



Elektronische Last

EL 9000 Teil 2

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. Nachdem wir im ersten Teil die Möglichkeiten und die Funktionen der EL 9000 vorgestellt haben, widmen wir uns nun der umfangreichen Schaltungstechnik.

Schaltungsbeschreibung

Zum Erreichen des umfassenden Funktions- und Leistungsumfanges der EL 9000 ist ein dementsprechend nicht unerheblicher Schaltungsaufwand erforderlich. Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, ist das Schaltbild deshalb in mehrere Funktionsgruppen unterteilt, die wir nacheinander betrachten werden:

- Digitalteil (Abbildung 5)
- Sollwertzeugung (Abbildung 6)
- Endstufe (Abbildung 7)
- Messschaltung (Abbildung 8)
- Schnittstelle (Abbildung 9)
- Netzteil mit Lüftersteuerung (Abbildung 10)

Digitalteil

Das zentrale Bauteil für alle Bedien-, Anzeigen- und Steuerfunktionen ist der Mikrocontroller IC 100. Hierbei handelt es sich um einen 87C58, eine OTP-Variante des bewährten, leistungsfähigen Prozessors 8032. Die vollständige Firmware ist im internen, 32 K fassenden ROM abgelegt. Somit ist kein externer Programmspeicher erforderlich und alle 4 Ports des Prozessors sind für Steueraufgaben verfügbar. Aufgrund der großen Anzahl an bereitzustellenden digitalen Ausgabesign-

nalen reicht jedoch auch dies nicht aus. Deshalb erfolgt eine Erweiterung mit drei Zwischenspeichern (IC 101 bis IC 103) vom Typ 74HC573, die an den als Parallelbus genutzten Port 0 angeschlossen sind. Hierüber werden außerdem das Displaymodul mit Daten versorgt und der 8-Bit-A/D-Wandler angesteuert. Da dieser Port keine internen Pull-Up-Widerstände besitzt, ist extern das Widerstandsnetzwerk R 105 angeschlossen.

Die Ansteuerung des Prozessor-Reset-Anschlusses (Pin 9) erfolgt über die aus IC 104 A bis C und einigen diskreten Komponenten gebildete Watchdog-Schaltung. Wird C 103 nicht regelmäßig durch Pulse aus Port 2.0 über IC 104 A, C 102, R 103, IC 104 B und D 100 nachgeladen, so beginnt der aus IC 104 C, R 104 und C 103 gebildete Oszillator langsam zu schwingen und löst so einen Reset des Prozessors aus. Zusätzlich wird über IC 104 D und IC 104 E das Sollwertsignal gesperrt und so ein unkontrolliertes Durchsteuern der Endstufe unterbunden.

Um Abgleich- und Einstellwerte dauerhaft und unabhängig von der Versorgungsspannung ablegen zu können, ist ein nichtflüchtiges, wiederbeschreibbares Speicherelement erforderlich. Zum Einsatz kommt ein ferroelektrisches EEPROM (IC 105) vom Typ FM 24C04 mit einer

Kapazität von 512 Byte, das über die I²C-Leitungen SDA und SCL mit den Ports 1.6 und 1.7 verbunden ist.

Das Displaymodul wird, wie bereits erwähnt, über eine parallele 8-Bit-Schnittstelle mit Daten versorgt. Außerdem sind noch die Steuerleitungen „Register Select“ (Port 2.6) und „Enable“ (Port 2.7) notwendig. Über die Display-Pins 15 und 16 ist die LED-Hintergrundbeleuchtung angeschlossen. Sie kann über den Transistor T 100, der über das Latch IC 103 angesteuert wird, ein- bzw. ausgeschaltet werden. Der Trimmer R 100 dient zur Einstellung des Display-Kontrastes.

Die Taster TA 100 bis TA 103 und der Drehimpulsgeber S 100 sind direkt mit den zugehörigen Portpins verbunden, wobei der Drehimpulsgeber bei Betätigung an Port 3.3 den internen Interrupt 1 auslöst. C 100 und C 101 entprellen die Signale.

Sollwertzeugung

Wie im Teil 1 dieses Artikels bereits erwähnt, ist eine reine digitale Lösung für die Generierung des Ansteuersignales aufgrund der dynamischen Anforderungen nicht mit vertretbarem Aufwand realisierbar.

Somit ist im ersten Schritt eine Wandlung der digital vom Prozessor erzeugten bzw. verwalteten Steuerwerte in entsprechende analoge Spannungen notwendig.

