



Elektronische Last

EL 9000 Teil 1

Diese neue, mikroprozessorgesteuerte Gleichstromlast bietet zahlreiche Möglichkeiten zur definierten Belastung von DC-Quellen wie Netzteile, Solarzellen, Akkus usw. Auch hohe Lastströme bis zu 20 Ampere und Verlustleistungen bis 200 Watt sind dank der umfangreichen Schutzfunktionen sicher beherrschbar.

Allgemeines

Zur Versorgung von elektronischen Schaltungen mit Gleichspannung befindet sich auf dem Arbeitsplatz jedes Elektrikers ein geregeltes Netzteil. Des Öfteren stellt sich jedoch auch die entgegengesetzte Aufgabenstellung, d. h., es ist eine Gleichspannungsquelle definiert zu belasten. Dies ist z. B. bei der Entwicklung von Netzgeräten der Fall, beim Testen von Solarzellen und Brennstoffzellen oder auch zum Entladen von Akkus. Häufig behilft man sich damit, dass vorhandene Widerstände oder auch Glühlampen zusammenschaltet werden. Solche „Basteleien“ sind meist zeitraubend und die gewünschte Belastung ist mit derartigen Provisorien nur sehr ungenau erreichbar. Eine etwas elegantere Lösung ist die Verwendung von Hochlast-Schiebewiderständen, die z. B. in Schulen und Laboren Anwendung finden, aber auch diese haben einige gravierende Nachteile:

- Sie sind mechanisch sehr groß und unhandlich.
- Die Einstellung des gewünschten Lastwertes ist mühsam und ungenau, sie erfordert zeitaufwändiges Messen, auch während des Betriebs.
- Der Funktionsumfang beschränkt sich auf Konstantwiderstandsbetrieb.
- Meist fehlt ein Überlastschutz.

Eine professionelle Lösung stellt die

Verwendung einer elektronischen Last, wie der hier vorgestellten EL 9000, dar.

Das Funktionsprinzip einer elektronischen Last liegt darin, dass die zugeführte elektrische Energie in einem steuerbaren Halbleiter in Wärmeenergie umgewandelt wird. Die Ansteuerung des Halbleiters erfolgt über einen Regelkreis, sodass mit der Sollwertvorgabe die Eigenschaften der Last beeinflussbar sind. Erst mit einer solchen Anordnung sind genau definierbare Verhältnisse herstellbar, zudem sorgen hier Schutzfunktionen dafür, dass sowohl Prüfling als auch die elektronische Last keinen Schaden nehmen können.

Bedienung und Funktion

Durch den Einsatz einer komfortablen Menüführung sind auf der Frontplatte der ELV EL 9000 nur wenige, übersichtlich angeordnete Bedien- und Anzeigenelemente erforderlich. Links befindet sich der obligate Netzschalter. Rechts sind die beiden 4-mm-Buchsen angeordnet, an die die zu belastende Gleichstromquelle (maximale Spannung 40 V) angeschlossen wird. Zwischen den Buchsen befindet sich die von außen zugängliche Flachstecksicherung (30 A, 80 V), die die Endstufe der EL 9000 bei grober Fehlbedienung (z. B. Verpolen) vor Beschädigung schützen soll. Die BNC-Buchse „Mod.“ dient zur Einspeisung des Modulationssignals in den

„Extern“-Betriebsarten. An der BNC-Buchse „U-I“ kann eine zum Laststrom proportionale Spannung mit einem Umsetzungsfaktor von ca. 0,1 Volt je Ampere abgegriffen werden.

Zentrales Anzeigenelement ist das große LC-Display (Sichtfeld 99 x 24 mm). In zwei Zeilen á 16 Zeichen werden hier alle wichtigen Informationen wie das Auswahlm Menü, Messwerte, Vorgabewerte etc. gut ablesbar dargestellt. Die Einstellung der Sollwerte erfolgt über den Drehimpulsgeber unter dem Display, genauso wie das „Blättern“ innerhalb des Betriebsartenmenüs. Die beiden Taster rechts neben dem Display haben eine so genannte „Soft-

