

# DART oder - Die neue Dimension der Eigensicherheit

## Abstract

*Eigensicherheit ist eine weltweit akzeptierte Zündschutzart, die gegenüber anderen Zündschutzarten zahlreiche Vorteile bietet. Das dynamisch wirkende eigensichere Energieversorgungskonzept DART ermöglicht erheblich höhere Wirkleistungen bei gleichzeitiger eigensicherer Energiebegrenzung durch Schnellabschaltung. Der Artikel beschreibt das DART-Basiskonzept und zwei für bestimmte Anwendungsbereiche optimierte Lösungen - eine für allgemeine High-Power-Anwendungen und eine für Feldbusanwendungen. Dabei werden die Funktionsweise von DART erläutert, notwendige sicherheitstechnische, für den Nachweis der Eigensicherheit relevante Aspekte aufgezeigt und dessen Auswirkungen auf die internationale Normung erläutert. Abschließend werden praktische Einsatzgebiete in der Prozessindustrie aufgezeigt.*

## 1 Motivation

Im explosionsgefährdeten Bereich bietet die Schutzart Eigensicherheit anerkannte Vorteile wie etwa die weltweite Anerkennung sowie eine einfache Anschluss- und Installationstechnik. Ferner ist das Arbeiten an Stromkreisen und Geräten im laufenden Betrieb für die Umrüstung, Erweiterung und Wartung an der elektrischen Anlage ohne Heiarbeitserlaubnis möglich. Der Zündschutzart Eigensicherheit liegt das Wirkprinzip zu Grunde, dass Funken, die an einem elektrischen Stromkreis entstehen, stets so in ihrer Energie begrenzt sind, dass eine anstehende explosionsfähige Atmosphäre nicht entzündet werden kann.

Die Realisierung der Zündschutzart Eigensicherheit erfolgt heute über die Begrenzung der zur Verfügung stehenden Wirkleistung. Genau diese Leistungsbegrenzung auf üblicherweise weniger als 2 W führt dazu, dass die Eigensicherheit (Ex i) hauptsächlich im Bereich Mess- und Regeltechnik zur Stromversorgung von Aktoren und Sensoren mit niedrigen Anschlussleistungen eingesetzt wird.

Eine deutlich höhere Wirkleistung bei gleichzeitiger Wahrung aller positiven Eigenschaften der Eigensicherheit stellt dem Anwender neue und wesentlich breitere Anwendungsmöglichkeiten zur Verfügung. Diese Ziele werden durch die DART-Technologie erreicht (DART: Dynamic Arc Recognition and Termination). DART ist eine Schnellabschaltung, die einen ungewollten Zustand oder eine Störung des elektrischen Systems bereits im Moment des Entstehens dynamisch erkennt und daraus eine sofortige Überführung in einen sicheren Zustand erwirkt, noch bevor eine sicherheitstechnisch kritische Größe überschritten wird. DART basiert auf einer Erkennung von Strzustnden durch deren charakteristischen Stromanstieg.

Durch DART kann im Vergleich zu heutigen eigensicheren Lösungen eine drastisch höhere Wirkleistung abgegeben werden. Mehr zur Verfügung stehende Wirkleistung eröffnet den Einsatz der Zündschutzart Eigensicherheit in vielen für die Prozessindustrie relevanten Applikationen. Als Beispiele seien genannt: Waagen, Beleuchtungssysteme, Ventilsteuerungen und Feldbusse wie FOUNDATION Fieldbus H1 oder PROFIBUS PA.

## 2 Das DART- Basiskonzept

### 2.1 Wirkprinzip

Im Normalbetrieb liefert ein DART-Speisegerät die volle nominale Wirkleistung, die je nach Applikation um den Faktor 4 bis 25 (8 bis 50 W) höher sein kann als die bisher normativ zulässigen Werte. DART erkennt im Moment eines sich bildenden Störfalles, beispielsweise durch eine Öffnung des Stromkreises, die Stromänderung und schaltet die Versorgung sofort ab. Hierdurch wird in wenigen Mikrosekunden die aus dem elektrischen System austretende Energie wirksam begrenzt und ein zündfähiger Funke verhindert.

Diese Vorgehensweise ist möglich wegen der während des Eintretens eines Strzustandes sehr charakteristischen und deswegen gut detektierbaren Stromänderung  $di/dt$ . Die Reaktion des Speisegerätes erfolgt sehr schnell – in etwa 1,4  $\mu$ s. Zusätzlich sind bei einem so schnell reagierenden System auch die Laufzeiten in der Leitung zu berücksichtigen. Die frei werdende Energie bestimmt sich aus der in der

Störstelle umgesetzten Leistung integriert über die Zeit bis zum Wirksamwerden der Abschaltung. Dafür sind hauptsächlich die folgenden Einflussgrößen verantwortlich:

- ⇒ die Leistung - bestimmt durch Versorgungsspannung und Laststrom,
- ⇒ die Zeit - bestehend aus Signallaufzeit in der Leitung und der Reaktionszeit des Speisegerätes,
- ⇒ die gespeicherte Energie in der Anschlussleitung,
- ⇒ das Verbraucherverhalten.

Abbildung 2-A zeigt die prinzipielle Anordnung von Speisegerät, Leitung, Verbraucher und deren Anordnung in explosionsgefährdeten Bereichen.

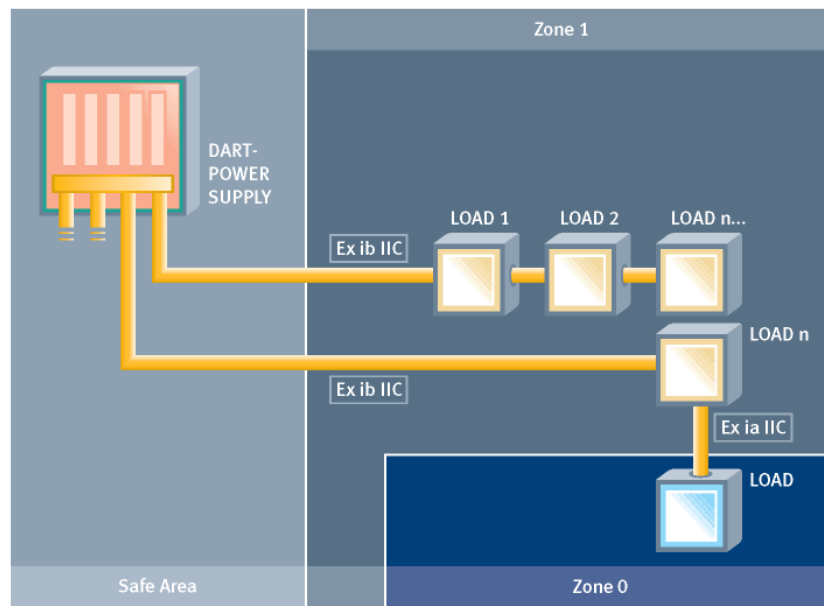


Abbildung 2-A: DART-Konzept: Speisung mit zwei unabhängigen Leitungen und Verbrauchern. Mit Ex-Zonen.

## 2.2 Zündphysikalische Grundlagen

Nach IEC 60079-11 gilt ein Stromkreis dann als eigensicher, wenn weder ein Funke noch ein thermischer Effekt unter genau festgelegten Bedingungen sowohl im ungestörten Betrieb als auch im Betrieb unter bestimmten Fehlerbedingungen die Entzündung einer bestimmten explosionsfähigen Atmosphäre verursachen kann.

Die Ermittlung der elektrischen Zündgrenzwerte erfolgt mit dem in der Norm IEC 60079-11 spezifizierten Funkenprüfgerät. Diese Werte unterliegen einer bestimmten Zündwahrscheinlichkeit. Das Funkenprüfgerät erzeugt sowohl Öffnungs- als auch Schließfunken, wobei in Abhängigkeit vom zu prüfenden Stromkreis jeweils nur einer dieser Funkentypen überwiegend für die Grenzwertbestimmung relevant ist. Da Öffnungsfunken, bedingt durch das elektrische Verhalten der hier betrachteten Konzepte, deutlich zündfähiger sind als Schließfunken, werden in diesem Aufsatz nur Öffnungsfunken betrachtet.

