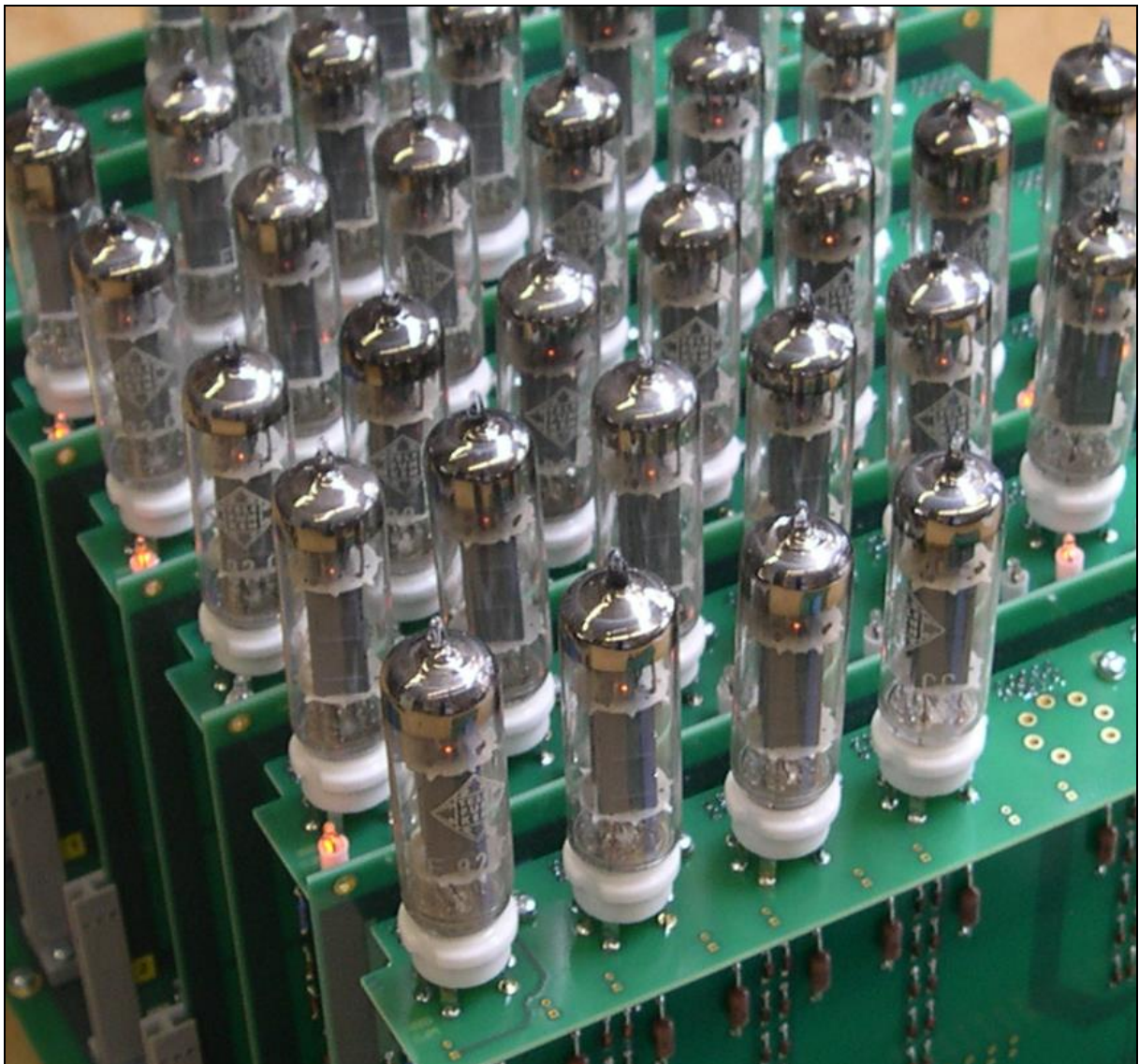
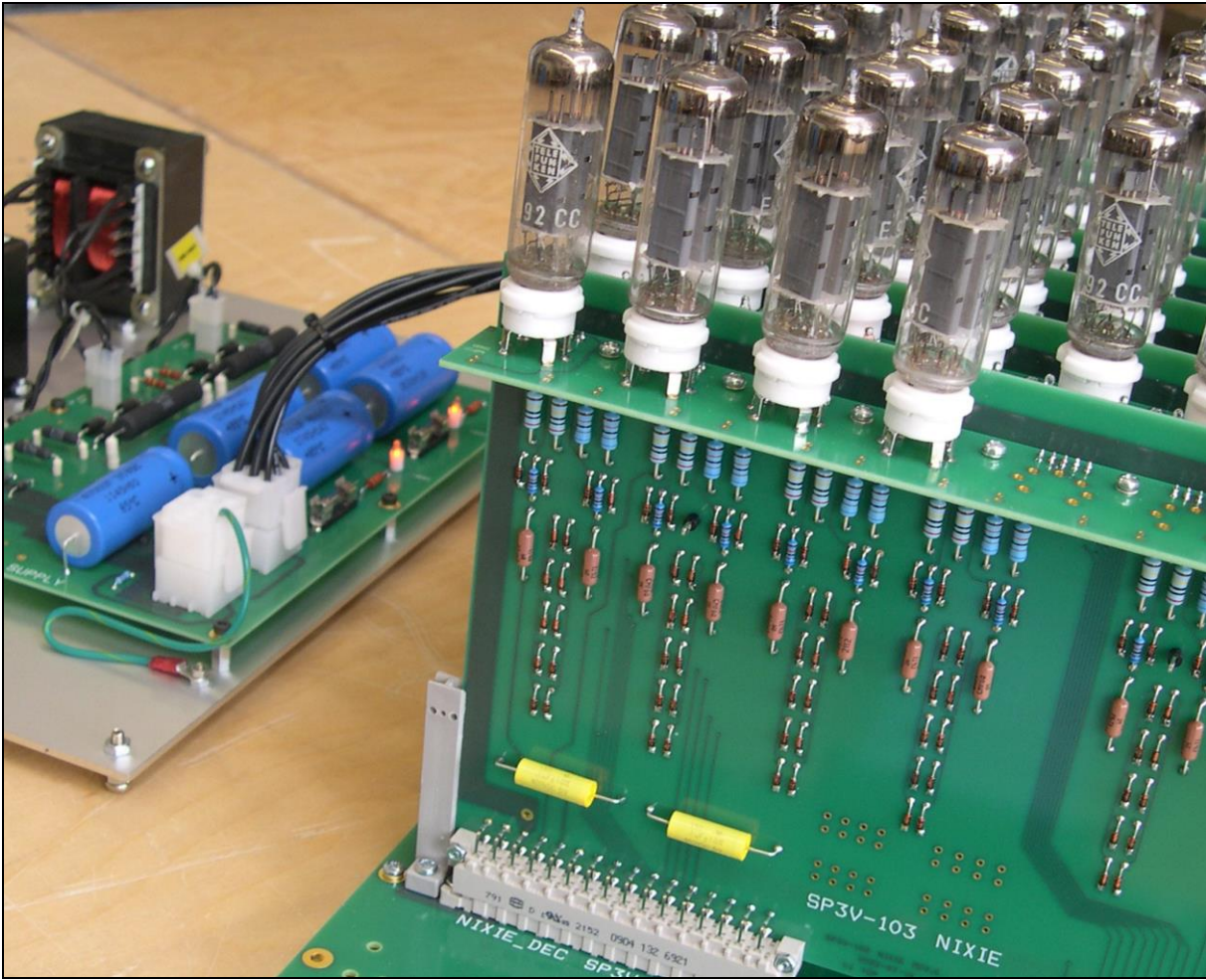
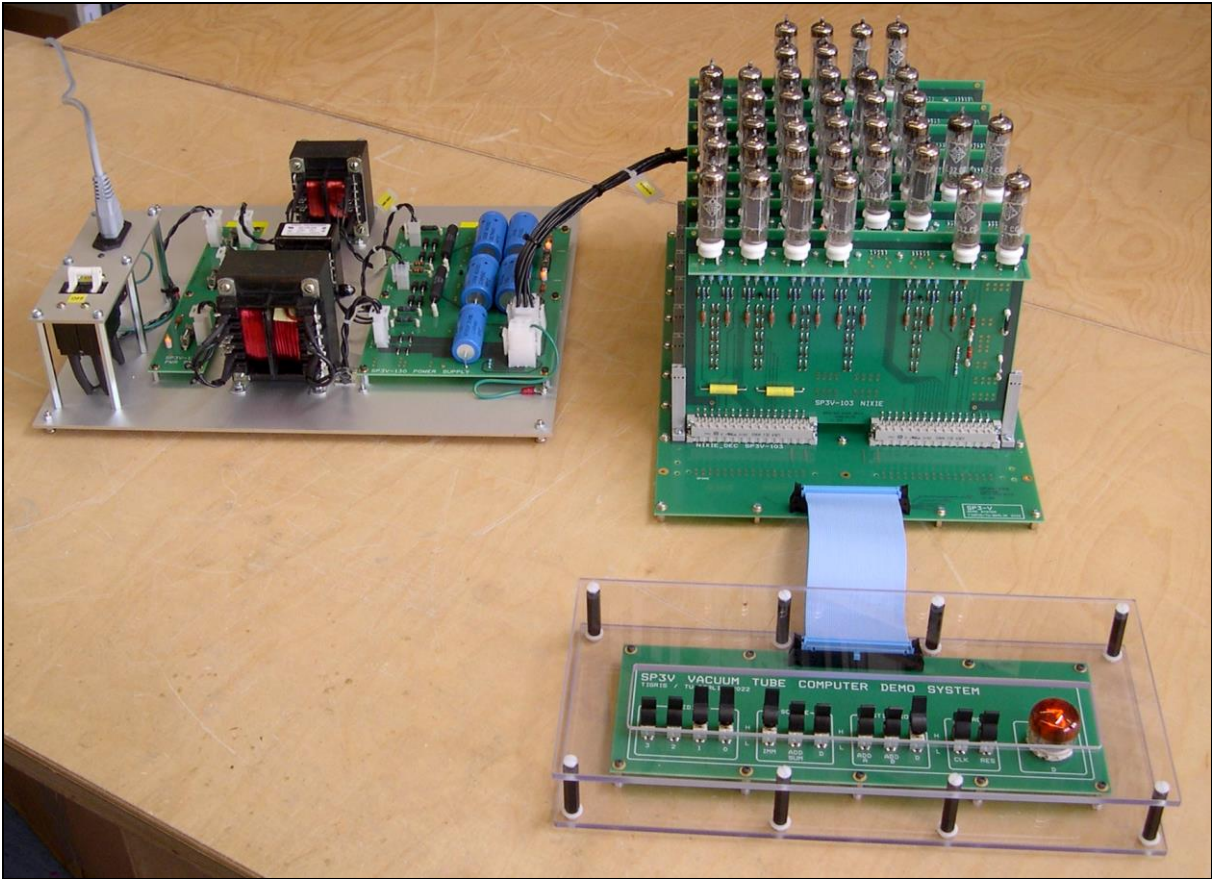


Der Demonstrator für den Röhren-Rechner SPACE AGE 3-V.







Der Demonstrator für den Röhren-Rechner SPACE AGE 3-V	1
Vorbemerkung	5
Dieser Bericht dokumentiert den Entwurf, Aufbau und Inbetriebnahme eines Addierers, wie sie im Jahr 2022 im Rahmen eines Lehrauftrags des Verfassers am Fachgebiet EMSP der TU-Berlin, in Zusammenarbeit mit der Firma TIGRIS-Elektronik GmbH, durchgeführt wurde.	5
Die Idee	6
Die Konzeption	7
Die Auswahl der Schlüsselbauteile.....	7
Die Planung des mechanischen Aufbaus.....	8
Die Planung des Demo-Systems zur Vorstellung auf der VCFB 2022	11
Die Konzeption des 4-Bit Datenbussystems.....	15
Der Detailentwurf	18
Der Entwurf des NAND-Grundgatters	18
Die Betrachtung des Verhaltens des Grundgatters bei abweichenden Versorgungsspannungen	26
Die Ergänzung des NAND-Grundgatters um eine Schutzbeschaltung	34
Die Erweiterung des NAND-Grundgatters um eine OR-Verknüpfungsebene	35
Der Aufbau eines Registers aus dem AND / NOR-Gatter	41
Der Entwurf der Baugruppe SP3V-101 ADD_HEX	45
Der Entwurf der Baugruppe SP3V-102 REG	48
Der Entwurf der Baugruppe SP3V-103 NIXIE	50
Der Entwurf der Baugruppe SP3V-104 CONST.....	53
Der Entwurf der Baugruppe SP3V-105 BUS	54
Der Entwurf des Panels SP3V-107.....	56
Der Entwurf des Netzteils SP3V-130 für das Demo-System.....	57
Abschätzung des Stromverbrauchs:.....	57
Auslegung Zweig 12.6VAC/16VDC:	59
Auslegung Zweig + 300V:	59
Auslegung Zweig - 300V:.....	59
Der Entwurf des Testadapters SP3V-140 für die Baugruppen des Demo-Systems.....	60
Inbetriebnahme und Test	63
Die Inbetriebnahme der Baugruppe SP3V-101 ADD-HEX	63
Die Inbetriebnahme der Baugruppe SP3V-102 REG.....	67
Die Inbetriebnahme der Baugruppe SP3V-103 NIXIE.....	77
Die Inbetriebnahme der Baugruppe SP3V-104 CONST	77
Die Inbetriebnahme der Baugruppe SP3V-105 BUS.....	78
Die Inbetriebnahme des Gesamtsystems	79
Die Inbetriebnahme auf der funktionalen Ebene	79
Weitere Betrachtungen.....	85
Detaillierte Untersuchung des Übertragungsverhaltens eines einzelnen NAND-Gatters.....	86
Untersuchung des Verhaltens bei unsymmetrischer Versorgung	86
Aufnahme der Kennlinien verschiedener Röhrenexemplare aus verschiedenen Quellen	86
Betrachtung des Zeitverhaltens	86
Fotos.....	103
Zusammenfassung aller Änderungen und bekannten Fehler	117

Vorbemerkung

Dieser Bericht dokumentiert den Entwurf, Aufbau und Inbetriebnahme eines Addierers, wie sie im Jahr 2022 im Rahmen eines Lehrauftrags des Verfassers am Fachgebiet EMSP der TU-Berlin, in Zusammenarbeit mit der Firma TIGRIS-Elektronik GmbH, durchgeführt wurde.

Dieser Bericht ist als Erfahrungsbericht und nicht als detaillierte Bauanleitung zu verstehen. In diesem Bericht ist der gesamte Arbeitsprozess, von der Konzeption, über den Detailentwurf bis zur Inbetriebnahme ausführlich und nachvollziehbar beschrieben.

Bitte beachten Sie unbedingt die folgenden Hinweise:

Diese Schaltung arbeitet mit gefährlicher Spannung. Kondensatoren können tödliche Spannungen über längere Zeit halten. Stellen Sie daher unbedingt den Berührungsschutz sicher und verbinden Sie alle berührbaren Metallteile mit einer sicheren Erdung ausreichenden Querschnitts.

Sie können den Verfasser, Henry Westphal, unter hw@tigris.de kontaktieren.

Die Idee

Im Berichtszeitraum wurde ein Demonstrator erstellt, der einen Teil des Datenpfades des geplanten zukünftigen Röhren-Rechners SPACE AGE 3-V darstellt. Mit Hilfe dieses Demonstrators wurde die für den SPACE AGE 3-V vorgesehene Technologie erfolgreich verifiziert.

Bei der Realisierung des Röhren-Rechners ES24 für das Heinz Nixdorf-Museumsforums (HNF) in den Jahren 2020 und 2021 hat sich gezeigt, dass das dort verwendete als Einzelanfertigung hergestellte Gehäuse sowie die dort verwendete stabilisierte Stromversorgung einen großen Anteil der Gesamtkosten ausmachten.

Daher wurde für den SPACE AGE3-V ein Schaltungskonzept entworfen, das mit unstabilierten Versorgungsspannungen über einen großen Variationsbereich dieser Spannungen zuverlässig arbeitet. Weiterhin wurde ein Aufbaukonzept entworfen, das auf handelsüblichen 19-Zoll Gehäuseelementen basiert.

Im Vergleich zum ES24 ist durch die unregelmäßige Heizspannung jedoch mit einer höheren Ausfallrate der Röhre zu rechnen. Dies kann jedoch durch ein geeignetes Testkonzept aufgefangen werden. Im Gegensatz zu den für den ES24 verwendeten Röhren E90CC, die sehr selten sind, stehen für die im geplanten SPACE AGE 3-V zur Verwendung vorgesehenen Röhren E92CC große Lagerbestände, die bereits im Haus sind, zur Verfügung, so dass eine höhere Ausfallrate akzeptiert werden kann. Die Praxis hat jedoch gezeigt, dass es beim Betrieb von ca. 60 Röhren E92CC (Telefunken, gebraucht) in einer Digitaluhr mit unregelmäßiger Heizspannung und täglichem Einschaltvorgang über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren zu keinen einzigen Röhrenausfall gekommen ist.

Alle Schaltungsteile des SPACE AGE 3-V arbeiten rein zustandsgesteuert, so dass die Kurvengestalt der Taktsignale für die korrekte Funktion keine Rolle spielt. Es muss lediglich die Überlappung von verschiedenen Phasen des verwendeten Mehrphasentakts sicher vermieden werden. Die zustandsgesteuerte Arbeitsweise erlaubt einen einfachen und übersichtlichen PC-gestützten Funktionstest mit hoher Fehlerrate. Es werden keinerlei Echtzeitanforderungen an die Testsoftware gestellt.

Um die soeben beschriebenen Vorteile zu erreichen, wurde bewusst eine vergleichsweise lange Gatterlaufzeit im zweistelligen μ s-Bereich in Kauf genommen. Damit reduziert sich die mögliche Taktfrequenz auf den einstelligen kHz-Bereich. Dies stellt für die geplante Anwendung als Taschenrechner jedoch keine Einschränkung dar.

Weiterhin wurde die Gatterschaltung daraufhin ausgelegt, dass ein Ausgang eine große Zahl an bis zu 30 Eingängen anderer Gatter treiben kann, um die Zahl der notwendigen Röhren so gering wie möglich zu halten.

Die genannten Ziele wurden durch den Einsatz hochsperrender Siliziumdioden BAV21 in Verbindung mit hochohmigen Widerständen und einer vergleichsweise hohen Betriebsspannung von +/-300V erreicht.

Auch wenn in historischen Röhren-Rechnern aus den 1950-er Jahren Halbleiterdioden zum Einsatz kamen, muss man der Fairness halber hinzufügen, dass die damaligen Dioden deutlich höhere Sperrströme als eine heutige BAV21 hatten und dass vor allem die Stückpreise der Dioden nicht wie heute im unteren einstelligen Cent-Bereich liegen sondern mit einstelligen Dollar-Beträgen teilweise höher als die Stückpreise von Röhren waren. Die an dieser Stelle verwendete Schaltungstechnik mit großen Dioden-Matrixen zur Realisierung der kombinatorischen Verknüpfungen wäre in den 1950-er Jahren noch nicht realisierbar gewesen.

Um preisgünstige, als Standardprodukte verfügbare Gehäusekomponenten einsetzen zu können, wurde der mechanische Aufbau des SPACE AGE 3-V kompatibel mit dem weit verbreiteten 19-Zoll-Aufbausystem konzipiert. Die Standard-Einsteckkarte des SPACE AGE 3-V entspricht einer Doppelpackkarte (233 x 160mm) mit 8 Teilungseinheiten (40,3mm) und ist mit zwei Steckverbindern DIN 41612 32AC kontaktiert. Die Röhren ragen dabei aus der Ebene der Teilfrontplatten heraus und können mit einem Luftstrom gekühlt werden. Die Teilfrontplatten verhindern, dass dieser Luftstrom die Dioden und Widerstände auf der Leiterplatte aufheizt. Die Leiterplatten werden mit einem separaten Luftstrom gekühlt. Damit können die Sperrströme der Dioden klein gehalten werden, so dass große Diodenmatrixen für umfassende kombinatorische Verknüpfungen realisierbar sind.

Die Konzeption

Die Auswahl der Schlüsselbauteile

Röhren:

Es wurde die Grundsatz-Entscheidung getroffen, den gesamten Rechner mit nur einem einzigen Röhrentyp zu realisieren. Damit wird die Ersatzteilhaltung und das Tauschen defekter Röhren vereinfacht. Weiterhin lässt sich das Instandhaltungskonzept, wie beim ES24 geschehen, auf einen einfachen Röhrentester zur gleichzeitigen Prüfung mehrerer Röhren stützen, mit dem dann die letzte Stufe der Lokalisierung defekter Röhren durchgeführt wird.

Aufgrund von Vorüberlegungen und aus Gründen der Verfügbarkeit wurde die E92CC, eine Spezialröhre für Rechner-Anwendungen ausgewählt. Die Firma BTB stellte uns freundlicherweise einen großen Bestand dieser Röhre zu Sonderkonditionen für die universitäre Verwendung zur Verfügung.

Im Gegensatz zu üblichen Röhren für Funk- und Audio-Zwecke hat die E92CC eine spezielle Beschichtung der Kathode, die es erlaubt, die geheizte Röhre auch ohne Anodenstrom zu betreiben, ohne dass die Beschichtung dabei, wie bei üblichen Röhren, ihre Emissionsfähigkeit verliert. Die spezielle Beschichtung der E92CC (und anderer Röhren für digitale Zwecke) führt aber zu einem höheren Eigenrauschen. Daher kann die E92CC nicht für Audio- oder Funkzwecke verwendet werden.

Halbleiterdioden:

Es wird eine Diode mit folgenden Eigenschaften gesucht:

- Sperrspannung mindestens 200V
- Geringer Leckstrom
- Geringe Kapazität
- bedrahtetes, kleines, axiales Gehäuse
- Günstiger Preis
- Gute Verfügbarkeit

Der einzige bei Vorab-Recherchen als geeignet identifizierte Diodentyp ist die BAV21.

Bei Vergleich der Datenblätter verschiedener Hersteller fällt auf, dass der spezifizierte maximale Sperrstrom bei NXP niedriger als bei VISHAY und anderen Herstellern ist. Daher wird die BAV21 von NXP ausgewählt, mit den folgenden Kenndaten:

- Sperrspannung 200V dauerhaft / 250V kurzzeitig
- Leckstrom 3uA max. bei 200V und 80°C
- Kapazität 1,5pF
- Gehäuse DO-35
- 0,023 EUR/Stück bei Abnahme vom 10'000 Stück
- Bei Mouser ab Lager lieferbar

Es wurde weiterhin festgelegt, die Schaltungen mit einem Leckstrom von 3uA zu berechnen und gleichzeitig die Temperatur im Bereich der Dioden bei einem späteren Systemaufbau durch einen geeigneten Luftstrom auf 70°C zu begrenzen.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Röhrenfassungen:

In der Vergangenheit hat sich die folgende Ausführung von BTB-Elektronik bewährt:

Miniatur Print B7G Keramik
Standard

Bestellkürzel: MiniaturPriKera

Diese Fassung besteht aus Silberkontakten und einem Keramikkörper.

Es wurde entschieden, diese Fassungen erneut einzusetzen.

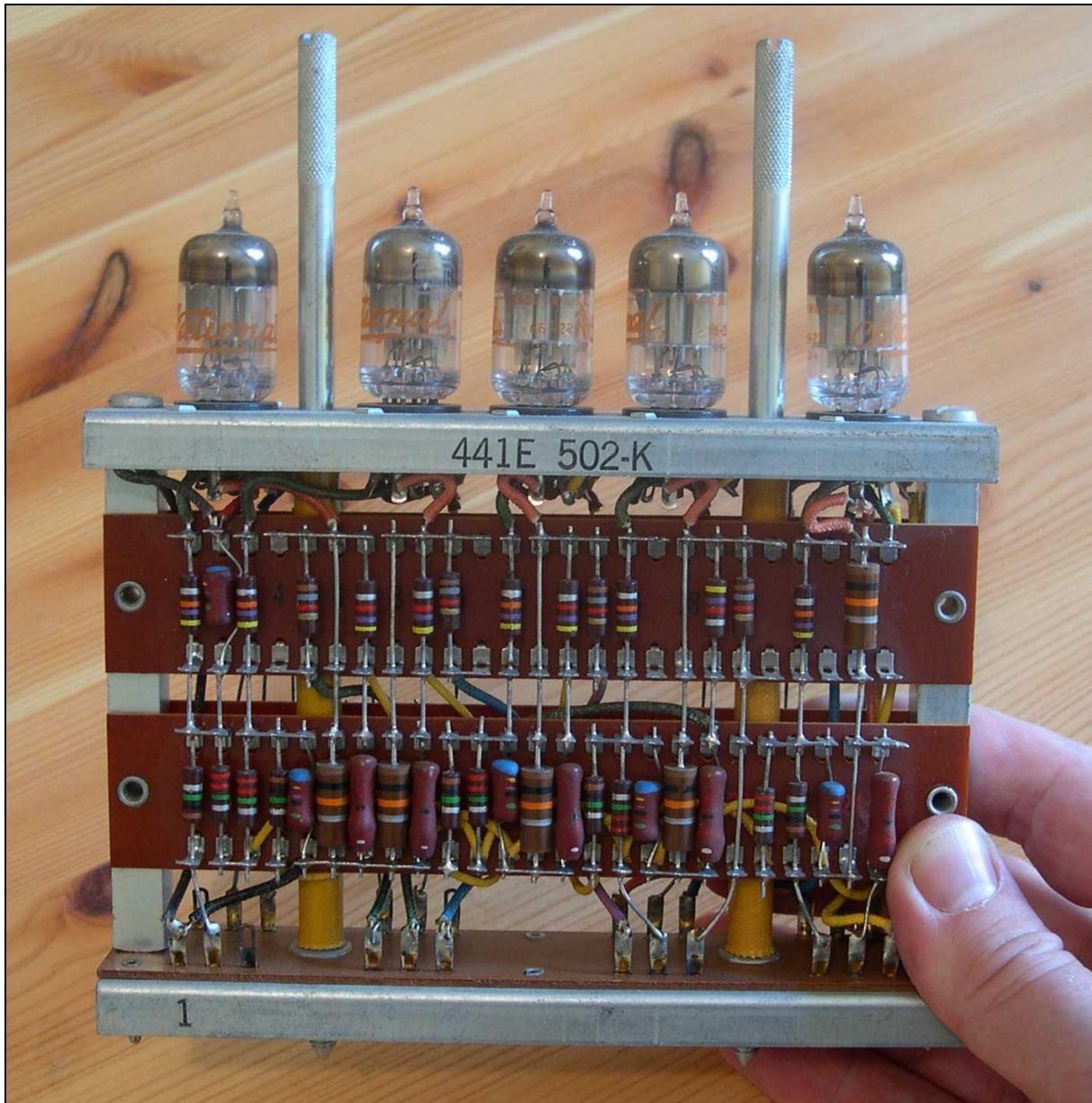
Die Planung des mechanischen Aufbaus

Der SPACE AGE 3-V wird vermutlich 1200 bis 1500 Röhren Umfassen. Daher ist der aus Gründen der Anschaulichkeit eigentlich zu bevorzugende offene, zweidimensionale Aufbau, wie er beim ES24 realisiert wurde, aus Platzgründen nicht auf den SPACE AGE 3-V übertragbar. Es soll daher das aus historischen Rechnern bekannte Aufbauprinzip Anwendung finden, bei dem sich die Beschaltung der Röhren „hinter“ den Röhren befindet und von diesen durch eine weitgehend luftundurchlässige Wand getrennt ist.

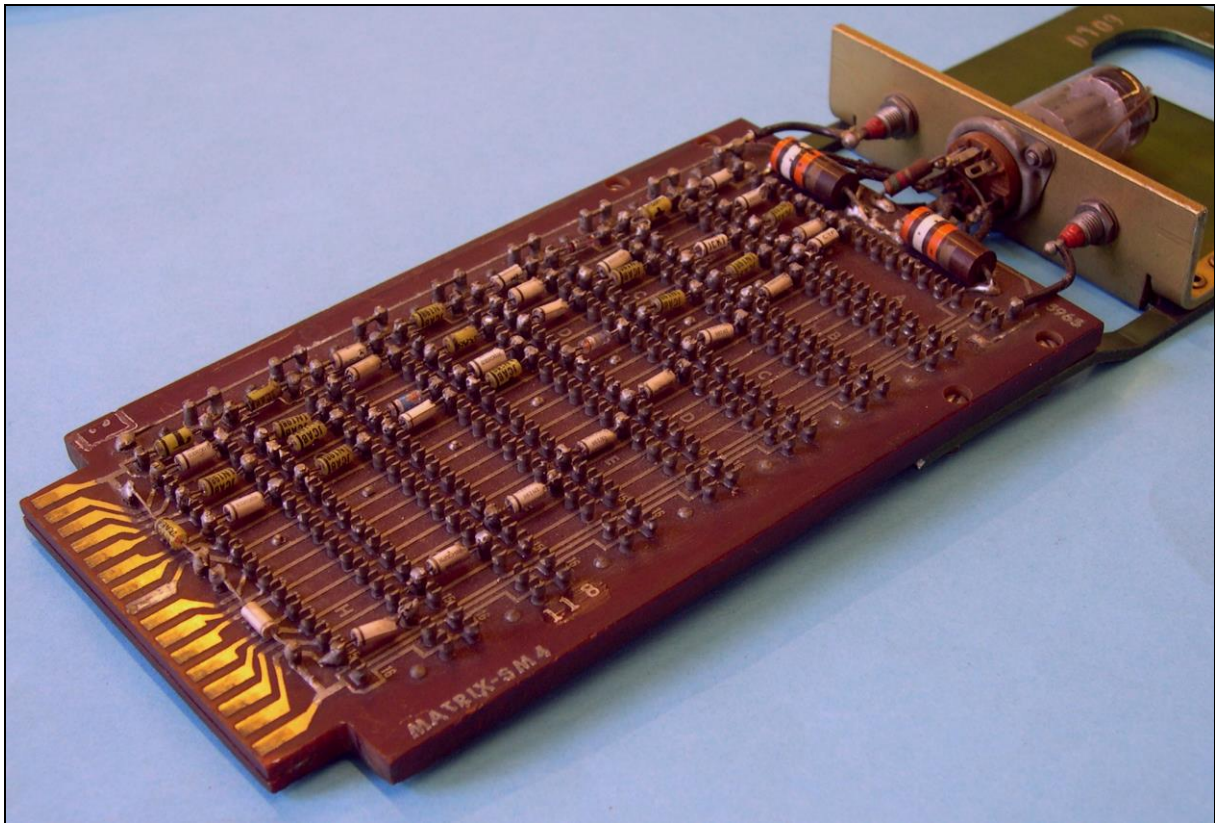
Damit können zur Kühlung der Röhren und zur Kühlung der Beschaltung zwei getrennte Luftströme verwendet werden. Damit wird insbesondere eine Aufheizung der Si-Dioden durch die Abwärme der Röhren vermieden. Dies ist von besonderer Bedeutung, da die Sperrströme der Si-Dioden exponentiell mit der Temperatur zunehmen.

Es wird als möglich angenommen, die Temperatur im Bereich der Kleinteile auf 70°C zu halten.

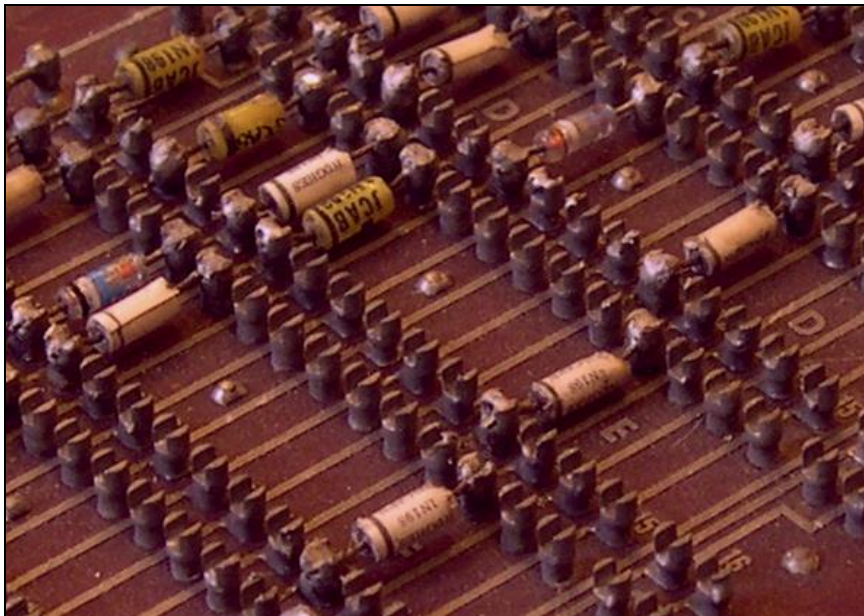
Die folgenden Abbildungen zeigen Teilansichten historischer Röhren-Rechner, die nach dem beschriebenen Prinzip aufgebaut sind. Das gezeigte Aufbauprinzip wurde von vielen Herstellern in sehr ähnlicher Form angewendet.



Modul aus einem Großrechner von NCR, Ende der 1950-er Jahre



Programmspeichermatrix (ROM) mit Germaniumdioden aus einem Röhren-Computer.



Detail der Programmspeichermatrix, ein Software-Update wurde durch Umlöten der Dioden ausgeführt.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Wie bereits erwähnt, wird das Prinzip der Konstruktion der Steckmodule der historischen Röhren-Rechner übernommen, dabei jedoch an die Abmessungen des genormten 19-Zoll-Systems angepasst.

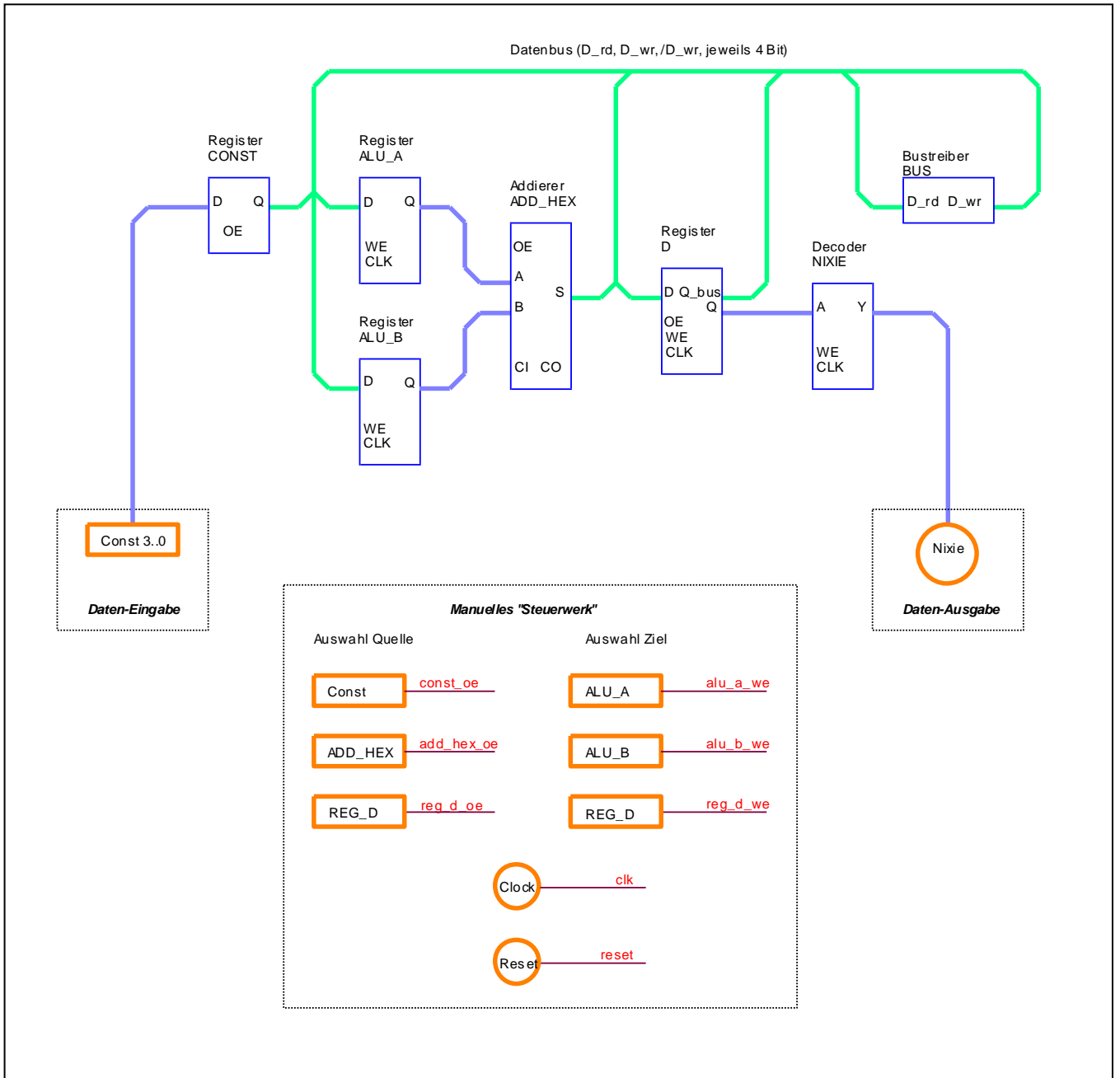
Die dabei senkrecht zur Ebene der Haupt-Leiterplatte stehenden Röhrenfassungen werden auf einer weiteren Leiterplatte untergebracht, die mit der Haupt-Leiterplatte über gewinkelte Stiftleisten verbunden ist. Damit ist bei der Herstellung des Steckmoduls keinerlei Handverdrahtung mehr notwendig. Zur definierten mechanischen Verbindung der Leiterplatten werden diese vor dem Löten der Stiftleisten mit Gewindeklötzen miteinander verschraubt.

Die Verbindung zwischen den Steckmodulen erfolgt entweder über Backplanes oder über Wire-Wrap-Verbindungen für die Signale und Litzenverbindungen für die Versorgungs- und Heizspannungen.

Die Planung des Demo-Systems zur Vorstellung auf der VCFB 2022

Das Demo-System stellt einen einfachen Datenpfad mit einem Addierer und den dazugehörigen Ein- und Ausgangsregistern dar. Die Funktion des Steuerwerkes wird dabei durch manuelle Eingaben des Benutzers ausgeführt.

Über das Register CONST werden mit Schaltern eingestellte Immediate-Werte in die Eingangsregister des Addierers ALU_A und ALU_B geschrieben. Das Ergebnis wird dann in das Register D übertragen und mit der Nixie-Röhre angezeigt, wenn es sich im Zahlenbereich 0..9 befindet.



Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Der Nutzer führt dabei das folgende „Programm“ aus:

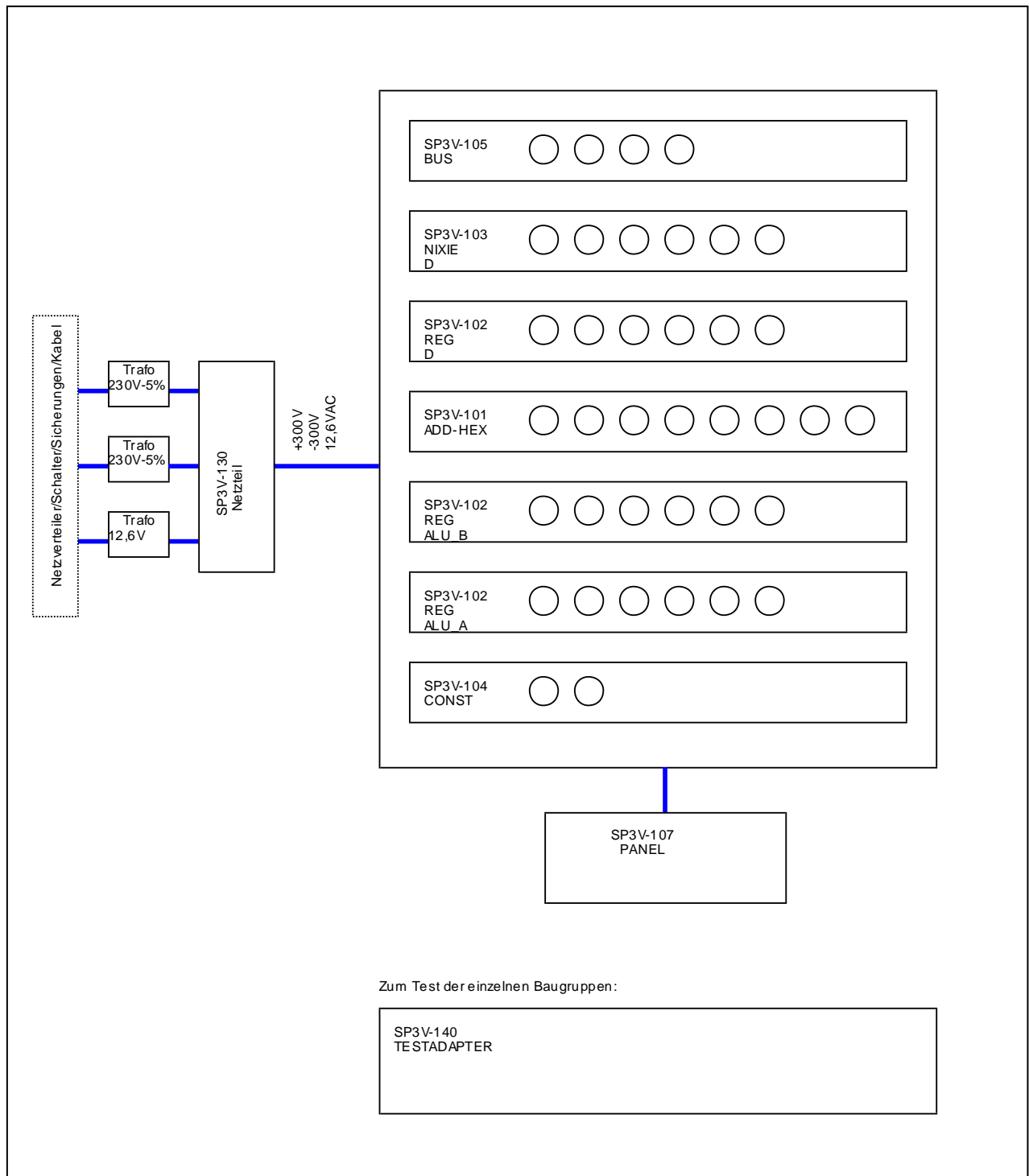
- Vorbereitung: Reset drücken, es wird dann 0 angezeigt.
- Schritt 1.1 Ersten Summanden als Immediate an CONST 3..0 einstellen
- Schritt 1.2 Quelle = Const einstellen (alle anderen Quellen deaktivieren!)
- Schritt 1.3 Ziel = ALU_A einstellen (alle anderen Ziele deaktivieren oder Register D als Anzeige aktivieren)
- Schritt 1.4 Clock betätigen
- Schritt 2.1 Zweiten Summanden als Immediate an CONST 3..0 einstellen
- Schritt 2.2 Quelle = Const einstellen (alle anderen Quellen deaktivieren!)
- Schritt 2.3 Ziel = ALU_B einstellen (alle anderen Ziele deaktivieren oder Register D als Anzeige aktivieren)
- Schritt 2.4 Clock betätigen
- Schritt 3.1 Quelle = ADD_HEX einstellen (alle anderen Quellen deaktivieren!)
- Schritt 3.2 Ziel = Register D einstellen (alle anderen Ziele deaktivieren)
- Ergebnis: Die Summe der beiden zuvor eingegeben Summanden erscheint auf der Nixie (wenn im Bereich 0..9)

Eine grafisch aufbereitete, detaillierte „Bedienungsanleitung“ findet sich in der anliegenden Excel-Liste „SP3V_Anwendungs-Abläufe.xls“.

