

Schaltnetzteile parallel geschaltet

Technische Details zur passiven Stromaufteilung

Ziel der Parallelschaltung von Schaltnetzteilen (SNTs) ist die Leistungserhöhung mittel der Erhöhung des Ausgangsstromes. Wie dies nach der Methode der passiven Stromaufteilung am besten erfolgt, zeigt folgender Beitrag.

Von Martin Rosenbaum

Eine Parallelschaltung lässt sich mit zwei Methoden realisieren, die heute Stand der Technik sind: erstens mit der aktiven Stromaufteilung (Loadshare-Regelung) und

zweitens mit der passiven Stromaufteilung.

Die aktive Stromaufteilung misst den Ausgangsstrom jedes Netzteiles und regelt die Ausgangsspannung jedes

einzelnen SNT so, dass sich eine gleichmäßige Stromaufteilung ergibt. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass sich eine recht genaue Stromaufteilung und eine gleichmäßige Belastung der parallelgeschalteten SNTs ergeben. Als Nachteile sind der erhöhte schaltungstechnische Aufwand und die höheren Kosten anzuführen.

Im Gegensatz dazu wird bei der passiven Stromaufteilung über eine „weiche Ausgangskennlinie“ (Bild 1) des SNT eine

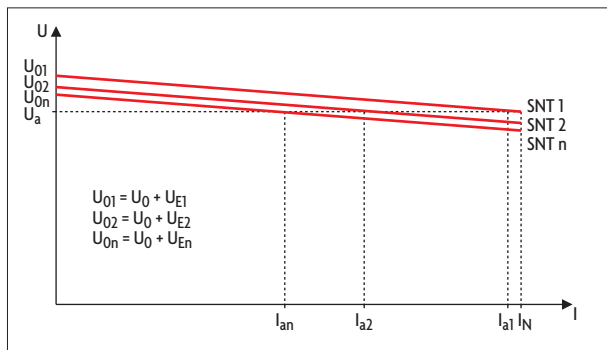


Bild 1. Kennlinien („weiche Kennlinien“) von n parallelgeschalteten Schaltnetzteilen.

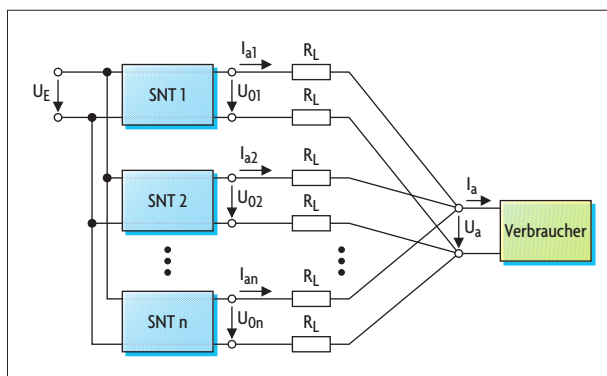


Bild 2. Symmetrische Verkabelung ist eine Voraussetzung für die Parallelschaltung von Schaltnetzteilen.

möglichst gleichmäßige Stromaufteilung realisiert. Vorteilhaft wirken sich hierbei der geringe schaltungstechnische Aufwand und die nahezu unbegrenzte Anzahl der parallelgeschaltbaren SNTs aus. Ein Nachteil ist in der etwas ungenaueren Stromaufteilung zu sehen.

Passive Stromaufteilung: die Grundlagen

Im folgenden einige wichtige Details zur passiven Stromaufteilung, wobei als Voraussetzung angenommen wird:

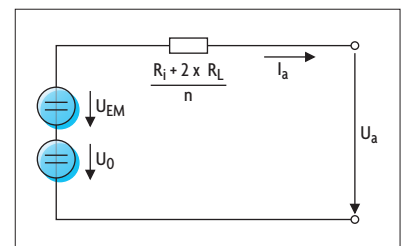


Bild 3. Ersatzschaltung der n parallelgeschalteten Schaltnetzteile

- Es erfolgt eine Parallelschaltung von n gleichen Schaltnetzteilen.
- Es liegt eine symmetrische Verkabelung jedes Schaltnetzteil zum Verbraucher vor (Bild 2).

