

ESR Anforderungen für stabile Spannungsregler - einfach ermittelt.

Viele Entwicklungsingenieure haben immer wieder Probleme mit der Stabilität von Linearreglern im Feld. Da von Herstellerseite normalerweise nur geringe Informationen über die Regelstabilität veröffentlicht werden, ist dies nicht weiter verwunderlich. Bei den meisten Linearreglern bestimmt der ESR (Serienwiderstand, engl. Equivalent Series Resistance) des Ausgangskondensators die Nullstelle des Regelkreises, welche den Regler stabilisiert. Die Datenblätter der Regler bieten meist nur wenige Informationen darüber wie die Ausgangskapazität und der ESR des Ausgangskondensators als externe Parameter die Regelstabilität beeinflussen.

In diesem Artikel wird eine einfache Methode vorgestellt, wie basierend auf einer einzigen, einfachen Messung der zur Erreichung einer bestimmten Phasenreserve benötigte ESR für beliebige Ausgangskondensatoren ermittelt werden kann.

Allgemeines über Linearregler

Für die meisten Linearregler, unabhängig von der Reglertopologie, liefert die Ausgangsimpedanz des Reglers alle notwendigen Informationen um den benötigten ESR zur Erzielung einer bestimmten Phasenreserve zu bestimmen.

Die meisten am Markt verfügbaren Linearregler sind auch ohne angeschlossenen Ausgangskondensator im Leerlauf grundsätzlich stabil. Daher ist es möglich, die Ausgangsimpedanz des Reglers als Funktion über die Frequenz ohne angeschlossenen Ausgangskondensator zu messen. Das Ergebnis der Impedanzmessung kann in drei markante Bereiche eingeteilt werden:

- 1) Bei Gleichspannung und bei niedrigen Frequenzen ist die Ausgangsimpedanz ein reeller Widerstand, welcher durch die Lastregelung des Reglers und den Referenzspannungsteiler definiert wird.
- 2) Im zweiten Bereich ist die Ausgangsimpedanz induktiv, wobei die Induktivität vom Laststrom und der Reglerbandbreite abhängt.
- 3) Im dritten Bereich kann die Ausgangsimpedanz, abhängig von der Art des Reglers, wieder rein reell werden.

Da die beschriebene Methode zur Ermittlung des benötigten ESR auf der Ausgangsimpedanz beruht, ist der erste Schritt die breitbandige Messung der Ausgangsimpedanz. Die Messungen für diesen Beitrag wurden mit dem vektoriiellen Netzwerkanalysator Bode 100 und dem Picotest J2111A Strominjektor durchgeführt. Die Auswahl dieser beiden Geräte erfolgte aufgrund ihrer hohen Messbandbreite sowie der direkten Messmöglichkeit von Phasenreserve und effektiver Güte in Abhängigkeit von der Ausgangsimpedanz. Die Messungen sollten beim geringsten zu erwartenden Laststrom gemacht werden, da hier normalerweise die geringste Phasenreserve auftritt. Es ist sogar so, dass der minimale Laststrom oft die Grenzen der erreichbaren Reglerleistung definiert.

Messung der Ausgangsimpedanz

Abbildung 1 zeigt den für die Messung der Ausgangsimpedanz verwendeten Messaufbau. Als Messobjekt dient ein LM317 Regler, welcher sich auf dem VRTS Demoboard der Firma Picotest befindet.

