

**DIN EN IEC 61788-22-3
(VDE 0390-22-3)**
DIN

Diese Norm ist zugleich eine **VDE-Bestimmung** im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.

VDE

ICS 29.050

Einsprüche bis 2020-09-30

Entwurf

**Supraleitfähigkeit –
Teil 22-3: Supraleitender Streifen-Photonendetektor –
Dunkelzählrate
(IEC 90/446/CD:2019);
Text Deutsch und Englisch**

Superconductivity –
Part 22-3: Superconducting strip photon detector –
dark count rate
(IEC 90/446/CD:2019);
Text in German and English

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-07-31 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 51 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 90/446/CD:2019 „Superconductivity – Part 22-3: Superconducting strip photon detector – dark count rate“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom ITC 90 „Superconductivity“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und unterliegt dem Copyright der IEC .

Das Dokument wurde den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf FprEN nur 6 Wochen beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 184 „Supraleiter“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Inhalt

Seite

1	Anwendungsbereich.....	6
2	Normative Verweisungen	6
3	Begriffe	6
4	Symbole	8
5	Prinzip der Messmethode	8
6	Messaufbau.....	9
6.1	Montage des Detektors	9
6.2	Tieftemperatursystem	9
6.3	Messsystem	10
7	Messverfahren.....	11
7.1	Temperaturmessung	11
7.2	Messung des kritischen Stromes	11
7.3	Messung von R_D	12
8	Messunsicherheit	12
8.1	Messunsicherheit Typ A.....	13
8.2	Messunsicherheit Typ B.....	13
8.3	Messunsicherheitsbudget	13
8.4	Anforderungen an die Messunsicherheit	14
9	Prüfbericht.....	14
9.1	Kennzeichnung der Prüflinge (en: DUT, device under test)	14
9.2	Messwert I_{sw}	14
9.3	Kennlinien R_D als Funktion von I_b	14
9.4	Relativer Fehler der Messung von R_D für den höchsten Wert von R_D	14
9.5	Mittlere Temperatur	15
9.6	Standardabweichung der Temperatur	15
9.7	Relativer Fehler von T	15
9.8	Wahlweise Angabe sonstiger Daten	15
	Anhang A (informativ) Ergebnisse des Ringversuches (erste Runde).....	16
A.1	Beschreibung der Prüflinge (en: DUT, device under test)	16
A.2	Messbedingungen	16
A.3	Ergebnisse der Messungen	17
A.3.1	Prüfergebnisse der Einrichtung P1	17
A.3.2	Prüfergebnisse der Einrichtung P2	19
A.3.3	Prüfergebnisse der Einrichtung P3	21
A.3.4	Prüfergebnisse der Einrichtung P4	23
A.4	Auswertung der Messergebnisse.....	23

A.4.1 Vergleich der Prüfergebnisse	23
A.4.2 Diskussion der Abweichungen	25
Literaturhinweise	26

Bilder

Bild 1 – Beispiele für Dunkelzählereignisse: (a) Impulsfolge von Dunkelzählereignissen und (b) Form des Ausgangsimpulses eines Dunkelzählereignisses	7
Bild 2 – R_D in Abhängigkeit vom Betriebsstrom: R_{Dh} dominiert im Bereich kleiner Betriebsströme und R_{Di} im Bereich großer Betriebsströme	9
Bild 3 – Schematische Darstellung der DCR-Messung	10
Bild 4 – Typische Strom-Spannungs-Kennlinie eines SSPD	12
Bild A.1 – Fotos der SSPD-Prüflinge mit den Bezeichnungen D1 (links) und D2 (rechts)	16
Bild A.2 – I-U-Kennlinie (a) und R_D - I_B -Kennlinie (b) von D1 geprüft durch P1	17
Bild A.3 – I-U-Kennlinie (a) und R_D - I_B -Kennlinie (b) von D2 geprüft durch P1	18
Bild A.4 – I-U-Kennlinie (a) und R_D - I_B -Kennlinie (b) von D1 geprüft durch P2	19
Bild A.5 – I-U-Kennlinie (a) und R_D - I_B -Kennlinie (b) von D2 geprüft durch P2	20
Bild A.6 – I-U-Kennlinie (a) und R_D - I_B -Kennlinie (b) von D1 geprüft durch P3	21
Bild A.7 – I-U-Kennlinie (a) und R_D - I_B -Kennlinie (b) von D2 geprüft durch P3	22
Bild A.8 – R_D - I_B Kennlinien von D1 und D2 geprüft durch P4	23
Bild A.9 – R_D - I_B -Kennlinien von D1 geprüft durch P1, P2, P3 und P4	24
Bild A.10 – R_D - I_B -Kennlinien von D2 geprüft durch P1, P2, P3 und P4	25

Tabellen

Tabelle 1 – Messunsicherheitsbudget für R_D	14
Tabelle A.1 – Ergebnisse der Prüfung von D1 durch P1	17
Tabelle A.2 – Ergebnisse der Prüfung von D2 durch P1	18
Tabelle A.3 – Ergebnisse der Prüfung von D1 durch P2	19
Tabelle A.4 – Ergebnisse der Prüfung von D2 durch P2	20
Tabelle A.5. – Ergebnisse der Prüfung von D1 durch P3	21
Tabelle A.6 – Ergebnisse der Prüfung von D2 durch P3	22
Tabelle A.7 – Ergebnisse der Prüfung von D1 durch P4	23
Tabelle A.8 – Ergebnisse der Prüfung von D2 geprüft durch P4	23

Einleitung

Die Normenreihe IEC 61788-22 legt internationale Normen für supraleitende elektronische Bauelemente fest. Der physikalische Effekt der Supraleitfähigkeit ermöglicht die höchstempfindliche Messung oder Detektion einer Reihe von verschiedenen Messgrößen. Die IEC-Norm **IEC 61788-22-1** beschreibt verschiedene Typen supraleitender Sensoren und Detektoren. Einer davon ist der supraleitende Streifendetektor.

