TECHNISCHE NOTIZ

MIL-STD-1275, 810 und 461 für Akkuladegeräte: eine Design-Checkliste für robuste 24-V-Fahrzeugladegeräte

Die Spezifikation eines robusten Ladegeräts kann rund 1.400 Seiten Militärnormen nach sich ziehen, doch weniger als 150 davon verändern das Design. Diese Checkliste ordnet jeder Anforderung die Designentscheidung zu, die sie erzwingt, und die Prüfung, die sie nachweist, mit der Rechnung hinter den schwierigen Punkten.

Tan Shuai · tanshuai.com · i@tanshuai.com 23. November 2026

Zusammenfassung

Ein robustes 24-V-Akkuladegerät für Fahrzeuge und den Feldeinsatz ist im Kern ein gewöhnliches Schaltnetzteil-Ladegerät, um das vier harte Probleme gewickelt sind. MIL-STD-1275 legt an seinen Eingang einen Surge auf 100 V aus einer Quelle mit 0,5 Ω, den keine Klemmdiode aufnehmen kann; die Eingangsstufe braucht daher einen seriellen Surge-Stopper aus Bauteilen der 150-V-Klasse. MIL-STD-461 macht die Störaussendung, nicht die Störfestigkeit, zur schwierigen Seite: Jeder Leistungseingang braucht ein zweistufiges Filter an der Steckerwand, und das Gehäuse muss elektrisch so dicht sein wie mechanisch. MIL-STD-810 verlangt eine dichte Box, die bei +55 °C in der Sonne Wärme abgibt, 26 Stürze übersteht und in der Höhe atmet, ohne Wasser einzulassen. Eine MTTF von 40.000 Stunden lässt keinen Platz für einen Lüfter. Alles andere, von Feuchte und Salznebel bis ESD, Berührungstemperatur und Zuverlässigkeitsbericht, folgt guter Praxis und wird durch Prüfung oder Dokument nachgewiesen. Die meisten Spezifikationen zitieren noch Ausgaben aus den 1980er- und 1990er-Jahren; nach den aktuellen zu konstruieren und eine Querverweistabelle zu übergeben, kostet nichts und vermeidet Nacharbeit. Eine belastbare Qualifikation braucht drei Muster und 8 bis 16 Wochen und kostet zu veröffentlichten Labortarifen in Festlandchina etwa 20.000 bis 55.000 Dollar.

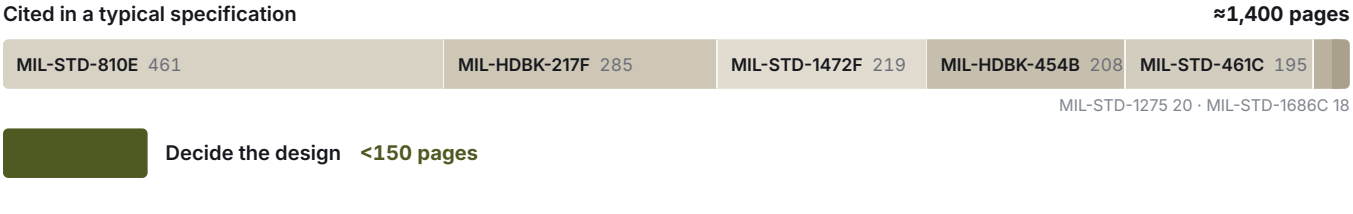
Warum ich das schreibe

Anfragen für robuste Ladegeräte kommen als Seite mit Anforderungen und eine Liste von Normen: MIL-STD-810 für die Umwelt, MIL-STD-461 für die elektromagnetische Verträglichkeit, MIL-STD-1275 für die Fahrzeugversorgung, eine Sicherheitsnorm, ein MTTF-Wert und ein paar Regeln zur Ergonomie. Die Dokumente hinter dieser Liste umfassen etwa 1.400 Seiten. Wörtlich gelesen, machen sie aus einem Ladegerät ein Forschungsprojekt. Überflogen, verbergen sie die drei oder vier Klauseln, die über Blockschaltbild, Gehäuse und Preis entscheiden.

Ich habe kürzlich eine solche Spezifikation Zeile für Zeile durchgearbeitet, die Normen selbst statt ihrer Zusammenfassungen gelesen und jede Klausel danach sortiert, was sie mit dem Design macht. Dieser Beitrag ist das Ergebnis, geschrieben als Checkliste für Ingenieure, die eine solche Spezifikation in Hardware umsetzen müssen, und für Einkäufer, die wissen wollen, was sie verlangen. Alle Zahlen gelten für November 2026, Beträge in US-Dollar.

Ergebnisse auf einen Blick

Abbildung 1. Von etwa 1.400 Seiten Normen entscheiden weniger als 150 über das Design. Der Rest ist gute Praxis und Papier.



Quelle: The author's reading of the standards cited; page counts are those of the published documents.

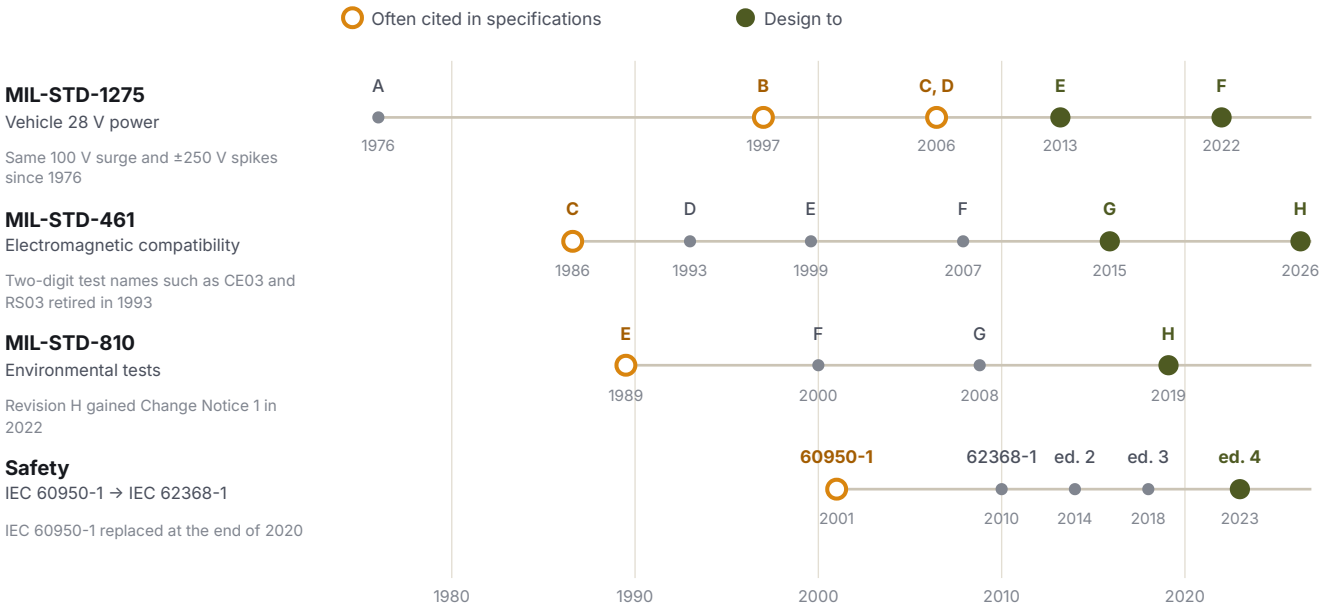
Die Checkliste selbst, von der Anforderung zur Designentscheidung, die sie erzwingt, und zum Nachweis:

Anforderung	Was sie mit dem Design macht	Wie sie nachgewiesen wird
MIL-STD-1275, 24-V-Fahrzeugversorgung	Serieller MOSFET-Surge-Stopper mit Bauteilen der 150-V-Klasse, TVS für Spikes, Verpolschutz ohne Diodenspannungsabfall; Laden von 16 bis 33 V, bei Motorstarts selbsttätig pausieren und fortsetzen	Prüfung mit einem Transientengenerator für die zitierte Ausgabe
MIL-STD-461, EMV	Ein zweistufiges LC-Filter an jedem Leistungseingang, an der Steckerwand montiert; leitfähige Dichtungen an jeder Fuge; Frequenzplanung der Wandler; Vorscans am ersten Prototyp	Prüfung in der Kammer, nach internen Vorscans
MIL-STD-810, Umwelt	Dichter, lüfterloser Elektronikraum, Wärme über Rippen; ePTFE-Druckausgleich für die Höhe; Eckpuffer und versenkte Stecker für Stürze; Bauteile für Lagerung von −40 bis +71 °C	Ein Muster durch die Klimakette, eines durch die Mechanikkette
Ladetemperatur von Li-Ionen	Jeden Akku messen und nur innerhalb seines Fensters laden, typischerweise 0 bis 45 °C; pausieren, Grund anzeigen, selbsttätig fortsetzen; optionales Vorheizen	Prüfung an den Temperaturgrenzen
Sicherheit, IEC 62368-1	Luftstrecken nach der größeren Lesart der Tabellen; metallisches Brandschutzgehäuse über 100 W; Griffe und Knöpfe aus Polymer wegen Berührungstemperatur	CB-Prüfbericht und Inspektion
ESD	4 kV Kontaktentladung auf alles, was eine Hand erreicht, 8 kV als Reserve	Prüfung, etwa ein halber Tag
MTTF von 40.000 Stunden	Ein Budget von 25 Ausfällen pro Million Stunden für das ganze Ladegerät: kein Lüfter, entlastete Bauteile	Vorhersage nach MIL-HDBK-217F, Methode vorab vereinbart
Ergonomie, MIL-STD-1472	Ein Griff für Handschuhe, Rastungen des Knopfs 15 bis 40° auseinander, auf Armlänge lesbare Zeichen	Inspektion und Vorführung mit Handschuhen

Schritt null: nach den aktuellen Ausgaben konstruieren

Spezifikationen für robuste Geräte sind oft älter, als sie aussehen. Häufig stehen MIL-STD-810E (1989) und MIL-STD-461C (1986) neben inzwischen zurückgezogenen Sicherheitsnormen, weil Beschaffungsstellen ihre Vorlagen fortschreiben. Die Prüfbezeichnungen der 461C aus zwei Buchstaben und zwei Ziffern, etwa CE03 und RS03, wurden 1993 abgeschafft. MIL-STD-810 steht heute bei Ausgabe H (Januar 2019, mit Change Notice 1 von 2022); MIL-STD-461 bei G (Dezember 2015), gefolgt von H im April 2026; MIL-STD-1275 bei E (März 2013) und F (2022). IEC 62368-1 hat IEC 60950-1 Ende 2020 abgelöst und liegt in der vierten Ausgabe (2023) vor. EN 50091-1, die noch in Ladegeräte-Spezifikationen auftaucht, ist eine USV-Norm, die 2005 zurückgezogen wurde.

Abbildung 2. Spezifikationen zitieren noch Ausgaben aus den 1980er- und 1990er-Jahren. Nach den aktuellen konstruieren und gegen beide berichten.



Quelle: Revision dates from the standards themselves and from a US test lab's revision list; IEC publication dates.

Die Standard-Schärfegrade der MIL-STD-810 haben sich zwischen 1989 und 2019 kaum verändert, und die beiden Belastungen, die eine Eingangsstufe nach MIL-STD-1275 prägen, sind seit 1976 dieselben; nach den aktuellen Ausgaben zu konstruieren, kostet also nichts. Man gewinnt ein Design, das auch dann noch besteht, wenn der Kunde die Spezifikation aktualisiert, und Labore, die die Methoden noch durchführen. Meine Regel: nach 810H, 461G oder H, 1275E oder F und IEC 62368-1:2023 konstruieren, die Ergebnisse gegen die vom Kunden zitierten Methodennummern berichten und eine einseitige Tabelle übergeben, die Alt auf Neu abbildet. Wo eine alte Methode nur noch in wenigen Laboren existiert, etwa die leitungsgebundene Störaussendung CE03 der 461C, vor der Kammerbuchung das aktuelle Äquivalent vereinbaren.