Technische Daten: EL 9000

P _{max} :	200 W
I _{max} :	Dauer 20 A, Impuls 40 A
U _{max} :	40 V
R-Bereich:	1 Ω – 500 Ω
Pulsfrequenz:	1 Hz – 1 kHz,
	Impuls-Pausen-Verhältnis 1:1
Slew-Rate:	1 mA/μs – 5 A/μs
Schutzfunktionen:	.. Strombegrenzung,
	Leistungsbegrenzung, Übertemperaturabschaltung, Schmelzsicherung
Schnittstelle:	RS 232
Betriebsspannung:	230 V, 50 Hz,
	ca. 60 mA
Abmessungen:	380 x 117 x 220 mm
Gewicht:	ca. 4,4 kg



Bild 1: Anzeige im Konstantstrombetrieb

Key"-Funktion, d. h. ihre Funktion ist von der Anzeige in der daneben befindlichen Displayzeile abhängig. Erscheint im Display z. B. ein Pfeil, so kann man durch einen Tastendruck den nächsten Parameter bzw. Messwert aufrufen. Innerhalb des Betriebsartenmenüs wird links neben der oberen Taste ein „Enter“-Symbol dargestellt – über einen Tastendruck erfolgt dann die Anwahl der angezeigten Betriebsart. Entsprechend selbsterklärend sind auch alle weiteren Funktionen dieser Tasten.

Ist eine Betriebsart angewählt, so werden in der oberen Displayzeile die Messwerte angezeigt. Da nicht alle Werte gleichzeitig darstellbar sind, kann man, wie beschrieben, mit der oberen Taste zum nächsten Wert „weiterblättern“. Auf den letzten Anzeigenwert folgt wieder der erste, symbolisiert durch einen „Umlaufpfeil“. Im Fehlerfall wird vor den Messwerten der Fehlercode eingereicht, sodass diese Werte weiter abrufbar bleiben.

Die untere Zeile zeigt die Vorgabewerte (Parameter) an. Da auch diese nicht alle gleichzeitig darstellbar sind, wird jeweils nur ein Parameter angezeigt, weitere Anzeigen erfolgen über das „Blättern“, wie in der oberen Zeile. Mit dem Drehimpulsgeber kann der ausgewählte Parameter eingestellt werden. Abbildung 1 zeigt eine typische Displayanzeige.

Die „Stand-by“-Taste rechts unter dem Display hat eine Toggle-Funktion und dient dazu, die Endstufe in den Stand-by-Zustand bzw. von Stand-by in den Ein-Zustand zu schalten. Stand-by bedeutet hierbei, dass ein Sollwert von 0 Ampere vorgegeben wird und die Endstufe gesperrt ist. Dies ist sinnvoll, um schnell einen Lastabwurf realisieren zu können, ohne den Sollwert mühsam auf Null zurückstellen zu müssen. Besonders angenehm ist, dass diese Funktion es möglich macht, alle Lastparameter im Vorfeld in Ruhe einzustellen und erst dann die Last zuzuschalten.

Mit der Menü-Taste gelangt man aus den verschiedenen Betriebsarten zurück in das Hauptmenü. Hierbei wird die Endstufe automatisch in den Stand-by-Modus geschaltet.

Zusätzlich zum LC-Display geben die 6 Leuchtdioden einen schnellen Überblick über den aktuellen Betriebszustand des Gerätes. Es wird angezeigt, ob die I- oder die R-Kennlinie aktiviert ist und ob Puls- bzw. externe Modulation gewählt ist. Die LED neben der „Stand-by“-Taste zeigt

durch Farbwechsel an, ob die Endstufe zugeschaltet ist (grün) oder sich im Stand-by-Modus (rot) befindet. Über die rote LED erfolgt eine Fehlersignalisierung. Außerdem gibt eine entsprechende Klartext-Fehlermeldung, wie z. B. „Strombegrenzung“ oder „Übertemperatur“ in der oberen Displayzeile einen Hinweis auf die mögliche Fehlerursache.

Zur Verdeutlichung des großen Funktionsumfangs der neuen elektronischen Last ELV EL 9000 sollen im Folgenden die verschiedenen Betriebsarten näher betrachtet werden.

Konstantstrombetrieb

In diesem Betriebsmode ist der Laststrom unabhängig von der angelegten Spannung. Er kann bis zu 20 Ampere betragen. Außerdem lässt sich hier, genauso wie in allen weiteren Modi, die Verlustleistung im Bereich von 1 Watt bis 200 Watt begrenzen. Wird die eingestellte Leistung überschritten, so erfolgt eine entsprechende Reduzierung des Laststroms, sodass dann Konstantleistungsbetrieb vorliegt. Nicht nur die EL 9000 wird mit dieser nützlichen Funktion geschützt, sondern auch empfindliche Prüflinge.

