

Mein ESD-Tester im Eigenbau - Entwicklung und bisherige Ergebnisse

Radig Hard & Software · Stand 24.10.2026



Abb. 1: Meine fertig beschriftete Gerätefront mit Touchdisplay, Not-Aus sowie READY- und HV-Leuchte.

Mein Ziel ist ein privat aufgebauter ESD-Tester für eigene Pre-Compliance-Untersuchungen nach IEC 61000-4-2. Ich möchte das Gerät unabhängig vom Rechner bedienen und die Ladespannung bis 16 kV einstellen können. Dafür habe ich Hochspannungserzeugung, Messwerterfassung, Regelung und Bedienung in einem Tischgerät zusammengeführt.

Ich habe den Aufbau von der freien Verdrahtung über eigene Kaskadenplatinen bis zum eingebauten Neunstufengenerator weiterentwickelt. Dabei habe ich den Messpfad mehrfach geprüft, den Regelcontroller ausgetauscht und den Abgleich am zusammengebauten Gerät wiederholt. Die Anschlüsse des vergossenen Ladewiderstands habe ich nach elektrischen und mechanischen Problemen umgebaut.

Mein Stand: Die einstellbare Hochspannung bis 16 kV habe ich realisiert und stationär mit einer externen Referenz kontrolliert. Die ESD-Pistole konstruiere ich noch. Eine normgerechte Entladestromform habe ich bisher nicht nachgewiesen.

Neun Stufen im aktuellen Aufbau

Ich verwende eine Cockcroft-Walton-Kaskade mit neun vollständigen Verdopplerstufen. Sie besteht aus drei Dreistufenmodulen mit insgesamt 18 Kondensatoren und 18 Diodenzweigen. In jedem Zweig habe ich drei Dioden in Reihe eingesetzt: insgesamt also 54 einzelne Dioden.



Abb. 2: Meine realisierte Kaskadenplatine im Modulgehäuse. Die Aufnahme dokumentiert den Aufbau der Leiterplattenbaugruppe.

Als Kondensatoren habe ich WIMA-Bauteile mit 100 nF / 3 kV und als Dioden SUF4007 eingesetzt. Die Bestückung entspricht der Typbezeichnung im Schaltplan. Eine gleichmäßige Spannungsaufteilung über die drei Dioden eines Zweigs habe ich nicht messtechnisch nachgewiesen.

Die H-Brücke betreibe ich aus der eingebauten 24-V-Versorgung. Sie steuert den Transformator mit 500 Hz Grundfrequenz und 10 kHz PWM-Träger an. Beim Myrra 45031 liegen die beiden 6-V-Wicklungen parallel an der Brücke; die 230-V-Seite speist die Kaskade. Über die Ansteueramplitude verändere ich die erzeugte Hochspannung.

Im früheren Zwölfstufenaufbau habe ich 1N4007 verwendet. Für den heutigen Neunstufenaufbau mit SUF4007 habe ich die Vorsteuerkennlinie neu aufgenommen. Die älteren Zwölfstufenmessungen übertrage ich deshalb nicht auf den heutigen Aufbau. Auch den 10-VA-Typwert des Transformators verwende ich nicht als gemessene Ausgangsleistung meines Generators.

Den Ladeausgang führe ich über den vergossenen 50-M Ω -Ladewiderstand. Die Rückmessung für die Regelung greife ich davor direkt am Kaskadenausgang ab. Diesen Ladepfad unterscheide ich vom vorgesehenen 330- Ω -Entladewiderstand der ESD-Pistole.

Abgleich der eingebauten Messkette

Ich erfasse die Hochspannung mit einem Teiler aus 10 G Ω und 1 M Ω . Parallel zum unteren Widerstand liegen heute 10 nF. Den Teilerknoten führe ich über eine geschirmte Leitung zum AD8616 auf der Regelplatine; der Schirm dient als GND-Rückleitung. Am OPV-Eingang habe ich 10 k Ω in Reihe und zwei SK34 gegen 3,3 V und GND eingesetzt.

Aus den Nennwerten ergibt sich rechnerisch ein Teilerfaktor von 10001:1. Bei 16 kV entspricht das ideal 1,59984 V am unteren Zweig. Für das 10-nF-Filter ergeben sich rechnerisch rund 10 ms Zeitkonstante und 15,92 Hz Grenzfrequenz. Diese Werte beschreiben das Filtermodell, keine gemessene Ladezeit und keine ESD-Impulserfassung.