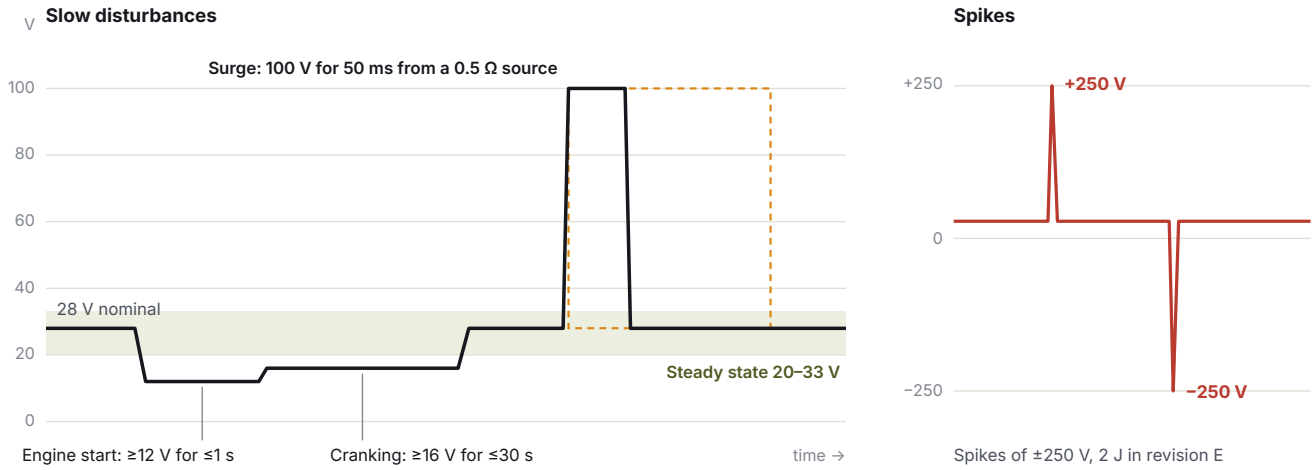
Zwei Fragen gehören in die erste E-Mail, weil die Antworten die Kosten ändern: welche Ausgabe der MIL-STD-1275 gilt, mit welchem Bestehenskriterium, und was „EMP-Schutz“ bedeutet. Kabeleinspeisung gedämpfter Sinusschwingungen (CS116, oder CS10 und CS11 in 461C) dauert etwa einen Kammertag. Eine gestrahlte Impulsprüfung (RS105, oder RS05 in 461C) ist ein anderes Budget, und 461H wendet sie nur auf Geräte mit ausdrücklicher EMP-Anforderung an.

MIL-STD-1275: der 24-V-Eingang bestimmt das Blockschaltbild

Jede Ausgabe der MIL-STD-1275, von A 1976 bis E 2013, enthält dieselben zwei Belastungen, die das Design bestimmen: einen Surge auf +100 V für 50 ms aus einer Quelle mit 0,5 Ω und Spikes von ±250 V. Was sich zwischen den Ausgaben geändert hat, ist Buchhaltung: Betriebsarten, die Spike-Energie (15 mJ in B und D, 2 J in E), die Untergrenze des Einbruchs beim Motorstart (nicht unter 6 V für 1 s in den älteren Ausgaben, 12 V in E, danach nicht

unter 16 V für bis zu 30 s beim Anlassen) und das Fenster im Dauerbetrieb, 20 bis 33 V in E. Ausgabe F verlängert den Surge, nach der Dokumentation der dafür gebauten Prüfgeneratoren zu urteilen, auf etwa 500 ms aus einer deutlich steiferen Quelle und senkt die Spike-Energie auf 250 mJ.

Abbildung 3. Die Hüllkurve nach MIL-STD-1275E an einem 28-V-Fahrzeugbordnetz.

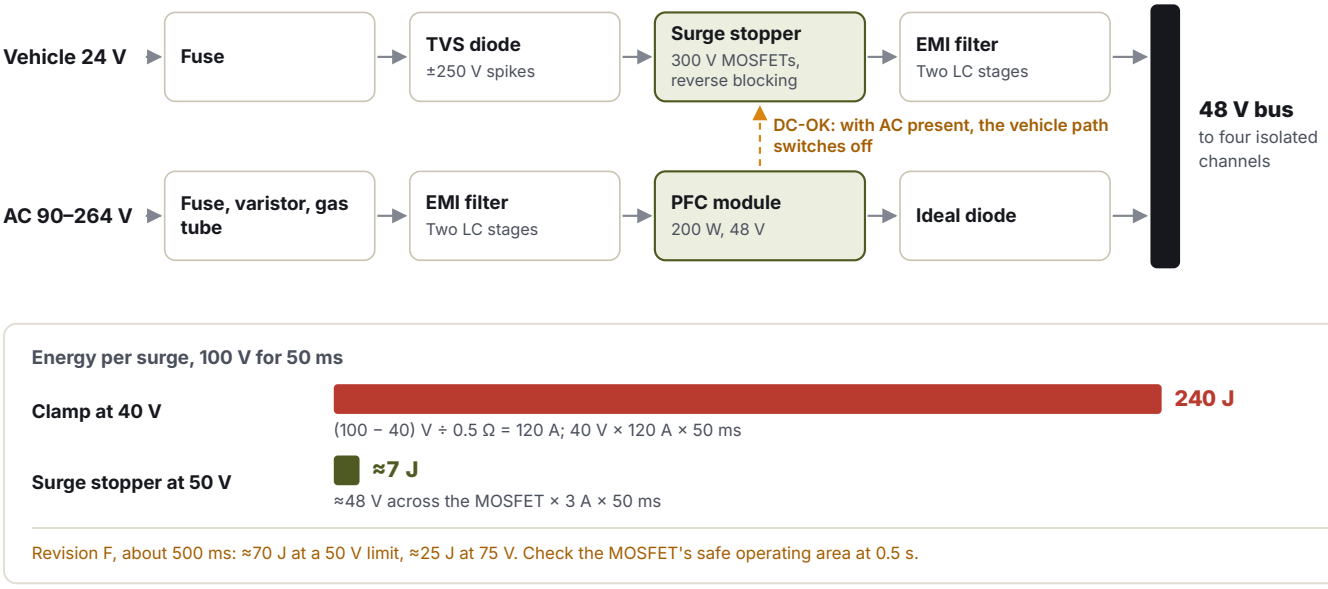


Revision F: the surge lasts about 500 ms, from a much stiffer source

Quelle: MIL-STD-1275E (2013); the revision F note is inferred from the documentation of F-rated test generators.

Der Surge ist es, der die naheliegende Lösung ausschließt. Klemmt man ihn mit einer TVS-Diode oder einem Varistor auf 40 V, treibt die Quelle (100 − 40) / 0,5 = 120 A für 50 ms in die Klemme; das bringt 40 V × 120 A × 0,05 s = 240 J in ein Bauteil. Keine Klemme vernünftiger Größe verträgt das wiederholt. Ein serieller Surge-Stopper löst die Aufgabe anders: Ein MOSFET im Versorgungspfad begrenzt seinen Ausgang auf eine eingestellte Spannung und nimmt den Rest auf, er verheizt also nur die Differenz zwischen Surge und dieser Spannung mal Laststrom. Für eine 150-W-Last bei 50 V sind das etwa 48 V × 3 A, rund 150 W für 50 ms: etwa 7 J, dreißigmal weniger als die Klemme.

