

# Der Norton-Verstärker („Transformer Lossless-Feedback Amplifier“)

Von Guenter Fred Mandel, DL4ZAO

[www.dl4zao.de](http://www.dl4zao.de)

## Einführung

Als „Norton Verstärker“ bezeichnet man eine Verstärkervariante mit Transformator-Gegenkopplung, wie sie von David Norton und Allen Podell von der Fa. Anzac 1975 patentiert wurde [1]. Das Verstärkerprinzip vereint niedrige Intermodulationsverzerrungen mit einer niedrigen Rauschzahl. Beides erstrebenswerte Eigenschaften beim Design von Empfängern. Beim Norton Verstärker wird zur Linearisierung negative Rückkopplung über einen Übertrager verwendet, um so intermodulationsarme Verstärkung bei hoher Aussteuerbarkeit zu erreichen. Im Gegensatz zur konventionellen Gegenkopplung mit verlustbehafteten Widerständen ist die Gegenkopplung über einen Transformator nahezu verlustfrei und bewirkt keine Verschlechterung der Rauschanpassung des Transistors. Das Norton Verstärkerprinzip wird in der angelsächsischen Literatur deswegen als „Transformer Lossless-Feedback Amplifier“ bezeichnet. Wegen seiner ausgezeichneten Linearität und Rauschmutter ist ein Norton-Verstärker deshalb als Hochfrequenz Breitband-Verstärker geeignet.

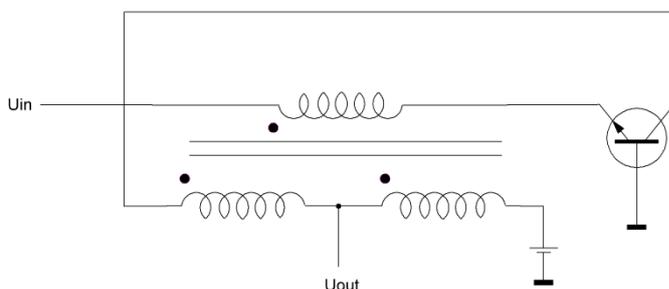


Bild 1 Das Norton-Verstärker Prinzip aus der Patentschrift

Die Verstärkung wird praktisch nur durch das Windungsverhältnis des Gegenkopplungs-Übertragers bestimmt und ist weitgehend unabhängig von Bauteilstreuungen. Der Lastwiderstand wird dabei auf den Eingang transformiert. Bei gutem Abschluss ergibt sich auch eine gute Eingangsanpassung. Die Bandbreite wird überwiegend durch die Eigenschaften des Gegenkopplungs-Übertragers begrenzt. Es sind Verstärker vom kHz Bereich bis UHF realisierbar. Wie bei jeder Gegenkopplung gilt: je größer der Betrag der negativen Rückkopplung ist, desto geringer ist die Stufenverstärkung, desto höher aber auch der linearisierende Effekt.

## Pro- und Contra Norton-Verstärker:

- + Linear und hoch aussteuerbar, hoher IP3 erreichbar
- + Rauscharm; Rauschzahl des Transistors wird durch die Trafo-Gegenkopplung nicht beeinträchtigt
- + Breitbandig, Frequenzgang vornehmlich durch die Eigenschaften des Übertragers bestimmt
- + Verstärkungsfaktor durch das Transformationsverhältnis fix
- + Gute Anpassung bei korrektem Abschluss,  $Z_{\text{ein}} = Z_{\text{aus}}$
- geringe Isolation (Reverse Gain), als Trennverstärker weniger geeignet
- $Z_{\text{ein}} = Z_{\text{aus}}$ , Fehlanpassung am Ausgang wird zum Eingang durchgereicht, Gefahr von Instabilität
- wegen Trafo aufwändiger als monolithische MMIC
- Stufenverstärkungen  $>14\text{dB}$  wenig sinnvoll

## Schaltungsprinzip und praktische Umsetzung des Norton Verstärkers

Beim Aufbau und bei der Auswahl der Transistoren ist auf gute HF-Eigenschaften zu achten. Die Transitfrequenz der verwendeten Transistoren soll hoch genug sein, damit ausreichend Verstärkungsreserve für eine wirksame Gegenkopplung vorhanden ist. Ein sorgfältig nach HF-Gesichtspunkten ausgerichteter Aufbau ist notwendig, da parasitäre Elemente leicht zu unerwünschtem Schwingen auf hohen Frequenzen führen können. Als Transistoren eignen sich rauscharme, lineare CATV/Cellular Typen wie z.B. 2N5109, BFR96S, NE46134, BFU580Q.