Vorsteuerung und PI-Regelung

Mein ESP32-S3-Regelcontroller misst die Rückmeldung und steuert die H-Brücke. Eine gemessene Kennlinie liefert die Vorsteuerung; der proportionale und der integrale Anteil korrigieren die verbleibende Soll-Ist-Abweichung. Für Ladeübergänge und Entladeereignisse nutze ich zustandsabhängige Reglerfunktionen. Begrenzung und Aktuatornachführung verhindern ein unbegrenztes Aufintegrieren.

Die Vorsteuerung stammt aus der Neunstufenmessreihe vom 17.10.2026 bei 24 V und 500 Hz. Am 20.10.2026 habe ich nach dem Controllerwechsel die ADC-Zuordnung im eingebauten Gerät neu abgeglichen. Vorsteuerung, PI-Parameter und vorhandene Schutzpfade habe ich dabei beibehalten. Die aktuelle Reglerfassung heißt esd-adc-assembled-29.

Die reale Kennlinie ist entscheidend

Ich verwende eine stückweise lineare Zuordnung der ADC-Millivoltwerte zur Hochspannung. Damit berücksichtige ich die reale Gesamtmesskette einschließlich ihres Offsets. Der obere gemessene Kalibrieranker liegt bei 15,478333 kV; darüber extrapoliere ich. Den Kontrollpunkt bei 16 kV habe ich anschließend getrennt von den Kalibrierpunkten aufgenommen.

Offener Punkt am Nullpunkt: Beim Abgleich erhielt ich 299,477 mV, nach Neustart 292,4 mV. Die Verschiebung um rund -7,1 mV bleibt relevant. Bei 100 V Soll erreichte ich innerhalb von 200 s kein angenommenes stationäres Fenster; extern lagen ungefähr 127 bis 155 V an. Diesen unteren Bereich betrachte ich nicht als nachgewiesen abgeglichen.

Die Ursache dieser Drift habe ich bisher nicht eindeutig auf ADC, OPV, Schutzdioden, Teiler oder Temperatur aufteilen können. Aus dem guten Vergleich einzelner höherer Spannungswerte leite ich deshalb keine allgemeine Genauigkeitsklasse ab.

Zwei Controller, getrennte Versorgung

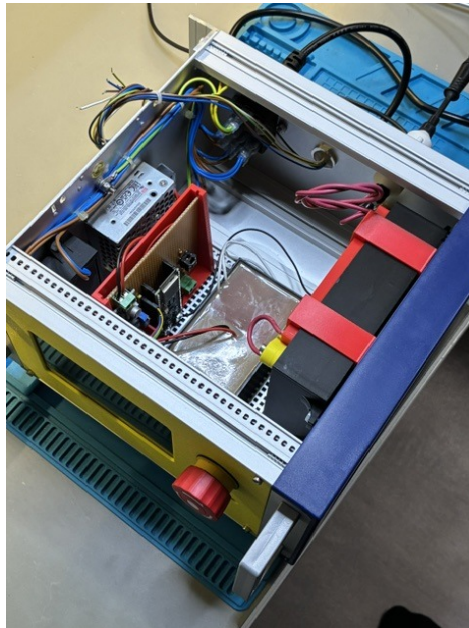


Abb. 3: Mein geöffneter Geräteaufbau mit Netzteilen, Regelplatine, Kaskade und vergossenen Baugruppen. Die Aufnahme zeigt die frühere Kabelausführung vor dem Anschlussumbau; den neuen Stand zeigt Abb. 5.

Für die Bedienung verwende ich ein 5-Zoll-CrowPanel mit Touchdisplay und eigenem ESP32-S3. Es überträgt Sollwerte und Befehle per ESP-NOW an den separaten Regelcontroller. Zwischen den beiden Steuerdomänen habe ich keine leitende Datenverbindung vorgesehen. Beide erhalten getrennte Netzteile.

In der Draufsicht mit der Front unten sitzen die Netzteile links, die Regelplatine mittig und die Kaskade rechts. Den gelb vergossenen Spannungsteiler und den rot vergossenen 50-M Ω -Ladewiderstand habe ich direkt am schwarzen Kaskadenmodul befestigt. Die Front trägt Display, Not-Aus und Meldeleuchten; an der Rückwand liegen die Anschlüsse.

