

### **Verfahren und Vorrichtung zur direkten digitalen Synthese eines elektrischen Signals mit beliebigem Amplitudenverlauf**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erzeugung eines zeitkontinuierlichen Signals mit beliebigem Amplitudenverlauf sowie eine Vorrichtung zur Umsetzung des Verfahrens.

#### *Einordnung der Erfindung in den Stand der Technik*

Aus der US 2002/0063647 A1 ist, beispielsweise aus der Zusammenfassung, sowie aus den Figuren 3 oder 4 bekannt, eine Digital-Analog-Wandlung vorzunehmen, indem ein empfangener Eingangscodewort in eine Reihe von Sub-codewörtern aufgespalten wird. Dabei sind die Sub-codewörter so beschaffen, dass deren Summe dem Eingangssignal entspricht. Das analoge Ausgangssignal wird erzeugt, indem jeder der Sub-codewörter getrennt in ein analoges Signal gewandelt wird, welche dann zur Erzeugung des Ausgangssignals summiert werden.

Aus der US 7 345 610 B2 ist bekannt, bei der Digital-Analog-Wandlung einzelne Bitwerte einer Bitfolge parallel und voneinander unabhängig in ein analoges Signal umzusetzen, sowie zur Erzeugung des Ausgangssignals die einzelnen analogen Signale zu summieren.

Aus der US 2003/0020642 A1 ist bekannt, ein Analogsignal zu erzeugen, indem die Ausgangssignale mehrerer Flipflops aufsummiert werden (siehe Figur 49).

US 6 801 148 B2 zeigt ebenfalls die Verwendung von Flipflops, um analoge Signale aus digitalen Wertefolgen zu erzeugen. Wie es beispielsweise Figur 17 zu entnehmen ist, werden mittels mehrerer Flipflops elektrische Signale generiert, die durch einen Differenzverstärker zu einem zeitkontinuierlichen Ausgangssignal aufsummiert werden.

Die direkte digitale Synthese („DDS“) zumeist sinusförmiger elektrischer Signale ist heutzutage ein häufig benutztes Verfahren in der Elektronik, insbesondere der Nachrichtentechnik. Beispielhaft seien hier die digitale Modulation sowie Träger- bzw. Mischfrequenzerzeugung genannt. Für die schaltungstechnische Umsetzung steht eine breite Palette von hoch integrierten Bausteinen („IC“) zur Verfügung. Diese DDS – IC beinhalten einen Phasenzähler, welcher auf Basis eines Grundtaktes sowie eines vorzugebenden Inkrementalwertes („Frequenzwort“) den zur Erzeugung einer bestimmten Frequenz notwendigen zeitlichen Phasenverlauf des Signals bestimmt. Das Ergebnis wird dazu verwendet, einen digitalen Speicher („ROM“, „RAM“), welcher die diskreten Amplitudenwerte bzw. Stützstellen des zu realisierenden, meist sinusförmigen Signalverlaufs beinhaltet, zyklisch auszulesen („Wavetable - Prinzip“). Der Speicherinhalt wiederum wird einem digital/analog –Wandler („Digital-Analog-Converter“ oder „DAC“) zugeführt, der das analoge Ausgangssignal erzeugt. Ein Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit, sehr hohe Auflösungen in der Frequenz erreichen zu können. Außerdem kann das generierte Signal mit geringer Verzögerung und ohne Verzerrungseffekte wie zum Beispiel Überspringen in Phase, Amplitude und Frequenz variiert werden. Von erheblichem Nachteil sind andererseits die hohe schaltungstechnische Komplexität sowie die durch das notwendige Auslesen eines Speichers und die daran anschließende digital/analog – Wandlung („D/A – Wandlung“) relativ große Informationslaufzeit.

Ein weiteres Problem stellt die geringe spektrale Reinheit des generierten Signals dar. Gründe dafür sind zum einen die endliche zeitliche Auflösung der gespeicherten Amplitudenwerte, was letztlich zum Auftreten von Störfrequenzen im Spektrum des Ausgangssignals („Spurious Noise“) führt, und zum anderen das durch die D/A – Wandlung erzeugte Quantisierungsrauschen. Diese Nachteile lassen zusammen die Verwendung von Standard – DDS – IC für bestimmte Anwendungen unvorteilhaft erscheinen bzw. schließen diese ganz aus. Stellvertretend seien hierfür folgende Anwendungen genannt:

- *Funktionsgeneratoren („Function Generator“, „Arbitrary Waveform Generator“)* / Standard – DDS – IC sind aufgrund der Beschränkung auf sinusförmige Signale ungeeignet. Zudem ist der Störanteil im Ausgangssignal für anspruchsvolle messtechnische Applikationen zu hoch.
- *kundenspezifische Lösungen* / Standard – DDS – IC sind hier aufgrund der hohen Komplexität des IC – Designs und der damit verbundenen hohen Designkosten unwirtschaftlich.
- *niedrigpreisige Endprodukte* / Standard – DDS – IC sind hier aufgrund der hohen Herstellungskosten unwirtschaftlich.
- *Signalerzeugung im Mikrowellenbereich* / Standard – DDS – IC sind nach dem gegenwärtigen technologischen Stand nur bis Frequenzen um 1GHz einsetzbar.

Die Erfindung vermeidet diese Nachteile und bietet sich deshalb für den Einsatz unter anderem in den oben genannten Bereichen an. Erfindungsgemäß hat die Information für das zu generierende Signal in Form einer  $2^N$  Elemente langen, zeitlich äquidistanten Wertefolge (Sequenz) vorzuliegen (**N Element der ganzen Zahlen,  $N \geq 1$** ). Beispielfolge sein eine Folge von  $2^4=16$  Elementen angenommen. Der spektrale Inhalt dieser (reellen) Wertefolge lässt sich im Sinne der diskreten Fourieranalyse als aus sinusförmigen Funktionen der Periodenlänge  $j=2^N/k$  zusammengesetzt interpretieren (**k Element der ganzen Zahlen,  $1 \leq k \leq 2^N/2$** ). Die Beispielfolge kann also sinusförmige Funktionen der Periodenlänge 16, 16/2, 16/3, bis 16/8=2 enthalten. Die kürzeste Periodenlänge ist aufgrund des Abtasttheorems auf 2 beschränkt (Aliasing-Effekt). Erfindungsgemäß wird die vorzugebende,  $2^N$  Elemente lange Wertefolge in eine Anzahl von zumindest einer und maximal **N** Unterfolgen der Längen  $2^l$  aufgespaltet, welche jede im Sinne der diskreten Fourieranalyse ausschließlich sinusförmige Funktionen einer Periodenlänge von  $2^l$  sowie ungerader Bruchteile davon enthalten darf (**l Element der ganzen Zahlen,  $1 \leq l \leq N$** ). Die Grenze wird auch hier durch das Abtasttheorem bestimmt und liegt bei einer minimalen Periodenlänge von 2 Elementen. Die Beispielfolge wäre somit in Unterfolgen der Länge 16, 8, 4 und 2 aufzuteilen, wobei die Unterfolge mit der Länge 16 nur Spektralanteile der Periode 16, 16/3, 16/5 und 16/7, die mit der Länge 8 nur Spektralanteile der Periode 8, 8/3 usw. enthalten darf. Enthält die Ausgangsfolge keine spektralen Anteile einer bestimmten Unterfolge, also zum Beispiel keine sinusförmigen Funktionen der Periode 8 und 8/3, so ist die jeweilige Unterfolge leer (alle Elemente Null).

Der spektrale Inhalt der Unterfolgen ist derart, dass er durch die Summe von zumindest einer und maximal **m=1+2<sup>l</sup>/2** zueinander phasenverschobenen Rechteckfunktionen restfrei beschrieben wird. Im Beispiel wäre also die Unterfolge der Länge 16 durch maximal 9 solcher Rechteckfunktionen restfrei zu beschreiben. Die schaltungstechnische Umsetzung der Erzeugung dieser Rechteckfunktionen und deren Summierung zu einem zeitkontinuierlichen Ausgangssignal erfolgt durch vergleichsweise einfache Schaltungsanordnungen. Nachstehend seien die Hauptvorteile der Erfindung im Vergleich zu dem bei Standard – DDS – IC angewandten Prinzip nochmals genannt:

- Keine Beschränkung auf sinusförmige Signale. Grundsätzlich sind bei zyklischer Synthese alle periodischen Signalverläufe der Länge  $j=2^N/k$  erzeugbar (**k, N Elemente der ganzen Zahlen,  $N \geq 1$ ,  $1 \leq k \leq 2^N/2$** ). Diese Einschränkung

verschwindet zudem, wenn für jeden neuen Syntheszyklus (der Länge  $2^N$ ) die Neuberechnung der oben beschriebenen Unterfolgen und Rechteckfunktionen sowie die Anpassung in der erzeugenden Schaltung durchgeführt werden. Mit dieser Erweiterung sind dann Signalverläufe beliebiger Periode sowie auch aperiodische Signale beliebiger Länge synthetisierbar.

