bei der Neuerrichtung von PoE-Netzen fällt die Entscheidung fast immer zugunsten vom Endspan-Konzept.

Die Versorgungsspannung und ein neuer Anschaltvorgang löst wieder die geschilderte Signalisierungsprozedur aus. So ist sichergestellt, dass ein schnelles „Umstöpseln“ auf ein Nicht-PoE-Gerät diesem keinen Schaden zufügen kann.

Ein Problem kann sich mit PDs ergeben, die nach einer gewissen Zeit der Untätigkeit in einen Schlafzustand (idle mode) übergehen, um Strom zu sparen. Falls dabei der Stromverbrauch unter die Abschaltsschwelle des PSEs sinkt, wird dieser seine Energielieferung über den entsprechenden Port einstellen, indem er ihn spannungsfrei schaltet. Jetzt kann das PD nicht mehr durch ein aktivierendes Ereignis aufgeweckt werden. Um die Stabilität und Zuverlässigkeit von PoE-Anwendungen zu steigern, muss dieses irrtümliche „DC-Disconnect“ unterbunden werden. Eine Methode ist das „AC-Disconnect“. Dabei wird der Gleichspannung im PSE eine kleine Wechselspannung überlagert, die über den PD einen entsprechenden Strom erzeugt. Bei eingestecktem PD ist dies stets gegeben. Erst wenn das PSE eine Wechselstromimpedanz $>26,24 \text{ k}\Omega$ feststellt, wird die Versorgung abgeschaltet. Damit ist sichergestellt, dass nur das Entfernen des PDs zum Beenden der Stromlieferung führt.

Neue Herausforderungen durch PoE plus.

Die bei PoE plus höheren übertragbaren Leistungen können zu zwei Problemen führen: Erwärmung des Ethernet-Kabels und Kontaktabbrand an den Steckverbindern.

	IEEE 802.3af (PoE)	IEEE 802.3at (PoE plus)
PSE-Typ	Ethernet-Switch, Power-Injector-Hub	Ethernet-Switch
Power-Einspeisung	End- oder Midspan	nur Endspan
PSE-Ausgangsspannung	44 – 57 V	50 – 57 V
max. Betriebsstrom	0,35 A	0,72 A
Leitungswiderstand	20 Ω	20 Ω
max. Spannungsfall	7,0 V	14,4 V
min. Spannung am PD	37,0 V	35,6 V
max. Leistung vom PSE	15,40 W	30,00 W
max. Leistung zum PD	12,95 W	25,63 W
Class ID	0...3, 4 wie 0	Layer 1: nur Class 4 Layer 2: bis zu 1023 Klassen

Bild 11: Gegenüberstellung der wichtigsten Kennwerte von PoE (IEEE 802.3af) und PoE plus (IEEE 802.3at)



Bild 10: Ein steuerbarer PoE-Switch mit 52 Ports (Foto: D-Link)

Die Stärke des übertragenen Stroms und der Querschnitt der stromführenden Leiter beeinflussen den Temperaturanstieg des Kabels. Bei Kabelbündeln wirkt sich dies besonders bei den im Inneren liegenden Kabeln aus, die ihre Wärme naturgemäß schlechter abführen können (Abbildung 14). Laut Standard sind maximal 60 °C Leitertemperatur zulässig. In heißen Umfeldern kann diese Grenze überschritten werden. Tests der PoE-plus-Arbeitsgruppe IEEE 802.3at an Bündeln aus 100 Kabeln haben für verschiedene Kabeltypen den maximalen Temperaturanstieg ermittelt (Abbildung 15). Es fällt auf, dass hochwertige, zweifach geschirmte S/STP-Kabel der Kategorie 7 (für Gigabit-Ethernet geeignet) die geringste, durch die innere Verlustleistung bedingte Erwärmung aufweisen. Man kann dies auf die bessere Wärmeabführung durch die Schirmung und die größeren Adernquerschnitte (geringerer Widerstand!) zurückführen. Auf jeden Fall schränkt die Zusatzerwärmung die zulässige Umgebungstemperatur beim Einsatz der Kabel in größeren Bündeln ein und muss bei Planungen berücksichtigt werden.