Ansatzpunkt für die Berechnung der Parallelschaltung sind die folgenden n Gleichungen der n Schaltnetzteile:

1. $U_{a1} = U_0 + U_{E1} - (R_i + 2R_L) I_{a1}$
2. $U_{a2} = U_0 + U_{E2} - (R_i + 2R_L) I_{a2}$
3. $U_{a3} = U_0 + U_{E3} - (R_i + 2R_L) I_{a3}$
-
- n. $U_{an} = U_0 + U_{En} - (R_i + 2R_L) I_{an}$

Parallelschaltbedingungen für die n Schaltnetzteile:

$$U_{a1} = U_{a2} = U_{a3} = \dots = U_{an}$$

und

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a3} + \dots + I_{an}$$

Hieraus ergibt sich das Gleichungssystem für die n parallelgeschalteten Schaltnetzteile:

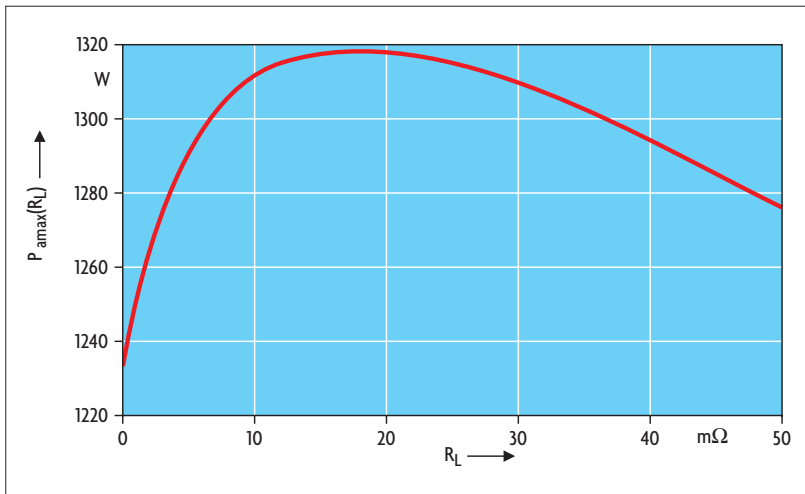


Bild 4. Maximale Verbraucherleistung in Abhängigkeit des Leitungswiderstandes. (Die Diagramme der Bilder 4...8 sind für jedes parallelschaltbare Schaltnetzteil mit passiver Stromaufteilung, das beispielsweise von der Fa. MGV Stromversorgungen (www.mvg.de) bezogen wird, auf Anfrage dort erhältlich.)

$$U_a = U_0 + U_{E1} - (R_i + 2R_L) I_{a1}$$

$$U_a = U_0 + U_{E2} - (R_i + 2R_L) I_{a2}$$

$$U_a = U_0 + U_{E3} - (R_i + 2R_L) I_{a3}$$

$$\dots$$

$$U_a = U_0 + U_{En} - (R_i + 2R_L) I_{an}$$

Mit Hilfe dieses Gleichungssystems lassen sich diverse Gleichungen für die n parallelgeschalteten Schaltnetzteile nach einigen Vereinfachungen ableiten. Doch zunächst noch die Definition des Mittelwertes der Einstelltoleranzen:

$$U_{EM} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n U_{Ei}$$

Spannung am Verbraucher:

$$U_a = U_0 + U_{EM} - \frac{R_i + 2 \cdot R_L}{n} \cdot I_a \quad (1)$$

Anhand der Gleichung (1) lässt sich die in Bild 3 gezeigte Ersatzschaltung für die n parallelgeschalteten Schaltnetzteile konstruieren.

Es ist erstaunlich, dass sich so ein einfaches Ersatzschaltbild (ESB) für die Parallelschaltung ergibt. Das ESB besteht lediglich aus drei Elementen: Zum Einen setzt es sich aus zwei Spannungsquellen zusammen, deren Parameter sich leicht ermitteln lassen. Zum Anderen kommt noch ein Widerstand hinzu. Dieser lässt sich ebenfalls leicht aus dem Innenwiderstand des Schaltnetzteiles, dem Leitungswiderstand (Lastleitung) und der Anzahl der parallelgeschalteten Schaltnetzteile berechnen. Geht man noch einen Schritt weiter und fasst die beiden Spannungsquellen zusammen, so erhält man das Ersatzschaltbild einer realen Ersatzspannungsquelle, bestehend aus idealer Spannungsquelle und Innenwiderstand.