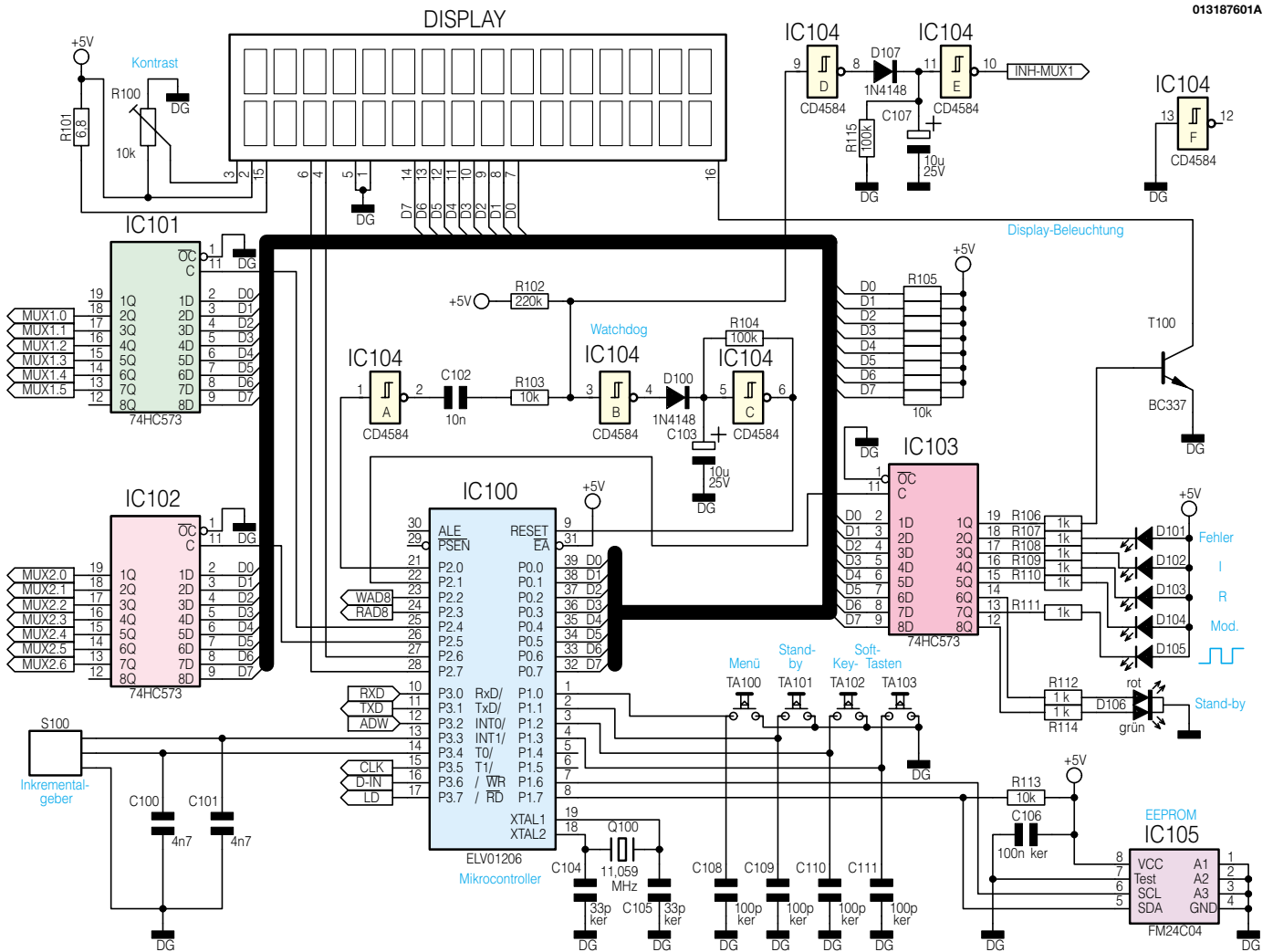


Bild 5: Schaltung des Digitalteils

Um innerhalb des großen zu überstreichenden Bereiches (z. B. 0 A bis 40 A für den Strom-Sollwert) eine ausreichend feine Abstufung zu erreichen, ist ein Wandler mit entsprechend hoher Auflösung erforderlich. Zum Einsatz kommt ein Digital-Analog-Wandler vom Typ LTC 1658 (IC 300) mit einer Auflösung von 14 Bit, der über die Leitungen CLK, D-IN und LD seriell angesteuert wird. Die Z-Diode D 300 erzeugt die zum Erzielen der Wandlergenauigkeit benötigte stabile Referenzspannung. Da nur ein Wandlerbaustein zur Bereitstellung der insgesamt 4 benötigten Vorgabesignale verwendet wird, ist eine Zwischenspeicherung in 4 Sample-and-Hold-Gliedern (IC 303 A/B, IC 304 A und IC 308 A mit den vorgeschalteten R-C-Kombinationen) erforderlich, auf die der Multiplexer IC 301 regelmäßig das entsprechende Signal schaltet.

Bei den ersten beiden so vorgehaltenen Signalen (IC 303 A und B) handelt es sich um die Sollwerte (Strom bzw. Leitwert). Zwischen diesen wird im Pulsbetrieb mittels des CMOS-Schalters IC 305 X mit der eingestellten Frequenz gewechselt. Über die Schalter Y und Z (IC 305) ist außerdem bei externer Modulation das an Buchse

BU300 einspeisbare Modulationssignal aufgeschaltet. Die Empfindlichkeit wird entsprechend der Widerstandsverhältnisse $R\ 312 + R\ 308$ zu $R\ 311 + R\ 310 + R\ 308 = 10:1$ über die Steuerleitungen MUX 1.4 und MUX 1.5 gewählt. Die Summierstufe um IC 306 A vereint diese Komponenten zu einem Sollwertsignal. Außerdem erfolgt an dieser Stelle über R 313 bei Bedarf (Überstrom) der Eingriff des Stromreglers. Der durch die Dioden D 301 und D 302 nur einseitig (nur strombegrenzend, nicht stromerhöhend) wirkende Regler IC 304 B mit C 306 und R 307 vergleicht den Ist-Strom „I-Ist“ mit dem von IC 304 A vorgehaltenen Maximalwert „I-Max“ und reduziert das Sollwertsignal ggf. so weit, dass der Ist-Strom dem Maximalstrom entspricht.