Ein typisches Beispiel für den Verlauf der elektrischen Parameter eines linear begrenzten Öffnungsfunkens zeigt Abbildung 2-B. Ein Öffnungsfunke beginnt mit Spannung  $U_F = 0 \text{ V}$  und endet üblicherweise mit dem Erreichen der Leerlaufspannung bei  $U_F = U_0$ . Bei linearer Kennlinie ist die stete Zunahme der Funkenspannung direkt mit einer Reduzierung des Funkenstromes  $I_F$  verbunden. Der dazwischen liegende Zeitbereich ist stromkreisabhängig und wird als Funkendauer  $t_F$  bezeichnet. Für die Funkendauer  $t_F$  gilt:  $5 \mu\text{s} < t_F < 2 \text{ ms}$ .

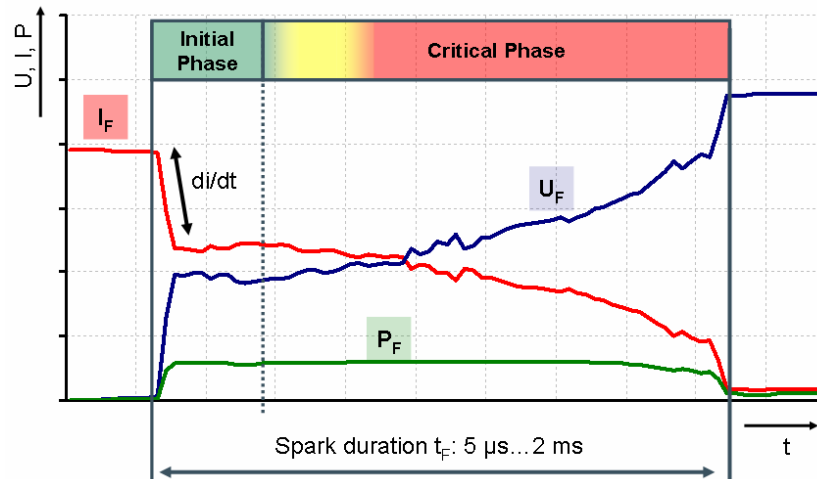


Abbildung 2-B: Zeitverlauf von Funkenstrom, -spannung und -leistung eines linear begrenzten Öffnungsfunkens

Zu Beginn eines Öffnungsfunkens springt die Funkenspannung  $U_F$  innerhalb einer sehr kurzen Zeit ( $t \leq 1 \mu\text{s}$ ) von 0 V auf  $U_F \geq 10 \text{ V}$ . Diese Spannungsänderung ist direkt mit einem charakteristischen, gut auswertbaren Stromsprung  $di/dt$  verbunden (siehe Kurve  $I_F$ ). Unmittelbar nach diesem Stromsprung bleiben Funkenstrom und -spannung für etwa 1 bis 5  $\mu\text{s}$  relativ konstant. Diese Zeit ist wegen der äußerst geringen zur Verfügung stehenden Funkenenergie  $W_F$  definitiv nicht zündfähig und wird als „initial phase“ bezeichnet. Dem schließt sich ein längerer Zeitbereich an, der maximal bis zum Ende der Funkendauer  $t_F$  anhält. Dieser Bereich ist die „critical phase“ und gilt als zündfähig. Hier bezieht der entstehende Funke seine Zündenergie aus dem System, d.h. aus der Quelle, der Leitung oder den Verbrauchern.

Aus der Kenntnis dieser zeitlichen Zusammenhänge ist ableitbar, dass sich durch eine schnelle Detektion von Funken in Verbindung mit einer schnellen Abschaltung eine Entzündung explosionsfähiger Gemische zuverlässig verhindern lässt. Hauptsächlich wird hierzu der Stromsprung  $di/dt$  unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Kennwerte ausgewertet.

Abbildung 2-C zeigt das zeitliche Verhalten eines Funkens bei einer Stromkreisöffnung an einem dynamisch wirkenden DART-Speisegerät. Es ist der Stromsprung zu erkennen, der die Überführung des Stromkreises in den sicheren Zustand auslöst. Es wird deutlich, dass bei DART ein Stöorzustand bereits innerhalb der „initial phase“ nicht nur erkannt und ausgewertet wird, sondern auch zur Abschaltung des Speisegerätes führt. Die hierfür zur Verfügung stehende Abschaltzeit ist systemabhängig. Ein aus zündphysikalischer Sicht vielfach anwendbarer Wert ist 5  $\mu\text{s}$ .

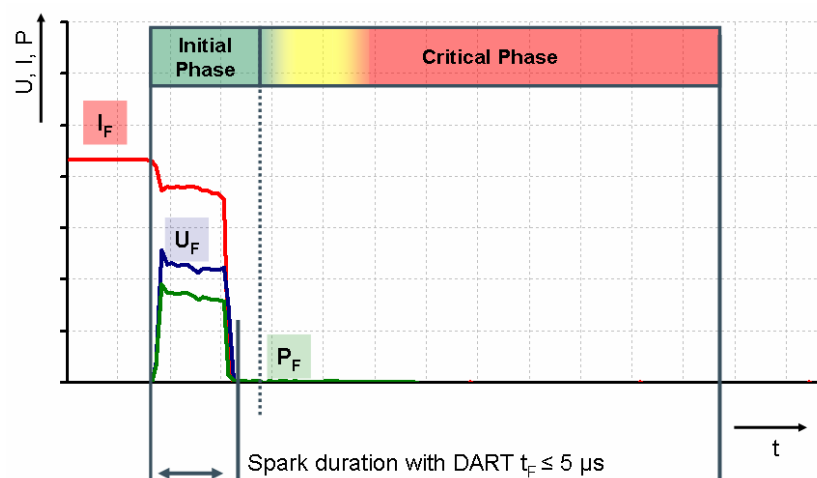


Abbildung 2-C: Zeitverlauf von Strom, Spannung und Leistung eines Öffnungsfunkens mit DART-Abschaltung

## 2.3 Signallaufzeiten in Leitungen

Aufgrund der sehr kurzen Anstiegszeiten von Strom und Spannung bei der Entstehung eines Funkens, wirken die Verbindungsleitung zwischen Speisegerät und Verbraucher bereits bei relativ kurzen Leitungslängen als Wellenleiter. Die Information darüber, dass ein Funke entsteht, breitet sich als Wanderwelle auf der Verbindungsleitung aus. Das Speisegerät erhält die Information somit verzögert um bis zu einer Leitungslaufzeit. Die Reaktion des Speisegerätes wird wiederum erst verzögert um bis zu einer Leitungslaufzeit an der Stelle des Funkens wirksam. Wie in 2.1 erwähnt, ist die Signallaufzeit als eine maßgebliche sicherheitstechnisch kritische Größe anzusehen. Dieser Einfluss soll beispielhaft an einer typischen in der Industrie eingesetzten Polypropylenleitung gezeigt werden:

Die Signallaufzeit  $v$  in einer Leitung wird durch die relative Permeabilität  $\epsilon_r$  bestimmt. So ergibt sich beispielsweise z.B. für eine Polypropylenleitung mit einem  $\epsilon_r = 2,5$  folgende Laufzeit  $v$ :

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} = \frac{300 \frac{m}{\mu s}}{\sqrt{\epsilon_r}} = 190 \frac{m}{\mu s}$$

Dieser Wert entspricht nur ca. 63% der Lichtgeschwindigkeit  $c$  im Vakuum. Bei Verwendung einer Leitungslänge  $l = 1000$  m lässt sich daraus die maximale Verzögerungszeit  $\tau_D$  ableiten:

$$\tau_D = \frac{l}{v} = l \cdot \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} = 5,27 \mu s$$