Als Messwerte können neben Spannung und Strom auch die umgesetzte Verlustleistung und der Widerstandswert, der der Belastung entspricht, abgerufen werden.

Konstantwiderstandsbetrieb

Die EL 9000 simuliert in dieser Betriebsart einen ohmschen Widerstand, d. h. der Laststrom ist gemäß dem ohmschen Gesetz von der angelegten Spannung abhängig. Der Widerstandswert kann zwischen 1 Ω und 500 Ω liegen. Neben der Leistungsbegrenzung ist zusätzlich eine Strombegrenzung (100 mA bis 20 A) implementiert. Ebenso wie in der Betriebsart Konstantstrom können als Messwerte die Spannung, der Strom, die Leistung und der Widerstand abgerufen werden.

Pulsstrombetrieb

In dieser Betriebsart wechselt der Laststrom automatisch zwischen zwei unabhängig einstellbaren Werten. Besonders hilfreich ist dies zum Optimieren von Regelschaltungen in Netzteilen o. ä., da die hierfür erforderliche Sprungfunktion des Laststromes bereitgestellt wird. Anhand der Sprungantwort (Änderung der Spannung) kann man das Regelverhalten bezüglich Ausregelzeit, bleibender Regelabweichung, Ansprechen einer Strombegrenzung etc. beurteilen und ggf. verbessern.

Im Pulsstrombetrieb sind High- und Low-Wert des Stromes getrennt voneinander einstellbar. Der High-Strom kann bis zu 40 Ampere (!) betragen, wobei der Mittelwert von High- und Low-Strom auf

maximal 20 Ampere begrenzt ist.

Die Frequenz, mit der zwischen den beiden Lastwerten gewechselt wird, kann in 10 Stufen zwischen 1 Hz und 1 kHz gewählt werden. Das Puls-Pausen-Verhältnis liegt fest bei 1:1.

Neben einer Begrenzung der Effektivleistung ist als besonderes Feature eine variable Begrenzung der Stromanstiegs-geschwindigkeit (Slew-Rate) vorhanden. Diese ist zur Anpassung an verschiedene dynamische Randbedingungen hilfreich und wird später noch näher beschrieben.

Als Messwerte werden neben dem Mittelwert von Spannung und Strom auch die High- und Low-Werte angezeigt. Daneben sind außerdem die Effektivleistung und der Innenwiderstand abrufbar. Letzterer errechnet sich aus der Differenz der Spannungen und der Differenz der Ströme. Zu beachten ist hierbei, dass nicht der reine Innenwiderstand der Gleichstromquelle gemessen wird, sondern die Verbindungsleitung das Ergebnis verfälscht. Sinnvolle Anzeigenwerte sind nur dann möglich, wenn Ströme und Spannungen in geeigneten Bereichen (ausreichende Differenz) liegen. Für eine genaue Bestimmung des Innenwiderstandes muss man die Spannung bei verschiedenen Belastungen direkt an den Klemmen der Quelle messen.

Pulswiderstandsbetrieb

Diese Betriebsart entspricht dem Pulsstrombetrieb, es wird jedoch zwischen zwei Widerstandswerten automatisch gewechselt. Wie im Konstantwiderstandsbetrieb ist auch hier eine Strombegrenzung vorgesehen.

Extern modulierter Strom

In Verbindung mit einer entsprechenden Signalquelle (z. B. Funktionsgenerator) ist in dieser Betriebsart nahezu jede erdenkliche Kurvenform des Laststromes realisierbar. Der Laststrom folgt dem über die BNC-Buchse eingespeisten Modulationssignal, dessen Pegel maximal ± 5 Volt betragen darf. Die Empfindlichkeit, das heißt der Faktor, mit dem das Modulationssignal den Laststrom beeinflusst, ist hierbei umschaltbar von 1 A/V auf 10 A/V. Außerdem ist noch eine Empfindlichkeit von 0 A/V wählbar. Diese Einstellung, in der die Modulation ausgeschaltet ist, ist hilfreich zum Einstellen des sog. Offset-Stromes, d. h. des Stromes, der bei einer Modulationsspannung von 0 Volt fließt. Er kann 0 A bis 20 A betragen.