Als Ergänzung wäre es möglich gewesen, das Carry-Signal einstellbar zu machen bzw. anzuzeigen, das wurde aber bewusst nicht vorgesehen, um die Bedienung übersichtlich zu halten.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Es wurde der folgende Systemaufbau festgelegt:



Die Konzeption des 4-Bit Datenbussystems

Der SPACE AGE 3-V arbeitet mit einem Datenbus mit einer Breite von 4 Bit. Der Bus wird als WIRED-AND-Verknüpfung aufgebaut, bei dem die Ausgänge aller treibenden Stufen miteinander verbunden sind und auf einen gemeinsamen Pull-Up-Widerstand arbeiten. Der Zustand „nicht auf den Bus geschaltet“ und der Zustand „Ausgabe eines H-Pegels auf den Bus“ sind damit identisch, in beiden Fällen sperrt der treibende Ausgang. Nur dann, wenn die Bedingungen „Auf den Bus geschaltet“ und „Ausgabe eines L-Pegels“ gleichzeitig erfüllt sind, schaltet der treibende Ausgang nach Masse durch.

Prinzipiell wäre es möglich, den Datenbus als bidirektionalen 4 Bit-Datenbus aufzubauen, womit dann nur 4 Busleitungen durch das System zu führen sind. Hieraus entstünde jedoch die Anforderung, dass jede einzelne Quelle die zum Treiben des gesamten Busses notwendige Treiberleistung aufzubringen hätte. Dies wäre mit einem einzigen Triodensystem der E92CC nicht zu realisieren.

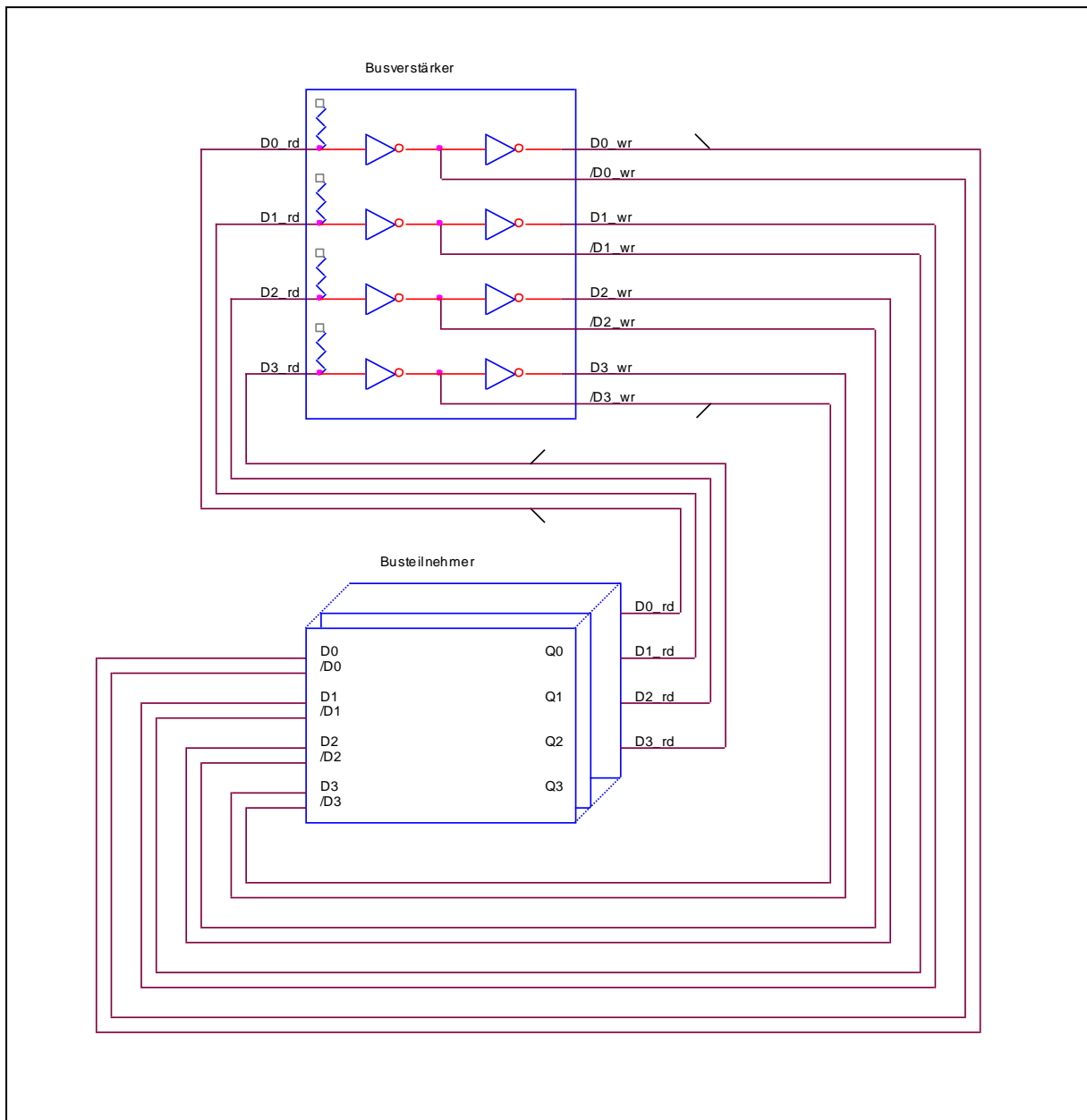
Daher wird eine Trennung des Busses in einen Lese- und einen Schreibpfad, der von den zusammengeschalteten treibenden Ausgängen an die Eingänge eines Bus-Verstärkermoduls führt und einen Schreibpfad, der von den Ausgängen des Busverstärkers an die zusammengeschalteten am Bus liegenden Eingänge führt, vorgesehen.

Mit Hilfe dieser Busverstärker lässt sich dann, im Sinne einer Baumstruktur, eine Segmentierung des Busses in Teil-Busse für verschiedene Teilsysteme vornehmen, so dass an den Ausgängen der einzelnen Busteilnehmer ein einziges Triodensystem ausreicht, um die notwendige Treiberleistung zu erbringen.

Weiterhin ermöglicht es der Busverstärker, ohne Mehraufwand komplementäre Ausgangssignale bereitzustellen, da innerhalb des Busverstärkers ohnehin zwei Inverterstufen hintereinander geschaltet arbeiten. Mit diesen komplementären Signalen werden dann die meist komplementären Eingänge der am Bus befindlichen Funktionsgruppen direkt angesteuert. Damit werden pro am Bus befindlicher Baugruppe 4 Triodensysteme eingespart.

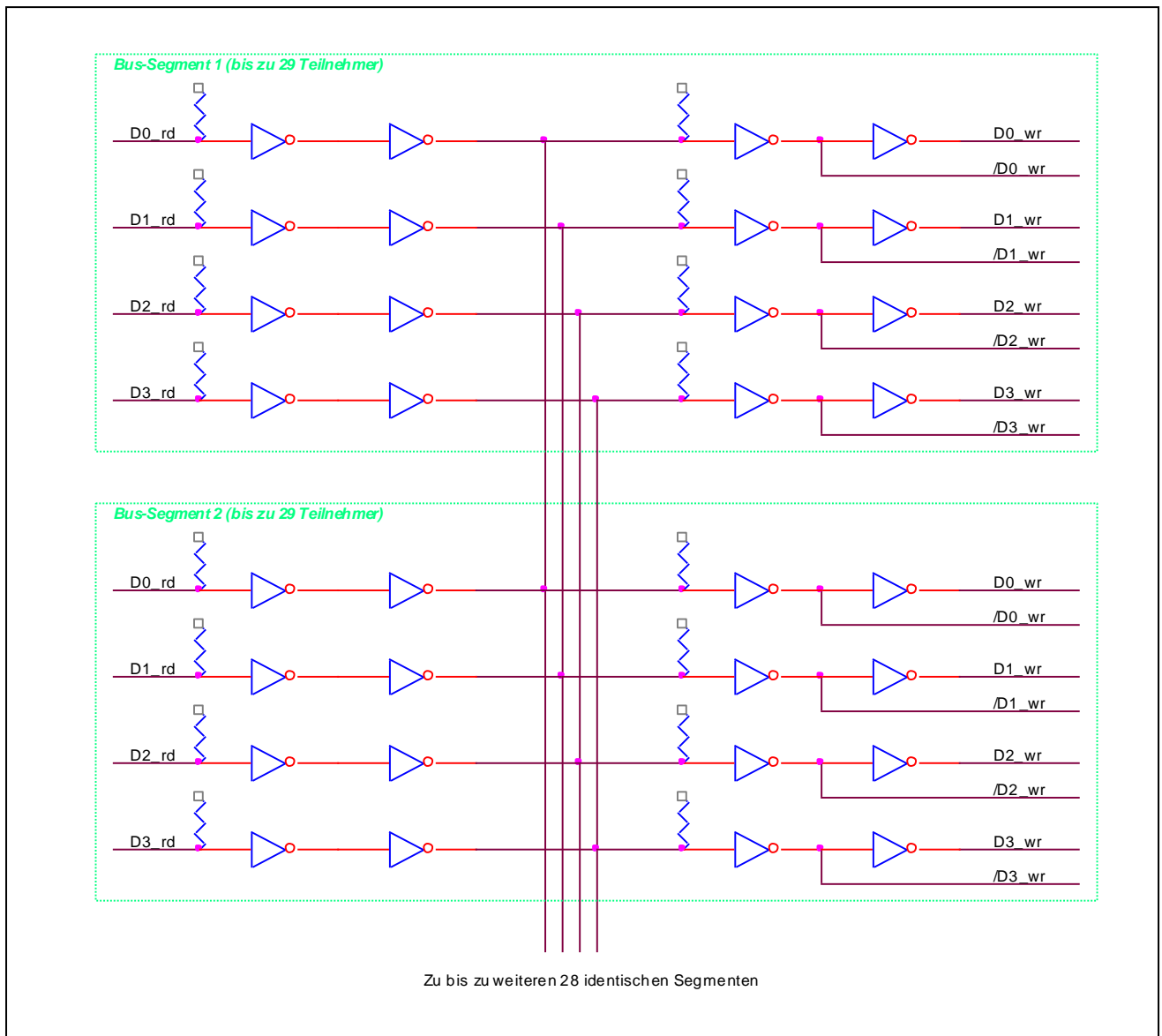
Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Das damit entstehende Bussystem aus 12 Leitungen ist in der folgenden Skizze symbolisch dargestellt:



Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Die folgende Skizze zeigt die Erweiterung dieses Prinzips zur Anbindung einer großen Zahl an Busteilnehmern:

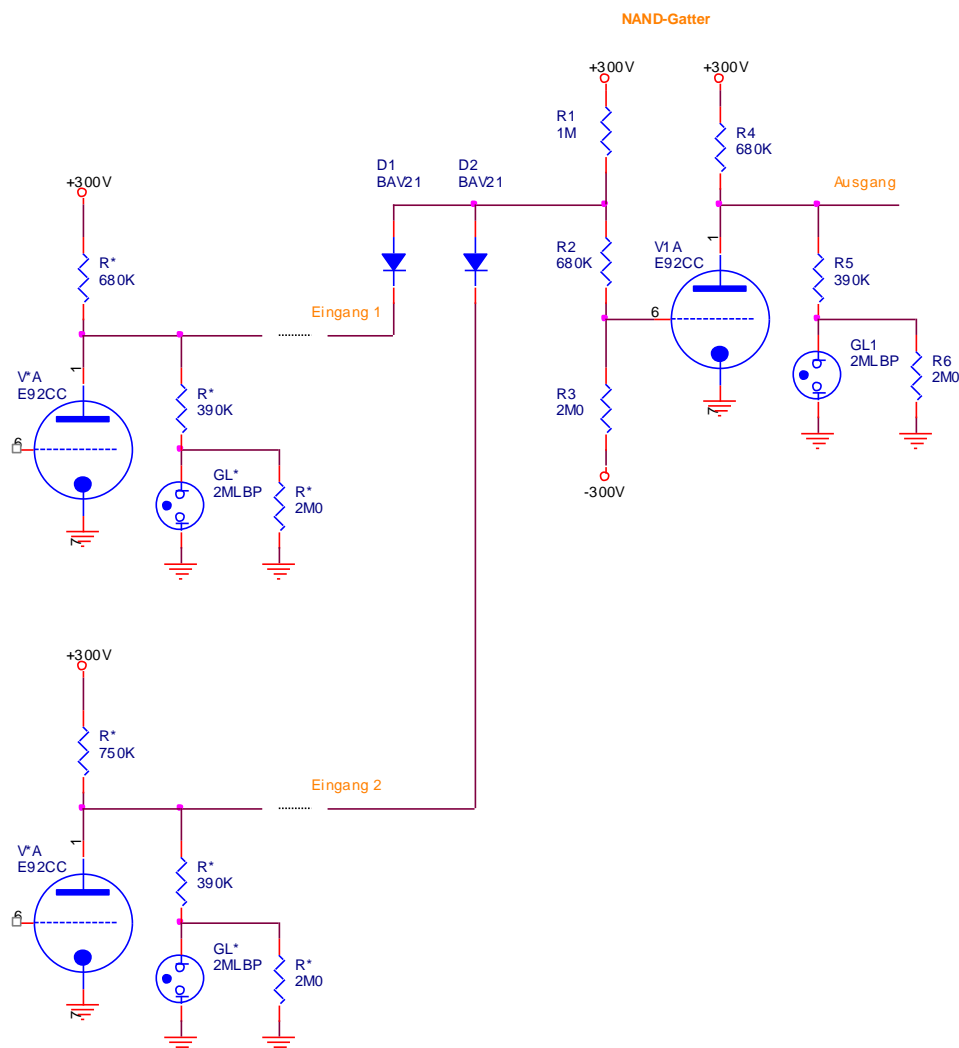


Das direkte Zusammenschalten der Ausgänge der Eingangsstufen der gezeigten Schaltung ist deswegen möglich, da immer nur eine der Eingangsleitungen jeder Bitposition (aus allen Segmenten gemeinsam) auf L sein kann.

Der Detailentwurf

Der Entwurf des NAND-Grundgatters

Alle Schaltungen des SP3-V bauen auf der folgenden Grundschaltung eines NAND-Gatters auf:



Wenn beide ansteuernden Ausgänge sperren, also einen H-Pegel abgeben, dann befinden sich beide Eingänge auf einem Potential von ca. 150V. Dann sind D1 und D2 stromlos. Am Gitter von V1 stellt sich damit ein Potential ein, dass (bedingt durch das Fließen von Gitterstrom) um einige hundert mV über dem Massepotential liegt, V1A leitet damit und der Ausgang nimmt in der Folge einen L-Pegel an.

Wenn einer der beiden ansteuernden Ausgänge nach Masse hin leitet, also einen L-Pegel abgibt, dann fließt durch D1 oder D2 ein Strom über die Anode der leitenden Röhre nach Masse und das Potential am Verbindungspunkt von D1 und D2 sinkt soweit ab, dass sich in der Folge am Gitter von V1A ein negatives Potential einstellt. Damit sperrt V1A und am Ausgang stellt sich ein H-Pegel ein.

Wenn beide ansteuernden Eingänge nach Masse leiten, dann stellt sich selbstverständlich ebenfalls ein H-Pegel am Ausgang ein.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Die Dimensionierung dieses Grundgatters wird schrittweise erläutert:

Die verwendeten Dioden BAV21 haben eine maximale dauerhafte Sperrspannung von 200V. Um eine hohe Zuverlässigkeit zu erreichen, wird die Festlegung getroffen, die Dioden mit maximal 150V in Sperrrichtung zu belasten. Dann besteht noch eine Sicherheitsmarge von 33%.

Die E92CC ist bei einer Anodenspannung von 150V (aus vorheriger Festlegung folgend) und einer Gitterspannung von $-7V$ vollständig sperrend. Bei einer Gitterspannung von 0V ist die E92CC vollständig aufgesteuert. In der Praxis steuert man das Gitter der Röhre mit einem positiven Potential über einen hochohmigen Widerstand an, so dass im Bereich des eingangsseitigen H-Pegels ein Gitterstrom fließt und sich damit zuverlässig über den gesamten Spannungsbereich, der einen H-Pegel repräsentiert, eine Gitterspannung von etwas positiver als 0V einstellt.

Ausgangsseitig ergibt sich dagegen bei sperrender Röhre ein H-Pegel von nahe 150V, während sich bei leitender Röhre, in Abhängigkeit vom in den Ausgang aus den angesteuerten Eingängen hineinfließenden Strom, ein positives Potential zwischen 10V und 75V einstellt, das dem L-Pegel entspricht.

Eine direkte Verbindung zwischen der Anode der ansteuernden Stufe und dem Gitter der angesteuerten Stufe ist also nicht möglich, da die absoluten Potentiale der Spannungspegel an der Anode und am Gitter gegeneinander verschoben sind. (Ein „idealer“ ausgangsseitiger L-Pegel von 0V würde am Gitter der Folgestufe immer noch die Wirkung eines H-Pegels haben) Die ausgangsseitige Spannungsänderung muss stattdessen über den mit R2 und R3 aufgebauten Spannungsteiler, der die negative Versorgungsspannung als Bezugspunkt hat, an das Gitter der anzusteuern Röhre gelangen.

Es ist vorteilhaft, die Spannungsänderung am Verbindungspunkt von D1 und D2 möglichst unabgeschwächt auf das Gitter von V1A gelangen zu lassen, weil sich damit der undefinierte Bereich zwischen L- und H-Pegel am Verbindungspunkt zwischen D1 und D2 und damit an den ansteuernden Ausgängen) auf ein Minimum reduziert.

In diesem undefinierten Bereich, der zu Gitterpotentialen zwischen 0V und $-7V$ führt, gibt das NAND-Gatter an seinem Ausgang eine Spannung ab, die keinem der beiden Logikpegel H und L zugeordnet werden kann und damit einen undefinierten Zustand repräsentiert. Hierbei ist zu bemerken, dass das NAND-Gatter eine analoge Verstärkerstufe ist, die in den normalen Betriebspunkten jedoch mit extremer Übersteuerung betrieben wird.

Eine möglichst kleiner undefinierter Bereich erlaubt es, höhere Potentiale noch als gültige L-Pegel zu erkennen und damit ausgangsseitig zuzulassen. Das alterungsbedingte Absinken der Emission der Röhren ist gleichbedeutend mit einem höheren Anodenpotential bei der Ausgabe des L-Pegels. Damit erlaubt eine Verschmälerung des undefinierten Bereichs eine längere Nutzungsdauer der Röhren, was angesichts der Tatsache, dass die verwendeten Röhren nicht mehr hergestellt werden und die noch vorhandenen Vorräte begrenzt sind, von hohem Nutzen ist.

Für das gewünschte kleine Teilverhältnis des Teilers aus R2 und R3 muss daher R3 deutlich größer als R2 sein. Dies lässt sich dadurch erreichen, dass die negative Spannung vergleichsweise hoch gewählt wird.

Mit zunehmender negativer Spannung nimmt das Spannungsteilverhältnis zunächst rasch zu, mit weiter steigender Spannung wird die Zunahme aber immer geringer.

Im Grenzfall einer unendlich hohen negativen Spannung und eines unendlich hohen Widerstandes wäre R3 eine ideale Stromquelle, die einen festen Strom in R2 einprägen würde. Damit würde der eingangsseitige Spannungshub vollständig an das Gitter übertragen.

Mit einer noch praktikablen Spannung von $-300V$ lässt sich ein in der Praxis vollkommen ausreichendes Teilverhältnis von 0,75 erreichen, es geht im Teiler also nur noch 25% des ursprünglichen Signalhubs verloren.

Mit einer Spannung von 300V können noch übliche Widerstände, Kondensatoren und Steckverbinder verwendet werden.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Gleichzeitig besteht die Anforderung, dass die Quellimpedanz am Gitter nicht wesentlich größer als 500kOhm sein soll. Diese Anforderung findet sich einerseits im Datenblatt der E92CC, andererseits ist sie auch durch die Vermeidung der kapazitiven Einkopplung von Störungen motiviert.

Diese Anforderung ist jedoch nur für den Fall relevant, dass eingangsseitig ein L-Pegel anliegt. Dann ist der Verbindungspunkt von D1 und D2 jedoch niederohmig abgeschlossen, so dass der Quellwiderstand der Parallelschaltung von R2 und R3 entspricht.

Bei einem eingangsseitigen H-Pegel ist bereits die Gitter-Kathoden-Strecke selbst durch den fließenden Gitterstrom niederohmig.

Das Potential am Verbindungspunkt von D1 und D2 soll dann, wenn D1 und D2 stromlos sind, nicht über 150V hinaus ansteigen. Um die Belastung der ansteuernden Stufe möglichst gering zu halten, ist es vorteilhaft, R1 so hochohmig wie möglich zu wählen, damit R1 möglichst weitgehend das Verhalten einer Stromquelle annimmt.

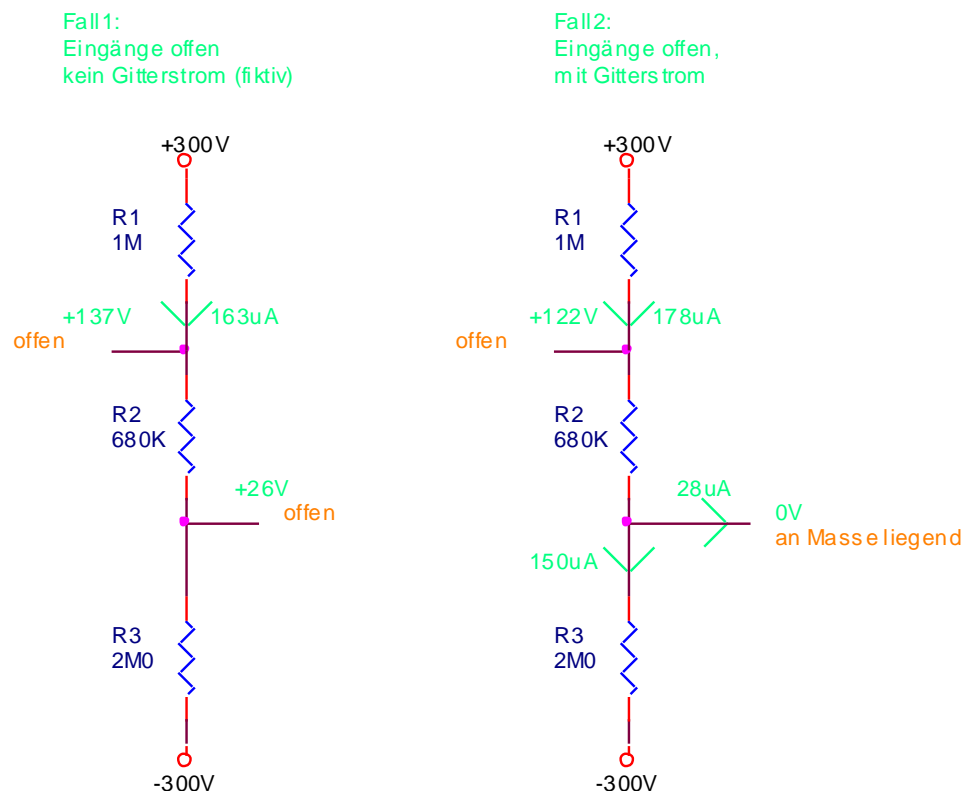
Dies erlaubt einerseits das Minimieren der Anzahl der Röhren, weil dann eine Stufe eine größere Zahl von Eingängen treiben kann und andererseits eine längere Benutzungsdauer der Röhren, da bei einem geringeren Strom in den Ausgang auch mit einer schon zurückgegangenen Emission noch ein hinreichend geringes Potential der Anode bei der Ausgabe eines L-Pegels erreicht werden kann.

Aus diesen Überlegungen folgt, als praxisgerechten Kompromiss zwischen gewünschtem stromquellenähnlichen Verhalten und dem Aufwand der praktischen Realisierung auch für die positive Spannung 300V vorzusehen.

In einem iterativen Prozess wurde die dargestellte Dimensionierung für R1, R2 und R3 gefunden.

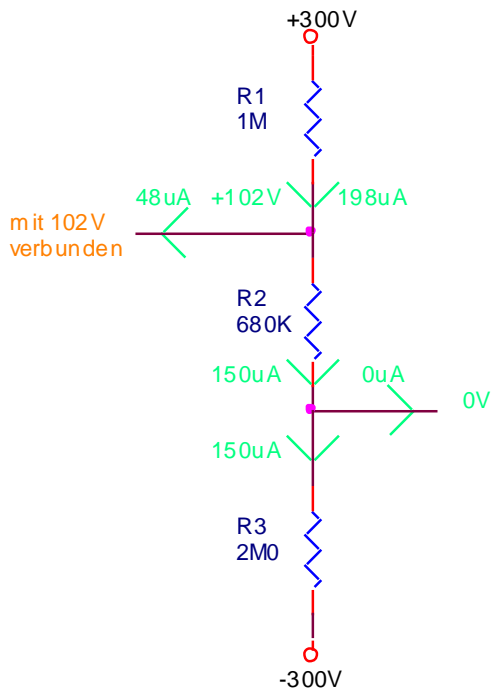
Diese Dimensionierung wird in der Folge erläutert.

Zunächst ist das Verhalten einiger relevanter Fälle durchgerechnet:

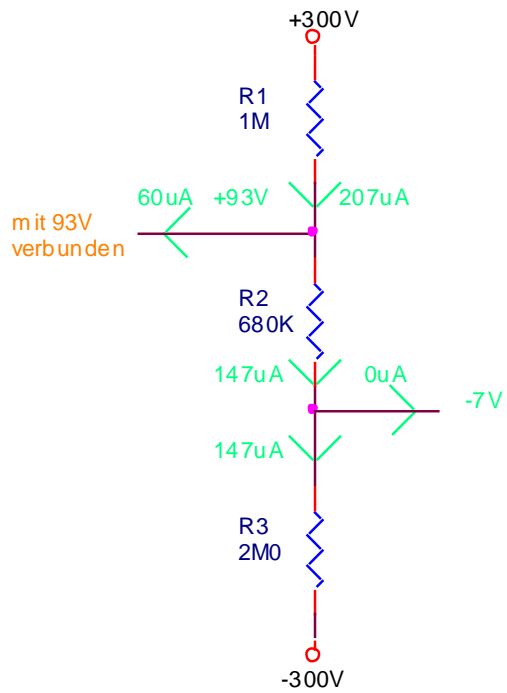


Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

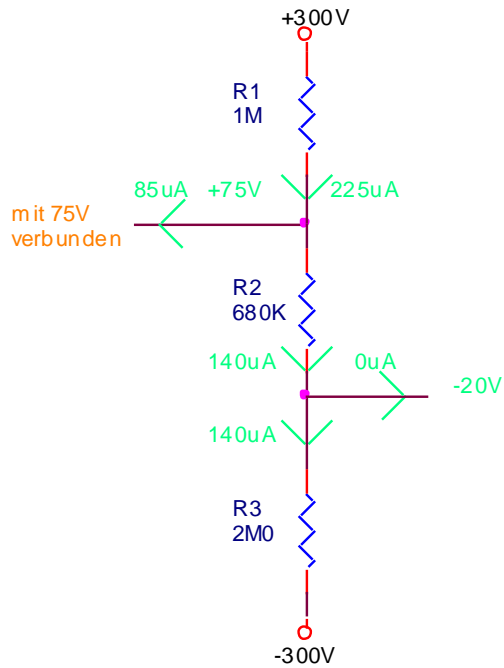
Fall 3:
Grenzfall H zu
undefiniert



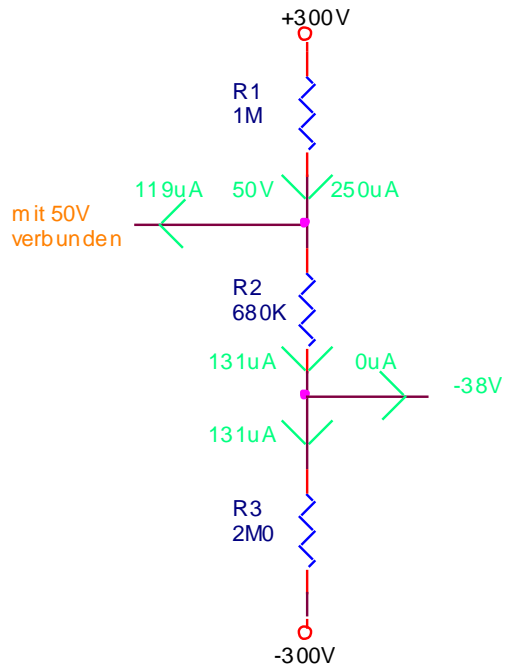
Fall 4:
Grenzfall L zu
undefiniert



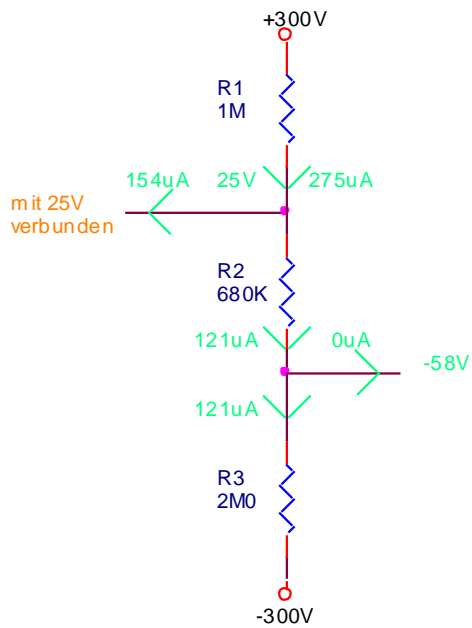
Fall5:
L-Pegel 75V



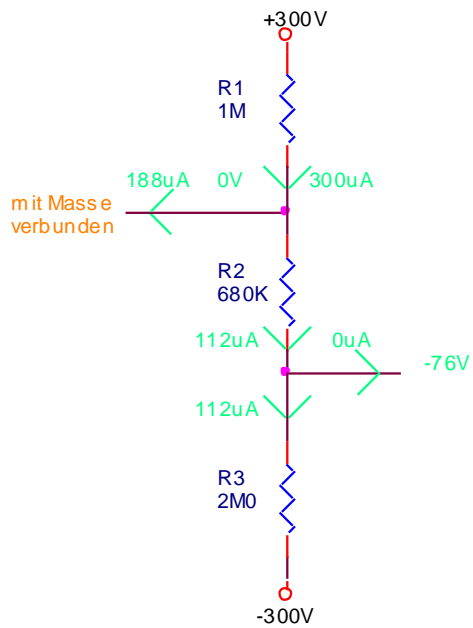
Fall6:
L-Pegel 50V



Fall7:
L-Pegel 25V



Fall8:
L-Pegel 0V



Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Es lässt sich zusammenfassen:

Untere Grenze der eingangsseitigen Erkennung des H-Pegels: 102V

Obere Grenze der eingangsseitigen Erfassung des L-Pegels: 93V

Eingangsstrom bei einem eingangsseitigen L-Pegel von 25V: 154 μ A

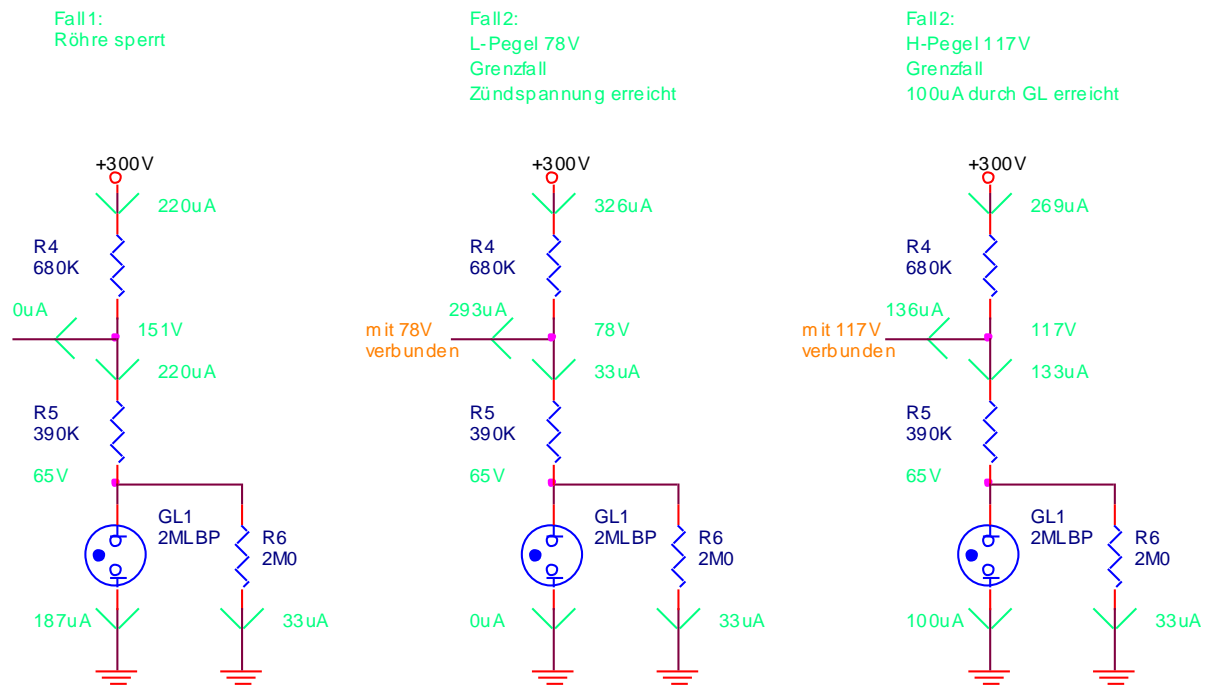
Ersatzschaltung des Eingangs bei L-Pegel: $U_0 = 137V$, $R_i = 728 \text{ k}\Omega$

Quellwiderstand am Gitter bei L-Pegel: 507 $\text{k}\Omega$

Die Leckströme der Dioden D1 und D2 spielen an dieser Stelle keine Rolle. Wenn an allen Eingängen ein H-Pegel anliegt, also alle Dioden sperren, dann würde der Leckstrom das Potential am Verbindungspunkt von D1 und D2 weiter erhöhen. Wenn an einem Eingang ein L-Pegel ist, dann wird der Leckstrom der anderen Dioden von dem diesen Eingang treibenden Ausgang aufgenommen, der hinreichend niederohmig ist.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Weiterhin wird die ausgangsseitige Beschaltung des Gatters betrachtet:



Die Glimmlampe hat eine nominelle Brennspannung von 65V.

Aufgrund der Wirkung der Eingangsdiode der nachfolgenden Stufe gibt der Ausgang im H-Zustand keinen Strom an die Eingänge ab. Daher ergibt sich bei sperrender Röhre stets ein H-Pegel von 151V und damit ein für helles Leuchten ausreichender Strom von nahe 190μA durch die Glimmlampe.

Bei einem L-Pegel von 78V wird gerade die Zündspannung erreicht.

Bei einem H-Pegel von 117V fließt ein Strom von 100μA durch die Glimmlampe.

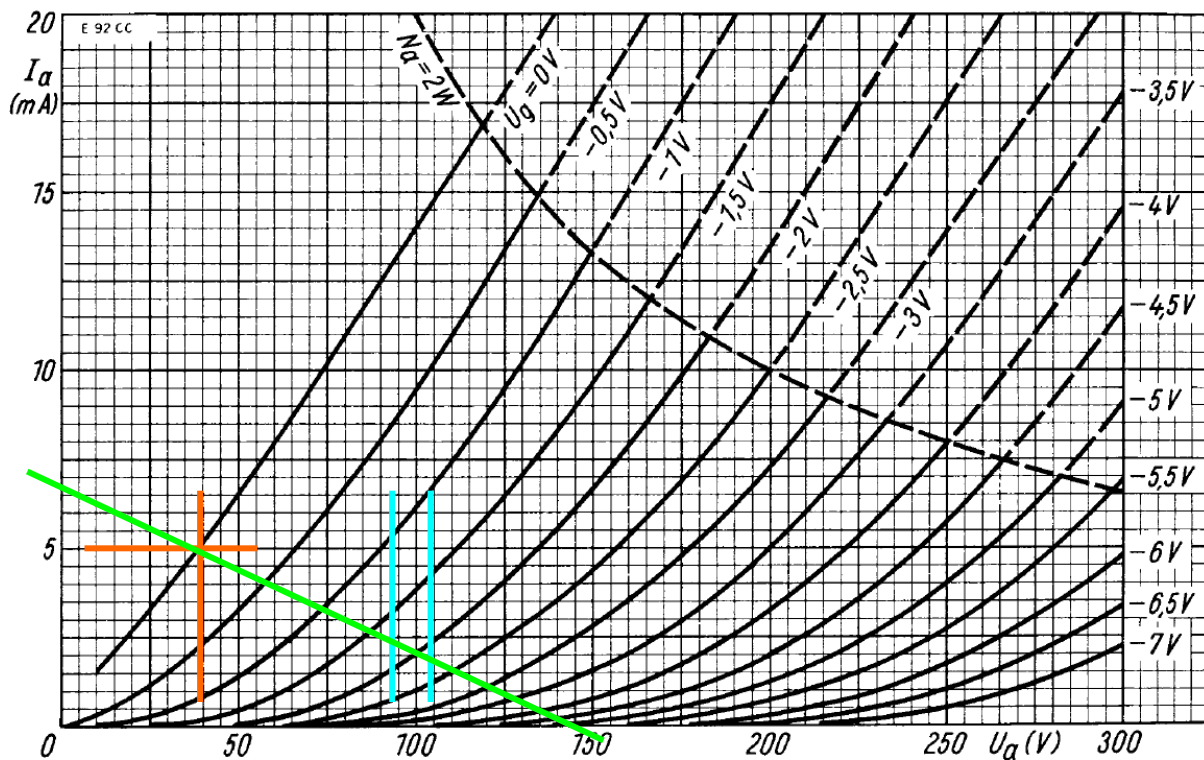
Es ist zu vermuten, dass sich ungefähr ab einem Strom von 100μA ein eindeutig wahrnehmbares Leuchten der Glimmlampe ergibt.

In Bezug auf die ansteuernde Röhre wirkt die Ausgangsbeschaltung (bei L-Pegel und nicht leitender Glimmlampe) wie eine Ersatzspannungsquelle mit einer Leerlaufspannung von 151V und einem Innenwiderstand von 530 kΩ.

Es wurde bereits berechnet, dass sich ein Gatter-Eingang bei L-Pegel durch eine Ersatzspannungsquelle mit einer Leerlaufspannung von 137V und einem Innenwiderstand von 728 kΩ beschreiben lässt.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

In der folgenden Abbildung ist das Kennlinienfeld der E92CC dargestellt.



Auszug Datenblatt AEG E92CC 1960

Man erkennt, dass sich bei einer Gitterspannung von 0V und einem Anodenstrom von 5mA ein L-Pegel von 40V einstellt. (orange)

Wenn man hierbei eine Toleranz von 100% zulässt, dann erhielte man einen L-Pegel von 80V, der noch unterhalb der errechneten Erkennungsschwelle von 93V (blau) liegt.

Die Erkennungsschwelle für H von 102V ist ebenfalls in blau eingezeichnet.

Daher wird die Festlegung getroffen, alle Schaltungen so auszulegen, dass bei einem L-Pegel von 40V ein Anodenstrom von 5mA nicht überschritten wird.

Dies wird mit der in grün eingezeichneten Arbeitsgeraden dargestellt, die sich auf eine Leerlaufspannung von 143V, entsprechend der angesteuerten Eingänge bezieht.

Man erkennt, dass sich die Arbeitsgerade bei einem Strom von 6,5mA mit der Nulllinie der Spannung schneidet. Hieraus folgt eine Widerstand von $143V / 6,5mA = 22 k\Omega$ zu 143V. Dies entspricht einer Anzahl von 33 angesteuerten Eingängen. Hierbei ist aber die Ausgangsbeschaltung noch nicht berücksichtigt. Deren Einfluss kann entsprechend 3 Eingängen hinreichend genau abgeschätzt werden, womit dann ein Ausgang 30 Eingänge ansteuern kann.