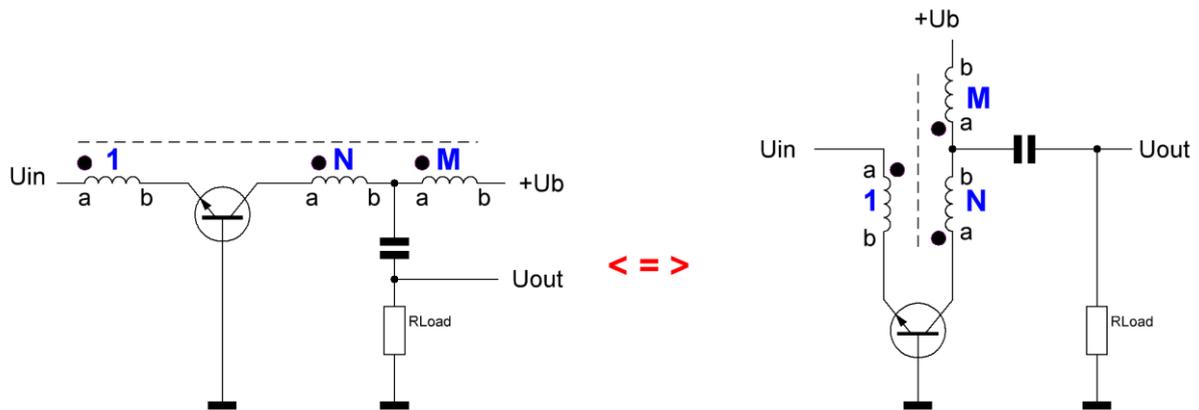


Bild 2 Schaltungsprinzip des Norton Verstärkers in unterschiedlichen Zeichnungsvarianten

### Der Gegenkopplungs-Übertrager

Der Gegenkopplungs Übertrager (1 : N : M) ist von ausschlaggebender Bedeutung, seine Eigenschaften bestimmen Bandbreite und Verstärkung einer Norton-Verstärkerstufe [5][6]. Die Punkte an den Windungen in Bild 2 markieren die Anschlüsse mit gleicher Phasenlage. Die Primärwicklung „1“ besteht in der Regel aus nur einer Windung und ist am Emitter gegenphasig zur Sekundärwicklung gepolt, um so eine negative Rückkopplung zu erzeugen. Vertauscht man versehentlich die Anschlüsse der Primärwicklung wird aus der Gegenkopplung eine Mitkopplung und aus dem Verstärker wird ein Meissner Oszillator. Beste Ergebnisse erhält man mit Doppellochkernen. Sie vereinen geringe Verluste, einen hohen Kopplungsfaktor und geringe Streuinduktivitäten.

Die Spannungsverstärkung  $G$  einer Verstärkerstufe entspricht beim idealen Trafo und 1Wdg primär der Windungszahl der Sekundär-Wicklung  $M$ . In der Praxis ist es, je nach Trafo, geringfügig weniger.

$$G = M; \quad G(\text{dB}) = 20 \log M$$

Die Windungszahl der Wicklung  $N$  errechnet sich für  $Z_{\text{in}} = Z_{\text{out}}$  in Abhängigkeit von der Windungszahl von  $M$  nach der Regel:

$$N = M^2 - M - 1$$

Der Transistor arbeitet auf eine Lastimpedanz von:

$$(N + M) * Z_{\text{out}}$$

Windungsverhältnis 1:N:M		
Windungszahl	Windungszahl	Spannungs-Verstärkung G
N = 1	M = 2	6 dB
N = 5	M = 3	9,5 dB
N = 11	M = 4	12 dB
N = 19	M = 5	14 dB

Tabelle: Trafo-Windungsverhältnisse für praktische Verstärkungswerte

Die Tabelle zeigt die Windungszahlen für sinnvolle Stufenverstärkungen. Höhere Verstärkung wird besser durch das Kaskadieren von mehreren Verstärkerstufen erreicht. Stufen mit großer Gegenkopplung und somit kleinerer Verstärkung weisen Prinzip-bedingt eine bessere Linearität und Bandbreite auf. Um niedrigere Grenzfrequenzen zu erreichen kann die Windungszahl angepasst werden, solange das Windungsverhältnis beibehalten wird. Zum Beispiel kann ein 1:5:3 Übertrager für 9,5dB Verstärkung bei Bedarf auch mit 2:10:6 oder mit 3:15:9 Windungen gewickelt werden.

