

# Das pulsgetriebene AC-Josephson-Spannungsnormal

Oliver Kieler\*

Josephson-Spannungsnormale für Gleichspannungsanwendungen sind in der elektrischen Präzisionsmesstechnik fest etabliert. Der zunehmende Bedarf nach Referenzsignalen im Audio- und HF-Bereich (HF: Hochfrequenz) sowie von Rauschquellen hat zur Entwicklung von Josephson-Spannungsnormalen für Wechselspannungsanwendungen geführt. In diesem Beitrag werden quantengenaue Wechselspannungsquellen vorgestellt, die die Erzeugung beliebiger Wellenformen mit höchster spektraler Reinheit mit einer hohen Bandbreite von DC bis in den MHz-Bereich ermöglichen (DC: direct current = Gleichstrom). Herzstück all dieser Josephson-Spannungsnormale ist eine Reihenschaltung aus vielen tausend Josephson-Kontakten, die bei Einstrahlung von Hochfrequenzstrahlung (Mikrowellen) die Erzeugung hochgenauer Spannungswerte ermöglichen. Dabei treten in den Strom-Spannungs-Kennlinien Stufen konstanter Spannung, sogenannte Shapiro-Stufen (SS), auf. Anschaulich lassen sich diese Stufen durch den Transfer einer bestimmten Anzahl magnetischer Flussquanten durch die Josephson-Kontakte beschreiben.

## 1 Prinzip

Für AC-Josephson-Spannungsnormale (AC: alternating current = Wechselstrom) werden an der PTB zwei unterschiedliche Funktionsprinzipien genutzt: Beim programmierbaren Josephson-Spannungsnormal (PJVS: programmable Josephson voltage standard) wird die Anzahl der aktiven Josephson-Kontakte in einer Reihenschaltung mit binärer Teilung im Laufe der Zeit geändert, während beim pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormal (JAWS: Josephson arbitrary waveform synthesizer) die Anzahl kurzer Strompulse pro Zeiteinheit verändert wird [1]. Bild 1 stellt diese unterschiedlichen Grundprinzipien gegenüber. Anhand der Josephson-Gleichung erkennt man den prinzipiellen Unterschied von PJVS und JAWS. Die Signalspannung  $U_{AC}(t)$  wird wie folgt berechnet:

$$U_{AC}(t) = M(t) \cdot N \cdot \Phi_0 \cdot f_p(t) \tag{1}$$

\* Dr. Oliver Kieler, Arbeitsgruppe 2.43 „Josephson-Schaltungen“, E-Mail: oliver.kieler@ptb.de

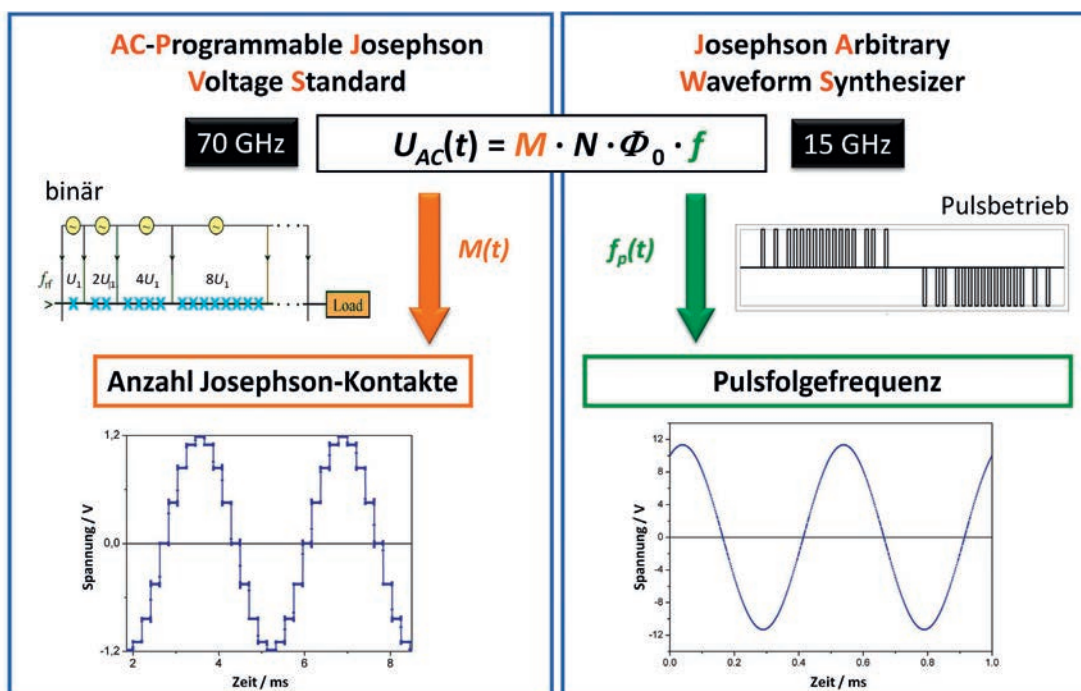


Bild 1: Vergleich des Prinzips von PJVS und JAWS

Hierbei ist  $M(t)$  die Zahl der Josephson-Kontakte (zeitlich veränderlich für das PJVS),  $N$  die Ordnung der SS,  $\Phi_0$  das Flussquant ( $h/2e$  mit dem Planck'schen Wirkungsquantum  $h$  und der Elementarladung  $e$ ) sowie  $f_p(t)$  die Pulsfolgefrequenz (zeitlich veränderlich für das JAWS).

