

HF/NF-Tastkopf mit Arduino Uno

Reinhard Noll, DF1RN

Im Ortsverband Aachen des DARC, G01, haben wir begonnen, uns mit dem Arduino Uno zu befassen. Das Arduino Uno Microcontroller-Board mit einem ATmega328 Chip von Atmel wird von verschiedenen Elektronik-Versandhändlern angeboten, z.B. von [1]. Einen ersten Einstieg gibt das Büchlein von Massimo Banzi, "Arduino für Einsteiger", das wir uns besorgt hatten [2]. OM Ludwig, DG2KHL, hat fast alle darin beschriebenen Beispiele ausprobiert und ab und an auf unseren Treffen an der Clubstation von G01 vorgeführt.

Auf der Ideensuche nach eigenen Projekten, ist mir der HF/NF-Tastkopf der QRP AG eingefallen [3], siehe Bild 1 und 2. Statt ein Digitalvoltmeter an den HF/NF-Tastkopf anzuschließen und aus dem Messwert über die Kennlinien in [3] auf die Spitze-Spitze-Spannung am Eingang des Tastkopfs - der Tastspitze - zu schließen, ist die Idee, die A/D-Eingänge des Arduino zu nutzen und die Kennlinien in die Software "einzubauen". Dabei gibt es für HF- und NF-Signale verschiedene Kennlinien, die wiederum in zwei Messbereiche (unterer und oberer Messbereich) unterteilt sind [3]. Die Spitze-Spitze-Spannung soll dann über ein LCD-Display angezeigt werden.

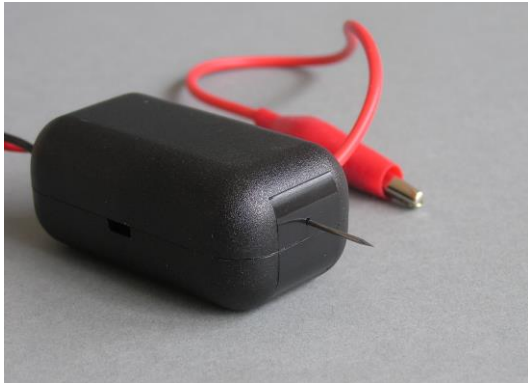


Bild 1: HF/NF-Tastkopf der QRP AG. Mit der Krokodilklemme wird der Masseanschluss hergestellt

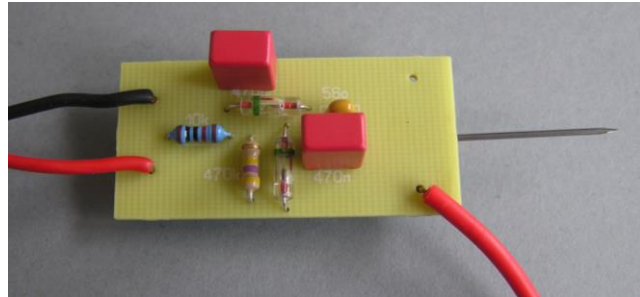


Bild 2: Das Innenleben des HF/NF-Tastkopfs. Mit den beiden nach links weggehenden Leitungen (rt, sw) wird die gleichgerichtete Spannung zu einem Digitalvoltmeter oder zu einer Verstärkerschaltung geführt

Die Ausgangspegel des HF/NF-Tastkopfs sind zunächst an die A/D-Eingänge des Arduino anzupassen, die den Pegelbereich von 0 - 5 V erfassen können. Bild 3 zeigt die Schaltung mit Operationsverstärkern. Der Tastkopf richtet das HF- oder NF-Signal mit einer Greinacher-Schaltung zur Spannungsverdopplung gleich. Am Ausgang des Tastkopfs sind zwei Anschlussleitungen mit Bananensteckern vorhanden, die üblicherweise zu einem Digitalvoltmeter geführt werden, um die Ausgangsspannung zu messen (rote und schwarze Leitung, siehe Bild 2 und rt, sw in Bild 3). Die Verstärkerschaltung ist am Ausgang mit den drei A/D-Eingängen des Arduino A0, A1 und A2 verbunden. Der Eingang und die Ausgänge der Schaltung sind jeweils mit 5,1 V Zenerdioden geschützt, damit die A/D-Eingänge des Microcontroller-Boards bei zu hohen gleichgerichteten Spannungen des Tastkopfs keinen Schaden nehmen.

Liegt am Ausgang A2 ein Pegel von $\leq 0,3$ V vor, so wird in der Software des Arduino der untere Messbereich (abgekürzt: uM) gewählt und das Signal am Ausgang A1 ausgewertet. An A1 liegt das durch den Operationsverstärker OP1 um den Faktor 16 verstärkte Signal an: $V_{OP1} = 1 + R_5/R_6 = 16$, also maximal die Gleichspannung $u_{A1} = 16 \cdot u_{ein} = 4,8$ V. Diese liegt unter der Erfassungsgrenze von 5 V des A/D-Wandlers und noch hinreichend deutlich unter der Zenerspannung von 5,1 V.