Der Strom des k-ten Schaltnetzteiles (1 ≤ k ≤ n):

$$I_{ak} = \frac{U_{Ek} - U_{EM}}{R_i + 2 \cdot R_L} + \frac{1}{n} \cdot I_a \quad (2)$$

Die Genauigkeit der Stromaufteilung des k-ten Schaltnetzteils (1 ≤ k ≤ n):

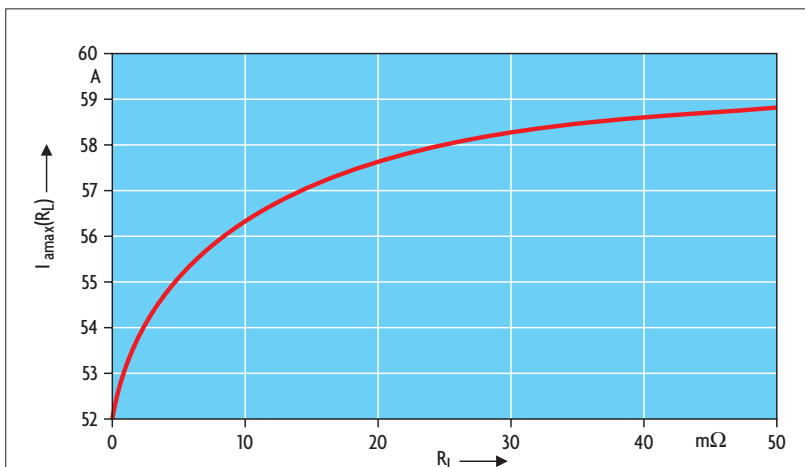
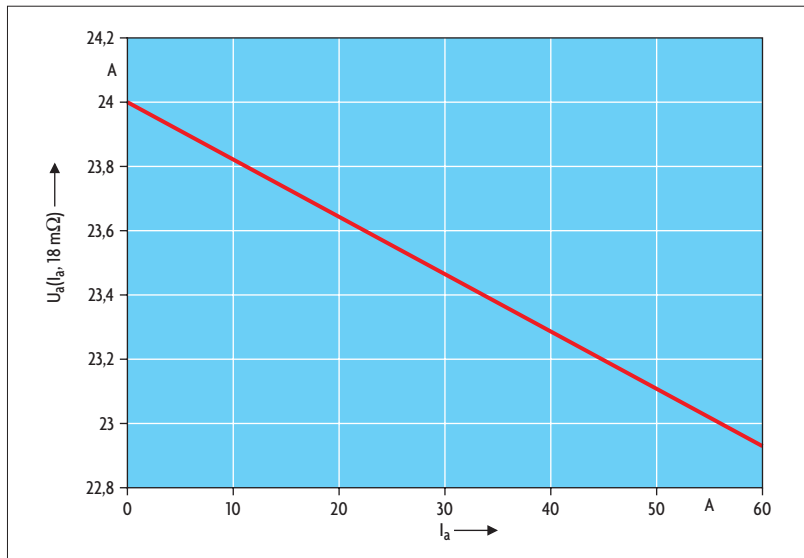


Bild 5. Maximal entnehmbarer Strom der Parallelschaltung in Abhängigkeit vom Leitungswiderstand.

Bild 6.
Verbraucher-
spannung in
Abhängigkeit
des Verbra-
cherstromes
beim optima-
len Leitungs-
widerstand.



$$\Delta I_{ak} = \frac{U_{EK} - U_{EM}}{\frac{I_a}{n} \cdot (R_i + 2 \cdot R_L)} \quad (3)$$

Beim genaueren Analysieren der Gleichung (2) fällt auf, dass der zweite Summand den Stromanteil bei einer gleichmäßigen Stromaufteilung der Parallelschaltung darstellt. Der erste Summand stellt dann folgerichtig die Abweichung von der gleichmäßigen Stromaufteilung dar. Setzt man diese Abweichung ins Verhältnis zum Strom eines SNTs bei gleichmäßiger Stromaufteilung, so erhält man die prozentuale Abweichung (Gleichung (3)). Interessant sind die Abhängigkeiten der prozentualen Abweichung. Zum Einen

ist die Stromaufteilung um so genauer, je größer der Verbraucherstrom (vgl. Bild 7), der Innenwiderstand und der Leitungswiderstand werden. Zum Anderen steigt die Genauigkeit der Stromaufteilung mit der Annäherung der Einstelltoleranz an den Mittelwert der Einstelltoleranz.