Beim PJVS wird zur Erzeugung einer stufenförmigen approximierten Wechselspannung die Anzahl der aktiven Josephson-Kontakte einer Reihenschaltung variiert. Dazu ist die Josephson-Schaltung in unterschiedlich große Segmente eingeteilt. Die Einteilung erfolgt in einer binären Abfolge (d. h. Segmente mit 1, 2, 4, ... Kontakten) mit 16-bit-Auflösung. Jedes Segment kann mit einer schnellen computergesteuerten Stromquelle gezielt an- bzw. abgeschaltet werden. Dieses Spannungsnormal wird mit einer kontinuierlichen Mikrowelle (CW) bei einer Frequenz von ca. 70 GHz betrieben. Die Schaltungen sind so gestaltet, dass sie in diesem (und nur in diesem) Frequenzbereich eine optimale Ausbildung der Shapiro-Stufen gewährleisten. Nur auf den SS wird eine wohldefinierte Anzahl von Flussquanten transferiert. Bedingt durch das Stufensignal ergeben sich im Frequenzspektrum sehr viele, jedoch wohldefinierte höhere Harmonische. Weiterhin ist die jeweilige Spannung für die Zeitspanne beim Übergang zwischen den SS nicht quantisiert. Die im zeitlichen Mittel gemessene RMS-Spannung (engl. *root mean square*) weist einen Fehler auf. Dieser sogenannte Transientenfehler (Transient = Übergang zwischen den SS) führt zu Einschränkungen beim Betrieb dieses AC-PJVS und begrenzt die Signalfrequenzen auf weniger als 10 kHz, selbst wenn mit Abtastverfahren nur auf den SS gemessen wird. Im Gegensatz dazu wird beim JAWS die Zahl der aktiven Josephson-Kontakte konstant gehalten und stattdessen die Pulsfolgefrequenz variiert. Diese ist aufgrund der verfügbaren Puls-

generatoren (PPG: *Pulse Pattern Generator*) auf ca. 15 GHz beschränkt (Datenrate 30 Gbit/s). Beim JAWS können beliebige und spektral reine Wellenformen höchster Güte in einem Frequenzbereich von DC bis 1 MHz generiert werden. Der entscheidende Vorteil des Pulsbetriebes ist, dass im Gegensatz zum CW-Betrieb breite und stabile SS nicht nur in einem schmalen Frequenzbereich ausgebildet werden, sondern im gesamten Frequenzbereich für beliebige Pulsfolgen. Nur dadurch ist der Pulsbetrieb mit wechselnden Pulsfolgefrequenzen möglich.

In Bild 2 ist das Grundprinzip des JAWS bzgl. der Pulsfolgefrequenz dargestellt. Ist die Pulsfolgefrequenz zeitlich unveränderlich, erhält man in der Pulsamplitude-Spannungs-Kennlinie die gewohnten SS für quantisierte DC-Spannungen. Ist diese Pulsfolgefrequenz eine Funktion der Zeit, ergibt sich laut der Josephson-Gleichung eine Wechselspannung, die aber zu jedem Zeitpunkt exakt quantisiert ist, da es zu jedem Zeitpunkt zu einem definierten Transport von Flußquanten kommt. Dies bedeutet, dass jeder Strompuls jeweils genau eine ganzzahlige Anzahl von Flußquanten pro Josephson-Kontakt transferiert. Dieser einfache, aber fundamentale Ansatz zeichnet das JAWS aus.

Bild 3 zeigt in einem einfachen Schema, wie das JAWS in der Praxis realisiert wird. Ausgangspunkt ist eine Wellenform (hier ein Sinus), die quantisiert werden soll. Mithilfe einer SD-Simulation (*Sigma-Delta*) höherer Ordnung wird diese in ein Bitmuster überführt (SD-Code). Dies ist eine Folge von  $-1 / 0 / +1$ , welches der  $-1$ . SS, der  $0$ . SS und der  $+1$ . SS entspricht. Die ausgefeilte SD-Simulation sorgt dafür, dass die Wellenform im Frequenzraum mit größtmöglicher Qualität digitalisiert wird. Dies bedeutet für das Beispiel der Sinus-Wellenform: Bei einem „perfekten“ Sinus ist im Frequenzspektrum nur die Fundamentale

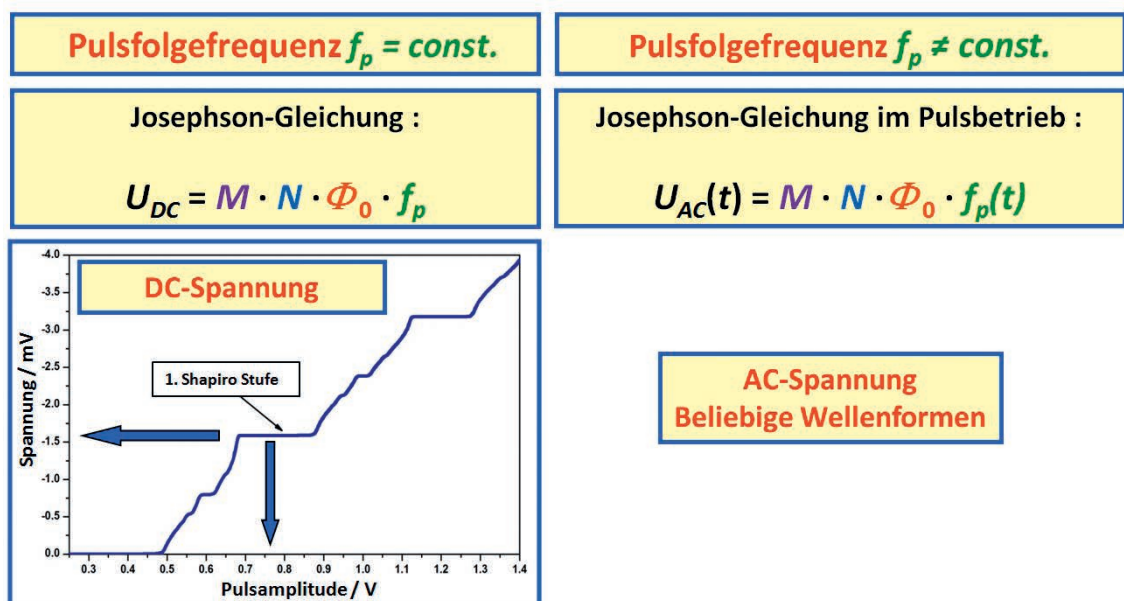


Bild 2: Erläuterung des Pulsbetriebs beim JAWS

vorhanden, welche gleich der Signalfrequenz ist. Die höheren Harmonischen sind vollständig unterdrückt, unterhalb des Rauschuntergrundes. Desweiteren sorgt die SD-Simulation dafür, dass das unvermeidliche Quantisierungsrauschen im Frequenzband deutlich vom Signal getrennt und zu hohen Frequenzen (beginnend ab ca. 10 MHz) verschoben wird. Das so erzeugte Bitmuster wird nun in den Speicher eines PPG übertragen. Dieser PPG liefert an seinem Ausgang sehr kurze Strompulse, die auf die Josephson-Schaltung mittels geeigneter HF-Leitungen übertragen werden. In der Schaltung wird von jedem Kontakt jeder einzelne Strompuls in einen Flussquantenpuls umgewandelt. Im zeitlichen Mittel kann nun am Schaltungsausgang die quantisierte Wellenform gemessen werden. Hierzu kommt ein leistungsfähiger schneller Analog-Digital-Wandler zum Einsatz. Er ermöglicht die hochwertige Analyse der Wellenformen im Frequenz- und Zeitbereich.