Am Display stelle ich den Sollwert im 100-V-Raster ein. Die große Anzeige zeigt normalerweise HV IST, beim Einstellen vorübergehend HV SOLL. Für eine ruhigere Ablesung glätte ich nur die Istwertanzeige mit 0,5 s Zeitkonstante; die Regelung und die HV-Warnleuchte verwenden diese Anzeigeglättung nicht. Mein dokumentierter Displaystand ist esd-hmi-wifi-3 vom 22.10.2026. Updates beider Controller sind über den Display-Hotspot möglich.

Hardwareseitiger Not-Aus

Mit dem Not-Aus unterbreche ich die Versorgung der gesamten HV-Domäne einschließlich ihres Regelcontrollers hardwareseitig, unabhängig von Software und Funkverbindung. Das Bedienteil bleibt über sein eigenes Netzteil eingeschaltet. Daraus kann ich weder eine weitere Live-Rückmeldung des abgeschalteten Reglers noch das Verschwinden der gespeicherten Hochspannung ableiten. Den Restspannungsverlauf muss ich gesondert messen.

Stationäre Kontrolle vom 20.10.2026

Ich habe den zusammengebauten Neunstufengenerator nach dem Abgleich mit dem Escort 3145A im DC-V-Bereich und meinem physischen 1000:1-Hochspannungstastkopf kontrolliert. Das Gerät lief aus seinem eingebauten Netzteil; dessen tatsächliche Versorgungsspannung habe ich in dieser Reihe nicht separat gemessen. Die folgenden Werte sind die nachfolgenden Kontrollpunkte, nicht die Kalibrierstützstellen.

Sollwert / V	Escort / V	Intern / V	Escort – Soll / V
1.000	1.036,2	998,4	+36,2
4.000	3.933,8	3.999,0	–66,2
8.000	7.957,2	8.002,5	–42,8
12.000	11.985,1	12.001,9	–14,9
16.000	16.014,0	16.012,8	+14,0

Tabelle 1: Unveränderte Spannungswerte aus der unabhängigen stationären Kontrolle im Originalbericht, Anhang J1. Die letzte Spalte bezeichnet die Differenz zur Vorgabe.

Bei 16 kV Soll habe ich 16.014,0 V extern und 16.012,8 V intern erfasst; beide Rückmeldungen unterscheiden sich dort um rund 1,2 V. Bei 1 kV bleibt die externe Abweichung mit +36,2 V deutlich größer. Für die Messunsicherheit von Tastkopf und Multimeter habe ich noch keine Bilanz erstellt.

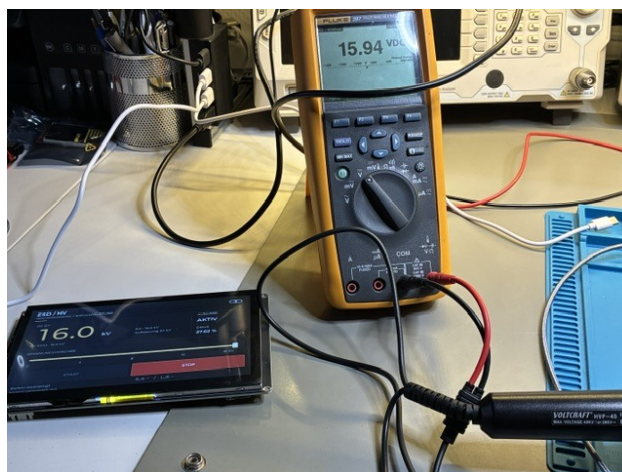


Abb. 4: Historische Messaufnahme aus der Entwicklung: 16,0 kV am damaligen Display und 15,94 V DC am Fluke mit 1000:1-Tastkopf, entsprechend etwa 15,94 kV. Dies ist kein Messpunkt der Escort-Reihe vom 20.10.2026.

Die aktuelle Escort-Erfassung erfolgte mit festem Bereich und mindestens 350 ms zwischen den Abfragen. Damit kontrolliere ich stationäre Spannungen. Schnelle Überschwinger und insbesondere die ESD-Entladestromform kann ich aus diesen Ablesungen nicht bestimmen.