Allerdings entspricht die Zeit  $\tau_D$  nur der Zeit, die zwischen der Funkenentstehung (d.h. dem Stromsprung  $di/dt$ ) und der Ankunft dieser Information im DART-Speisegerät vergeht. Erst danach kann das Speisegerät reagieren. Die maximale Reaktionszeit  $\tau_{D-max}$  auf einen möglichen Störszustand bzw. Funken lässt sich aus der hardwarebedingten Reaktionszeit (z.B.  $\tau_{reac} = 1,4 \mu s$ ), der Leitungslänge (z.B.  $l = 1000$  m) und der relativen Permeabilität (z.B.  $\epsilon_r = 2,5$ ) wie folgt ermitteln:

$$\tau_{D-max} = 2 \cdot \tau_D + \tau_{reac} \approx 12 \mu s$$

An der Störstelle kann somit erst nach ca.  $12 \mu s$  eine wirksame Reaktion erfolgen. Mit der in dieser Zeit akkumulierten Funkenenergie ist eine Entzündung explosionsfähiger Gemische in Abhängigkeit von der übertragenen Wirkleistung möglich (siehe Abbildung 2-A). Diese Reaktionszeit kann durch geeignete im Verbraucher integrierte Maßnahmen, wie zusätzliche  $di/dt$  Erkennung und Abschaltung, verkürzt werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden dafür Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Weitere zu berücksichtigende Einflussfaktoren sind z.B. die gespeicherten Energien in der Anschlussleitung und im Verbraucher. Die zuvor beschriebenen Effekte führen zu einem Derating der verfügbaren eigensicheren Wirkleistung in Abhängigkeit von Leitungslänge und Leitungstyp. Nachstehende Abbildung 2-D zeigt das Derating der Ausgangsleistung  $P_{Out}$  eines DART-Speisegerätes mit  $U_{Out} = 50$  V über eine ASI-Leitung (27 Ohm/km).

In erster Näherung lässt sich abschätzen, dass eine Verdoppelung der Leitungslänge eine Halbierung der verfügbaren Leistung bedeutet.

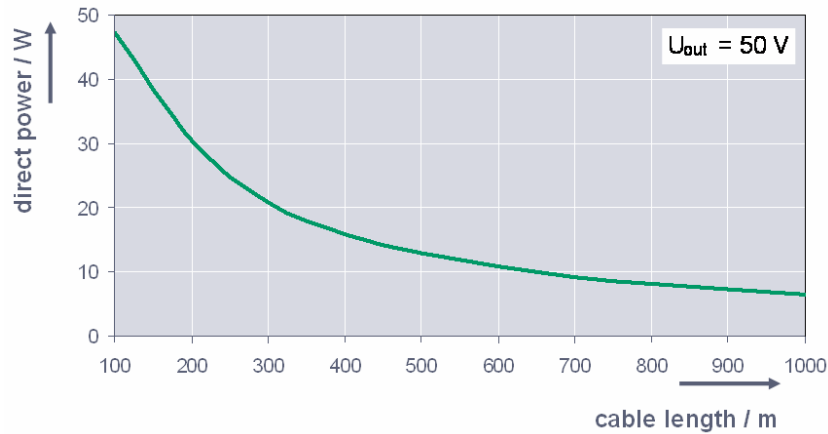


Abbildung 2-D: Derating – DART-Ausgangsleistung  $P_{out}$  über die Leitungslänge bei  $U_{Out} = 50\text{ V}$  an einer ASI-Leitung

## 2.4 Die DART- Komponenten und ihre Wirkung

Ein DART Versorgungssystem besteht aus folgenden drei Komponenten: Speisegerät, Verbindungsleitungen und einem oder mehreren Verbrauchern. In einem System darf grundsätzlich nur eine Quelle, die aus Verfügbarkeitsgründen jedoch redundant ausgelegt sein kann, vorhanden sein. Verbraucher sind über eine Verbindungsleitung mit fest definiertem Wellenwiderstand an das Speisegerät angeschlossen.

### 2.4.1 Das Speisegerät

Die von der Stationsversorgung galvanisch getrennte Ausgangsspannung wird mehrfach redundant begrenzt. Das DART- spezifische Verhalten wird durch die im Blockschaltbild Abbildung 2-E dargestellten Funktionen erreicht.

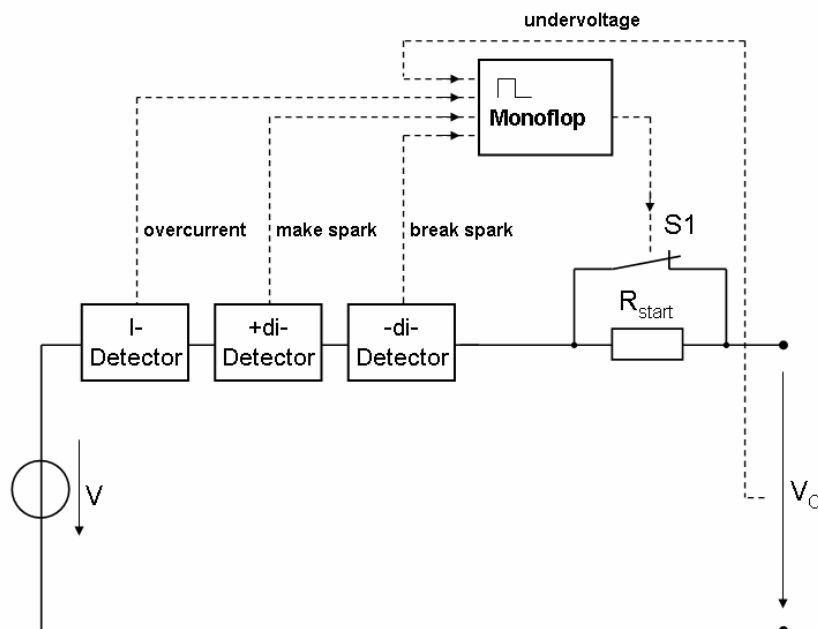


Abbildung 2-E: Blockschaltbild Speisegerät

Das Zusammenspiel dieser im DART- Speisegerät integrierten Funktionen lässt sich gut im Ausgangskennlinienfeld, in dem die Ausgangsspannung  $U_{out}$  über dem Ausgangsstrom  $I_{out}$  dargestellt ist, erkennen. Eingerahmt von den sicherheitstechnisch zulässigen Höchstwerten  $U_{lim}$  und  $I_{lim}$  teilt sich die Kennlinie hier auf die beiden Arbeitsbereiche A und B:

**Sicherer Bereich (A): Abbildung 2-F**

Dieser Bereich, auch Anfahr- und Foldback Bereich genannt, stellt den Kennlinienverlauf einer linearen Spannungsquelle mit sicherheitstechnisch unbedenklichen Werten dar. Nach dem Einschalten der Quelle ist der Schalter S1 geöffnet (Punkt 1). Über den Widerstand  $R_{\text{Start}}$  wird ein sehr kleiner Strom von wenigen mA, dem sogenannten „trickle current“ (Punkt 2), an den Ausgangsklemmen zur Verfügung gestellt. Ist der durch die Kombination von Leitung und Verbraucher gebildete Lastwiderstand ausreichend groß ( $R_{\text{Last}} > R_{L1}$ ) heisst das, dass keine Störung vorliegt. Die Ausgangsspannung erreicht bzw. überschreitet einen festgelegten Schwellwert  $U_{\text{thr}}$  (Punkt 3) und die Quelle schaltet nach einer sicherheitstechnisch notwendigen Wartezeit von ca. 3 ms in den Bereich B, den Arbeitsbereich. Dies ist nur möglich, wenn die sich durch die Last ergebene Stromänderung  $di/dt$  während der Einschaltphase unterhalb der vorgegebenen Detektionsschwelle liegt.