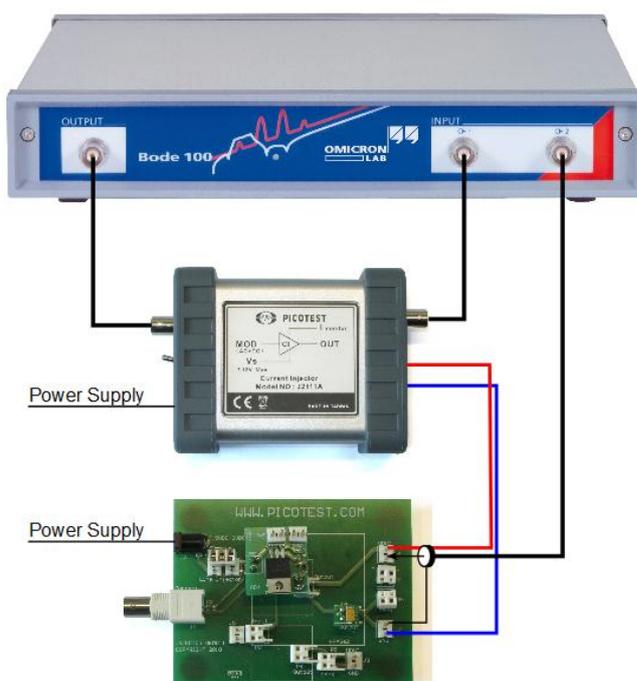


Abbildung 1: Messaufbau zur Messung der Ausgangsimpedanz

Die Ausgangsimpedanz des LM317 Spannungsreglers wurde bei Lastströmen von 25 und 50 mA ermittelt. Das in Abbildung 2 dargestellte Ergebnis der Messung zeigt deutlich die drei genannten Bereiche und bestätigt die Abhängigkeit der Impedanz vom Laststrom. Zusätzlich zum Laststrom ist die Ausgangsimpedanz auch von der Ausgangsspannung und der internen

Kompensation des Reglers abhängig. Aus diesem Grund kommt man für verschiedene Regler zu unterschiedlichen Ergebnissen.

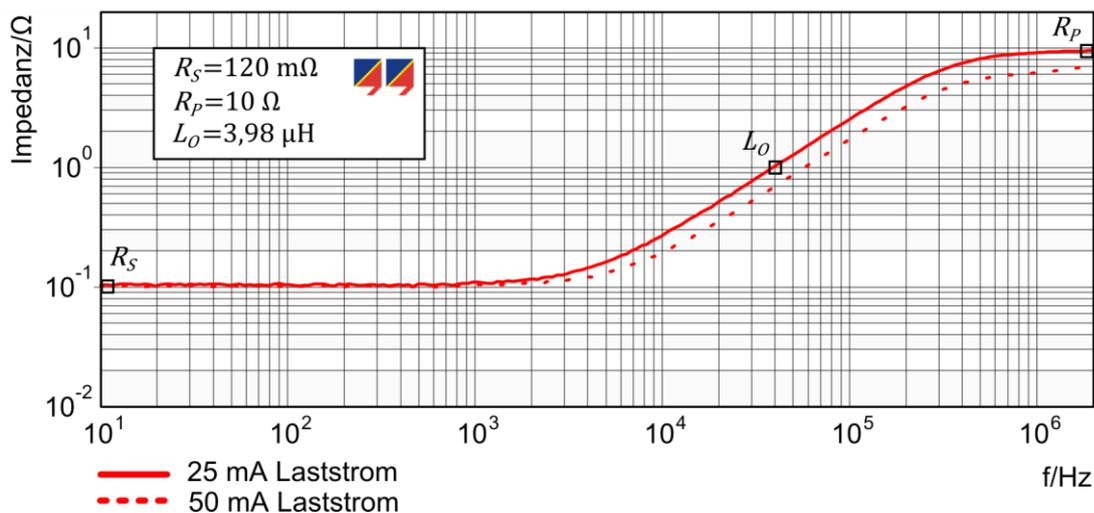


Abbildung 2: LM317 Ausgangsimpedanz in Ohm für 25mA und 50mA Laststrom

Abbildung 3 zeigt das Ersatzschaltbild des Reglers mit angeschlossenem Ausgangskondensator, bestehend aus der Kapazität C_{OUT} und dem äquivalenten Serienwiderstand ESR. Die Ausgangsinduktivität L_O ist laststromabhängig. R_S und R_P können ebenfalls laststromabhängig sein.