Messpfad und HV-Anschlüsse

Ich habe die gesamte eingebaute Messkette neu abgeglichen. In der Reglerentwicklung habe ich die wiederholt ausgelöste einsekündige Rampe durch eine direkte Nachführung über vollständige Polaritätspaar-Zyklen der Brücke ersetzt. Außerdem habe ich die ADC-Mittelung von 200 ms auf 10 ms verkürzt und später den analogen Filterkondensator von 100 nF auf 10 nF geändert. Historische Regelzeiten übertrage ich deshalb nicht auf die heutige Messbeschaltung.

Verguss und Isolationsversuche

Ich habe Vergussproben hergestellt, das Harz unter Vakuum entgast und die Proben auf ihr Isolationsverhalten untersucht. Meinen Vakuumaufbau und die Probenprüfung beschreibe ich ausführlicher auf Seite 7.

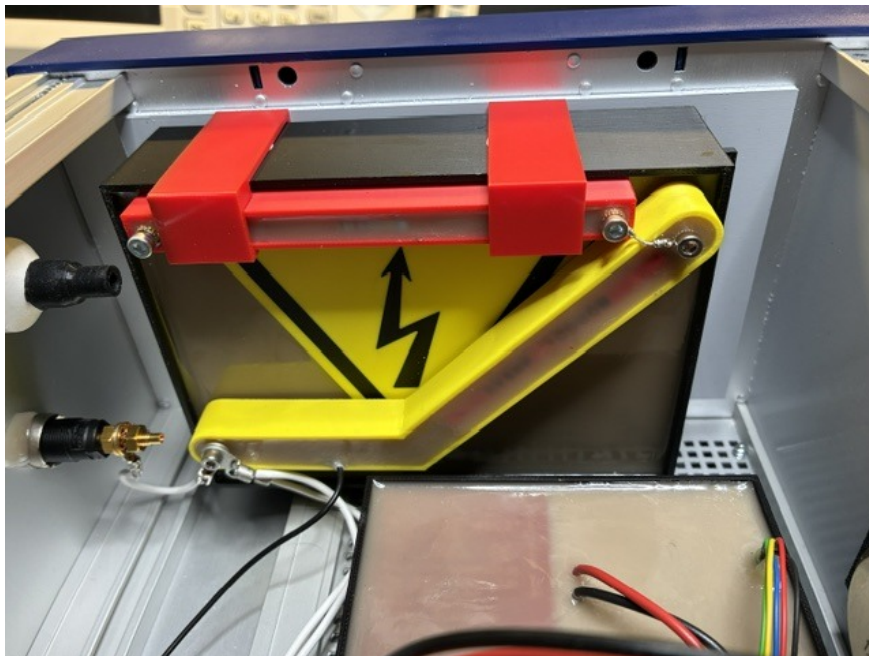


Abb. 5: Mein aktueller Anschlussstand mit rotem 50-M Ω -Ladewiderstand und gelbem Spannungsteiler. Ich habe die fest eingegossenen HV-Kabel durch Schraubterminals ersetzt.

Trotz der Vorversuche beobachtete ich bei einer späteren Ausführung mit fest eingegossenen HV-Kabeln Überschläge zur Masse. Außerdem waren die Kabelinnenleiter mechanisch empfindlich und konnten leicht abreißen. Deshalb habe ich die fest eingegossenen Anschlussleitungen durch Schraubterminals ersetzt.

Eine bestimmte Rissstelle oder ein bestimmtes Vergussmaterial habe ich als Ursache der Überschläge nicht eindeutig nachgewiesen. Die neue Anschlussausführung und das fertige Gerät muss ich gesondert prüfen. Mit dem Foto dokumentiere ich den Umbau, keine bestandene Isolationsprüfung.

Mein Vakuumaufbau für den Verguss

Für das Vergießen meiner Hochspannungsbaugruppen verwende ich einen umgebauten Kochtopf als Vakuumkammer mit angeschlossener Drehschieberpumpe.

Den Unterdruck kann ich über ein Manometer kontrollieren. Über die Ventile kann ich die Vakuumkammer von der Pumpe trennen beziehungsweise wieder belüften.



Abb. 6: Mein selbst aufgebautes Vakuumsystem mit Drehschieberpumpe, umgebautem Kochtopf, Manometer und Ventilen zum Entgasen des Vergusscharzes.