### Herstellung des Trafos

Am besten wickelt man den Übertrager auf einen Ferrit-Doppellochkern. Man erreicht damit enge Kopplung bei minimalen Streuinduktivitäten. Auch Ringkerne sind durchaus geeignet. Die Phasenbeziehung der Wicklung ist von ausschlaggebender Bedeutung. Bild 3 zeigt auf, wie man den Doppellochkern bewickelt und in der Schaltung anschließt. Da der Kollektorstrom des Transistors durch die Übertragerwicklung fließt, ist bei der Auswahl des Kerns darauf zu achten, dass das Kernmaterial nicht in die Sättigung gerät.

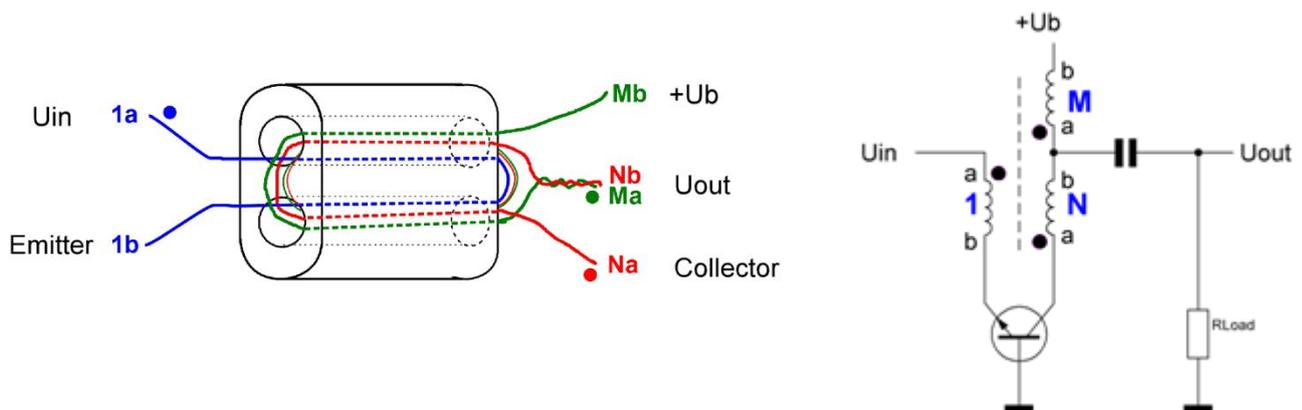
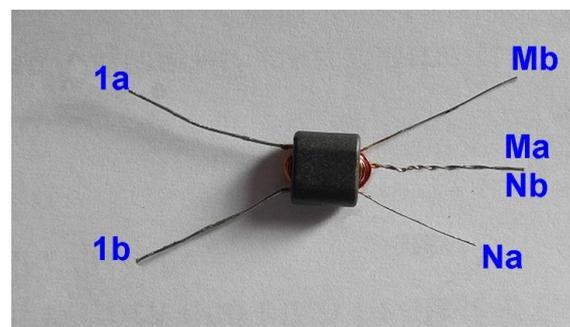


Bild 3: Wickel- und Anschlussschema des Gegenkopplungs-Übertragers

Bild 4 rechts zeigt einen fertig gewickelten 1:11:4 Trafo für 12dB Verstärkung auf einem Doppellochkern BN43-2402 von Amidon. Mit diesem Trafo arbeitet der Verstärker von ca 1 bis 70 MHz. Verwendet man Kernmaterialien mit höherer Anfangspermeabilität oder passt man die Zahl der Windungen unter Beibehaltung des Windungsverhältnisses an, ist eine untere Frequenzgrenze von wenigen Kilohertz erreichbar.



## Anwendungen für Norton Verstärker

Norton Verstärker wurden wegen ihrer vorteilhaften Eigenschaften in Schaltungen von professionellen Empfängern verwendet (Rhode & Schwarz EK070). Auch in Amateurfunkempfängern werden Norton Verstärkerstufen eingesetzt, so z.B. von ICOM in neueren TRX wie IC7600/700/800 Norton (Bild 5, rechts).