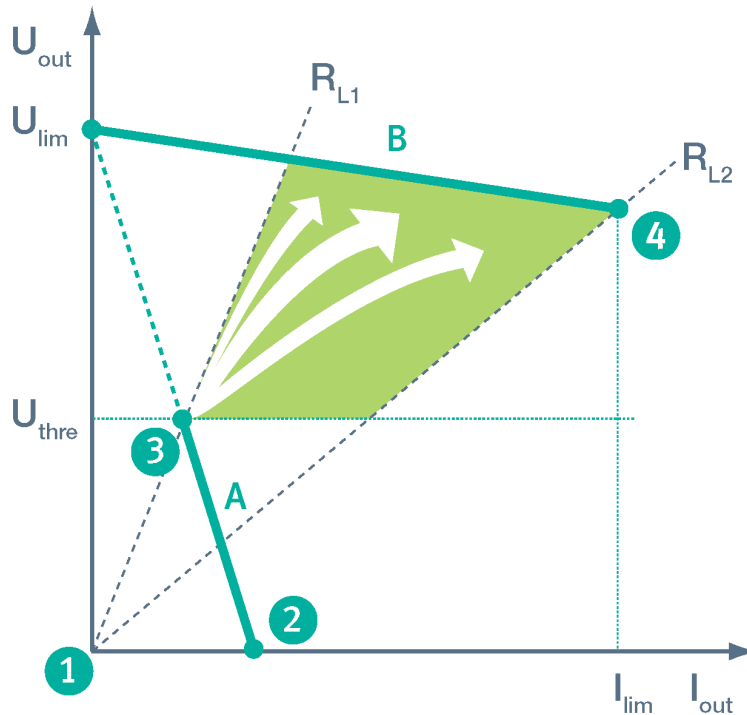


Abbildung 2-F: Ausgangskennlinie einer DART-Quelle mit Darstellung des Überganges vom sicheren Bereich A in den optimalen Arbeitsbereich B (Prinzipdarstellung)

**Normaler Bereich oder Arbeitsbereich (B): Abbildung 2-G**

Der Bereich B entspricht einer nahezu idealen Spannungsquelle mit einem Innenwiderstand  $R_i \approx 0 \Omega$ . Im Arbeitsbereich kann die Quelle die optimale Leistung an die Verbraucher abgeben, wobei der maximale Leistungsumsatz im Punkt 4 bei  $R_{\text{Last}} = R_i$  möglich ist. Jegliche Veränderungen des Lastzustandes – also auch Störungen – sind mit einer unmittelbar wirkenden Stromänderung  $di/dt$  verbunden. Wird hierbei der vorgegebene Maximalwert der Stromänderung betragsmäßig überschritten, schaltet die Quelle ab, und der Arbeitspunkt geht sofort vom Bereich B in den sicheren Foldback-Bereich A über. Dies geschieht auch dann, wenn der maximal zulässige Laststrom  $I_{\text{lim}}$  überschritten wird. (siehe Punkt 4).

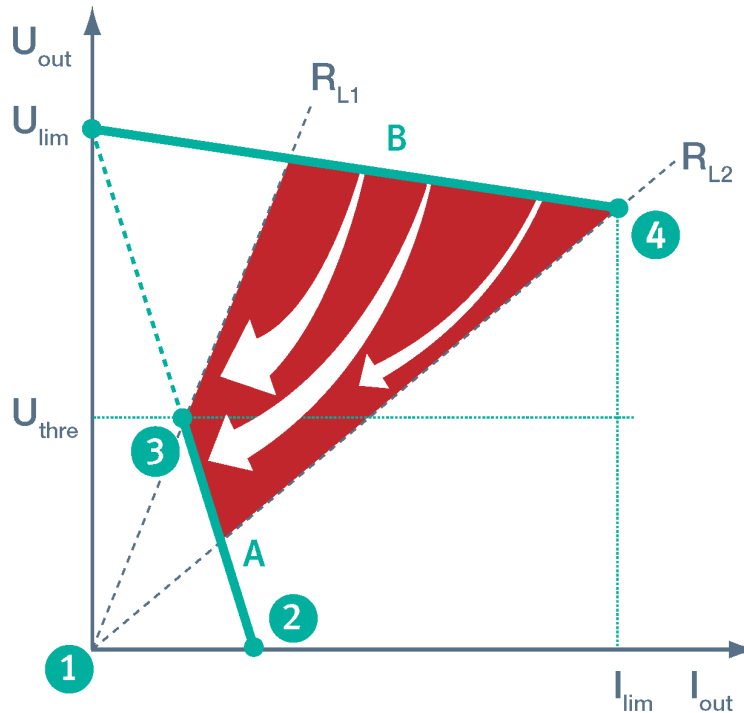


Abbildung 2-G: Verhalten der DART-Quelle bei einer Störung (Prinzipdarstellung)

Zusammenfassend lässt sich das dynamische Regelverhalten einer DART-Quelle wie folgt kennzeichnen: Im Gegensatz zu üblichen elektronischen Strombegrenzungen wird bei DART aus sicherheitstechnischer Sicht zwischen dem Anfahren: der Überführung in den optimalen Arbeitsbereich in wenigen Millisekunden und dem schnellen Abregeln bei Störungen in den sicheren Foldback-Bereich in wenigen Mikrosekunden, unterschieden.

#### 2.4.2 Die Verbraucher

Folgende Vorgaben bzgl. der Verbraucher wurden bei der Konzeption von DART berücksichtigt:

- ⇒ Das Spektrum der zu verwendenden Verbraucher sollte möglichst umfassend sein.
- ⇒ Die Verbraucher sollen möglichst einfach in das System integriert werden können.
- ⇒ Bereits existierende Komponenten / Verbraucher (u.a. übliche Feldgeräte) sollen mit dieser Technologie genauso wie mit bisher üblichen Technologien - z.B. FISCO - betrieben werden können (Bestandsschutz).
- ⇒ Um die sicherheitstechnische Betrachtung einfach zu halten, wird nur eine Linientopologie betrachtet.
- ⇒ Die Verbraucher dürfen sowohl die DART-Quelle als auch andere Verbraucher (einschließlich der Leitung) weder funktionell noch sicherheitstechnisch negativ beeinflussen.

Für den Verbraucher gilt insbesondere, dass er die Ausbreitung der Information über die Funkenentstehung nicht dämpfen, oder absorbieren darf. Hierbei muss das Verbraucherverhalten als nicht exakt definiert angenommen werden. Folgende zwei Beispiele veranschaulichen sicherheitstechnisch kritische Fälle, die nach zusätzlichen Maßnahmen verlangen.

#### 2.4.3 Kritisches Verhalten des Systems mit einem Verbraucher

Abbildung 2-H zeigt einen DART Stromkreis mit einer Quelle, einer Verbindungsleitung und einem Verbraucher, der sich wie eine Konstant-Strom-Senke verhält. Mit dem Auftreten des Funkens ändert sich aufgrund der Charakteristik des Verbrauchers, der im Kreis fließende Strom nicht. Aufgrund der hohen Impedanz des Verbrauchers im Vergleich zu dem Wellenwiderstand, wird die plötzlich auftreten-

de Funkenspannung  $U_F$  ausschließlich am Verbraucher sichtbar. Die Spannung am Verbraucher bricht also schlagartig um etwa 10 V ein, während die Spannung an der Leitung unverändert bleibt. Die Information der Funkenentstehung wird somit von dem Verbraucher vollständig absorbiert. Das Speisegerät nimmt den Fehlerzustand nicht wahr und kann folglich nicht abschalten.

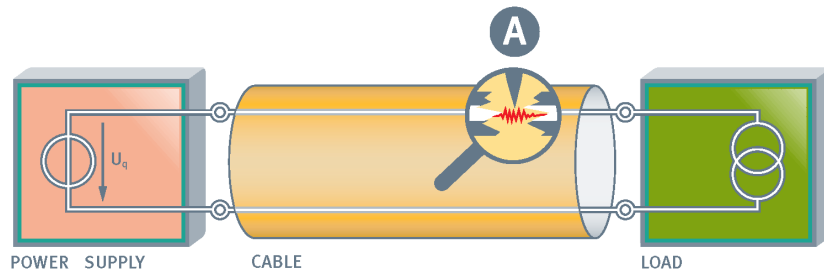


Abbildung 2-H: DART Quelle mit einem Verbraucher mit stromkonstantem Verhalten

#### 2.4.4 Kritisches Verhalten des Systems mit mehreren Verbrauchern.

Abbildung 2-I betrachtet eine Linientopologie mit zwei Verbrauchern, die jeweils ein Konstanzspannungsverhalten aufweisen. Hier bewirkt der Öffnungsfunken zunächst einen positiven Spannungssprung an der Stelle B. Als Folge breiten sich eine Spannungs- und eine über den Wellenwiderstand verknüpfte Stromwelle in der Verbindungsleitung in Richtung Speisegerät aus. Verhält sich der Verbraucher 1 wie eine Zener-Diode, so kann sich die Spannung an der Stelle A nicht ändern. Stattdessen nimmt der Strom in den Verbraucher 1 zu. Da die Spannung an der Stelle A konstant bleibt, breitet sich keine Welle in der Verbindungsleitung 1 in Richtung des Speisegerätes aus. Das Speisegerät nimmt den Fehlerzustand nicht wahr und kann folglich nicht abschalten.