- Höhere spektrale Reinheit des Ausgangssignals im Vergleich zu Standard – DDS - IC, da die beschriebenen Phänomene „Spurious Noise“ und „Quantisierungsrauschen“ verfahrensbedingt nicht auftreten.
- Aufgrund ihrer einfachen Struktur ist die erzeugende Schaltung leicht als kundenspezifische Lösung (Gate Arrays, ASICs, ...) zu realisieren. Erfindungsgemäß werden zur Generierung des elektrischen Signals lediglich Standard – Logikelemente (FlipFlop) sowie einige weitere, wenig komplexe digitale und analoge Komponenten benötigt.
- Aufgrund ihrer einfachen Struktur ist die erzeugende Schaltung preiswert als integrierte Lösung herzustellen.
- Aufgrund des Wegfalls komplexer Syntheseschritte wie dem Auslesen von Speichern und der D/A – Wandlung sind im Vergleich zu Standard – DDS – IC höhere Einsatzfrequenzen erreichbar.

### *Vorgehen zur Abspaltung von Rechteckfunktionen von einer Wertefolge*

Erfindungsgemäß ist eine, die Information des zu generierenden (reellen) Signals enthaltende,  $2^N$  Elemente lange Wertefolge in zumindest eine und maximal  $N$  Unterfolgen der Längen  $2^l$  zu zerlegen, welche jede im Sinne der diskreten Fourieranalyse ausschließlich sinusförmige Funktionen einer Periodenlänge von  $2^l$  sowie ungerader Bruchteile davon enthalten darf (**l Element der ganzen Zahlen,  $1 \leq l \leq N$** ). Aufgrund des Abtasttheorems gilt dabei, dass die kleinste Periodenlänge  $\geq 2$  sein muss. Der spektrale Inhalt jeder Unterfolge der Länge  $2^l$  ist somit derart, dass diese durch die Summe von maximal  $m=1+2^{l/2}$  zueinander phasenverschobenen Rechteckfunktionen restfrei beschrieben wird.

In den **Fig. 1 bis 4** ist das Vorgehen zur Abspaltung dieser Rechteckfunktionen dargestellt. **Fig. 1** zeigt beispielhaft eine  $2^l=2^4=16$  Elemente lange, zufallsverteilte Wertefolge (Rauschsignal) als Tabelle und Diagramm. In den **Fig. 2 und 3** wird für diese Wertefolge die Abspaltung von  $m=1+2^{l/2}=1+2^{4/2}=9$  Rechteckfunktionen erläutert. Diese sind zueinander um jeweils einen Abtastschritt, also  $1/l=1/16$  der gesamten Periodenlänge phasenverschoben. Ihre Amplitude ergibt sich als Differenz vom Wert der Eingangsfolge (**E**) im jeweiligen Abtastschritt und seinem Vorgänger. Eine Ausnahme bilden die erste und letzte Rechteckfunktion (**siehe Fig. 2**). Da die beispielhafte Wertefolge ein Rauschsignal ist, welches bezüglich seiner spektralen Zusammensetzung nicht die oben genannten Kriterien erfüllt, berechnet sich weiterhin aus der Differenz von Eingangsfolge (**E**) und der Summe aller Rechteckfunktionen eine Ausgangsfolge (**A**, Ausgangssequenz, Rest) der Länge  $2^{l/2}$ . Dieser Rest enthält die spektrale Differenz zwischen den abgespaltenen Rechteckfunktionen und der Eingangsfolge. Hätte die Wertefolge **E** die eingangs genannten Bedingungen erfüllt, also lediglich sinusförmige Funktionen der Periodenlänge  $2^l$  und ungerader Bruchteile davon enthalten, so wäre dieser Rest gleich Null. **Fig. 4** zeigt das Ergebnis für den Fall, dass von den sich im Beispiel ergebenden Restsequenzen **A** weitere Gruppen von Rechteckfunktionen bis hin zur kürzesten Periodenlänge 2 abgespalten werden. Der letzte Abspaltungsschritt (Periodenlänge = 2) ist immer restfrei (**A=Null**), d.h. alle spektralen Anteile der ursprünglichen Wertefolge sind an dieser Stelle vollständig in den Rechteckfunktionen enthalten.

### *Vorgehen zur Zerlegung einer Wertefolge in Unterfolgen definierten, gegenüber der Ursprungsfolge reduzierten spektralen Inhalts*

Wie bereits ausgeführt erfolgt die Abspaltung von Rechteckfunktionen aus einer  $2^l$  langen Wertefolge immer dann restfrei, wenn diese Wertefolge ausschließlich sinusförmige Funktionen (spektrale Anteile) der Periodenlänge  $2^l$  und ungerader Bruchteile davon enthält. Ursache dafür ist die spektrale Zusammensetzung von Rechteckfunktionen nach dem Muster  $f(t) = A \cdot (\cos(\omega t) - 1/3 \cos(3\omega t) + 1/5 \cos(5\omega t) - \dots)$ . Erfindungsgemäß muss also die zu synthetisierende Wertefolge der Länge  $2^N$  vollständig, d.h. restfrei, in derartige Unterfolgen zerlegt werden. Diese Unterfolgen werden anschließend nach dem oben erläuterten Prinzip restfrei in Rechteckfunktionen überführt. Die Amplituden der Rechteckfunktionen gehen schließlich als Wichtungsfaktoren in die Syntheseschaltung ein. **Fig. 5** zeigt die Rechenvorschrift zur Bildung der Unterfolgen (Untersequenzen) aus der gegebenen, zu synthetisierenden Wertefolge (Eingangssequenz) beispielhaft für eine  $2^N = 2^4 = 16$  Elemente lange, zufallsverteilte Wertefolge (Rauschsignal). Das Grundprinzip ist das eines, z.B. aus der Nachrichtentechnik bekannten, Kammfilters, welches hier in Form einer Kaskade angewendet wird. Dabei wird die Eingangsfolge durch mittige Teilung und paarweise Addition bzw. Subtraktion in eine Unterfolge  $U_1$  der Länge 16 und eine Unterfolge  $G_1$  der Länge 8 aufgeteilt.  $U_1$  enthält alle bezüglich ihrer Periode zur Basis 16 ungeraden spektralen Komponenten (also  $16, 16/3, 16/5$  und  $16/7$ ).  $G_1$  enthält die zu 16 geraden Komponenten  $16/2=8, 16/4=4, 16/6=8/3$  und  $16/8=2$ .  $G_1$  ist nun wiederum teilbar in zwei Unterfolgen, welche die spektralen Komponenten mit **zur Länge 8** geraden und ungeraden Periodendauern beinhalten. Im Endergebnis der Kaskade stehen die Unterfolgen  $U_1, U_2, U_3$  und  $G_3$  als Basis für die Synthese der Eingangsfolge. Der gesamte Vorgang der Aufteilung läuft sequentiell ab, wobei auf Ergebnisse des jeweils vorhergehenden Schrittes zurückgegriffen wird. Für die programmier- und schaltungstechnische Umsetzung von besonderem Vorteil ist, dass die Berechnung „in situ“, also ohne zusätzlichen Zwischenspeicher erfolgen kann. Außerdem sind die notwendigen Berechnungen von geringem Umfang. Außer Additionen sind lediglich Divisionen durch 2 notwendig, welche programmiertechnisch einfach durch eine Bitverschiebung zu realisieren sind. **Fig. 6** stellt zusammenfassend das Ergebnis des gesamten Verfahrens der Aufteilung in Unterfolgen und der Abspaltung von Rechteckfunktionen anhand der bereits eingangs verwendeten, zufallsverteilten Wertefolge (Rauschsignal) dar. Es zeigt sich wie beschrieben, dass die Abspaltungen restfrei erfolgen (**alle A=Null**).

### *Zusammenfassung zur mathematischen Zerlegung und Abspaltung*

Erfindungsgemäß ist eine  $2^N$  Elemente lange (reelle) Wertefolge vollständig durch Rechteckfunktionen zu beschreiben. Dies erfolgt durch:

- Fortlaufende Aufspaltung der  $2^N$  Elemente langen Wertefolge in Unterfolgen nach dem Prinzip eines Kammfilters.
- restfreie Abspaltung von Rechteckfunktionen aus diesen Unterfolgen.

Die Rechteckfunktionen werden in einer noch zu beschreibenden Schaltung als elektrische Signale erzeugt. Durch Summation dieser Signale entsteht ein zeitkontinuierliches, diskretes elektrisches Signal, welches den Verlauf und damit spektralen Inhalt der  $2^N$  Elemente langen (reellen) Wertefolge repräsentiert.