Der maximal der Parallelschaltung entnehmbare Strom (Annahme: $U_{E1} \geq U_{En}$ und $I_{a1} = I_N$)

$$I_{a\max} = n \cdot I_N - \frac{n \cdot (U_{E1} - U_{EM})}{R_i + 2 \cdot R_L} \quad (4)$$

Der maximal entnehmbare Strom der Parallelschaltung ergibt sich dann, wenn das Schaltnetzteil mit der größ-

ten Leerlaufspannung (hier SNT 1 mit höchster Leerlaufspannung angenommen) den Nennstrom zieht. Der Ausgangsstrom aller anderen SNTs ist dann immer kleiner oder höchstens gleich dem Nennstrom eines SNT (Bild 1). Die maximale Verbraucherleistung in Abhängigkeit des Leitungswiderstandes bei der Entnahme des maximalen Stromes ergibt sich zu:

$$P_{a\max} = \left[U_0 + U_{E1} - I_N \cdot (R_i + 2 \cdot R_L) \right] \cdot \left[n \cdot I_N - \frac{n \cdot (U_{E1} - U_{EM})}{R_i + 2 \cdot R_L} \right] \quad (5)$$

■ Darstellung der abgeleiteten Formeln anhand eines Berechnungsbeispiels

Für das Beispiel werden folgende Daten des Schaltnetzteiles angenommen:

- Nominalspannung: $U_0 = 24 \text{ V}$
- Nennstrom eines SNT: $I_N = 20 \text{ A}$
- Innenwiderstand des SNT: $R_i = 17,5 \text{ m}\Omega$
- Parallelgeschaltete Schaltnetzteile: $n = 3$
- Einstelltoleranz der drei Schaltnetzteile: $U_{E1} = 50 \text{ mV}$, $U_{E2} = -10 \text{ mV}$, $U_{E3} = -30 \text{ mV}$
Mittelwert der Einstelltoleranz: $U_{EM} = 1/3 (50 \text{ mV} - 10 \text{ mV} - 30 \text{ mV}) = 3,33 \text{ mV}$

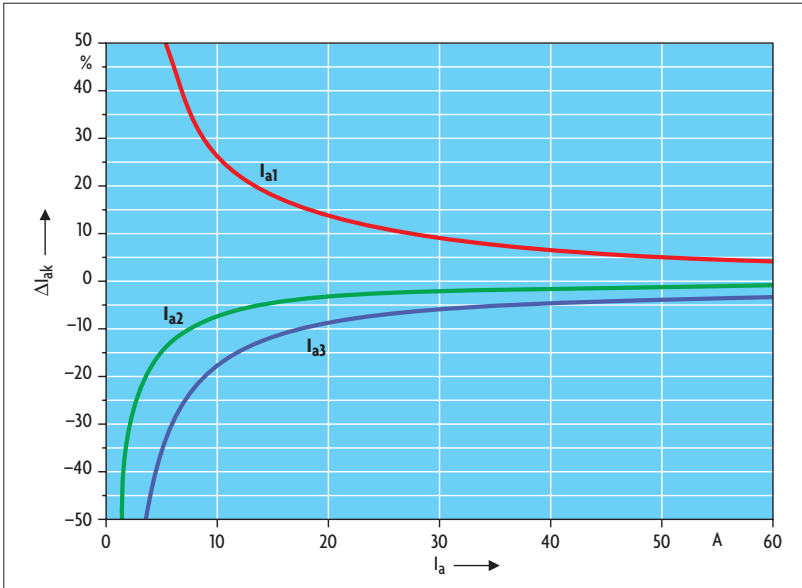


Bild 7. Prozentuale Stromaufteilung in Abhängigkeit des Verbraucherstromes beim optimalen Leitungswiderstand.