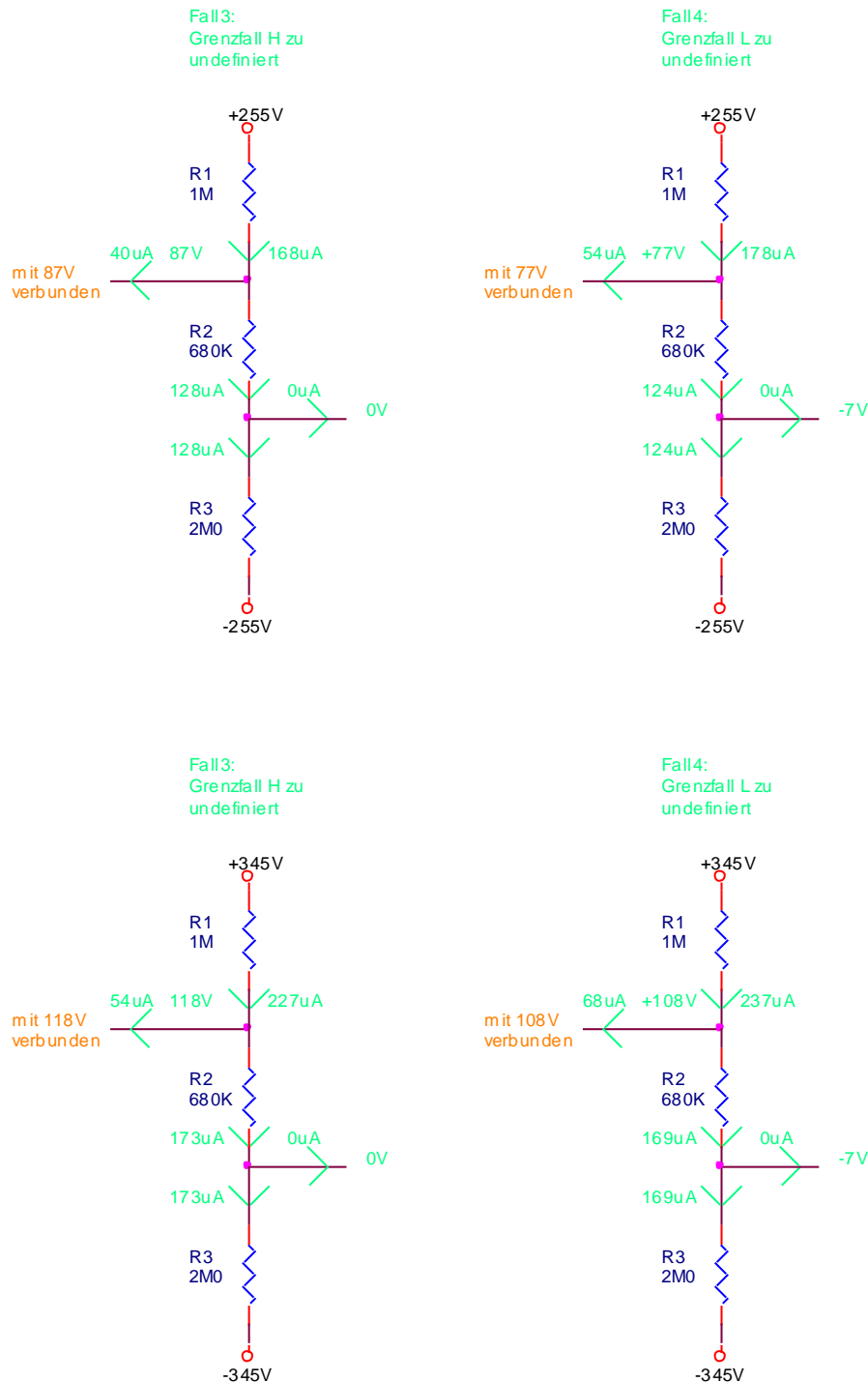
Es wird sich später zeigen, dass sich dieser Wert aufgrund weiterer Maßnahmen zur Kompensation von Sperrströmen der Dioden noch nach unten verändern wird.

Die Betrachtung des Verhaltens des Grundgatters bei abweichenden Versorgungsspannungen

Zunächst wird angenommen, dass beide Versorgungsspannungen zwar schwanken, dabei aber betragsmäßig gleich bleiben. Diese Annahme beruht darauf, dass beide Versorgungsspannungen durch verschiedene Sekundärwicklungen des gleichen Trafos gespeist werden.

Es wird eine Schwankung von +/- 15% angenommen.

Man erhält dann die folgenden Erkennungsschwellen für den H- und den L-Pegel:



Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Man erkennt, dass sich die Erkennungsschwellen erwartungsgemäß verschieben.

Minimal: 77V – 87V

Maximal: 118V – 108V

Es wird betrachtet, inwieweit sich der L-Pegel der treibenden Stufe mit der Versorgungsspannung ändert.

Hierbei wird zunächst angenommen, die Heizspannung sei von der Änderung nicht betroffen.

In der Praxis wird aber die Heizspannung auch abnehmen, wenn die Versorgungsspannungen +/-300V aufgrund von Netzschwankungen abnehmen. Damit wird sich der L-Pegel gegenüber den nachfolgenden Betrachtungen jedoch erhöhen, so dass diese Betrachtungen zu optimistisch sind.

Da keine Datenblattangaben zur Verschiebung der Kennlinienfelder mit sich verändernder Heizspannung vorliegen, können abschließende Ergebnisse nur empirisch in einer Versuchsreihe ermittelt werden, in der ein tatsächlich aufgebautes Gatter mit unregelmäßiger Versorgung an variabler Netzspannung betrieben wird.

Im Falle eines L-Pegels bei einer Versorgung mit 255V entspricht der Eingang des Gatters einer Ersatzspannungsquelle mit den folgenden Parametern:

117V / 728 k Ohm

Im Falle eines L-Pegels bei einer Versorgung mit 345V entspricht der Eingang des Gatters einer Ersatzspannungsquelle mit den folgenden Parametern:

157,5V / 728 kOhm

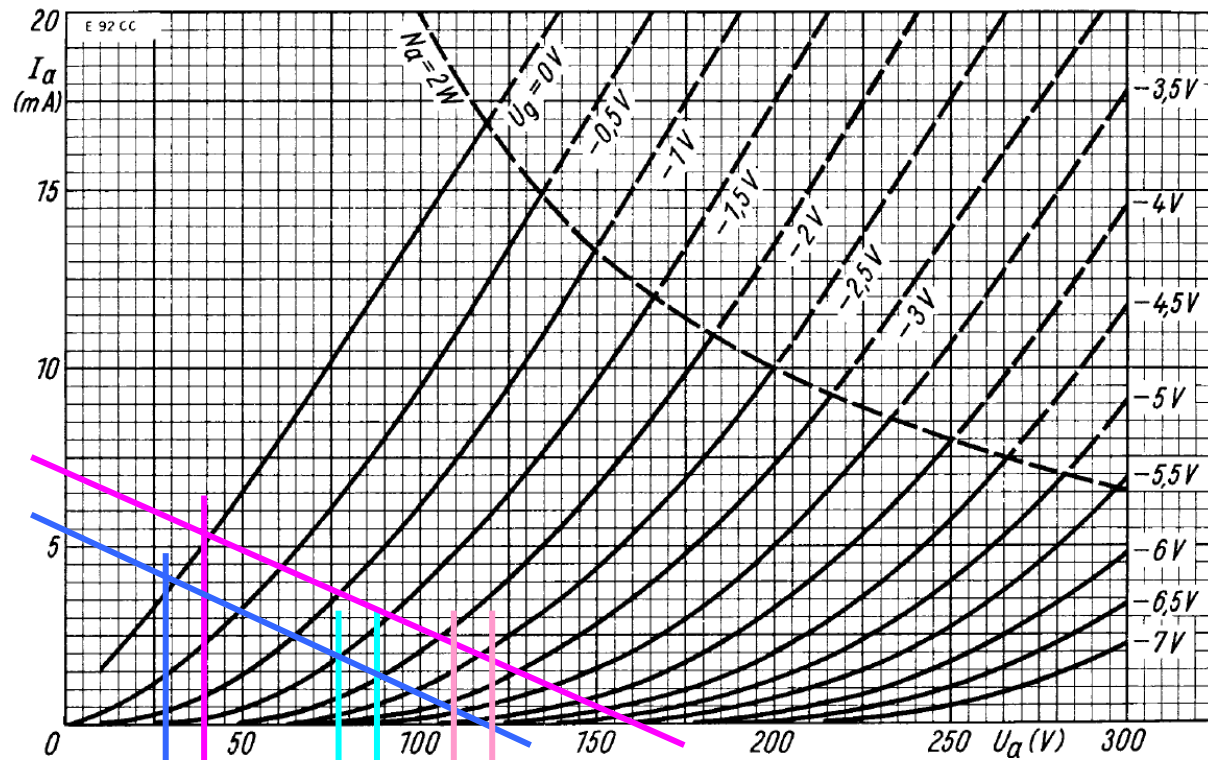
Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

In das Kennlinienfeld wird eingetragen:

Dunkelblau: 33 Gattereingänge bei +/- 255V
 Pink: 33 Gattereingänge bei +/- 345V

Hellblau: Erkennungsschwellen bei +/- 255V
 Rosa: Erkennungsschwellen bei +/-345V

Die anodenseitige Beschaltung der Röhre wird in der folgenden Darstellung vernachlässigt.



Auszug Datenblatt AEG E92CC 1960

Man erkennt:

Bei Versorgung mit +/-255V:	L-Pegel: 30V	Erkennungsschwelle: 77V
Bei Versorgung mit +/-345V:	L-Pegel: 42V	Erkennungsschwelle: 87V

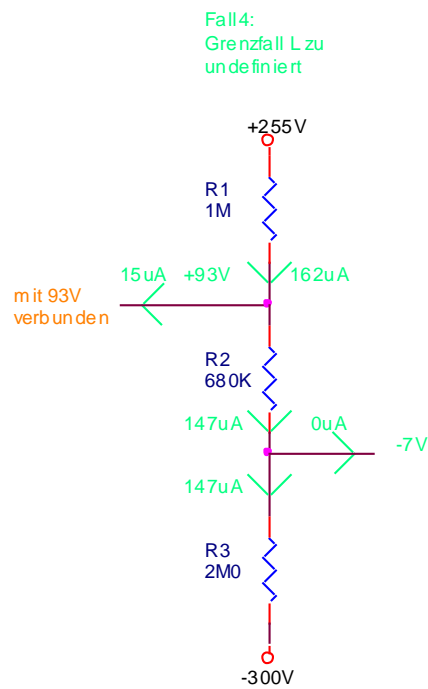
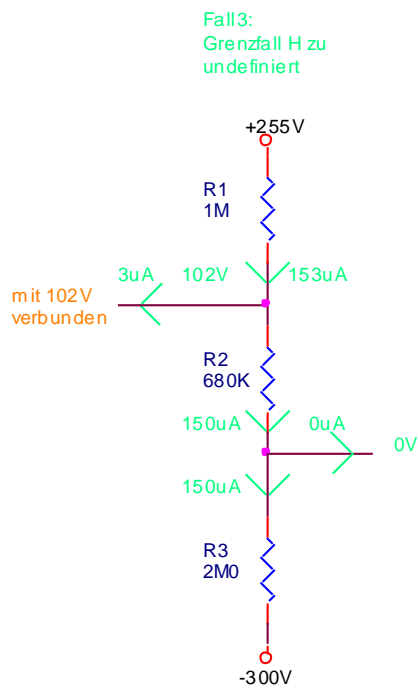
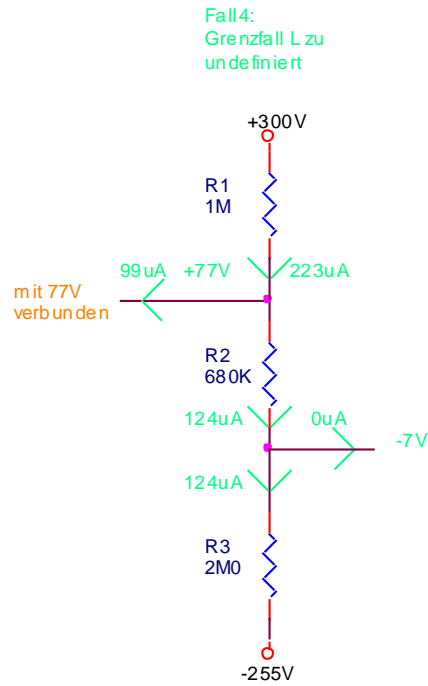
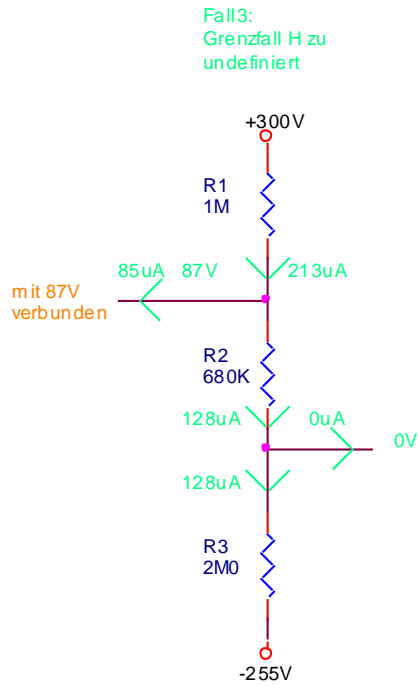
Hierbei ist aber der Einfluss der bei Betrieb mit +/-255V gleichzeitig reduzierten Heizung noch nicht berücksichtigt, die zu einer Anhebung des L-Pegels führt. Hier besteht noch eine Sicherheitsmarge von $77V / 30V = 156\%$, die aber auch für Exemplarstreuungen und Röhrenalterung teilweise aufgebraucht wird.

Wie bereits erwähnt muss die Betriebssicherheit bei Spannungsschwankungen experimentell betrachtet werden, um abschließende Aussagen mit Berücksichtigung des Einflusses der Heizung treffen zu können.

Der Anstieg der Erkennungsschwelle für den H-Pegel bei Betrieb mit +/-345V ist unkritisch, da auch der sich einstellende H-Pegel entsprechend ansteigt.

Weiterhin wird das Verhalten betrachtet, wenn die Beträge der Versorgungsspannungen ungleich sind.

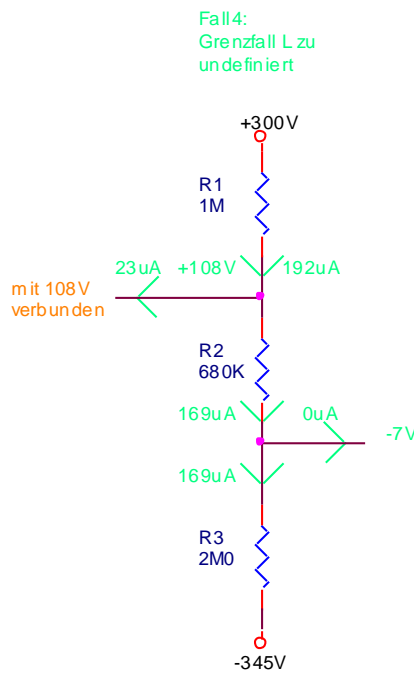
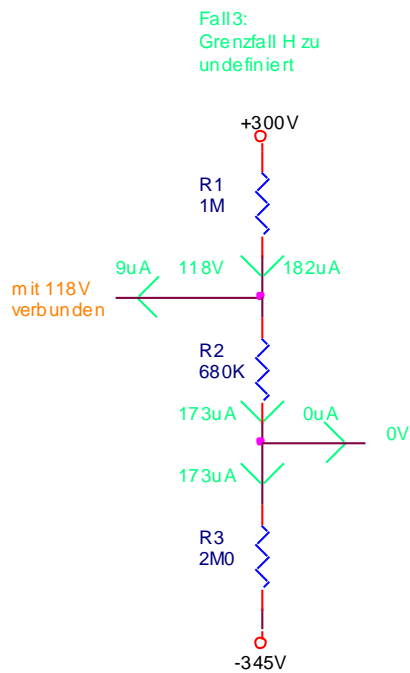
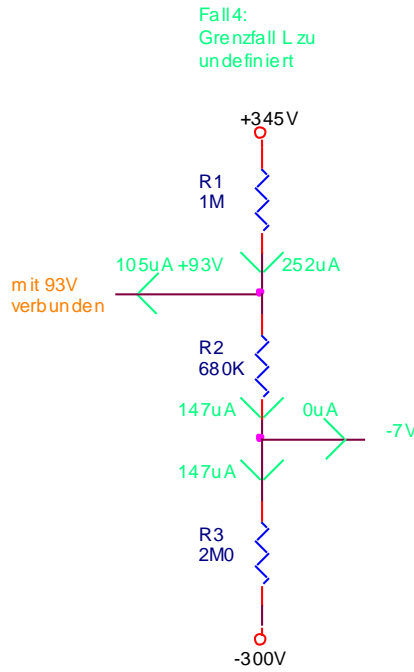
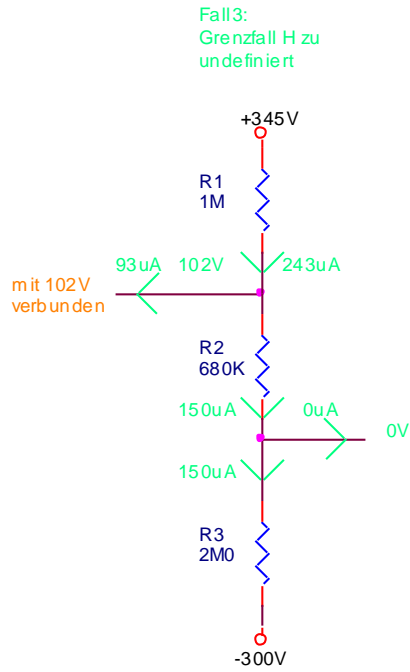
Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de



Man erkennt folgende Erkennungsschwellen:

Bei +300V / -255V: 77V / 87V
Bei +255V / -300V: 93V / 102V

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de



Man erkennt folgende Erkennungsschwellen:

Bei +345V / -300V: 93V / 102V
 Bei +300V / -345V: 108V / 118V

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

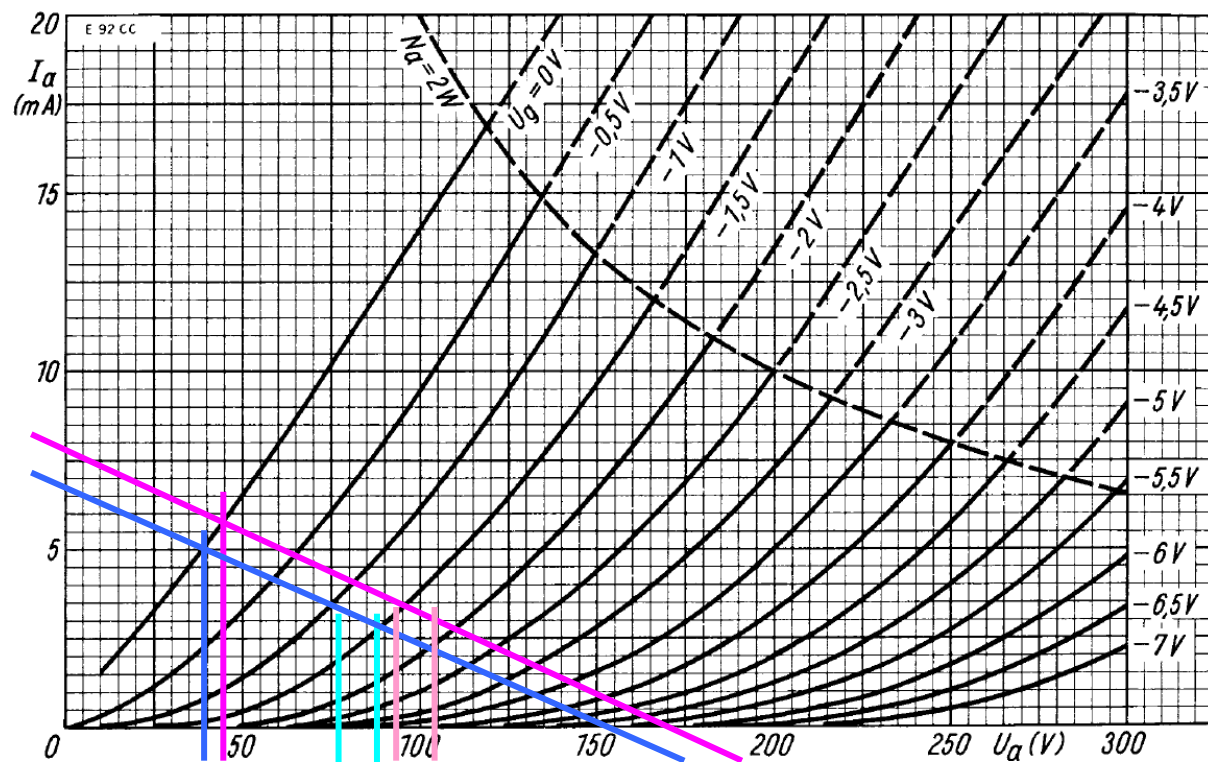
Für den L-Pegel stellt der Eingang des Gatters eine Ersatzspannungsquelle mit einem Innenwiderstand von 728 k Ω und einer Leerlaufspannung nach folgender Aufstellung dar:

+300V / -255V	149V
+255V / -300V	104V
+345V / -300V	170V
+300V / -345V	125V

In das Kennlinienfeld wird eingetragen:

Dunkelblau:	33 Gattereingänge bei +300V/-255V
Pink:	33 Gattereingänge bei +345V/-300V
Hellblau:	Erkennungsschwellen bei +300V/-255V
Rosa:	Erkennungsschwellen bei +345V/-300V

Die anodenseitige Beschaltung der Röhre wird in der folgenden Darstellung vernachlässigt.



Auszug Datenblatt AEG E92CC 1960

Man erkennt:

+300V/-255V :	L-Pegel = 40V / Erkennungsschwelle = 77V	Reserve: 92%
+345V/-300V:	L-Pegel = 45V / Erkennungsschwelle = 93V	Reserve: 106%

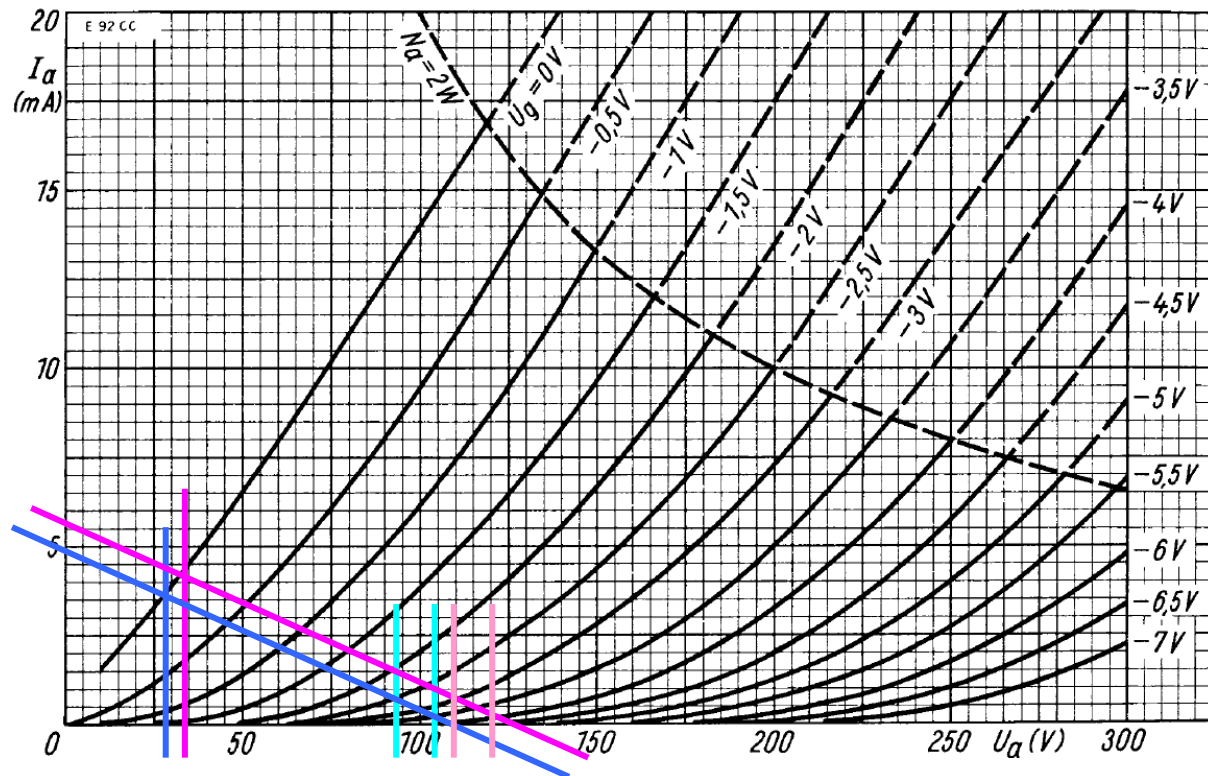
Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

In das Kennlinienfeld wird eingetragen:

Dunkelblau: 33 Gattereingänge bei +255V/-300V
 Pink: 33 Gattereingänge bei +300V/-345V

Hellblau: Erkennungsschwellen bei +255V/-300V
 Rosa: Erkennungsschwellen bei +300V/-345V

Die anodenseitige Beschaltung der Röhre wird in der folgenden Darstellung vernachlässigt.



Auszug Datenblatt AEG E92CC 1960

Man erkennt:

+255V/-300V: L-Pegel = 28V / Erkennungsschwelle = 93V Reserve: 232%
 +300V/-345V: L-Pegel = 35V / Erkennungsschwelle = 108V Reserve: 208%

Weiterhin erkennt man, dass wenn die negative Versorgungsspannung höher als die positive Versorgungsspannung ist, sich die untere Erkennungsschwelle für den H-Pegel an die maximal erreichbare positive Spannung, die Leerlaufspannung, annähert.

Dieses Verhalten soll näher betrachtet werden:

Man erkennt, dass die Leeraufspannung des Teilers aus R1 zu R2 und R3 im betrachteten Fall praktisch der Mindestspannung entspricht, die dazu nötig ist, 0V am Gitter der Röhre zu erreichen. Bei einer nur noch geringfügigen weiteren Verringerung der positiven Versorgungsspannung könnte der H-Pegel eingangsseitig gar nicht mehr erreicht werden. Der Ausgang des Gatters würde damit nicht mehr auf L gehen können.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Das Vorsehen einer betragsmäßig gegenüber der negativen Betriebsspannung größeren positiven Betriebsspannung würde die Toleranz gegenüber dem soeben beschriebenen Verhalten erhöhen. Andererseits verliert man jedoch Toleranz gegenüber einem Ansteigen des H-Pegels aufgrund der Alterung von Röhren.

Ein deutliches Auseinanderlaufen der Spannungen kann jedoch dadurch verhindert werden, dass beide Spannungen aus Sekundärwicklungen des gleichen Trafos gespeist werden und gleichzeitig beide Gleichrichterschaltungen mit einem geringen Innenwiderstand (große Kapazität / kleine Drossel) aufgebaut werden.

Nachteilig ist, dass die Belastung der positiven Betriebsspannung höher und ungleichmäßiger als die Belastung der negativen Betriebsspannung ist, der Fall, dass die positive Betriebsspannung kleiner als die negative Betriebsspannung ist, ist also wahrscheinlicher als umgekehrt.

Hieraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Eine Auslegung der Versorgung mit geringem Innenwiderstand ist unabdingbar
- Es werden Anzapfungen an den Sekundärwicklungen vorgesehen, die es erlauben, das Verhältnis der Sekundärspannung von 1 zu 1 leicht abweichen zu lassen, so dass im Mittel bei dem vorhandenen Belastungsprofil dann die Spannungen gleich sind.
- Es wird geprüft, ob die Gesamt-Stromaufnahme aus der negativen Betriebsspannung so gering ist, dass eine einfache Regelung mit Zenerdioden möglich ist.

Die Ergänzung des NAND-Grundgatters um eine Schutzbeschaltung

Ohne weitere Maßnahmen würde bei ungeheizter Röhre V1A und bei Ausfall der Versorgungsspannung -300V und offenen Eingängen die volle Versorgungsspannung von 300V an den Kathoden von D1 und D2 anliegen.

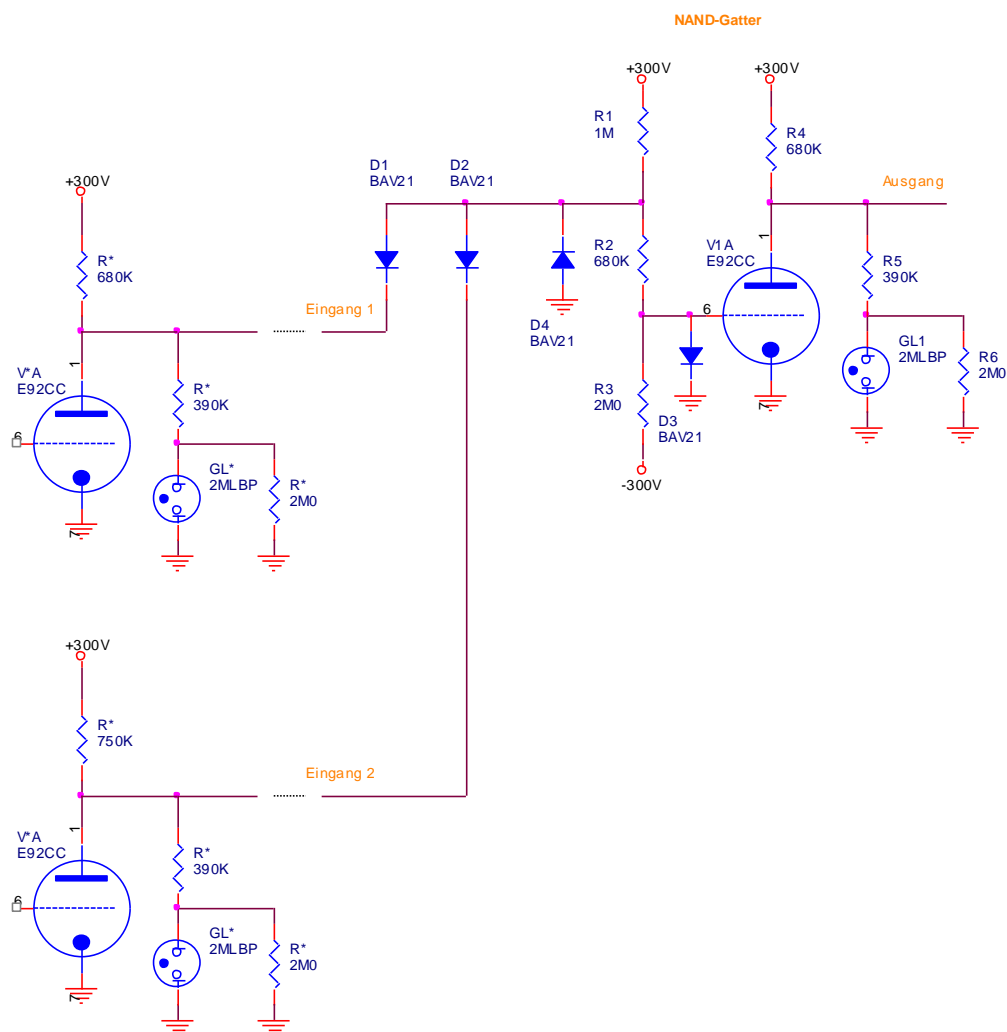
Daher wird die in der folgenden Abbildung sichtbare zusätzliche Diode D3 vorgesehen, womit dann, wie beim Fließen eines Gitterstroms, R1 und R2 als Spannungsteiler wirken und sich keine höhere Spannung als im Normalbetrieb ergibt.

Beim Ausfall der positiven Versorgungsspannung $+300\text{V}$ würde sich eine zu hohe negative Spannung am Gitter ergeben.

Daher wird D4 vorgesehen, womit R2 und R3 in diesem Fall als Spannungsteiler wirken und die Spannung am Gitter begrenzt wird.

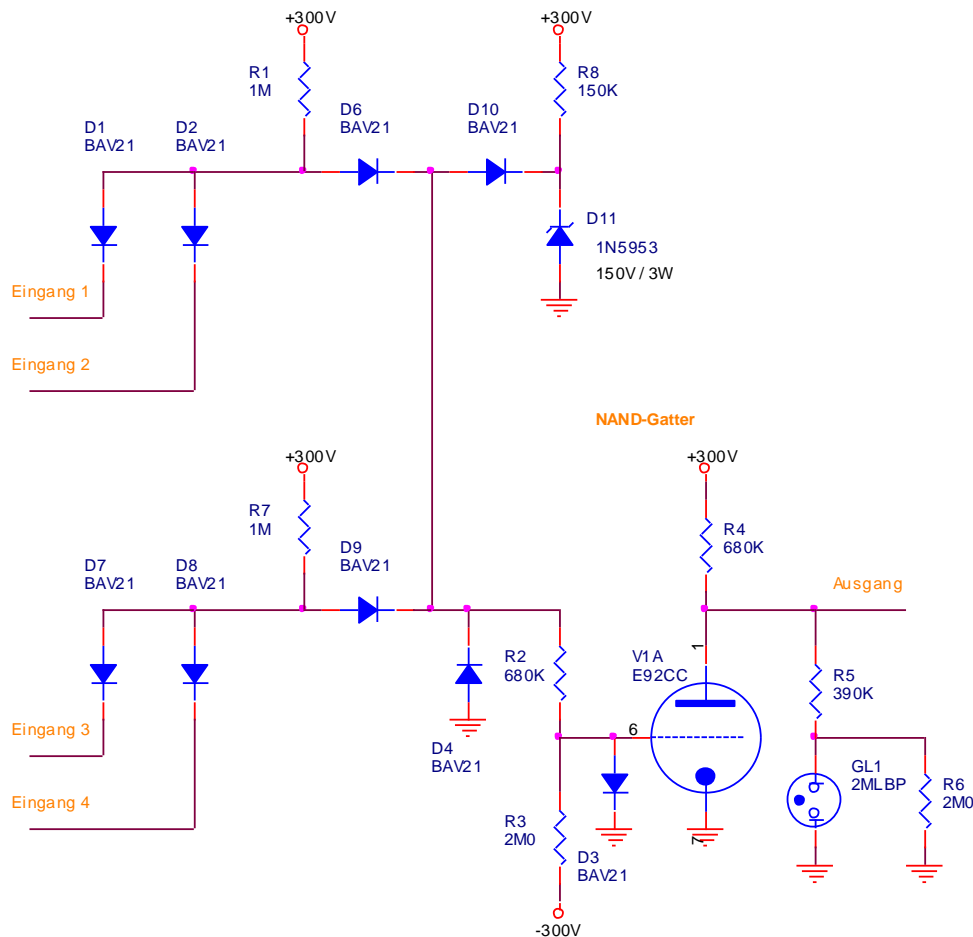
D3 und D4 haben auf die Funktion des Gatters im Normalbetrieb keinen Einfluss, da diese im Normalbetrieb immer sperren.

Die folgende Abbildung zeigt die um die Schutzbeschaltung ergänzte Schaltung des NAND-Gatters:



Die Erweiterung des NAND-Grundgatters um eine OR-Verknüpfungsebene

Die folgende Abbildung stellt die OR-Verknüpfung mehrerer der bereits betrachteten AND-Verknüpfungslinien dar:



Für die erste Betrachtung der Schaltung wird D10 als noch nicht vorhanden angenommen.

An den Kathoden von D6 und D9 ist stets das höchste der beiden an den Anoden von D6 und D9 anliegenden Potentiale anliegend.

Wenn entweder der Verbindungspunkt von D1 und D2 oder der Verbindungspunkt von D7 und D8 auf einem H-Pegel liegt, dann stellt sich dieser H-Pegel auch am „oberen“ Anschluss von R2 ein, womit dann V1A in der bekannten Weise leitend wird.

Wenn beide Verbindungspunkte von D1 und D2 sowie von D7 und D8 auf L-Pegel sind, dann liegt die höhere der beiden Restspannungen am „oberen Anschluss“ von R2 an, womit V1A in der bekannten Weise sperrt.

Es soll nun der Fall betrachtet werden, in dem an allen 4 Eingängen ein H-Pegel anliegt.

Zunächst nehmen wir an, die Eingänge seien offen.

In diesem Fall liegen R1 und R7 in Bezug auf den mit R2 gebildeten Teiler parallel. Man erkennt, dass sich damit das Potential an den „unteren“ Anschlüssen von R1 und R7 auf 172V erhöht, womit die Vorgabe verletzt ist, dass die Sperrspannung über den Dioden 150V nicht überschreiten soll.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Bei einer größeren Anzahl von Eingängen der OR-Verknüpfung würden noch höhere Spannungen entstehen.

Daher wird die mit D10, R8 und D11 aufgebaute Clamp-Schaltung vorgesehen. Hierbei können D11 und R8 für mehrere Gatter gemeinsam verwendet werden.

Die nominelle Durchbruchspannung der verwendeten Zenerdiode 1N5953 ist 150V, hierbei ist ein Strom von 2mA spezifiziert. Aus dem Datenblatt ist ersichtlich, dass sich bereits mit einem Strom von 1mA eine Spannung von ca. 140V einstellt, die bereits ausreichend ist, um den H-Pegel bei einem auf H befindlichen Eingang nicht zu reduzieren.

Mit $R8 = 150K$ ergibt sich ein Querstrom von 1mA durch die Zenerdiode.

Es wird im Datenblatt der Zenerdiode ein thermischer Widerstand von $40^{\circ}C/W$ von der Sperrschicht zur Umgebung angegeben.

Es wird eine Umgebungstemperatur von $70^{\circ}C$ angenommen.

Damit ist folgende Verlustleistung in der Zenerdiode zulässig, wenn man eine innere Temperatur von $120^{\circ}C$ (Spezifiziertes Maximum: $200^{\circ}C$) nicht überschreiten will:

$$(120^{\circ}C - 70^{\circ}C) / 40^{\circ}C/W = 1,25W.$$

Der Querstrom verursacht eine Verlustleistung von 0,15W.

Damit verbleibt eine Reserve von 1,1W zur Aufnahme von Strömen aus einer gewissen Anzahl an Clamp-Schaltungen.

Ein AND-Verknüpfungspfad verursacht (bei offenen Eingängen) folgenden Strom durch die Zenerdiode: $(300V - 150V) / 1M = 0,15mA$.

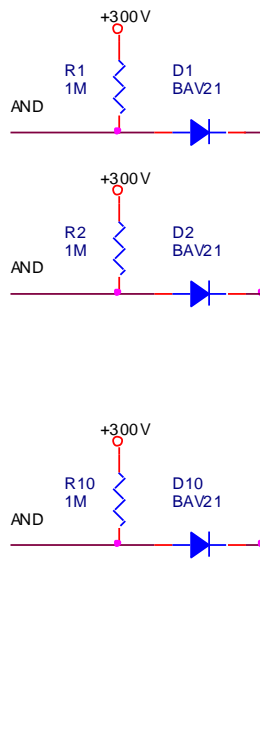
Dies entspricht folgender Verlustleistung in der Zenerdiode: $150V * 0,15mA = 22,5mW$.

Damit können an eine Zenerdiode bis zu 48 AND-Verknüpfungspfade mit einem Pull-Up-Widerstand von 1M Ω angeschlossen werden.

Es wird in der Folge die Zusammenschaltung einer größeren Anzahl von OR-Verknüpfungen betrachtet.

Zunächst könnte man die verschiedenen AND-Pfade direkt zusammenschalten.

Dies ist in der folgenden Abbildung gezeigt.

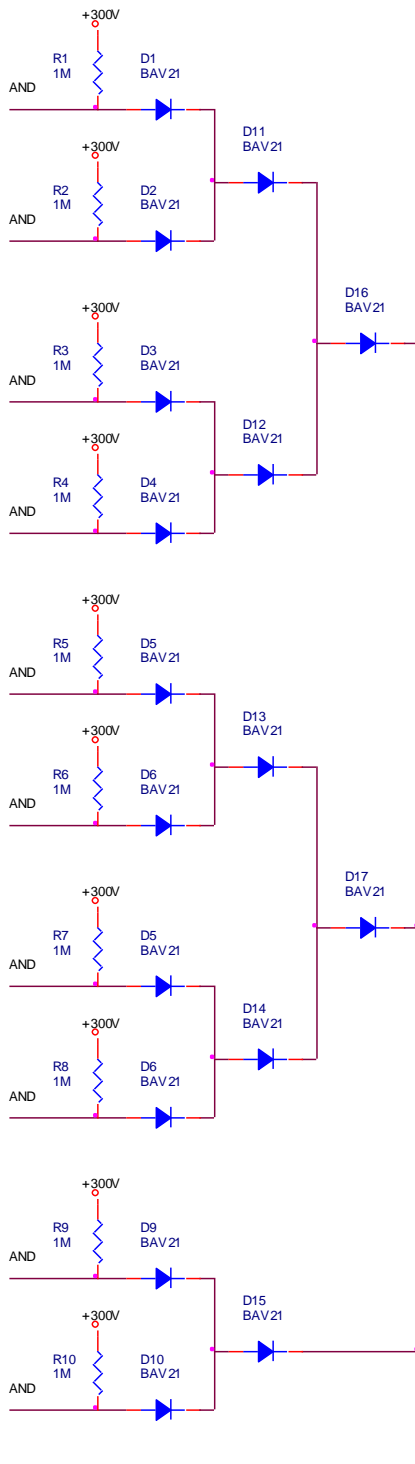
Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Die Abbildung symbolisiert die Zusammenschaltung von 10 Pfaden. Es wird angenommen, der oberste Pfad sei auf H-Pegel, während alle anderen 9 Pfade auf L-Pegel sind. Damit fließt durch die Dioden D2 bis D10 ein Leckstrom von jeweils $3\mu\text{A}$, womit sich insgesamt ein Leckstrom von $9 \cdot 3\mu\text{A} = 27\mu\text{A}$ ergibt.