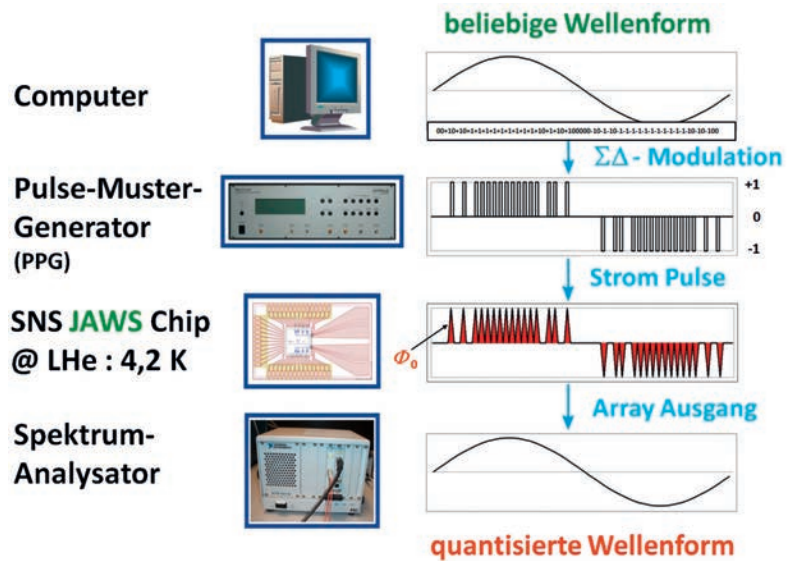


Bild 3: Skizze zur Veranschaulichung des Prinzips der Realisierung des JAWS

## 2 Design und Aufbau

Für den Betrieb des JAWS müssen die Josephson-Schaltungen bei allen Pulsfolgefrequenzen breite SS liefern. Um den hohen Anforderungen des JAWS zu genügen, muss das HF-Design der Schaltungen dahingehend optimiert werden. Bild 4 zeigt ein Beispiel eines JAWS-Chips, welcher 10 mm x 10 mm groß ist und auf dem 2 JAWS-Schaltungen integriert wurden, die zum Teil bereits auf dem Chip supraleitend miteinander verbunden sind. Die Vergrößerung zeigt, dass die Josephson-Kontakte im Innenleiter eines koplanaren Wellenleiters (CPW: *coplanar waveguide*) angeordnet sind, flankiert auf beiden Seiten von der Masse-Leitung. Die Impedanz der CPW ist auf 50  $\Omega$  dimensioniert

und die CPW ist am Leitungsende mit einem 50- $\Omega$ -Widerstand abgeschlossen, um Reflektionen der Pulse zu verhindern. Die HF-Pulse werden über einen 50- $\Omega$ -CPW-Taper über einen PCB-Chip-Träger eingekoppelt (PCB: *printed circuit board*). Die Schaltungen verfügen über LCR-Filter (L: Induktivität, C: Kapazität, R: Widerstand) an den niederfrequenten Ausgangsleitungen, an denen die Spannung ausgekoppelt bzw. der Kompensationsstrom eingekoppelt werden. Diese Tiefpass-Filter verhindern eine Übertragung der HF-Pulse auf diesen Leitungen, welche die synthetisierten Signale beeinträchtigen würde [2]. Auf einem 3-Zoll-Silizium wafer sind 20 dieser Chips integriert.