Für rauscharme Vor- oder Zwischenfrequenz-Verstärker ist das X-gegekoppelte Norton Verstärkerprinzip gut geeignet. Nachfolgend einige ausgewählte Beispiele zum praktischen Einsatz von Norton Verstärkern.

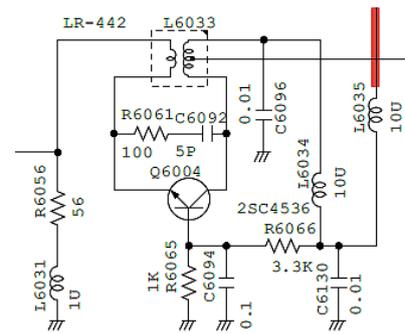


Bild 5 Norton Stufe aus IC7600

## „Neuartiger Vorverstärker für 145MHz- und 435MHz“ von Michael Martin

Wenige Jahre nach der Patentanmeldung von David Norton erschien in den UKW-Berichten 4/1977 ein vielbeachteter Artikel von Michael Martin, DJ7VY: „Neuartiger Vorverstärker für 145MHz- und 435MHz-Empfänger“ [2]. Martin zeigt darin, wie es „mit einer neuen Art von Gegenkopplung“ nach dem Norton Prinzip gelingt, bipolare Transistorverstärker linearer zu machen ohne das Rauschverhalten zu beeinträchtigen. Bis dahin waren für rauscharme VHF/UHF Vorverstärker überwiegend Feldeffekt-Transistoren eingesetzt worden.

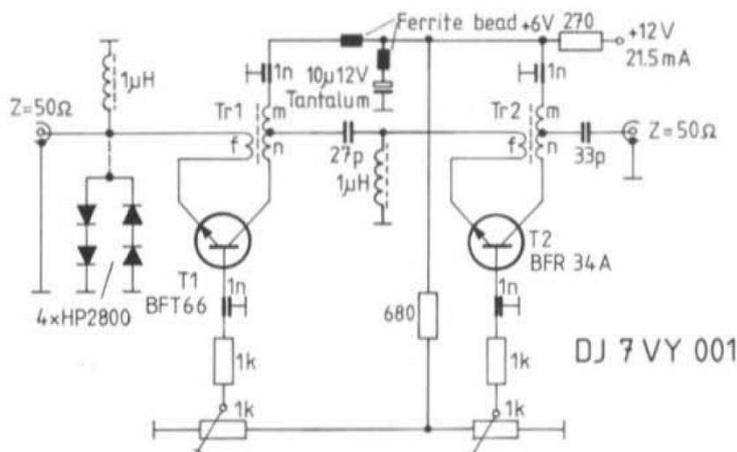


Bild 6: Norton Verstärker für 145 bzw. 435 MHz Michael Martin, DJ7VY - UKW-Berichte 4/1977

Der Bauvorschlag für den Norton Verstärker von DJ7VY war mit einem Doppellochkern aus SiFerrit X17 Material für einen Frequenzbereich von 70 bis 670 MHz dimensioniert. Der Vorverstärker besteht aus zwei Stufen mit je 9,5 dB Verstärkung, insgesamt ergibt sich eine Gesamtverstärkung von etwa 18dB.

Als Daten wurden angegeben:

Rauschzahl: 1,35dB bei 144 MHz und 2 dB bei 435 MHz

Ausgangs IP3: +33dBm,

1dB Kompression +18dBm, was einer Ausgangsleistung von 63 mW entspricht.

Offensichtlich fiel dem Autor DJ7VY damals auch die Schwingfreudigkeit der Schaltung auf, insbesondere dann wenn der Verstärker auf ein nachgeschaltetes Filter arbeitet. Er weist im Artikel darauf hin, dass zur Neutralisation einige Picofarad vom Kollektor nach Masse notwendig waren. Diese Schwingneigung auf hohen Frequenzen wird häufig beim Norton-Verstärker beobachtet. Es empfiehlt sich, in die Kollektorleitung eine Ferritperle zur Absenkung der Verstärkung hin zu hohen Frequenzen einzufügen. Alternativ oder ergänzend kann auch, wie z.B. in Bild 5, ein Widerstand und ein Kondensator in Serie zwischen Kollektor und Emitter für Beruhigung sorgen.