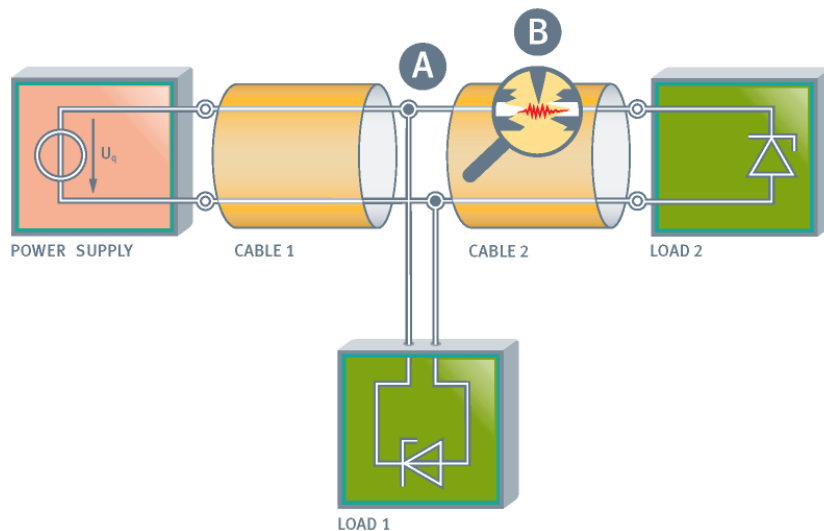


Abbildung 2-I: DART Quelle und zwei räumlich verteilten Verbrauchern mit Konstanzspannungsverhalten

#### 2.4.5 Das Entkopplungsmodul

Die Beispiele zeigen, dass die DART-Funktionalität durch das Verbraucherverhalten sicherheitstechnisch negativ beeinflusst werden kann. Deshalb müssen Mechanismen greifen, die ein definiertes Verhalten sicher stellen. Das kann zum Beispiel erreicht werden, indem der Verbraucher nicht direkt an die mit dem DART-Speisegerät verbundene Leitung angeschlossen wird, sondern über ein sogenanntes Entkopplungsmodul. Durch die Vorschaltung dieses Entkopplungsmoduls lässt sich – bei beliebigem Verbraucherverhalten - ein sicherheitstechnisch und funktionell genau definiertes Verhalten gegenüber dem Speisegerät erzwingen.

Dieses Entkopplungsmodul muss auf die DART-Funktionalität abgestimmt sein. Dadurch wird erreicht, dass das Speisegerät die Information über die Funkenentstehung verbraucherunabhängig erkennen und die bereitgestellte Leistung auf einen unkritischen Wert reduzieren kann.



Durch die Verwendung von Entkopplungsmodulen lassen sich alle oben genannten Zielstellungen erfüllen. Die Module und die Anbindung der Last an das Entkopplungsmodul müssen sowohl sicherheits- als auch funktionstechnischen Kriterien entsprechen.

Entkopplungsmodule erlauben den Betrieb nahezu beliebiger Verbraucher innerhalb des DART-Systems. Diese Module sind den Verbrauchern unmittelbar vorzuschalten – sie bilden mit diesen eine Einheit. Das Entkopplungsmodul erfüllt im wesentlichen folgende Aufgaben:

- ⇒ sanfter Anlauf des Verbrauchers mit begrenztem Stromanstieg  $di/dt$ ,
- ⇒ definiertes elektrisches Verhalten,
- ⇒ optional: Abschaltung im Fehlerfalle durch  $di/dt$ -Detektion.

### 3 Nachweis der Eigensicherheit, Prüfverfahren für dynamische Spannungsquellen

Alle in der Basisnorm der „Eigensicherheit“ IEC/EN 60079-11 angeführten sicherheitstechnischen Grenzwerte für die Funkenzündung basieren auf dem dort definierten Funkenprüfgerät. Dieses Gerät erzeugt unter Vorgabe bestimmter Randbedingungen sowohl Öffnungs- als auch Schließfunken. Über die Zeit, die vergeht, bis die Entzündung des explosionsfähigen Gemisches erfolgt, können statistisch auswertbare Aussagen über das Zündvermögen verschiedener Stromkreise getroffen werden. Die nach dieser Methode ermittelten Zündgrenzwerte finden sich in den Gleichstrom-Referenzkurven und in den Tabellen der IEC/EN 60079-11 wieder. Neben dieser Bewertung erlaubt die Norm auch die Durchführung von praktischen Prüfungen mit dem Funkenprüfgerät gemäß Anhang B der IEC 60079-11. Darüber hinaus ist eine Softwareprüfung mit dem Programms „ISPARK“ möglich.

Mit keinem der aufgeführten Bewertungsverfahren ist eine objektive, sicherheitstechnische Beurteilung dynamisch wirkender, eigensicherer Leistungsquellen - wie z.B. DART- Quellen, möglich, da die damit erreichbaren Zündgrenzwerte weit oberhalb der normativen Werte liegen. Die Eigensicherheit dieser Quellen wird allein durch deren dynamische Wirkungsweise, d.h. das sofortige Reagieren auf Störungen, sichergestellt.

Die dazu erforderliche Nachweisführung erzwingt die Einführung neuartiger Prüfmethoden. Diese müssen die in der Praxis möglicherweise auftretenden kritischsten Fälle gezielt und reproduzierbar nachbilden. Zur Beurteilung des Zündverhaltens dynamisch wirkender Quellen sind diese vor dem Auftreten der Störung (Funken) mit genau definierten Szenarien für die besonders kritischen Zustände, hardwaremäßig zu belasten, d.h. es muss eine definierte Funkenhistorie erzeugt werden. Die Definition erster „worst-case“-Szenarien liegt bereits vor. Auf Grund der Komplexität der Zusammenhänge sind aber weitere Untersuchungen erforderlich. Z.Z. existieren zwei mögliche Prüfmethoden, die hier kurz beschrieben werden sollen:

#### **a) Prüfung mit einem modifizierten Funkenprüfgerät**

Eine elektronische Regelung sorgt dafür, dass eine Kontaktgabe (Öffnung oder Schließung) nur dann erfolgt, wenn die Quelle auch Wirkleistung an den Verbraucher liefert, d.h. in Abhängigkeit vom Betriebszustand der Quelle. Allerdings hat diese Methode Nachteile, die sie für eine industrielle Produktentwicklung ungeeignet erscheinen lassen. :

- ⇒ Die Prüfprozedur und Realisierung ist sehr aufwändig.
- ⇒ Es ergibt sich eine andere Zündwahrscheinlichkeit. Damit ist die Vergleichbarkeit mit existierenden Lösungen deutlich erschwert..

#### **b) Prüfung mit einem elektronischen Funkensimulator**

Der elektronische Funkensimulator ist eine Hardware, mit der sich in Verbindung mit einem Digital Speicher-Oszilloskop die sicherheitstechnisch zulässigen eigensicheren Maximalwerte dynamisch wirkender Leistungsquellen bestimmen lassen. Mit einem Funkensimulator lassen sich alle sicherheitstechnisch kritischen Fälle reproduzierbar bewerten. Im Funkensimulator werden - zweckmäßigerweise softwaregesteuert - die erforderlichen zeitkritischen Spannungs- und Stromverläufe im zu prüfenden Stromkreis

erzeugt. Er kann in Analogie zum Funkenprüfgerät an jedem Ort des zu prüfenden Stromkreises eingesetzt werden. Die Auswertung erfolgt mittels Digitalspeicher-Oszilloskop nach vorgegebenen Kriterien. Darüber hinaus ist der Funkensimulator sehr gut für eine begleitende Produktentwicklung geeignet.