Abbildung 4. Eine Klemme müsste 240 J aufnehmen; ein serieller Surge-Stopper verheizt etwa 7 J.



Quelle: The author's design; energies calculated for a 150 W load.

Der Rest der Eingangsstufe folgt daraus:

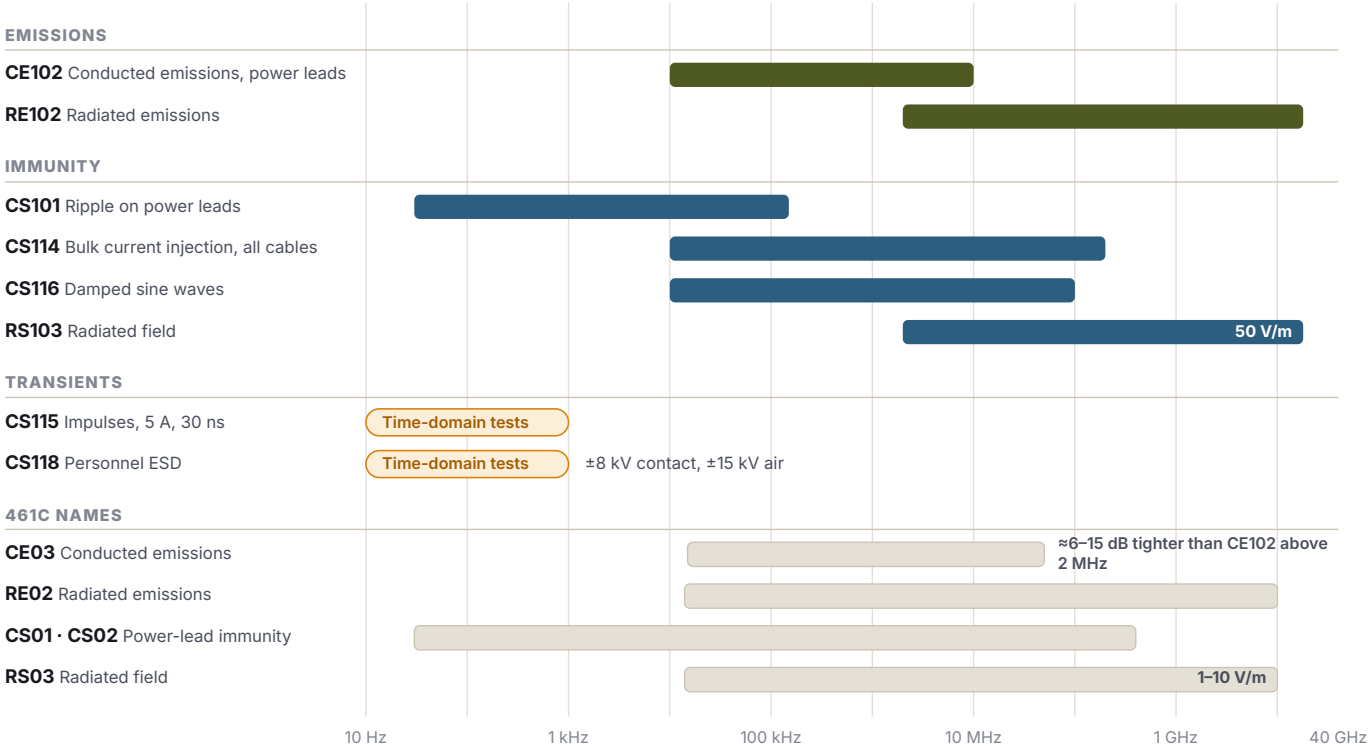
- **Bauteile für 150 V oder mehr** im Surge-Pfad. Ich verwende einen 300-V-MOSFET, das gibt Reserve gegenüber den Spikes.

- **Ausgabe F ändert die Zahlen.** Bei 500 ms brächte dieselbe 50-V-Grenze etwa 70 J in den MOSFET. Hebt man die Grenze auf etwa 75 V, was DC-DC-Module mit 18–75 V Eingang dauerhaft vertragen, sinkt der Strom auf 2 A und die Spannung über dem MOSFET auf etwa 24 V, insgesamt etwa 25 J; in beiden Fällen den sicheren Arbeitsbereich des MOSFETs bei 0,5 s prüfen.
- **Eine TVS-Diode fängt weiterhin die Spikes.** Bei 2 J (oder 250 mJ in F) ist das eine Aufgabe, die sie leisten kann.
- **Verpolung sperren antiserielle MOSFETs** unter einem Ideal-Dioden-Controller, keine Seriendiode, die mehrere Watt verschwenden würde.
- **Motorstarts sind eine Betriebsart, kein Fehler.** Wo möglich bis 16 V weiterladen. Darunter pausieren, Display und Protokoll am Leben halten und fortsetzen, ohne dass jemand das Gerät anfasst. Das in der Antwort auf die Spezifikation so schreiben.
- **Module mit 18–75 V Eingang helfen.** Sie vertragen typischerweise 100 V für 1 s, sodass eine Stufe Surge-Schutz davor genügt.
- **Auch die Welligkeit zählt.** 1275D erlaubt 7 V Spitze Welligkeit bis 200 kHz, die das Eingangsfilter ohne Resonanz bewältigen muss.

MIL-STD-461: die Störaussendung ist die schwierige Seite

Für Bodengeräte der Army wendet MIL-STD-461G acht Prüfungen an: CE102 leitungsgebundene Störaussendung auf Versorgungsleitungen (10 kHz bis 10 MHz), RE102 gestrahlte Störaussendung (2 MHz bis 18 GHz für Bodengeräte), CS101 Welligkeit im Tonfrequenzbereich auf Versorgungsleitungen (30 Hz bis 150 kHz), CS114 Stromeinspeisung auf jedes Kabel (10 kHz bis 200 MHz), CS115 schnelle Impulse, CS116 gedämpfte Sinusschwingungen (10 kHz bis 100 MHz), CS118 ESD durch Personen (±8 kV Kontakt, ±15 kV Luft) und RS103 gestrahlte Störfestigkeit, 50 V/m von 2 MHz bis 18 GHz. Die Ausgabe 461H vom April 2026 behält die Grenzwerte für Bodengeräte der Army bei und verschärft die Verfahren.