Ist die Spannung an A2 größer als 0,3 V, so wählt das Programm zur Auswertung das Signal an A0, das durch OP2 um den Faktor zwei verstärkt wurde: $V_{OP2} = 1 + R_3/R_4 = 2$. Danach dürfte die Eingangsspannung an OP2 maximal 2,5 V betragen, damit der Erfassungsbereich des A/D-Wandlers von 5 V nicht überschritten wird. Um einen sicheren Abstand von dieser Grenze

einzuhalten, wird per Software ab Spitze-Spitze-Spannungen an der Tastkopfspitze von $u_{ss} = 2,23 \text{ V}$ angezeigt, dass das Eingangssignal zu hoch ist.

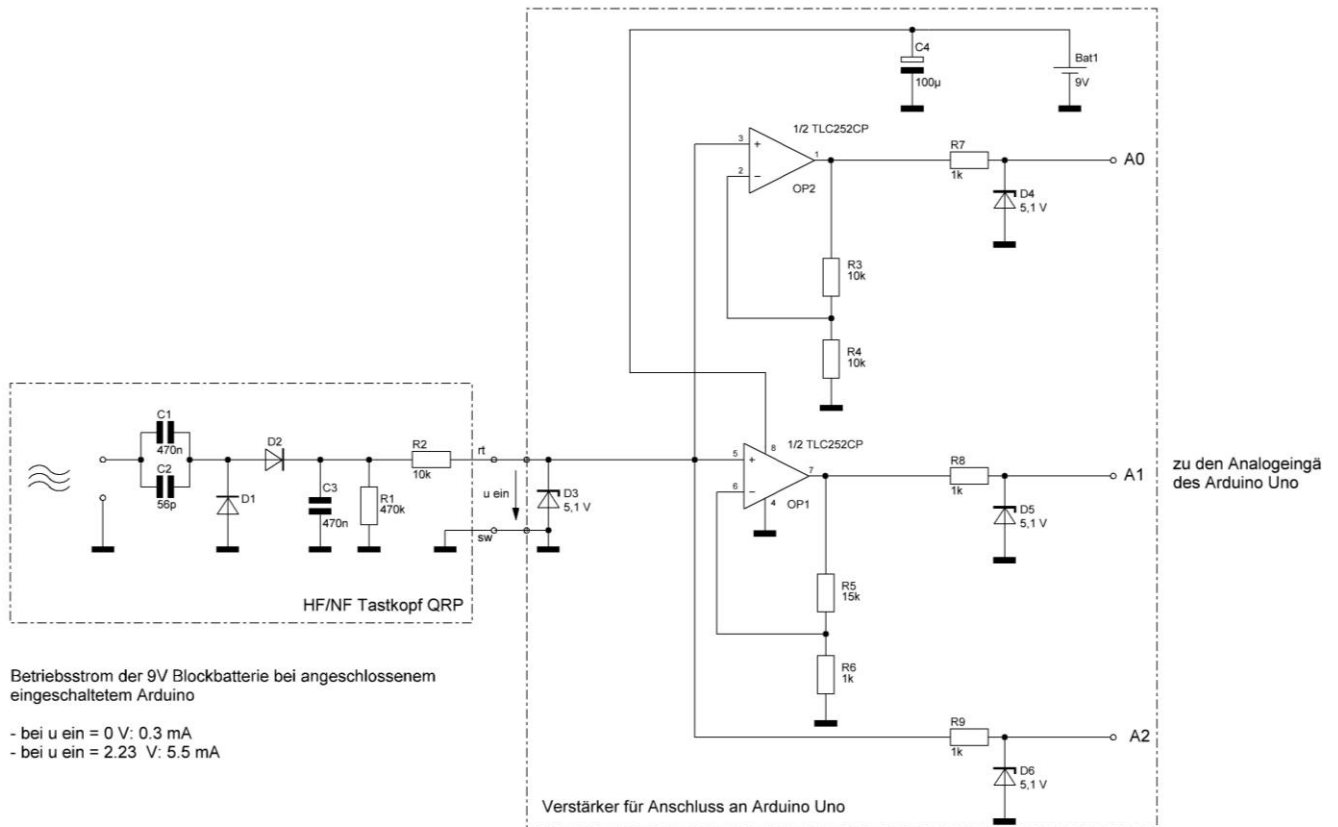


Bild 3: HF/NF-Tastkopf der QRP AG und Verstärkerschaltung zur Anpassung der Pegel an die A/D-Eingänge des Arduino Uno

Operationsverstärker OP1 läuft für Pegel von u_{ein} am Eingang der Verstärkerschaltung (siehe Bild 3) in dieser Größe schon längst in Sättigung. Der Stromverbrauch der Verstärkerschaltung steigt daher an, erreicht jedoch bei $u_{ein} \approx 3 \text{ V}$ maximal ca. 5,5 mA.