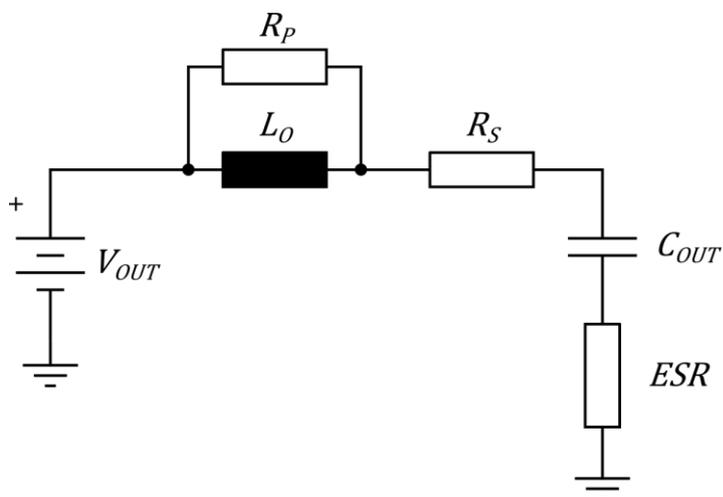


Abbildung 3: Reglerersatzschaltbild mit angeschlossenem Ausgangskondensator

Die Induktivität L_O kann im induktiven (ansteigenden) Bereich der Kurve an einem beliebigen Punkt mittels folgender Formel ermittelt werden.

$$L_O = \frac{1}{2\pi \cdot 40 \text{ kHz} \cdot 1 \Omega} = 3,98 \mu\text{H}$$

Für die Berechnung wurde der Widerstandswert bei 40 kHz der im aktuellen Fall 1 Ohm entspricht gewählt.

Die Werte für R_S und R_P können direkt aus der Messkurve entnommen werden. Aus dem niederfrequenten Bereich erhalten wir für R_S 120 mOhm und aus dem hochfrequenten Bereich für R_P 10 Ohm. Ein Großteil des Widerstandes R_S stammt vom Kontaktwiderstand der Verbindungen zum Messobjekt.

Der benötigte ESR kann direkt aus den Ersatzschaltbildkomponenten sowie der gewählten Ausgangskapazität C_{OUT} und der angestrebten Phasenreserve PM mittels der untenstehenden Formel berechnet werden (Auf die Herleitung der folgenden Berechnung des ESR wird hier nicht im Detail eingegangen):

$$ESR(PM; C_{OUT}; L_O; R_S; R_P) = 2 \sin\left(\frac{PM}{2}\right) \sqrt{\frac{L_O}{C_{OUT}} - \frac{R_P L_O}{R_P^2 C_{OUT} + L_O}} - R_S$$

Weiters kann die Regelbandbreite aus der äquivalenten Induktivität L_O und der Ausgangskapazität C_{OUT} berechnet werden.

Ein praktisches Beispiel zur ESR Berechnung

Betrieibt man den LM317 mit einer Ausgangsspannung von 3,3 V und einem Laststrom von 25 mA, können die Werte für L_O , R_P und R_S wie gezeigt aus der Kurve in Abbildung 2 ermittelt werden. Weiter wird ein 22 μF Kondensator als Ausgangskapazität C_{OUT} gewählt.

Bei einer angestrebten Phasenreserve von 38 Grad ergibt sich ein erforderlicher ESR von 139 mOhm.

$$ESR(38^\circ; 22 \mu\text{F}; 3,98 \mu\text{H}; 0,12 \Omega; 10 \Omega) = 139 \text{ m}\Omega$$

Die zu erwartende Regelbandbreite des Reglers kann aus der äquivalenten Induktivität L_O und der Ausgangskapazität C_{OUT} über die bekannte Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von Induktivität und Kapazität ermittelt werden.

$$BW = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_O C_{OUT}}} = 16,18 \text{ kHz}$$

Für die praktische Überprüfung der Ergebnisse wurde ein Tantal-Kondensator von 22 μ F ausgewählt und mit dem Bode100 von OMICRON Lab und dem zugehörigen Impedanzmessadapter B-SMC vermessen. Diese Messung wird in einer detaillierten Applikationsschrift beschrieben, welche unter <http://www.omicron-lab.com/application-notes/capacitor-esr-measurement.html> frei erhältlich ist.