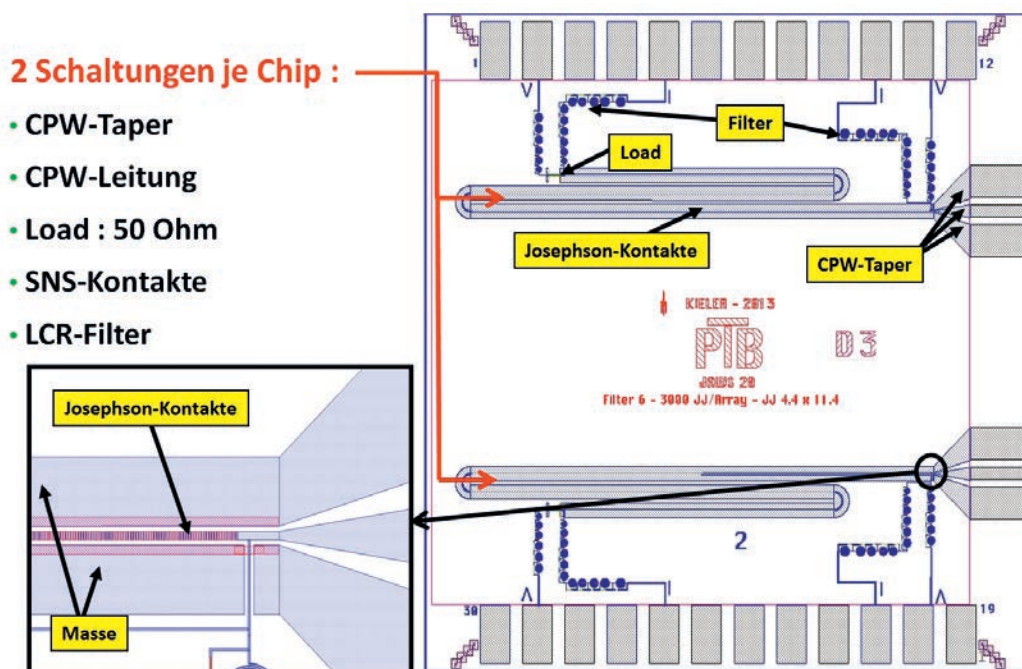


Bild 4: Darstellung des Layouts eines JAWS-Chips



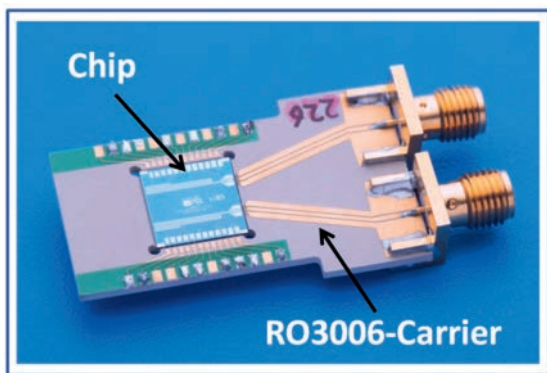


Bild 5: Darstellung eines JAWS-Chip-Trägers

Für den Betrieb des JAWS ist es erforderlich, dass alle verwendeten HF-Komponenten die Erfordernisse der Breitbandigkeit und geringen Dämpfung für eine optimale Pulsübertragung erfüllen. Deshalb sind die für die JAWS-Chips verwendeten Chip-Träger ebenfalls an der PTB entwickelt und optimiert worden. In Bild 5 ist ein Chip-Träger der aktuellen 3. Generation mit kontaktiertem JAWS-Chip gezeigt. Der Chip-Träger ist für den Betrieb von 2 Schaltungen pro Chip geeignet. Es wurden 2 HF-CPW-Leitungen mit passenden Anschlüssen für die SMA-PCB-Launcher integriert, die auf  $50 \Omega$  für den passenden Anschluss per Drahtbonden zum Chip getapert wurden. Außerdem gibt es 24 Anschlüsse für DC-Leitungen. Als Trägermaterial kommt das für HF-Anwendungen sehr gut geeignete Ro3006 [3] zum Einsatz, welches eine geringe HF-Dämpfung aufweist. Die Form der getaperten HF-CPW-Leitungen wurden bzgl. geringer Dämpfung und Reflektion optimiert [4]. Schließlich wurden die JAWS-Chips in einer Vertiefung so eingebettet, dass die Oberkanten Chip und Chip-Träger auf einer Ebene liegen. Dadurch wird eine Reflektion an der Chipkante vermieden. Außerdem sind demzufolge sehr kurze

Bonddrähte möglich, was für die HF-Übertragung vorteilhaft ist. Der Chip liegt in einer direkt in das Ro3006-Material gefrästen Vertiefung, weshalb die neueste Generation der Chip-Träger ohne eine Rückplatte aus FR1 auskommen, was zu einer kompakteren Bauweise führte. Außerdem wurde der aktuelle Chip-Träger schmaler gestaltet, um für den Einsatz in der 1V-JAWS-Probenstange ausreichend Platz für die Verdrahtung der 4 Carrier zu gewinnen. Die Schaltungen werden an der PTB in flüssigem Helium betrieben, welches in 100-l-Dewars zur Verfügung steht. Dazu werden die auf dem Chip-Träger kontaktierten JAWS-Chips in speziell angefertigten Probenstangen, die ca. 1 m lang sind, befestigt. Die JAWS-Schaltungen sind mit einem Cryoperm-Abschirmbecher magnetisch abgeschirmt. In der Probenstange befinden sich 2 halbstarre (*semi-rigid*) HF-Leitungen zur Pulsübertragung vom PPG zum Chip, sowie diverse Twisted-Pair-Kabel für die Kompensation und die Ausgangswellenform. Im Probenkopf sind in den HF-Leitungen DC-Blocks integriert für den „AC-Coupling-Betrieb“ [5]. Alle Leitungen sind isoliert geführt, sodass ein Kurzschluss mit der Masse vermieden wird, was für die Generierung von Wellenformen mit spektral reinen Frequenzspektren notwendig ist.

Eine zentrale Komponente im experimentellen Aufbau des JAWS ist der PPG, der die kurzen Strompulse mit einer Dauer von lediglich etwa 30 ps erzeugt. Die ersten Untersuchungen mit dem JAWS an der PTB wurden mit einem unipolaren PPG durchgeführt, d.h. nur 0- und 1-Pulse wurden erzeugt. Deshalb waren die synthetisierten Wellenformen ebenfalls unipolar, da nur die positive SS genutzt werden konnte [6]. Die Signale hatten somit auch einen DC-Offset. Vom NIST wurde eine Methode vorgeschlagen, bei der diese