### Norton Verstärker für eine koaxial abgeschirmte Aktiv-Loop Antenne

Wegen seiner Rauscharmut und hohen Aussteuerbarkeit eignet sich ein Norton Verstärker als Verstärkerkomponente für eine koaxial abgeschirmte „Small Active Loop“ Antenne, mit ihren kleinen Empfangsspannungen. Bild 7 zeigt den einen zweistufigen Norton Verstärker mit etwa 24dB Verstärkung als rauscharmer Verstärker für eine geschirmte Breitband Aktiv-Loop-Antenne. In den Verstärkerstufen wurden BFQ19S verwendet, die SMD Variante des altbewährten BFR96S.

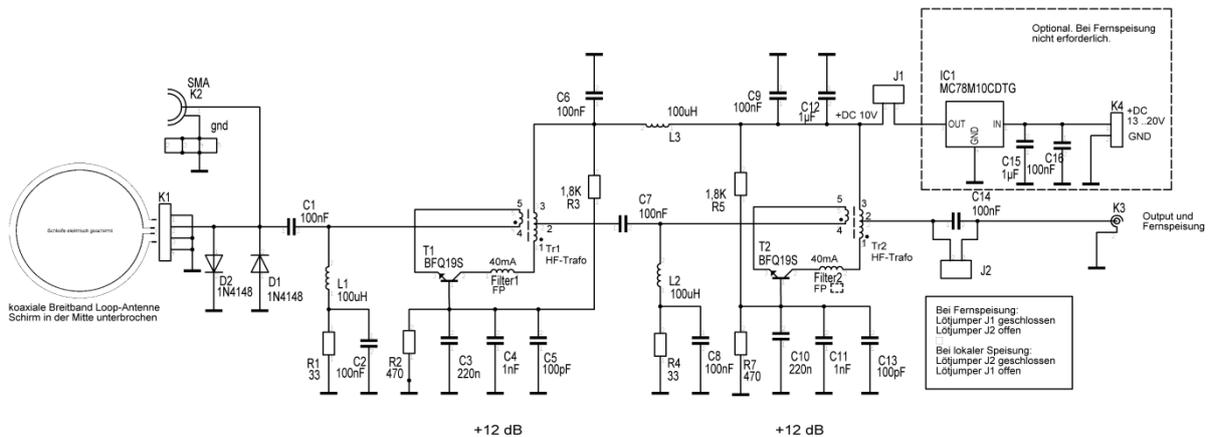
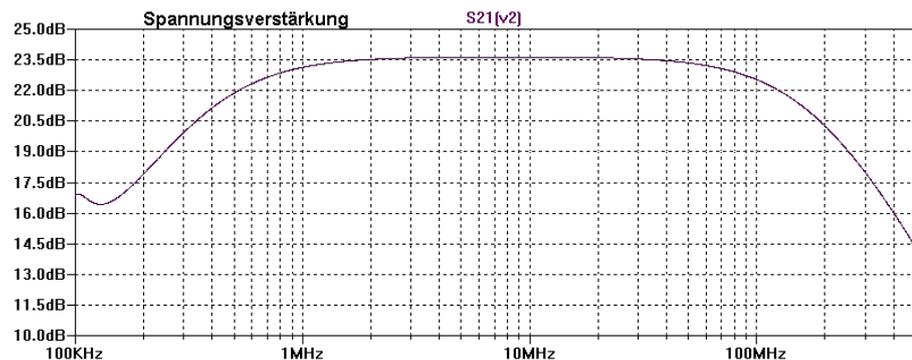


Bild 7: koaxiale Breitband Aktivloop Antenne mit zweistufigem Norton Verstärker

Direkt am Transistor ist jeweils eine Ferritperle bzw. eine SMD Ferritdrossel direkt am Kollektor eingefügt. Bei steilen Transistoren mit hoher Transitfrequenz ist dies eine Maßnahme, um parasitäre Schwingungen zu unterdrücken. Es gilt in diesem Zusammenhang zu bedenken, dass die Eingangsbandfilter eines nachgeschalteten Empfängers außerhalb ihrer Durchlassbandbreite eine Totalreflexion verursachen. Transformiert durch die Länge des Koaxialkabels zur Verbindung von Verstärker und dem RX „sieht“ der Ausgang des Norton-Verstärkers dadurch extreme Reaktanzen, was zu Instabilitäten führen kann. Auf einen HF-gerechten Aufbau und gute Masseführung ist zu achten. Mit einem Doppellochkern Amidon BN43-2402 für den Gegenkopplungstransformator ergibt sich ein flacher Frequenzgang über fast zwei Dekaden (Bild 8).