## Schaltungstechnische Umsetzung

**Fig. 7** zeigt die Prinzipschaltung der Vorrichtung, beispielhaft für die Erzeugung eines elektrischen Signals, abgeleitet aus einer  $2^N=2^4=16$  Elemente langen (reellen) Wertefolge. Erfindungsgemäß besteht die Schaltung aus:

- einer zu einem Ringzähler geschalteten Kaskade von  $1+2^{N-1}=9$  D-FlipFlops (**FF<sub>1</sub>1 bis FF<sub>1</sub>9**), zur Synthese der Signalanteile mit 1\*Grundfrequenz, 3\*Grundfrequenz, 5\*Grundfrequenz, 7\*Grundfrequenz.
- einer zu einem Ringzähler geschalteten Kaskade von  $1+2^{N-2}=5$  D-FlipFlops (**FF<sub>2</sub>1 bis FF<sub>2</sub>5**), zur Synthese der Signalanteile mit 2\*Grundfrequenz, 6\*Grundfrequenz.
- einer zu einem Ringzähler geschalteten Kaskade von  $1+2^{N-3}=3$  D-FlipFlops (**FF<sub>3</sub>1 bis FF<sub>3</sub>3**), zur Synthese der Signalanteile mit 4\*Grundfrequenz.
- einer zu einem Ringzähler geschalteten Kaskade von  $1+2^{N-4}=2$  D-FlipFlops (**FF<sub>4</sub>1 bis FF<sub>4</sub>2**), zur Synthese der Signalanteile mit 8\*Grundfrequenz.
- Einer Anzahl von 19 Wichtungsfaktoren (**F<sub>x</sub>X**), welche multiplikativ an die Ausgänge (**Q**) der D-FlipFlops gekoppelt werden und im Ergebnis die vorab zu berechnenden Amplituden der Rechteckfunktionen realisieren. Hier erfolgt letztlich die digital/analog – Wandlung. Je nach gefordertem Funktionsumfang der Applikation können diese Faktoren schaltungstechnisch sowohl konstant als auch veränderlich ausgeführt werden. Im Falle der Veränderlichkeit sind sowohl die einmalige manuelle Einstellung als auch eine automatische Anpassung für jeden neuen Syntheszyklus von  $2^N$  Werten (was die Synthese von Signalen beliebiger Periode bzw. auch aperiodischer Vorgänge beliebiger Länge ermöglichen würde) sowie Zwischenstufen dieser Lösungen denkbar.
- Einem Summierer ( $\Sigma$ ), welcher die 19 analogen Einzelsignale zusammenfasst und das analoge Summensignal ausgibt („**U<sub>out</sub>**“). Nicht dargestellt, kann sich hier noch ein Filter (z.B. Tiefpass) anschließen, wenn die Applikation dies verlangt.

Alle Kaskaden werden durch den Systemtakt („**CLK**“) angesteuert, welcher eine Periodenlänge von 1, entsprechend der sechzehnfachen (**allgemein  $2^N$ -fachen**) Grundfrequenz aufweist. Unter Nutzung der Löscheingänge der D-FlipFlop („**CLR**“) kann die Schaltung vor Beginn eines Ausgabesyklus in einen definierten Ausgangszustand gebracht werden.

**Fig. 8** zeigt das zur Schaltung gehörende Signalspiel an den Ausgängen **Q** der jeweiligen FlipFlop (**F<sub>x</sub>X**). Es ist zu beachten, dass es sich bei der Taktsequenz jeweils um das gleiche Signal „**CLK**“ handelt. Alle Ringzähler werden mit einem einheitlichen Takt beaufschlagt. Die unterschiedliche Darstellung ergibt sich durch verschiedene zeitliche Maßstäbe, da für jeden Ringzähler lediglich ein kompletter Zyklus dargestellt wurde.

**Fig. 9** zeigt, aus der Prinzipschaltung abgeleitet, eine einfache, beispielhafte Applikation mit konstanten Wichtungsfaktoren. Hier übernehmen elektrische Widerstände im Zusammenwirken mit einem Operationsverstärker die Funktion der Multiplikation mit Wichtungsfaktoren sowie die anschließende Summation. Auf die Funktion des als Summierer beschalteten Operationsverstärkers soll nicht näher eingegangen werden, da es sich um eine allgemein bekannte, weit verbreitete Standardschaltung handelt. Da mittels dieser einfachen Schaltung nur positive Wichtungsfaktoren dargestellt werden können, sind die berechneten Wichtungsfaktoren (Amplituden der Rechteckfunktionen) linear zu verschieben, so dass ausschließlich positive Werte auftreten. Dies jedoch führt zu einem Gleichanteil in der Ausgangsspannung (**U<sub>out</sub>**), welcher kompensiert werden muss. Im dargestellten Fall erfolgt dies durch das Anlegen einer dem Gleichanteil entsprechenden Spannung (**U<sub>Offset</sub>**) an den positiven Eingang des Operationsverstärkers.

### Anwendungsbeispiele mit 16 Stützstellen

Nachstehende Beispiele sollen den möglichen Anwendungsumfang der Erfindung näher vorstellen. Die **Fig. 10 bis 18** zeigen für verschiedene Signalformen beispielhaft die ermittelten Wichtungsfaktoren (Amplituden der Rechteckfunktionen). Je nach zu erzeugender Signalform verringert sich dabei der notwendige Schaltungsaufwand durch den Wegfall von Rechteckfunktionen bzw. Symmetrien in deren Amplitudenwerten teilweise erheblich, was bei der Schaltungsauslegung berücksichtigt werden kann.

Element	Wert
E1	-0.65
E2	0.95
E3	-0.32
E4	0.51
E5	0.64
E6	-0.27
E7	0.31
E8	0.27
E9	0.54
E10	-0.71
E11	0.36
E12	-0.61
E13	0.44
E14	-0.07
E15	-0.08
E16	0.91

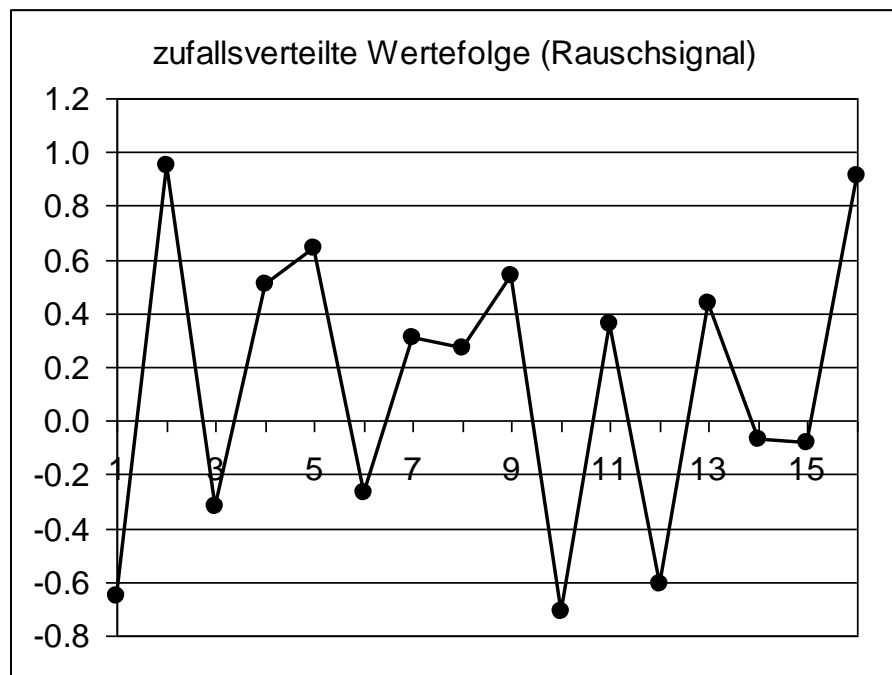


Fig. 1 Beispielhafte, reelle Wertefolge der Länge  $2^4=16$  als Tabelle und Diagramm