Eine typische Grundstruktur eines Streifendetektors ist ein mäanderförmiger Streifen eines Supraleiters, der zum Beispiel eine Dicke von weniger als 10 nm, eine Breite von weniger als einigen 100 nm sowie eine Länge von 1 mm besitzt. Dies ist eine Struktur im Nanomaßstab. In der Norm ISO/TS 80004-2:2015 „Nanotechnologies – Vocabulary – Part 2: Nano-objects“ wird der nanoskalige Bereich oder Nanomaßstab als Längenbereich von ungefähr 1 nm bis 100 nm festgelegt. Da ein Nanoobjekt dadurch charakterisiert ist, dass es mindestens ein Außenmaß im nanoskaligen Bereich besitzt, gehören die supraleitenden Mäanderstrukturen zur Kategorie der Nanoobjekte.

Die für supraleitende Mäanderstrukturen häufig verwendete Benennung „Nanodraht“ (en: nanowire) wird in dieser Norm nicht empfohlen. Im ISO-Wörterbuch wird ein Nanodraht als elektrisch leitende oder halbleitende Nanofaser definiert, wobei eine Nanofaser zwei Außenmaße in Nanomaßstab und ein signifikant größeres drittes Außenmaß besitzt. Der signifikante Faktor, um den sich zwei Außenmaße unterscheiden, ist dabei typischerweise größer als 3. Wenn die ersten zwei Außenmaße sich signifikant unterscheiden, wären die Benennungen „Nanoplättchen“ (en: nano plate) bzw. „Nanoband“ (en: nanoribbon, nanotape) für die Mäanderstrukturen zu verwenden. Allerdings sind diese Benennungen im Fachbereich der Elektronik nicht gebräuchlich. Abgesehen von der Problematik dieser ISO-Definition, nach der manche der supraleitenden Strukturen noch als Nanodraht bezeichnet werden könnten (z.B. bei einer Dicke von 5 nm und einer Breite von 15 nm), unterscheiden sich diese aber auch im Formfaktor von üblichen Drähten mit rundem Querschnitt. Aus diesem Grund werden in **IEC 61788-22-1** die Benennungen „Streifen“ bzw. „Nanostreifen“ festgelegt für Supraleiter der Form von Mäanderlinien. Gemäß dieser Norm wird der Detektor dann als Supraleitender Streifen-Photonendetektor (SSPD, en. superconducting strip photon detector) oder Supraleitender Nanostreifen-Photonendetektor (SNSPD, en. superconducting nano strip photon detector) bezeichnet. In der vorliegenden Norm wird die Abkürzung SSPD verwendet.

Typische Anwendungsgebiete für SSPD sind die Quanteninformatik, Laserkommunikation, LIDAR (en. light detection and ranging) sowie die Fluoreszenzspektroskopie. SSPD erreichen dabei bessere Leistungsparameter als herkömmliche Einzelphotonendetektoren, wie Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) oder Avalanche-Fotodioden. Wegen der steigenden Nachfrage nach höchstempfindlicher Detektion von Photonen im Frequenzbereich des sichtbaren Lichts bis hin zum mittleren Infrarot begründen die SSPD einen schnell wachsenden Markt. Die Normierung der SSPD ist aber nicht nur für industrielle Anwendungen von Nutzen, sondern auch für die Weiterentwicklung dieser Detektoren.

Bei der Detektion gibt es eine Reihe grundlegender Kenngrößen wie den Nachweiswirkungsgrad, die Schwankungen des Schaltzeitpunktes (en: timing jitter) und die Dunkelzählrate (en: dark count rate). Da die Dunkelzählrate auch Einfluss auf die Messung anderer Kenngrößen hat, wird sie hier mit Priorität behandelt. Natürlich werden standardisierte Messmethoden auch für die Bestimmung der anderen Kenngrößen benötigt. Diese festzulegen ist für die Zukunft geplant.

Supraleitfähigkeit – Teil 22-3: Supraleitender Streifen-Photonendetektor – Dunkelzählrate

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil 61788-22-3 der Internationalen Normenreihe IEC 61788 ist anwendbar für die Messung der Dunkelzählrate (en. dark count rate, DCR, R_D) von supraleitenden Streifen-Photonendetektoren (SSPD, en. superconducting strip photon detector). Für die Photonendetektion sollte mindestens ein Außenmaß einer supraleitenden Linearstruktur im nanoskaligen Bereich liegen. Ein Beispiel wäre eine Streifenstruktur mit einer Dicke von 5 nm, einer Breite von 100 nm und einer Länge von 0,5 mm, die als einfache Mäanderstruktur mit einem Linienraster von 100 nm eine aktive Detektorfläche von $100 \mu\text{m}^2$ bedeckt.