Um die Vorteile, die sich durch den Einsatz von dynamisch wirkenden Quellen ergeben, auch international nutzen zu können, ist die Einarbeitung einer Ergänzung bzgl. der Anwendung von anderen Prüfmethoden in der IEC 60079-11 notwendig. In Absprache mit dem DKE Arbeitskreis 241.0.14 „Eigensicherheit“ hat die deutsche Abordnung des Subcommittee SC 31G „Intrinsically Safe Apparatus“ (MT 60079-11) während der IEC Sitzung im November 2007 folgendes erreicht:

In der etwa 2010 erscheinenden 6. Ausgabe der IEC 60079-11 wird der Abschnitt 10.1.2 ergänzt. In Fällen, in denen das Funkenprüfgerät nicht einsetzbar ist – wie bei den hier betrachteten dynamisch wirkenden Quellen – sind alternative Testmethoden zulässig. Erst in einer späteren Stufe, nachdem weitere gesicherte Erkenntnisse vorliegen, werden die dann anzuwendenden Prüfverfahren in die Norm einfließen.

Somit steht der Anwendung von DART-Technologie perspektivisch der Weg nach Erscheinen der 6. Ausgabe international offen.

#### 4 Das DART – High-Power-Konzept

Die DART- High – Power Lösung wird schwerpunktmäßig für Punkt zu Punkt Versorgung vom Speisegerät zum Verbraucher benutzt. Die sich damit ergebende Topologie bestehend aus Speisegerät, Leitung und dem üblicherweise am Leitungsende befindlichen Verbraucher, ermöglicht bei einer einfachen Betrachtungsweise des Gesamtsystems die Abgabe sehr hoher eigensicherer Wirkleistungen an die Verbraucher.

Das Entkopplungsmodul ermöglicht einen sicheren und funktionellen Betrieb des Systems unabhängig von den Eigenschaften des jeweiligen Verbrauchers. Die Abbildung 4-A zeigt beispielhaft die Zusammenschaltung eines DART-High-Power-Speisegerätes mit drei Verbrauchern über eine Verbindungsleitung und ein Entkopplungsmodul. Für eine Reihe von Anwendungen, wie z.B. Magnetventile, bietet sich eine direkte Integration des Entkopplungsmoduls in den Verbraucher an.

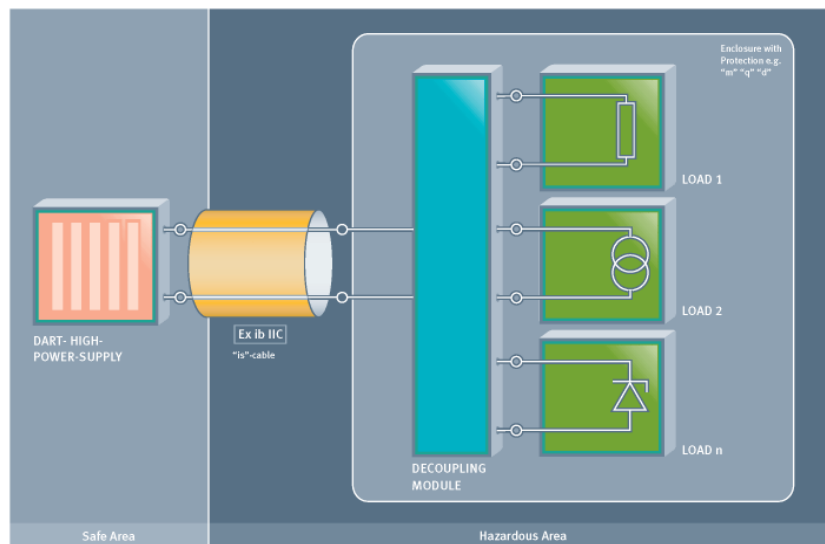


Abbildung 4-A: Beispiel für die Zusammenschaltung eines DART-High-Power-Systems

Durch das sicherheitstechnisch eindeutige und einfach beschreibbare Verhalten des Systems sind hierbei zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung als maximale Ausgangsdaten  $U_{\max} = 50 \text{ V}$  und  $I_{\max} = 1,2 \text{ A}$  bei einer Leitungslänge von maximal 100 m erreichbar. Abbildung 4-B zeigt das Blockschaltbild eines Entkopplungsmoduls.

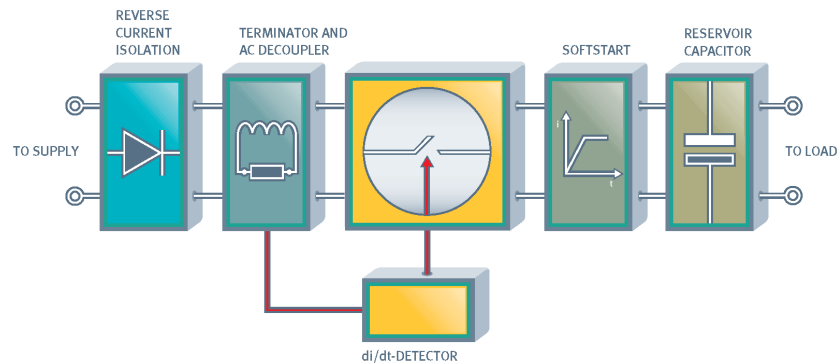


Abbildung 4-B: Blockschaltbild des Entkopplungsmoduls mit optionaler di/dt- Detektion

Die Komponenten Soft-Start und Lastaufschaltung sowie der Pufferkondensator sorgen für ein störungsfreies und sanftes Aufschalten des Verbrauchers auf die DART-High-Power-Versorgung. Durch eine entsprechende Auslegung des Pufferkondensators können eventuelle Einschaltüberströme bzw. kurzzeitige starke Stromschwankungen des Verbrauchers ausgeglichen werden, sodass diese nicht zum Auslösen der di/dt- Abschaltfunktion führen. In sicherheitstechnischer Hinsicht sorgt die Kombination von Pufferkondensator, AC- und Rückstromentkopplung für ein definiertes DART- systemkonformes elektrisches Verhalten in Richtung der Versorgungsleitung - unabhängig von den elektrischen Parametern des eigentlichen Verbrauchers. Diese Komponenten sind sicherheitsrelevant und müssen entsprechend den normativen Vorgaben der Zündschutzart Eigensicherheit ausgelegt sein.

Durch zusätzliche Integration einer entsprechenden di/dt Abschaltfunktionalität analog des DART-Basiskonzeptes in das Entkopplungsmodul ist eine Verdopplung der zulässigen Leitungslänge erreichbar. Die Abschaltung kann dann an beiden Leitungsenden erfolgen, sodass der „worst-case“ im Hinblick auf Laufzeiten in der Leitungsmitte zwischen Speisegerät und Verbraucher liegt. Durch diese zusätzliche Funktionalität verringert sich das leitungslängenabhängige Derating gemäß Abbildung 2-D um den Faktor 2, d.h. die für eine bestimmte Leistung zulässige Leitungslänge kann entsprechend verdoppelt werden.

Um eine möglichst breite Anwendungspalette abdecken zu können wurde bei der Konzeption auch die Möglichkeit einer Datenübertragung auf der Versorgungsleitung vorgesehen. Die hierfür notwendigen Entkopplungsglieder und Leitungsabschlüsse zur Realisierung einer BPSK Datenübertragung > 500 kbit/s sind bereits im Speisegerät und in der Anpassschaltung vorhanden. Eine 500 kbit/s Datenübertragung über ein DART-High-Power-System konnte bereits erfolgreich getestet werden. Nähere Informationen zur Datenübertragung sind über die PTB zu erhalten.

Folgende Applikationen sind mit DART-High-Power in der Explosionsgruppe Ex ib IIC realisierbar:

- ⇒ Industrie PC, Bedienterminals und Displays,
- ⇒ LED-Beleuchtungssysteme,
- ⇒ Sensoren mit hohem Leistungsbedarf z.B. Coriolis- Durchflussmesssysteme,
- ⇒ Analysengeräte,
- ⇒ Magnetische Stellglieder bzw. Magnetventile hoher Leistung,
- ⇒ Elektrische Heizungen

## 5 DART für den Feldbus

Im Bereich der Prozessautomatisierung haben sich die beiden Feldbussysteme FOUNDATION Fieldbus H1 und PROFIBUS PA (MBP) als de facto Standard etabliert. Sie erfüllen in besonderem Maße die hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit, die in der Prozessindustrie gestellt werden. Beide Systeme basieren auf dem gleichen, in IEC 61158-2 definierten, Physical Layer. Alle Teilnehmer sind hier über eine Zwei-Draht-Verbindung miteinander verbunden.