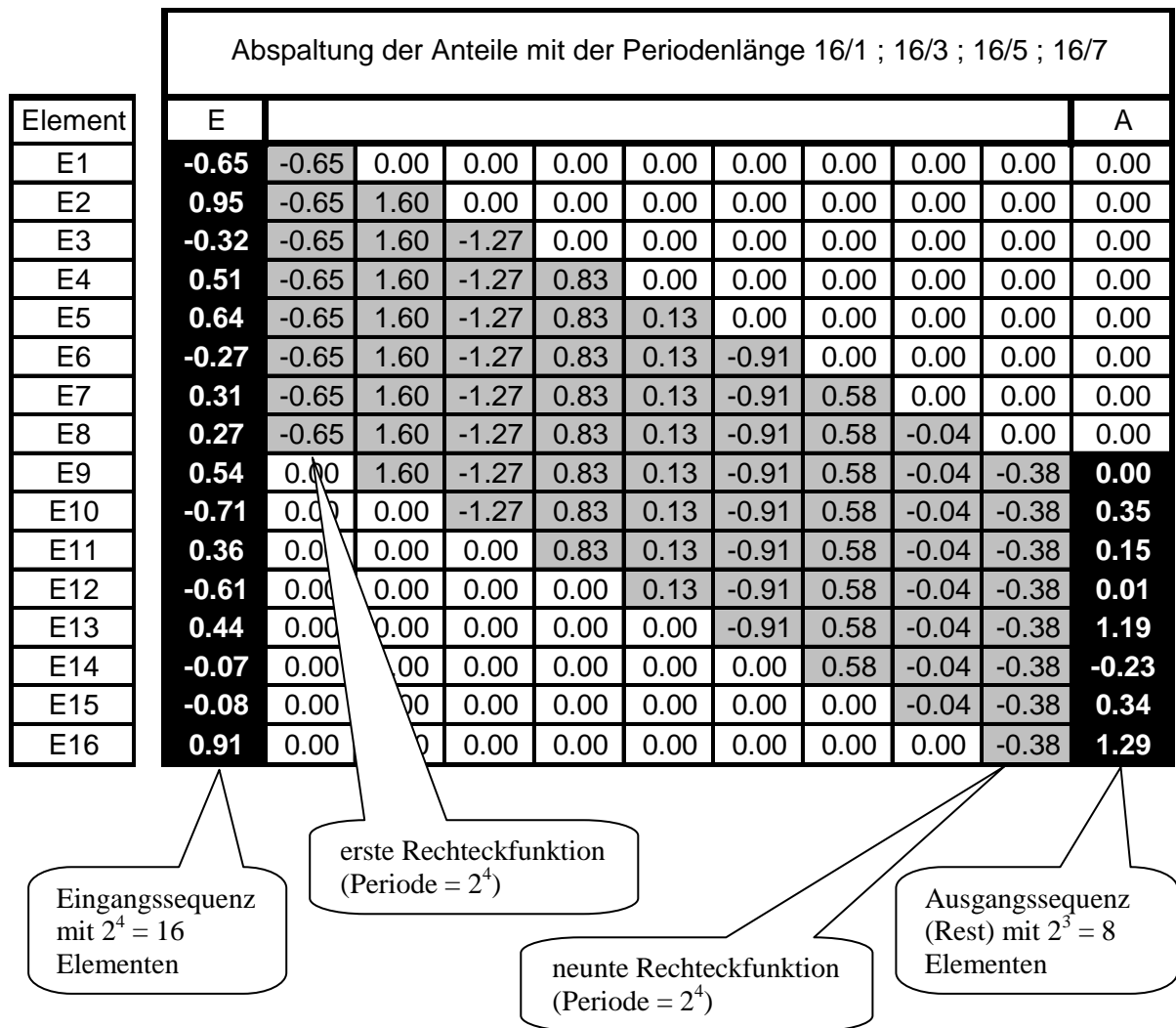


Fig. 2 Prinzipdarstellung der Abspaltung von Rechteckfunktionen, ausgehend von der beispielhaften, reellen Wertefolge (Eingangssequenz)



Element	Eingangssequenz	erste Rechteckfunktion	zweite Rechteckfunktion	...	neunte Rechteckfunktion	Ausgangssequenz
E1	-0.65	-0.65	0.00	...	0.00	0.00
E2	0.95	-0.65	1.60	...	0.00	0.00
E3	-0.32	-0.65	1.60	...	0.00	0.00
E4	0.51	-0.65	1.60	...	0.00	0.00
E5	0.64	-0.65	1.60	...	0.00	0.00
E6	-0.27	-0.65	1.60	...	0.00	0.00
E7	0.31	-0.65	1.60	...	0.00	0.00
E8	0.27	-0.65	1.60	...	0.00	0.00
E9	0.54	0.00	1.60	...	-0.38	0.00
E10	-0.71	0.00	0.00	...	-0.38	0.35
E11	0.36	0.00	0.00	...	-0.38	0.15
E12	-0.61	0.00	0.00	...	-0.38	0.01
E13	0.44	0.00	0.00	...	-0.38	1.19
E14	-0.07	0.00	0.00	...	-0.38	-0.23
E15	-0.08	0.00	0.00	...	-0.38	0.34
E16	0.91	0.00	0.00	...	-0.38	1.29

Fig. 3 Bildungsvorschrift zur Bestimmung der Amplituden von Rechteckfunktionen und Ausgangssequenz (Rest)

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/1 ; 16/3 ; 16/5 ; 16/7

E											A
-0.65	-0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.95	-0.65	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.32	-0.65	1.60	-1.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.51	-0.65	1.60	-1.27	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.64	-0.65	1.60	-1.27	0.83	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.27	-0.65	1.60	-1.27	0.83	0.13	-0.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.31	-0.65	1.60	-1.27	0.83	0.13	-0.91	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00
0.27	-0.65	1.60	-1.27	0.83	0.13	-0.91	0.58	-0.04	0.00	0.00	0.00
0.54	0.00	1.60	-1.27	0.83	0.13	-0.91	0.58	-0.04	-0.38	0.00	0.00
-0.71	0.00	0.00	-1.27	0.83	0.13	-0.91	0.58	-0.04	-0.38	0.35	0.00
0.36	0.00	0.00	0.00	0.83	0.13	-0.91	0.58	-0.04	-0.38	0.15	0.00
-0.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	-0.91	0.58	-0.04	-0.38	0.01	0.00
0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.91	0.58	-0.04	-0.38	1.19	0.00
-0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	-0.04	-0.38	-0.23	0.00
-0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.04	-0.38	0.34	0.00
0.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.38	1.29	0.00

Eingangssequenz

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/2 ; 16/6

E							A
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.35	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.15	0.00	0.35	-0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	0.00	0.35	-0.20	-0.14	0.00	0.00	0.00
1.19	0.00	0.35	-0.20	-0.14	1.18	0.00	0.00
-0.23	0.00	0.00	-0.20	-0.14	1.18	-1.07	0.00
0.34	0.00	0.00	0.00	-0.14	1.18	-0.70	0.00
1.29	0.00	0.00	0.00	0.00	1.18	0.11	0.00

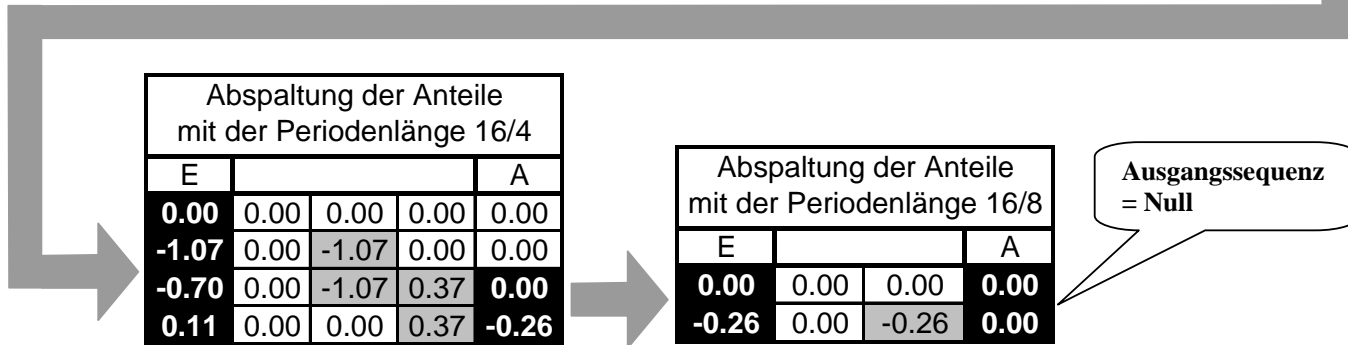


Fig. 4 Fortlaufende Abspaltung von Rechteckfunktionen, ausgehend von der beispielhaften, reellen Wertefolge

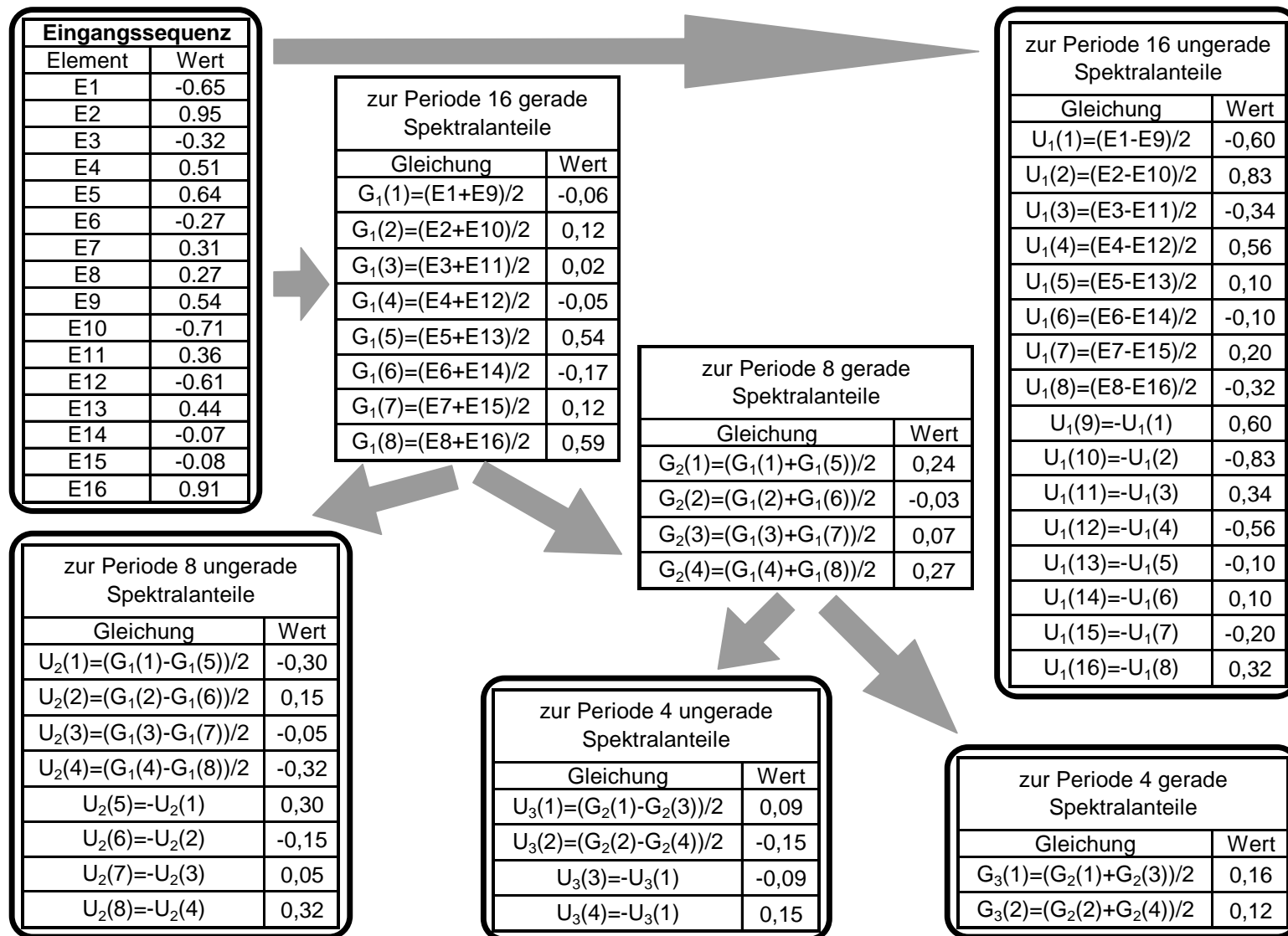
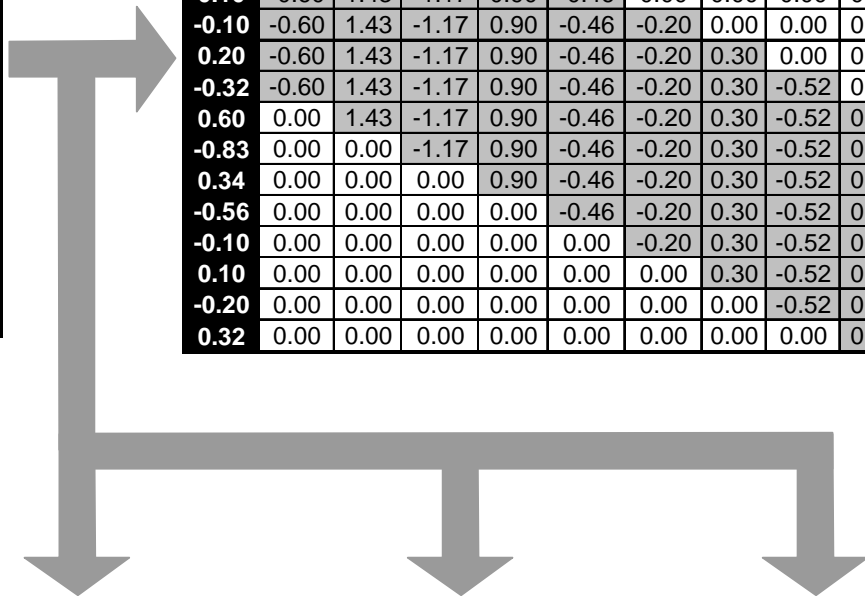