Die von der Summierschaltung (IC 306 A) verursachte Invertierung wird durch den invertierenden Verstärker IC 306 B rückgängig gemacht. Die Beschaltung mit den Dioden D 305 und D 306 verhindert negative Ansteuersignale, z. B. im extern modulierten Modus.

Die Bereichswahl erfolgt über den Multiplexer IC 309. Abhängig von den Steuersignalen „MUX 1.0“ bis „MUX 1.2“ wird der Ausgang (Pin 3) mit einem der Eingän-

ge verbunden. Ist der Eingang 4 (Pin 1) aktiviert, so erfolgt die Ansteuerung direkt mit dem Sollwertsignal. Dies entspricht der I-Kennlinie (Betriebsarten: Konstantstrom, Pulsstrom, externe Strommodulation und Entladen). In den Betriebsarten Konstantwiderstand, Pulsstrom und externe Leitwertmodulation entspricht das Sollwertsignal (von IC 306 B kommend) dem Leitwert. Gemäß der Formel $I = G \cdot U$ wird dieses durch den Analogmultiplizierer IC 307 mit der Lastspannung zu einem Strom-Sollwert verknüpft. Da sich die Genauigkeit der Multiplikation mit sinkender Eingangsspannung verschlechtert, werden kleine Leitwerte nicht durch eine kleine Vorgabespannung realisiert, sondern durch Herunterteilen in 3 Bereiche mittels der Spannungsteiler R 317, R 318, R 319. Abhängig vom eingestellten Widerstandswert wählt die Software einen der Eingänge 1 bis 3 des Multiplexers IC 309 und bewertet den ausgegebenen Leitwert mit einem entsprechenden Faktor. Ist einer der anderen Eingänge des Multiplexers (0, 5, 6, 7) aktiv, so sperrt die Endstufe. Dies entspricht dem Stand-by-Modus.