## Topologie

Bei Feldbusapplikationen kommt, wie in Abbildung 5-A zu sehen ist, eine Linientopologie zum Einsatz, bei der die Verbraucher nicht direkt an die Hauptleitung (engl: Trunk), sondern über Stichleitungen (engl: Spur) an Feldverteiler angeschlossen werden, die sich an beliebigen Stellen auf der Hauptleitung befinden können.

Feldverteiler werden häufig auch als Segment Protector bezeichnet, da ihre Hauptaufgabe darin besteht, im Fehlerfall eines Feldgerätes, eine Rückwirkung auf das verbleibende Segment zu verhindern. Hierzu wird in der Regel der Strom, der einem Feldgerät zur Verfügung gestellt wird, im Feldverteiler begrenzt.

Aufgrund der bisher geltenden Limitierung bezüglich der verfügbaren Leistung bei eigensicheren Stromkreisen, wird die Hauptleitung in vielen Fällen nicht eigensicher, sondern beispielsweise in der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ ausgeführt. In diesen Fällen werden, häufig als Feldbusbarriere bezeichnete, Feldverteiler eingesetzt, die zusätzlich eine galvanische Trennung mit einer eigensicher begrenzten Ausgangsspannung aufweisen.

Der Zuwachs an verfügbarer Leistung wird bisher durch Einschränkungen beim Betrieb, sowie einem erhöhten Aufwand bei der Unterhaltung einer Anlage erkauft.

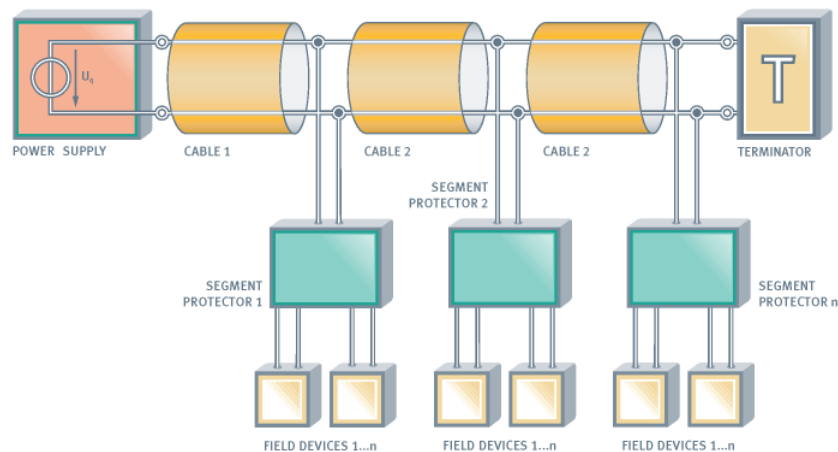


Abbildung 5-A: DART Feldbussystem mit mehreren Verbrauchern und Segment Protektoren

Durch den Einsatz von DART kann, im Vergleich zu heute existierenden eigensicheren Feldbuslösungen, ein Vielfaches an Leistung auf der Hauptleitung zur Verfügung gestellt werden, wobei aber die mit der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ verbundenen Nachteile entfallen.

## Versorgungsspannung

Die Leistung, die maximal zur Verfügung gestellt werden kann, steigt mit der Versorgungsspannung, so dass diese möglichst hoch gewählt werden sollte. Dem entgegen steht die Forderung, dass die am Markt bereits verfügbaren Feldgeräte für eine eigensichere Speisung, in einem DART-System einsetzbar sein sollen.

FISCO und Entity sind zwei in der IEC 60079-27 definierte Konzepte, die den Nachweis der Eigensicherheit für jede Topologie durch einfachen Wertevergleich ermöglicht. Nahezu jedes Feldgerät, das für eine eigensichere Speisung ausgeführt ist, erfüllt mindestens die Anforderungen eines dieser beiden Lösungsansätze. Die Versorgungsspannung für den Feldbus wird mit DART auf die für Entity maximal zulässige Spannung von 24 V gewählt. Hierdurch wird der Einsatz praktischer aller existierenden Feldgeräte sichergestellt.

## Leitungslänge

Häufig sind die zu automatisierenden Anlagen sehr weitläufig mit einer Forderung nach großen Leitungslängen. Wird die Leitungslänge zu 1000 m bestimmt ergibt sich eine verfügbare Wirkleistung von 8 W. Diese Ausgangsleistung ist für 10 bis 24 Verbraucher je Segment geeignet und entspricht der heu-

te mit dem allgemein anerkannten High-Power Trunk Konzept zur Verfügung gestellten Wirkleistung an Feldbussegmenten.

### Entkopplung der Feldgeräte

Wie bereits in Abschnitt 2.4 beschrieben ist das Verhalten von Verbrauchern aus sicherheitstechnischer Sicht nicht definiert. Entkopplungsmodule sorgen auch beim Feldbus dafür, dass sich zur Hauptleitung hin stets ein definiertes Verhalten ergibt. Abbildung 5-B zeigt eine Schaltung, die vor den Verbraucher geschaltet eine solche Entkopplung bewirkt.

Da die Feldgeräte nicht direkt an die Hauptleitung, sondern stets über Feldverteiler angeschlossen werden, bietet es sich an, das Entkopplungsmodul direkt in die Eingangsschaltung der Feldverteiler zu integrieren wie in Abbildung 5-B gezeigt.

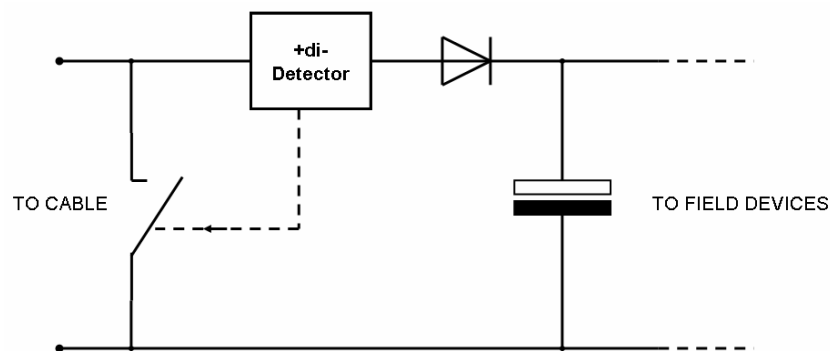


Abbildung 5-B: Entkopplungsmodul (Decoupling circuit) für DART-Feldbus

Unabhängig von der durch die Strom-Spannungs-Kennlinie beschriebenen Charakteristik der am Field-Device-Ausgang angeschlossenen Feldgeräte, sorgt der Pufferkondensator stets für ein eindeutig definiertes Lastverhalten an den Cable-Eingangsklemmen. Strom kann nur vom Entkopplungsmodul aufgenommen werden, wenn die Eingangsspannung  $U_i$  größer als die Ausgangsspannung ist. Sobald die Eingangsspannung sinkt, wird die Stromaufnahme zu Null.

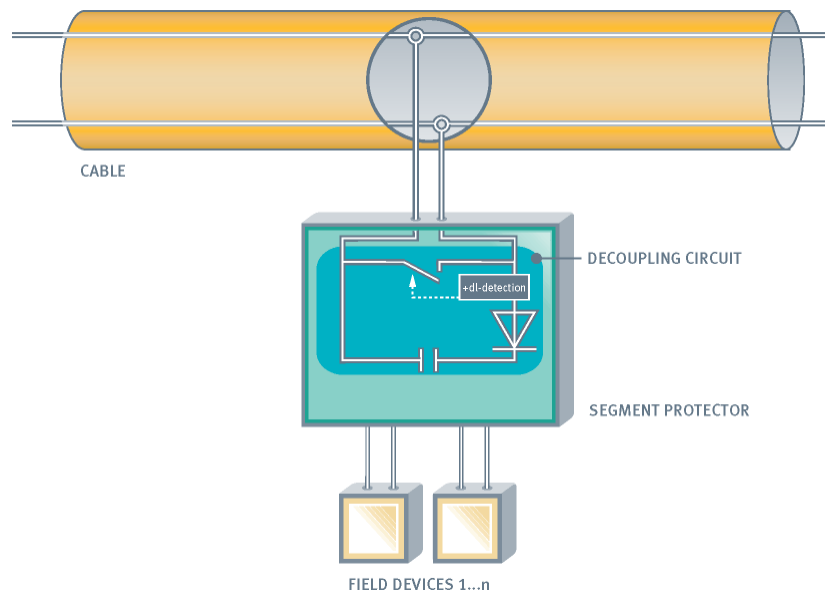


Abbildung 5-C: Segment Protektor mit integriertem Entkopplungsmodul zur Anschaltung von bis zu 12 beliebigen Feldbusgeräten

Wird die Entkopplungsschaltung aus Abbildung 5-B vor den Verbraucher in Abbildung 2-H geschaltet, so wird in dem Szenario der Entstehung eines Öffnungsfunkens entgegengewirkt.