Bild 4 zeigt die Beschaltung des Arduino Uno Boards. Das angeschlossene LCD-Display hat zwei Zeilen und verfügt über eine LED-Hintergrundbeleuchtung [4]. Mit dem Potentiometer P1 kann der Kontrast der LCD-Anzeige eingestellt werden.

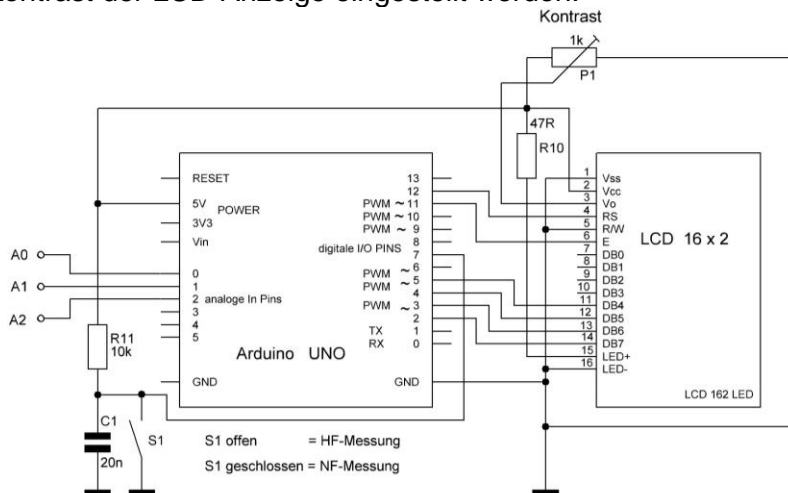


Bild 4: Arduino Uno Board mit angeschlossenen zweizeiligen LCD-Display. Die Eingänge der A/D-Wandler A0, A1 und A2 werden mit der Verstärkerschaltung von Bild 3 verbunden. Der Schalter S1 ist an den digitalen Eingangspin 7 angeschlossen und dient zur Wahl des Messmodus des Tastkopfs für HF oder NF

Auf die mit der Dokumentation zum Bausatz für den HF/NF-Tastkopf mitgelieferten Kalibrierkurven wollte ich mich nicht alleine stützen [3]. Bild 5 zeigt den hier gewählten Aufbau für die Kalibrierung. Vom Sinusgenerator DDS 20 G führt ein 40 cm langes RG 58 Koaxialkabel auf den Eingang des Tektronix Oszilloskops DPO 2014 mit einem Eingangswiderstand von 1 MΩ. Über ein BNC-T-Stück greift der Tastkopf mit seiner Spitze (vgl. Bild 1) die Spannung ab. Die tatsächliche Spitze-Spitze-Spannung des Sinussignals u_{ss} wird am Oszilloskop abgelesen. Das am Tastkopf angeschlossene Digitalvoltmeter PeakTech 3315 zeigt die Ausgangsgleichspannung des Tastkopfs u_{DVM} .

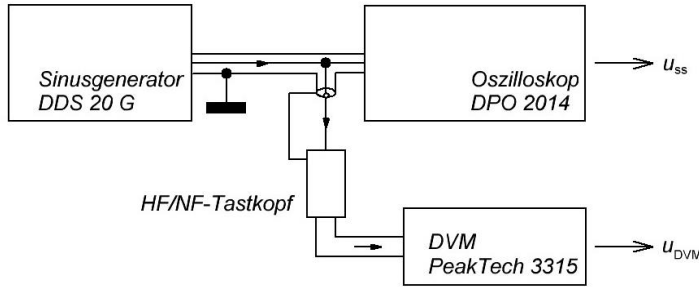


Bild 5: Kalibrierung des Tastkopfs zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen u_{ss} und u_{DVM}

Die ermittelten Datenpaare sind für den unteren Messbereich, $0 < u_{DVM} \leq 0,3 \text{ V}$, (auch mit "uM" abgekürzt, Datenpunkte: Kreise) und den oberen Messbereich ("oM", Datenpunkte: Dreiecke) in Bild 6 für eine Messung bei 8 MHz dargestellt. Die Daten können durch Fitfunktionen angenähert werden:

$$u_{ss} = f_i^{\text{HF}}(u_{DVM}), \quad (1)$$

wobei der Index i für uM oder oM steht, und der Index HF die Näherungsfunktion für die HF-Messung bei 8 MHz bezeichnet. Die Näherungsfunktionen werden mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Für den unteren Messbereich wird ein Polynom vierten Grades und für den oberen Messbereich ein Polynom zweiten Grades gewählt. Die numerische Lösung ergibt:

$$\begin{aligned} u_{ss} &= f_{\text{uM}}^{\text{HF}}(u_{DVM}) = 0,02173 + 2,9317 \cdot u_{DVM} - 14,87012 \cdot u_{DVM}^2 + 54,55325 \cdot u_{DVM}^3 - 69,9154 \cdot u_{DVM}^4, \\ u_{ss} &= f_{\text{oM}}^{\text{HF}}(u_{DVM}) = 0,12732 + 1,6729 \cdot u_{DVM} - 0,01438 \cdot u_{DVM}^2, \end{aligned} \quad (2)$$

wobei u_{DVM} in Volt einzusetzen ist. Die Näherungsfunktionen (2) sind in Bild 6 für den unteren Messbereich in rot und für den oberen in blau eingezeichnet. Wie zu erkennen ist, werden die experimentell bestimmten Datenpaare durch diese Funktionen sehr gut angenähert. Das Bestimmtheitsmaß R^2 erreicht für beide Funktionen Werte größer als 0,999.