Hinzu kommt, dass mit einer Erwärmung von Leitern deren Widerstand und die dadurch hervorgerufene Einfügedämpfung steigen, wodurch sich die maximal mögliche Länge eines Ethernet-Segments verkürzt. Bei der höchstens zulässigen Umgebungstemperatur für gemäß Abbildung 15 gebündelte Cat-7-Kabel von 56 °C mit einem Durchmesser der einzelnen Massivleiter von 0,64 mm sind dies immerhin etwa 6 %, d. h. die Länge eines Permanent-Links wird von 90 auf 85 m verkürzt. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund einer weiteren angedachten Leistungsverdoppelung und -übertragung bei Nutzung aller vier Adernpaare zu beachten.

Steckverbindungen unterliegen bei PoE plus besonderen Belastungen. Wenn man vor dem Ausstecken den Verbraucher nicht abschaltet, was meistens in der Praxis unterlassen wird, entsteht ein Abbrand des Kontaktmaterials in Stecker und Buchse durch Lichtbogenbildung beim Trennvorgang. Im Betrieb ist eine Temperaturerhöhung am ruhenden Kontakt durch die Verlustleistung im Übergangswiderstand zu verzeichnen. Ein geeignetes Kontaktdesign muss deshalb

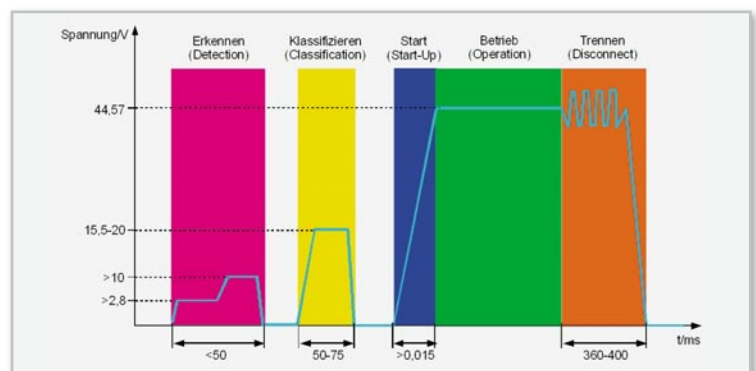


Bild 12: Die Phasen des Initialisierungsprotokolls bei PoE

Kabeltyp	Leiterquerschnitt	Temperaturanstieg
Cat 5e / u	AWG 24 (0,205 mm ²)	10°C
Cat 5e / s	AWG 24 (0,205 mm ²)	8°C
Cat 6e / u	AWG 24+ (0,205 mm ²)	8°C
Cat 6A / u	AWG 23 (0,246 mm ²)	6°C
Cat 6A / s	AWG 23 (0,246 mm ²)	5°C
Cat 7	AWG 22 (0,324 mm ²)	4°C

Bild 13: Die PoE-Leistungsklassen



Bild 14: Bei gebündelten PoE-Kabeln erwärmen sich die innenliegenden naturgemäß am stärksten. (Quelle: Reichle & De-Massari)

Kabeltyp	Leiterquerschnitt	Temperaturanstieg
Cat 5e / u	AWG 24 (0,205 mm ²)	10°C
Cat 5e / s	AWG 24 (0,205 mm ²)	8°C
Cat 6e / u	AWG 24+ (0,205 mm ²)	8°C
Cat 6A / u	AWG 23 (0,246 mm ²)	6°C
Cat 6A / s	AWG 23 (0,246 mm ²)	5°C
Cat 7	AWG 22 (0,324 mm ²)	4°C

Bild 15: Die maximale Temperaturerhöhung bei 100 gebündelten mit maximal zulässigem Strom beaufschlagten PoE-plus-Kabeln ist bei Cat-7-Kabeln wegen deren größerem Leiterquerschnitt am geringsten.

sicherstellen, dass sich die Verbindungs- bzw. Trennzone und die Ruhekontaktzone nicht überlappen (Abbildung 16). Die Fotografie in Abbildung 17 zeigt die Verhältnisse an einer stromlosen Kontaktfeder (links) und einer stromführenden (rechts) in einer RJ45-Buchse. Hier sind rechts die Abbrandzone und die nominale Kontaktzone durch eine ausgeprägte Schleifzone, wie es sein sollte, deutlich getrennt. In Ver-