Diese Norm legt Begriffe, Definitionen, Symbole sowie die Messmethode für die Dunkelzählrate DCR in Abhängigkeit des Betriebsstroms (I_b), der Betriebstemperatur (T) sowie der Standard-Messunsicherheit fest. Die DCR besteht aus zwei Bestandteilen: Zum einen aus der durch Wärmestrahlung der Optik und Streustrahlung verursachten Hintergrund-DCR (R_{Db}), die unabhängig von I_b ist, sowie zum anderen aus der intrinsischen DCR (R_{Di}), welche durch spontanes Auftreten resistiver Bereiche in einem supraleitenden Streifen entsteht, und die im Bereich hohen Betriebsstroms (I_b) nahe am kritischen Strom (I_{sw}) (en. switch current) vorherrschend ist.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 61788-22-1, *SUPERCONDUCTIVITY – Part 22-1: Superconducting electronic devices – Generic specification for sensors and detectors*

ISO/IEC GUIDE 98-3:2008(E), *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

JCGM 102:2011 *Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ – Extension to any number of output quantities*

IEC 60050-815:2015, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 815: Superconductivity*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-815, **IEC 61788-22-1** und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC 60050-815, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 815: Superconductivity*
- **IEC 61788-22-1**, *Superconductivity – Part 22-1: Superconducting electronic devices – Generic specification for sensors and detectors*
- ISO/TS 80004-2:2015, *Nanotechnology – Vocabulary — Part 2: Nano-objects*
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>
- IEC Glossary: <http://std.iec.ch/glossary>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

3.1

Dunkelzählereignis

(en. dark count)

Zählereignis, welches ein Messgerät ohne Anliegen eines Eingangssignals aufzeichnet

Anmerkung 1 zum Begriff: Als Zählereignis gilt ein registrierter Ausgangsimpuls

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein Beispiel von Dunkelzählereignissen zeigt Bild 1 (a). Die typische Impulsform eines Dunkelzählereignisses ist in Bild 1 (b) dargestellt. Es gibt keinen Unterschied der Impulsform zwischen Dunkelzählereignissen und echten durch Photonen hervorgerufenen Zählereignissen.

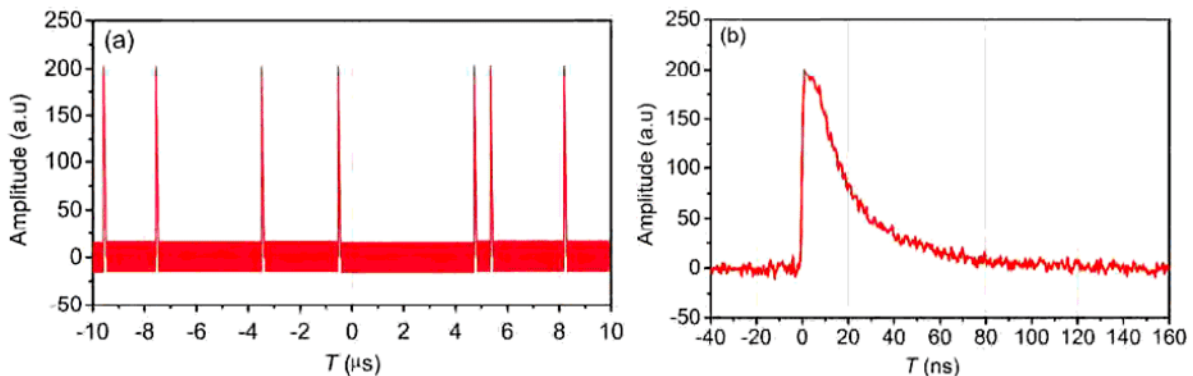


Bild 1 – Beispiel für Dunkelzählereignisse: (a) Impulsfolge von Dunkelzählereignissen und (b) Form des Ausgangsimpulses eines Dunkelzählereignisses

3.2

Dunkelzählrate

(en. dark count rate)

DCR, R_D

Anzahl der Dunkelzählereignisse je Zeiteinheit

Anmerkung 1 zum Begriff: R_D ist gleich der Summe von R_{Db} und R_{Di} , welche weiter unten definiert werden.

3.3

Hintergrund-Dunkelzählrate

(en. background dark count rate)

R_{Db}

Anzahl der Hintergrund-Dunkelzählereignisse je Zeiteinheit.

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Hintergrund-Dunkelzählrate entsteht durch Wärmestrahlung von Teilen der Messanordnung sowie Streustrahlung.

3.4

Intrinsische Dunkelzählrate

(en. intrinsic dark count rate)

R_{Di}

Anzahl der intrinsischen Dunkelzählereignisse je Zeiteinheit.

Anmerkung 1 zum Begriff: Die intrinsische Dunkelzählrate entsteht durch spontanes Auftreten resistiver Bereiche in einem supraleitenden Streifen.

3.5

Betriebsstrom

I_b

Gleichstrom, der durch den als SSPD verwendeten supraleitenden Streifen fließt.

3.6

Kritischer Strom

(en. switch current)

I_{sw}

maximaler Betriebsstrom im Betriebsmodus der Photonendetektion.

Anmerkung 1 zum Begriff: Wenn der Betriebsstrom I_{sw} überschreitet, schaltet der SSPD infolge der Entstehung eines stabilen resistiven Bereiches über die Breite des gesamten Nanostreifens sowie durch Ohmsche Wärme dauerhaft in den resistiven Zustand. Aus diesem Grund ist im normalen Betriebszustand I_b kleiner als I_{sw} .

3.7

Normierter Betriebsstrom

(en. normalized bias current)

I_b/I_{sw}

Betriebsstrom, geteilt durch den kritischen Strom.

3.8

Rücksprungstrom

(en. retrapping current)

I_r

Strom, bei dem die Spannung Null beträgt, während der Strom nach Umschalten in den resistiven Zustand abfällt.