Die bereits in den vorigen Betriebsarten erwähnten Funktionen Strombegrenzung und Begrenzung der Stromanstiegs-geschwindigkeit sind in dieser Betriebsart ebenfalls verfügbar. Eine Begrenzung der Effektivleistung ist aufgrund der beliebigen Kurvenform und ggf. hohen Frequenzen nicht mit vertretbarem Aufwand reali-

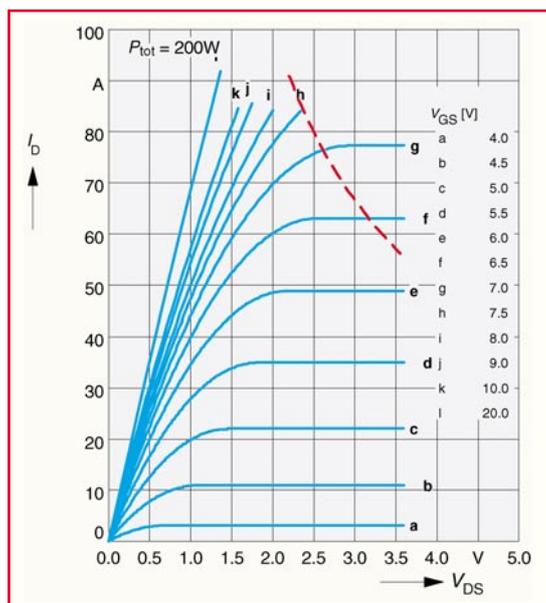


Bild 2: Ausgangskennlinienfeld des BUZ 102

sierbar. Die Leistungsbegrenzung schaltet hier die Endstufe in den Stand-by-Zustand, wenn das Produkt der Mittelwerte von Strom und Spannung den eingestellten Grenzwert überschreitet.

Extern modulierter Leitwert

Die theoretisch denkbare externe Widerstandsmodulation ist an dieser Stelle nicht realisiert. Dies ist zum einen sehr aufwändig, zum anderen macht es auch wenig Sinn, da die resultierenden Ströme bereits bei einfachen Modulationssignalen sehr komplizierte Kurvenformen annehmen. Eine sinnvolle Anwendung ist hier kaum denkbar. Stattdessen ist eine Betriebsart zur externen Modulation des Leitwertes vorhanden. Die Empfindlichkeit, mit der sich der Leitwert in Abhängigkeit von der angelegten Modulationsspannung ändert, ist abhängig vom Bereich des Offset-Leitwertes wählbar und kann 4 mS/V, 40 mS/V oder 400 mS/V betragen. Die Begrenzungsfunktionen sind identisch mit denen der Betriebsart „Externe Strommodulation“.

Entladen

Dieser Modus ist vor allem zum Entladen von Akkus und Batterien gedacht. Eine Anwendung ist das Entladen von Nickel-Cadmium-Akkus vor dem erneuten Laden, um dem gefürchteten Memory-Effekt vorzubeugen. Eine weitere Möglichkeit ist die Bestimmung der Kapazität, indem der geladene Akku (Batterie) bis zum Erreichen der Entladeschlussspannung entladen wird. Die entnommene Ladungsmenge (Q) entspricht dann der Kapazität:

$$Q = I \cdot t$$

Neben dem Strom kann man die Spannung, bei deren Unterschreiten der Entla-

devorgang beendet werden soll, vorgeben. Die Spannungsmessung erfolgt in kurzen Entladepausen, sodass der Widerstand der Zuleitungen und der Innenwiderstand des Akkus nicht zu einem frühzeitigen Abbrechen des Entladevorgangs führen. Die fortlaufend aufsummierte Ladungsmenge ist als Messwert abrufbar.

Remote

In dieser Betriebsart erfolgen alle Steuer- und Anzeigenfunktionen von einem PC aus über dessen serielle Schnittstelle. Alle Möglichkeiten, die die Handbedienung bietet, stehen auch hier in vollem Umfang zur Verfügung (abgesehen von den Sonderfunktionen, siehe unten). Zusätzlich sind zahlreiche weitere Möglichkeiten gegeben, die so nur eine PC-Steuerung bieten kann. Erwähnt sei hier nur das automatisierte Messen mit dem Abfahren verschiedener Belastungszustände über längere Zeiträume. Hierbei können die Messwerte gespeichert und somit für die Weiterverarbeitung, z. B. in Excel®, bereitgestellt werden.