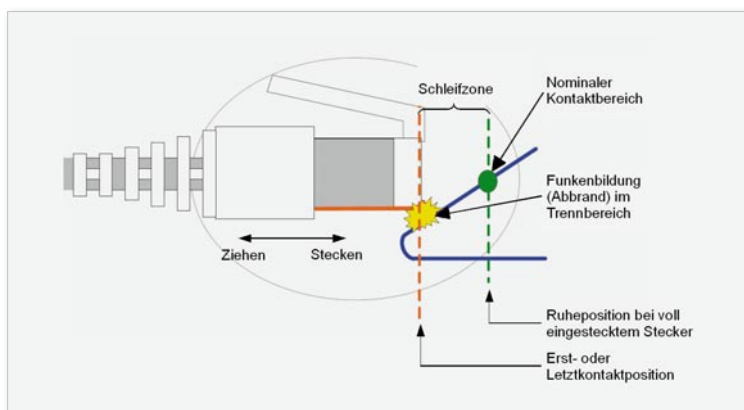


Bild 16: In der Trennzone entsteht beim Herausziehen des Steckers unter Last ein Lichtbogen, der den Kontakt abbrennt. Die Trennzone sollte sauber von der nominalen Kontaktzone bei voll eingestecktem Stecker sein, um gute und zuverlässige Übertragungseigenschaften zu gewährleisten. (Quelle: Reichle & De-Massari)

bindung mit der Wahl geeigneter Kontaktmaterialien, einer möglichst großflächigen Kontaktzone und einem angemessenen Kontaktdruck lassen sich Abbrand und nominaler Kontaktwiderstand minimieren. Weil Steckverbindungen ein unverzichtbarer Bestandteil des gesamten Links sind, dürfen ihre elektrischen Eigenschaften besonders unter PoE-plus-Gesichtspunkten nicht vernachlässigt werden. Hier gilt die alte Weisheit: Eine Kette ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied.

Zusammenfassung

Der Einsatz von PoE-fähigen Switches (Power Sourcing Equipment) in Verbindung mit PoE-fähigen Endgeräten (Powered Devices) bietet zahlreiche Vorteile wie einfache Installation, Mobilität und Flexibilität, Zuverlässigkeit und umfassende Management- und Überwachungsmöglichkeiten. Die Optimierung der Energieversorgung, die Möglichkeit mit einer USV (unterbrechungsfreie Stromversorgung) viele Endgeräte zugleich gegen Stromausfall zu sichern, über administrierbare PoE-Switches gezielt Ports ab- und anzuschalten und den Verbrauchsstatus des Endgeräts zu überwachen, keine Notwendigkeit einer 230-V-Steckdose am Ort des Endgeräts und nicht zuletzt auch die mit dieser Technik erzielbaren signifikanten Kosteneinsparungen rechtfertigen eine hervorragende Zukunftsprognose für PoE (plus). **ELV**

Literatur:

1. White Paper: „Power over Ethernet Plus – Aktualisierung und Hinweise zur Verkabelung“, Reichle & De-Massari AG
2. „Industrial Power over Ethernet – Making your heavy chores easy“ www.korenix.com/catalog_brochure/Korenix_PoE_Whitepaper.pdf
3. „Power over Ethernet (PoE) – Strom aus dem Netzkabel“ www.siemon.com/de/white_papers/poe.asp

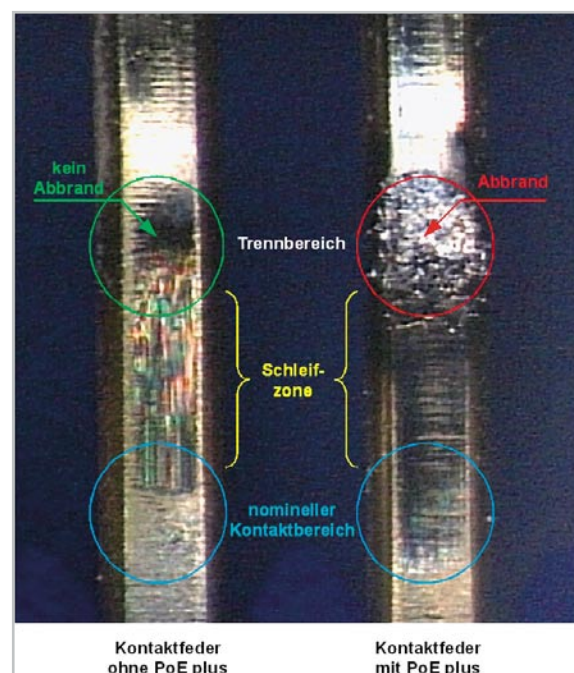


Bild 17: Der Kontakt links führt keinen Gleichstrom und ist deshalb abbrandfrei. Anders beim rechten Kontakt, wo die nominale Ruhekontaktzone am Ende der Schleifzone sauber von der Abbrandzone getrennt ist. (Quelle: Reichle & De-Massari)