Die folgende Stufe mit IC 310 realisiert die Begrenzung der Stromanstiegsge-

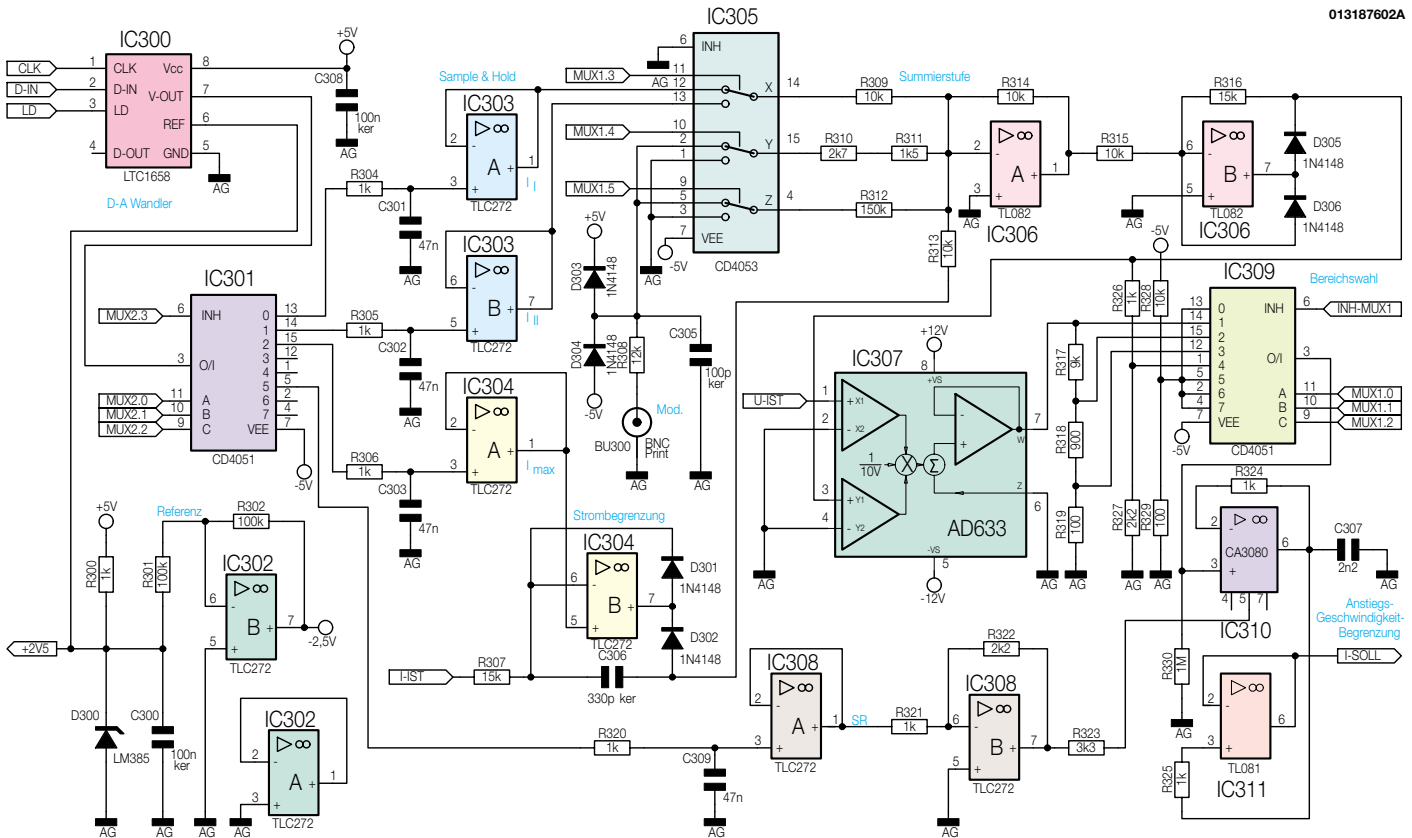


Bild 6: Schaltung der Sollwertzeugung

schwindigkeit. Bei IC 310 handelt es sich um einen sog. Transkonduktanz-Verstärker vom Typ CA 3080. Er entspricht vom Prinzip einem normalen Operationsverstärker, besitzt jedoch keinen Spannungsausgang, sondern einen hochohmigen Stromausgang. Das Verhältnis von Differenz-Ausgangsstrom zu Differenz-Eingangsspannung wird als Transkonduktanz bezeichnet. Beim vorliegenden CA 3080 kann diese Verstärkung durch einen Strom in den zusätzlichen Steuereingang (Pin 5) verändert werden.

Da von diesem Steuerstrom auch der bei Übersteuerung fließende, maximale Ausgangsstrom abhängt, entsteht durch das Beschalten des Ausgangs mit einem Kondensator ein Integrator mit einstellbarer Steilheit. Die Rückführung des Ausgangs (Pin 6) auf den invertierenden Eingang (Pin 2) über R 324 bewirkt bei einer Spannungsänderung am Eingang (Pin 3) ein Übersteuern von IC 310. Vom Ausgang her fließt so lange ein konstanter Strom in den Kondensator, bis die Eingangsspannung erreicht ist. Hierdurch entsteht die gewünschte Rampenfunktion.

Über den als Impedanzwandler geschalteten Operationsverstärker IC 311 wird der hohe Ausgangswiderstand von IC 310 herabgesetzt und so das Signal „I-Soll“ zur Ansteuerung der nachfolgenden Stromregler bereitgestellt.

Endstufe

Die zu belastende Gleichspannung wird

über die Polklemmen „+“ und „-“ zugeführt. Zum Schutz vor Überspannung, z. B. durch statische Entladung verursacht, ist die Transil-Schutzdiode D 400 parallel geschaltet. Die Leistung wird in 6 parallel geschalteten FETs vom Typ BUZ 102 umgesetzt. Eine gemeinsame Ansteuerung dieser FETs ist aufgrund der Exemplarstreuungen und der dadurch zu erwartenden ungleichmäßigen Leistungsaufteilung nicht möglich. Deshalb wird jeder FET mit einer eigenen Ansteuer- und Stromregelschaltung betrieben. Die 6 Stufen sind völlig identisch aufgebaut, sodass die Beschreibung beispielhaft an der Ansteuerung von T 412 erfolgen soll. Das in seiner Anstiegsgeschwindigkeit begrenzte Strom-Sollwert-Signal wird über den Spannungsteiler R 410, R 411 zugeführt. Der als Regler fungierende Operationsverstärker IC 410 vergleicht diese Spannung an seinem nichtinvertierenden Eingang (Pin 3) mit dem auf seinen invertierenden Eingang (Pin 2) geführten Signal, das dem tatsächlichen Strom entspricht. Sind diese nicht identisch, so ändert sich die Ansteuerung über den Ausgang (Pin 6) entsprechend.

Die Komplementär-Emitterfolger-Stufe T 410/ T 411 stellt den zum Umladen der Gate-Kapazitäten erforderlichen Strom bereit. Die Stabilität des Reglers bei gleichzeitigen guten dynamischen Eigenschaften wird durch die Beschaltung mit R 414, C 413, C 411 und C 412 erreicht.

D 410 verhindert, dass der Regler bei einem Sollwert von Null und darunter in

die negative Übersteuerungsgrenze fährt (der Laststrom kann nicht kleiner als Null werden). Die Erfassung des fließenden Laststroms erfolgt über den Shunt R 416. Dieses Signal wird außerdem über den Widerstand R 415 herausgeführt und mit den stromproportionalen Signalen der fünf anderen Stufen zum Gesamtstrom zusammengefasst.

Um die Wärme von den Leistungs-FETs effizient abführen zu können, sind diese auf einem ELV-Lüfter-Kühlkörper LK 75 montiert.

Messschaltung

Das den fließenden Laststrom repräsentierende Signal „I-Mess“ muss vor der Analog-Digital-Wandlung zunächst verstärkt werden. Hierzu dient die Verstärkerschaltung IC 200 A, bzw. für den über R 204 und C 200 gebildeten Mittelwert von „I-Mess“, IC 200 B. Außerdem erfolgt für die Bereitstellung des stromproportionalen Messsignals an der Buchse BU 200 noch eine separate Verstärkung über IC 200 C.