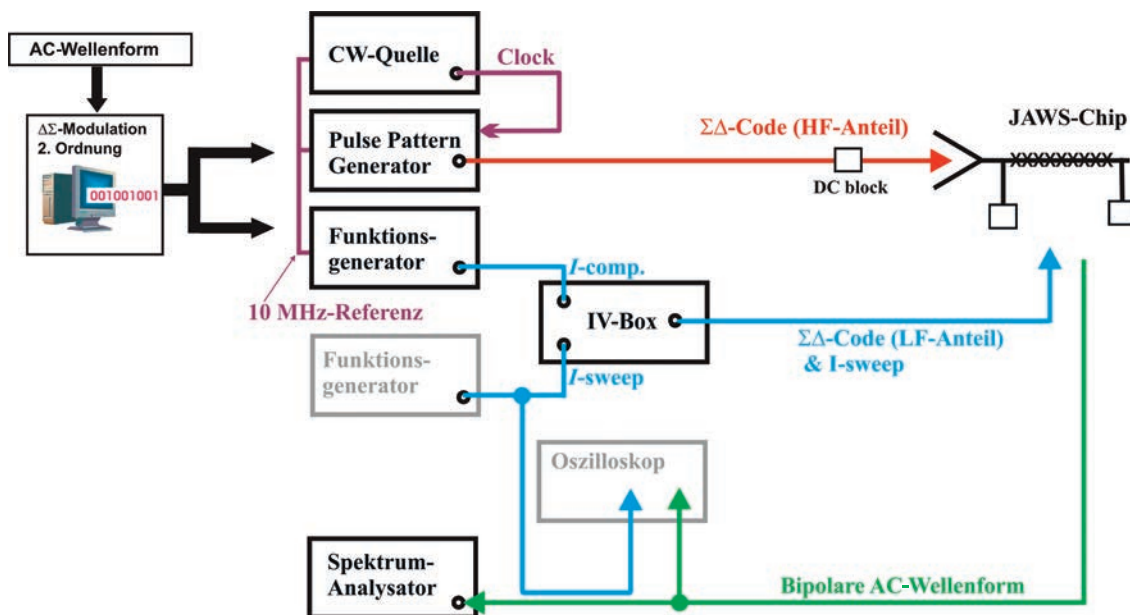


Bild 6: Schematischer Aufbau des JAWS-Systems

unipolaren Pulse mit einer CW in einem geeigneten Frequenz- und Amplitudenverhältnis überlagert werden [7, 8]. Dadurch war es uns möglich, die Ausgangsspannung zu verdoppeln und den Offset zu vermeiden, da nun beide SS (-1. SS und +1. SS) adressiert werden konnten. Diese Methode bewirkte jedoch einen ziemlich komplexen Aufbau und die Notwendigkeit der Optimierung von zahlreichen Parametern. In Bild 6 ist der aktuelle experimentelle Aufbau gezeigt, der nun auf einem bipolaren (oder ternären) PPG basiert – er liefert also +1-, 0-, -1-Pulse und beide SS können nun direkt adressiert werden.

Um zu verhindern, dass an den zur Impedanzanpassung integrierten *On-Chip*-Abschlusswiderständen eine sogenannte *Common-Mode*-Spannung abfällt, welche sich dem Ausgangssignal ununterscheidbar überlagern würde, wird die erwähnte *AC-Coupling*-Methode verwendet. Hierzu wird der SD-Code mit einem DC-Block in einen HF- und LF-Anteil (LF: *low frequency*) aufgespalten. Der HF-Anteil des Codes wird über den Eingangstaper durch die Josephson-Kontakte und die Widerstände geführt, wobei an den Widerständen nun keine Spannung abfällt. Der LF-Anteil des Codes wird über ein separates Kompensationssignal nur zwischen den Josephson-Kontakten eingespeist, wobei eine mit „IV-Box“ bezeichnete Elektronik das Signal von der Masse entkoppelt. Somit „sehen“ am Ende die Josephson-Kontakte die vollständige Information des SD-Codes und die Wellenform kann optimal synthetisiert werden. Von einer externen CW-Quelle erhält der PPG sein Taktsignal von typischerweise 15 GHz für eine Datenrate des PPG von maximal 30 Gbit/s. Die Ausgangswellenform wird mit einem Spektrumanalysator PXI 5922 analysiert [9]. Optional können die Pulskenlinien mit einem Oszilloskop betrachtet werden. Hierzu wird ein weiterer einfacher Funktionsgenerator für den Biasstrom benötigt.

Ausgehend von Schaltungen mit 500 bis 1000 Josephson-Kontakten, wurde die Anzahl der Josephson-Kontakte in den Schaltungen schrittweise vergrößert. Dabei stellte sich heraus, dass eine deutliche Erhöhung der Integrationsdichte der Josephson-Kontakte in einer JAWS-Schaltung über einen Wert von etwa 9000 Kontakten schwierig ist, sodass die Erhöhung der Ausgangsspannung einer einzelnen Schaltung über einen Wert von etwa 150 mV an der PTB über einige Jahre nicht gelungen ist. Im Jahre 2014 konnte jedoch das NIST und die PTB jeweils unabhängig voneinander einen spektakulären Erfolg verbuchen: die Etablierung eines 1-V-JAWS-Systems [10, 11]. Man bedenke, dass zur Erzeugung einer Ausgangsspannung von 1 V ca. 483 000 000 000 000 Flussquanten pro Sekunde transferiert werden müssen! Um die Ausgangsspannung des JAWS auf

diesen metrologisch relevanten Wert von 1 V RMS zu erhöhen, wurden in der PTB bis zu 8 Schaltungen (4 Chips mit jeweils 2 Schaltungen pro Chip) mit insgesamt 63 000 Josephson-Kontakten in Serie geschaltet. Das einfache Schema hierfür ist in Bild 7 dargestellt. Die einzelnen Schaltungen sind bei 4,2 K durch supraleitende Drähte miteinander verbunden, sodass die aufsummierte Gesamtspannung aller Schaltungen an den Ausgangsleitungen gemessen werden kann. Dieser Parallelbetrieb von 8 Schaltungen ist durch die Verwendung eines kommerziell erhältlichen neuartigen 8-Kanal-PPG möglich geworden. Eine entsprechende 8-Kanal-Elektronik (IV-Box) für die Kompensation wurde dazu an der PTB entwickelt.

Der Aufbau des 1-V-JAWS-Systems im Labor zeigt Bild 8. Man erkennt auf der linken Seite das 100-l-Dewar mit flüssigem Helium, in welchem die Schaltungen bei 4,2 K betrieben werden. Desweiteren sind die Kernkomponenten der Elektronik gekennzeichnet: der PPG, die Kompensationselektronik und das PXI 5922. Das System wird mittels einer eigens entwickelten *LabView-Software* komplett gesteuert. Alle Parameter und Messdaten

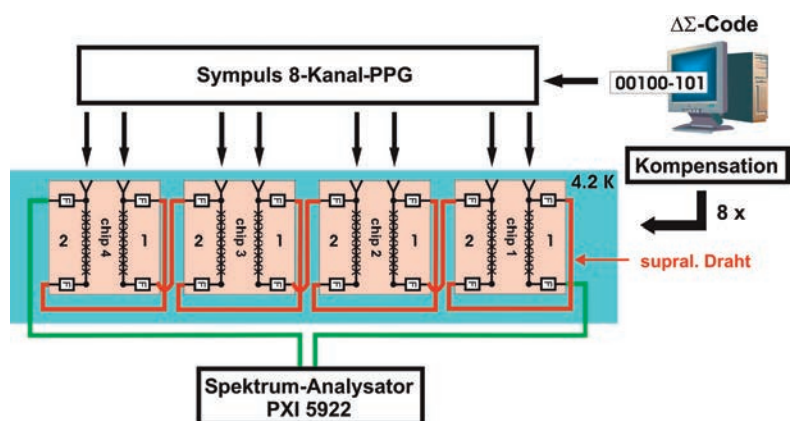


Bild 7: Schematischer Aufbau des 1-V-JAWS-Systems der PTB mit dem 8-Kanal-PPG und 4-JAWS-Chips in Serie