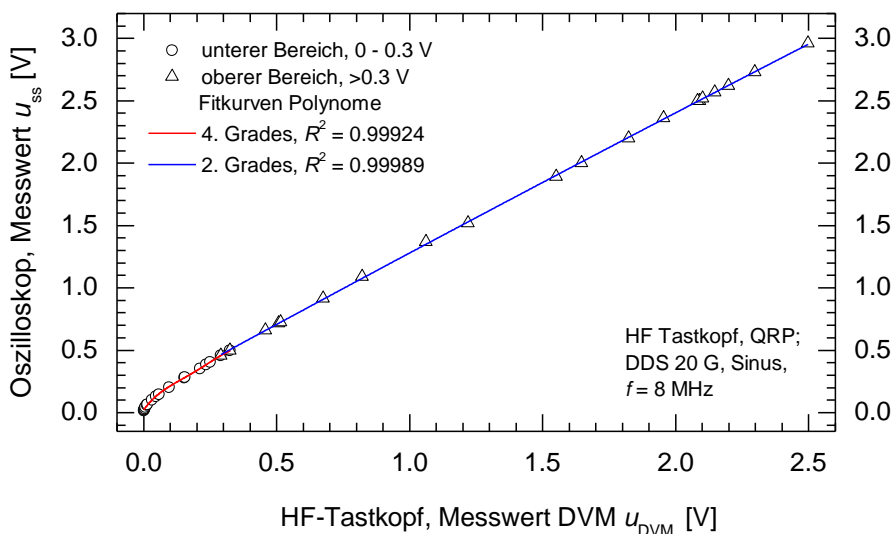


Bild 6: Kalibrierung des HF/NF-Tastkopfs für ein Sinus-Signal mit 8 MHz. Kreise, Dreiecke = Datenpunkte, rote und blaue Kurve = Fitfunktionen zur Beschreibung des unteren und oberen Messbereichs, siehe (2)

Mit den Messwerten für u_{ss} und u_{DVM} kann der Spannungsabfall an den Gleichrichterdioden im HF/NF-Tastkopf abgeschätzt werden. Für die Ausgangsspannung des Tastkopfs gilt näherungsweise:

$$u_{DVM} = 2 \cdot \frac{u_{ss}}{2} - 2 \cdot u_d, \quad (3)$$

wobei u_d den Spannungsabfall an einer Diode des Tastkopfs beschreibt. Der Faktor zwei an jedem der beiden Terme auf der rechten Seite von (3) berücksichtigt die Spannungsverdopplerschaltung der Tastkopfs. Die Beziehung (3) wird nach u_d aufgelöst:

$$u_d = \frac{1}{2}(u_{ss} - u_{DVM}). \quad (4)$$

Mit den Messdaten von Bild 6 folgt für u_d ein Bereich von 10 mV bis 210 mV.

In analoger Weise wird der Tastkopf für NF bei einer Frequenz von 1 kHz kalibriert. Für die Näherungsfunktionen im unteren und oberen Messbereich resultiert:

$$\begin{aligned} u_{ss} &= f_{uM}^{NF}(u_{DVM}) = 0,00844 + 2,80221 \cdot u_{DVM} - 12,60763 \cdot u_{DVM}^2 + 41,55911 \cdot u_{DVM}^3 - 48,36415 \cdot u_{DVM}^4, \\ u_{ss} &= f_{oM}^{NF}(u_{DVM}) = 0,09192 + 1,18577 \cdot u_{DVM} - 0,04652 \cdot u_{DVM}^2, \end{aligned} \quad (5)$$

wobei u_{DVM} wieder in Volt einzusetzen ist. Bild 7 zeigt die aufgenommenen Daten und die beiden Näherungsfunktionen für den unteren und oberen Messbereich, wieder in rot und blau dargestellt.

Mit den Funktionen (2) und (5) kann nun per Software auf dem Arduino aus einem gemessenen Wert der Ausgangsspannung des Tastkopfs die Spitze-Spitze-Spannung u_{ss} an der Tastspitze berechnet werden.