Die Lastspannung („U-Mess“) wird über die Spannungsteiler R 207, R 208 bzw. R 209, R 210 heruntergeteilt. C 202 dient hierbei zur Unterdrückung von Störungen bzw. C 203 zur Mittelwertbildung. Die Teilerschaltung R 205, R 206 und C 201 dient der Zuführung der Lastspannung an den Multiplizierer in der Sollwertzeugung.

Zum Bestimmen der High- und Low-Werte von Strom und Spannung im Puls-

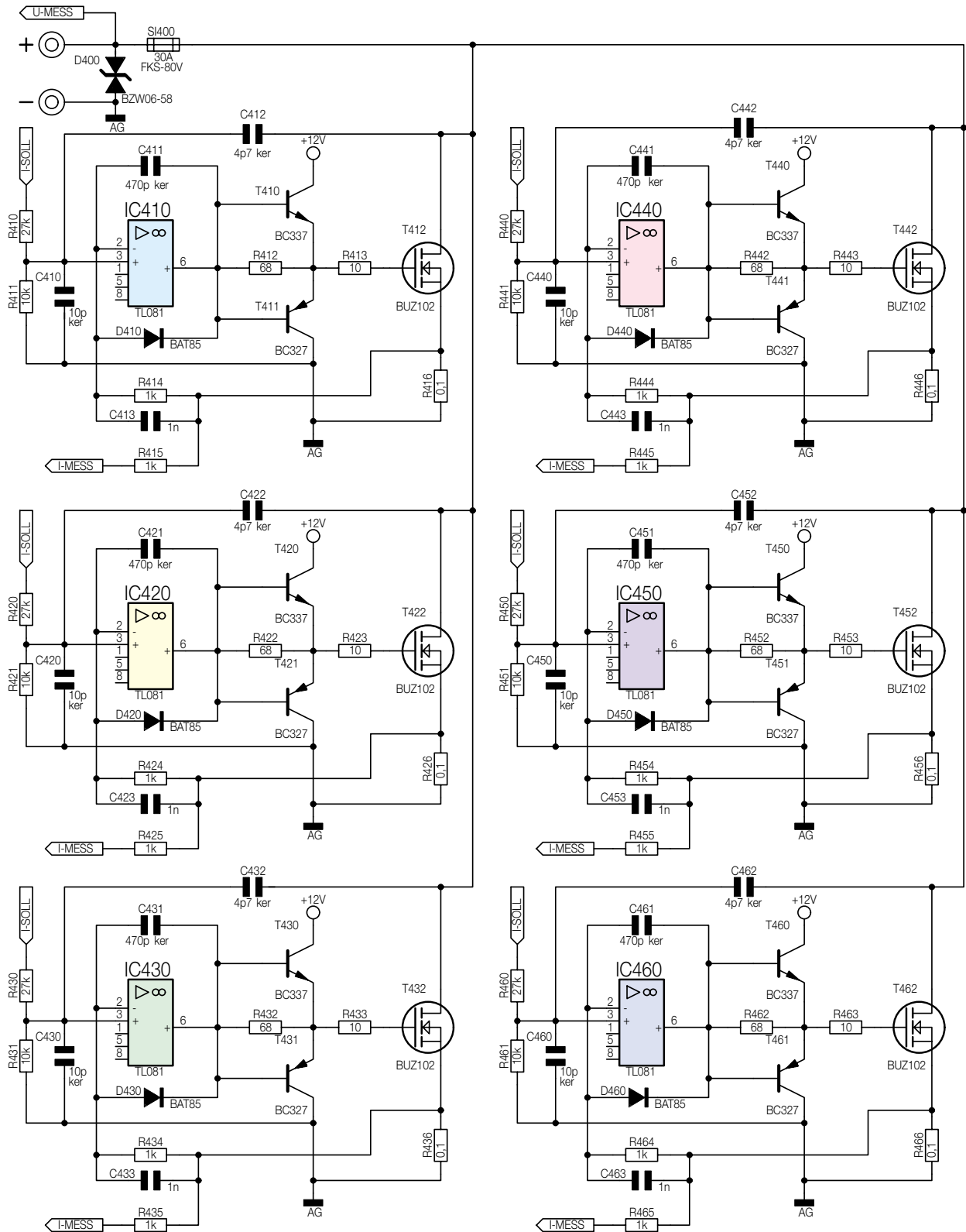


Bild 7: Schaltung der Endstufe

betrieb ist ein Erfassen während der jeweiligen Phasen (High bzw. Low) erforderlich. Da die Messwandlung bei hohen Frequenzen aufgrund der geringen Periodendauer nicht synchron erfolgen kann, ist eine Zwischenspeicherung notwendig. Hierzu dienen Sample-and-Hold-Glieder, die aus den vier Operationsverstärkern IC 203 A bis D und der zugehörigen R-C-Beschaltung an ihren Eingängen gebildet

werden. Das Nachsamplen erfolgt synchron zum Umschaltsignal (MUX 1.3) über den Multiplexer IC 201.

Zur Digitalisierung der so bereitgestellten Signale sind zwei verschiedene Wandler implementiert. Der erste, an dem die Mittelwerte und die Momentanwerte von Strom und Spannung sowie das Signal der Kühlkörpertemperatur „Temp“ gewandelt werden, ist IC 207. Hierbei handelt es sich

um einen voll integrierten, 8-Bit-/ 8-Kanal Analog-Digital-Wandler, der nach dem Wägeverfahren arbeitet. Über den parallelen Datenbus „D 0“ bis „D 7“ erfolgt sowohl die Auswahl des Kanals als auch das Auslesen des Wandlungsergebnisses. Die Signale „RAD 8“ und „WAD 8“ des Prozessors (IC 100) steuern die Schreib- und Lesevorgänge.