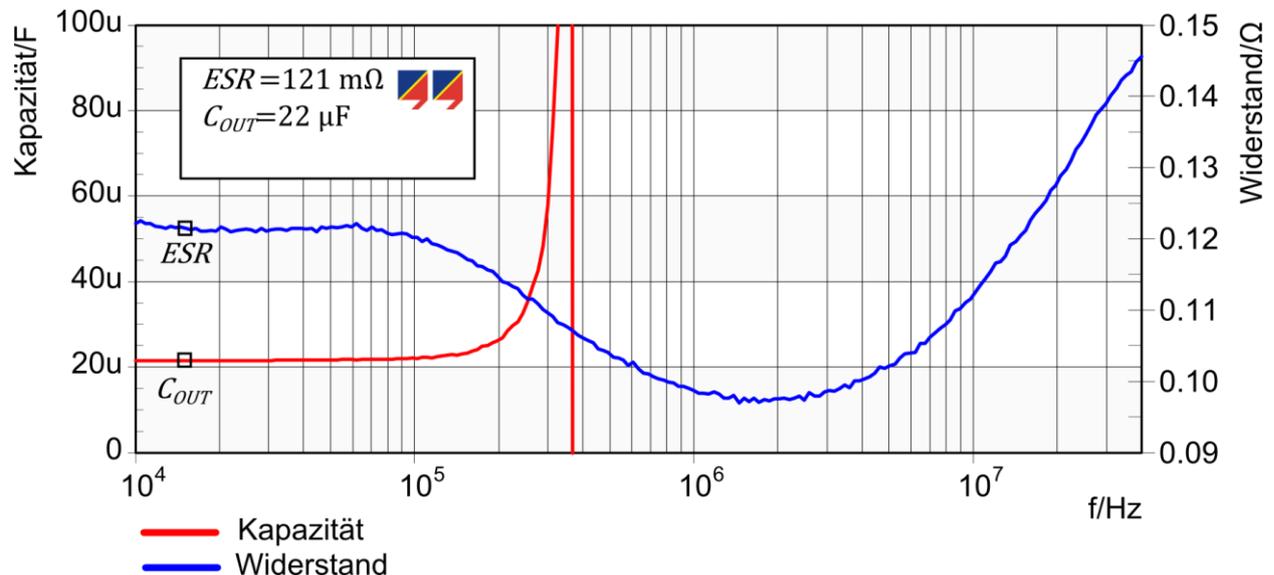


Abbildung 4: Impedanzkurve des verwendeten 22 μ F Tantal-Kondensators

Aus der in Abbildung 4 gezeigten Impedanzkurve kann eine Kapazität von 22 μ F und ein ESR von 121 m Ω bei der erwarteten Bandbreite von 16 kHz abgelesen werden. Zu diesem ESR müssen noch die Kontaktwiderstände der Steckverbindung des verwendeten VRTS Demoboards hinzuaddiert werden, so dass insgesamt von einem ESR von circa 140 m Ω ausgegangen werden kann.

Messung der Phasenreserve

Schließlich wird das OMICRON Lab Bode 100 und der Picotest J2111A Strominjektor eingesetzt um durch eine nicht invasive Messung der Phasenreserve das Ergebnis zu verifizieren. Bei der in Abbildung 5 dargestellten Messung wird über die festgestellte Ausgangsimpedanzanhebung im Bereich der Durchtrittsfrequenz die Phasenreserve und Regelbandbreite der Schaltung ermittelt. Die theoretischen Grundlagen hierzu sind in einer frei verfügbaren Applikationsschrift unter <http://www.omicron-lab.com/application-notes/non-invasive-stability.html> im Detail beschrieben. Das Ergebnis zeigt eine Regelbandbreite von 16,4 kHz und eine Phasenreserve von circa 38°.