4 Symbole

R_D	Dunkelzählrate
R_{Db}	Hintergrund-Dunkelzählrate
R_{Di}	intrinsische Dunkelzählrate
I_b	Betriebsstrom
I_{sw}	kritischer Strom
T	Temperatur
I_r	Rücksprungstrom
V_{pp}	Amplitude des Ausgangsimpulses
N	Anzahl der Messungen bei definierten I_b und T
u_A	Standard-Messunsicherheit Typ A von R_D
u_B	Standard-Messunsicherheit Typ B von R_D

5 Prinzip der Messmethode

Bild 2 zeigt eine schematische Kennlinie der Abhängigkeit der DCR vom Betriebsstrom, auch R_D -Kennlinie genannt, in Einheiten von Zählereignissen je Sekunde (cps, en: counts per second). Dabei sind zwei Bestandteile der DCR erkennbar. Wenn ein SSPD an eine optische Faser gekoppelt wird, um ein optisches Signal einzuspeisen, überwiegt im Bereich kleinen Betriebsstroms (I_b) der Anteil von R_{Db} . R_{Db} ist nur relativ gering vom Betriebsstrom abhängig und wird durch einen Rauschanteil von Photonen verursacht. Diese entstehen entweder als thermische Strahlung in der Faser selbst oder werden durch Streuung von Umgebungslicht eingekoppelt. R_{Di} dagegen weist eine starke Abhängigkeit von I_b auf und überwiegt im Bereich von hohen I_b .

Intrinsische Dunkelzählereignisse und Hintergrund-Dunkelzählereignisse lassen sich nicht unterscheiden, unabhängig vom Betriebsstrom. Der Messung zugänglich ist nur die Summe $R_D = R_{Db} + R_{Di}$. In R_D -Kennlinien

sind zwei Anstiege zu beobachten, da R_{Db} und R_{Di} jeweils im niedrigen bzw. hohen I_b -Bereich dominieren. Während R_{Di} üblicherweise eine exponentielle Abhängigkeit von I_b aufweist, trifft das auf R_{Db} nicht zu. R_{Db} ist gleich dem Produkt aus Nachweiswirkungsgrad und der Summe der Photonen aus Wärmestrahlung und Streulicht.

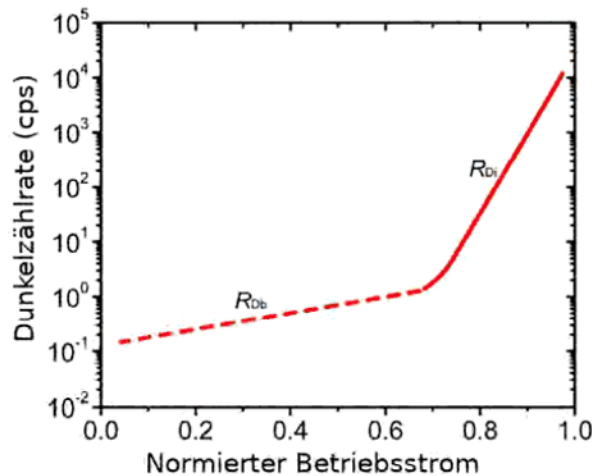


Bild 2 – R_D in Abhängigkeit vom Betriebsstrom: R_{Db} dominiert im Bereich kleiner Betriebsströme und R_{Di} im Bereich großer Betriebsströme.

R_D -Kennlinien müssen durch Zählen der Ausgangspulse je Zeiteinheit für verschiedene Betriebsströme I_b bei konstanter Temperatur gemessen werden.

6 Messaufbau

6.1 Montage des Detektors

Bevor ein SSPD charakterisiert werden kann, muss er in ein Detektormodul integriert werden. Die wichtigste Aufgabe des Detektormoduls ist die effiziente Einkopplung des Lichts aus einer Faser in die Empfangsfläche des SSPD. Ein hoher Koppelwirkungsgrad ist die Voraussetzung für einen hohen Nachweiswirkungsgrad. Es gibt verschiedene Möglichkeiten der optischen Einkopplung.

Das Detektormodul sollte nicht nur einen hohen Koppelwirkungsgrad aufweisen, sondern auch kompakt sein. Der Detektor muss im Detektormodul stabil befestigt und thermisch gut kontaktiert sein. Das Detektormodul sollte aus sauerstofffreiem Kupfer hergestellt werden und über einen HF-Steckverbinder verfügen.

Die optische Faser muss im Detektormodul so montiert sein, dass eine effektive und stabile Einkopplung von Licht auf den Detektor gewährleistet ist. Um R_{Db} zu minimieren, muss dabei das Ende der Faser auf die Temperatur des Detektormodules gebracht werden. Zur Gewährleistung einer guten Kopplung muss der Faserkern vertikal zur Empfangsfläche des SSPD ausgerichtet sein.

6.2 Tieftemperatursystem

Als Tieftemperatursystem für den Betrieb von SSPD wird üblicherweise ein Kryostat mit geschlossenem Kühlsystem auf Basis von mechanischen Kältemaschinen verwendet, z. B. Gifford–McMahon (GM) Kühler oder Pulsrohrkühler. Damit kann eine Basistemperatur von weniger als 4 K erreicht werden. Auch die Verwendung eines Kryostats mit Kühlung durch flüssiges Helium ist möglich. Das Detektormodul wird auf einer Plattform mit gutem thermischem Kontakt zum Kaltkopf montiert, so dass es die Temperatur dieser Plattform annimmt.

Die Temperatur des Detektormoduls muss während der R_D -Messung mit Hilfe eines kalibrierten Thermometers gemessen werden. Die Methode der Temperaturmessung ist in [Abschnitt 7.1](#) beschrieben.

Die optische Faser und die Koaxialkabel für die optische und elektrische Verbindung zwischen Detektormodul und der auf Raumtemperatur befindlichen Messeinrichtung sollten im Inneren des Kryostats angebracht werden.

Wie in Bild 3 gezeigt wird, ist ein Ende der Faser (blaue Linie) im Detektormodul befestigt. Das andere Ende der Faser ist auf Raumtemperatur mit einem in der Außenhülle des Kryostats angebrachten LWL-Steckverbinder (blaues Quadrat) verbunden.