Fig. 5 Vorgehen zur Aufspaltung der beispielhaften, reellen Wertefolge in vier Unterfolgen nach dem Prinzip eines Kammfilters

Eingangssequenz	
Element	Wert
E1	-0.65
E2	0.95
E3	-0.32
E4	0.51
E5	0.64
E6	-0.27
E7	0.31
E8	0.27
E9	0.54
E10	-0.71
E11	0.36
E12	-0.61
E13	0.44
E14	-0.07
E15	-0.08
E16	0.91

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/1 ; 16/3 ; 16/5 ; 16/7										
E										A
<b>-0.60</b>	-0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.83</b>	-0.60	1.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>-0.34</b>	-0.60	1.43	-1.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.56</b>	-0.60	1.43	-1.17	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.10</b>	-0.60	1.43	-1.17	0.90	-0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>-0.10</b>	-0.60	1.43	-1.17	0.90	-0.46	-0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.20</b>	-0.60	1.43	-1.17	0.90	-0.46	-0.20	0.30	0.00	0.00	0.00
<b>-0.32</b>	-0.60	1.43	-1.17	0.90	-0.46	-0.20	0.30	-0.52	0.00	0.00
<b>0.60</b>	0.00	1.43	-1.17	0.90	-0.46	-0.20	0.30	-0.52	0.32	<b>0.00</b>
<b>-0.83</b>	0.00	0.00	-1.17	0.90	-0.46	-0.20	0.30	-0.52	0.32	<b>0.00</b>
<b>0.34</b>	0.00	0.00	0.00	0.90	-0.46	-0.20	0.30	-0.52	0.32	<b>0.00</b>
<b>-0.56</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.46	-0.20	0.30	-0.52	0.32	<b>0.00</b>
<b>-0.10</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.20	0.30	-0.52	0.32	<b>0.00</b>
<b>0.10</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	-0.52	0.32	<b>0.00</b>
<b>-0.20</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.52	0.32	<b>0.00</b>
<b>0.32</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	<b>0.00</b>



Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/2 ; 16/6						
E						A
<b>-0.30</b>	-0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.15</b>	-0.30	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>-0.05</b>	-0.30	0.44	-0.19	0.00	0.00	0.00
<b>-0.32</b>	-0.30	0.44	-0.19	-0.27	0.00	0.00
<b>0.30</b>	0.00	0.44	-0.19	-0.27	0.32	0.00
<b>-0.15</b>	0.00	0.00	-0.19	-0.27	0.32	0.00
<b>0.05</b>	0.00	0.00	0.00	-0.27	0.32	0.00
<b>0.32</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00
<b>-0.30</b>	-0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.15</b>	-0.30	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>-0.05</b>	-0.30	0.44	-0.19	0.00	0.00	0.00
<b>-0.32</b>	-0.30	0.44	-0.19	-0.27	0.00	0.00
<b>0.30</b>	0.00	0.44	-0.19	-0.27	0.32	<b>0.00</b>
<b>-0.15</b>	0.00	0.00	-0.19	-0.27	0.32	<b>0.00</b>
<b>0.05</b>	0.00	0.00	0.00	-0.27	0.32	<b>0.00</b>
<b>0.32</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	<b>0.00</b>

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/4					
E					A
<b>0.09</b>	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>-0.15</b>	0.09	-0.24	0.00	0.00	0.00
<b>-0.09</b>	0.00	-0.24	0.15	0.00	0.00
<b>0.15</b>	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00
<b>0.09</b>	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>-0.15</b>	0.09	-0.24	0.00	0.00	0.00
<b>-0.09</b>	0.00	-0.24	0.15	0.00	0.00
<b>0.15</b>	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00
<b>0.09</b>	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>-0.15</b>	0.09	-0.24	0.00	0.00	0.00
<b>-0.09</b>	0.00	-0.24	0.15	0.00	0.00
<b>0.15</b>	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00
<b>0.09</b>	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>-0.15</b>	0.09	-0.24	0.00	0.00	0.00
<b>-0.09</b>	0.00	-0.24	0.15	<b>0.00</b>	0.00
<b>0.15</b>	0.00	0.00	0.15	<b>0.00</b>	0.00

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/8			
E			A
<b>0.16</b>	0.16	0.00	<b>0.00</b>
<b>0.12</b>	0.00	0.12	<b>0.00</b>
<b>0.16</b>	0.16	0.00	<b>0.00</b>
<b>0.12</b>	0.00	0.12	<b>0.00</b>
<b>0.16</b>	0.16	0.00	<b>0.00</b>
<b>0.12</b>	0.00	0.12	<b>0.00</b>
<b>0.16</b>	0.16	0.00	<b>0.00</b>
<b>0.12</b>	0.00	0.12	<b>0.00</b>
<b>0.16</b>	0.16	0.00	<b>0.00</b>
<b>0.12</b>	0.00	0.12	<b>0.00</b>
<b>0.16</b>	0.16	0.00	<b>0.00</b>
<b>0.12</b>	0.00	0.12	<b>0.00</b>
<b>0.16</b>	0.16	0.00	<b>0.00</b>
<b>0.12</b>	0.00	0.12	<b>0.00</b>

Fig. 6 Restfreie Abspaltung von Rechteckfunktionen, ausgehend von den vier in Figur 5 abgeleiteten Unterfolgen