Bild 8 rechts  
Simulation des  
Frequenzgangs der  
Verstärkung (S21)



## Gegentakt Norton Verstärker

Nach einem Vorschlag von Dr. Dallas Lankford [3] entstand der Push-Pull Norton Verstärker Kit Z10043 von Clifton Laboratories [6]. Die Verstärkung beträgt nominell 11dB bei einem flachen Frequenzbereich der von 100kHz bis 30 MHz reicht. Die 3dB Frequenzgrenzen liegen bei 45kHz respektive bei 55 MHz. Clifton Labs gibt als OIP3 Werte von >45dBm an. (OIP3 = Auf den Ausgang bezogener Interzeptpunkt 3. Ordnung).

Durch das Gegentaktprinzip, bei dem sich ja die Intermodulationsprodukte geradzahlgiger Ordnung aufheben, ergibt sich ein OIP2 Wert von >85dB. Der 1 dB Kompressionspunkt wird bei +19dBm am Eingang erreicht. Die Rauschzahl wird als besser 2,5dB angegeben.

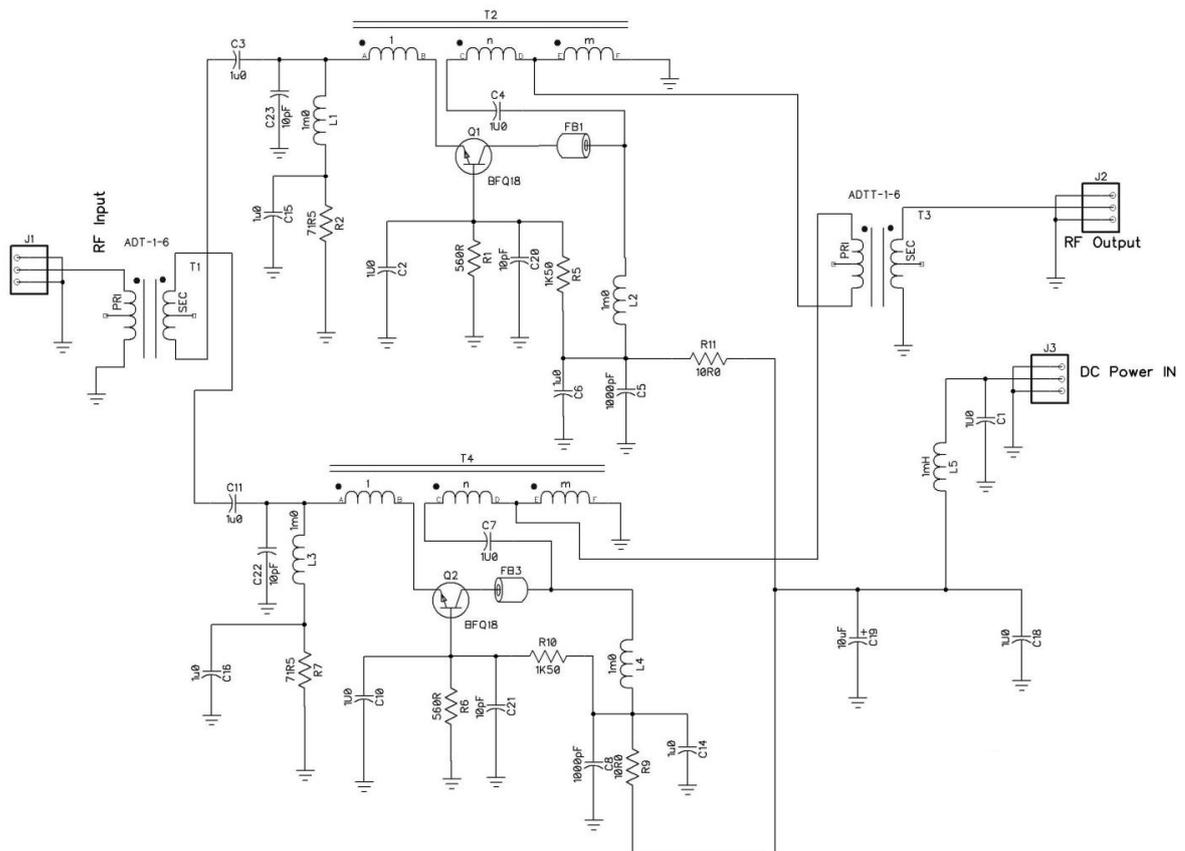


Bild 9: Gegentakt Norton Verstärker (Clifton Laboratories Z10043)