Dieser Leckstrom muss zusätzlich über R1 aufgebracht werden, womit sich ein zusätzlicher Spannungsabfall an R1 ergibt. Der Quellwiderstand bei H-Pegel (mit Gitterstrom) ist an dieser Stelle $1\text{M}\Omega$ parallel $680\text{k}\Omega = 404\text{k}\Omega$, die Leerlaufspannung liegt bei 121V . Damit fällt die Spannung auf $121\text{V} - 27\mu\text{A} \cdot 404\text{k}\Omega = 121\text{V} - 9,7\text{V} = 111,3\text{V}$ ab. Man erkennt, dass man bei einer größeren Anzahl von OR-Verknüpfungen in Gefahr läuft, die minimale Schwelle zur Erkennung des H-Pegels von 102V zu erreichen oder zu unterschreiten.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Daher wird (gemäß Vorschlag von Angelo Papenhoff) eine Baumstruktur der Dioden vorgesehen:



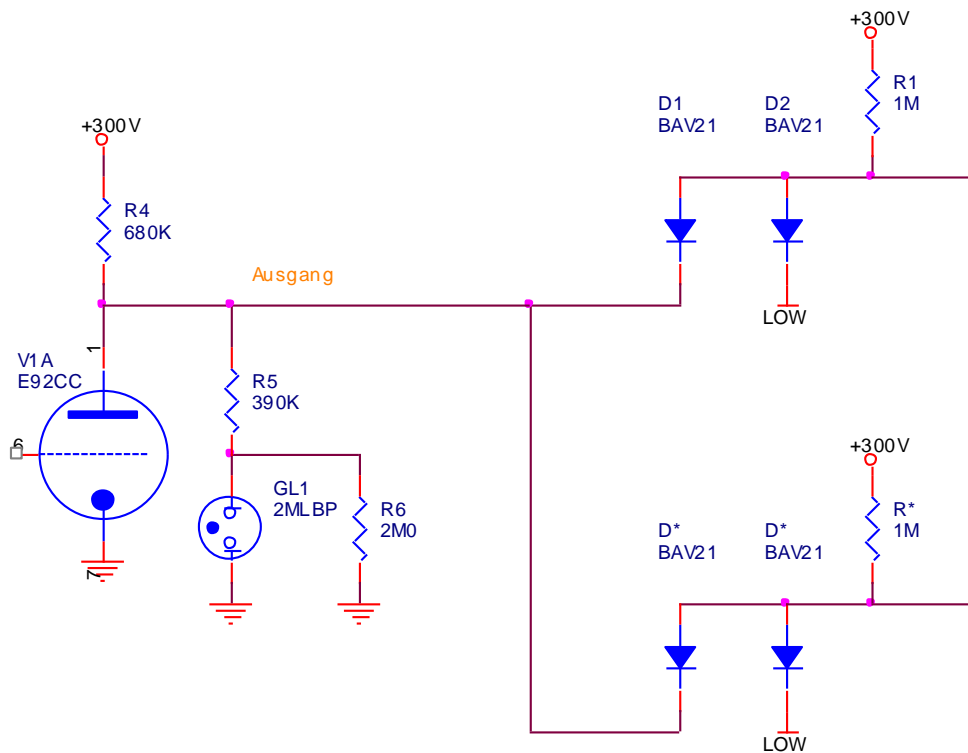
Erneut sei der oberste Eingang (an D1 führend) auf H, während alle anderen Eingänge auf L sind.

Damit fließt ein Leckstrom von je $3\mu\text{A}$ durch D2, D12, D17 und D15, womit insgesamt ein Leckstrom von $4 * 3\mu\text{A} = 12\mu\text{A}$ fließt. Damit ergibt sich eine Spannung von $121\text{V} - 12\mu\text{A} * 404\text{k}\Omega = 121\text{V} - 5\text{V} = 116\text{V}$. Dies ist noch akzeptabel.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Weiterhin wird der Einfluss des Leckstroms der Dioden der AND-Linien auf den H-Pegel am Ausgang der treibenden Stufe betrachtet.

Es wird angenommen, dass der Ausgang 10 AND-Linien auf H treibt, die aber alle durch andere Eingänge bereits nach L „gezogen“ sind.



In diesem Fall fließt durch die Diode D1 und die entsprechenden Dioden der anderen Zweige jeweils ein Leckstrom von 3uA, so dass sich insgesamt ein Leckstrom von $10 * 3\mu\text{A} = 30\mu\text{A}$ ergibt.

V1A ist gesperrt, GL1 leuchtet. Damit verhält sich die Ausgangsstufe wie eine Ersatzspannungsquelle mit einer Leerlaufspannung von 150V und einem Innenwiderstand von 248 kOhm.

Bei Belastung mit 30uA sinkt das Potential des Ausgangs daher wie folgt ab:

$$151\text{V} - 30\mu\text{A} * 248 \text{ kOhm} = 151\text{V} - 7,4\text{V} = 143,6\text{V}.$$

Damit liegt man noch deutlich über der Erkennungsschwelle von 102V für den H-Pegel.

Es soll die Grenze für die Anzahl der zu treibenden AND-Linien bestimmt werden:

Ein Abfallen des H-Pegels auf 120V wird toleriert.

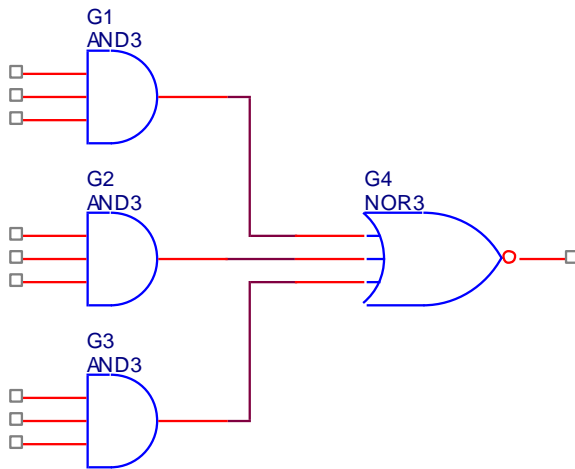
Damit ergibt sich ein möglicher Strom von: $(151\text{V} - 120\text{V}) / 248 \text{ kOhm} = 125\mu\text{A}$.

Dies entspricht 41 AND-Linien.

Man erkennt, dass die bereits bezüglich des L-Pegels hergeleitete Beschränkung auf 33 Eingänge weiterhin maßgeblich bleibt.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Die zuvor beschriebene Gatterstruktur kann als eine Zusammensetzung aus AND- und NOR-Gattern dargestellt werden. Beispielhaft ist in der Folge eine 3-fach Veroderung von 3-fach Verundungen dargestellt:



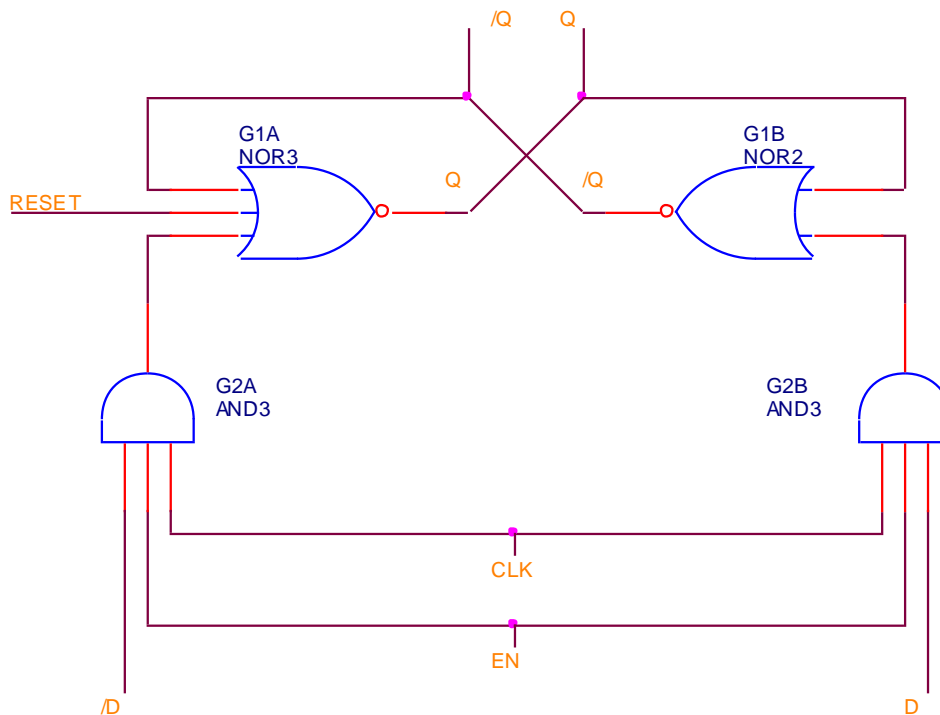
Man erkennt, dass sich die AND-Verknüpfungen auf einen Eingang reduzieren lassen. Dann erhält man ein reines NOR-Gatter.

Weiterhin erkennt man, dass sich dann, wenn man die NOR-Verknüpfung auf einen Eingang reduziert, man wieder das NAND-Gatter erhält, von dem ursprünglich ausgegangen wurde.

Der Aufbau eines Registers aus dem AND / NOR-Gatter

Der Aufbau des Registers wird zunächst mit abstrakten Gattersymbolen beschrieben.

Die grundsätzliche Theorie des Flipflops wird an dieser Stelle als bekannt vorausgesetzt, sie ist in der Dokumentation zum SPACE-AGE 1 am Beispiel der Implementation eines Flipflops mit Transistoren ausführlich beschrieben.



Die Ausgänge der NOR-Gatter G1A und G1B sind nur dann auf H, wenn alle Eingänge dieser Gatter auf L sind. Umgekehrt reicht es aus, einen einzigen der Eingänge auf H zu setzen, um einen L-Pegel am Ausgang zu erzwingen.

Zunächst wird der asynchrone Reset über das Signal RESET betrachtet. Hierzu nehmen wir an, dass die Ausgänge der AND-Gatter G2A und G2B auf L sind.

HINWEIS:

Es muss durch eine entsprechende Verknüpfung im Taktgenerator sichergestellt sein, dass das Taktsignal erst dann auf H gehen kann, wenn das RESET-Signal bereits inaktiv ist.

Mit dem H-Pegel am Signal RESET wird in jedem Fall ein L-Pegel am Ausgang des Gatters G1A (Q) erzwungen. Damit sind dann beide Eingänge des Gatters G1B auf L. Damit ist der Ausgang des Gatters G1B (/Q) auf H. Man erkennt, dass das Flipflop damit rückgesetzt ist. Durch die Rückführung des H-Pegels an /Q an G1A wird der Zustand des Flipflops auch dann gehalten, wenn das Signal RESET wieder zurück auf L geht.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Es wird das synchrone Setzen des Flipflops betrachtet.
Dazu ist der Eingang /D auf L, während der Eingang D auf H ist.
Ebenso ist der Eingang EN auf H.

Dabei sind die Ausgänge der AND-Gatter G2A und G2B immer noch auf L.

Wenn das Signal CLK auf H geht, dann geht auch der Ausgang des Gatters G2B auf H, während der Ausgang des Gatters G2A auf L bleibt.

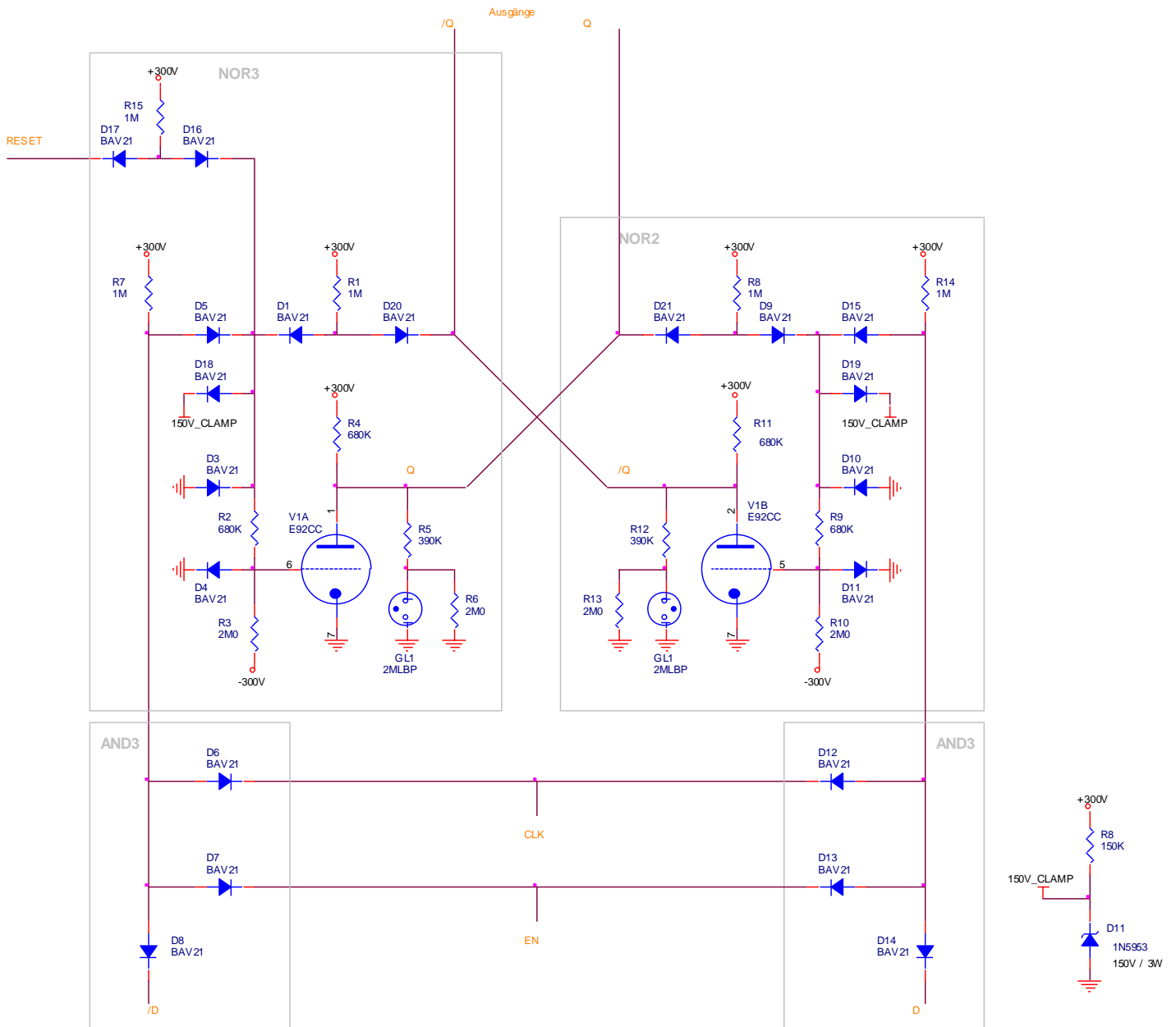
Damit wird erzwungen, dass der Ausgang des Gatters G1B (/Q) auf L geht. Damit sind alle Eingänge von G1A auf L, womit dann der Ausgang von G1A (Q) auf H geht. Das Flipflop ist damit gesetzt. Da der Ausgang von G1A wiederum auf einen Eingang von G1B rückgeführt wird, wird dieser Zustand auch dann gehalten, wenn das Signal CLK wieder auf L zurückgegangen ist.

Wäre das Signal EN während des H-Pegels des Signals CLK dagegen auf L gewesen, wäre keine Änderung des Zustandes des Flipflops erfolgt, da dann der Ausgang von G2B dauerhaft auf L gewesen wäre.

In gleicher Weise wird das Flipflop synchron rückgesetzt, wenn /D auf H ist und D auf L ist und dann EN und CLK gleichzeitig auf H gebracht werden. In diesem Fall ergibt sich für die Dauer des H-Pegels am Signal CLK ein H-Pegel am Ausgang des Gatters G2A, womit dann das Flipflop rückgesetzt wird.

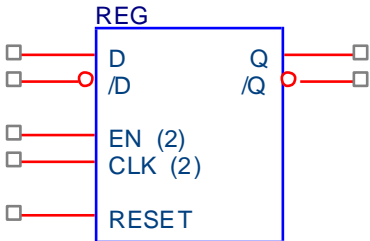
Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Die soeben auf Gatterebene beschriebene Schaltung lässt sich mithilfe der bereits beschriebenen Gatter-Grundschaltungen „Eins zu Eins“ in eine Röhrenschaltung umsetzen:



Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

In weiteren Darstellungen wird das Register als Schaltsymbol zusammengefasst dargestellt:



Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Der Entwurf der Baugruppe SP3V-101 ADD_HEX

Dieser Textabschnitt bezieht sich auf den in den Anlagen befindlichen Schaltplan der Baugruppe SP3V-101 ADD_HEX.

Die Baugruppe SP3V-101 addiert zwei Hex-Zahlen mit einer Breite von jeweils 4 Bit. Sie hat einen Übertragseingang und einen Übertragsausgang. Die Summenausgänge werden über einen abschaltbaren Bustreiber nach außen geführt. Diese Funktion entspricht dem TTL-Baustein 74xx283 mit einem nachgeschalteten Bustreiber 74xx125.

Die folgende Wahrheitstabelle stellt die gewünschte Funktion der Baugruppe, bezogen auf eine Bitposition dar. Die Ergebnisse sind nach Summe und Übertrag getrennt dargestellt.

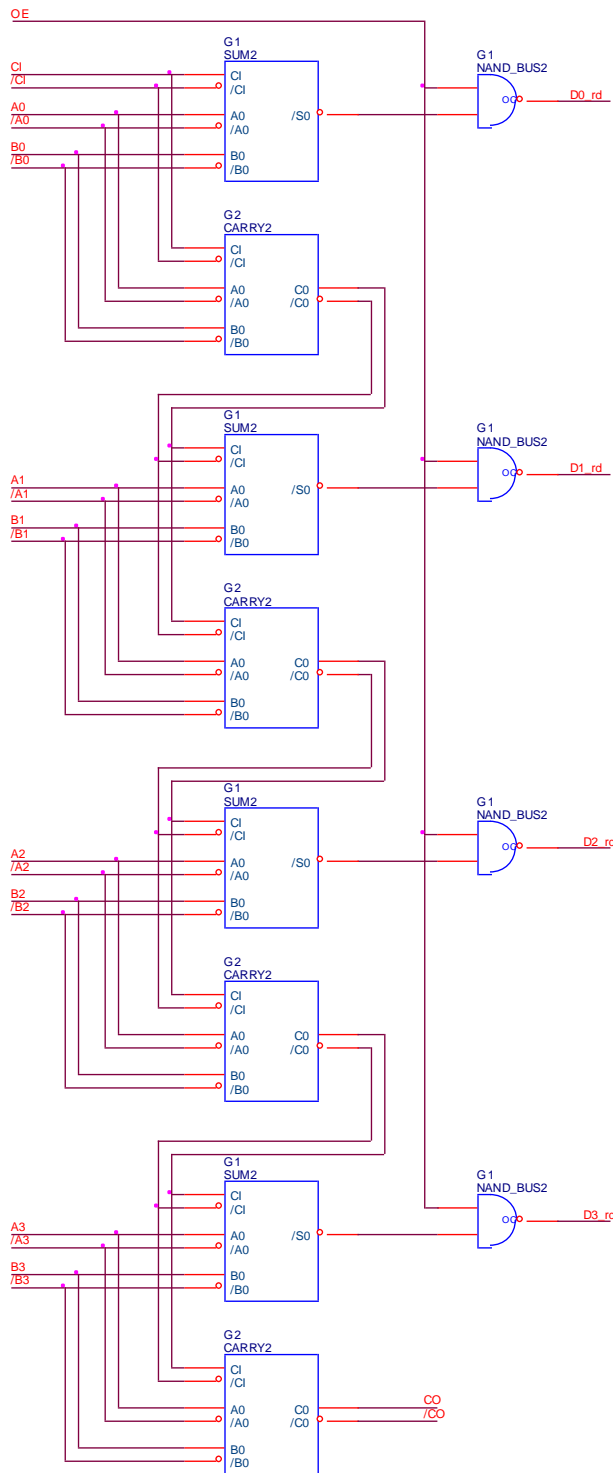
Übertrag Ein	Summand 1	Summand 2	Ergebnis	Dezimal
			Summe	
0	0	0	0	$0 + 0 + 0 = 0$
0	0	1	1	$0 + 0 + 1 = 1$
0	1	0	1	$0 + 1 + 0 = 1$
0	1	1	0	$0 + 1 + 1 = 2$
1	0	0	1	$1 + 0 + 0 = 1$
1	0	1	0	$1 + 0 + 1 = 2$
1	1	0	0	$1 + 1 + 0 = 2$
1	1	1	1	$1 + 1 + 1 = 3$
			Übertrag	
0	0	0	0	$0 + 0 + 0 = 0$
0	0	1	0	$0 + 0 + 1 = 1$
0	1	0	0	$0 + 1 + 0 = 1$
0	1	1	1	$0 + 1 + 1 = 2$
1	0	0	0	$1 + 0 + 0 = 1$
1	0	1	1	$1 + 0 + 1 = 2$
1	1	0	1	$1 + 1 + 0 = 2$
1	1	1	1	$1 + 1 + 1 = 3$

Der Übertragseingang der untersten Bitposition Bit 0 ist nach außen geführt. Der Übertragsausgang der Addierschaltung für Bit 0 wird an den Übertragseingang der nächstfolgenden Addierschaltung für Bit 1 gelegt. In entsprechender Weise werden die Addierschaltungen für die Bits 2 und 3 in Bezug auf den Übertrag kaskadiert. Der Übertragsausgang der Addierschaltung für Bit 3 wird nach außen geführt.

Die durch diese serielle Verarbeitung des Übertrags entstehende Addition der Laufzeiten der einzelnen Addierstufen in Bezug auf das Vorliegen des Gesamtergebnisses wird zum Zwecke der Einsparung von Bauelementen akzeptiert.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

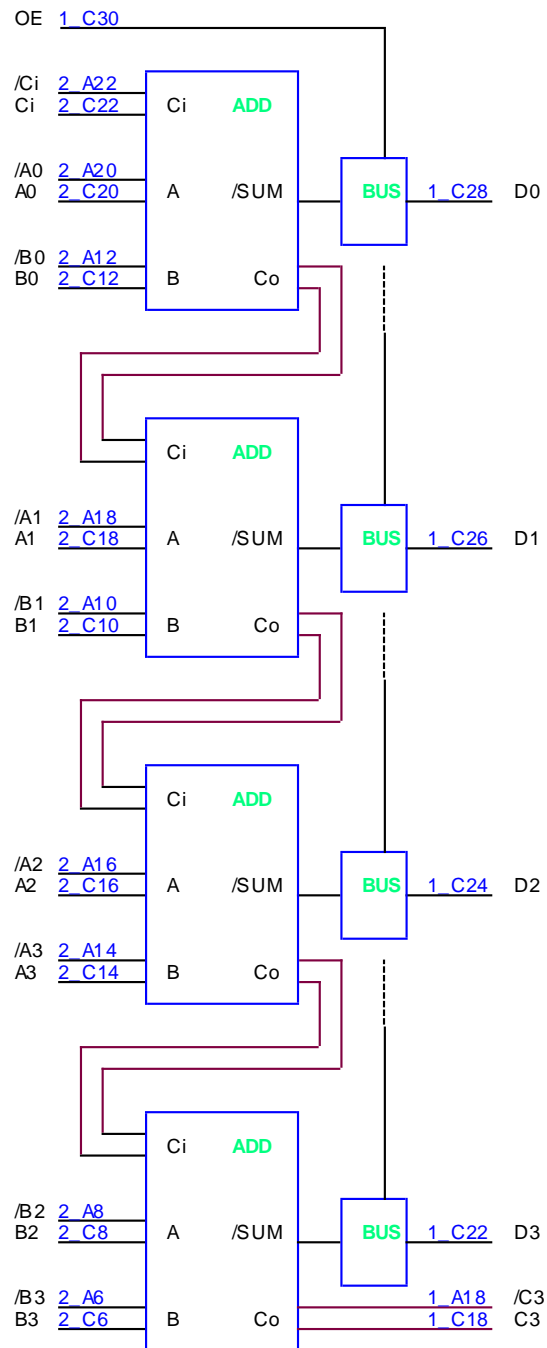
Die Logikblöcke für die Bildung der Teilsummen und der Überträge werden als abstrakte Blöcke dargestellt. Damit ergibt sich die folgende Gatterschaltung für die Baugruppe:



Diese Schaltung wurde Eins zu Eins mittels der Struktur des bereits hergeleiteten AND/NOR-Gatters umgesetzt. Diese Schaltung ist im anliegenden Schaltplan der Baugruppe SP3V-101 ADD_HEX dargestellt.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

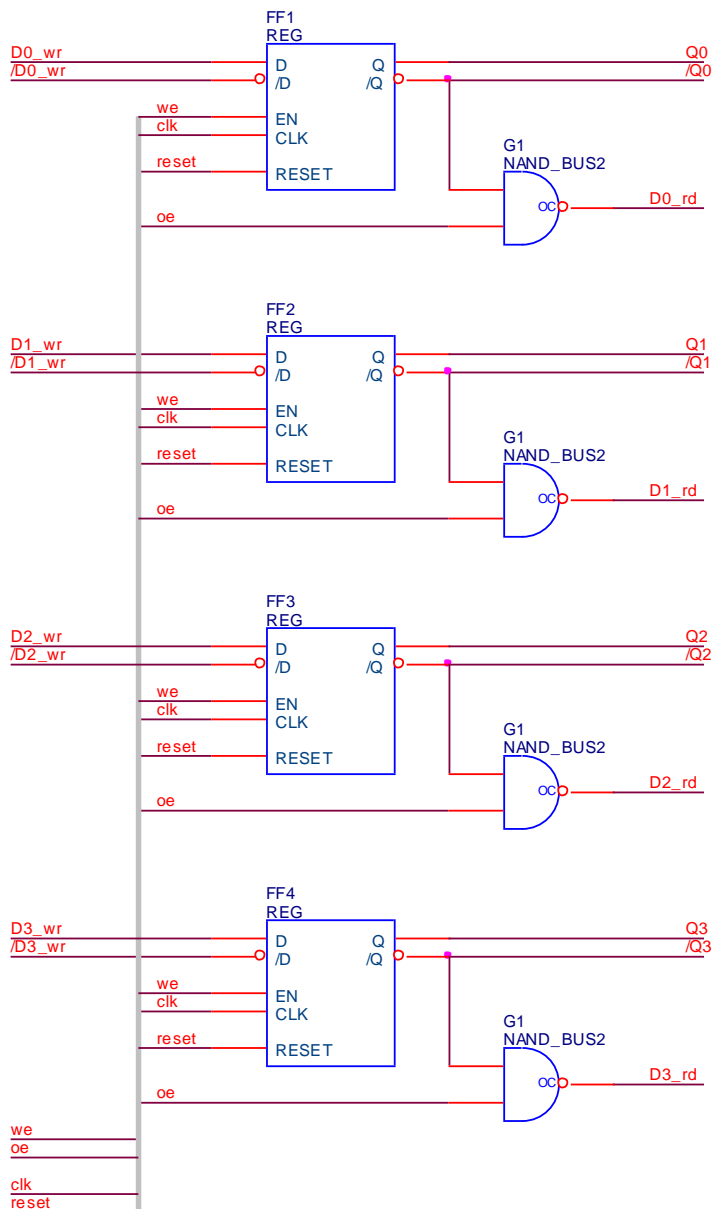
Die folgende Skizze zeigt die Anschlussbelegung der Baugruppe:



Der Entwurf der Baugruppe SP3V-102 REG

Dieser Textabschnitt bezieht sich auf den in den Anlagen befindlichen Schaltplan der Baugruppe SP3V-102 REG.

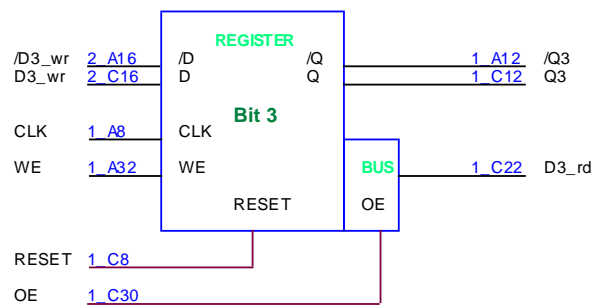
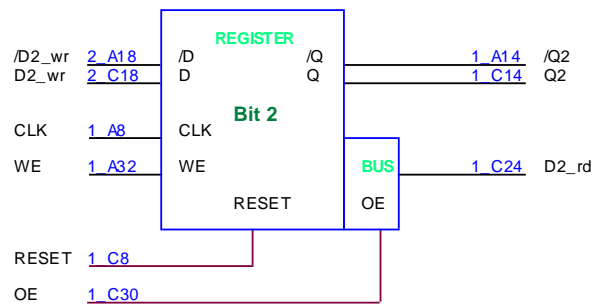
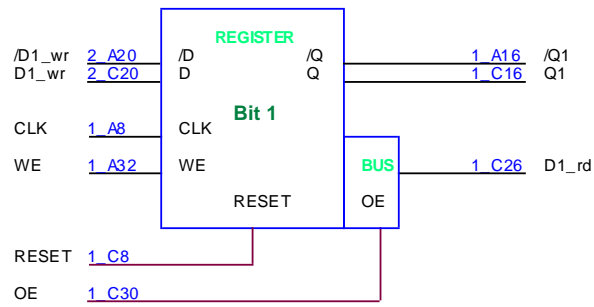
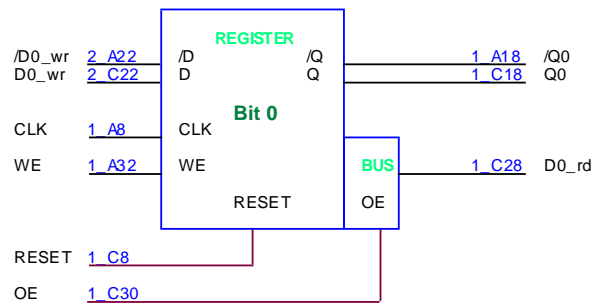
Die folgende Skizze zeigt den Schaltplan der Baugruppe in Gattersymbolen.



Die Umsetzung in den Detailschaltplan erfolgte Eins zu Eins durch Zusammensetzen der bereits hergeleiteten Grundsaltungen. Diese Schaltung ist im anliegenden Schaltplan der Baugruppe SP3V-102 REG dargestellt.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

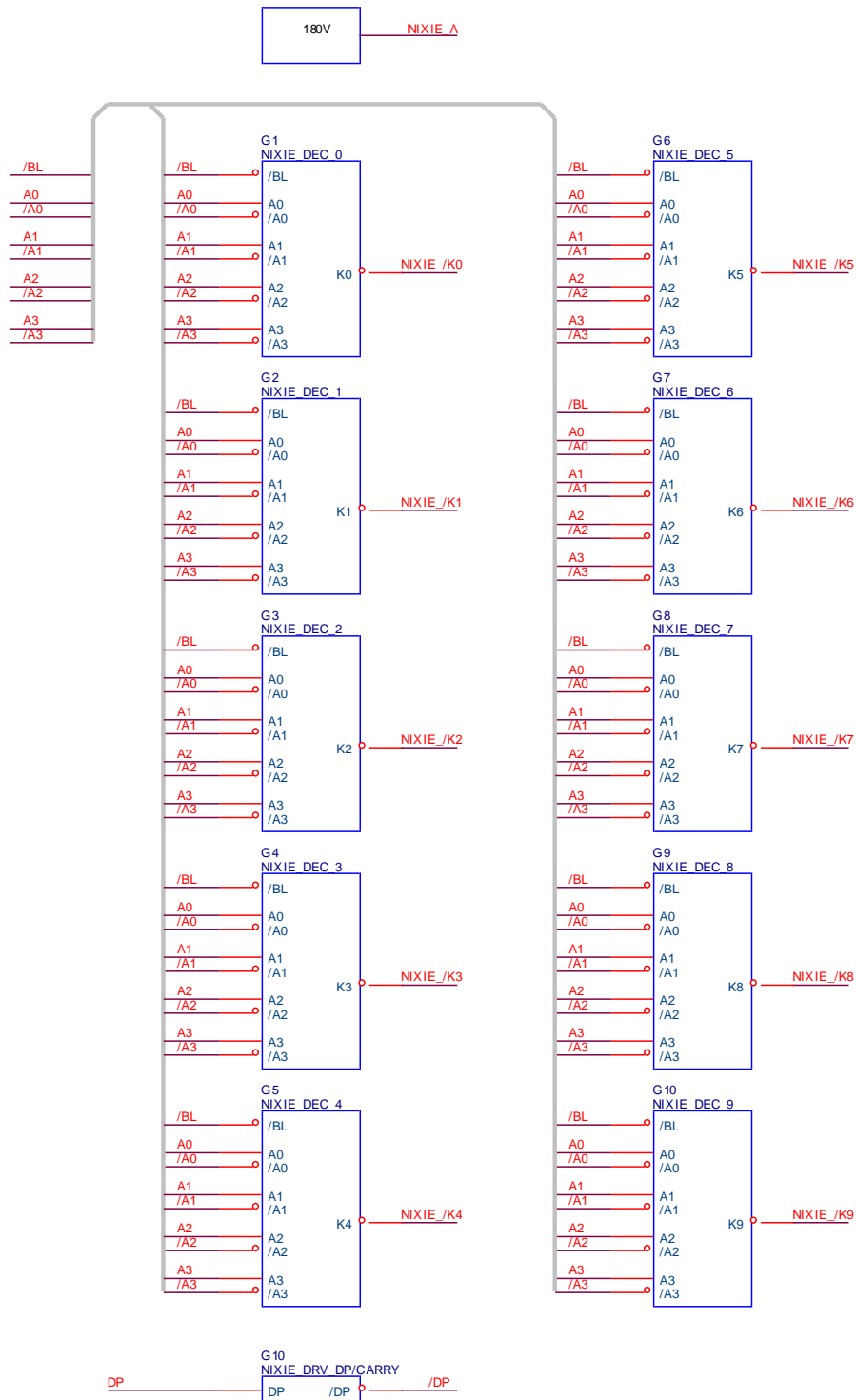
Die folgende Skizze zeigt die Anschlussbelegung der Baugruppe:



Der Entwurf der Baugruppe SP3V-103 NIXIE

Dieser Textabschnitt bezieht sich auf den in den Anlagen befindlichen Schaltplan der Baugruppe SP3V-103 NIXIE.

Die folgende Skizze zeigt den Schaltplan der Baugruppe in Gattersymbolen.



Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Eine detaillierte Wahrheitstabelle findet sich in der Excel-Tabelle „Testergebnisse_SP3V-101_2_3_4_5_2022-08-04.xls „ in den Anlagen.

Die Umsetzung in den Detailschaltplan erfolgte Eins zu Eins durch Zusammensetzen der bereits hergeleiteten Grundsaltungen zuzüglich einer Ergänzung um zwei Spannungsquellen für die Versorgung der Nixie-Röhre und zur Vorspannung der inaktiven Kathoden der Nixie-Röhre. Diese Schaltung ist im anliegenden Schaltplan der Baugruppe SP3V-103 NIXIE dargestellt.

Die Dimensionierung dieser Spannungsquellen und der dazugehörigen Vorwiderstände ist in der Folge dokumentiert:

Die verwendete Nixie-Röhre Z560M von RFT hat die folgenden Kennwerte:

Zündspannung: 145V
Brennspannung: 135V
Brennstrom: 1,8mA..2mA

Festlegung Versorgungsspannung für Nixie: 180V

Dann R002: $(180V - 135V) / 1,8mA = 25K \Rightarrow$ Normwert 24K $P = 0,08W$

(In der tatsächlich realisierten Baugruppe wurde der Wert 24K9 bestückt)

Festlegung: Strom durch D001 im Lastfall: 3mA.

$P = 180V * 3mA = 0,54W$.

Damit Strom durch D001 im Leerlauf: (Addition von 2mA für den Strom, der sonst durch die Nixie fließen würde zum vorhandenen Leerlaufstrom von 3mA)

$P = 180V * 5mA = 0,97W$.

R001: $(300V - 180V) / 5mA = 24K$

$P = 0,6W$.

\Rightarrow 1W-Bauform

Festlegung der Clampspannung für Nixie: 100V

Strom durch D11 im Leerlauf soll sein: 5mA.

$P = 100V * 5mA = 0,5W$.

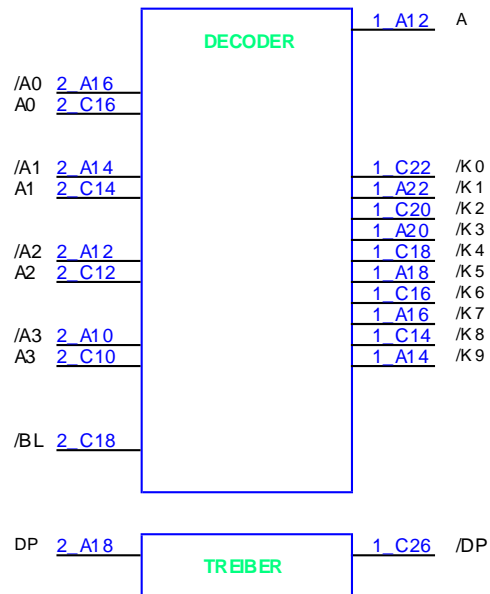
R8 = $(300V - 100V) / 5mA = 40K \Rightarrow$ Normwert 39K

$P = 200V * 5mA = 1,0W$.

\Rightarrow 2W-Bauform

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

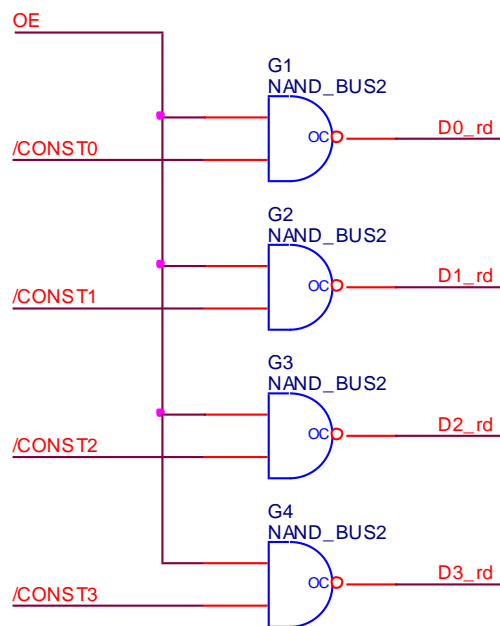
Die folgende Skizze zeigt die Anschlussbelegung der Baugruppe:



Der Entwurf der Baugruppe SP3V-104 CONST

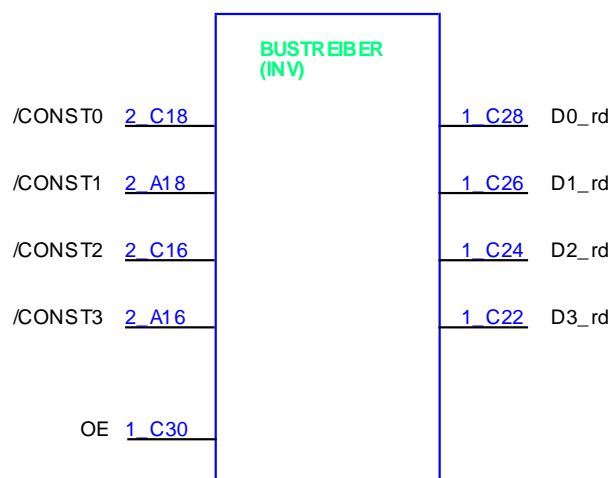
Dieser Textabschnitt bezieht sich auf den in den Anlagen befindlichen Schaltplan der Baugruppe SP3V-104 CONST.

Die folgende Skizze zeigt den Schaltplan der Baugruppe in Gattersymbolen.



Die Umsetzung in den Detailschaltplan erfolgte Eins zu Eins durch Zusammensetzen der bereits hergeleiteten Grundsaltungen. Diese Schaltung ist im anliegenden Schaltplan der Baugruppe SP3V-104 CONST dargestellt.

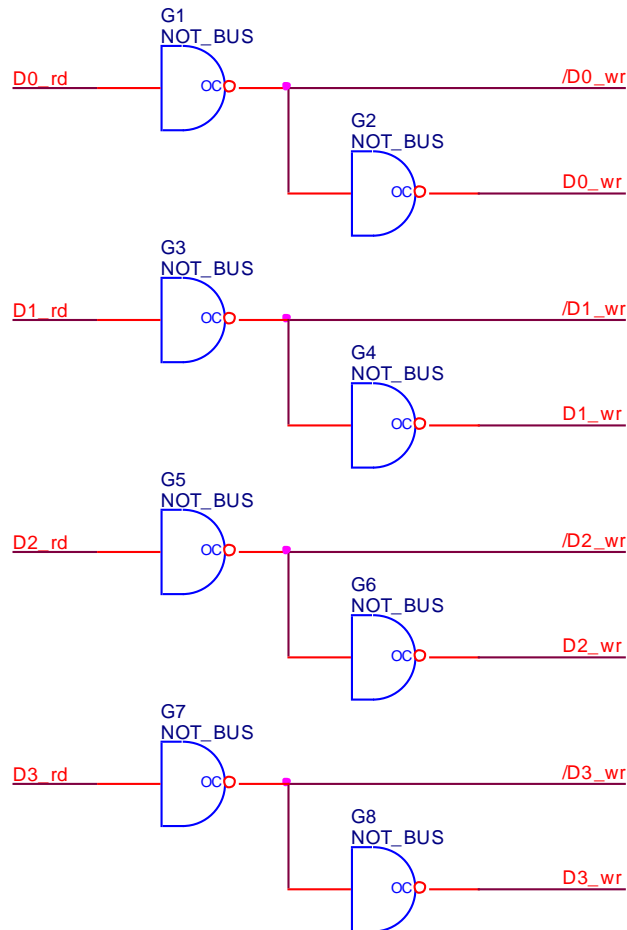
Die folgende Skizze zeigt die Anschlussbelegung der Baugruppe:



Der Entwurf der Baugruppe SP3V-105 BUS

Dieser Textabschnitt bezieht sich auf den in den Anlagen befindlichen Schaltplan der Baugruppe SP3V-105 BUS.