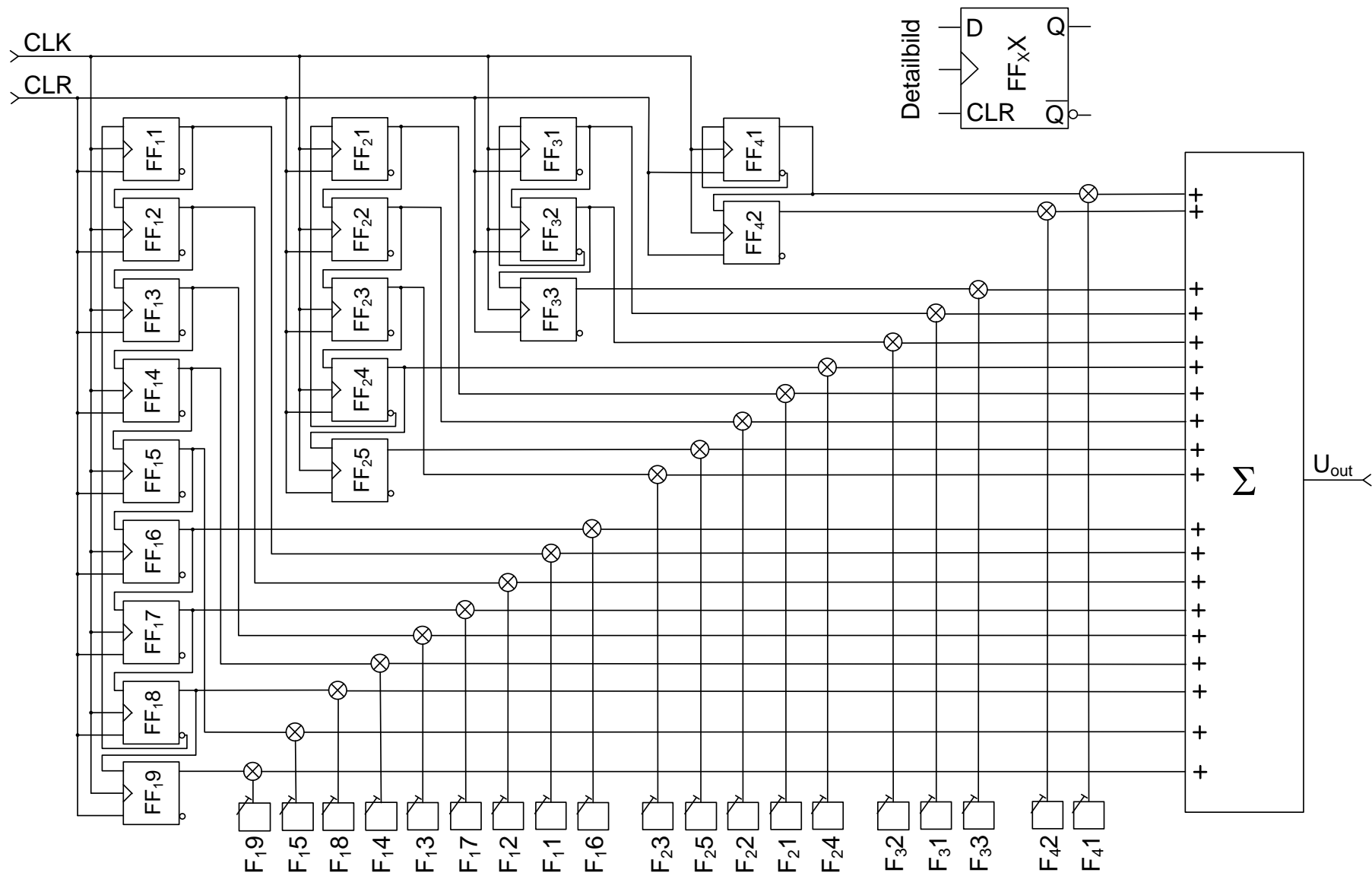


Fig. 7 Prinzipschaltung der Vorrichtung, beispielhaft für die D/A - Wandlung einer aus 16 Elementen bestehenden, reellen Wertefolge

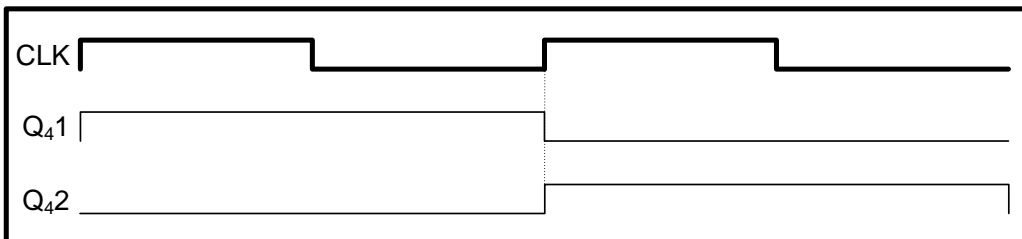
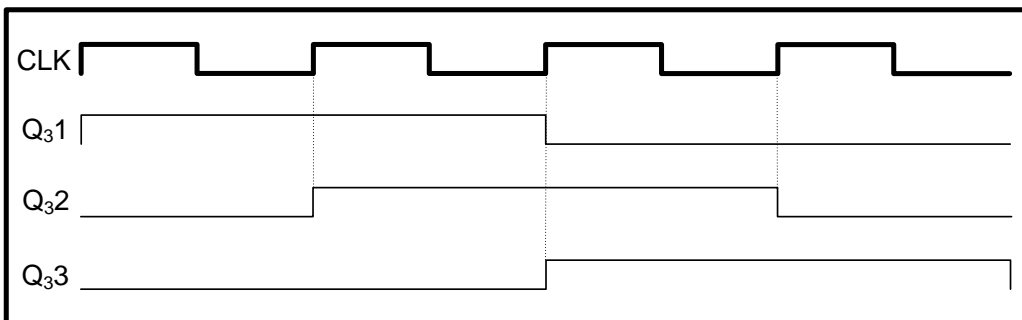
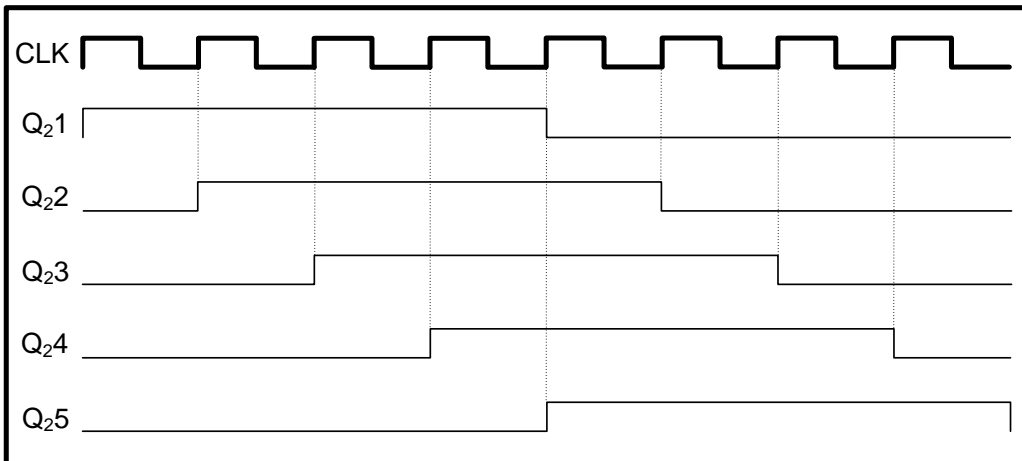
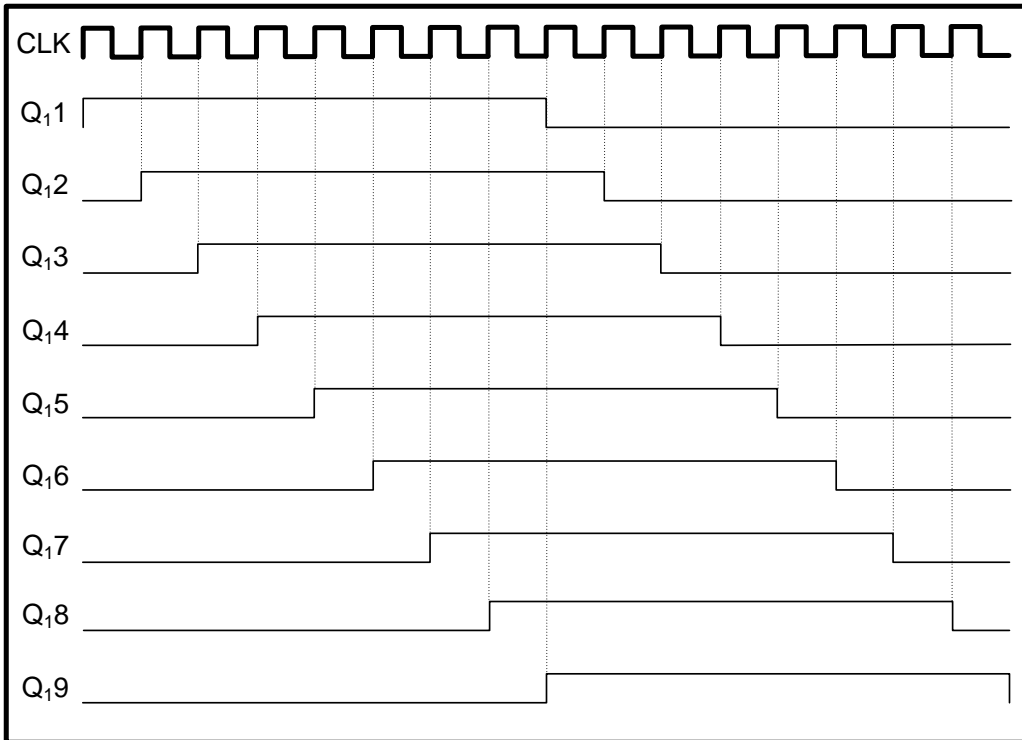