Abbildung 5. Die Prüfungen der MIL-STD-461G für Bodengeräte der Army und die 461C-Prüfungen, die ältere Spezifikationen noch nennen.



Quelle: MIL-STD-461G (2015), Table V and test sections; MIL-STD-461C (1986), Part 4.

Ein Akkuladegerät ist für die Störaussendung ein schwieriger Fall. Es enthält mehrere Schaltwandler: eine Leistungsfaktorkorrektur, einen getrennten Wandler pro Kanal und eine Buck-Boost-Ladestufe pro Kanal. Vier Kanäle mit leicht unterschiedlichen Frequenzen erzeugen Schwebungsprodukte, und Akkuleitungen und Fahrzeugkabel sind gute Antennen. Die Störfestigkeit ist meist die leichtere Seite, auch wenn 50 V/m in RS103 Respekt verdienen. Eine ältere Spezifikation verschiebt das Gewicht weiter: Der CE03-Grenzwert der 461C liegt oberhalb von 2 MHz an einem 28-V-Eingang etwa 6 dB und an einem 230-V-Eingang etwa 15 dB unter CE102 und reicht bis 50 statt 10 MHz, während seine Anforderung an die gestrahlte Störfestigkeit nur 1 bis 10 V/m beträgt.

Was funktioniert:

- **Ein zweistufiges LC-Filter an jedem Leistungseingang,** an der Steckerwand aufgebaut, damit gefilterte und ungefilterte Verdrahtung nie einen Raum teilen. Nach meiner Schätzung braucht ein Ladegerät 40 bis 60 dB Dämpfung bei seinen Schaltfrequenzen und 50 bis 70 dB von 2 bis 50 MHz, um CE03 mit Reserve einzuhalten.
- **Der dichte Elektronikraum ist zugleich die Schirmung.** Leitfähige Dichtungen und eine durchgehende Verbindung an jeder Fuge machen das Gehäuse ohne Mehrkosten zum Faradayschen Käfig.
- **Die Frequenzen der Wandler planen.** Kanalwandler synchronisieren oder ihr Spektrum spreizen und die Schaltflanken verlangsamen, wo der Wirkungsgrad es erlaubt.
- **Akkuleitungen drosseln.** Eine Gleichtaktdrossel an jedem Ausgang verhindert, dass die Akkukabel abstrahlen.
- **Früh messen.** Ein Vorscan der leitungsgebundenen Störaussendung am ersten Prototyp kostet einen Tag mit LISN und Spektrumanalysator; ein Problem erst in der offiziellen Kammer zu finden, kostet Wochen.

MIL-STD-810: eine dichte Box, die Wärme abgibt, atmet und Stürze übersteht

Die zehn Umweltbedingungen, die eine Ladegeräte-Spezifikation typischerweise nennt, entsprechen eins zu eins den 810E-Methoden 500.3, 501.3, 502.3, 505.3, 506.3, 507.3, 509.3, 510.3, 514.4 und 516.4, die in 810H zu 500.6, 501.7, 502.7, 505.7, 506.6, 507.6, 509.7, 510.7, 514.8 und 516.8 wurden. Ihre Standard-Schärfegrade haben sich in dreißig Jahren kaum verändert. Keine ist für sich genommen schwer; zusammen beschreiben sie eine dichte Box, und eine dichte Box hat drei Probleme: Wärme, Druck und Stoß.

Methode (810E / 810H)	Standard-Schärfegrad	Designantwort
Unterdruck (500.3 / 500.6)	4.570 m, 57 kPa	Eine dichte Box sieht etwa 44 kPa über ihre Wände; auf einem Deckel von 340 × 240 mm sind das etwa 3,6 kN. Ein ePTFE-Element gleicht den Druck aus und hält Wasser fern.
Hohe Temperatur (501.3 / 501.7)	Heiß-trockener Zyklus: 32 bis 49 °C Umgebung, 33 bis 71 °C induziert in Fahrzeugen und Gehäusen	Lüfterlose natürliche Konvektion über eine verrippte Wand; jedes warme Bauteil leitet in sie; die Firmware reduziert die Ladeleistung über 50 °C.
Sonneneinstrahlung (505.3 / 505.7)	1.120 W/m², 24-Stunden-Zyklen	Eine hellere Farbe senkt den Solareintrag; vereinbaren, ob eine Analyse die Prüfung ersetzen darf.
Tiefe Temperatur (502.3 / 502.7)	Basiskälte bis etwa −32 °C; kältere Kategorien nach Vereinbarung	Bauteile und Display für −40 °C; Akkus werden unter 0 °C nicht geladen (siehe unten).
Regen (506.3 / 506.6)	10 cm/h, Wind 18 m/s, 30 Minuten pro Seite	Elektronikraum IP67, umlaufende Deckeldichtung, Ablassventile in den Akkuschächten.
Feuchte (507.3 / 507.6)	10-Tage-Zyklen	Dichter Raum und Schutzlackierung.
Salznebel (509.3 / 509.7)	5 % NaCl bei 35 °C, 48 h nass und 48 h trocken	Konversionsschicht unter Pulver- oder CARC-Lack, Edelstahl-Verbindungselemente, keine ungleichen Metalle im Kontakt.
Sand und Staub (510.3 / 510.7)	Staub 10,6 g/m³ bei 8,9 m/s; Sand 1,1 g/m³ bei 18 bis 29 m/s	Dichter Raum; abriebfeste Beschichtung und Displayscheibe.
Vibration (514.4 / 514.8)	Profil für Rad- oder Kettenfahrzeug: nachfragen, welches	Schwere Bauteile fixieren; ein Schaumstoffpolster im Deckel hält die Akkus; während der Prüfung echte Akkus laden, um den Betrieb während der Fahrt nachzuweisen.

Methode (810E / 810H)	Standard-Schärfegrad	Designantwort
Schock und Transportsturz (516.4 / 516.8)	26 Stürze aus 122 cm	Etwa 10 mm kontrollierte Verformung in den Eckpuffern; versenkte Stecker; nichts landet auf einem Stecker.