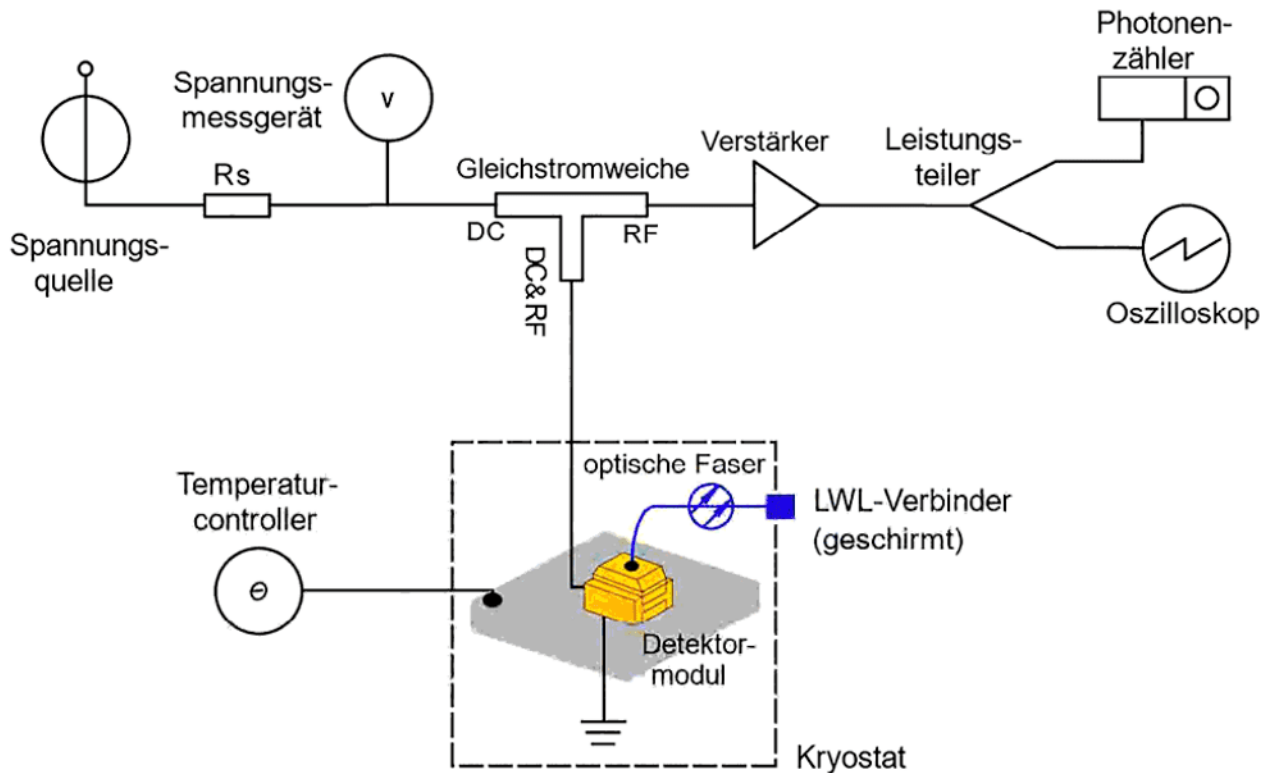


Bild 3 – Schematische Darstellung der DCR-Messung

6.3 Messsystem

Die schematische Darstellung des Messaufbaus ist in Bild 3 dargestellt. Ein SSPD im Detektormodul wird mit einer auf Raumtemperatur befindlichen Gleichstromweiche (en: bias-tee) verbunden. Eine isolierte Spannungsquelle mit Reihenwiderstand liefert eine stabile Stromspeisung des SSPD. Die Toleranz des Nebenschlusswiderstandes sollte besser als $\pm 0,05 \%$ sein. Der Betriebsstrom wird vom Gleichstromausgang (DC) der Gleichstromweiche in den Detektor eingekoppelt. Das Ausgangssignal des Detektors wird dem Hochfrequenzausgang (RF) der Gleichstromweiche entnommen und mit Hilfe eines breitbandigen rauscharmen Hochfrequenzverstärkers verstärkt. Die Bandbreite des Verstärkers muss größer als der Bereich 100 kHz – 500 MHz sein. Die verstärkten Impulssignale sollten mit einem Oszilloskop überwacht oder mit geeigneter Zähl elektronik ausgewertet werden.

Alle Komponenten der Raumtemperaturelektronik sollten gegen HF-Einstreuung abgeschirmt sein, da diese den kritischen Strom I_{sw} unterdrücken kann. Ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis kann erreicht werden, wenn die Gleichstromweiche oder der Vorverstärker bei tiefen Temperaturen betrieben werden. Da die DCR-Messung davon nicht wesentlich beeinflusst wird, ist dies aber nicht zwingend erforderlich.

7 Messverfahren

7.1 Temperaturmessung

Da die DCR temperaturabhängig ist, muss die Betriebstemperatur während der Messung der DCR erfasst werden. Für die Überwachung der Temperatur und der Temperaturschwankungen des Detektormoduls muss ein geeigneter Tieftemperatursensor, z. B. eine Siliziumdiode, mit einer Genauigkeit von ± 12 mK im Bereich von 1,4 bis 10 K (und ± 22 mK bei 77 K, falls höhere Temperaturen benötigt werden) verwendet werden. Die Werte für die Temperatur sollten mit einem Temperaturmessgerät gemessen werden, das mit dem kalibrierten Temperatursensor verbunden ist, der thermisch gut leitend an dem Detektormodul befestigt ist.

Üblicherweise sind die kurzzeitigen Schwankungen des Kaltkopfes des Kühlers kleiner als 10 mK. Langzeitschwankungen können aber auch durch die Umgebungstemperatur beeinflusst werden. Deshalb muss die Temperatur während der DCR-Messung regelmäßig und mindestens 10-mal protokolliert werden.