Fig. 8 Signalspiel an den Ausgängen Q<sub>x</sub>X der Prinzipschaltung

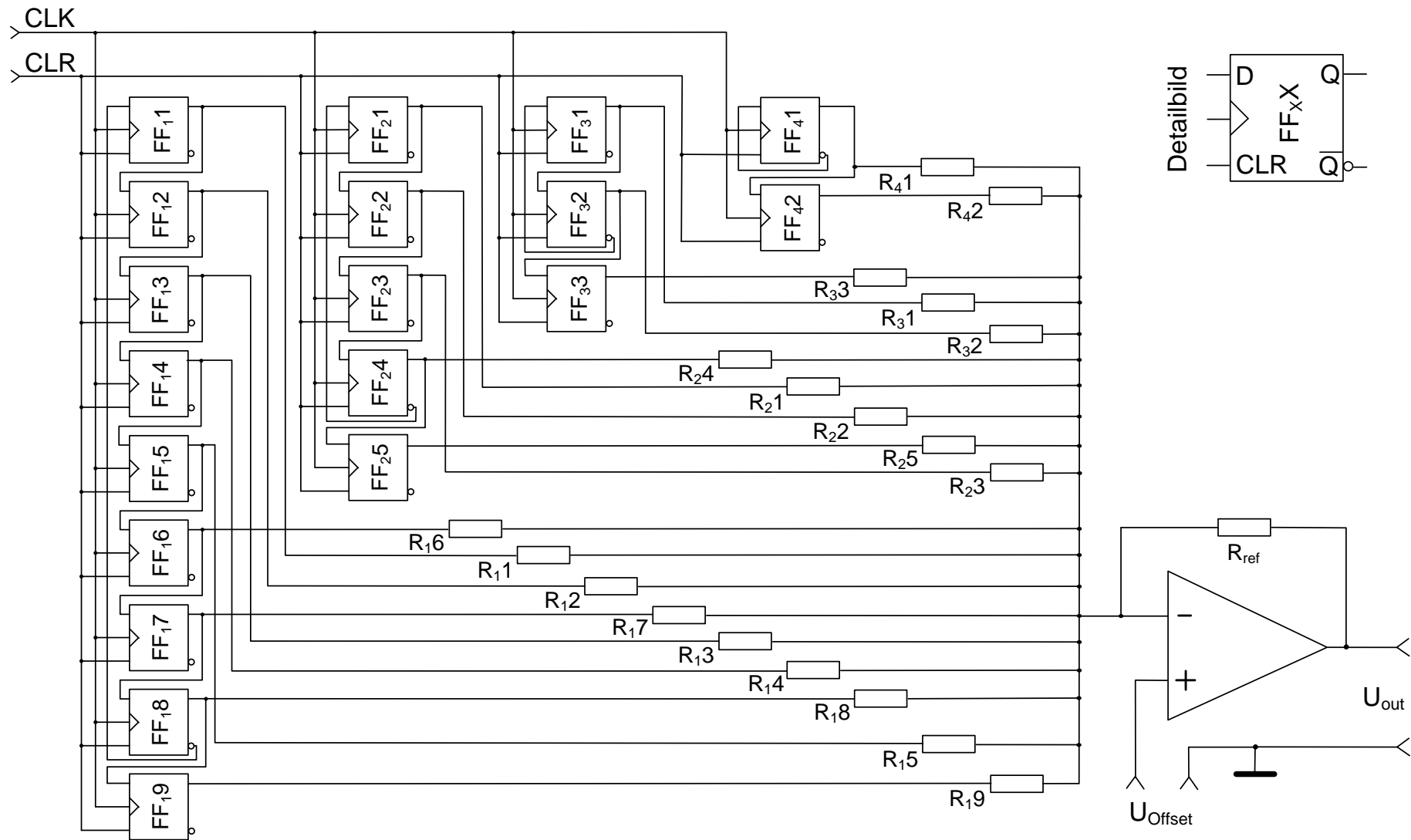
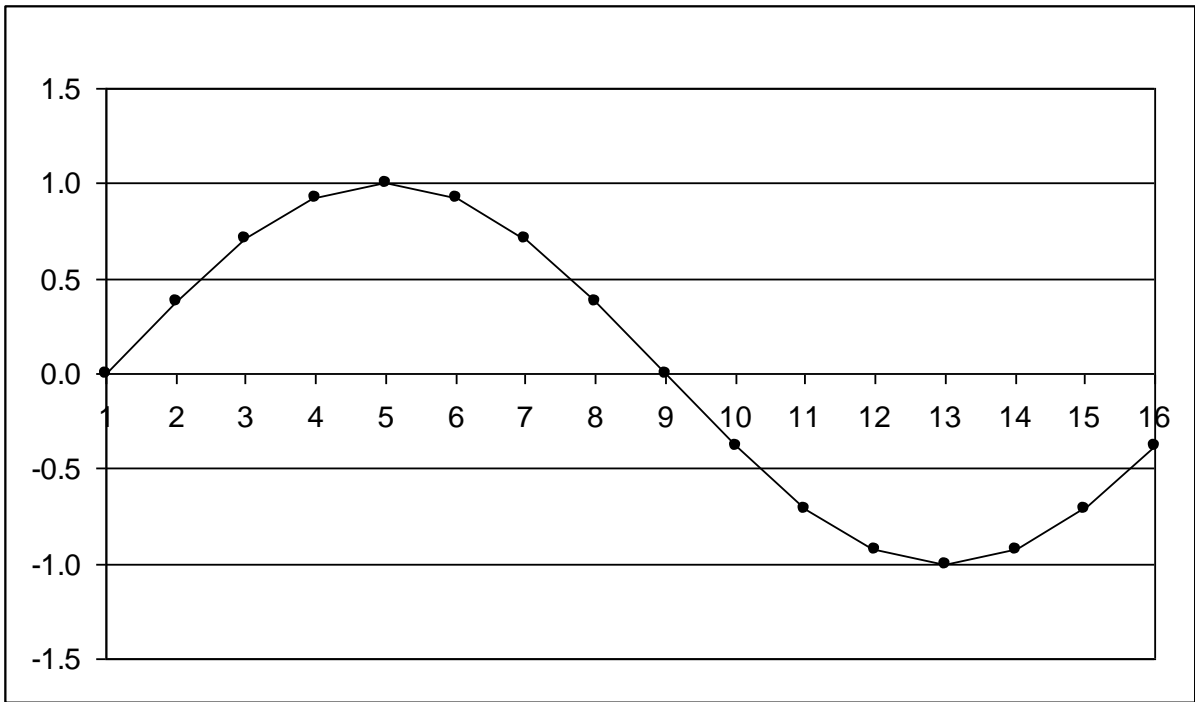


Fig. 9 Beispielapplikation mit konstanter Wichtung, ausgelegt für die D/A - Wandlung einer aus 16 Elementen bestehenden, rellen Wertefolge

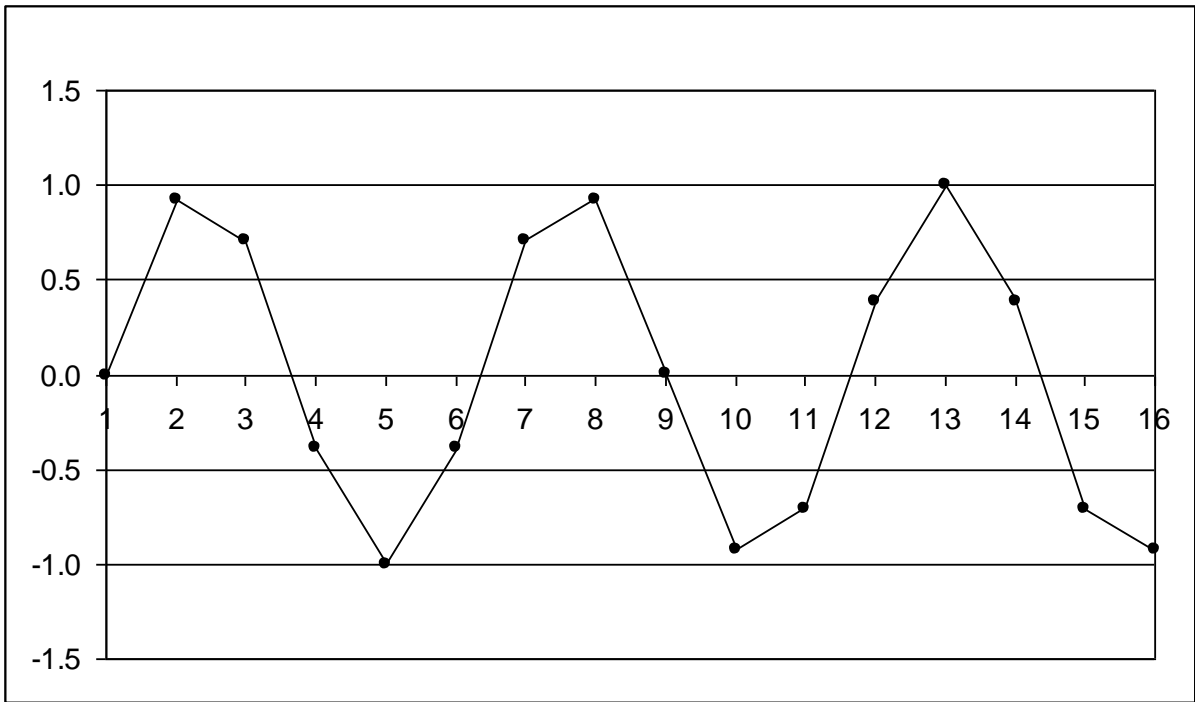


Eingangssequenz		
Element	Phasenwinkel	Wert
E1	0.00	0.00
E2	0.39	0.38
E3	0.79	0.71
E4	1.18	0.92
E5	1.57	1.00
E6	1.96	0.92
E7	2.36	0.71
E8	2.75	0.38
E9	3.14	0.00
E10	3.53	-0.38
E11	3.93	-0.71
E12	4.32	-0.92
E13	4.71	-1.00
E14	5.11	-0.92
E15	5.50	-0.71
E16	5.89	-0.38