Der zweite Wandler ist ein aus mehreren

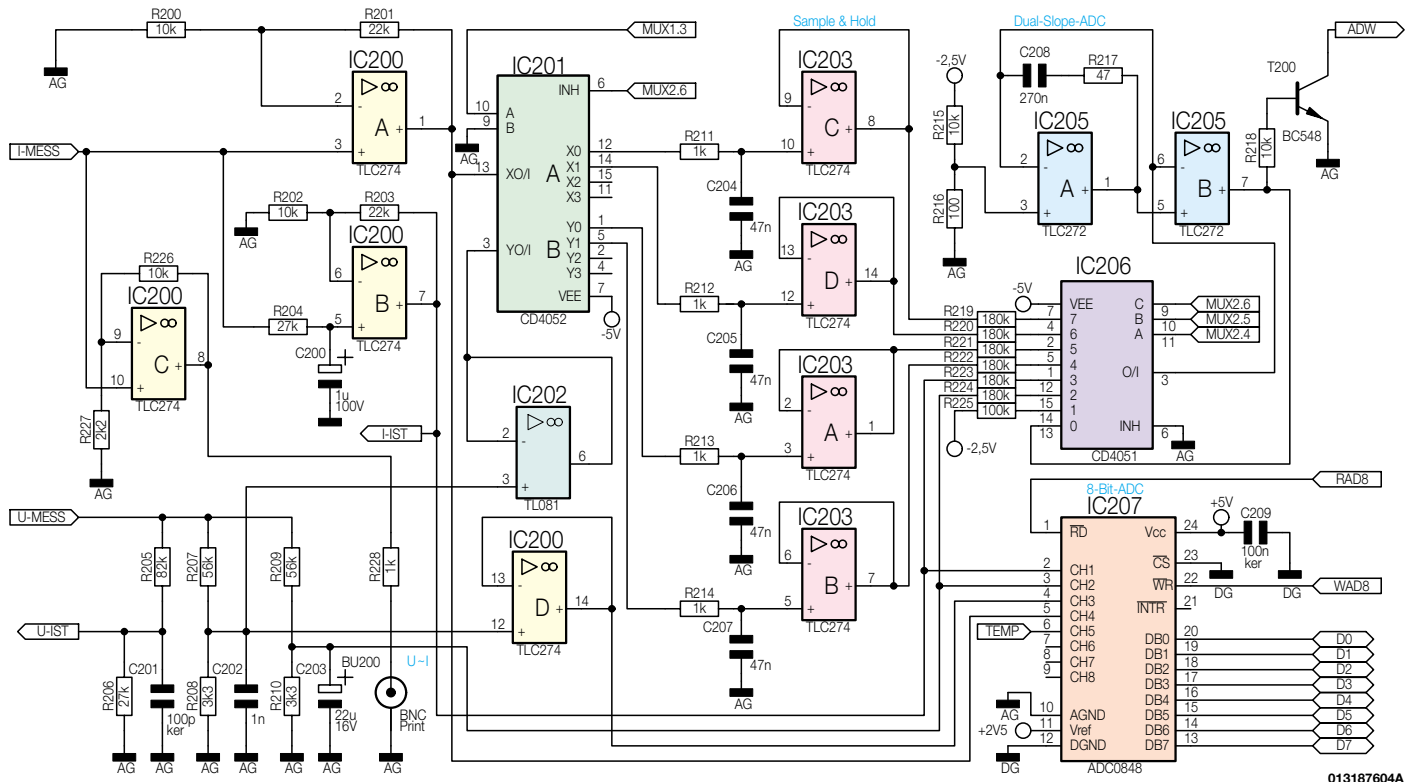


Bild 8: Messschaltung der EL 9000

Einzelkomponenten aufgebauter Dual-Slope-Wandler, der bereits in zahlreichen anderen Geräten aus dem Hause ELV erfolgreich zur Anwendung kommt. Trotz des einfachen und preiswerten Aufbaus, bestehend aus einem CMOS-Multiplexer (IC 206), einem Doppel-OP (IC 205) und einigen diskreten Komponenten, ist die erreichbare Genauigkeit sehr gut. In der vorliegenden Anwendung liegt die erzielte Auflösung bei 14 Bit. Über die Steuerleitungen „MUX 2.4“ bis „MUX 2.6“ wählt der Prozessor den zu wandelnden Messkanal am Multiplexer IC 206 (Eingang 2 bis 7) an. Durch den zugehörigen Widerstand (R 219 bis R 224) fließt jetzt ein Strom in den aus IC 205 A, C 208 und R 217 gebildeten invertierenden Integrator. Die Spannung am Ausgang des Integrators fällt linear, wobei die Steilheit von der Höhe des Stroms und damit auch von der Messspannung abhängig ist. Nach einer definierten Zeit wechselt der Prozessor auf das Referenzsignal an Kanal 1 des Multiplexers. Da es sich bei diesem Signal um eine negative Spannung handelt, kehrt sich die Integrationsrichtung um. Erreicht die Ausgangsspannung des Integrators den Nulldurchgang, so schaltet der Komparator IC 205 B. Diese Flanke löst über R 218 und T 200 einen Interrupt im Prozessor aus, durch den ein intern mitlaufender Zähler gestoppt wird. Somit sind die Zeiten zum Auf- und Abintegrieren exakt bekannt und über das Verhältnis dieser zueinander kann die Größe der angelegten Spannung bestimmt werden. Die geringfügige Verschiebung der Nulllage in den negativen Bereich über den

Spannungsteiler R 215/R 216 verhindert Probleme mit der Offsetspannung des Operationsverstärkers.