Über die Tasten ist in dieser Betriebsart keinerlei Bedienung erforderlich. Deshalb führt das Betätigen einer Taste stets zur Rückkehr ins Hauptmenü. Da hiermit ein Abschalten der Endstufe in den Stand-by-Zustand erfolgt, haben die Tasten eine „Not-Aus“-Funktion, sodass in kritischen Situationen, wie z. B. dem Versagen des Prüflings unter Volllast, ein schneller Benutzereingriff möglich ist.

Sonderfunktionen

In diesem Menü finden sich einige gerätebezogene Einstellungen der ELVEL 9000. Diese sind im Einzelnen:

- Ein- und Ausschalten der Hintergrundbeleuchtung des Displays
- Einstellen der Baudrate der Schnittstelle
- Der Abgleich für die Ansteuer- und Messfunktion
- Der Abgleich für die Stromanstiegsge-
schwindigkeitsbegrenzung
- Einstellen der Geschwindigkeit, mit der sich die Parameter bei schnellem Drehen des Drehimpulsgebers ändern.

Dynamisches Verhalten

Eine besondere Bedeutung bei den intern und extern modulierten Betriebsarten spielen die dynamischen Eigenschaften der EL 9000. Will man das Verhalten einer Gleichspannungsquelle wie z. B. eines Netzgerätes bei einem Lastwechsel prüfen, so muss der Wechsel zwischen den Belastungswerten sehr schnell und genau ausgeführt werden. Eine rein digitale Lö-

sung für den Regler über den Mikroprozessor scheidet somit aus. Daher sind sowohl der Stromregler als auch die Strombegrenzung analog ausgeführt. Die hierdurch erreichte hohe Geschwindigkeit kann jedoch auch Stabilitätsprobleme mit sich bringen. Eine wesentliche Ursache hierfür ist die Verbindungsleitung von der Gleichspannungsquelle zur elektronischen Last. Ihre Induktivität wirkt einer Änderung des Stromes entgegen. Hierfür gilt das Induktionsgesetz:

$$u_L = -L \frac{di}{dt}$$

Bei einer Stromanstiegs-
geschwindigkeit von mehreren Ampere pro Mikrosekunde erzeugt eine Induktivität von nur einem µH bereits einen Spannungseinbruch von mehreren Volt. Diese Spannungsschwankungen dürfen die Stromregelung der Endstufe nicht wesentlich beeinflussen, da es sonst zu Wechselwirkungen in Form von Überschwüngen kommen kann. Im Extremfall sind die Wechselwirkungen so stark, dass sie zum Aufschaukeln und damit zum Dauerschwingen führen. Besonders kritisch ist dies beim Betrieb mit geringen Lastspannungen. Bei Feldeffekttransistoren, so wie sie in der Endstufe zum Einsatz kommen, führen bereits kleine Spannungsschwankungen zu großen Stromschwankungen, wenn die Drain-Source-Spannung sehr niedrig ist. Bei größeren Drain-Source-Spannungen ist der Drainstrom quasi ein Konstantstrom und nur von der Gatespannung abhängig. Dies verdeutlicht das Ausgangskennlinienfeld des eingesetzten BUZ 102 in Abbildung 2.