Den Ablaufplan der Software zeigt Bild 8. Zunächst wird die Stellung des Schalters S1 abgefragt, um zu entscheiden, ob eine NF- oder eine HF-Messung durchgeführt werden soll. Das Programm verzweigt in den entsprechenden Pfad und liest zuerst den Pegel an A2 ein. Anhand dieses Pegels wird entschieden, ob der untere oder der obere Messbereich vorliegt. In nächsten Schritt wird der zugehörige OP-Ausgang - also entweder A0 oder A1 - ausgelesen und mit den Funktionen f_{uM}^{HF}, f_{oM}^{HF} im Falle der HF-Messung, vgl. (2), oder f_{uM}^{NF}, f_{oM}^{NF} für die NF-Messung, vgl. (5), wird die Spannung u_{ss} an der Tastkopfspitze berechnet. Ist $u_{ss} > 2,23$ V, wird auf dem Display für 3 s "Eingangssignal zu hoch" angezeigt. Schließlich wird das Ergebnis u_{ss} in V sowie der zugehörige Messmodus - NF oder HF - und der gewählte Messbereich - uM oder oM - auf dem LCD-Display

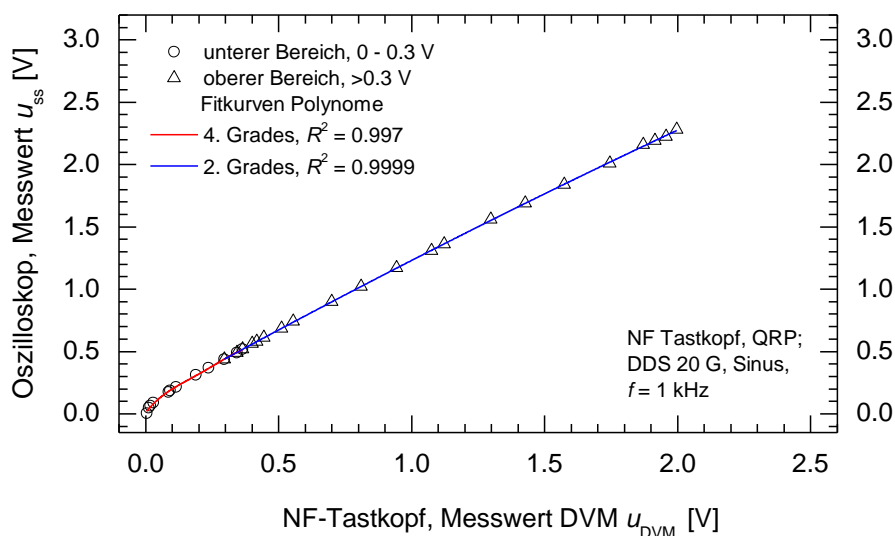


Bild 7: Kalibrierung des HF/NF-Tastkopfs für ein Sinus-Signal mit 1 kHz. Kreise, Dreiecke = Datenpunkte, rote und blaue Kurve = Fitfunktionen zur Beschreibung des unteren und oberen Messbereichs, siehe (5)

angezeigt. Bei der HF-Messung wird zusätzlich aus der ermittelten Spitze-Spitze-Spannung u_{ss} die zugehörige Leistung an 50Ω in dBm angegeben. Dies ermöglicht der Befehlsumfang der für den Arduino eingesetzten Programmiersprache *Processing* (eine C ähnliche Sprache), da zu diesem auch die Logarithmusfunktion gehört.