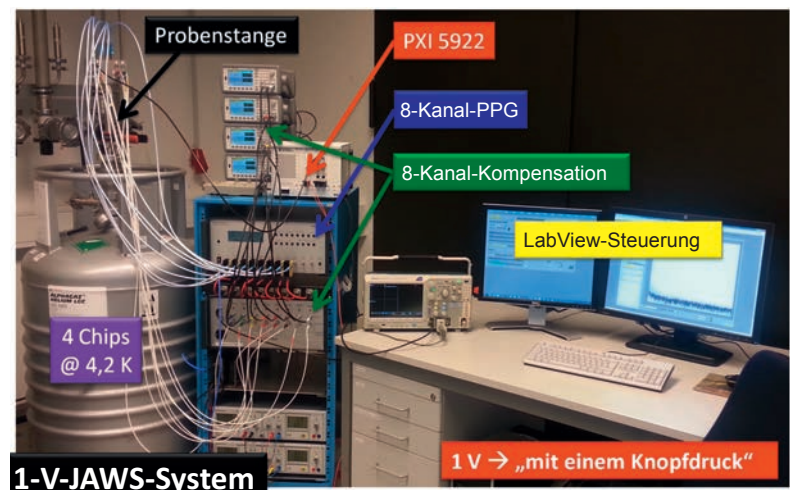


Bild 8: Fotografie des 1-V-JAWS-Systems der PTB

können gespeichert werden. Es ermöglicht einen komfortablen Betrieb des Systems, da man praktisch das 1 V mit einem einfachen Knopfdruck zur Verfügung hat. Das folgende Bild 9 zeigt als Beispiel eine Sinus-Wellenform von 250 Hz bei einer Spannung von 1 V RMS bzw. 1,4 V Spitze. Die untere Abbildung ist die Zeitdarstellung und die obere das Frequenzspektrum. Höhere Harmonische wurden um mehr als 120 dB unterdrückt, was einer hohen spektralen Reinheit entspricht. Der Rauschuntergrund ist sogar um exzellente 140 dB von der Signalamplitude getrennt.

### 3 Eigenschaften und Anwendungen

Das JAWS zeichnet sich im Vergleich zu Halbleiterquellen durch einmalige Eigenschaften

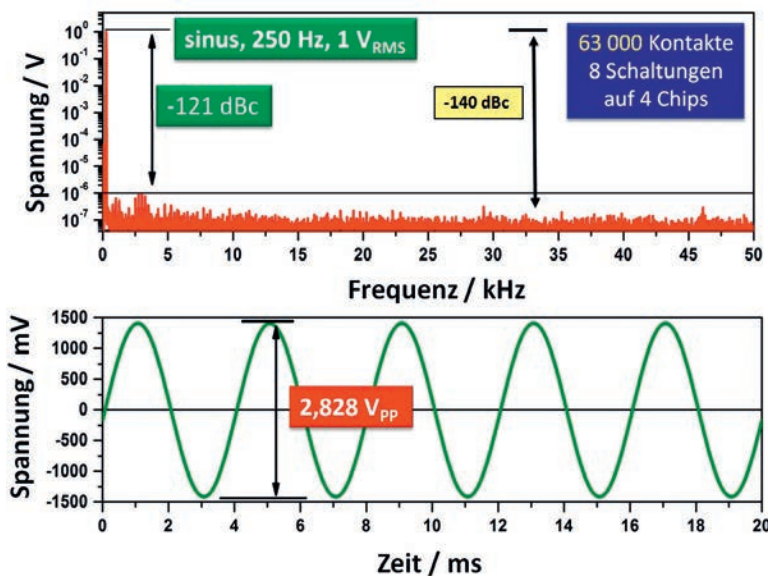


Bild 9: Frequenzspektrum und Zeitdarstellung einer Sinus-Wellenform mit 250 Hz und 1V<sub>RMS</sub>

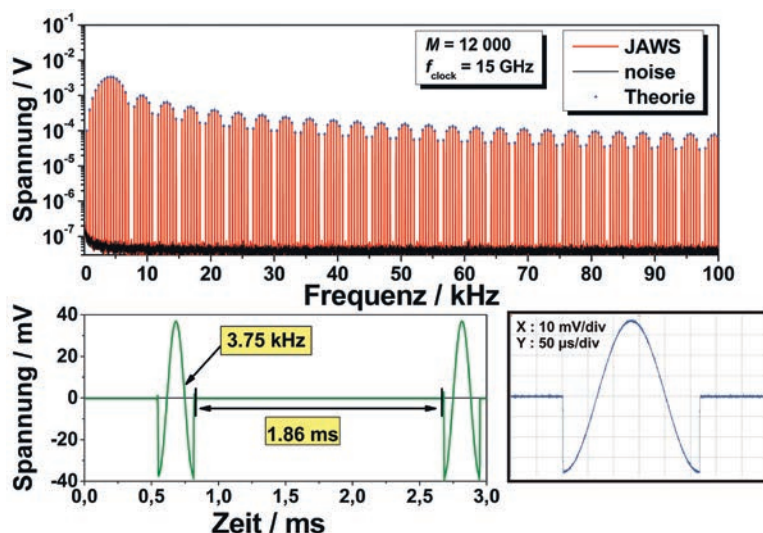


Bild 10: Frequenzspektrum und Zeitdarstellung einer Kosinus-Wellenform mit integrierter Pausezeit

aus: Die mit dem JAWS erzeugten Signale sind quantengenau, extrem rauscharm und absolut frei von irgendwelchen Driften der Signalamplituden. Da es sich um ein Quantennormal handelt, ist das JAWS auch durch zeitlich unbegrenzte stabile Betriebsparameter gekennzeichnet, d. h. nach Justage der für den Betrieb notwendigen Parameter der Geräte sind für die Generierung perfekter Wellenformen keinerlei Korrekturen notwendig. Die Drift der elektrischen Parameter der verwendeten Elektronik ist so klein, dass die JAWS-Schaltungen stets im quantisierten Zustand arbeiten (d. h. die SS wird nicht verlassen). Mit dem JAWS können beliebige Signale in einem weiten Frequenzbereich von DC, bzw. 2 Hz bis mehr als 1 MHz synthetisiert werden. Die exzellente Genauigkeit des JAWS konnte in einem direkten Vergleich von zwei JAWS-Systemen mit jeweils 10 000 Josephson-Kontakten eindrucksvoll demonstriert werden. Die Amplituden der synthetisierten Sinus-Wellen von jeweils 22 mV RMS stimmten bei einer Frequenz von 1875 Hz auf  $(1.8 \pm 2.0) \cdot 10^{-8}$  überein [12]. Die Genauigkeit des Vergleichs wurde bei diesem Experiment allein durch den verwendeten Nulldetektor begrenzt. Darüber hinaus wurde das 1-V-JAWS-System mit dem an der PTB etablierten AC-Quantenvoltmeter gemessen. Bei einer Frequenz von 250 Hz ergab sich zwischen der eingestellten und gemessenen Signalamplitude von 1 V RMS eine exzellente Übereinstimmung von  $(3.5 \pm 11.7) \cdot 10^{-9}$  [13]. Diese Ergebnisse zeigen eindrucksvoll, dass die Quantennormale perfekt funktionieren.