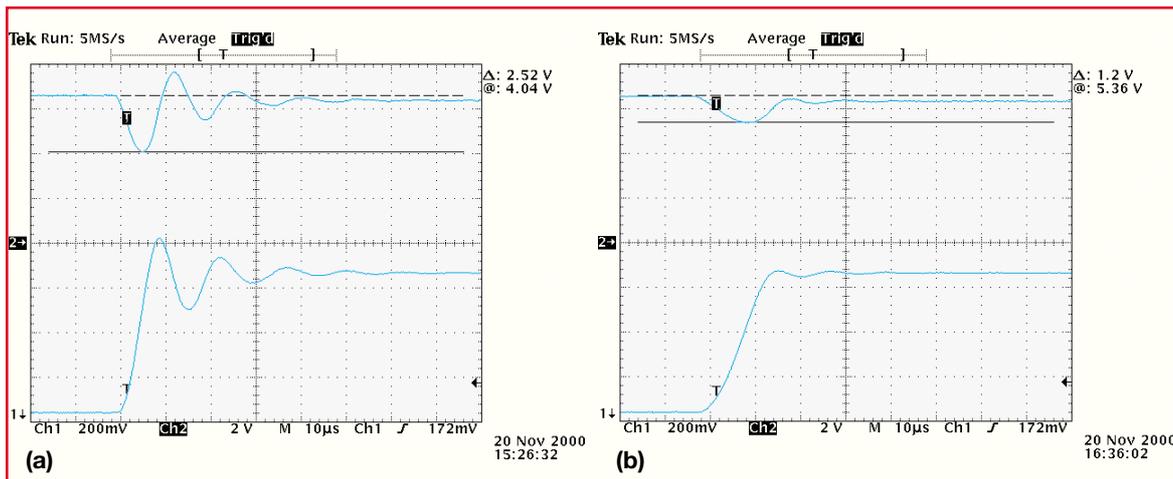
Im Konstantstrombetrieb lässt sich dieses Problem recht einfach in den Griff bekommen, indem man einen Kondensator (z. B. 10 µF) direkt parallel an die Klemmen der EL 9000 schaltet und so die Spannung stabilisiert.

Einen wesentlichen Einfluss hat in jedem Fall die Verbindungsleitung zwischen der Quelle und der Last. Sie muss so niederinduktiv wie möglich ausgeführt werden. Zu erreichen ist dies durch:

- einen großen Leiterquerschnitt,
- kurze Leitungen,
- einen geringen Abstand zwischen Hin- und Rückleiter.

Bewährt hat sich das Parallelschalten mehrerer handelsüblicher kurzer Laborleitungen, die zusätzlich miteinander verflochten werden.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist gemäß Induktionsgesetz die Geschwindigkeit, mit der der Strom sich ändert. Eine „natürliche“ Begrenzung dieser Geschwindigkeit ist bereits durch das Tiefpassverhalten der Ansteuerung und des Stromreglers gegeben. Somit wäre es möglich, den Regler bei maximaler Sprunggröße so zu



**Bild 3: Stromsprung von 0,5 A auf 7 A mit hoher Anstiegsge-
schwindigkeit (a) und Stromsprung von 0,5 A auf
7 A mit reduzier-
ter Anstiegsge-
schwindigkeit (b).**

parametrieren (zu verlangsamen), dass Schwingneigungen auszuschließen sind. Dies würde die Regelung der Last jedoch unter günstigeren Bedingungen und bei kleinen Sprüngen unnötig langsam machen. Deshalb ist in der EL 9000 eine variable Begrenzung der Stromanstiegs-
geschwindigkeit (Slew Rate, SR) implementiert. Das untere Oszillogramm im Bild 3a zeigt ein typisches Einschwingen des Stromes bei großer Anstiegsge-
schwindigkeit und geringer Qualität der Verbindungsleitung. Der Strom steigt mit einer Geschwindigkeit von max. 2 A/ μ s von 500 mA auf 7 A. Die Spannung beträgt 6,5 V. Im oberen Kurvenverlauf ist das Einbrechen der Spannung um 2,5 V zu erkennen. Im Bild 3b ist die Anstiegsge-
schwindigkeit auf 500 mA/ μ s reduziert. Der Spannungseinbruch verringert sich wesentlich, sodass auch beim Ausregeln des Stromes nur noch ein minimales Einschwingen auftritt. Bei noch weiterer Reduzierung der Anstiegsge-
schwindigkeit wäre es bei Bedarf auch möglich, das Überschwingen gänzlich zu eliminieren. Die Begrenzung der Stromanstiegsge-
schwindigkeit der EL 9000 kann über den weiten Bereich von

1 mA/ μ s bis 5 A/ μ s in 12 Stufen variiert werden.

Grundstruktur der EL 9000

Das Blockschaltbild (Abbildung 4) zeigt den prinzipiellen Aufbau der EL 9000. Zentrales Steuerelement ist der Mikrocontroller (1). Er ermöglicht über die Leuchtdioden (2), das Display (3), den Drehimpulsgeber (4) und die Taster (5) die Interaktion zwischen Gerät und Bediener. Über die galvanisch getrennte RS-232-Schnittstelle (6) ist der Anschluss an einen PC möglich.