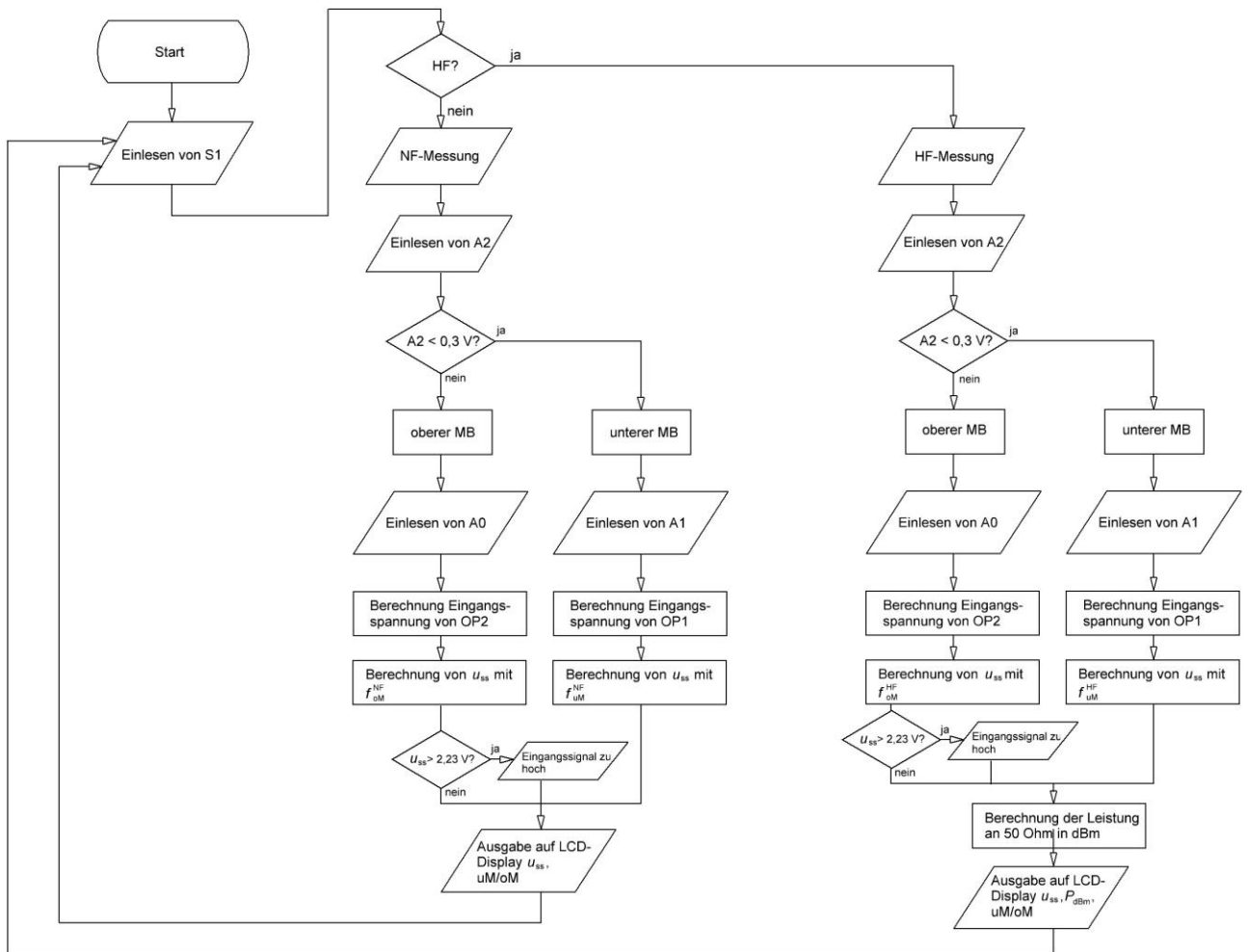


Bild 8: Programmablaufplan der Software für den Arduino Uno. MB Messbereich, uM unterer Messbereich, oM oberer Messbereich

Die Verstärkerschaltung wird auf einer kleinen Lochrasterplatine aufgebaut. Für den Entwurf dieser Platine habe ich wieder das Programm Loch Master eingesetzt [5]. Dabei werden die Komponenten R10 und P1 aus Bild 4 mit eingeplant. Bild 9 zeigt die geplante Anordnung der Bauteile. Die Anschlüsse zum Arduino Uno, dem LCD-Display sowie dem Tastkopf sind als Lötstifte ausgeführt, so dass steckbare Verbindungsleitungen zu den anderen Komponenten verwendet werden können. Bild 10 zeigt den realisierten Aufbau. Die Abmessungen der Platine betragen $40 \times 40 \text{ mm}^2$.

Jetzt kann alles in Betrieb genommen werden. Der Tastkopf wird an die Verstärkerplatine angeschlossen und diese wird dem Arduino Uno Board verbunden. Bild 11 zeigt eine Ansicht des Arduino Uno Boards.

In Bild 12 ist die LCD-Anzeige bei einer Messung im Betriebsmodus NF zu sehen. In der ersten Zeile wird die ermittelte Spitze-Spitze-Spannung " $U_{ss} = 0.28 \text{ V}$ " angezeigt und der Betriebsmodus "NF". Die zweite Zeile gibt an, dass im unteren Messbereich gemessen wird.