Die Schaltung zeigt zwei typische Norton Verstärkerstufen. Ein Eingangstransformator speist jeden Verstärker mit jeweils um 180° phasenverschobenen Signalen. Die in den Norton Stufen verstärkten Signale werden dann in einem Gegentakt-Ausgangsübertrager wieder zusammengefügt. Die Transistoren sollen auf gleiche Gleichstromverstärkung selektiert sein. Für eine gute Symmetrie sollen die Widerstände eine Toleranz von 2% oder besser aufweisen.

## 2m Vorverstärker

Bernhard Kaehs, DL6MFI hat einen 12dB Vorverstärker für das 2m-Band mit Sendempfangsumschaltung mit einer Norton Verstärkerstufe realisiert [7]. Zur Unterdrückung von Out-of-Band Signalen, die Intermodulationsprodukte verursachen können, wie z.B. benachbarte Funkdienste oder FM-Rundfunksender ist vor den Norton Verstärker zur Vorselektion ein

Bandpassfilter mit hoher Güte im geschirmten Weißblechgehäuse vorgeschaltet. DL6MFI hat die Dokumentation über dieses Projekt mit ausführlichen Illustrationen und Messwerten im Web als pdf zum Download bereitgestellt [7].

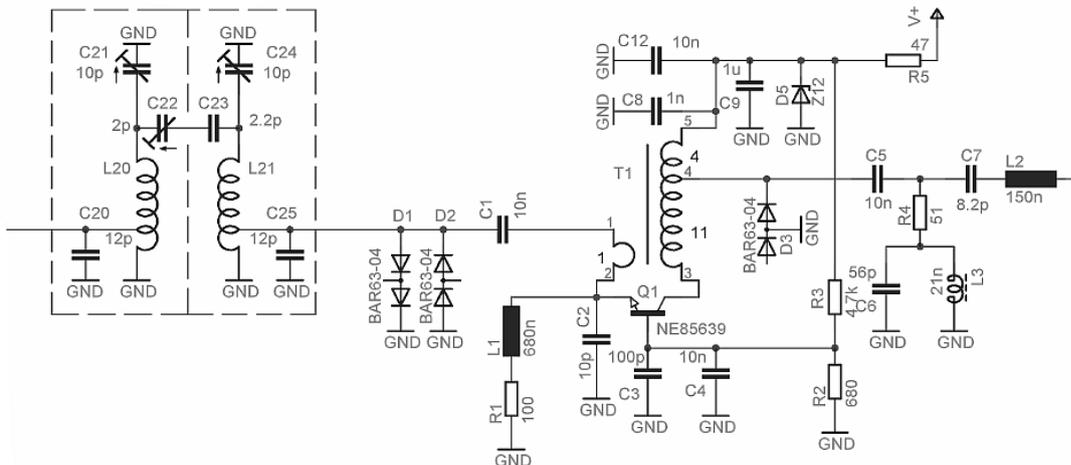


Bild 10: 2m Vorverstärker von Bernhard Kaehs, DL6MFI

### Zweistufiger 45 MHz ZF-Verstärker mit aktiver Ruhestromeinstellung

Chris Hirth, OE3HBW hat bei seinen Arbeiten an seinem General Coverage Receiver Projekt einen zweistufigen Norton Verstärker für die ZF untersucht [8]. Bemerkenswert die aktive Konstantstrom Vorspannungserzeugung mit PNP Transistor und LED als 1,65V Spannungs-Referenz. Über den 27Ω Emitterwiderstand des PNP Regeltransistors fällt eine Spannung ab, die vom Ruhestrom durch den HF-Transistor bestimmt wird. Der Transistor vergleicht den Spannungsabfall mit der LED Referenzspannung und stellt den Strom in die Basis der HF-Transistoren so, dass daraus ein konstanter Ruhestrom des HF Verstärkertransistors resultiert.