Über einen seriellen, 14 Bit auflösenden Digital-Analog-Wandler (7) werden die Vorgabewerte des Mikrocontrollers ausgegeben. Da vier verschiedene Vorgabewerte benötigt werden, erfolgt eine Verteilung mittels Multiplexer (8). Sample-and-Hold-Glieder (9) sorgen dabei für eine Zwischenspeicherung. Zum Messen der Analogwerte von Spannung und Strom sind zwei Analog-Digital-Wandler an den Controller angeschlossen. Hierbei handelt es sich um einen langsamen Dual-Slope-Wandler (10) mit 14 Bit Auflösung, dessen Eingang mittels eines Multiplexers (11)

auf verschiedene Signalquellen umgeschaltet werden kann und um einen schnellen, voll integrierten 8-Bit-Wandler (12) mit 8 Eingängen.

Die für die verschiedenen Betriebsarten notwendige weitere Modifikation des Sollwertsignals erfolgt über eine Summierstufe (13). In den „Extern-“Betriebsarten wird hier das Modulationssignal zugeschaltet (14). Bei Bedarf (Überstrom) kann der Strombegrenzungsregler (15) reduzierend auf den Sollwert einwirken. Im Pulsbetrieb erfolgt ein ständiges Vorhalten sowohl des High- als auch des Low-Wertes. Zwischen diesen kann dann mit einem elektronischen Umschalter (16) sehr schnell gewechselt werden.

Im Widerstandsbetrieb entspricht das vom Controller ausgegebene Sollwertsignal dem entsprechenden Leitwert. Gemäß der Beziehung $I = G \cdot U$ wird dieses durch einen Analogmultiplizierer (17) mit der Lastspannung zu einem Strom-Sollwert gewandelt. Ein Multiplexer (18) sorgt für die korrekte Bereichswahl und schaltet den Stromsollwert im Stand-by auf Null. Das Sollwertsignal des Stromreglers (20) wird über eine vorgeschaltete Stufe (19) in seiner Anstiegsge-
schwindigkeit variabel begrenzt. Der Istwert des Laststromes wird über Shunt-Widerstände (21) gemessen und vor der AD-Wandlung verstärkt (22).

Die eigentliche Endstufe (23) der ELV EL 9000 besteht aus 6 parallel geschalteten Feldeffekttransistoren, die jeweils über einen eigenen Stromregler (20) und einen eigenen Messshunt (21) verfügen.

Damit ist die einführende Beschreibung abgeschlossen und im nächsten Teil des Artikels folgt die Darstellung der umfangreichen Schaltungstechnik der EL 9000.

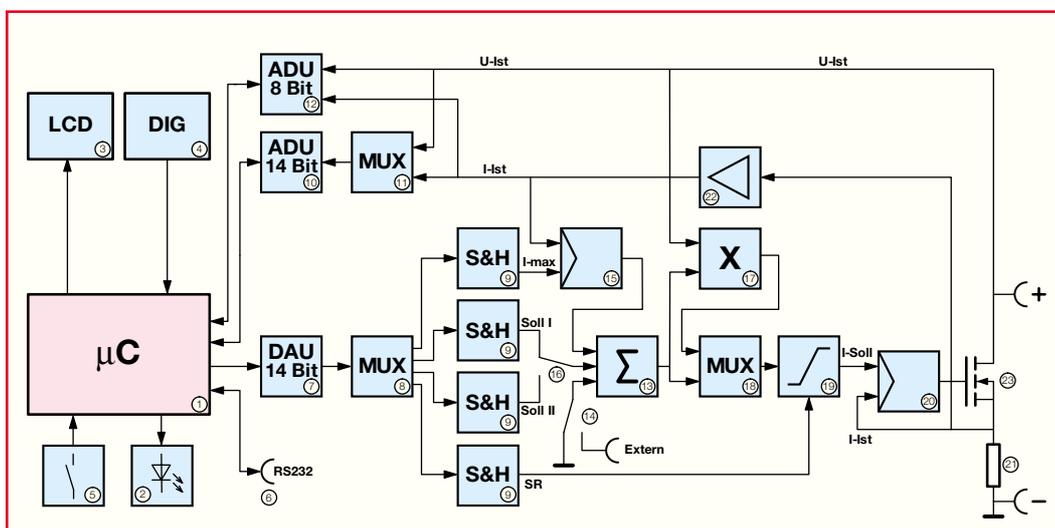


Bild 4: Blockschaltbild der EL 9000