Die Dimensionierung des Leitungswiderstandes nach der maximal entnehmbaren Leistung für den Verbraucher mit eingesetzten Werten (siehe auch *Bild 4*):

$$P_{a\max} = \left[24,05 \text{ V} - 20 \text{ A} \cdot (17,5 \text{ m}\Omega + 2 \cdot R_L) \right] \cdot \left(60 \text{ A} - \frac{140 \text{ mV}}{17,5 \text{ m}\Omega + 2 \cdot R_L} \right) \quad (5a)$$

Anhand des Diagrammes im Bild 4 lässt sich ein optimaler Leitungswiderstand ablesen, bei dem die Verbraucherleistung ein Maximum aufweist. In diesem Berechnungsbeispiel liegt der optimale Leitungswiderstand bei etwa 18 mΩ. Alle weiteren Betrachtungen

werden mit dem optimalen Leitungswiderstand durchgeführt.

Maximal entnehmbarer Strom der Parallelschaltung mit eingesetzten Werten:

$$I_{a\max} = 60 \text{ A} - \frac{140 \text{ mV}}{17,5 \text{ m}\Omega + 2 \cdot R_L} \quad (5b)$$

Der maximal entnehmbare Strom der Parallelschaltung beträgt nach *Bild 5* und unter Berücksichtigung des optimalen Leitungswiderstandes etwa 57,5 A. Dieser Wert entspricht 95,8 % des theoretisch möglichen Wertes von 60 A.

Die Verbraucherspannung in Abhängigkeit des Verbraucherstromes beim optimalen Leitungswiderstand

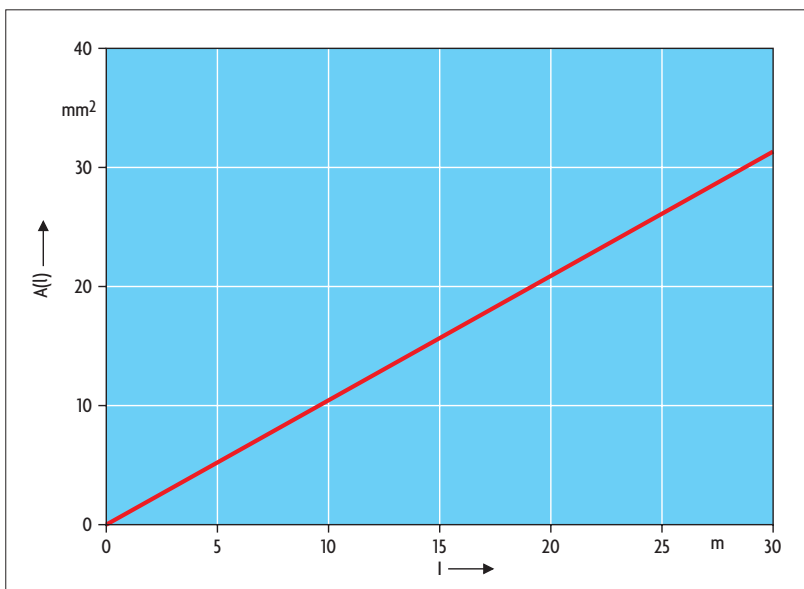


Bild 8. Leitungsquerschnitt in Abhängigkeit der Leitungslänge für den optimalen Leitungswiderstand.