Die geeignete Betriebstemperatur von SSPD hängt vom supraleitenden Material ab. Wie in [Abschnitt 8](#) beschrieben, muss der Mittelwert der Temperatur protokolliert werden. Der relative Fehler, berechnet als Standardabweichung geteilt durch die mittlere Temperatur, muss kleiner als 0,5 % sein. DCR Messungen bei verschiedenen Werten der Betriebstemperatur können für einen großen Bereich von Anwendern aufgezeichnet werden.

7.2 Messung des kritischen Stromes

Um SSPD in einem geeigneten Arbeitspunkt betreiben zu können, sollte zuerst der kritische Strom (I_{sw}) gemessen werden. I_{sw} ist der höchstmögliche Strom im supraleitenden Zustand auf der Strom-Spannungskennlinie. [Abbildung 4](#) zeigt eine typische Kennlinie. Gemessen wird die I-U-Kennlinie folgendermaßen:

- Das Detektormodul sollte in einem Kryostaten mit mechanischer Kältemaschine oder mit flüssigem Helium bis zur Basistemperatur abgekühlt werden. Wenn das Thermometer Betriebstemperatur anzeigt, sollte noch mindestens 10 Minuten bis zur Aufnahme der ersten I-U-Kennlinie abgewartet werden.
- Die Messung der I-U-Kennlinie wird über den Gleichstrompfad gemäß [Bild 3](#) vorgenommen, wobei die Reihenschaltung aus R_s und dem Detektor von der Spannungsquelle gespeist wird.
- Die Gleichspannung über dem Detektor sollte mit dem Spannungsmessgerät bestimmt werden.
- Der durch den Detektor fließende Gleichstrom sollte anhand des Spannungsabfalls über R_s bestimmt werden.
- Die Ausgangsspannung der Spannungsquelle sollte gemeinsam mit der Detektorspannung und dem Spannungsabfall über R_s aufgezeichnet werden. Zur Abtastung der Kennlinie sollte die Speisespannung eine lineare Zeitabhängigkeit aufweisen. Der zugehörige Detektorstrom wird aus dem Spannungsabfall über R_s berechnet. Eine typische Kennlinie zeigt [Bild 4](#). Der höchste Strom der I-U-Kennlinie vor dem Schalten des SSPD entspricht dem kritischen Strom I_{sw} . Beim Strom I_r erfolgt in der hysteretischen Kennlinie der Rücksprung zur Spannung 0.

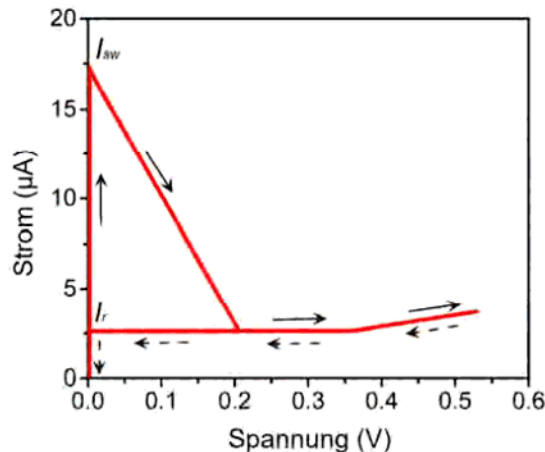


Bild 4 –Typische Strom-Spannungs-Kennlinie eines SSPD

7.3 Messung von R_D

Folgendes Messverfahren wird zur Messung der Dunkelzählrate (DCR) verwendet:

- Das auf Raumtemperatur befindliche Ende der optischen Faser muss mit einer metallischen Abdeckkappe gut gegen Streulicht geschützt sein.
- Die Schwellspannung der Messeinrichtung für die Photonen-zählung muss auf einen Wert kleiner als die Amplitude der Detektorimpulse eingestellt werden. Die Amplitude berechnet sich gemäß der Gleichung $V_{pp} = (I_b - I_r) \cdot 50 \, \Omega \cdot G$, wobei G die Verstärkung des Vorverstärkers bezeichnet. Um die DCR sauber messen zu können, muss andererseits die Schwellspannung deutlich über dem Signalrauschen liegen. Sinnvoll ist z. B. ein Wert von $0,7 V_{pp}$.
- Während der DCR-Messung muss die Temperatur mit einem relativen Fehler (Standardabweichung geteilt durch mittlere Temperatur) von weniger als 0,5 % stabilisiert werden. Bei einer Temperatur von 2 K sind das weniger als ± 10 mK. I_b muss auf einen Wert kleiner I_{sw} eingestellt werden. Dabei sollte mit einem Wert I_b/I_{sw} von 0,6 begonnen werden.
- Der Impuls-zähler zeichnet die Anzahl der Dunkelzählereignisse je Zeitintervall t auf. Bei der Einstellung des Zeitintervalls müssen die Betrachtungen zur Messunsicherheit in [Abschnitt 8.1](#). berücksichtigt werden. R_D berechnet sich als Quotient aus gezählten Impulsen und dem Zeitintervall.
- R_D muss für jeden Wert vom I_b mindestens N mal (mindestens 10-mal) gemessen werden. Die Mittelwerte $\bar{R}_D$ berechnen sich gemäß Gleichung (1):

$$R_D = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N R_{Dj} \quad (1)$$

- Die Abhängigkeit der DCR vom Betriebsstrom muss mit schrittweise ansteigendem I_b gemessen werden. Die Anzahl der Schritte sollte mehr als 50 betragen. Dabei wird jeweils die Messung der Dunkelzählrate gemäß Anweisungen d) und e) ausgeführt. I_b wird solange erhöht, bis I_{sw} erreicht ist.
- Optional kann die Abhängigkeit der Kennlinien von der Temperatur gemessen werden, indem die Betriebstemperatur verändert wird. Für jede einzelne Temperatur werden dabei die Schritte d) – f) ausgeführt.