Wird die Entkopplungsschaltung aus Abbildung 5-B vor beide Verbraucher in Abbildung 2-1 geschaltet, so ergibt sich mit der Unterbrechung an der Stelle B folgendes Szenario:

Ein Stromfluss in Verbraucher2 ist nur möglich wenn die Spannung am Eingang von Verbraucher2 nicht sinkt. Folglich steigt die Spannung am Punkt B um etwa 10 V. Eine Spannungswelle läuft von Punkt B aus in die Verbindungsleitung 2 in Richtung Speisegerät. Der Pufferkondensator in Verbraucher1 verhindert einen Spannungsanstieg an der Stelle A, wodurch die Stromaufnahme, der in Verbraucher1 integrierten Entkopplungsschaltung, signifikant ansteigt. Dieser Anstieg wird durch die in Abbildung 5-B gezeigte Stromänderungserkennung (+dI-detection) festgestellt, worauf der Schalter Sw die beiden Zuleitungen kurz schließt. Hierdurch wird einerseits bereits der Energieeintrag in den Funken reduziert, andererseits wird eine für das Speisegerät sicher auswertbare Information zur Auslösung erzeugt.

### **Kommunikation**

Die Kommunikation wird in Form eines trapezförmigen Wechselsignals mit einer Schwingungsbreite von 18 mA (+/- 9 mA) dem Gleichstrom-Versorgungssignal überlagert und auf ein und demselben Adernpaar übertragen. Auf der Hauptleitung wird diese Strommodulation durch die Busabschlüsse in eine Spannung mit einer Schwingungsbreite von 900 mV (+/- 450 mV) übersetzt.

Zwar beträgt die Datenrate nur 31,25 kBit pro Sekunde, jedoch können die Flanken wenige Mikro-Sekunden kurz sein. Das System unterscheidet diese Stromänderungen eindeutig und zuverlässig von denen, die bei der Funkenentstehung auftreten. Diese geforderte Unterscheidbarkeit ist beim Einsatz von DART in einem Feldbusystem mitbestimmend für die Leistung, die maximal zur Verfügung gestellt werden kann.

## **6 Zusammenfassung und Ausblick**

Durch das dynamisch wirkende, eigensichere Energieversorgungskonzept DART stehen in Abhängigkeit von der Leitungslänge sehr hohe eigensichere Wirkleistungen für neue Anwendungen in der Prozessindustrie zur Verfügung. Das DART-High-Power Konzept ermöglicht eine allgemein anwendbare eigensichere Energieversorgung, die sowohl auf die Leitungslänge als auch auf maximal abgebbare Leistung optimiert werden kann. DART-Feldbus stellt ein eigensicheres Energieversorgungskonzept für Feldbusanwendung dar, welches verglichen mit bestehenden eigensicheren Lösungen ein Vielfaches an Leistung zur Verfügung stellt. Im Vordergrund steht hier nicht die Optimierung hinsichtlich eines bestimmten Parameters, sondern die Berücksichtigung wichtiger Randbedingungen aus der Feldbustechnik. So wird die übliche Linien-Topologie mit einer Hauptleitung von bis zu 1000 m Länge unterstützt. Darüber hinaus ist der Einsatz existierender Feldgeräte, die nach FISCO/Entity zertifiziert sind, möglich. Tabelle 6-A fasst die möglichen Leistungswerte zusammen.

*Tabelle 6-A: Maximale eigensichere DART-Ausgangswerte bei typischen Leitungslängen*

|                 | Spannung $U_{out}$ | Wirkleistung $P_{out}$ | Leitungslänge |
|-----------------|--------------------|------------------------|---------------|
| DART High-Power | 50 VDC             | ca. 50 W               | bei 100 m     |
|                 | 24 VDC             | ca. 22 W               | bei 100 m     |
|                 | 50 VDC             | ca. 8 W                | bei 1000 m    |
| DART Feldbus    | 24 VDC             | ca. 8 W                | bei 1000 m    |

Für eine exakte sicherheitstechnische Bewertung des Zündverhaltens dynamisch wirkender eigensicherer Energieversorgungskonzepte wurden geeignete Prüfverfahren vorgeschlagen. Änderungen in den aktuell geltenden Normen wurden bereits veranlasst. Weitere Schritte werden folgen.

DART ist flexibel für praktisch alle elektrischen Verbraucher in der Ex-Zone einsetzbar und ermöglicht den Einsatz der Zündschutzart Eigensicherheit in Anwendungen mit einem Energiebedarf, die nach heutigem Stand anderer, typischerweise weniger flexibler oder aufwändiger Zündschutzarten bedürfen. Durch Anwendung des DART- Konzepts lassen sich besonders in der Prozessindustrie Arbeitsprozesse

vereinfachen oder eliminieren – dies trägt zur Reduzierung der Investitions- und Betriebskosten und unmittelbar zur Erhöhung der Betriebssicherheit bei.

## 7 Förderhinweis

Das Forschungsvorhaben 14490 N wird aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) gefördert. Im „Projektbegleitenden Ausschuss“ des AiF- Projektes arbeiten folgende Firmen mit:

- ⇒ HIMA Paul Hildebrandt GmbH + Co KG, 68782 Brühl
- ⇒ Gönzheimer Elektronik GmbH, 67433 Neustadt
- ⇒ Pepperl+Fuchs GmbH, 68307 Mannheim
- ⇒ Knick Elektronische Messgeräte GmbH, 14134 Berlin
- ⇒ Dipl.-Ing. Bender GmbH, 35305 Grünberg
- ⇒ Dezidata GmbH, 94469 Deggendorf

## 8 Literatur

- IEC 60079-11 Explosive atmospheres – Part 11: Equipment protection by intrinsic safety “i”
- IEC 61158-2 Digital data communications for measurement and control – Fieldbus for use in industrial control systems – Part 2: Physical layer specification and service definition
- PTB-Bericht PTB-Ex-1, Braunschweig, Juni 2007,  
11. BAM/PTB-Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik;  
Beitrag von U. Gerlach und Th. Uehlken: Neue Herausforderungen bei Speisesystemen hoher Leistung in der Zündschutzart Eigensicherheit

## 9 Präsentation auf der Hannovermesse / Interkama 2008

- PTB : Halle 7 Stand E14
- Pepperl+Fuchs : Halle 7 Stand C14

### Autoren

- PTB: Dr. Udo Gerlach  
<http://www.explosionsschutz.ptb.de>  
Phone: +49 531-3620  
e-mail : [udo.gerlach@ptb.de](mailto:udo.gerlach@ptb.de)
- Dr. Ulrich Johannsmeyer  
e-mail : [ulrich.johannsmeyer@ptb.de](mailto:ulrich.johannsmeyer@ptb.de)
- Dipl.-Ing. Thomas Uehlken  
e-mail: [thomas.uehlken@ptb.de](mailto:thomas.uehlken@ptb.de)
- Pepperl+Fuchs :  
Dr. Martin Junker  
<http://www.pepperl-fuchs.com>  
Phone: +49 621-776-1128  
e-mail: [mjunker@de.pepperl-fuchs.com](mailto:mjunker@de.pepperl-fuchs.com)
- Andreas Hennecke  
Phone: +49 621-776-1601  
e-mail: [ahennecke@de.pepperl-fuchs.com](mailto:ahennecke@de.pepperl-fuchs.com)