Verwendete Abkürzungen

A:	Leitungsquerschnitt	R _i :	Innenwiderstand des SNT
ESB:	Ersatzschaltbild	R _L :	Widerstand der Lastleitung (Hin- oder Rückleiter)
i:	Laufindex	SNT:	Schaltnetzteil
ΔI _{ak} :	prozentuale Abweichung der Stromaufteilung des k-ten SNT	U _a :	Ausgangsspannung der parallelgeschalteten SNTs
I _a :	Verbraucherstrom	U _{an} :	Ausgangsspannung des n-ten SNT
I _{amax} :	maximal entnehmbarer Verbraucherstrom	U _E :	Eingangsspannung
I _{an} :	Ausgangsstrom des n-ten SNT bei Parallelschaltung	U _{EM} :	Mittelwert der Einstelltoleranzen
I _N :	Nennausgangsstrom eines SNT	U ₀ :	nominale Leerlaufspannung
κ:	elektrische Leitfähigkeit	U _{0n} :	tatsächliche Leerlaufspannung des n-ten SNT
k:	Laufindex	U _{En} :	Einstelltoleranz der Ausgangsspannung des n-ten SNT (berechnet aus der Leerlaufspannung minus Nominalspannung)
l:	Leitungslänge		
n:	Anzahl der parallelgeschalteten SNTs		
P _{amax} :	maximale Verbraucherleistung		

von $R_L = 18 \text{ m}\Omega$ (Bild 6) ergibt sich aus:

$$U_a = 24,0033 \text{ V} - 17,83 \text{ m}\Omega \cdot I_a$$

Prozentuale Stromaufteilung (bezogen auf I_a/n) der drei parallelgeschalteten Netzteile in Abhängigkeit des Verbraucherstromes und beim optimalen Leitungswiderstand:

$$\begin{aligned} \Delta I_{a1} &= 2,617 \text{ A}/I_a \\ \Delta I_{a2} &= -0,748 \text{ A}/I_a \\ \Delta I_{a3} &= -1,869 \text{ A}/I_a \end{aligned}$$

Im Bild 7 wird die Abhängigkeit der Stromaufteilung vom Verbraucherstrom deutlich. Die Nullprozentlinie der Ordinate des Diagramms entspricht einer gleichmäßigen Stromaufteilung, das heißt, jedes Schaltnetzteil liefert den gleichen Strom. Bei sehr kleinen Verbraucherströmen ist die Stromaufteilung äußerst ungünstig. Dies stellt aber in der Regel kein Problem dar, da in diesem Fall die einzelnen SNTs weit unterhalb ihrer Nennleistung betrieben werden. Ab einem Verbraucherstrom von etwa 25 A liegt

die Abweichung der Stromaufteilung unter 10 % und beim maximal entnehmbaren Strom sogar unter 5 %.

Für den Anwender ist nicht so sehr der optimale Leitungswiderstand interessant, sondern der einzusetzende Leitungsquerschnitt in Abhängigkeit der Leitungslänge für die Realisierung des optimalen Leitungswiderstandes. Dies lässt sich mit Hilfe der folgenden, bekannten Formel für den Leitungswiderstand berechnen:

$$R_L = \frac{1}{\kappa \cdot A} \quad (6)$$

Erstellt man hieraus ein Diagramm, so lässt sich mit dessen Hilfe relativ schnell und einfach der nötige Leitungsquerschnitt bei einer gegebenen Leitungslänge mit der Prämisse der maximal entnehmbaren Leistung ermitteln.

Das Diagramm im Bild 8 ist mit der Einschränkung zu sehen, dass der Leitungsquerschnitt einen Minimalwert (Strombelastbarkeit von Leitungen nach einschlägigen Vorschriften) nicht unterschreiten darf.

Aufgrund des minimalen Leitungsquerschnittes wird es nicht bei jeder Anwendung möglich sein, den optimalen Leitungswiderstand zu realisieren. Man sollte aber in jedem Falle auf eine symmetrische Verkabelung der einzelnen Schaltnetzteile achten. *ha*



**Dipl.-Ing. (FH)
Martin Rosenbaum**

ist gebürtiger Coburger. Nach der Ausbildung zum Energieanlagenelektroniker und einer zweijährigen Tätigkeit als Facharbeiter studierte er an der Fachhochschule Coburg Elektrotechnik mit dem Schwerpunkt Elektrische Energietechnik. Nach dem Studium betreute er ein Forschungsprojekt an der FH Coburg mit dem Thema „Asynchronmotoren für die Umrichterspeisung“. Seit Oktober 1997 beschäftigt er sich bei der Firma MGV Stromversorgungen sowohl mit der Entwicklung von Standard-Schaltnetzteilen als auch mit der Realisierung von kundenspezifischen Lösungen.
► E-Mail: martin.rosenbaum@mgv.de