Zur Veranschaulichung, dass mit dem JAWS beliebige Wellenformen generiert werden können, sollen zwei Beispiele dienen. In Bild 10 ist eine Kosinus-Wellenform der Frequenz 3,75 kHz mit einer integrierten Pausezeit von 1,86 ms dargestellt. Die Frequenz des Kosinus und die Pausezeit lassen sich durch Wahl des SD-Codes beliebig einstellen. Das Frequenzspektrum zeigt eine sehr komplexe, jedoch wohldefinierte Form. Diese entspricht genau dem theoretisch erwarteten Verlauf. Solche nichtkontinuierlichen Wellenformen sind z. B. für Single-Shot-Messungen bei der dynamischen Charakterisierung eines AD-Konverters wichtig. Schließlich wurde in Bild 11 versucht, die Abkürzung JAWS mit 132 Tönen im Frequenzraum nachzubilden. Die Zeitdarstellung für diese sehr spezielle Wellenform sieht dagegen wie ein unkoordiniertes Rauschsignal aus. Umgekehrt kann auch jede Wellenform in der Zeitdomain mit dem JAWS programmiert werden.

Für den Einsatz des JAWS in der Praxis in metrologischen Instituten oder der Industrie ist es wichtig, dass ein Einsatz im Kleinkühler möglich ist. Dies wurde an der PTB in zwei Kleinkühler-Systemen erfolgreich demonstriert [14]. Somit wird ein einfacher und kostengünstiger Betrieb



auch in einem Umfeld, in dem der Betrieb mit flüssigem Helium nicht oder nur schwer möglich ist, sichergestellt.

Für die Zukunft eröffnen Effektivspannungen von 1 V eine Vielzahl von neuen Anwendungsmöglichkeiten des JAWS im Bereich der elektrischen Wechselspannungsmetrologie, wie z. B. die Kalibrierung von Wechselspannungen, Analog-Digital- bzw. Digital-Analog-Wandlern, AC-DC-Normalen, Spannungsteilern, Impedanz-Normalen, usw. Ein Beispiel für die Charakterisierung eines schnellen Analog-Digital-Wandlers (Datenrate bis 15 MS/s), der gleichzeitig als Spektrumanalysator beim JAWS genutzt wird, ist in Bild 12 gezeigt. Hierzu kann mit einer einzigen Messung in wenigen Augenblicken eine vollständige Frequenz-Charakterisierung dieses Gerätes vorgenommen werden. Dabei wird mit dem JAWS eine Multiton-Wellenform erzeugt, wobei jeder Ton die gleiche Amplitude hat. In diesem Fall ist es ein sogenannter Frequenzkamm mit 300 Tönen (Ton-Abstand 1,2 kHz), von dem in der Abbildung jedoch zur besseren Übersicht nur die ersten 40 Töne bis 50 kHz gezeigt sind. Man erkennt, dass die Amplitude, bedingt durch die internen Verstärker des Analog-Digital-Wandlers, einen wellenförmigen Verlauf zeigt. Dies ist mit der durch den Hersteller angegebenen Spezifikation vergleichbar. Weitere bereits an der PTB erfolgte Anwendungen sind die Charakterisierung eines breitbandigen (500 Hz bis 100 kHz) Verstärkers (Verstärkungsfaktor  $100,9 \pm 0,05 @ 1 \text{ kHz}$ ) oder die Messung der AC-DC-Differenz mit einem Thermokonverter Fluke792A im Frequenzbereich 1 kHz bis 20 kHz. Schließlich wurde eine PTB-Patentidee realisiert: die Kombination von PJVS und JAWS zur Erzielung von großen Ausgangsspannungen mit spektral reinen Spektren. Hierbei ergänzt das JAWS das stufenförmige Signal des PJVS. Dadurch werden im Frequenzspektrum alle durch die Stufen bedingten Harmonischen unterdrückt. Für eine Sinus-Wellenform konnte eine hervorragende spektrale Reinheit von 125 dBc erreicht werden. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass die zeitliche Stabilität und das Rauschen dieses kombinierten Signals besser als die besten auf dem Markt verfügbaren Signalgeneratoren ist [15]. Schließlich hat

das NIST gezeigt, dass das JAWS als quantisierte Pseudo-Rauschquelle bei der Johnson-Rauschthermometrie eingesetzt werden kann [16]. Bei dieser Anwendung werden vom JAWS Multiton-Wellenformen mit geringer Amplitude und hoher Bandbreite ( $> 1 \text{ MHz}$ ) synthetisiert.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die erfolgreiche Entwicklung des JAWS stellt für die Realisierung eines praxistauglichen AC-Josephson-Spannungsnormalen einen wesentlichen Meilenstein dar. Das Erreichen von effektiven Ausgangsspannungen bis 1 V war ein Durchbruch für die Anwendung des JAWS in der Metrologie. Bei der Synthese von beliebig programmierbaren Wellenformen höchster Güte im Frequenz- oder Zeitbereich ist das JAWS im Vergleich mit anderen Quellen unübertroffen. In den nächsten Jahren soll die Komplexität des 1-V-JAWS-Systems durch Weiterentwicklung der Josephson-Schaltungen und des experimentellen Aufbaus verringert werden.