Schnittstelle

Die EL 9000 kann über die 9-polige Sub-D-Buchse BU 500 mit der seriellen Schnittstelle eines PCs verbunden werden. Damit sich über die Masse vom PC (im Allgemeinen mit dem Schutzleiter verbunden) keine Kurzschlüsse bzw. Masseschleifen mit der des Prüflings oder auch angeschlossener Messgeräte bilden, ist es notwendig, dass die Schnittstelle galvanisch vom Rest des Gerätes getrennt ist. Diese Trennung realisieren die Optokoppler IC 500 und IC 501. Das an Port 3.1 des Controllers ausgegebene „TXD“-Signal steuert den Transistor T 500 an, dessen Kollektorstrom durch die Sendediode von IC 500 fließt. Der Fototransistor der Empfängerseite steuert entsprechend dem übertragenen Lichtsignal T 501 an. Das so entstandene Signal mit den typischen positiv/negativ Logikpegeln steht an Pin 2 von BU 500 an.

Über Pin 3 von BU 500 gelangen die Befehle und

Daten vom PC in die EL 9000. T 502 verstärkt den Strom und steuert in seinem Kollektorkreis die Sendediode von IC 501 an. Das Datensignal „RXD“ wird vom Empfänger-Fototransistor direkt auf Port 3.0 vom Controller geführt.

Netzteil und Lüftersteuerung

Die Netzspannung gelangt über den zweipoligen Netzschalter und je eine Sicherung SI 1 bzw. SI 2 auf die beiden