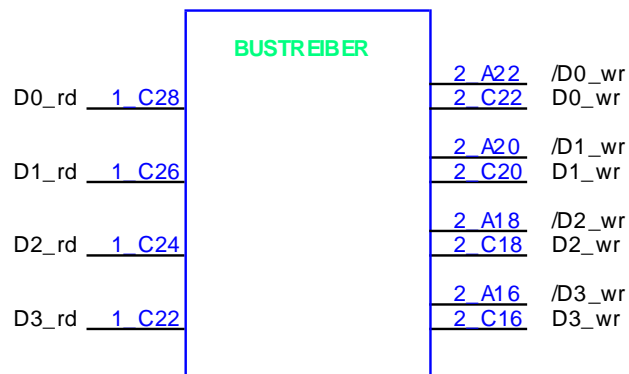
Die folgende Skizze zeigt den Schaltplan der Baugruppe in Gattersymbolen.



Die Umsetzung in den Detailschaltplan erfolgte Eins zu Eins durch Zusammensetzen der bereits hergeleiteten Grundsaltungen. Diese Schaltung ist im anliegenden Schaltplan der Baugruppe SP3V-105 BUS dargestellt.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Die folgende Skizze zeigt die Anschlussbelegung der Baugruppe:



Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Der Entwurf des Panels SP3V-107

Es wurden die folgenden Schaltelemente herausgesucht, die bei Digikey ab Lager erhältlich waren.

Taster:	U18	J2 V3 QE2	C&K 2 Stück
Schalter:	7101	J2 V3 BE2	C&K 10 Stück

J2 = Schalthebel

V3 = Bauhöhe 11,68mm

Hinweis: Das Rating der Goldkontakte **BE2** ist trotz der Angabe 20V bei der Spezifikation des Schaltvermögens ausreichend, da der getrennte Strom sehr klein ist. Die Datenblattangabe „dielectric strenght“, die für das Isolationsvermögen des Schalters maßgeblich ist, beträgt 1000V.

Beim Entwurf wurde mittels einer Trennstelle und einem Lötpad die Möglichkeit vorgesehen, die Polarität des Schaltvorgangs zu invertieren, diese wurde tatsächlich benötigt, da zunächst übersehen wurde, dass die Eingänge der Baugruppe CONST invertierend sind.

Der Entwurf des Netzteils SP3V-130 für das Demo-System

Dieser Textabschnitt bezieht sich auf den in den Anlagen befindlichen Schaltplan der Baugruppe SP3V-130.

Abschätzung des Stromverbrauchs:

12.6VAC:

Heizung:

Gesamtzahl der Röhren: 38

Damit $38/2 = 19$ Heizkreise 12,6V / 0,4A parallel = 7,6A insgesamt.

Galvanische Trennung:

Schätzung: 0,25A

Summe: **7,9A**

P = **99W**

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

+300V:

Anodenwiderstände:

Gesamtzahl der Triodensysteme: $38 * 2 = 76$.

Obere Schranke für Stromaufnahme: $300V / 680K * 76 = 33,5 \text{ mA}$

Gattereingänge:

Gesamtzahl der Gattereingänge:

REG	$24 * 3 \text{ BG} = 72$
ADD_HEX	40
NIXIE	11
CONST	4
BUS	8

Summe: 135 Eingänge

Obere Schranke für Stromaufnahme: $300V / 1M * 135 = 40,5 \text{ mA}$

Clampschaltungen:

Gesamtzahl: 7

Stromaufnahme $(300V - 150V) / 150K * 7 = 7 \text{ mA}$.

Nixie:

2mA

Summe + 300V: $33,5 \text{ mA} + 40,5 \text{ mA} + 7 \text{ mA} + 2 \text{ mA} = \mathbf{83 \text{ mA}}$.

P = **25W**

-300V:

Gitterwiderstände: 1 x pro Triodensystem => 76

Obere Schranke für Stromaufnahme: $300V / 2M * 76 = \mathbf{11,4 \text{ mA}}$

P = **3,4W**

Für den möglichen Anschluss einer Relaischaltung zur galvanischen Abtrennung der Schalter des Panels wurde noch ein aus der Heizspannung 12,6V gespeister DC-Ausgang mit einer unregelmäßigen Spannung von ca. 16V und einem Nennstrom von 250mA vorgesehen, der jedoch in der aktuellen Ausführung des Demo-Systems nicht genutzt wird.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Auslegung Zweig 12.6VAC/16VDC:

Es wird ein Trafo des Typs A41-175-12 von Bel Signal Transformers vorgesehen, mit einer Sekundärspannung von 12,6V und einer (überdimensionierten) Leistung von 175VA.

Gleichstromausgang:

Scheitelwert: $12,6V * 1,41 = 17,7V$

Abzüglich Diodenflussspannung ca. 16V

Angenommener Strom: 250mA

Ziel: Welligkeit 0,5Vpp

$C = 10ms * 0,25A / 0,5V = 5000\mu F$, es wurde der Normwert 4700 μF vorgesehen.

Auslegung Zweig + 300V:

Es wird ein Standard-Netztrafo mit einer Sekundärspannung von 230V vorgesehen.

Scheitelwert damit: 325V.

Dies ist um 8% höher als die gewünschte Spannung von 300V.

Der Scheitelwert kann aber in der Praxis nicht erreicht werden, da sich die Sinusform in der Realität abplattet, dieser Effekt wird durch den zur Strombegrenzung notwendigen Vorwiderstand vor dem Ladekondensator noch verstärkt.

Die Spannung wird bei Bedarf durch Anpassen des Vorwiderstandes eingestellt.

Ladekondensator:

Mit einem praxisgerechten Wert von 100 μF erhält man eine Welligkeit von:

$10ms * 0,083A / 0,1mF = 3,8Vpp$.

Im Sinne einer Überdimensionierung werden 2 Kondensatoren mit je 100 μF vorgesehen.

„Zwischen“ den Kondensatoren befindet sich ein Serienwiderstand von 100 Ohm.

Als Netztrafo wird der A41-80-230 von Bel Signal Transformers vorgesehen, mit einer Sekundärspannung von 230V und einer (überdimensionierten) Leistung von 80VA.

Auslegung Zweig - 300V:

Die Schaltung ist identisch zu Schaltung für +300V, jedoch mit den folgenden Ausnahmen:

- „Zwischen“ den Kondensatoren befindet sich ein Serienwiderstand von 220 Ohm.
- Netztrafo A41-25-230 von Bel Signal Transformers, mit einer Sekundärspannung von 230V und einer (überdimensionierten) Leistung von 25VA

Der Entwurf des Testadapters SP3V-140 für die Baugruppen des Demo-Systems

Dieser Textabschnitt bezieht sich auf den in den Anlagen befindlichen Schaltplan der Baugruppe SP3V-140.

Übersicht:

Die zu prüfende Baugruppe (DUT) wird über die Steckverbinder J1001 und J1002 kontaktiert. Die Stromversorgung wird über J1003 bzw. J1004 angeschlossen. Der zunächst noch unbenutzte zweite Versorgungs-Steckverbinder ist für die Versorgung möglicher zukünftiger Ergänzungen vorgesehen.

Für Ein- und Ausgangssignale ist eine identische Beschaltung vorgesehen. Diese Beschaltung ist für alle Signale gleich.

Als Beispiel wird das Signal SIG_2_A2 betrachtet.

Betrachtung für den Fall, dass dieses Signal mit einem Ausgang des DUT verbunden ist:

In diesem Fall ist der Schalter SW1101/1 stets geöffnet.

R1101 fungiert als zusätzlicher Pull-Up-Widerstand, der damit eine Last von näherungsweise 2 Eingängen nachbildet. Über den Teiler aus R1102 und R1103 wird die Glimmlampe GL1101 an den Ausgang geschaltet, die bei einem H-Pegel leuchtet.

Diese Beschaltung entspricht exakt der Beschaltung der Standard-Ausgänge im SP3V. Im Falle eines Bustreiber-Ausgangs, der diese Beschaltung nicht hat, wirkt sie als alleinige Beschaltung des Ausgangs.

Mit einem Berg-Kabel kann eine Verbindung von J1101/1 an einen beliebigen Anschluss von J2101 hergestellt werden. Dann wird zu R1101 ein weiterer Widerstand mit dem Wert 33K parallelgeschaltet, um das Verhalten des zu testenden Ausgangs bei höheren Anodenströmen zu überprüfen. Der sich bei zusätzlicher Last einstellende L-Pegel kann an dem dazugehörigen Testpunkt aus TP2101..TP2108 gemessen werden.

Betrachtung für den Fall, dass dieses Signal mit einem Eingang des DUT verbunden ist:

Die bereits erwähnte Beschaltung mit R1101..R1103 und GL1101 bildet den treibenden Ausgang im System nach. Bei geöffnetem Schalter SW1101/1 wird ein H-Pegel dargestellt, womit dann GL1101 leuchtet. Bei geschlossenem Schalter SW1101/1 wird ein L-Pegel dargestellt, dieser L-Pegel ist mit 0V „besser“ als die tatsächlichen L-Pegel in einem realen System.

Um die Schaltschwellen des Eingang „analog“ zu überprüfen, wird der Schalter SW1101/1 geöffnet mit einem Berg-Kabel eine Verbindung von J1101/1 zu einem beliebigen Pin von J3101 hergestellt. Damit wird der Eingang (näherungsweise) auf die Ausgangsspannung des an J3102 angeschlossenen Labornetzteils „heruntergezogen“, der wirksame L-Pegel kann also durch Verstellen der Ausgangsspannung des Labornetzteils variiert werden.

Es können auf diese Weise bis zu 8 Eingänge auf einen (identischen) einstellbaren L-Pegel gebracht werden.

D3101 bis D3108 verhindern einen Kurzschluss des Labornetzteils, wenn irrtümlich der DIL-Schalter des angeschlossenen I/Os geschlossen ist. D3109 verhindert eine Rückspeisung der aus dem Eingang kommenden Ströme in das Labornetzteil. Diese Ströme werden stattdessen von der Last aus R3101..R3104 aufgenommen.

Zukünftige Erweiterung:

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Über J1005 kann für zukünftige Anwendungen ein entprelltes Taktsignal und ein entprelltes Resetsignal zugeschaltet werden. Für die aktuelle Anwendung befindet sich eine Brückung in J1005, die die Signale `clk_DUT` und `clk` sowie `reset_DUT` und `reset` jeweils miteinander verbindet.

Betrachtung der Details der Dimensionierung:

Die höchste Verlustleistung an R2101..R2108 tritt dann auf, wenn irrtümlich der Schalter des angeschlossenen I/Os geschlossen ist. In diesem Fall darf keine Beschädigung auftreten.

$$P = 300V^2 / 33k \text{ Ohm} = 2,73W.$$

Es soll der maximal über J3101 aus den Eingängen heraus fließende Strom abgeschätzt werden.

Ein Eingangspin treibt maximal 32 Eingänge. Dies entspricht einem Strom von $32 * 300V / 1M\Omega = 32 * 0,3mA = 9,6mA$.

Würde man 8 derartige Eingänge gleichzeitig an J3101 anschließen, dann ergäbe sich ein Strom von $9,6mA * 8 = 76,8mA$.

Mit dem vorgesehenen Lastwiderstand von $1k\Omega$ ergibt sich dann (bei 0V am Labornetzteil) eine Spannung von 76,8V, was gerade noch einem gültigen L-Pegel entspricht und für diesen unwahrscheinlichen Grenzfall akzeptabel ist.

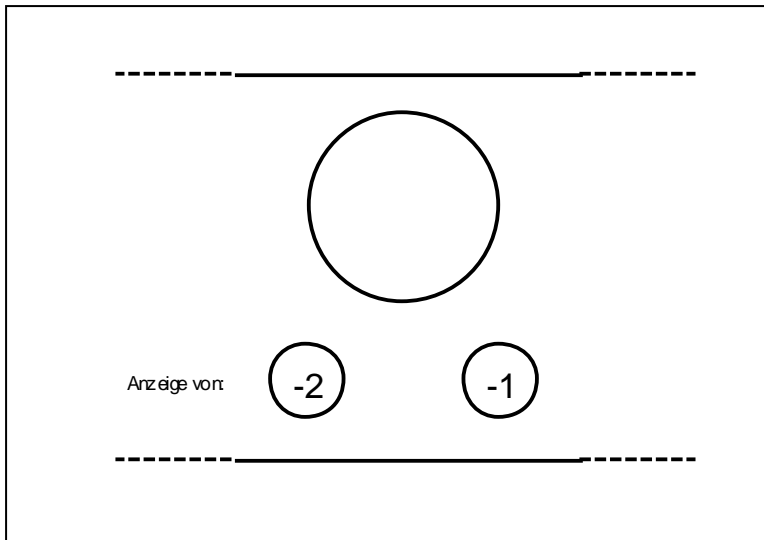
Es soll möglich sein, Spannungen bis 130V über der Last einzustellen. Damit ergibt sich ein Strom von $130V / 1k = 130mA$ durch die Last und somit eine Verlustleistung von $130V * 0,13A = 16,9W$.

Die Isolationsspannung der verwendeten DIL-Schalter Grayhill 76PSB08ST ist 500V eff.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Verschiedene Details

Die folgende Skizze zeigt die Zuordnung der Glühlampen an der Frontseite der Steckkarten:



Inbetriebnahme und Test

Alle Baugruppen wurden im Testadapter SP3V-140 betrieben und, wenn nicht anders angegeben, mit dem Netzteil SP3V-130 versorgt.

Die Inbetriebnahme der Baugruppe SP3V-101 ADD-HEX

(Durchführung am 18.07.2022)

Die Baugruppe wurde mit gebrauchten Röhren E92CC von TELEFUNKEN aus dem Kauf beim Schrottplatz Manteuffel im Jahr 2007 bestückt.

Vorbereitende Tests

(1)

Clamp-Spannung an D11: 150V (entspricht Erwartungswert 150V)

(2)

Messung der Heizspannungen

Messung direkt an den Anschlüssen 3 und 4 der Röhrenfassungen.

V1:	6,30V	V2:	6,28V	V1 zu V2:	12,57V
V3:	6,02V	V4:	6,45V	V3 zu V4:	12,56V
V5:	6,20V	V6:	6,33V	V5 zu V6:	12,56V
V7:	6,23V	V8:	6,30V	V7 zu V8:	12,56V

Unterseite Backplane, direkt an Steckerpins zu V1..V4: 12,64V

Unterseite Backplane, direkt an Steckerpins zu V5..V8: 12,62V

Auf Netzteil-Leiterplatte, direkt am Gleichrichter für Hilfsspannung 16V: 12,71V

Größte Abweichung nach oben: 6,45V = +2,4%

Größte Abweichung nach unten: 6,02V = - 4,4%

Die im Datenblatt E92CC vorgegebene Toleranz von +/-5% wird noch eingehalten, es ist aber kein Raum mehr für Netzspannungsschwankungen.

Da diese starken Abweichungen nur bei einer Röhren-Paarung auftreten kann dieses Problem durch Selektieren der Röhren in Bezug auf den Heizfadenwiderstand im Warmzustand gelöst werden.

Der Spannungsabfall von der Trafo-Sekundärwicklung zu den Röhrenfassungen ist:

$$12,71V - 12,56V = 150mV.$$

Der nominale Heizstrom ist: 4 Serienschaltungen mit je 400mA = 1,6A.

Damit ergibt sich folgender Widerstand im gesamten Heizkreis:

$$150mV / 1,6A = 94 m\Omega = 47m\Omega \text{ pro Zweig.}$$

Der mittlere Widerstand der Leiterbahnen und Lötstellen eines einzelnen Heizkreises auf dem PCB ist:

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

$12,63\text{V} - 12,56\text{V} = 70\text{mV} / 0,4\text{A} = 175\text{m}\Omega = 88\text{ m}\Omega$ pro Zweig.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Test der Logikfunktion

Der Test wurde zunächst mit nominalen Spannungsbedingungen vorgenommen.

Der Versuchsaufbau wurde mit einem Stelltrafo versorgt.

Der Stelltrafo wurde so eingestellt, dass sich eine positive Versorgungsspannung von 300V ergab.

Die negative Versorgungsspannung wurde dabei mit -316V gemessen.

Die Testergebnisse sind in der folgenden Tabelle in den Anlagen dokumentiert:

„Testergebnisse_SP3V-101_2_3_4_5_2022-08-04.xls

Die Testergebnisse entsprechen der erwarteten Logikfunktion.

Die Glimmlampen am Tastadapter zünden bei 90V an der dazugehörigen Anode und erlöschen bei 82V an der dazugehörigen Anode.

Test des Verhaltens bei abweichenden Netzspannungen:

Der vierte Testschritt, die Überprüfung der vierten Addiererstufe, wurde mit verschiedenen am Stelltrafo eingestellten Netzspannungen wiederholt:

Einstellung der Netzspannung auf Reduktion der positiven Versorgung auf 60% = 180V.

Die gesamte Logikfunktion dieses Testschrittes wurde vollständig korrekt ausgeführt.

Einstellung der Netzspannung auf Erhöhung der positiven Versorgung auf 120% = 360V.

Die gesamte Logikfunktion dieses Testschrittes wurde vollständig korrekt ausgeführt.

Es zeigte sich jedoch eine Empfindlichkeit der Schaltung gegenüber einem raschen Absenken der Netzspannung. In diesem Fall ergibt sich ein starkes Ungleichgewicht zwischen der positiven und der negativen Versorgungsspannung, da der Strom aus der negativen Versorgung geringer als der Strom aus der positiven Versorgung ist, womit die negative Versorgung langsamer absinkt, als dies die positive Versorgung tut, da die Entladung der gleich großen Kapazitäten bei der negativen Versorgung langsamer erfolgt. Bei einem raschen Absenken der Netzspannung ist dann die negative Versorgung temporär deutlich höher als die positive Versorgung, dies führt dazu, dass einige Triodensysteme, die bei korrekten Verhältnissen leitend sind, kurzzeitig sperren, dies ist am Aufflackern der dazugehörigen Glimmlampen beim Absenken der Netzspannung zu erkennen.

In einem späteren System besteht daher die Notwendigkeit, einerseits das Absinken der positiven Versorgung durch größere Kapazitäten zu verlangsamen und andererseits die Kapazität an der negativen Versorgung soweit zu verkleinern, dass ein ungefähre Gleichlauf der Spannungen erreicht wird.

In der Praxis ist jedoch nicht mit kurzzeitigen Änderungen der Netzspannung über längere Zeiträume zu rechnen, transiente Änderungen können durch große Kapazitäten an beiden Versorgungsspannungen unwirksam gemacht werden.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Messung der Spannungen der Logikpegel in den einzelnen Gattern

Die Testergebnisse sind in der folgenden Tabelle in den Anlagen dokumentiert:

„Testergebnisse_SP3V-101_2_3_4_5_2022-08-04.xls

Messung der Übertragungskennlinie der Gatter

Die Testergebnisse sind in der folgenden Tabelle in den Anlagen dokumentiert:

„Testergebnisse_SP3V-101_2_3_4_5_2022-08-04.xls

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Die Inbetriebnahme der Baugruppe SP3V-102 REG

(Durchführung für S/N 1 am 18.07.2022, für S/N 2 und S/N3 am 30.7.2022)

Die Baugruppe wurde mit gebrauchten Röhren E92CC von TELEFUNKEN aus dem Kauf beim Schrottplatz Manteuffel im Jahr 2007 bestückt.

Überprüfung der logischen Funktion:

Hinweis:

Die asynchrone Reset-Funktion setzt voraus, das CLK auf 0 ist.
(Dies ist eine bekannte Eigenschaft der Schaltung, das Einhalten dieser Bedingung muss durch eine entsprechende Verknüpfung im Clock-Generator sichergestellt werden.)

Der Test wurde zunächst mit Bit 0 durchgeführt:

Default-Einstellungen:

OE **1_C30** = 1
WE **1_A32** = 1
RESET **1_C8** = 0
CLK **1_A8** = 0

/DO_wr **2_A22** = 1;
DO_wr **2_C22** = 0

(1)
Rücksetzen mit asynchronem Reset

RESET **1_C8** auf 1
RESET **1_C8** wieder auf 0
=>
/Q0 **1_A18** = 1
Q0 **1_C18** = 0
DO_rd **1_C28** = 0

(2)
Setzen über Dateneingang:

/DO_wr **2_A22** = 0;
DO_wr **2_C22** = 1

CLK **1_A8** auf 1
CLK **1_A8** wieder auf 0
=>
/Q0 **1_A18** = 0
Q0 **1_C18** = 1
DO_rd **1_C28** = 1

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

(3)

Rücksetzen über Dateneingang:

```
/DO_wr 2_A22 = 1;  
DO_wr 2_C22 = 0
```

```
CLK 1_A8 auf 1  
CLK 1_A8 wieder auf 0  
=>
```

```
/Q0 1_A18 = 1  
Q0 1_C18 = 0  
DO_rd 1_C28 = 0
```

(4)

Setzen über Dateneingang, gesperrt:

```
WE 1_A32 = 0
```

```
/DO_wr 2_A22 = 0;  
DO_wr 2_C22 = 1
```

```
CLK 1_A8 auf 1  
CLK 1_A8 wieder auf 0  
=>
```

```
/Q0 1_A18 = 1  
Q0 1_C18 = 0  
DO_rd 1_C28 = 0
```

```
WE 1_A32 = 1
```

(5)

Setzen über Dateneingang, wieder freigegeben:

```
/DO_wr 2_A22 = 0;  
DO_wr 2_C22 = 1
```

```
CLK 1_A8 auf 1  
CLK 1_A8 wieder auf 0  
=>
```

```
/Q 0 1_A18 = 0  
Q0 1_C18 = 1  
DO_rd 1_C28 = 1
```

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

(6)

Rücksetzen über Dateneingang, gesperrt

WE 1_A32 = 0

/DO_wr 2_A22 = 1

DO_wr 2_C22 = 0

CLK 1_A8 auf 1

CLK 1_A8 wieder auf 0

=>

/Q0 1_A18 = 0

Q0 0 1_C18 = 1

DO_rd 1_C28 = 1

WE 1_A32 = 0

(7)

Rücksetzen über asynchronen Reset

RESET 1_C8 auf 1

RESET 1_C8 wieder auf 0

=>

/Q0 1_A18 = 1

Q0 1_C18 = 0

DO_rd 1_C28 = 0

(8)

Bus sperren

OE 1_C30 = 0

=> DO_rd 1_C28 = 1

OE 1_C30 = 1

Dieser Test wurde für Bit 0 zunächst mit nomineller Versorgungsspannung durchgeführt.

Der Stelltrafo wurde dafür so eingestellt, dass sich eine positive Versorgungsspannung von 300V ergibt, die negative Versorgungsspannung beträgt dann -320V.

Der Test wurde (nur bei S/N 1) mit abgesenkter Netzspannung (positive Versorgungsspannung auf 180V = -40%) erfolgreich wiederholt.

Der Test wurde (nur bei S/N 1) mit angehobener Netzspannung (positive Versorgungsspannung auf 360V = +20%) erfolgreich wiederholt.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Durchführung für **Bit 1**:

(1)

Rücksetzen mit asynchronem Reset

RESET **1_C8** auf 1

RESET **1_C8** wieder auf 0

=>

/Q1 **1_A16** = 1

Q1 **1_C16** = 0

D1_rd **1_C26** = 0

(2)

Setzen über Dateneingang:

/D1_wr **2_A20** = 0;

D1_wr **2_C20** = 1

CLK **1_A8** auf 1

CLK **1_A8** wieder auf 0

=>

/Q1 **1_A16** = 0

Q1 **1_C16** = 1

D1_rd **1_C26** = 1

(3)

Rücksetzen über Dateneingang:

/D1_wr **2_A20** = 1;

D1_wr **2_C20** = 0

CLK **1_A8** auf 1

CLK **1_A8** wieder auf 0

=>

/Q1 **1_A16** = 1

Q1 **1_C16** = 0

D1_rd **1_C26** = 0

(4)

Setzen über Dateneingang, gesperrt:

WE **1_A32** = 0

/D1_wr **2_A20** = 0;

D1_wr **2_C20** = 1

CLK **1_A8** auf 1

CLK **1_A8** wieder auf 0

=>

/Q1 **1_A16** = 1

Q1 **1_C16** = 0

D1_rd **1_C26** = 0

WE **1_A32** = 1

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

(5)

Setzen über Dateneingang, wieder freigegeben:

```
/D1_wr 2_A20 = 0;  
D1_wr 2_C20 = 1
```

```
CLK 1_A8 auf 1  
CLK 1_A8 wieder auf 0  
=>  
/Q1 1_A16 = 0  
Q1 1_C16 = 1  
D1_rd 1_C26 = 1
```

(6)

Rücksetzen über Dateneingang, gesperrt

```
WE 1_A32 = 0
```

```
/DO_wr 2_A20 = 1  
DO_wr 2_C20 = 0
```

```
CLK 1_A8 auf 1  
CLK 1_A8 wieder auf 0  
=>  
/Q0 1_A16 = 0  
Q0 1_C16 = 1  
DO_rd 1_C26 = 1
```

```
WE 1_A32 = 0
```

(7)

Rücksetzen über asynchronen Reset

```
RESET 1_C8 auf 1  
RESET 1_C8 wieder auf 0  
=>  
/Q0 1_A16 = 1  
Q0 1_C16 = 0  
DO_rd 1_C26 = 0
```

(8)

Bus sperren

```
OE 1_C30 = 0
```

```
=> DO_rd 1_C26 = 1
```

```
OE 1_C30 = 1
```

Durchführung mit nomineller Betriebsspannung +Ub = 300V.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Durchführung für **Bit 2**:

(1)

Rücksetzen mit asynchronem Reset

RESET **1_C8** auf 1

RESET **1_C8** wieder auf 0

=>

/Q1 **1_A14** = 1

Q1 **1_C14** = 0

D1_rd **1_C24** = 0

(2)

Setzen über Dateneingang:

/D1_wr **2_A18** = 0;

D1_wr **2_C18** = 1

CLK **1_A8** auf 1

CLK **1_A8** wieder auf 0

=>

/Q1 **1_A14** = 0

Q1 **1_C14** = 1

D1_rd **1_C24** = 1

(3)

Rücksetzen über Dateneingang:

/D1_wr **2_A18** = 1;

D1_wr **2_C18** = 0

CLK **1_A8** auf 1

CLK **1_A8** wieder auf 0

=>

/Q1 **1_A14** = 1

Q1 **1_C14** = 0

D1_rd **1_C24** = 0

(4)

Setzen über Dateneingang, gesperrt:

WE **1_A32** = 0

/D1_wr **2_A18** = 0;

D1_wr **2_C18** = 1

CLK **1_A8** auf 1

CLK **1_A8** wieder auf 0

=>

/Q1 **1_A14** = 1

Q1 **1_C14** = 0

D1_rd **1_C24** = 0

WE **1_A32** = 1

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

(5)

Setzen über Dateneingang, wieder freigegeben:

```
/D1_wr 2_A18 = 0;  
D1_wr 2_C18 = 1
```

```
CLK 1_A8 auf 1  
CLK 1_A8 wieder auf 0  
=>  
/Q1 1_A14 = 0  
Q1 1_C14 = 1  
D1_rd 1_C24 = 1
```

(6)

Rücksetzen über Dateneingang, gesperrt

```
WE 1_A32 = 0
```

```
/DO_wr 2_A18 = 1  
DO_wr 2_C18 = 0
```

```
CLK 1_A8 auf 1  
CLK 1_A8 wieder auf 0  
=>  
/Q0 1_A14 = 0  
Q0 1_C14 = 1  
DO_rd 1_C24 = 1
```

```
WE 1_A32 = 0
```

(7)

Rücksetzen über asynchronen Reset

```
RESET 1_C8 auf 1  
RESET 1_C8 wieder auf 0  
=>  
/Q0 1_A14 = 1  
Q0 1_C14 = 0  
DO_rd 1_C24 = 0
```

(8)

Bus sperren

```
OE 1_C30 = 0
```

```
=> DO_rd 1_C24 = 1
```

```
OE 1_C30 = 1
```

Durchführung mit nomineller Betriebsspannung +Ub = 300V.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Durchführung für **Bit 3**:

(1)

Rücksetzen mit asynchronem Reset

RESET **1_C8** auf 1

RESET **1_C8** wieder auf 0

=>

/Q1 **1_A12** = 1

Q1 **1_C12** = 0

D1_rd **1_C22** = 0

(2)

Setzen über Dateneingang:

/D1_wr **2_A16** = 0;

D1_wr **2_C16** = 1

CLK **1_A8** auf 1

CLK **1_A8** wieder auf 0

=>

/Q1 **1_A12** = 0

Q1 **1_C12** = 1

D1_rd **1_C22** = 1

(3)

Rücksetzen über Dateneingang:

/D1_wr **2_A16** = 1;

D1_wr **2_C16** = 0

CLK **1_A8** auf 1

CLK **1_A8** wieder auf 0

=>

/Q1 **1_A12** = 1

Q1 **1_C12** = 0

D1_rd **1_C22** = 0

(4)

Setzen über Dateneingang, gesperrt:

WE **1_A32** = 0

/D1_wr **2_A16** = 0;

D1_wr **2_C16** = 1

CLK **1_A8** auf 1

CLK **1_A8** wieder auf 0

=>

/Q1 **1_A12** = 1

Q1 **1_C12** = 0

D1_rd **1_C22** = 0

WE **1_A32** = 1

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

(5)

Setzen über Dateneingang, wieder freigegeben:

```
/D1_wr 2_A16 = 0;  
D1_wr 2_C16 = 1
```

```
CLK 1_A8 auf 1  
CLK 1_A8 wieder auf 0  
=>  
/Q1 1_A12 = 0  
Q1 1_C12 = 1  
D1_rd 1_C22 = 1
```

(6)

Rücksetzen über Dateneingang, gesperrt

```
WE 1_A32 = 0
```

```
/DO_wr 2_A16 = 1  
DO_wr 2_C16 = 0
```

```
CLK 1_A8 auf 1  
CLK 1_A8 wieder auf 0  
=>  
/Q0 1_A12 = 0  
Q0 1_C12 = 1  
DO_rd 1_C22 = 1
```

```
WE 1_A32 = 0
```

(7)

Rücksetzen über asynchronen Reset

```
RESET 1_C8 auf 1  
RESET 1_C8 wieder auf 0  
=>  
/Q0 1_A12 = 1  
Q0 1_C12 = 0  
DO_rd 1_C22 = 0
```

(8)

Bus sperren

```
OE 1_C30 = 0
```

```
=> DO_rd 1_C22 = 1
```

```
OE 1_C30 = 1
```

Durchführung mit nomineller Betriebsspannung +Ub = 300V.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Messung der Spannungen der Logikpegel in den einzelnen Gattern

Die Testergebnisse sind in der folgenden Tabelle in den Anlagen dokumentiert:

„Testergebnisse_SP3V-101_2_3_4_5_2022-08-04.xls

Die Inbetriebnahme der Baugruppe SP3V-103 NIXIE

(Durchführung am 18.07.2022)

Die Baugruppe wurde mit gebrauchten Röhren E92CC von TELEFUNKEN aus dem Kauf beim Schrottplatz Manteuffel im Jahr 2007 bestückt.

Überprüfung der logischen Funktion:

Die Testergebnisse sind in der folgenden Tabelle in den Anlagen dokumentiert:

„Testergebnisse_SP3V-101_2_3_4_5_2022-08-04.xls

Messung der Spannungen der Logikpegel in den einzelnen Gattern

Die Testergebnisse sind in der folgenden Tabelle in den Anlagen dokumentiert:

„Testergebnisse_SP3V-101_2_3_4_5_2022-08-04.xls

Die Inbetriebnahme der Baugruppe SP3V-104 CONST

(Durchführung am 18.07.2022)

Die Baugruppe wurde mit gebrauchten Röhren E92CC von TELEFUNKEN aus dem Kauf beim Schrottplatz Manteuffel im Jahr 2007 bestückt.

Überprüfung der logischen Funktion:

Die Testergebnisse sind in der folgenden Tabelle in den Anlagen dokumentiert:

„Testergebnisse_SP3V-101_2_3_4_5_2022-08-04.xls

Messung der Spannungen der Logikpegel in den einzelnen Gattern

Die Testergebnisse sind in der folgenden Tabelle in den Anlagen dokumentiert:

„Testergebnisse_SP3V-101_2_3_4_5_2022-08-04.xls

Die Inbetriebnahme der Baugruppe SP3V-105 BUS

(Durchführung am 18.07.2022)

Die Baugruppe wurde mit gebrauchten Röhren E92CC von TELEFUNKEN aus dem Kauf beim Schrottplatz Manteuffel im Jahr 2007 bestückt.

Überprüfung der logischen Funktion:

Die Testergebnisse sind in der folgenden Tabelle in den Anlagen dokumentiert:

„Testergebnisse_SP3V-101_2_3_4_5_2022-08-04.xls

Messung der Spannungen der Logikpegel in den einzelnen Gattern

Die Testergebnisse sind in der folgenden Tabelle in den Anlagen dokumentiert:

„Testergebnisse_SP3V-101_2_3_4_5_2022-08-04.xls

Die Inbetriebnahme des Gesamtsystems

Die Inbetriebnahme auf der funktionalen Ebene

(Durchführung am 31.7.2022)

Default-Einstellungen:

Alle nicht namentlich genannten Schalter stehen auf der Stellung „L“.

Schritt1:

Die Baugruppe CONST wurde in die Backplane gesteckt.

Die Verbindungen zwischen dem Netzteil und der Baugruppe wurden mit den Ohmmeter überprüft. Es wurden dabei die erwarteten Verbindungen vorgefunden.

Das Netzteil wurde eingeschaltet.

Die Röhren auf der Baugruppe CONST heizten.

Die Betriebsspannungen +300V und –300V lagen an den richtigen Stellen an.

Schritt 2:

Das Panel wurde über ein Flachbandkabel mit der Backplane verbunden.

Es wurde geprüft, dass das Betätigen der Schalter der Gruppe IMMEDIATE zu den erwarteten Eingangssignalen an der Baugruppe CONST führt. Um diese Signale sichtbar zu machen, muss zunächst der Schalter IMM in der Gruppe SOURCE auf H gestellt werden, da ansonsten ein L-Pegel am OE-Signal keinen H-Pegel am Eingangssignal zulässt.

Die Schalter der Gruppe IMMEDIATE sind invertiert verschaltet, die Schalterstellung „H“ führt zu einem L-Pegel am entsprechenden Eingang.

Schalter IMMEDIATE 0 auf Stellung „L“: H-Pegel an R1101 („unten“ im Schaltplan)

Schalter IMMEDIATE 1 auf Stellung „L“: H-Pegel an R1201 („unten“ im Schaltplan)

Schalter IMMEDIATE 2 auf Stellung „L“: H-Pegel an R1301 („unten“ im Schaltplan)

Schalter IMMEDIATE 3 auf Stellung „L“: H-Pegel an R1401 („unten“ im Schaltplan)

Schritt 3:

Die Baugruppe BUS wurde in die Backplane gesteckt.

Der Schalter IMM in der Gruppe SOURCE wurde auf H gestellt.

Jeweils ein Schalter der Gruppe IMMEDIATE wurde in die Stellung H gebracht.

Es war an den frontseitigen Glimmlampen der Baugruppe BUS abzulesen, dass die Ausgangssignale D_wr und /D_wr der Baugruppe BUS die verschiedenen Schalterstellungen wie erwartet wiedergab.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Schritt 4:

Eine Baugruppe REG wurde in den Slot REG_D gesteckt.

Zunächst zeigte sich nicht die gewünschte Funktion. Es zeigte sich, dass aufgrund eines Schreibfehlers bei der Schaltplanerstellung die Signale CLK und RESET auf der Backplane miteinander vertauscht waren. Der Fehler wurde durch Nachverdrahtung korrigiert. (Detailbeschreibung in nachfolgendem Abschnitt)

Danach zeigte sich das erwartete Verhalten.

Die Signale CLK und RESET sind an den dazugehörigen Eingangskreisen auf der Baugruppe REG vorhanden.

Der Schalter IMM in der Gruppe SOURCE wurde auf H gestellt.

Der Schalter D in der Gruppe DESTINATION wurde auf H gestellt.

Um eine definierte Anfangsbedingung zu schaffen, wurde der Taster RES betätigt, um damit einen Reset auszulösen.

Es wurde jeweils ein Schalter der Gruppe IMMEDIATE auf H gestellt.

Anschließend wurde ein CLK-Impuls ausgelöst, indem der Taster CLK betätigt wurde.

Damit wurde das zur Bitposition des auf H gestellten Schalters der Gruppe IMMEDIATE gehörende Flipflop gesetzt. Dies wurde durch Beobachtung der frontseitigen Glimmlampen erkannt.

Anschließend wurde jedes der 4 Flipflops dadurch zurückgesetzt, dass der entsprechende Schalter aus der Gruppe IMMEDIATE auf L gestellt wurde und erneut ein CLK-Impuls ausgelöst wurde.

Die Flipflops wurden noch einmal gesetzt.

Anschließend wurde ein RESET-Impuls ausgelöst.

Es wurde beobachtet, dass damit alle 4 Flipflops des Registers zurückgesetzt wurden.

Der Schalter D in der Gruppe DESTINATION wurde auf L gestellt.

Damit war kein Setzen der Flipflops über die Schalter der Gruppe IMMEDIATE und einen CLK-Impuls mehr möglich.

Ebenso war kein Rücksetzen zuvor gesetzter Flipflops über die Schalter der Gruppe IMMEDIATE und einen CLK-Impuls mehr möglich.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Schritt 5:

Die Baugruppe NIXIE wurde in die Backplane gesteckt.

Der Schalter IMM in der Gruppe SOURCE wurde auf H gestellt.

Der Schalter D in der Gruppe DESTINATION wurde auf H gestellt.

Mit den Schaltern der Gruppe IMMEDIATE wurden alle Zahlen von 0 bis 9 dargestellt und durch einen CLK-Impuls in das Register D übertragen.

Alle Zahlen wurden auf der Nixie-Röhre auf dem Panel korrekt dargestellt.

Wenn Zahlen größer als 9 eingestellt wurden, blieb die Nixie-Röhre dunkel.

Es wurde eine Null auf der Nixie-Röhre dargestellt.

Hierbei wurden die folgenden Messwerte aufgenommen:

Potential Anode VM1-1:	20V	(dies ist die Anode, die die Kathode Null der Nixie ansteuert)
Potential Anode Nixie-Röhre:	152V	

Damit Brennspannung der Nixie-Röhre: $152V - 20V = 132V$,

Potential Kathode D001: 196V

Damit Brennstrom der Nixie-Röhre:

$(196V - 152V) / 24,9k\Omega = 1,76mA$, (Für den Vorwiderstand R002 wurde 24K9 statt 24K bestückt)

Weiterhin wurde Folgendes beobachtet:

Die anderen, sperrenden Anoden der E92CC für die nicht durchgeschalteten Kathoden liegen auf Potentialen zwischen 100V und 134V. Die an den Anodenwiderstand gelegte treibende Spannung ist 100V. Wenn man dagegen eine Zahl größer 9 darstellen will und die Nixie dunkel bleibt, dann liegt an allen Kathoden 100V an. Diese Beobachtung legt nahe, dass bei leuchtender Nixie Ströme von der Anode zu den nicht angesteuerten Kathoden fließen, die dann zu der beobachteten Potentialerhöhung der gesperrten Ausgänge des Decoders führen.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Schritt 6:

Eine Baugruppe REG wurde in den Slot ALU_A gesteckt.

Es zeigte sich, dass die zuvor getestete Übertragung von den Schaltern der Gruppe IMMEDIATE zur Nixie nicht mehr möglich war. Es wurde (nach Reset) stets eine Null angezeigt. Als Grund dafür zeigte es sich, dass das Register ALU_A den Bus blockiert, indem es die Busleitungen D_rd auf L „zieht“.

Als Grund dafür zeigte sich, dass die Bus-Ausgänge der Register ALU_A und ALU_B durch einen Copy-Paste-Fehler an den Bus D_rd angebunden sind, die Signale OE dieser Register aber unbeschaltet sind, womit der Ausgang der Register stets freigeschaltet ist.

Nach Verbinden der OE-Eingänge der Register ALU_A und ALU_B mit GND (Detailbeschreibung in nachfolgendem Abschnitt) stellte sich dann die erwartete Funktion ein:

Der Schalter IMM in der Gruppe SOURCE wurde auf H gestellt.

Der Schalter ADD_A in der Gruppe DESTINATION wurde auf H gestellt.

In genau der gleichen Weise, wie es bereits für das Register D beschrieben wurde, wurde die Übertragung der Stellung der Schalter der Gruppe IMMEDIATE in das Register ALU_A überprüft. Hierbei wurde auch die Wirkung des asynchronen Resets überprüft.

Der Zustand der einzelnen Flipflops des Registers wurde an den frontseitigen Glimmlampen der Baugruppe abgelesen.

Schritt 7:

Eine Baugruppe REG wurde in den Slot ALU_B gesteckt.

Zunächst konnte nicht selektiv in das Register geschrieben werden, das Register reagierte auf jeden CLK-Impuls mit Datenübernahme. Es zeigte sich, dass das WE-Signal des Registers nicht angeschlossen war. Das dazugehörige Netz war aufgrund eines Fehlers im Layoutprogramm disabelt und wurde daher nicht geroutet.

Nachdem die fehlende Verbindung durch Nachverdrahtung hergestellt wurde (Detailbeschreibung in nachfolgendem Abschnitt), wurde die Funktion des Registers entsprechend des bereits beschriebenen Ablaufs für die Register D und ALU_A getestet. Hierbei zeigte sich das erwartete Verhalten.

Schritt 8:

Es wurde, mit dem nun erreichten nahezu vollständigen Bestückungsstand, immer mit der Zahlenfolge 1,2,4,8 noch einmal der Transfer zwischen den verschiedenen Registern überprüft, um sicherzustellen, dass nicht bei der Bestückung weiterer Baugruppen bereits zuvor geprüfte Funktionen gestört werden.