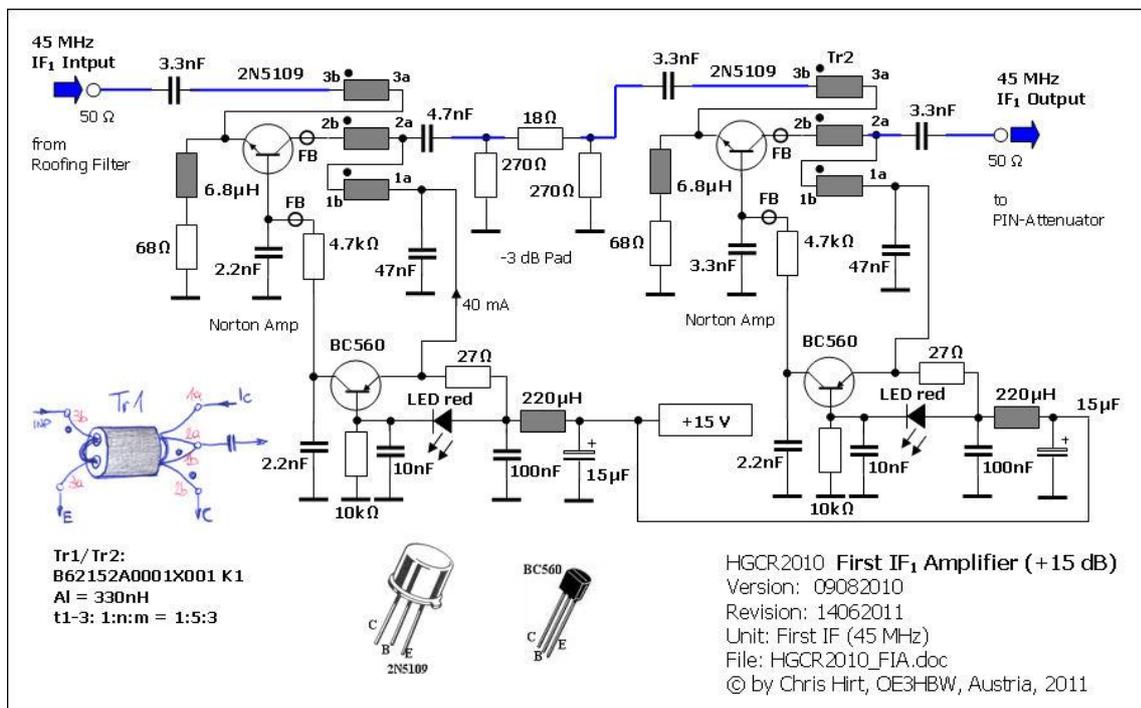


Bild 11: 45 MHz ZF-Verstärker mit aktiver Ruhestromregelung von Chris Hirt, OE3HBW

## Quellen und Referenzen

- [1] David Norton, "High Dynamic Range Transistor Amplifiers Using Lossless Feedback," Proceedings of the IEEE International Symposium 1975
- [2] Michael Martin, DJ7VY, "Neuartiger Vorverstärker für 145MHz- und 435MHz-Empfänger" UKW-Berichte 4/1977
- [3] Dallas Lankford "Common Base Transformer Feedback Norton Amplifiers", 8 June 1994,
- [4] Chris Trask, "Lossless Feedback Amplifiers: Theory and Advanced Techniques"
- [5] Chris Trask, „Transformer Feedback Amplifiers: Variations on a Theme“
- [6] Cliftonlaboratories, Norton Amplifier Z10043 Manual,  
<http://www.cliftonlaboratories.com/Documents/Z10043%20Manual.pdf>
- [7] Bernhard Kaehs, DL6MFI, „2m -Vorverstärker mit S/E-Umschaltung“  
[http://www.darc.de/uploads/media/2m\\_vv.pdf](http://www.darc.de/uploads/media/2m_vv.pdf)
- [8] Chris Hirt, OE3HBW. Web Dokumentation „General Coverage Receiver (5 kHz - 30 MHz)“  
<http://www.qth.at/oe3hbw/Projects/HGCR2010/HGCR2010.htm>
- [9] Ulrich Rohde:"Communications receivers for the year 2000", Ham Radio Magazine 12/1981
- [10] Günter Fred Mandel, DL4ZAO, "Der Kubik-Amp, ein rauscharmer Verstärker mit hoher Linearität"  
[http://www.dl4zao.de/\\_downloads/KubikAmp.pdf](http://www.dl4zao.de/_downloads/KubikAmp.pdf)