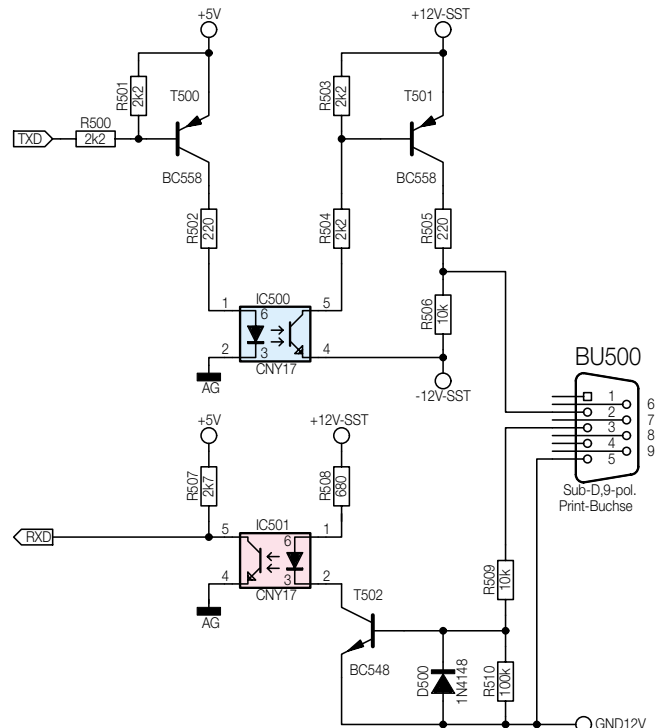


Bild 9: Schaltung der Schnittstelle

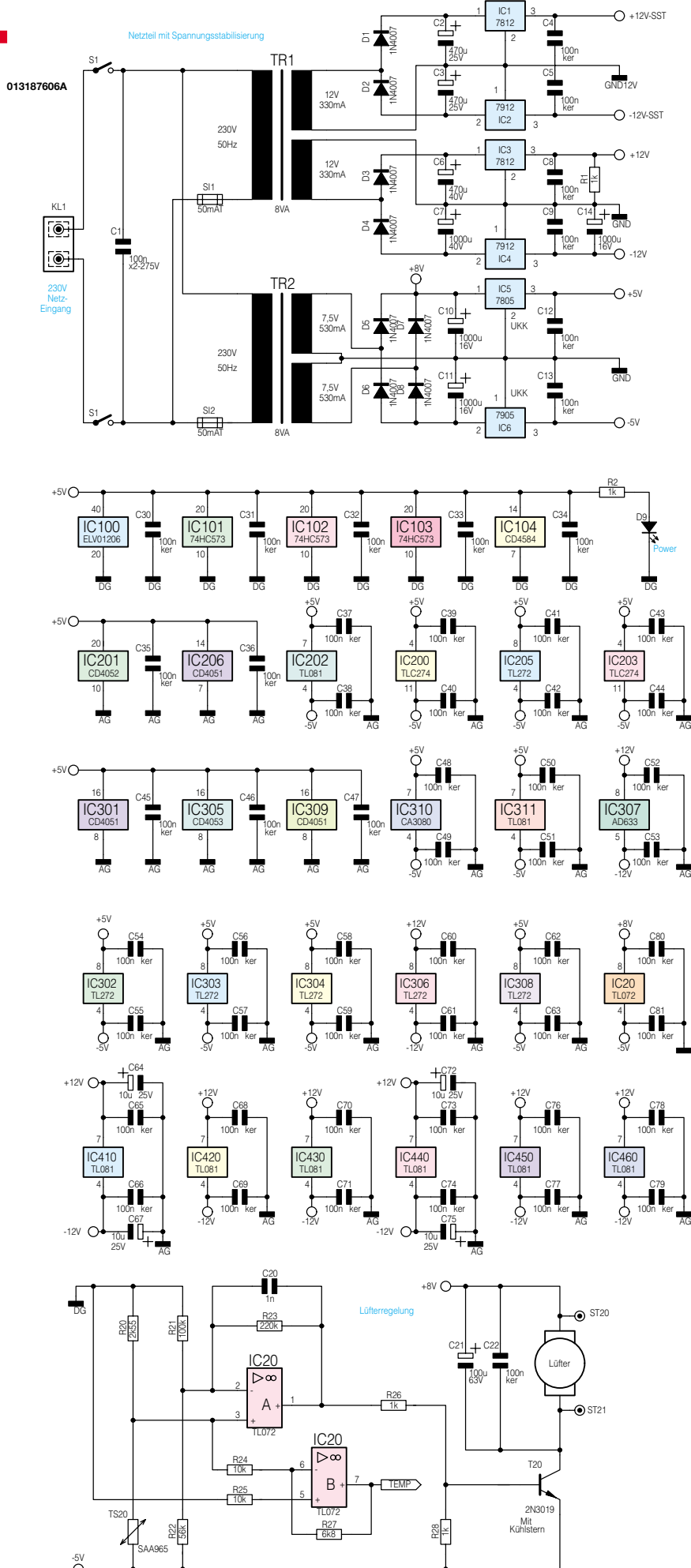


Bild 10: Schaltung des Netzteils mit Lüftersteuerung

Transformatoren. Die obere Wicklung von TR 1 dient ausschließlich zur Versorgung der seriellen Schnittstelle. Dies ist erforderlich, um die vollständige galvanische Trennung zu erreichen. D 1 bzw. D 2 realisieren eine Einweg-Gleichrichtung zur Gewinnung einer positiven und einer negativen Spannung, die mittels der Kondensatoren C 2, C 3 und der Spannungsregler IC 1, IC 2 auf ± 12 V stabilisiert wird.

Der unteren Wicklung von TR 1 folgt eine identische Spannungserzeugung von ± 12 V u. a. für die Versorgung der Endstufen-Ansteuerung. Die Beschaltung mit R 1 und C 14 gewährleistet einen Abbau der Spannungen in definierter Reihenfolge bei Netzausfall oder Abschalten des Gerätes.

Fast alle weiteren Schaltungsteile arbeiten mit 5 V oder ± 5 V. Der entsprechend große Strombedarf erfordert einen eigenen 8-VA-Trafo (TR 2). Die Ausgangswchselspannungen dieses Trafos werden in Mittelpunktschaltung (D 5 bis D 8) gleichgerichtet, mit Elkos (C10, C11) geglättet und über Festspannungsregler (IC 5, IC6) stabilisiert. U-Kühlkörper unter IC 5 und IC 6 verbessern deren Wärmeabfuhr.

An der Stirnseite des Kühlkörpers LK 75, auf dem die Endstufentransistoren montiert sind, ist ein leistungsfähiger Lüfter montiert. Dieser drückt Luft durch das mit Kühlrippen ausgestattete Innere des LK 75, die anschließend erwärmt aus der Geräte-rückseite austritt. Um hierbei eine unnötige Lärmentwicklung zu vermeiden, ist die Lüfterdrehzahl direkt von der Kühlkörpertemperatur abhängig. Die zugehörige Ansteuerschaltung ist mit im Netzteilsschaltbild dargestellt. Mit steigender Temperatur des Temperatursensors TS 20 steigt dessen Widerstand und damit auch die Spannung am nichtinvertierenden Eingang von IC 20 A. Folglich steigt die Ausgangsspannung von IC 20 A und damit der Basisstrom von T 20. Dieser steuert zunehmend durch, die Lüfterdrehzahl erhöht sich und wirkt einem weiteren Ansteigen der Temperatur entgegen. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen zugeführter und abgeführter Energie ein, wodurch die Temperatur unterhalb kritischer Werte bleibt. Zusätzlich stellt der invertierende Operationsverstärker IC 20 B eine temperaturproportionale Spannung bereit. Sie wird dem Controller über den AD-Wandler IC 207 zugeführt, der somit eine Überhitzung des Gerätes, etwa durch Lüfterausfall oder zu hohe Umgebungstemperatur (Wärmestau) erkennen und eine Sicherheitsabschaltung durchführen kann. Die zum Lüfter parallel geschalteten Kondensatoren C 21 und C 22 dienen der Siebung und Entstörung.

Damit ist die detaillierte Schaltungsbeschreibung abgeschlossen, und im nächsten Teil dieser Artikelserie folgt die Aufbaubeschreibung. **ELV**