Die Kombination, die Leute erwischt, ist Wärme mit Dichtheit. Bei +55 °C in praller Sonne kann eine dichte Box keine Außenluft nutzen, also muss der gesamte Verlust über Wärmeleitung und natürliche Konvektion hinaus. Bei 120 W Ausgangsleistung verliert ein Ladegerät mit 79 bis 83 % Wirkungsgrad 25 bis 32 W, was eine verrippte Aluminiumwand abgeben kann, doch ein AC-DC-Modul, das oberhalb von 50 °C um 2 bis 3 % pro Grad abregelt, muss dafür dimensioniert sein. Muss die volle Leistung bei +55 °C verfügbar sein, wächst entweder das Modul um eine Baugröße, oder die Firmware reduziert den Ladestrom und sagt das.

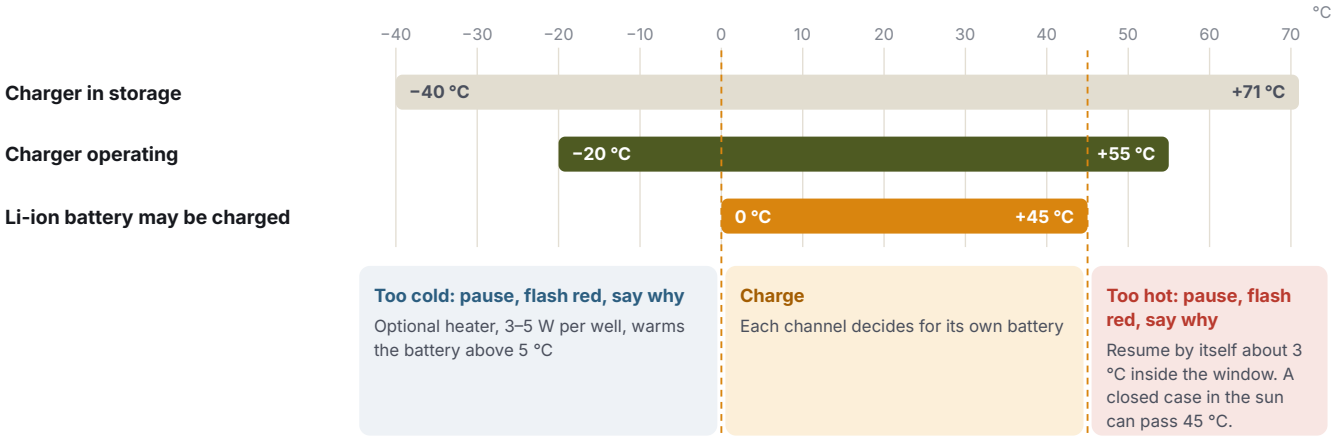
Kein Lüfter, wegen der MTTF

Eine geforderte MTTF von 40.000 Stunden ist ein Budget von 25 Ausfällen pro Million Stunden für das gesamte Ladegerät. Der übliche Nachweis ist eine Bauteil-Belastungsvorhersage nach MIL-HDBK-217F Notice 2 in der Umgebung „ground mobile“, in der Kondensatoren einen zwanzigmal so hohen Umgebungsfaktor tragen wie in einer milden Umgebung. Ein Lüfterlager hat bei 60 °C eine charakteristische Lebensdauer von etwa 35.000 Stunden und bei 70 °C von 22.000; in dieser Vorhersage trägt ein einziger Lüfter etwa 43 Ausfälle pro Million Stunden bei, mehr als das ganze Budget. Damit ist es entschieden: kein Lüfter innen, entlastete Bauteile, und Vorhersagemethode, Umgebung und Temperatur werden mit dem Kunden vereinbart, bevor jemand rechnet. Den Wert durch Prüfung nachzuweisen, ist unpraktikabel: Übliche Nachweispläne brauchen Zehntausende ausfallfreier Gerätestunden.

Der Akku hat sein eigenes Temperaturfenster

Ein Li-Ionen-Akku darf nur innerhalb des Temperaturfensters geladen werden, das sein Hersteller zulässt, typischerweise 0 bis 45 °C, während vom Ladegerät meist Betrieb von −10 oder −20 °C bis +55 °C verlangt wird. Eine kalte Zelle zu laden, scheidet Lithium ab und zerstört sie; eine heiße zu laden, verkürzt ihre Lebensdauer. Das Ladegerät muss daher die Temperatur jedes Akkus kennen, über den Thermistor des Akkus oder seine Smart-Battery-Daten, und für jeden Kanal getrennt entscheiden.

Abbildung 6. Das Ladegerät muss in einem weiteren Bereich arbeiten, als der Akku geladen werden darf.



Quelle: Typical Li-ion charging window from battery datasheets; charger ranges and behavior from the author's design.

Das Verhalten, das ich spezifiziere: Außerhalb des Fensters hört dieser Kanal auf zu laden, während Display, Datenauslesen und Selbsttest weiterlaufen; seine LED blinkt rot, und das Display nennt den Grund in der Sprache des Bedieners; kehrt der Akku mit etwa 3 °C Hysterese ins Fenster zurück, wird ohne Zutun weitergeladen. Braucht ein Kunde Laden bei −10 °C, bringt eine Heizmatte mit 3 bis 5 W in jedem Schacht den Akku zuerst über 5 °C. Und weil die Schächte eines geschlossenen Gehäuses in der Sonne 45 °C überschreiten können, gilt eine zugesagte Ladezeit nur bei gemäßigter Temperatur; das gehört in die schriftlichen Annahmen.

Sicherheit, Berührungstemperatur, ESD und Ergonomie

Sicherheit. IEC 62368-1 hat IEC und UL 60950-1 Ende 2020 abgelöst, und ihre Ausgabe 2023 hat die Klauseln zum Akkuladen überarbeitet. Veröffentlichte Lesarten ihrer Luftstreckentabelle weichen voneinander ab (1,5 und 3,0 mm in einem Prüfbericht, 1,8 und 3,6 mm in der Lesart eines Halbleiterherstellers), daher konstruiere ich nach den größeren Werten: mindestens 1,8 mm Basis- und 3,6 mm verstärkte Isolierung bis 2.000 m, mal 1,48 auf 5.000 m. Ein Ladegerät mit mehr als 100 W Ausgangsleistung ist ein PS3-Stromkreis und braucht ein Brandschutzgehäuse; ein Metallgehäuse ist eines. Ein CB-Prüfbericht, der den Anhang zum Akkuladen abdeckt, ist der effiziente Weg, all das nachzuweisen.