- CONST zu D
- CONST zu ALU_A
- CONST zu ALU_B
- D zu ALU_A
- D zu ALU_B

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Schritt 9:

Die Baugruppe ADD_HEX wurde in den dazugehörigen Slot gesteckt.

Es wurde mit verschiedenen Zahlenkombinationen der folgende Ablauf durchgeführt:

Einmalige Initialisierung des Systems zu Beginn

RES-Impuls

Übertragen von Operand A in Register ALU_A:

SOURCE: IMM auf H
DESTINATION: ADD_A auf H

Eingabe Operand A über IMMEDIATE

CLK-Impuls

Übertragen von Operand B in Register ALU_B:

SOURCE: IMM auf H
DESTINATION: ADD_B auf H

Eingabe Operand B über IMMEDIATE

CLK-Impuls

Übertragen der Summe an Register D (und damit an die Nixie):

SOURCE: ADD SUM auf H
DESTINATION: D auf H

CLK-Impuls

=> Die Summe von A und B erscheint auf der Nixie, wenn diese nicht größer als 9 ist.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Es wurden die folgenden Kombinationen überprüft:

<i>Operand A</i>	<i>Operand B</i>	<i>Anzeige Nixie</i>
0	1	1
0	2	2
0	4	4
0	8	8
1	0	1
2	0	2
4	0	4
8	0	8
1	1	2
2	2	4
4	4	8
8	1	9

Weiterhin wurde geprüft, ein Ergebnis aus Register D wieder in die Operandenregister zurückzugeben und damit eine Kettenrechnung auszuführen.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Weitere Betrachtungen

(Durchführung am 01.08.2022)

Spannungsabfall im Stromweg für die Röhrenheizung:

Der Stelltrafo wurde so eingestellt, dass sich direkt an der Sekundärwicklung des Heiztrafos eine Spannung von 12,66V einstellte, die Primärspannung lag dazu bei etwa 210V.

Es wurden die folgenden Spannungen (mit einem Multimeter) gemessen:

Direkt an der Sekundärwicklung:	12,66V
Auf dem Netzteil-PCB, zwischen den Dioden-Anschlüssen für Erzeugung 16V DC:	12,58V
An den Kontakten des aus dem Netzteil herausführenden 9-poligen Steckverbinders:	12,46V
An den Kontakten des Steckverbinders zur Baugruppe BUS: (dem Power-Steckverbinder nächstliegend)	12,37..12,38V
An den Kontakten des Steckverbinders zur Baugruppe NIXIE: (vom Power-Steckverbinder am weitesten entfernt)	12,34..12,36V
Direkt an den Röhrenfassungs-Anschlüssen auf der Baugruppe NIXIE:	12,29..12,30V

Der Spannungsabfall beträgt bis zu $12,66V - 12,29V = 0,37V$, das ist 2,9% von 12,6V.

Tatsächliche Versorgungsspannungen bei Primärspannung 230V:

Der Stelltrafo wurde so eingestellt, dass sich eine Primärspannung von 230V, direkt an der Primärwicklung des Heiztrafos gemessen, einstellt.

Es wurden, mit dem Multimeter, die folgenden Spannungen gemessen:

Sekundärspannung Heiztrafo:	13,46V
Heizspannung an den Anschlüssen der Röhrenfassung auf der BG NIXIE: Das ist 3,73% über dem Nominalwert von 12,6V.	13,07V

Positive DC-Versorgung: 314V, dies ist 4,7% über dem Nominalwert 300V
Negative DC-Versorgung: -338V, dies ist 12,7% über dem Nominalwert 300V

Die Ungleichheit zwischen positiver und negativer Versorgung beträgt damit 7,6%.

Detaillierte Untersuchung des Übertragungsverhaltens eines einzelnen NAND-Gatters

(Durchführung am 02.08.2022)

Die nachfolgenden Messungen wurden am Gatter für das Eingangssignal Bit 0 auf der Baugruppe SP3V-104 CONST durchgeführt. Dafür wurde die Baugruppe SP3V-104 CONST im Testadapter SP3V-140 betrieben und, wenn nicht anders angegeben, mit dem Netzteil SP3V-130 versorgt.

Untersuchung des Verhaltens bei unsymmetrischer Versorgung

Diese Messungen sind in der in den Anlagen befindlichen Tabelle: „Betrieb mit unsymmetrischen Spannungen_2022-08-01.xls“ vom 02.08.2022 dokumentiert.

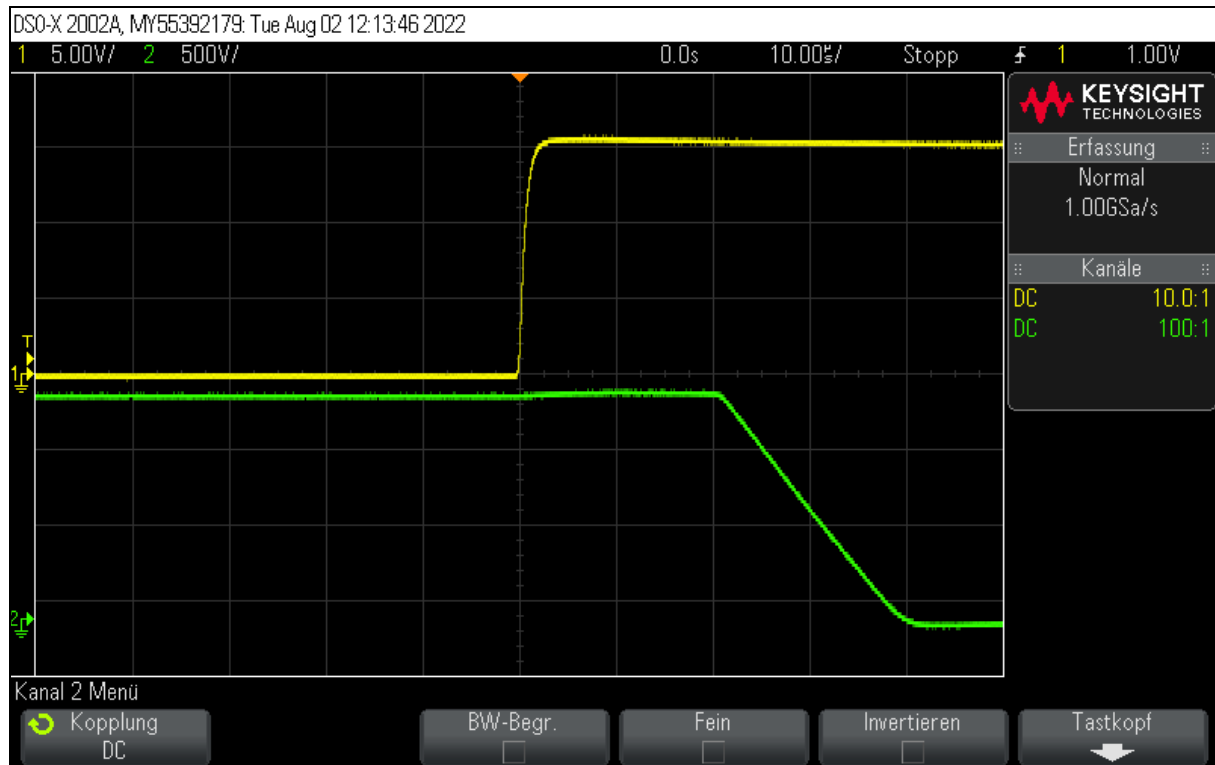
Aufnahme der Kennlinien verschiedener Röhrenexemplare aus verschiedenen Quellen

Diese Messungen sind in der in den Anlagen befindlichen Tabelle „Kennlinien_verschiedene_Röhren_2022-08-01.xls“ vom 02.08.2022 dokumentiert.

Betrachtung des Zeitverhaltens

Die Ansteuerung des Eingangs (2_C18) erfolgte mit einem von einem Oszillator gesteuerten, nach Masse schaltenden N-Kanal FET FQP2N60C und einem Pull-Up-Widerstand von 10kOhm nach +150V aus einem Labornetzteil.

Die durchgeführten Messungen sind in der Folge dokumentiert:

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

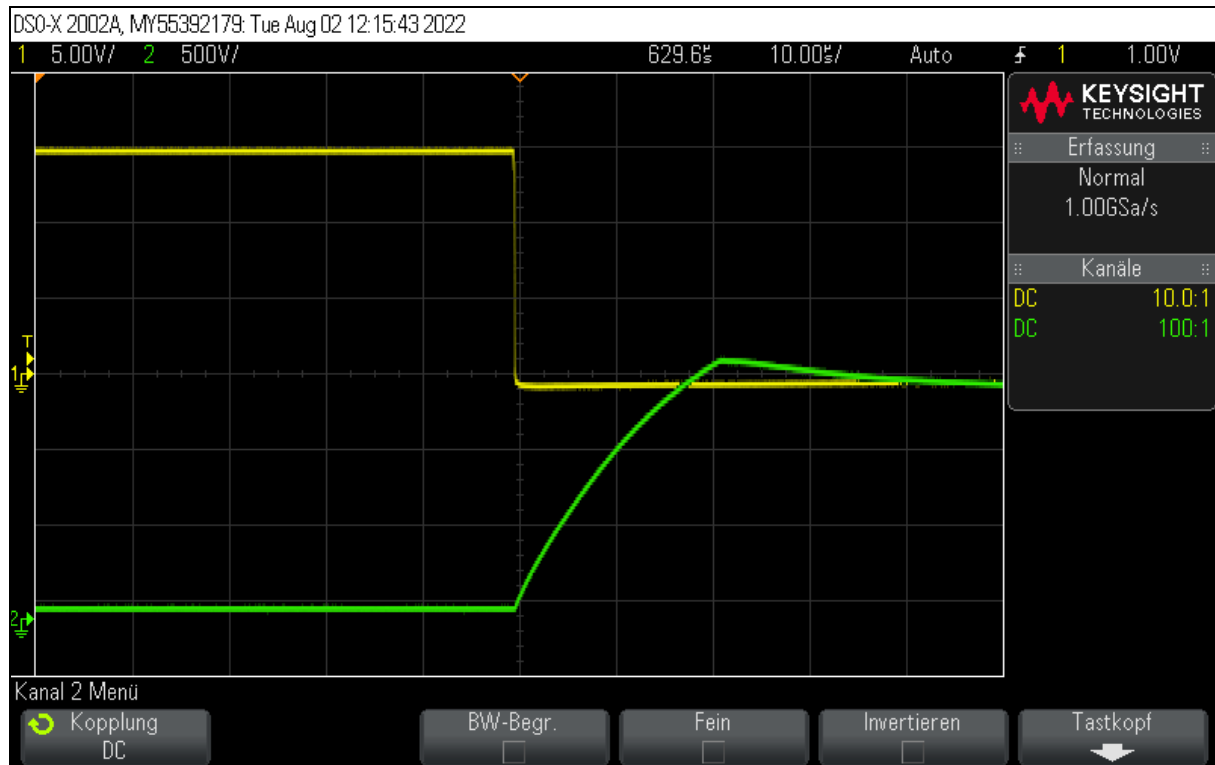
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / OpF.

Die beobachtete Latenz von 20us ist durch Anstieg von U_g von Startwert ca. -70V bis zu Beginn des Aufsteuerns bei -7V begründet.

HINWEIS:

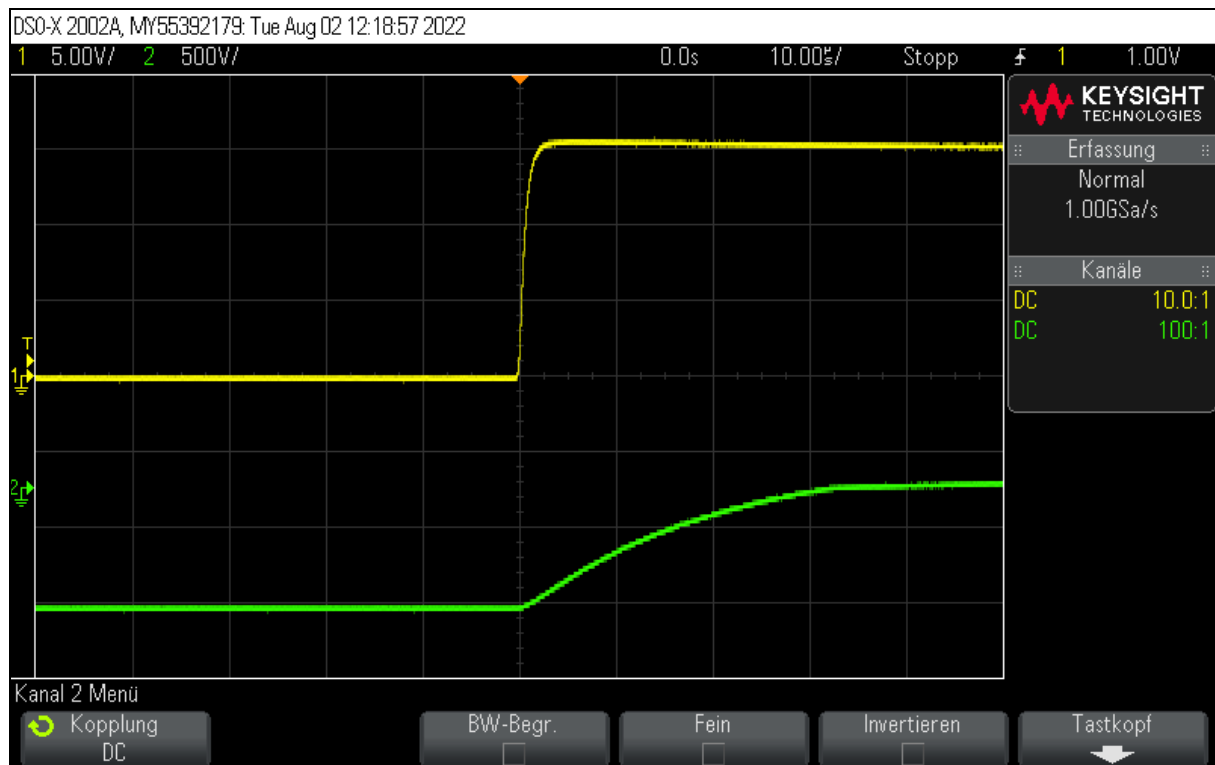
Würde man bei einer zukünftigen Schaltungsänderung die negative Gitterspannung mit einer Clamp-Schaltung auf ca. -10V begrenzen, könnte man diese Latenzzeit nahezu vollständig vermeiden.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2 M parallel / OpF.

Der zu beobachtende „Überschwinger“ ist durch das Zünden der Glimmlampe verursacht. Nach einmal erfolgter Zündung nimmt der Strom durch die Glimmlampe zu und das Anodenpotential sinkt dabei so lange ab, bis sich die Glimmentladung in einem stabilen Gleichgewichtszustand befindet.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Gitter der angesteuerten Stufe, 50V/DIV

(Nullpunkt verschoben, um neg. Spannungen sichtbar zu machen)

Zeit: 10µs/DIV

Die beobachteten Vorgänge sind gegenüber dem Echtbetrieb durch die Wirkung der Kapazität des Tastkopfs am hochohmigen Gitterwiderstand verlangsamt.

Aus Oszillogramm abgelesene Zeitkonstante des Gitterkreises: ca. 20µs

Quellwiderstand des Gitterkreises nach Anlegen des H-Pegels bei noch negativer Gitterspannung:
 $(1\text{M} + 680\text{K}) \text{ parallel } 2\text{M} = 913\text{k}\Omega$.

Hieraus folgt eine insgesamt wirksame Kapazität von $20\mu\text{s} / 0,913\text{M}\Omega = 22\text{pF}$

Es soll die Kapazität abgeschätzt werden, die ohne den Tastkopf des Oszilloskops wirksam ist:

Die Röhre beginnt nach 20µs zu leiten. Dann ist das Potential am Gitter von ursprünglich ca. -70V auf -7V angestiegen.

In einer Zeitkonstante steigt die Spannung von -70V auf überschlägig -26V an.

In einer weiteren Zeitkonstante steigt die Spannung von -26V auf überschlägig -9,6V an.

In Rahmen dieser überschlägigen Betrachtung kann die Aussage getroffen werden, dass das Leiten der Röhre nach zwei Zeitkonstanten des Gitterkreises nach dem Beginn des Anliegens des Eingangssignals beginnt. Das Leiten beginnt 20µs nach dem Anlegen des H-Pegels. Hieraus folgt eine Zeitkonstante von 10µs und eine Kapazität von $10\mu\text{s} / 0,913\text{M}\Omega = 11\text{pF}$.

Damit ergibt sich eine Kapazität des Oszil-Tastkopfs von $22\text{pF} - 11\text{pF} = 11\text{pF}$, was dem erwarteten Wert entspricht.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

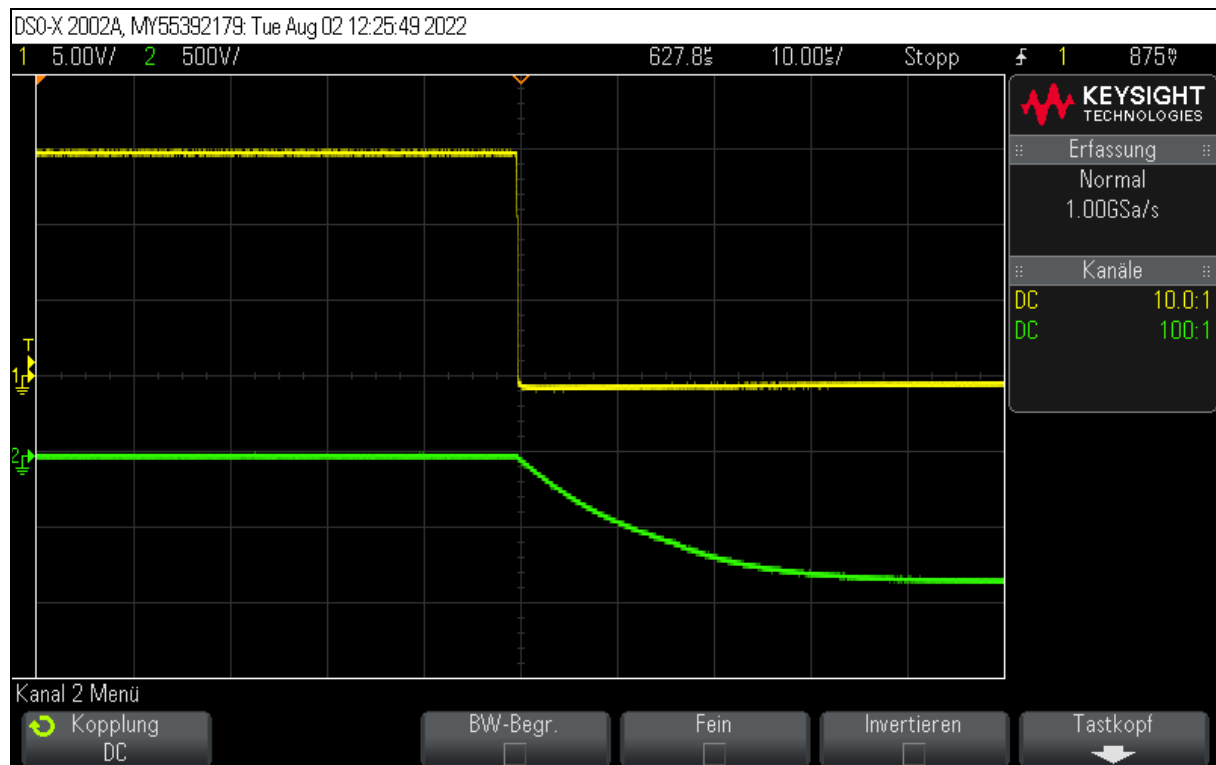
Die tatsächlich in der Schaltung vorhandene Kapazität von 11pF kann wie folgt erklärt werden:

Kapazität zwischen Gitter und Kathode der E92CC aus Datenblatt:	3,5pF
Kapazität zwischen Gitter und Anode der E92CC aus Datenblatt:	2,6pF
Summe:	6,1pF

Es tritt kein Miller-Effekt auf, da die Anode zum Zeitpunkt der Betrachtung noch auf dem H-Pegel „stillsteht“.

Es verbleibt eine zu erklärende Differenz von $11\text{pF} - 6,1\text{pF} = 4,9\text{pF}$.

Diese Kapazität ist auf die vergleichsweise langen Verbindungen zwischen der Beschaltung des Gitterkreises und dem Gitteranschluss selbst (Übergang auf senkrechtstehende Leiterplatte über Stiftleisten) zurückzuführen.

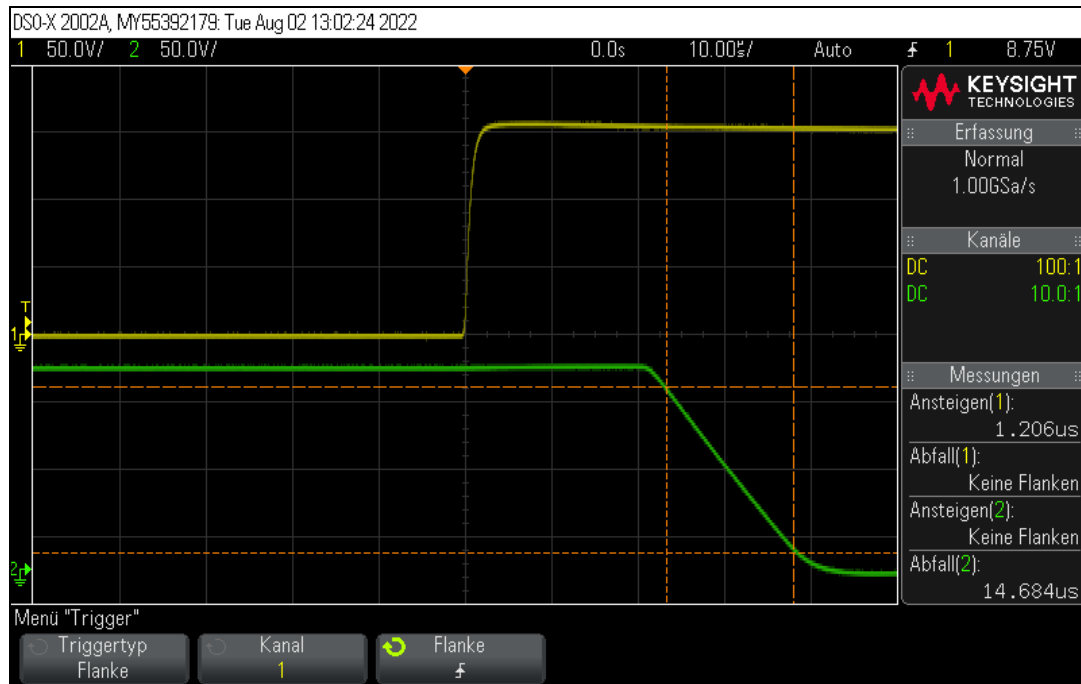
Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Gitter der angesteuerten Stufe, 50V/DIV

(Nullpunkt verschoben, um neg. Spannungen sichtbar zu machen)

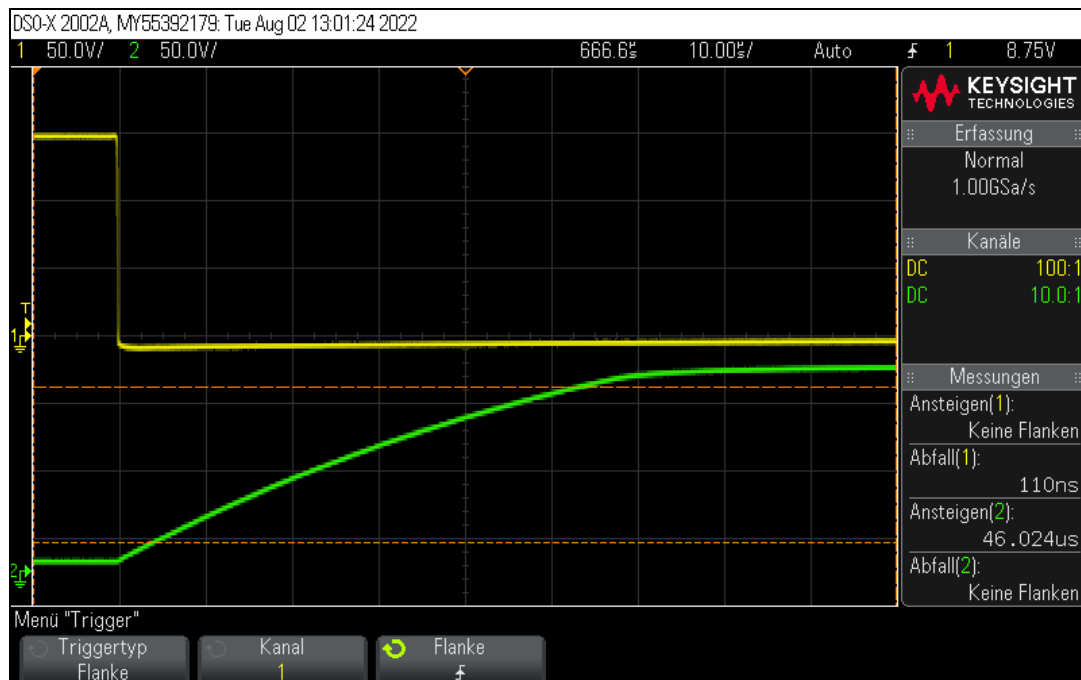
Zeit: 10us/DIV

Die beobachteten Vorgänge sind gegenüber dem Echtbetrieb durch die Wirkung der Kapazität des Tastkopfs am hochohmigen Gitterwiderstand verlangsamt.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

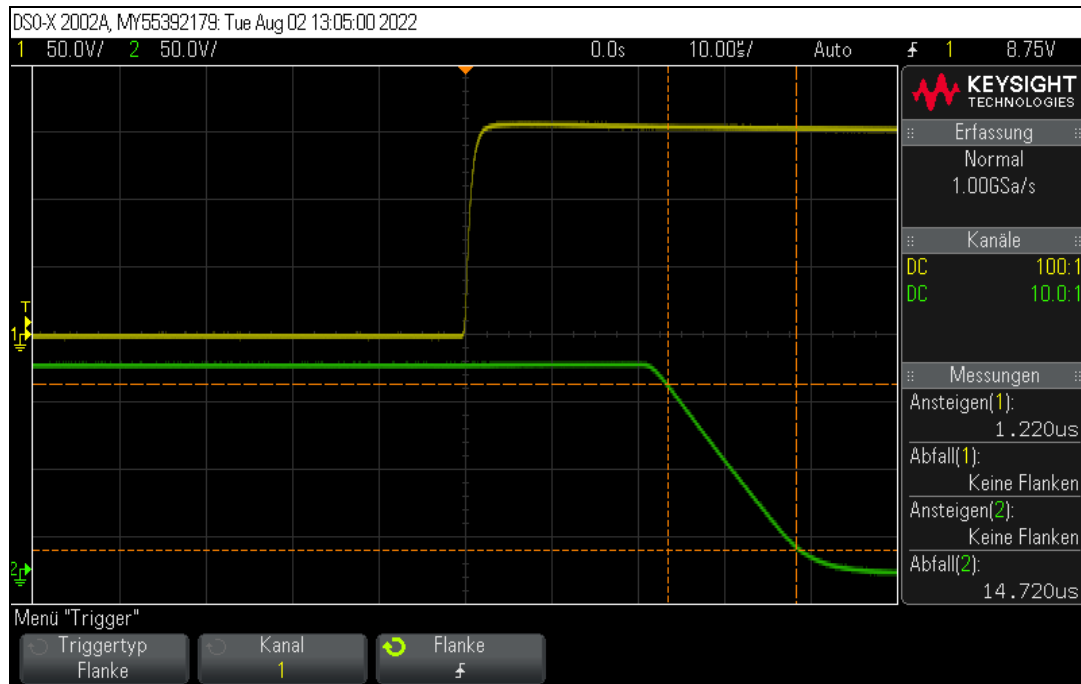
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10µs/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / 100pF vom Ausgang nach Masse.



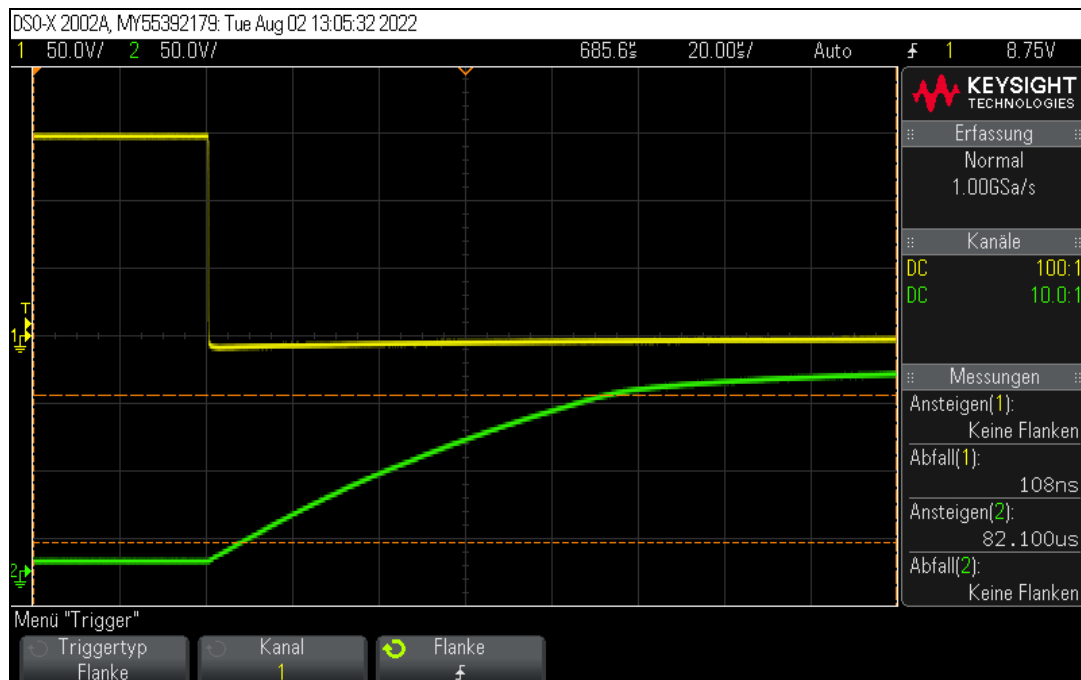
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10µs/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / 100pF vom Ausgang nach Masse.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

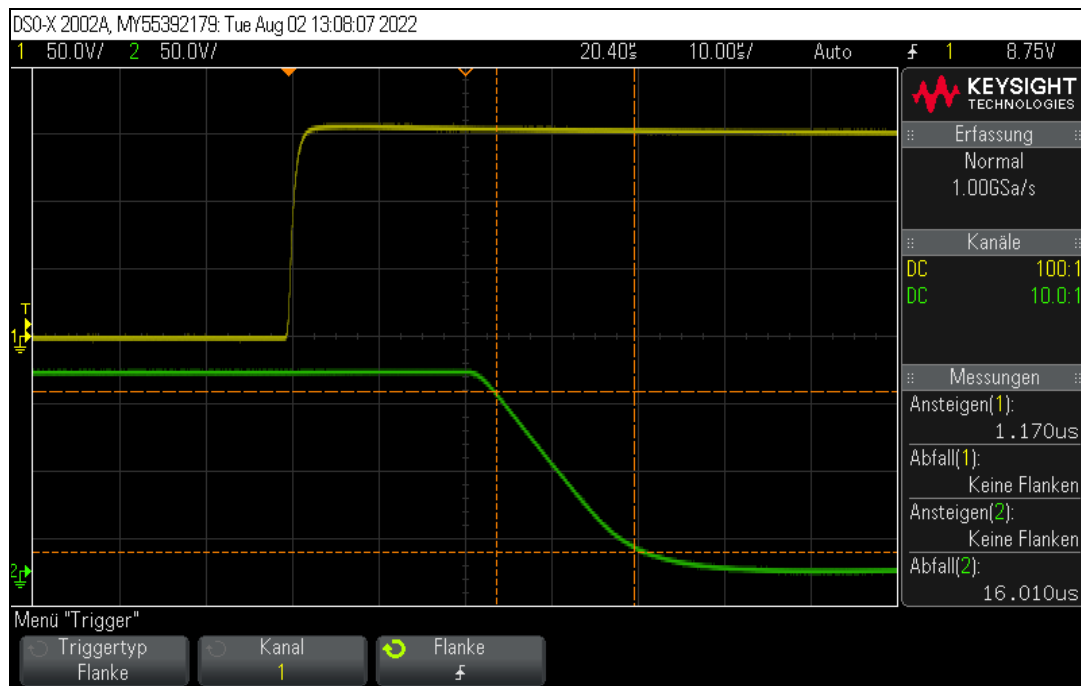
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / 220pF vom Ausgang nach Masse.



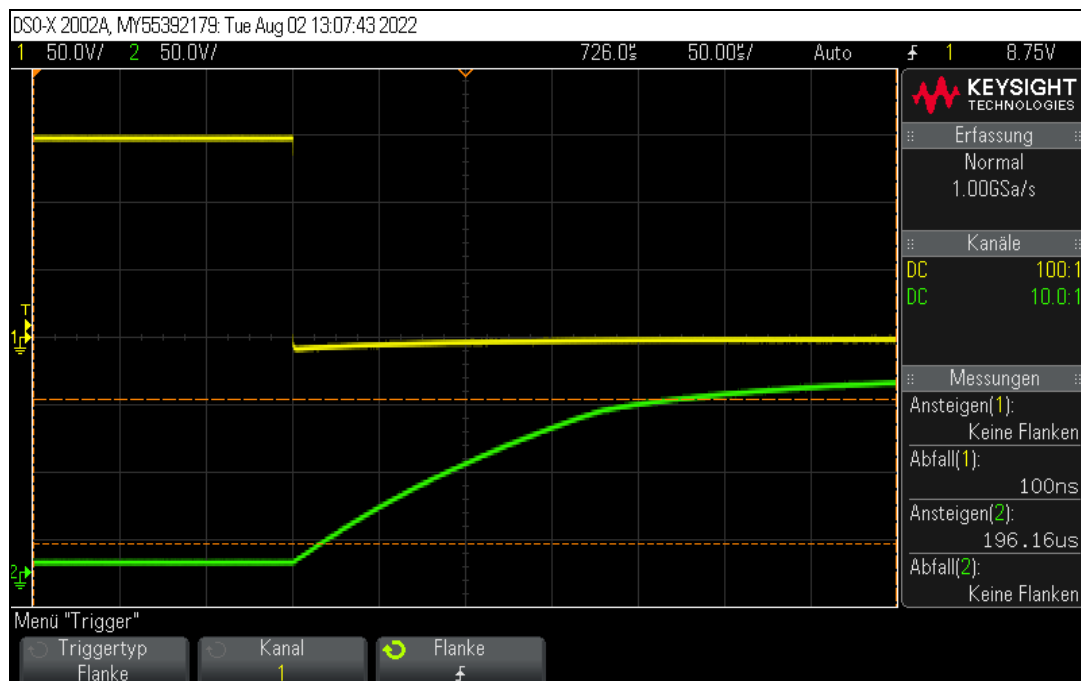
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 20us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / 220pF vom Ausgang nach Masse.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

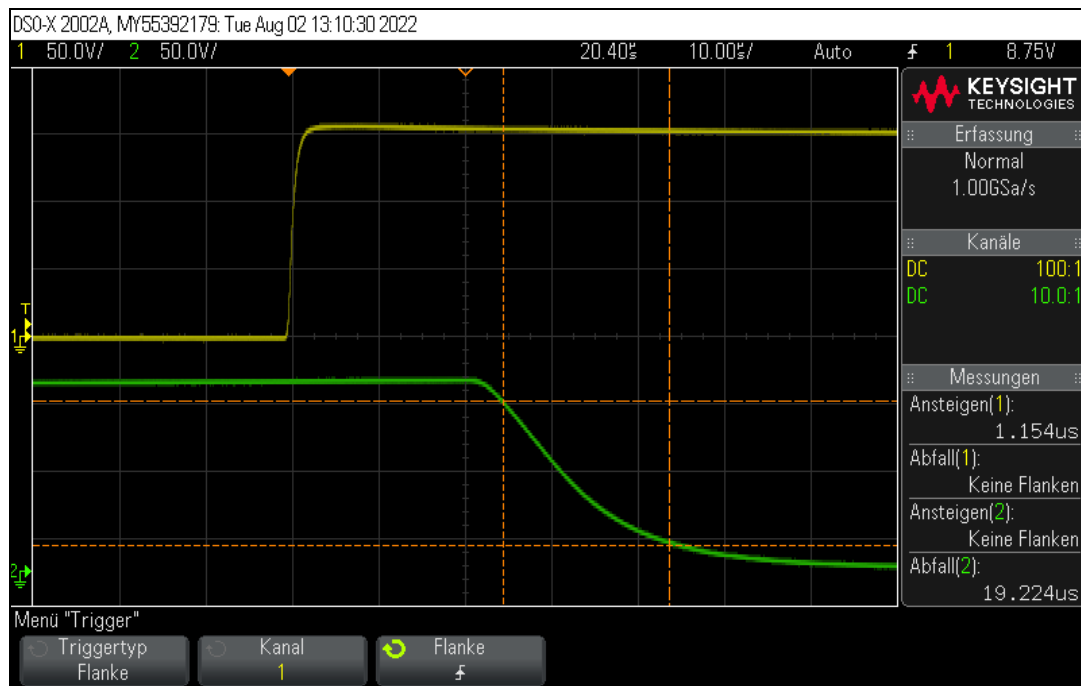
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / 470pF vom Ausgang nach Masse.



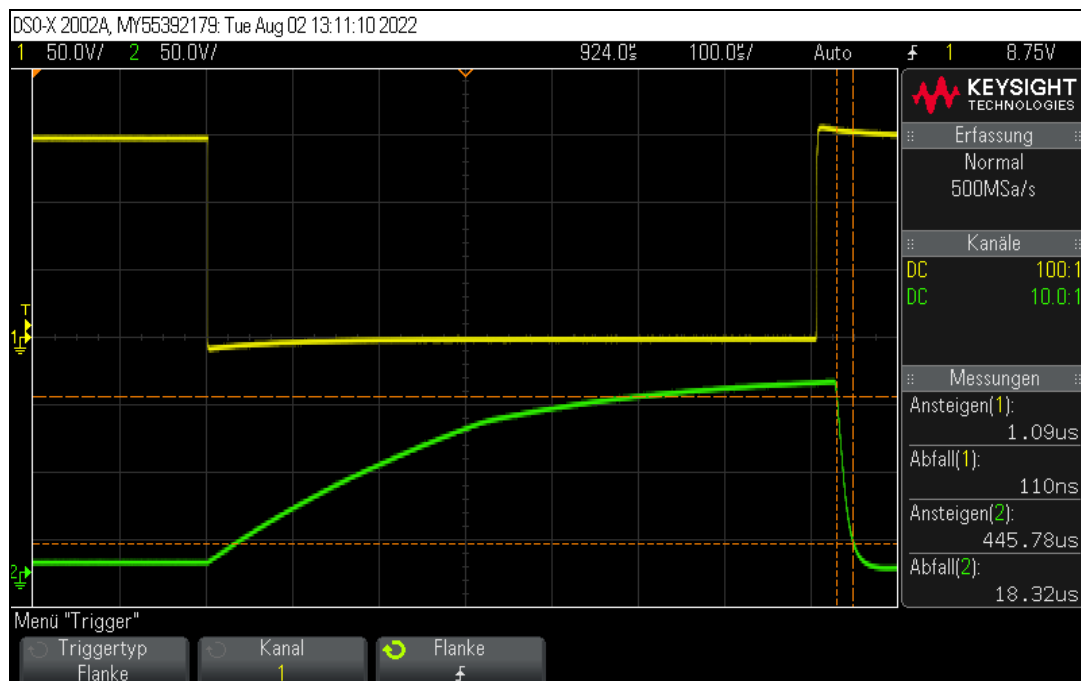
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 50us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / 470pF vom Ausgang nach Masse.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

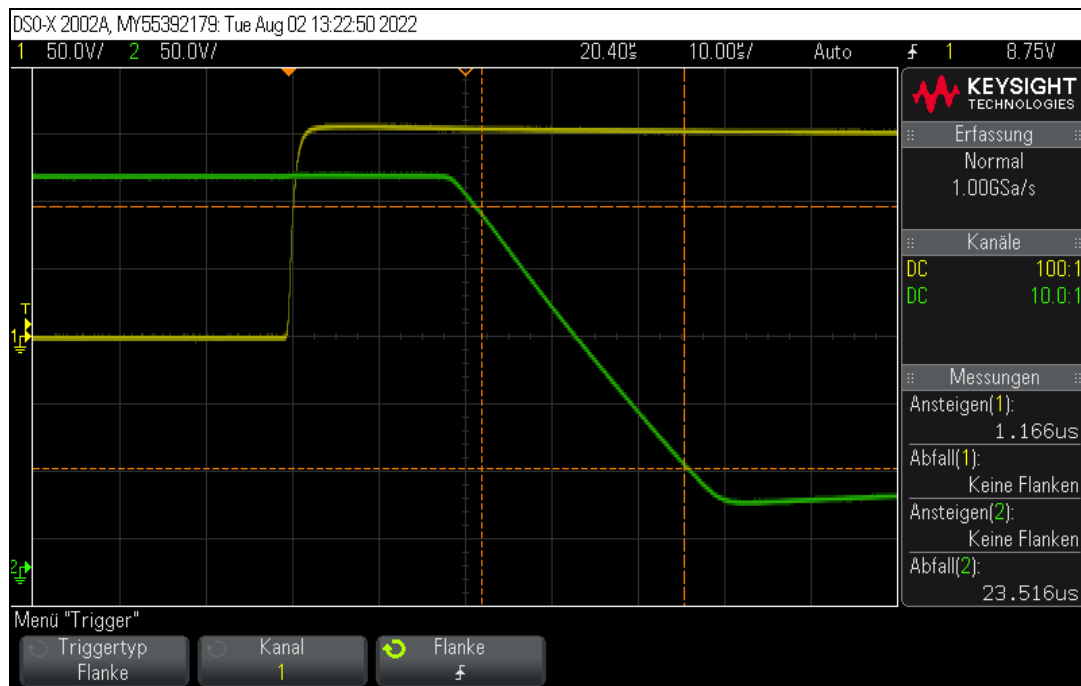
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / 1nF vom Ausgang nach Masse.