Mit diesem Aufbau entgase ich das Vergussharz, um eingeschlossene Luftblasen möglichst zu reduzieren. Gerade bei Hochspannungsbaugruppen möchte ich Lufteinschlüsse vermeiden, da sie die elektrische Isolationsfestigkeit beeinträchtigen können.

Zusätzlich habe ich Vergussproben angefertigt und deren Isolationsverhalten mit meinem GW INSTEK GPT-96 untersucht. Konkrete Prüfspannungen und Messergebnisse gebe ich mangels dokumentierter Werte nicht an.

Mit der Vakuumbehandlung verringere ich Lufteinschlüsse; einen vollständig blasenfreien oder grundsätzlich durchschlagsicheren Verguss leite ich daraus nicht ab. Die Probenprüfungen unterscheide ich weiterhin von einer Prüfung des fertigen Geräts.

Die Eignung des umgebauten Behälters für Unterdruck habe ich noch nicht nachgewiesen. Ich dokumentiere hier meinen Versuchsaufbau; eine Nachbauempfehlung gebe ich damit nicht.

Von der Ladespannung zum ESD-Impuls

Ich konstruiere derzeit die ESD-Pistole. Ihren vorgesehenen 150-pF-Kondensator lade ich auf die eingestellte Hochspannung; die Entladung soll über den HV-Schalter und den 330-Ω-Widerstand erfolgen. Die Baugruppe habe ich noch nicht fertig geprüft.

Meine ESD-Target-Platine ist eingetroffen. Daran möchte ich als nächsten Schritt die Entladestromform erfassen und bewerten. Meine bisherigen Gleichspannungsmessungen und Funkenversuche ersetzen diese Strommessung nicht.

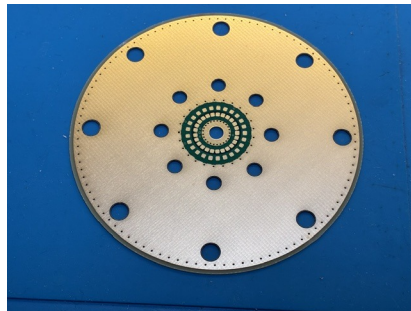


Abb. 7: Meine eingetroffene, noch unbestückte ESD-Target-Platine. Die Messung der Entladestromform steht noch aus.

Welche Nachweise ich noch erbringen muss

Restspannung und Abschaltung: Ich muss den Spannungsabbau nach STOP und Not-Aus messen und die Abschaltkette dokumentieren. Am 20.10.2026 zeigte die interne Rückmeldung bei Sollwert und Ansteuerung null sowie deaktiviertem Antrieb noch 14,346 kV. Damit habe ich keine Spannungsfreiheit nachgewiesen.

Isolation und Aufbau: Ich muss die neue Anschlussausführung, die vergossenen Baugruppen und die Trennung der Domänen prüfen sowie Gesamtstromlaufplan und Anschlusszuordnung vervollständigen. Die Schutzleiterführung des Metallchassis bewerte ich gesondert.

Nullpunkt und Messung: Ich muss Neustart- und Temperaturdrift, den unteren Spannungsbereich und die Unsicherheit der externen Referenz untersuchen. Die fünf stationären Kontrollpunkte gelten nicht pauschal für sämtliche Lasten und Betriebszustände.

Dynamik und Entladestrom: Ich muss Sollwertsprünge, Überschwingen und Wiederaufladung am aktuellen Aufbau erfassen und die Stromform am Target prüfen. Temperatur- und Dauerlaufdaten fehlen ebenfalls.

Mein Fazit

Ich habe eine eigenständig bedienbare, geregelte Hochspannungsquelle bis 16 kV aufgebaut und extern kontrolliert. Die wesentlichen Verbesserungen waren der Abgleich der gesamten Messkette und der Umbau der HV-Anschlüsse. Als Nächstes folgen Pistole und Strommessung am Target. Normkonformität, Zertifizierung oder vollständig nachgewiesene elektrische Sicherheit beanspruche ich nicht.

Grundlage: mein ausführlicher Projektbericht, Stand 24.10.2026. In dieser Kurzfassung habe ich den aktuellen Entwicklungsstand mit meinen Originalfotos zusammengefasst.