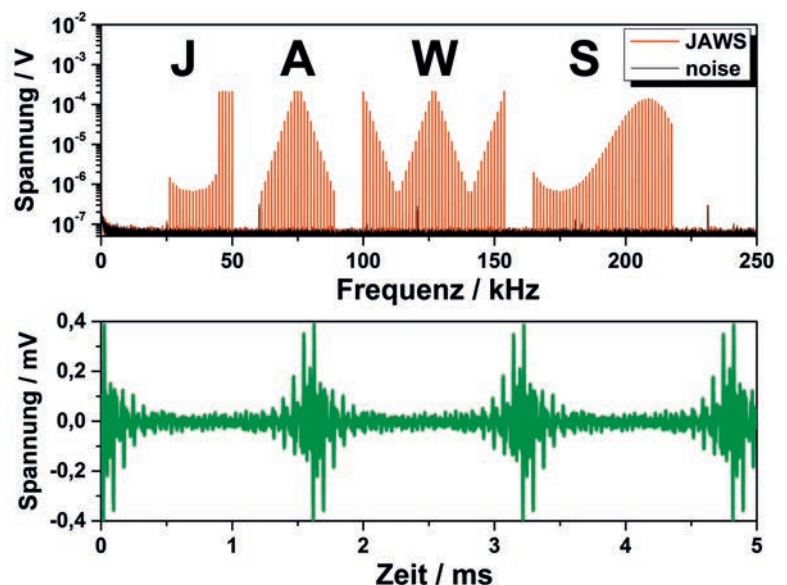


Bild 11: Frequenzspektrum und Zeitdarstellung einer Multiton-Wellenform zur Darstellung der Abkürzung JAWS

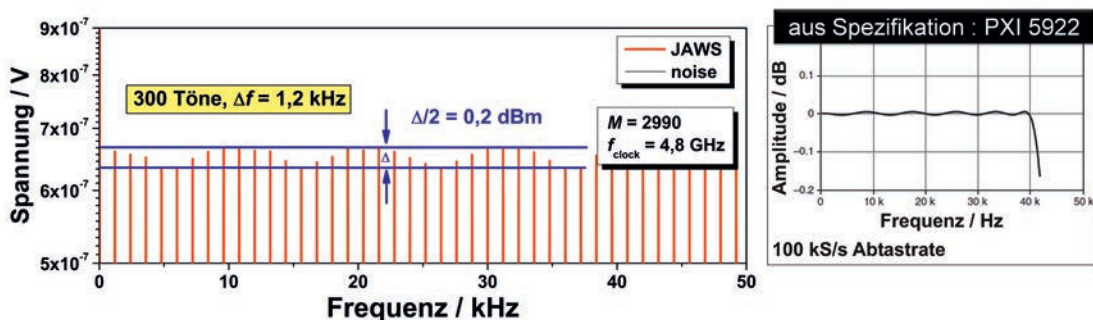


Bild 12: Frequenzspektrum einer JAWS-Multiton-Wellenform zur Charakterisierung eines AD-Wandlers NI PXI 5922 und Vergleich mit der Spezifikation des Herstellers

## Danksagung

Diese Arbeiten wurden zum Teil mit finanzieller Unterstützung durch die Europäische Union im Rahmen von EMRP JRP SIB59 Q-WAVE ausgeführt. Das EMRP wird gemeinsam von den EMRP-Teilnehmerstaaten innerhalb von EURAMET und der Europäischen Union finanziert.

## Literatur

- [1] S. P. Benz und C. A. Hamilton, *A pulse-driven programmable Josephson voltage standard*, Appl. Phys. Lett. **68**, 3171–3173 (1996).
- [2] M. Watanabe, P. D. Dresselhaus und S. P. Benz, *Resonance-free lowpass filters for the AC Josephson voltage standard*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **16**, 49–53 (2006).
- [3] RO3006™, Rogers Corporation, Connecticut, USA.
- [4] R. Judaschke und K. Kuhlmann, PTB Braunschweig, private Mitteilung.
- [5] S. P. Benz, C. J. Burroughs und P. D. Dresselhaus, *AC coupling technique for Josephson waveform synthesis*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **11**, 612–616 (2001).
- [6] O. F. O. Kieler, J. Kohlmann, R. Behr, F. Mueller, L. Palafox und J. Niemeyer, *SNS Josephson junction series arrays for the Josephson arbitrary waveform synthesizer*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **17**, 187–190 (2007).
- [7] S. P. Benz, C. J. Burroughs und P. D. Dresselhaus, *Low harmonic distortion in a Josephson arbitrary waveform synthesizer*, Appl. Phys. Lett. **77**, 1014–1016 (2000).
- [8] O. F. Kieler, J. Kohlmann und F. Müller, *Improved design of superconductor/normal conductor/superconductor Josephson junction series arrays for an ac Josephson voltage standard*, Supercond. Sci. Technol. **20**, 318–322 (2007).
- [9] PXI 5922, National Instruments, Austin, Tx, USA.
- [10] S. P. Benz, S. B. Waltman, A. E. Fox, P. D. Dresselhaus, A. Rüfenacht, J. M. Underwood, L. Howe, R. E. Schwall und C. J. Burroughs, *1 V Josephson arbitrary waveform synthesizer*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **25**, 1300108 (2015).
- [11] O. F. Kieler, R. Behr, R. Wendisch, S. Bauer, L. Palafox und J. Kohlmann, *Towards a 1 V Josephson arbitrary waveform synthesizer*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **25**, 1400305 (2015).
- [12] O. F. Kieler, R. Behr, D. Schleißner, L. Palafox und J. Kohlmann, *Precision comparison of sine waveforms with pulse-driven Josephson arrays*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **23**, 1301404 (2013), und O. F. Kieler, unpublished.
- [13] R. Behr, O. Kieler, J. Lee, S. Bauer, L. Palafox und J. Kohlmann, *Direct comparison of a 1 V Josephson arbitrary waveform synthesizer and an ac quantum voltmeter*, Metrologia **52**, 528–537 (2015).
- [14] O. F. Kieler, T. Scheller und J. Kohlmann, *Cryocooler operation of a pulse-driven AC Josephson voltage standard at PTB*, World J. Condens. Matter Phys. **3**, 189–193 (2013).
- [15] R. Behr, O. Kieler, D. Schleißner, L. Palafox und F. J. Ahlers, *Combining Josephson Systems for Spectrally Pure AC Waveforms With Large Amplitudes*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **62**, 1634–1639 (2013).
- [16] S. P. Benz, et al., *Improvements in the NIST Johnson Noise Thermometry System*. IEEE Trans. Instrum. Meas. **58**, 884–890 (2009).