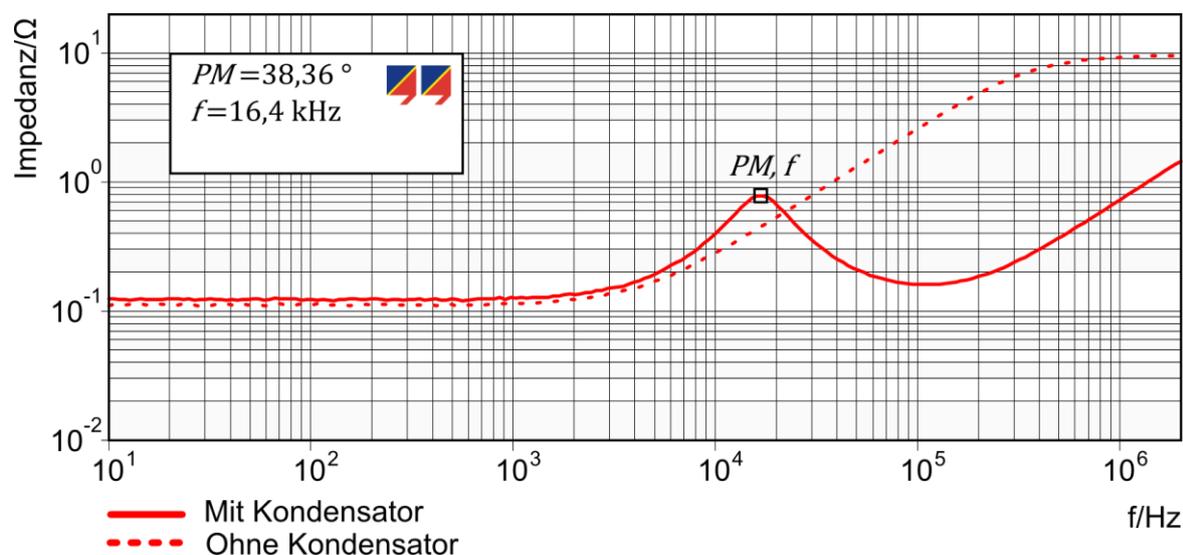


Abbildung 5: Nichtinvasive Bestimmung der Phasenreserve und Regelbandbreite

Schlussbemerkung

Durch eine einzige, einfache Messung ist es möglich, den für eine gewünschte Phasenreserve benötigten ESR des Ausgangskondensators zu bestimmen. Durch die Erfüllung der ESR Anforderungen beim niedrigsten auftretenden Laststrom wird ein stabiler Betrieb des Reglers auch bei höheren Lastströmen sichergestellt. Die nichtinvasive Messung der Phasenreserve mit dem vektorialen Netzwerkanalysator Bode 100 und dem Picotest J2111A Strominjektor ermöglicht die Beurteilung der Reglerstabilität auch für Regler bei denen kein Zugriff auf die Regelschleife besteht. Eine Verbesserung der Regelstabilität kann einen signifikanten positiven Einfluss auf die Systemleistung des Reglers haben. Dies äußert sich meist in einer niedrigeren Ausgangsimpedanz, einem optimierten Verhalten bei dynamischen Laständerungen sowie einer verbesserten PSRR¹ und Rückflussdämpfung des Reglers.

¹ Power Supply Ripple Rejection ... gibt an wie gut über die Betriebsspannung ankommende Störungen vom Regler unterdrückt werden.

Referenzen:

1. No-Load Specification Impacts Power-Supply Performance. **Steven M. Sandler, Charles Hymowitz**. 1, s.l. : Power Electronics Technology, 2008, Vol. 34 No 3.
2. **Picotest**. Invasive and Non-Invasive Stability Measurements. <https://www.picotest.com/blog/?p=312> 2010.
3. **Picotest**. Signal Injector Documentation. *Version 1.0c*. 2010.
4. **OMICRON Lab**. Capacitor ESR Measurement Application Note. <http://www.omicron-lab.com/application-notes/capacitor-esr-measurement.html>
5. **Picotest**. Voltage Regulator Test Standard. *Version 1.0d*. 2010.
6. **Erickson, Robert W. and Maksimovic, Dragan**. *Fundamentals of Power Electronics*. s.l. : Springer, 2004.