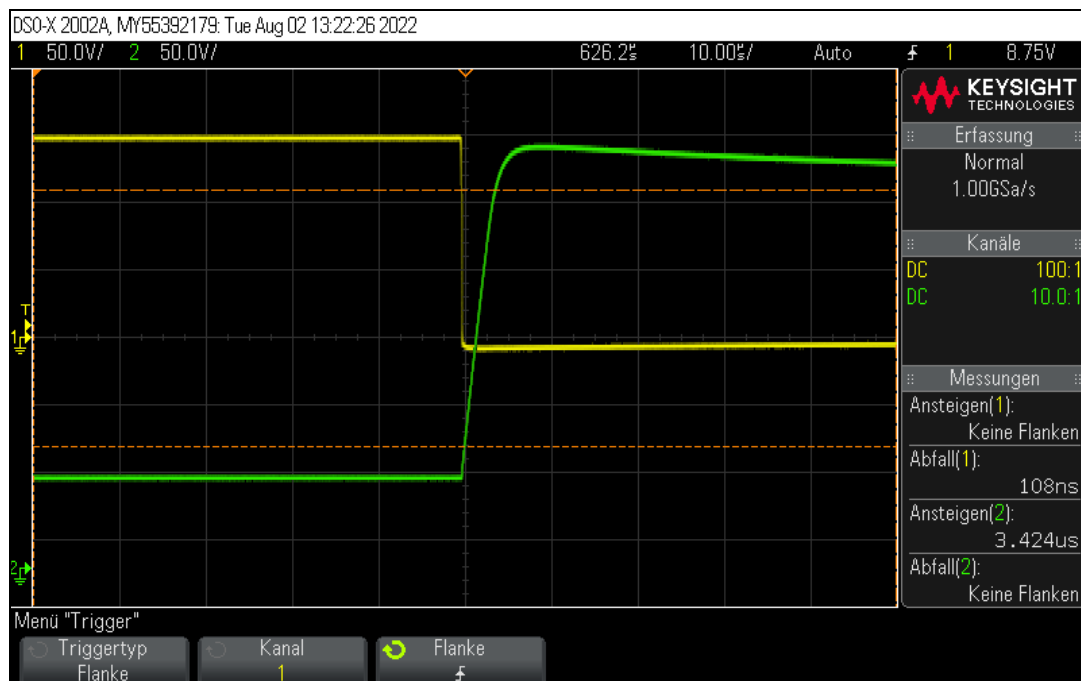
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 100us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / 1nF vom Ausgang nach Masse.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

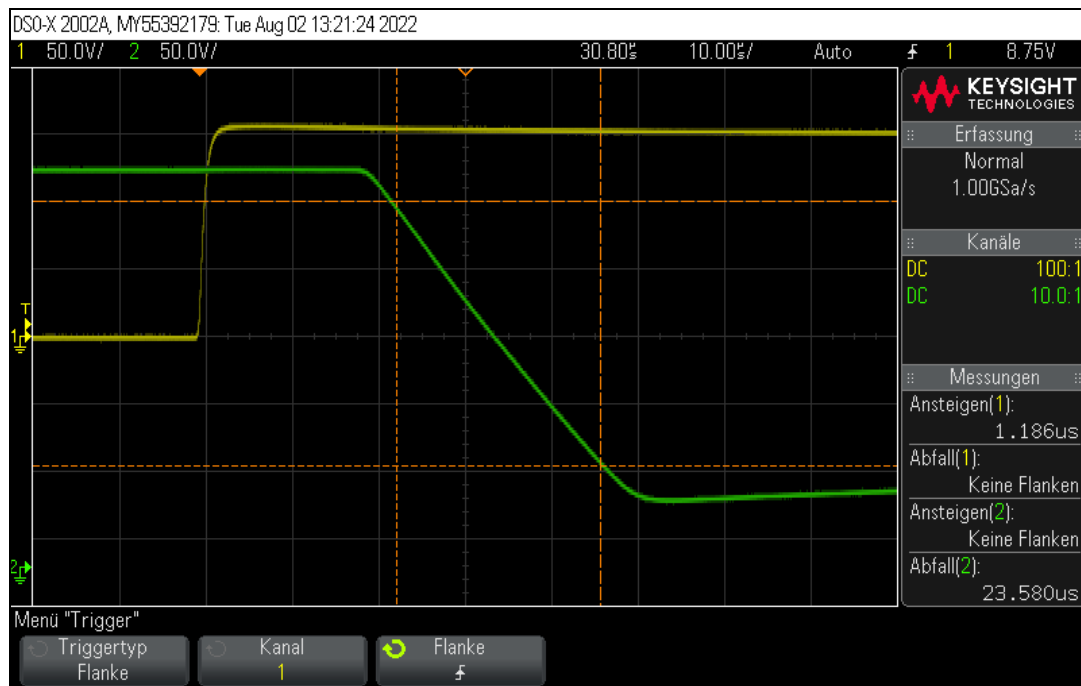
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glühlampe über 390K / 2M parallel / **0pF** vom Ausgang nach Masse und **33K** vom Ausgang nach +300V.



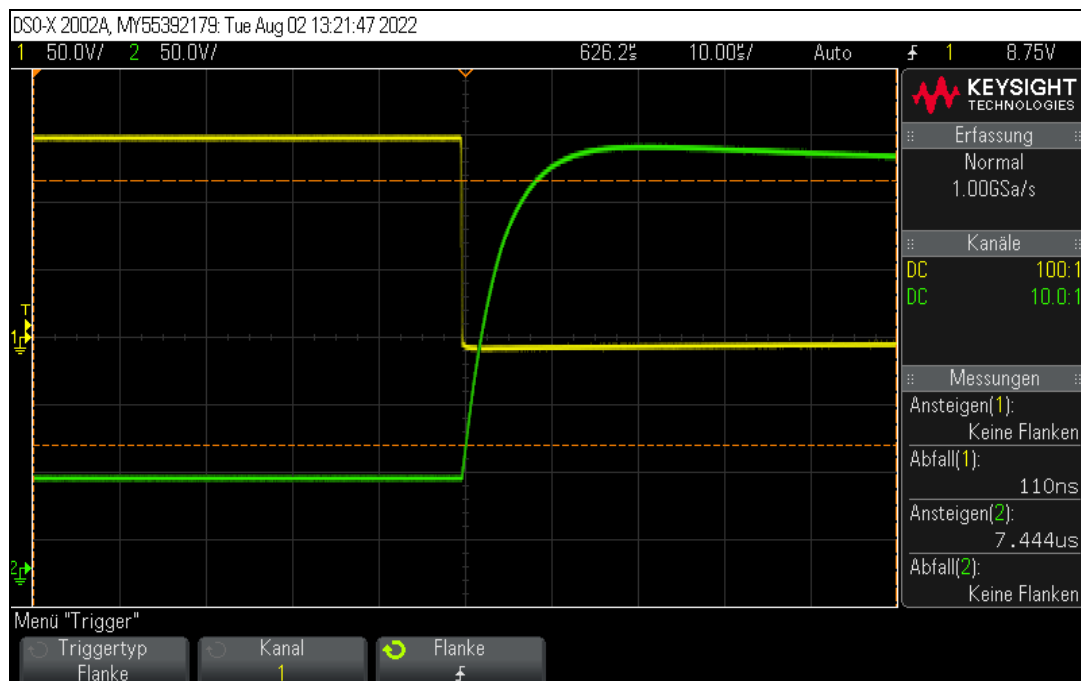
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glühlampe über 390K / 2M parallel / **0pF** vom Ausgang nach Masse und **33K** vom Ausgang nach +300V.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

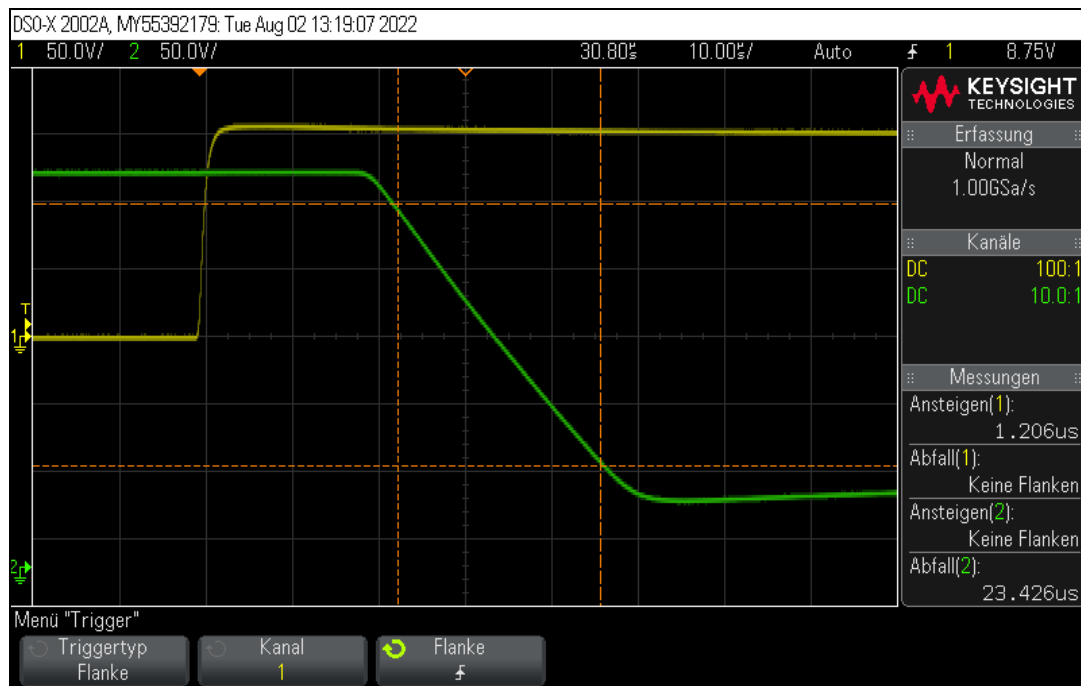
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / **100pF** vom Ausgang nach Masse und **33K** vom Ausgang nach +300V.



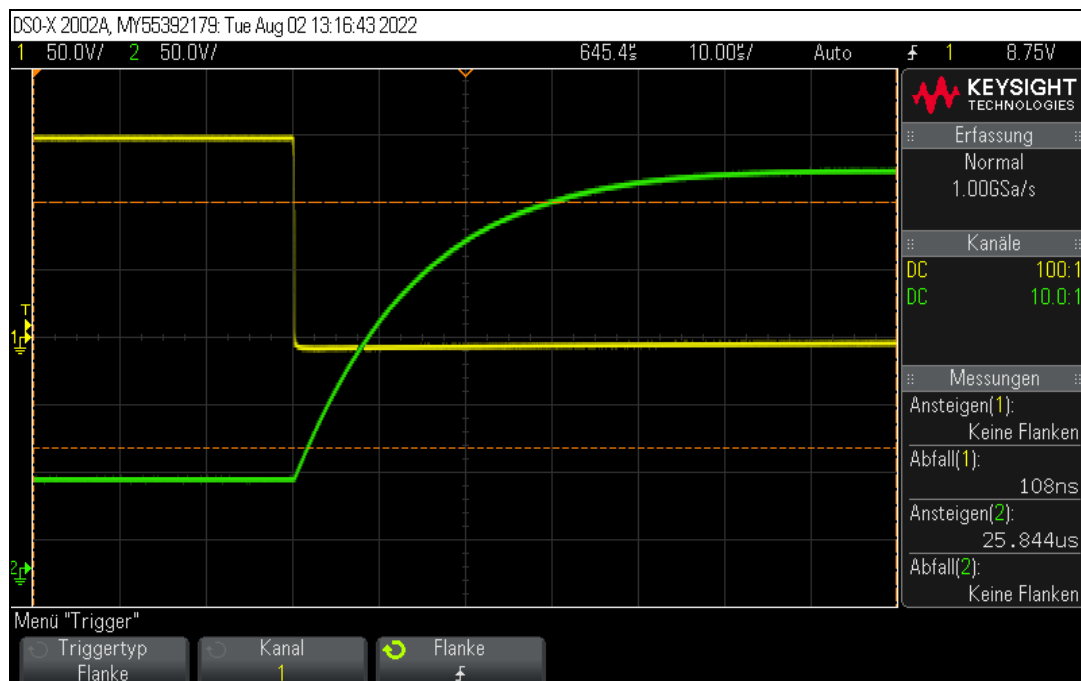
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / **100pF** vom Ausgang nach Masse und **33K** vom Ausgang nach +300V.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

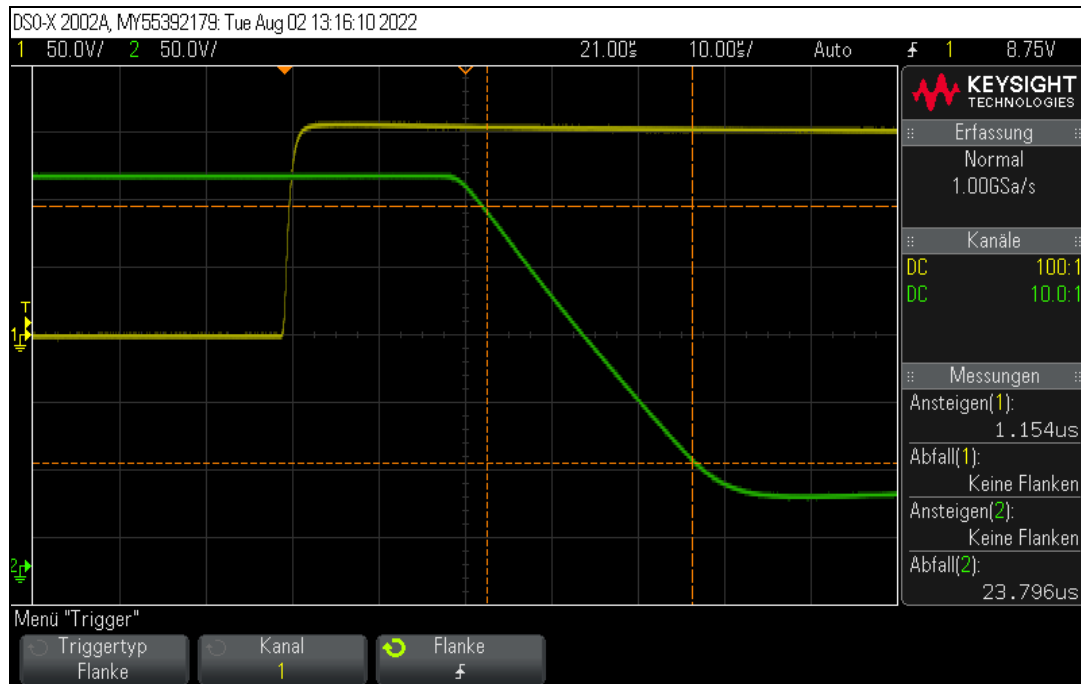
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (gelb): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / **220pF** vom Ausgang nach Masse und **33K** vom Ausgang nach +300V.



CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / **220pF** vom Ausgang nach Masse und **33K** vom Ausgang nach +300V.



CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV

CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV

Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / **470pF** vom Ausgang nach Masse und **33K** vom Ausgang nach +300V.



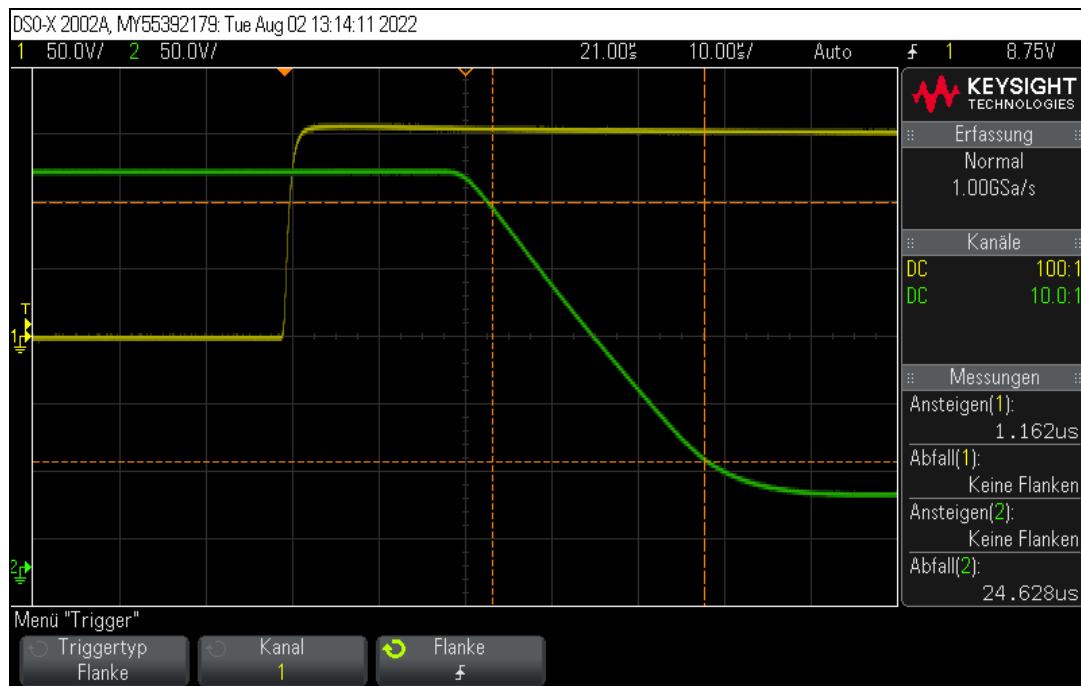
CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV

CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV

Zeit: 10us/DIV

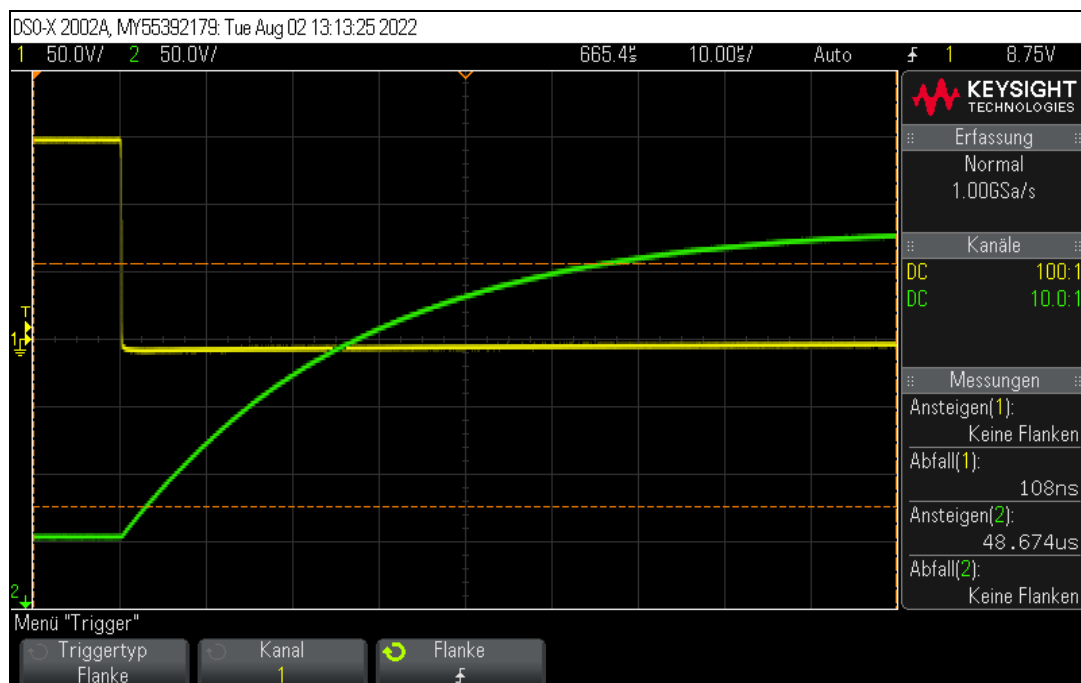
Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / **470pF und 33K nach +300V.**

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / 1nF vom Ausgang nach Masse und 33K vom Ausgang nach +300V.

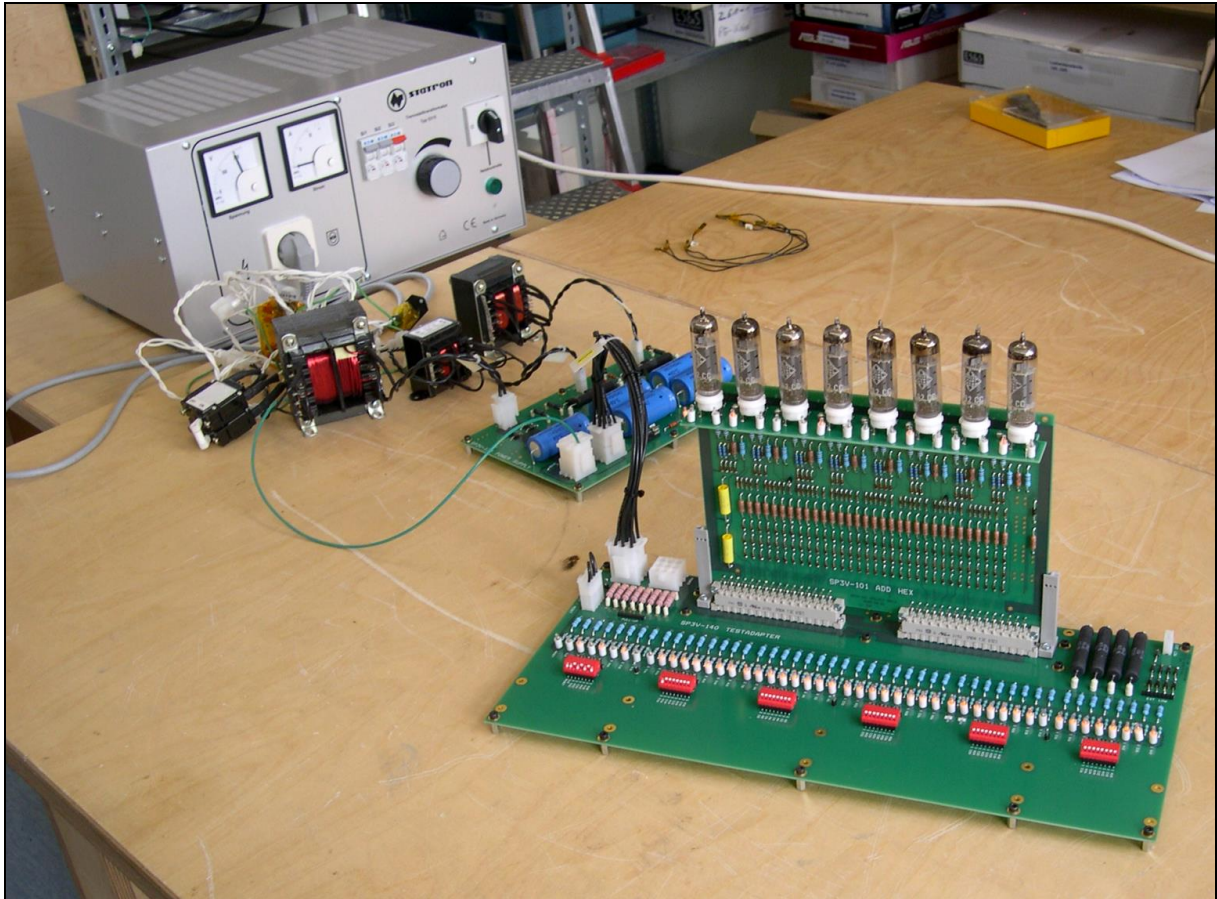


CH1 (gelb): Eingang, 2_C18 50V/DIV
 CH2 (grün): Ausgang, 1_C28 50V/DIV
 Zeit: 10us/DIV

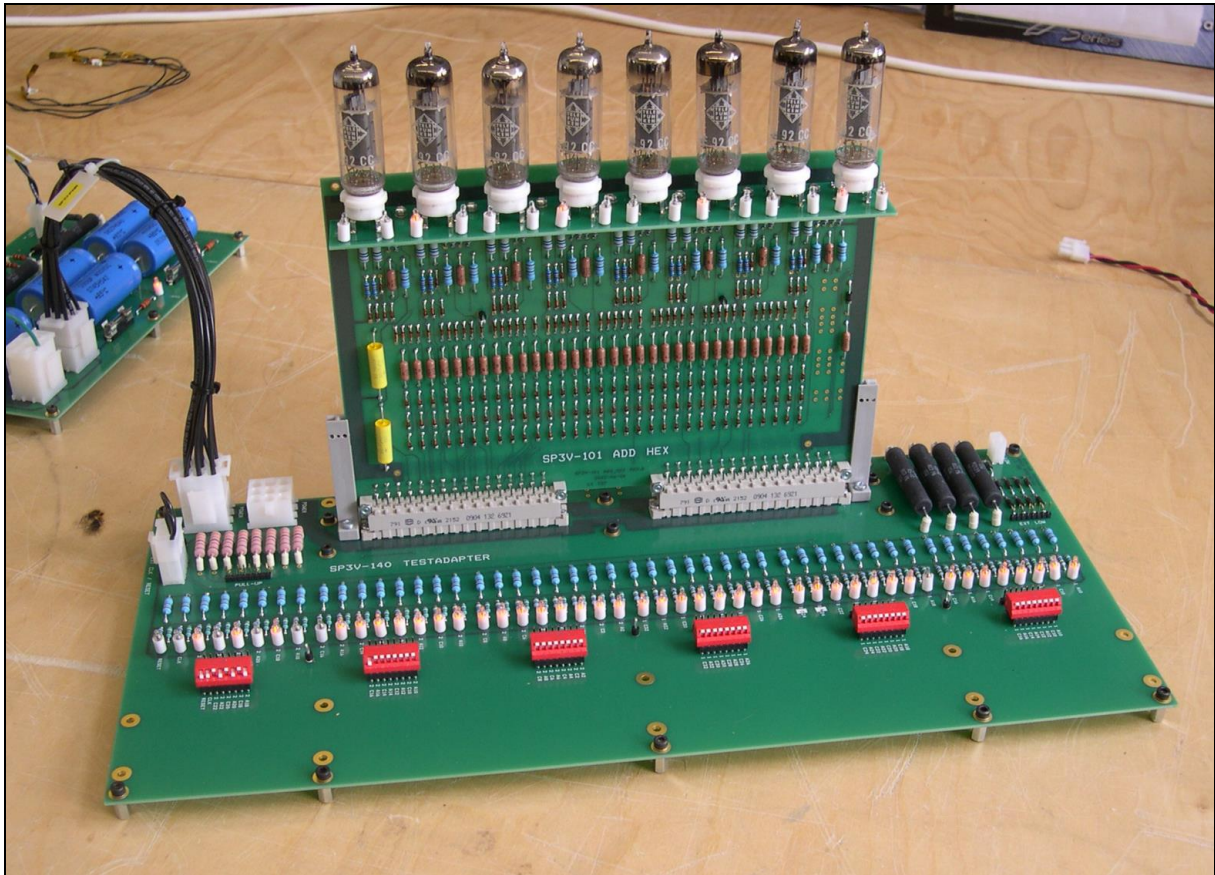
Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Last am Ausgang: 680K nach +300V / Glimmlampe über 390K / 2M parallel / **1nF** vom Ausgang nach Masse und **33K** vom Ausgang nach +300V.

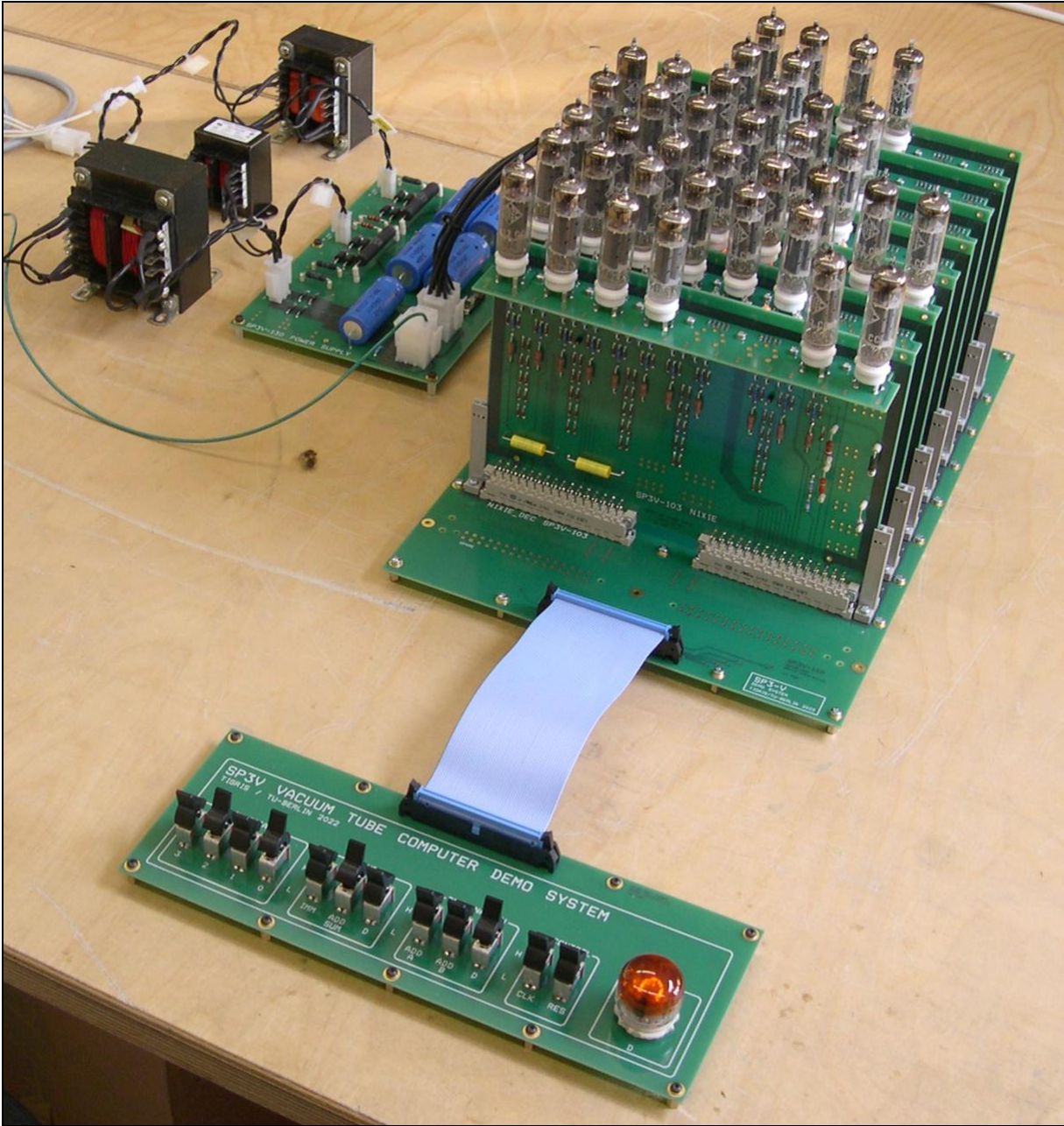
Fotos



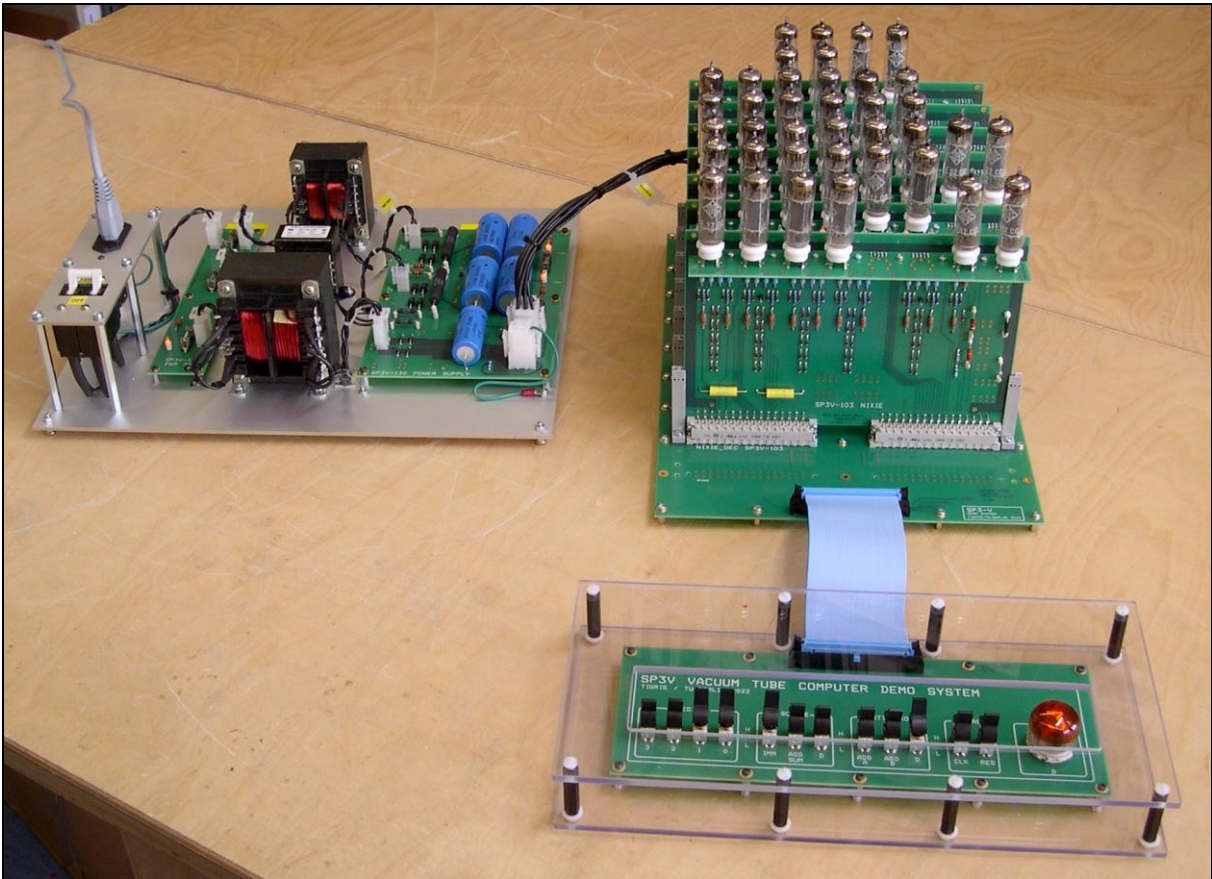
Gesamtaufbau zum Test einzelner Baugruppen



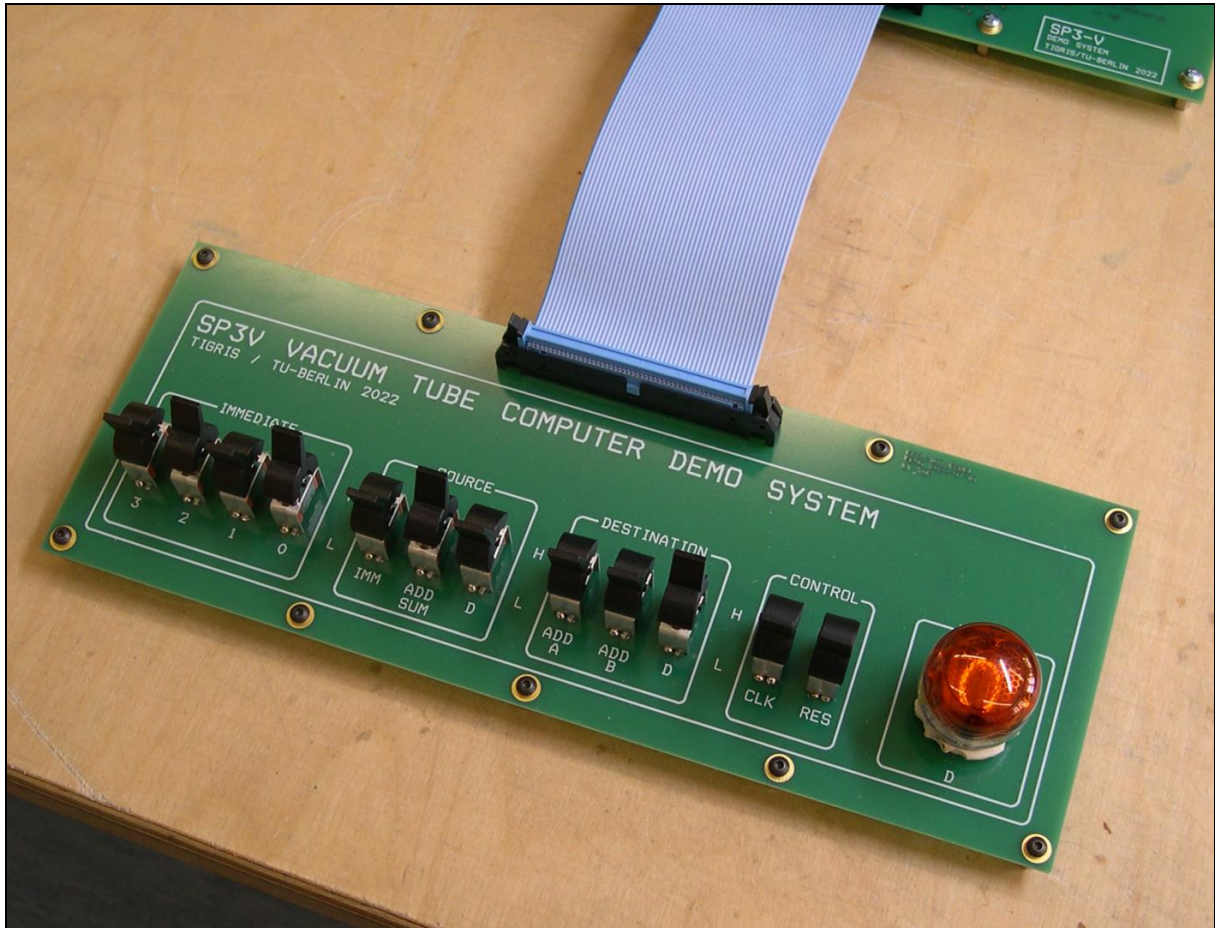
Funktionstest der Baugruppe SP3V-101 im Testadapter



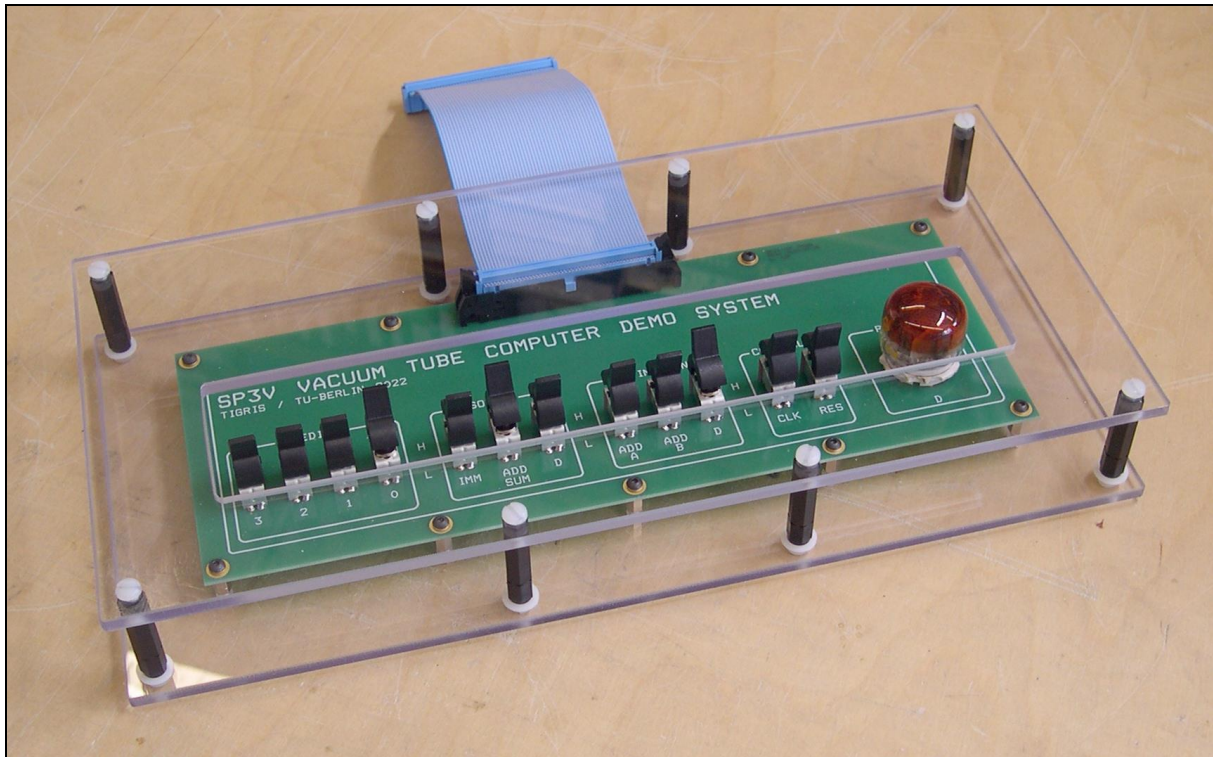
Gesamtansicht des Demo-Systems bei der ersten Erprobung