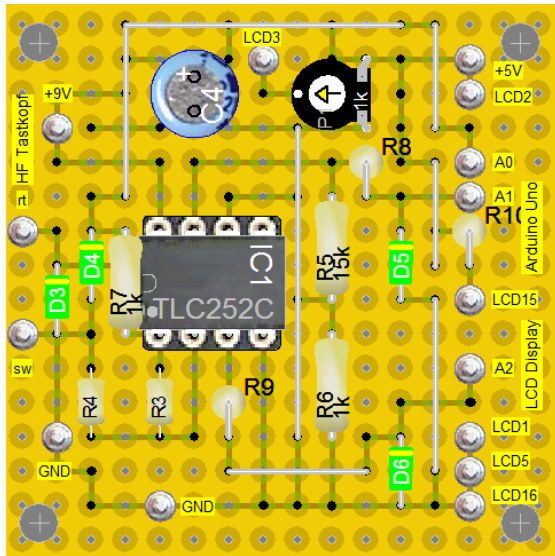


Bild 9: Planung der Verstärkerschaltung auf einer Lochrasterplatine

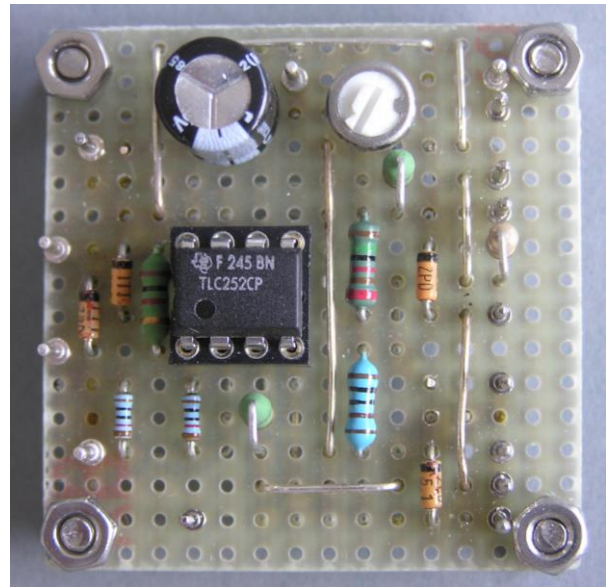


Bild 10: Fertig bestückte Platine der Verstärkerschaltung

Bild 13 zeigt ein Beispiel für eine Anzeige bei der HF-Messung mit der Spitze-Spitze-Spannung und der Leistung an 50Ω in dBm.

Nachdem alles aufgebaut ist und funktioniert, wollen wir schließlich noch die Richtigkeit unseres HF/NF-Tastkopfs mit angeschlossenem Arduino prüfen. Wir beziehen uns dabei auf die Messung der Spitze-Spitze-Spannung mit dem Oszilloskop DPO 2014 und vergleichen diese mit der Anzeige auf dem LCD-Display unserer Schaltung. Im Idealfall sollten diese Werte übereinstimmen. Bild 14 zeigt das Ergebnis der Prüfmessungen für den HF-Betrieb bei einem Sinussignal von 8 MHz. Aufgetragen ist die Spitze-Spitze-Spannung, die auf dem LCD-Display angezeigt wird, als Funktion der Spitze-Spitze-Spannung, die mit dem Oszilloskop an der Tastspitze gemessen wird. Im Idealfall sollte die Steigung der Ausgleichsgeraden eins betragen. Der ermittelte Wert der Steigung der Regressionsgeraden kommt dem sehr nahe, er liegt bei 0.9991. Auch das Bestimmtheitsmaß erreicht fast den Maximalwert: 0.9998.



Bild 11: Das Arduino Uno Board mit dem Atmega 328P Prozessor. Links oben befindet sich ein Taster zum Reset. Die Buchse links oben dient zum Anschluss des USB-Verbindungskabels zum PC. Links unten: Buchse für die Versorgung mit Gleichspannung über ein Steckernetzteil



Bild 12: Anzeige auf dem LCD-Display bei einer NF-Messung



Bild 13: Anzeige auf dem LCD-Display bei einer HF-Messung. Neben der Spitze-Spitze-Spannung in der ersten Zeile wird in der zweiten Zeile die Leistung an 50Ω in dBm angegeben

Zusätzliche Datenpunkte bei anderen Signalfrequenzen - und zwar 1 MHz und 18 MHz - zeigt Bild 15. Auch diese liegen nah an der Ausgleichsgeraden, ihre Abweichung ist tendenziell etwas höher als für die Datenpunkte des 8 MHz Signals.

In analoger Weise habe ich die Richtigkeit der NF-Messung geprüft. Hier sind die Abweichungen etwas größer, sie liegen für u_{ss} -Werte zwischen 0,11 V und 2,23 V bei $< 2 \%$.

In Anhang 1 sind die technischen Daten des HF/NF-Tastkopfs mit Verstärkerschaltung und Arduino Uno zusammengefasst.

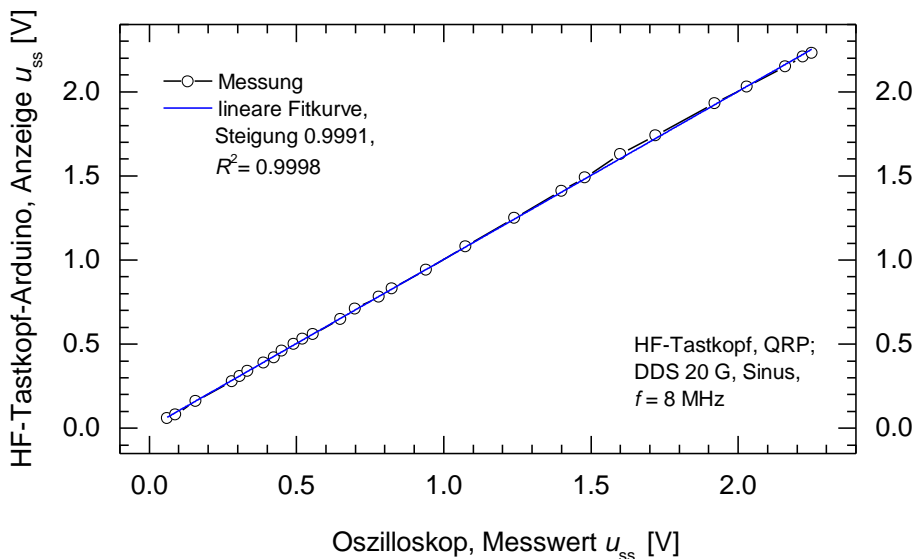


Bild 14: Anzeige der Spitze-Spitze-Spannung auf dem LCD-Display als Funktion der Spitze-Spitze Spannung an der Tastkopfspitze. Offene Kreise = Messpunkte für ein Sinussignal mit 8 MHz, blaue Kurve = Ausgleichsgerade