8 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit Typ A bei bestimmten Werten von T und I_b beinhaltet Schwankungen von T und I_b in Abhängigkeit von der Messanordnung. Die Messunsicherheit Typ B von R_D umfasst die Fehlerfortpflanzung der Messunsicherheiten der Temperatursensoren und der Spannungsquelle für den Betriebsstrom. Für die Genauigkeit wird eine gleichförmige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion angenommen.

8.1 Messunsicherheit Typ A

Die Messunsicherheit Typ A (u_A) von R_D , d. h. die aufgrund statistischer Analyse berechnete Messunsicherheit, wird mit Hilfe der Standardabweichung (σ) der Messungen von R_D abgeschätzt [1,2].

Wie in [Abschnitt 7.3](#) beschrieben, werden für jeden Arbeitspunkt I_b N Messwerte für R_D ermittelt. Die mittlere DCR ($\bar{R}_D$) berechnet sich gemäß [Gleichung \(1\)](#) und u_A gemäß Gleichung (2).

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (R_{Dj} - \bar{R})^2} \quad (2)$$

Während der Messung muss die Temperatur gemäß [Abschnitt 7.1](#) stabilisiert werden.

8.2 Messunsicherheit Typ B

Die Messunsicherheit Typ B (u_B) von R_D , d. h. die ohne statistische Methoden ermittelte Messunsicherheit, umfasst die Messunsicherheit aufgrund der Toleranzen der Temperatursensoren und der für die Bereitstellung des Betriebsstroms verwendeten Spannungsquellen [1, 2]. u_B berechnet sich gemäß Gleichung (3),

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{\partial R_D}{\partial T}\right) \cdot u_T^2 + \left(\frac{\partial R_D}{\partial I_b}\right) \cdot u_{Ib}^2} \quad (3)$$

wobei $\partial R_D / \partial T$ die Empfindlichkeit der DCR gegenüber Änderungen der Temperatur T , $\partial R_D / \partial I_b$ die Empfindlichkeit der DCR gegenüber Änderungen des Betriebsstroms I_b , sowie u_T und u_{Ib} die Werte der Messunsicherheit für den Temperatursensor und die Spannungsquellen darstellen.

Am Beispiel des Detektors D1 in [Anhang A](#) wählen wir den Arbeitspunkt $I_b = 20,7 \mu A$ ($I_b / I_{sw} = 0,97$) mit einem R_D von 10-100 cps. Die Temperaturabhängigkeit $\partial R_{DAC} / \partial T$ wurde durch Messung von R_D bei Temperaturen von 2,2 K und 2,4 K bestimmt und beträgt 93 cps/K. $\partial R_{DAC} / \partial I_b$ wurde gemäß [Bild A.2](#) aus Messungen bei 20,6 μA und 20,8 μA zu 561 cps/ μA bestimmt.

Der Wert u_T wird anhand der Standardabweichung der Genauigkeit der Temperatursensoren abgeschätzt. Dabei wird angenommen, dass die Temperatursensoren eine gleichförmige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von ± 12 mK im typischen Arbeitsbereich von 1,4 – 10 K haben. Dementsprechend beträgt der Wert für u_T $12 \text{ mK} / \sqrt{3} = 6,9 \text{ mK}$.

Der Wert u_{Ib} wird anhand einer typischen Standardabweichung der Genauigkeit der Spannungsquellen und des Widerstands R_s abgeschätzt. Ein typischer Wert der Spannungsaufösung ist ± 1 mV mit einem vernachlässigbaren Rauschen von 10 μV_{rms} . Bei einem Widerstand R_s von 20 k Ω , einer Toleranz von $\pm 0,05$ % und einer konstanten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion beträgt die Standardabweichung des Widerstandes $20 \text{ k}\Omega \times 0,0005 / \sqrt{3} = 5,77 \Omega$. In [Bild A.2](#) beträgt die Varianz von U / R_s bei 0,414 V ($I_b = 20,7 \mu A$) $(0,01 \text{ mV} / 20 \text{ k}\Omega)^2 + (0,414 \text{ V} / 20 \text{ k}\Omega^2 \times 5,77 \Omega)^2 = 0,000036 \mu A^2$. Die daraus folgende Standardabweichung von 0,006 μA wird für die folgende Abschätzung des Messunsicherheitsbudgets verwendet.

8.3 Messunsicherheitsbudget

Eine typische Abschätzung der Messunsicherheit gemäß dieser Norm ist in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Gesamtmessunsicherheit u_{total} bei einem I_b von 20,7 μA ($I_b / I_{sw} = 0,97$) wurde als Summe der Messunsicherheit Typ A u_A und der Messunsicherheit Typ B gemäß des Fehlerfortpflanzungsgesetzes berechnet.

Tabelle 1 – Messunsicherheitsbudget für R_D

Einflussgröße	Parameter-symbol	Symbol und Typ der Standardabweichung	Empfindlichkeitskoeffizient	Standardabweichung des Parameters	Beitrag zu u_{total}
N-fache Messung	R_D	u_A, A	–	1,0 cps	1,0 cps
Temperatur	T	u_T, B	93,3 cps/K	6,9 mK	0,6 cps
Strom	I	u_I, B	561,4 cps/ μA	0,006 μA	3,4 cps
Kombinierte Messunsicherheit		u_{total}	4,4 cps		
Relativer Fehler		6,3 %			
Erweiterte Messunsicherheit (Abdeckungsfaktor $k = 2$)		$R_D = 69,7 \pm 8,8 \text{ cps}$			

8.4 Anforderungen an die Messunsicherheit

Während der Messung der DCR muss die Temperatur mit einer relativen Abweichung (Standardabweichung geteilt durch mittlere Temperatur) von weniger als 0,5% stabilisiert werden.