Berührungstemperatur. MIL-HDBK-454 erlaubt 49 °C an Bedienelementen, 60 °C an anderen von Hand erreichbaren Teilen und 70 °C anderswo, bei 25 °C Umgebung. Bei +55 °C Umgebung überschreitet blankes Metall bereits 49 °C, daher sind Griffe, Knöpfe und Eckpuffer aus Polymer oder Elastomer, und heiße Flächen werden gekennzeichnet. Dieselbe Richtlinie verlangt einen Ableitstrom von höchstens 3,5 mA, einen Schutzleiterwiderstand von höchstens 0,1 Ω und Kondensatoren, die sich binnen 2 s unter 30 V entladen.

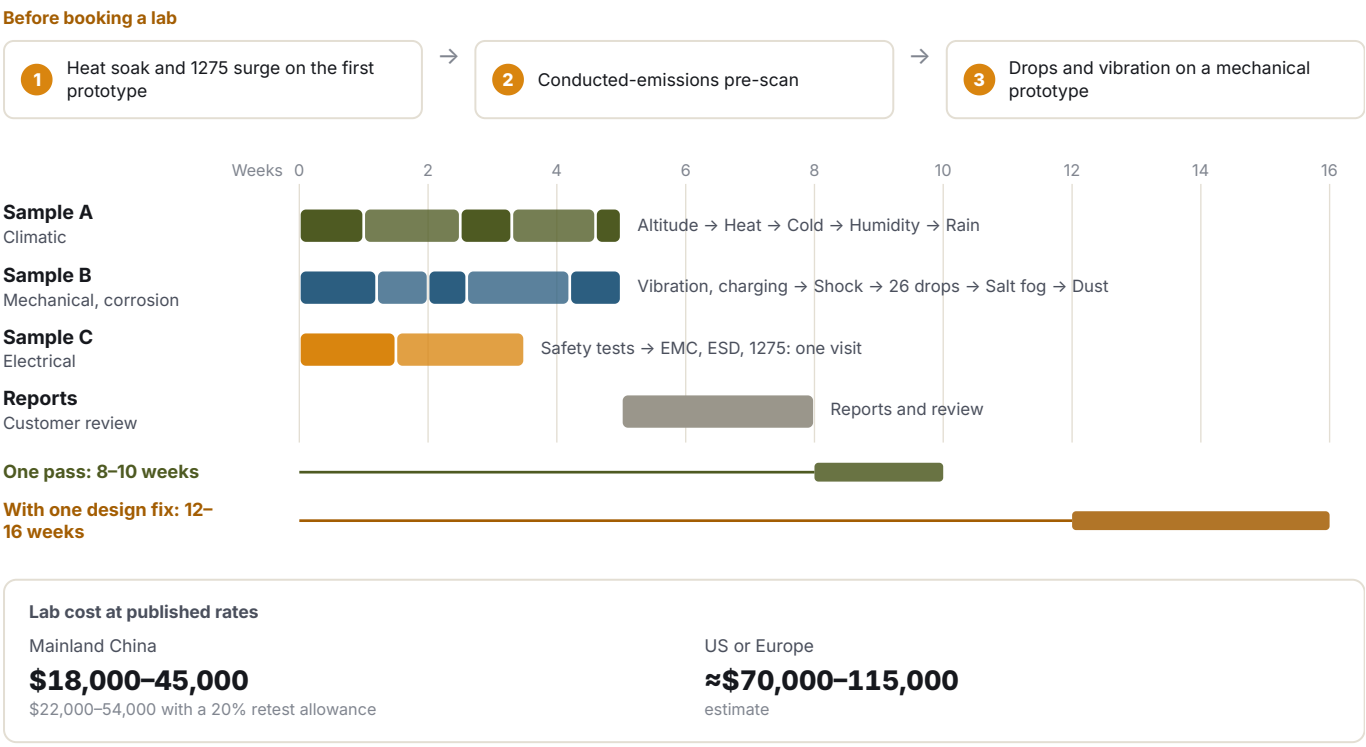
ESD. Die übliche Anforderung ist 4 kV Kontaktentladung nach dem Human-Body-Modell auf jedes Bedienelement, das ein Bediener berühren kann, und in der Mitte jeder Fläche, mit 2 kV auf unversorgten Schnittstellenpins. Zusätzlich mit den 8 kV der CS118 aus 461G zu prüfen, bringt Reserve fast ohne Kosten. Die Fertigung braucht ein eigenes ESD-Schutzprogramm nach ANSI/ESD S20.20 oder IEC 61340-5-1.

Ergonomie. MIL-STD-1472 bemisst einen Einhandgriff für die behandschuhte Hand mit 125 mm lichter Breite, 50 mm Fingerfreiraum und 100 mm Tiefe (111, 48 und 75 mm mit bloßer Hand; 135, 75 und 150 mm mit Fäustlingen), das Drehmoment eines Knopfs mit 115 bis 680 mN·m bei Rastungen im Abstand von 15 bis 40° und Zeichen mit 2,5 bis 5 mm Höhe bei 710 mm Leseabstand. All das wird durch Inspektion und eine Vorführung mit Handschuhen nachgewiesen, ohne Laborkosten.

Qualifikation: drei Muster, zwei parallele Ketten, ein EMV-Termin

Drei Muster sind die komfortable Zahl für die Qualifikation, zwei das Minimum. Muster A durchläuft die Klimakette: Unterdruck, Lagerung und Betrieb bei hoher Temperatur, tiefe Temperatur, Sonneneinstrahlung, falls geprüft, Feuchte und Regen. Muster B durchläuft die Mechanik- und Korrosionskette: Vibration beim Laden, Transport, Funktionsschock und Handhabung auf dem Prüftisch, die 26 Stürze, Salznebel und Staub. Muster C durchläuft die elektrische Kette: Sicherheits-Typprüfungen, MIL-STD-461, ESD und MIL-STD-1275. Parallel gefahren, brauchen die ersten beiden Ketten vier bis fünf Wochen; EMV und Versorgungstransienten anderthalb bis zwei; Berichte und Prüfung durch den Kunden fügen zwei bis drei hinzu. Das ergibt 8 bis 10 Wochen, wenn alles besteht, und 12 bis 16 Wochen mit einer Designkorrektur.

Abbildung 7. Ein Qualifikationsplan für drei Muster: 8–10 Wochen, wenn alles besteht, 12–16 mit einer Designkorrektur.



Quelle: The author's plan; lab rates from a Jiangsu provincial institute (2025), Taiwan's standards bureau and two US labs.