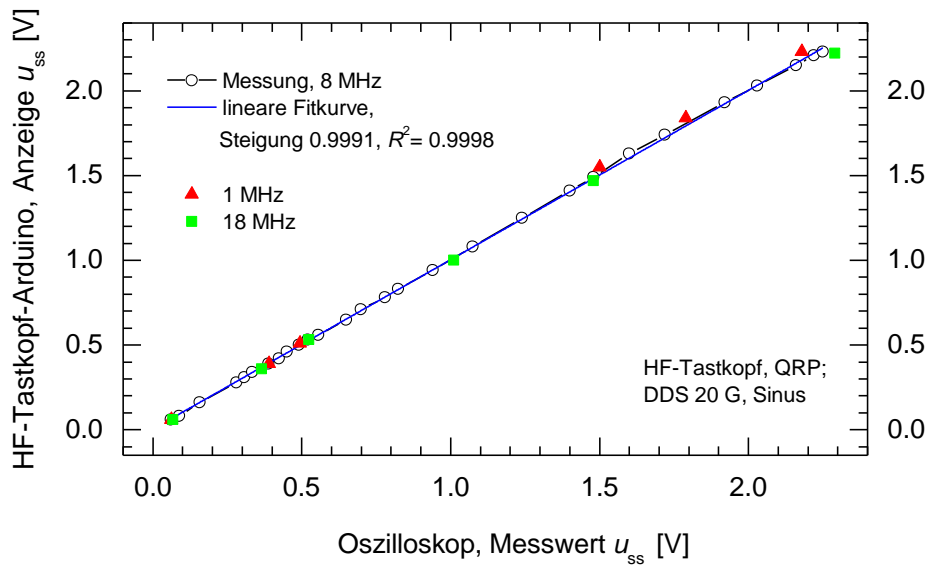


Bild 15: Anzeige der Spitze-Spitze-Spannung auf dem LCD-Display als Funktion der Spitze-Spitze Spannung an der Tastkopfspitze. Offene Kreise = Messpunkte für ein Sinussignal mit 8 MHz (gleiche Daten wie Bild 14), rote Dreiecke = Messpunkte bei 1 MHz, grüne Quadrate = Messpunkte bei 18 MHz

14.5.2017, Reinhard, DF1RN

Anhang 1

Technische Daten des HF/NF-Tastkopfs mit Arduino Uno und LCD-Display

Kenngroße	Daten	Bemerkungen
Messbereich	HF/NF, umschaltbar	
Messbereich NF		
u_{ss}	0,06 V - 2,23 V	Kalibrierfrequenz 1 kHz, vgl. Bild 7
Messunsicherheit NF	< 2 % für u_{ss} von 0,11 V bis 2,23 V	bei 1 kHz
Messbereich HF		
u_{ss}	0,06 V - 2,23 V	Kalibrierfrequenz 8 MHz, vgl. Bild 6
$P_{50\Omega}$	-20 dBm - 11 dBm	
Messunsicherheit HF	$\leq 0,5$ % für u_{ss} von 0,06 V bis 2,23 V	bei 8 MHz
Verstärkerschaltung	OP, x2, x 16	Bild 3
Stromversorgung des Verstärkers	Blockbatterie, 9 V,	
Stromverbrauch	$\leq 5,5$ mA	
Abmessungen Verstärkerplatine	40 x 40 mm ²	Bilder 9, 10
Arduino Uno	ATMega328 Chip	Bild 11
Stromversorgung	Steckernetzteil, 9 V	
Abmessungen Arduino Uno	53 x 70 mm ²	Bild 11
LCD-Display	zweizeilig, 16 x 2	Bilder 12, 13
Abmessungen Display	75 x 15 mm ²	

Literatur

- [1] Reichelt GmbH, www.reichelt.de/Programmer-Entwicklungstools/ARDUINO-UNO. Preis 23,95 € (25.5.2015)
- [2] Massimo Banzi, Arduino für Einsteiger, O'Reilly, 2012, ISBN 978-3-86899-232-8, 122 S.
- [3] HF/NF-Tastkopf, DL-QRP-AG, QRPproject, Motzener Str. 36-38, 12277 Berlin, www.qrpproject.de/Media/pdf/TastkopfManual.pdf. Bausatzpreis: 23,- € (25.5.2015)
- [4] Reichelt GmbH, Punktmatrix-LCD-Modul mit LED-Hintergrundbeleuchtung, 16 x 2, Artikel-Nr. LCD 162C LED. Preis 6,50 € (15.5.2015)
- [5] Loch Master, Version 3.0, ABACOM Ingenieurgesellschaft, www.abacom-online.de