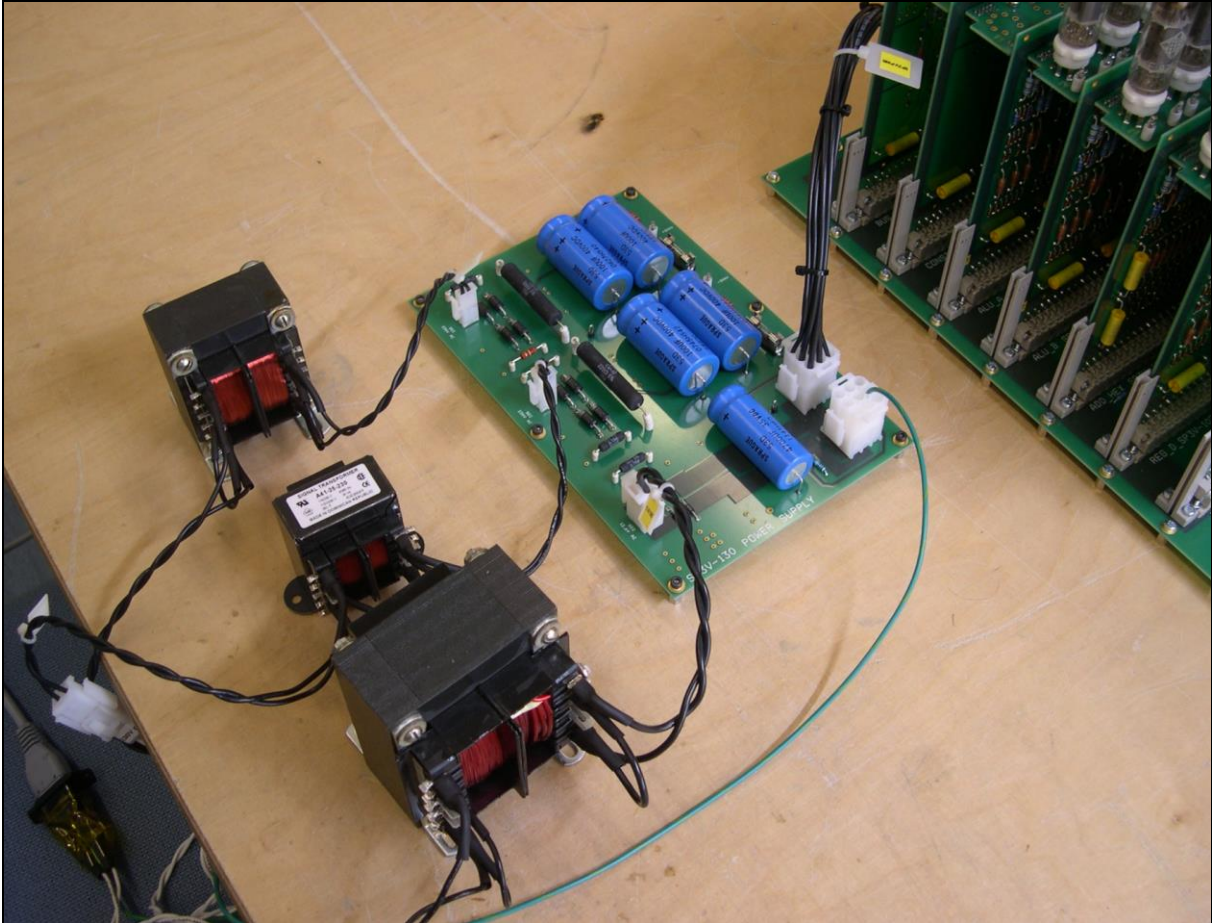
Fertig aufgebautes Demo-System



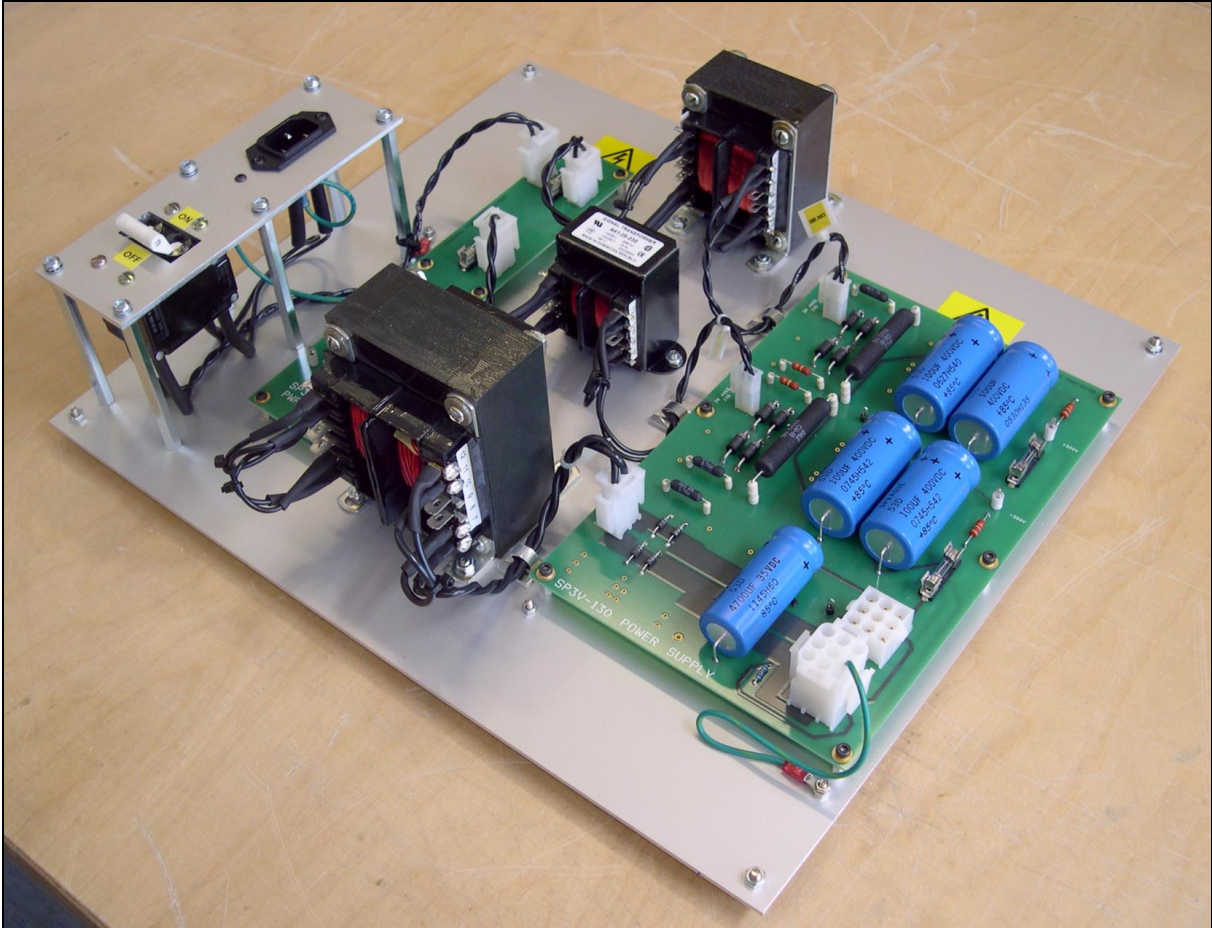
Detailansicht des Panels bei der ersten Erprobung



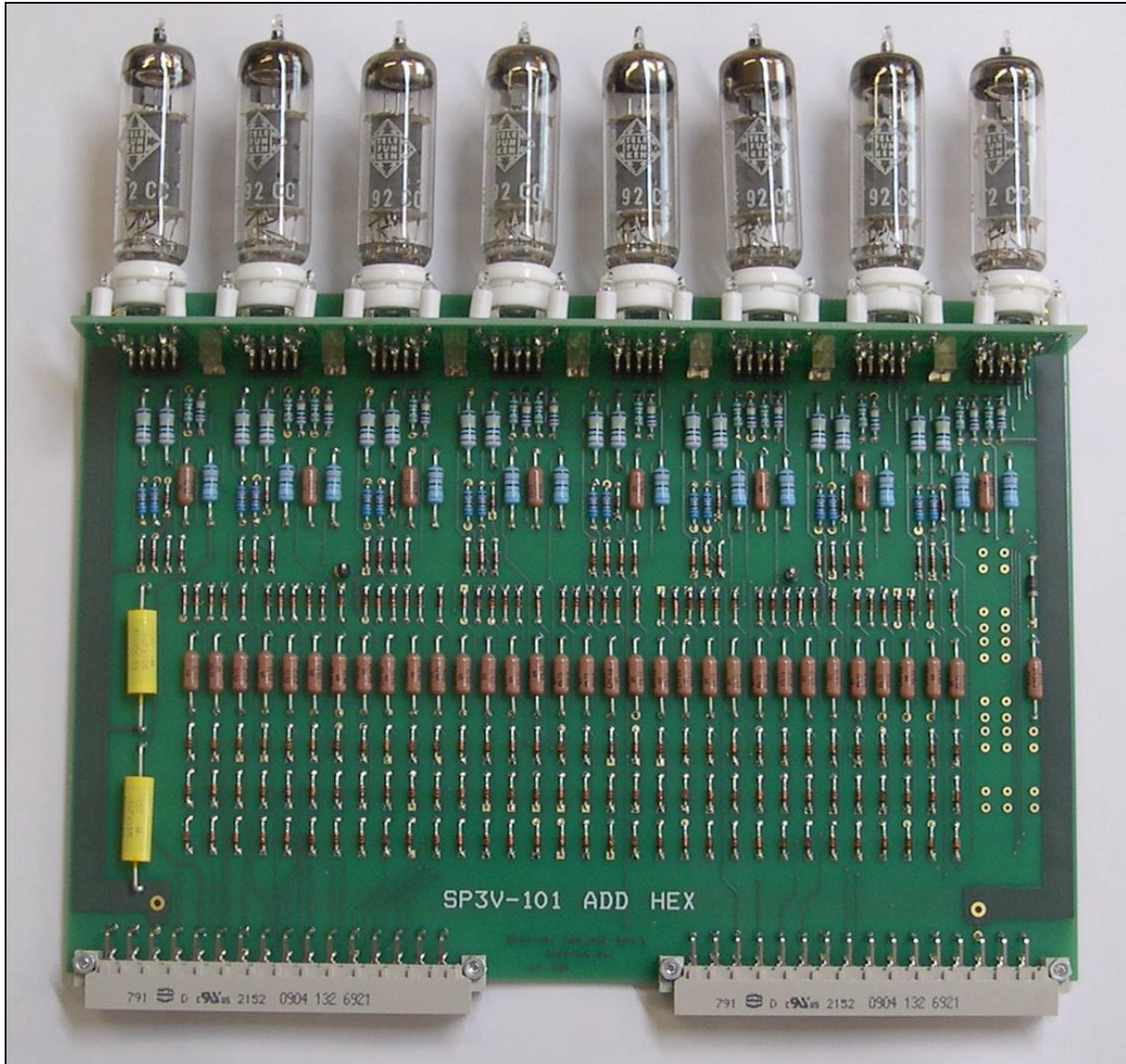
Fertig montiertes Panel mit Berührungsschutz



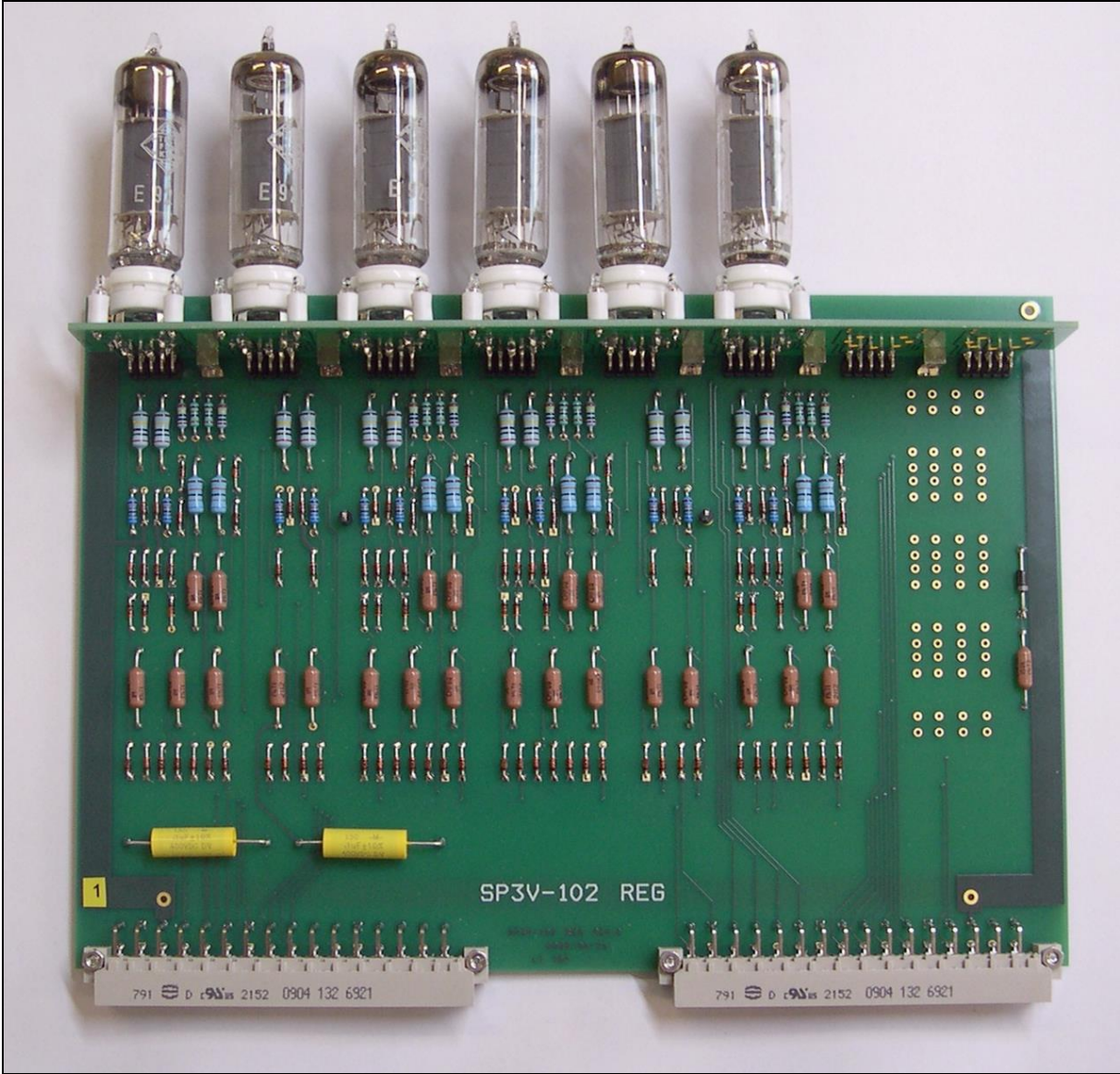
Detailansicht der Stromversorgung bei der ersten Erprobung



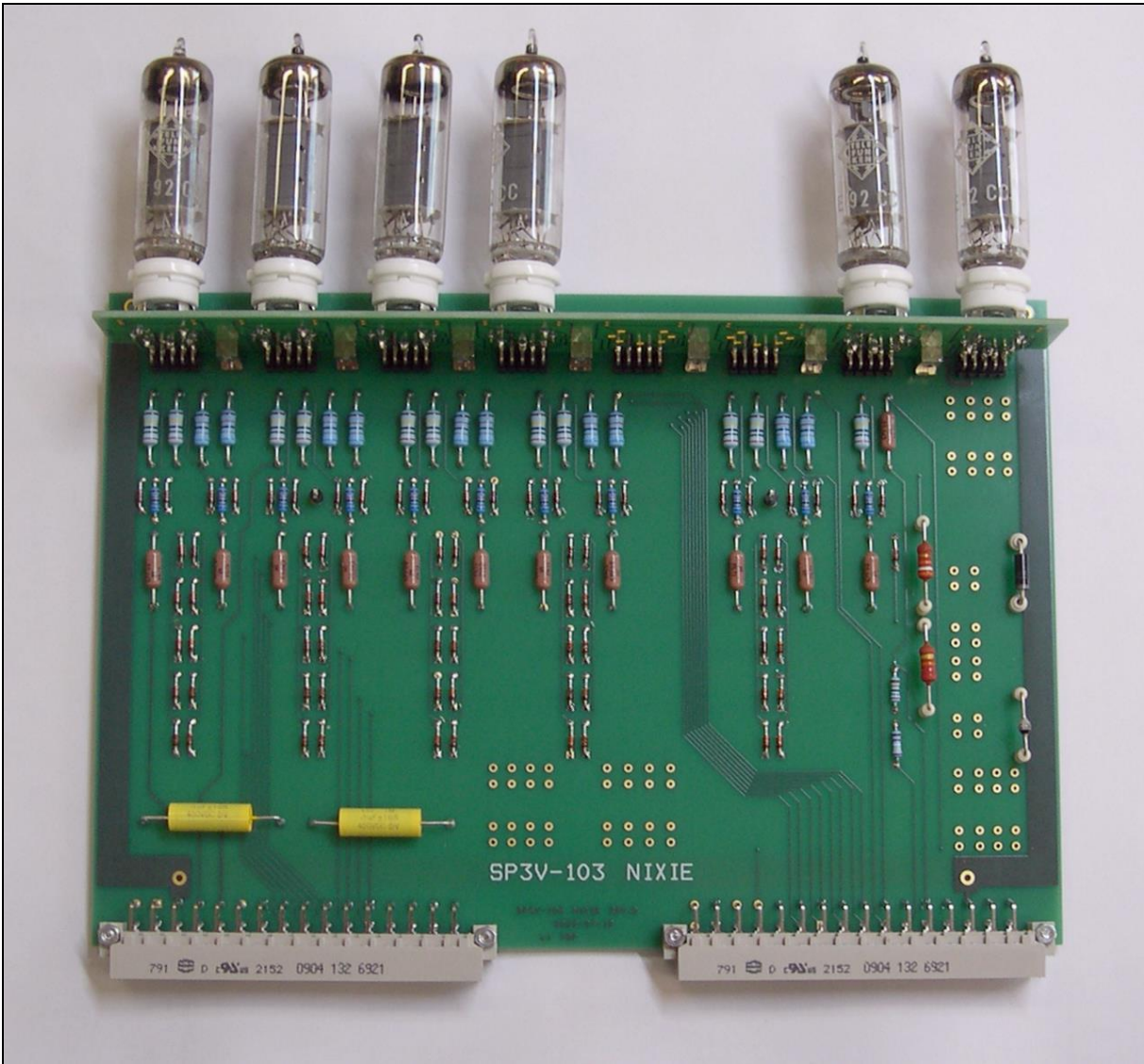
Fertig aufgebaute Stromversorgung



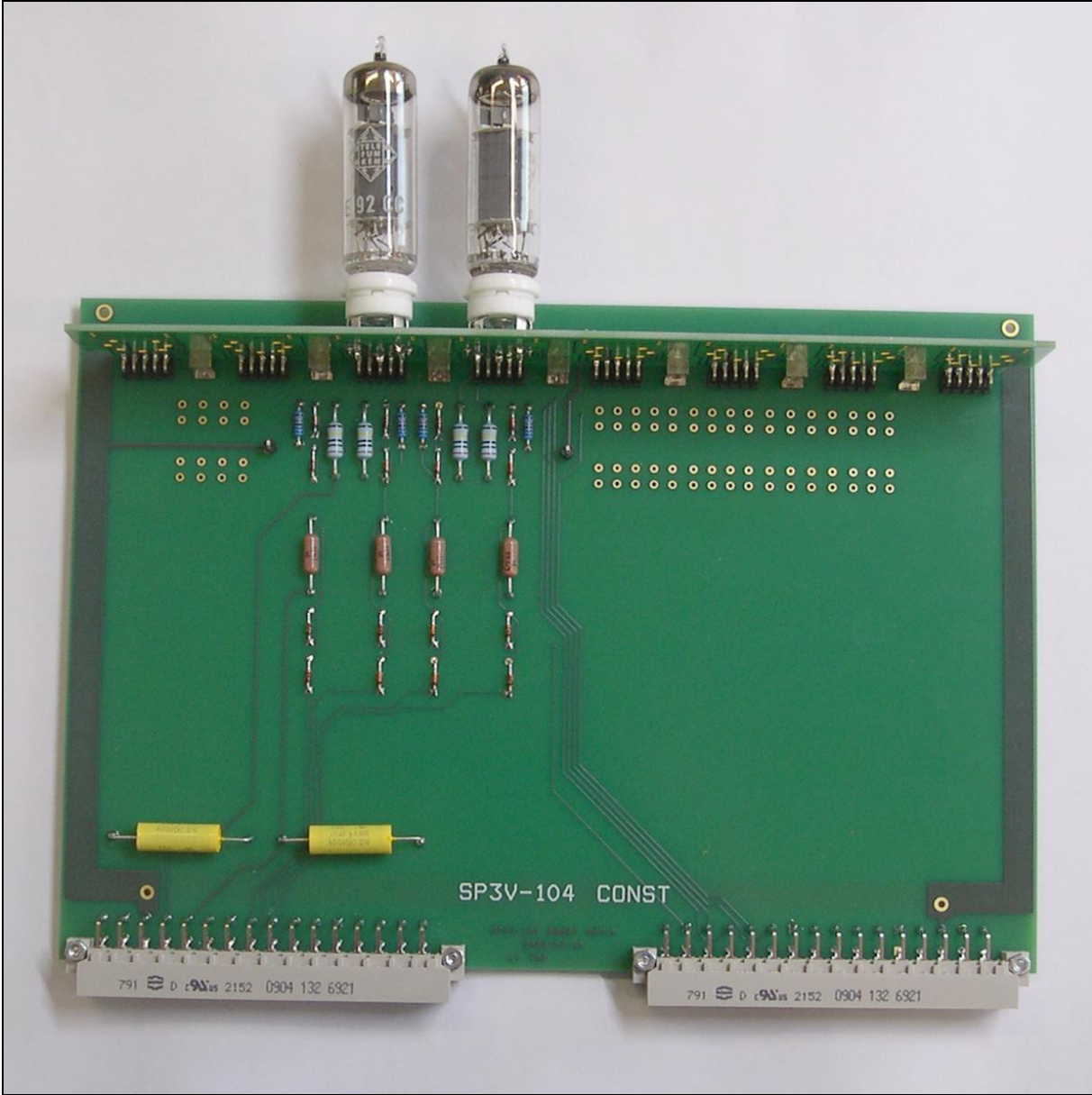
Baugruppe SP3V-101 ADD_HEX



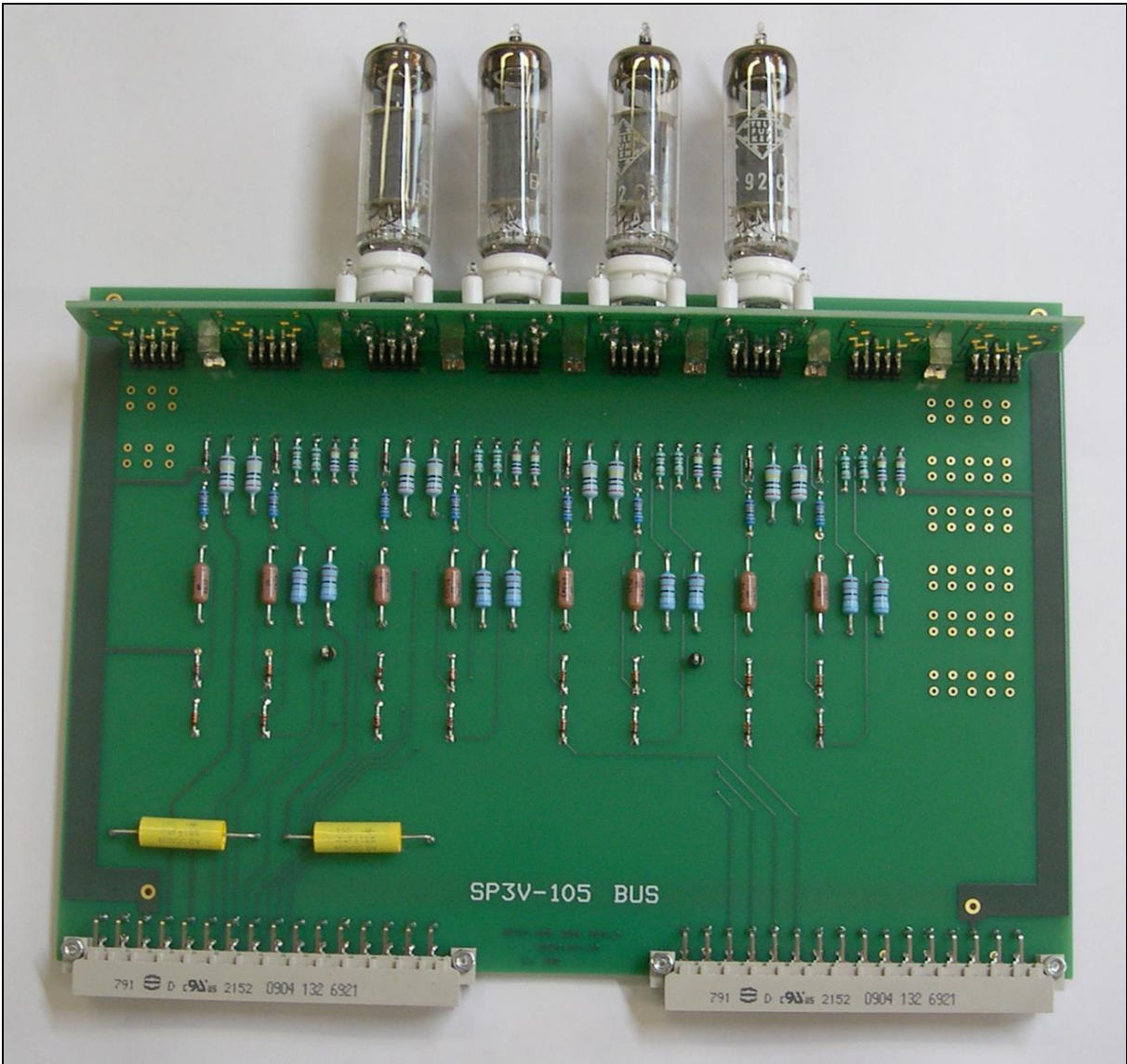
Baugruppe SP3V-102 REG



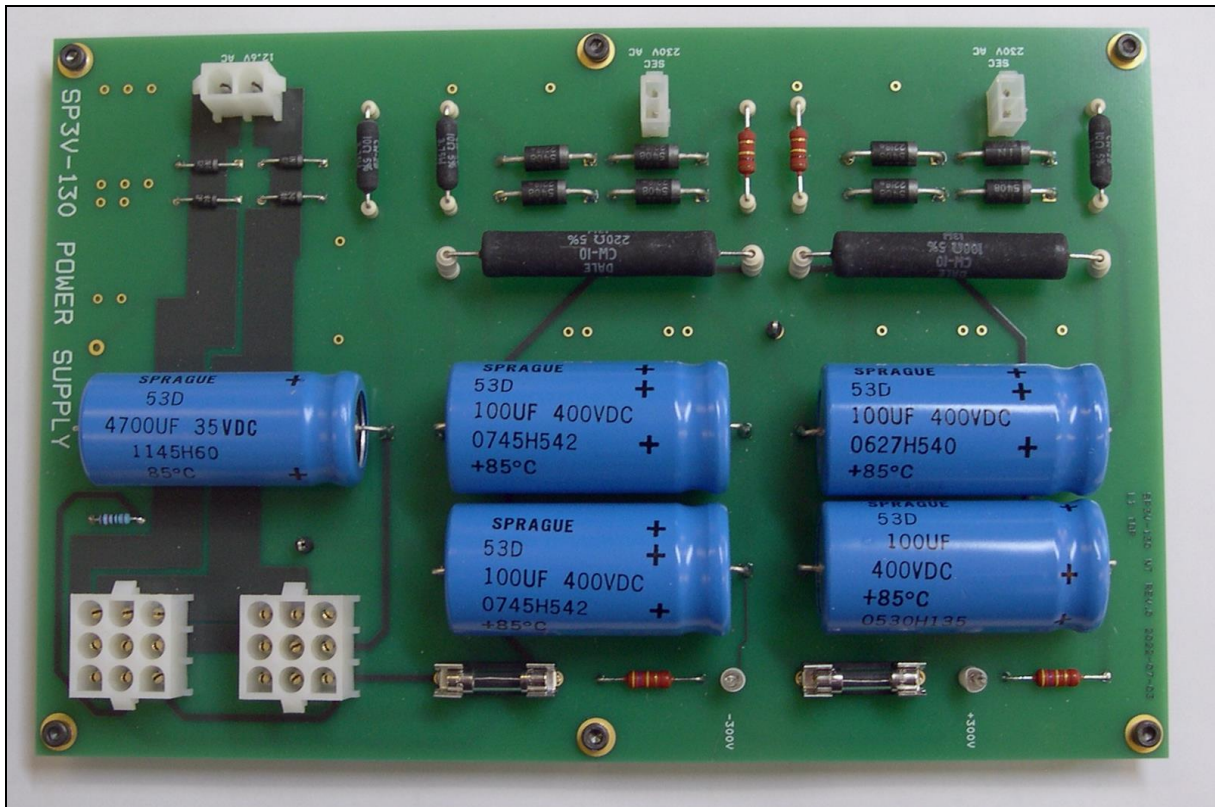
Baugruppe SP3V-102 NIXIE



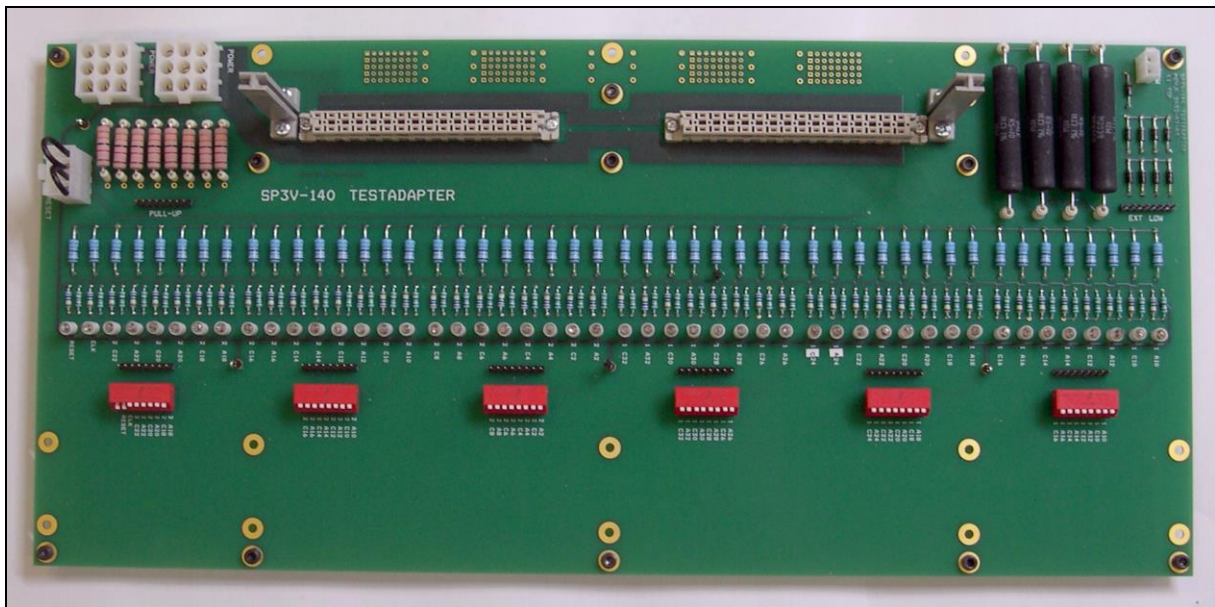
Baugruppe SP3V-104 CONST



Baugruppe SP3V-105 BUS



Baugruppe SP3V-130 Netzteil



Baugruppe SP3V-140 Testadapter

Zusammenfassung aller Änderungen und bekannten Fehler

(1)

SP3V-140 TESTADAPTER

Die Beschriftungen A24 und C24 an den Glühlampen sind miteinander vertauscht. Korrektur durch Aufkleber.

(2)

SP3V-102 REG

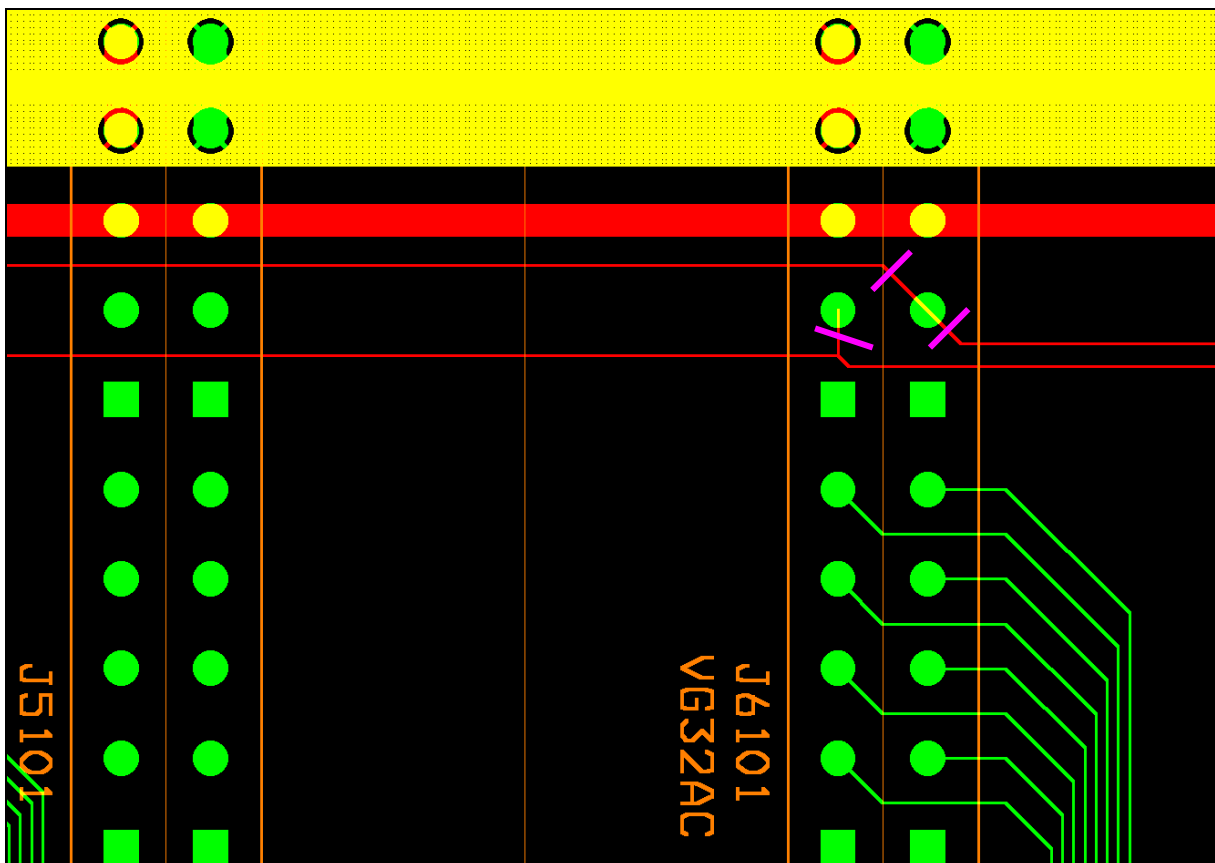
Leiterbahn recht nahe an Winkel-Element, aber für Fertigung von 2 weiteren PCBs keine Korrektur notwendig, sollte für eine größere Stückzahl aber geändert werden.

(3)

SP3V-120 BACKPLANE

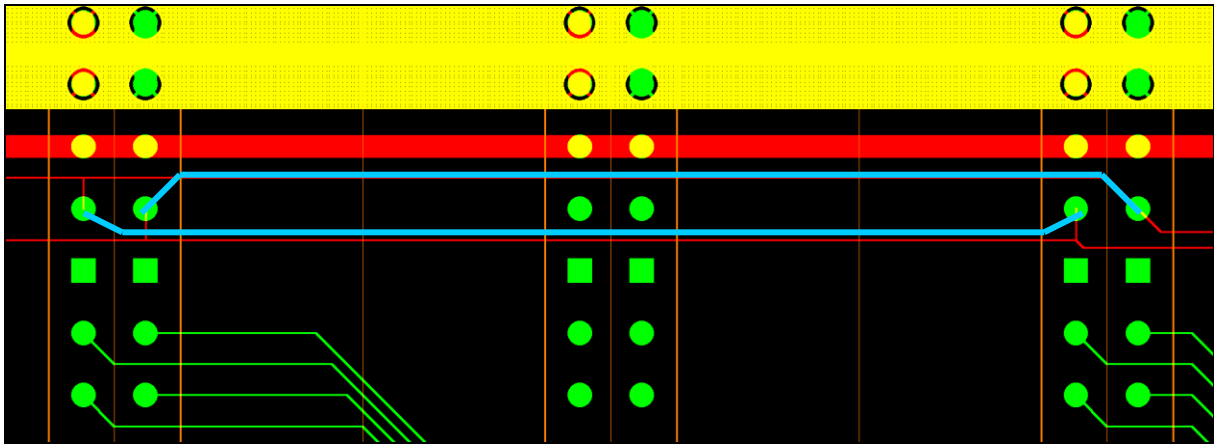
Vertauschung CLK und RESET an Register D (Schreibfehler), an den anderen Registern richtig.

Trennen:

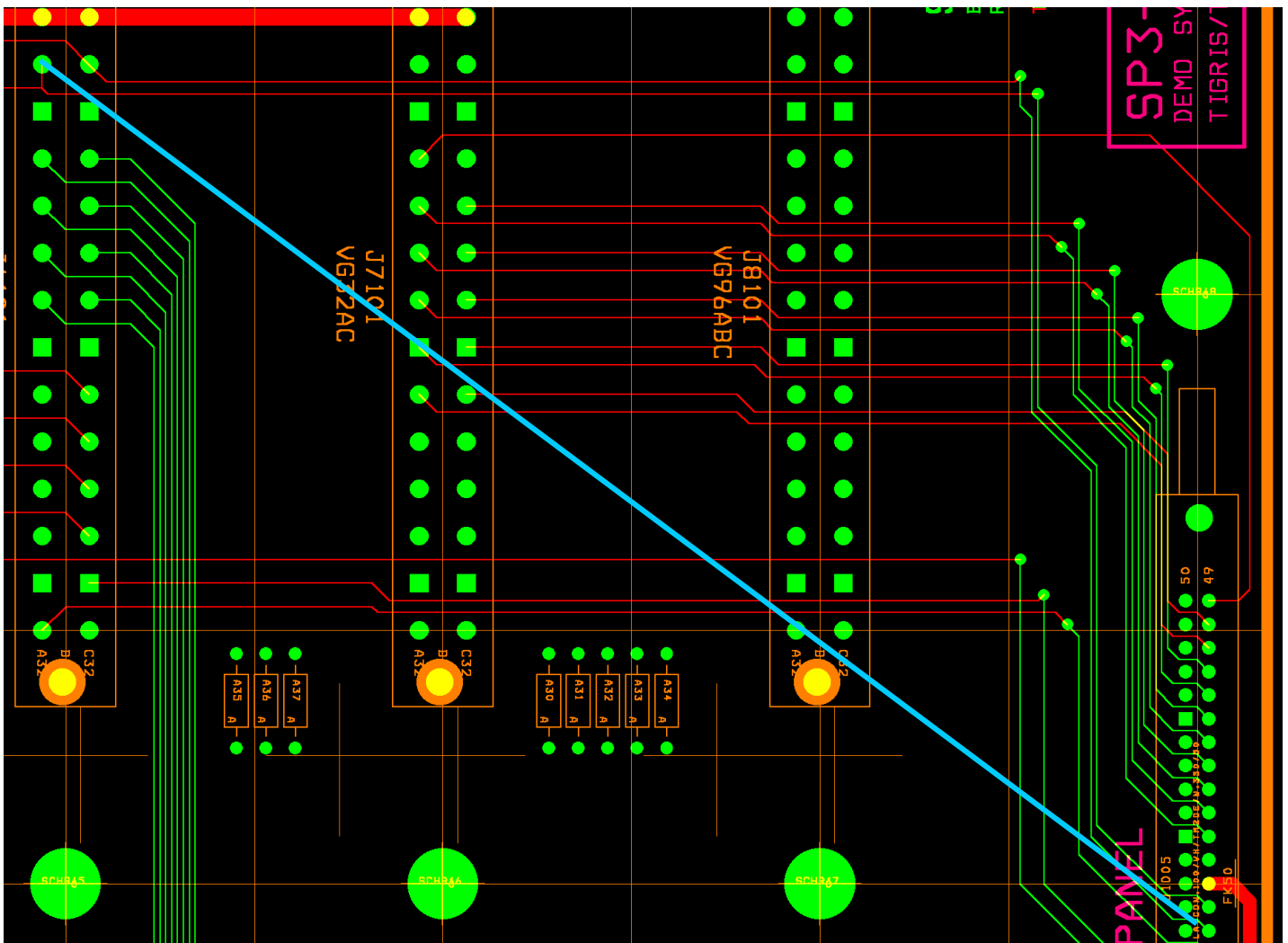


Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

Verbinden:



Verbinden:



Hinweis: Entgegen der Zeichnung wurde die Leitung am Steckverbinder J3101 angebunden, um die Schwierigkeit zu vermeiden, zwei Litzen an einen Pin anzubinden, die Verbindung ist elektrisch äquivalent.

Bereitgestellt von jogis-roehrenbude.de

(4)

SP3V-120 BACKPLANE

Die Busausgänge der Register ALU_A und ALU_B sind an den Bus D_rd angebunden (Copy-Paste-Fehler). Die dazugehörigen OE-Eingänge sind aber unbeschaltet, damit liegen die Register dauerhaft am Bus.

Lösung: Die OE-Eingänge werden an Masse gelegt, damit sind die Ausgänge stets sperrend.

Verbinden:

J3101/C30 (OE) an J3101/C6 (GND)

J4101/C30 (OE) an J4101/C6 (GND)

(5)

SP3V-120 BACKPLANE

Das Netz SW_D_AB ist nicht geroutet (ORCAD-Fehler, war ungewollt auf disabled gesetzt). Damit ist das WE-Signal für das Register ALU_B dauerhaft aktiv, da der Eingang „in der Luft hängt“.

Das Netz wird durch Nachverdrahtung verbunden:

Verbinden:

J4101/A32 an J1005/17