Der normierte Betriebsstrom I_b/I_{sw} muss 0,97 betragen. Wie in Tabelle 2 ersichtlich ist, wird die Gesamt-messunsicherheit u_{total} von der Messunsicherheit des Stromes dominiert. Um den Betrag der Messunsicherheit in Tabelle 2 nicht zu überschreiten, sollten die Werte u_A , d. h. die Standardabweichung von R_D in einer Serie von Messungen, kleiner als $2 \times u_A$ sein. Die zugehörigen relativen Fehler von u_A/R_D müssen kleiner als 2% sein. Wenn u_A/R_D diesen Wert überschreitet, muss die Messanordnung verbessert werden.

9 Prüfbericht

9.1 Kennzeichnung der Prüflinge (en: DUT, device under test)

Die zu prüfenden Bauelemente müssen folgendermaßen gekennzeichnet werden:

- Name des Herstellers,
- Seriennummer oder gleichwertige Kennzeichnung,
- supraleitendes Material und Substratmaterial,
- geometrische Struktur des SSPD,
- Methode der Faserkopplung.

9.2 Messwert I_{sw}

Wert für I_{sw} bestimmt gemäß dieser Norm.

9.3 Kennlinien R_D als Funktion von I_b

R_D -Kennlinien bestimmt gemäß dieser Norm.

9.4 Relativer Fehler der Messung von R_D für den höchsten Wert von R_D

u_A/R_D bestimmt gemäß dieser Norm.

9.5 Mittlere Temperatur

Wert bzw. Werte der mittleren Temperatur während der Messung von R_D .

9.6 Standardabweichung der Temperatur

Wert bzw. Werte der Standardabweichung der Temperatur während der Messung von R_D .

9.7 Relativer Fehler von T

Relativer Fehler von T (Standardabweichung geteilt durch mittlere Temperatur) während der Messung von R_D ($< 0,5 \%$).

9.8 Wahlweise Angabe sonstiger Daten

Folgende Daten können wahlweise in den Prüfbericht aufgenommen werden:

- Kennlinien von R_D als Funktion von I_b ,
- R_D -Kennlinien und -Kennliniendaten bei verschiedenen Temperaturen,
- I-U-Kennlinien,
- Angaben zum Temperatursensor,
- Führungen und Verbindungen der optischen Faser im Kryostaten,
- Aufbau des Kryostaten und HF-Abschirmung,
- Elektrischer Messaufbau.

Anhang A (informativ)

Ergebnisse des Ringversuches (erste Runde)

A.1 Beschreibung der Prüflinge (en: DUT, device under test)

Die SSPD-Module wurden in Schanghai hergestellt und mit den Bezeichnungen D1 und D2 versehen. D1 und D2 wurden an vier teilnehmende Einrichtungen verteilt, die hier als P1, P2, P3 und P4 bezeichnet werden sollen. Die Fotos der Prüflinge sind in Bild A.1 dargestellt.

- a) D1 ist in ein Kupfergehäuse eingebaut und eine optische Faser SMF-28e senkrecht zur aktiven Fläche des SSPD angekoppelt. Die Faser mit einer Länge von etwa 1,5 m ist über einen LWL-Steckverbinder FC/UPC verbunden. Für die elektrische Verbindung ist eine SMA-Buchse mit zwei Schrauben montiert.
- b) D2 ist ein Detektormodul ohne optische Faser, so dass nur R_{Di} gemessen wird. SMA-Buchse und Montageschrauben sind identisch zu D1.

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Aluminium-Klebeband auf der Oberfläche von D1 und D2 dient der optischen Abdichtung der Gehäuse gegen Streulicht.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der LWL-Steckverbinder FC/UPC des Detektormodules D1 ist zur optischen Verbindung innerhalb des Kryostaten gedacht. Der LWL-Steckverbinder an der Außenseite des Kryostaten sollte optisch gut geschirmt sein, damit kein Streulicht in die Faser eindringen kann. Dazu kann z.B. eine Schutzkappe aus Metall oder die Einhüllung mit Aluminiumfolie dienen.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die optische Faser wurde für die Aufbewahrung des Moduls aufgerollt. Für die Messung von R_{Db} spielt es keine Rolle, ob die Faser aufgerollt ist, oder nicht.



Bild A.1 – Fotos der SSPD-Prüflinge mit den Bezeichnungen D1 (links) und D2 (rechts)

A.2 Messbedingungen

Um die Übereinstimmung der Prüfergebnisse in verschiedenen Laboratorien zu gewährleisten, sollten verschiedene Bedingungen verpflichtend eingehalten werden.

- a) Temperatur: die Temperatur sollte exakt 2,3 K betragen.
- b) Messaufbau: der prinzipielle Messaufbau ist in [Abbildung 3](#) dargestellt.
- c) Zählen der Ereignisse: Für das Zählen der Signalimpulse können diverse kommerzielle Zählgeräte verwendet werden.
 - Der Schwellwert des Zählers sollte für jeden Betriebsstrom auf $0,7 V_{pp}$ eingestellt werden.
 - Die Zählzeit zur Bestimmung der DCR sollte für jeden Betriebsstrom I_b exakt 100 s betragen.
 - Der Bereich für den Betriebsstrom muss so gewählt werden, dass DCR im Bereich von kleiner 0,05 cps bis größer 500 cps gemessen werden.