Die Reihenfolge zählt mehr als das Labor. Vor jeder Buchung die Wärmeprüfung und den 1275-Surge am ersten Prototyp fahren, dann einen EMV-Vorscan, dann Stürze und Vibration an einem mechanischen Prototyp. Danach gibt es mehrere Einsparungen fast umsonst: Betrieb bei Hitze und Kälte in einer Kammerbuchung; Akkus laden während der Vibration, was zugleich den Betrieb während der Fahrt nachweist; Erwärmungsdaten für den Sicherheitsbericht, gesammelt während der Wärmeprüfung bei +55 °C; ESD und 1275 im selben Termin wie EMV; ein Prüfplan für 810, 461 und 1275, vom Kunden einmal freigegeben, der dann nur EMV, Sturz und Vibration bezeugt. Unterdruck, Sonneneinstrahlung und ein gestrahlter EMP-Impuls lassen sich oft durch Analyse statt Prüfung nachweisen.

Kein Labor veröffentlicht Preise für militärische Prüfungen, also müssen die Kosten aus öffentlichen Gebührenordnungen aufgebaut werden. Ein Provinz-Prüfinstitut in Jiangsu führt Klimakammern zu 4,50 bis 37 Dollar pro Stunde und eine EMV-Kammer zu 119 bis 149 Dollar pro Stunde; Taiwans Normenbehörde führt Vibration zu etwa 121 Dollar, eine Sturzprüfung zu etwa 73 Dollar, ESD zu etwa 364 Dollar und einen vollständigen EMV-Satz zu etwa 2.610 Dollar; in den USA wirbt ein Labor mit MIL-STD-461-Prüfungen ab 3.999 Dollar, ein anderes berechnet Ingenieurzeit mit 157 bis 377 Dollar pro Stunde. Aus diesen Sätzen aufgebaut, kostet ein vollständiger Satz (461, 1275, ESD, zehn 810-Methoden und ein Sicherheitsbericht) in Festlandchina etwa 18.000 bis 45.000 Dollar, mit 20 % Reserve für eine Wiederholungsprüfung 22.000 bis 54.000 Dollar, und ich schätze 70.000 bis 115.000 Dollar in den USA oder Europa. Taiwans öffentliche Labore sind zu ihren veröffentlichten Sätzen nicht teurer als die des Festlands. Ob ein Käufer die Berichte eines bestimmten Labors akzeptiert, ist eine kaufmännische Frage, die man am besten vor der ersten Buchung klärt.

Ein Ladegerät nach dieser Checkliste gebraucht?

Diese Checkliste stammt aus der Entwicklung eines solchen Geräts: eines dichten, lüfterlosen Vier-Schacht-Ladegeräts mit AC- und 24-V-Fahrzeugeingang, gebaut als Plattform, die von zwei bis acht Schächten skaliert. Wie es aufgebaut ist, wie Lücken in einer Spezifikation gefüllt werden und wie es in 16 Wochen von der Spezifikation zu Engineering-Mustern kommt, steht in Robuste Mehrfach-Akkuladegeräte nach Maß 2026, und was solche Ladegeräte kosten, in Preise für militärische Mehrfach-Akkuladegeräte 2026.

Wenn Sie einen Akku haben, der ein robustes Ladegerät braucht, schicken Sie Modell oder Datenblatt, die Zahl der Schächte, die Eingangsleistung, die geforderten Normen und die Menge an i@tanshuai.com. Ich antworte mit den Fragen, die das Design entscheiden.

Quellen

1. MIL-STD-1275E, Characteristics of 28 Volt DC Input Power to Utilization Equipment in Military Vehicles (2013). https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1100-1299/MIL-STD-1275E_45886/
2. MIL-STD-1275B (1997). https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1100-1299/MIL_STD_1275B_777/
3. Transient Specialists, PG-1275F transient generator user manual (revision F waveforms). https://transientspecialists.com/cdn/shop/files/Users_manual_PG-1275F_rev2.pdf
4. Texas Instruments, TIDUDG1, MIL-STD-1275 protection reference design guide. https://ti.com/lit/pdf/tidudg1
5. MIL-STD-461G, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics (2015). https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461G_53571/
6. MIL-STD-461C (1986). https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461C_19034/
7. In Compliance Magazine, MIL-STD-461H: a review. https://incompliancemag.com/mil-std-461h-a-review/
8. MIL-STD-810E, Environmental Test Methods and Engineering Guidelines (1989), and 810H (2019) method equivalents. https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0800-0899/MIL-STD-810E_13775/
9. MIL-STD-1472F, Human Engineering. https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1400-1499/MIL-STD-1472F_208/
10. MIL-STD-1686C, Electrostatic Discharge Control Program. https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1600-1699/MIL-STD-1686C_5522/
11. MIL-HDBK-217F Notice 2, Reliability Prediction of Electronic Equipment. https://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-0200-0299/MIL-HDBK-217F_NOTICE-2_14590/
12. MIL-HDBK-454, General Guidelines for Electronic Equipment (listing). https://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-0300-0499/
13. Texas Instruments, SLUP419, insulation requirements of IEC 62368-1. https://www.ti.com/lit/pdf/slup419
14. Genorma, EN 50091-1-1:1996 status. https://genorma.com/en/standards/en-50091-1-1-1996
15. Battery University, BU-410: Charging at high and low temperatures. https://batteryuniversity.com/article/bu-410-charging-at-high-and-low-temperatures
16. Jiangsu Administration for Market Regulation, product testing fee schedule (June 2025). https://scjgj.jiangsu.gov.cn/attach/0/7298087b18cf41529a3e43ac75aab677.pdf
17. Bureau of Standards, Metrology and Inspection (Taiwan), test fee table. https://www.bsmi.gov.tw/wSite/public/Attachment/f1784081743483.pdf
18. Sunfire Testing, MIL-STD-461 testing. https://www.sunfiretesting.com/military_device_mil-std-461/
19. Hi-Test Laboratories, 2023 rates. https://hitestlabs.com/s/2023-Rates_Update.pdf

Über den Autor

Tan Shuai ist Technologe und Gründer mit über zwanzig Jahren Arbeit in den Bereichen Chips, Hardware und Systemsoftware sowie 20 erteilten Patenten. Seine Arbeit führte ihn durch Silicon Valley, New York, Chicago, Taiwan, die Greater Bay Area (Shenzhen und Hongkong), Vietnam und Malaysia, mit langem Fokus auf fortschrittliche Fertigung und Lieferketten. Heute arbeitet er als KI-Forscher und -Entwickler und baut mit Fertigungspartnern in Shenzhen robuste Elektronik nach Maß.

Projekte für robuste Ladegeräte und fachlicher Austausch: i@tanshuai.com.