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/1 ; 16/3 ; 16/5 ; 16/7											
E											A
<b>0.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.38</b>	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.71</b>	0.00	0.38	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.92</b>	0.00	0.38	0.32	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>1.00</b>	0.00	0.38	0.32	0.22	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.92</b>	0.00	0.38	0.32	0.22	0.08	-0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.71</b>	0.00	0.38	0.32	0.22	0.08	-0.08	-0.22	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.38</b>	0.00	0.38	0.32	0.22	0.08	-0.08	-0.22	-0.32	0.00	0.00	0.00
<b>0.00</b>	0.00	0.38	0.32	0.22	0.08	-0.08	-0.22	-0.32	-0.38	<b>0.00</b>	0.00
<b>-0.38</b>	0.00	0.00	0.32	0.22	0.08	-0.08	-0.22	-0.32	-0.38	<b>0.00</b>	0.00
<b>-0.71</b>	0.00	0.00	0.00	0.22	0.08	-0.08	-0.22	-0.32	-0.38	<b>0.00</b>	0.00
<b>-0.92</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	-0.08	-0.22	-0.32	-0.38	<b>0.00</b>	0.00
<b>-1.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.08	-0.22	-0.32	-0.38	<b>0.00</b>	0.00
<b>-0.92</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.22	-0.32	-0.38	<b>0.00</b>	0.00
<b>-0.71</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.32	-0.38	<b>0.00</b>	0.00
<b>-0.38</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.38	<b>0.00</b>	0.00

Fig. 10 Sinus der Grundfrequenz (Anfangsphase Null)

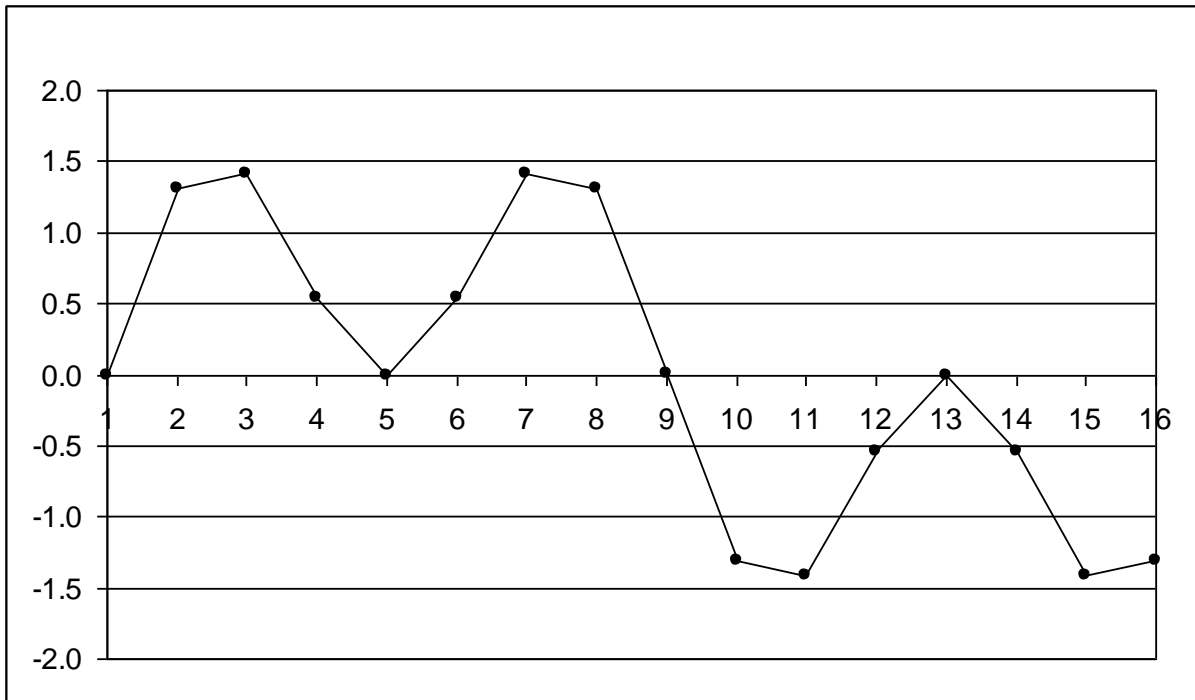




Eingangssequenz		
Element	Phasenwinkel	Wert
E1	0.00	0.00
E2	0.39	0.92
E3	0.79	0.71
E4	1.18	-0.38
E5	1.57	-1.00
E6	1.96	-0.38
E7	2.36	0.71
E8	2.75	0.92
E9	3.14	0.00
E10	3.53	-0.92
E11	3.93	-0.71
E12	4.32	0.38
E13	4.71	1.00
E14	5.11	0.38
E15	5.50	-0.71
E16	5.89	-0.92

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/1 ; 16/3 ; 16/5 ; 16/7											
E											A
<b>0.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.92</b>	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.71</b>	0.00	0.92	-0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>-0.38</b>	0.00	0.92	-0.22	-1.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>-1.00</b>	0.00	0.92	-0.22	-1.09	-0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>-0.38</b>	0.00	0.92	-0.22	-1.09	-0.62	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.71</b>	0.00	0.92	-0.22	-1.09	-0.62	0.62	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.92</b>	0.00	0.92	-0.22	-1.09	-0.62	0.62	1.09	0.22	0.00	0.00	0.00
<b>0.00</b>	0.00	0.92	-0.22	-1.09	-0.62	0.62	1.09	0.22	-0.92	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>-0.92</b>	0.00	0.00	-0.22	-1.09	-0.62	0.62	1.09	0.22	-0.92	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>-0.71</b>	0.00	0.00	0.00	-1.09	-0.62	0.62	1.09	0.22	-0.92	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>0.38</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.62	0.62	1.09	0.22	-0.92	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>1.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.62	1.09	0.22	-0.92	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>0.38</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.09	0.22	-0.92	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>-0.71</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	-0.92	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>-0.92</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.92	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>

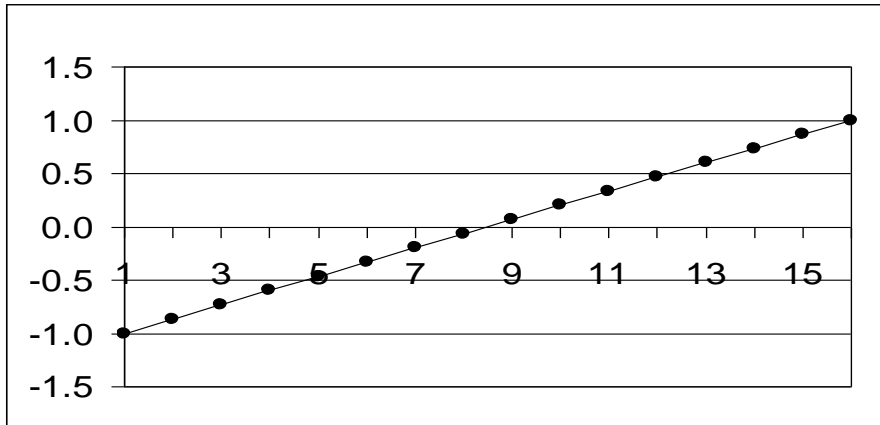
Fig. 11 Sinus der dreifachen Grundfrequenz (Anfangsphase Null)



Eingangssequenz		
Element	Phasenwinkel	Wert
E1	0.00	0.00
E2	0.39	1.31
E3	0.79	1.41
E4	1.18	0.54
E5	1.57	0.00
E6	1.96	0.54
E7	2.36	1.41
E8	2.75	1.31
E9	3.14	0.00
E10	3.53	-1.31
E11	3.93	-1.41
E12	4.32	-0.54
E13	4.71	0.00
E14	5.11	-0.54
E15	5.50	-1.41
E16	5.89	-1.31

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/1 ; 16/3 ; 16/5 ; 16/7											
E											A
<b>0.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>1.31</b>	0.00	1.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>1.41</b>	0.00	1.31	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.54</b>	0.00	1.31	0.11	-0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.00</b>	0.00	1.31	0.11	-0.87	-0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.54</b>	0.00	1.31	0.11	-0.87	-0.54	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>1.41</b>	0.00	1.31	0.11	-0.87	-0.54	0.54	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>1.31</b>	0.00	1.31	0.11	-0.87	-0.54	0.54	0.87	-0.11	0.00	0.00	0.00
<b>0.00</b>	0.00	1.31	0.11	-0.87	-0.54	0.54	0.87	-0.11	-1.31	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>-1.31</b>	0.00	0.00	0.11	-0.87	-0.54	0.54	0.87	-0.11	-1.31	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>-1.41</b>	0.00	0.00	0.00	-0.87	-0.54	0.54	0.87	-0.11	-1.31	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>-0.54</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.54	0.54	0.87	-0.11	-1.31	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>0.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.87	-0.11	-1.31	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>-0.54</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.87	-0.11	-1.31	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>-1.41</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.11	-1.31	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>-1.31</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.31	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>

Fig. 12 Überlagerung zweier Sinusfunktionen (einfache und dreifache Grundfrequenz, Anfangsphase Null)



Eingangssequenz		
Element	Phasenwinkel	Wert
E1	0.00	-1.00
E2	0.39	-0.87
E3	0.79	-0.73
E4	1.18	-0.60
E5	1.57	-0.47
E6	1.96	-0.33
E7	2.36	-0.20
E8	2.75	-0.07
E9	3.14	0.07
E10	3.53	0.20
E11	3.93	0.33
E12	4.32	0.47
E13	4.71	0.60
E14	5.11	0.73
E15	5.50	0.87
E16	5.89	1.00

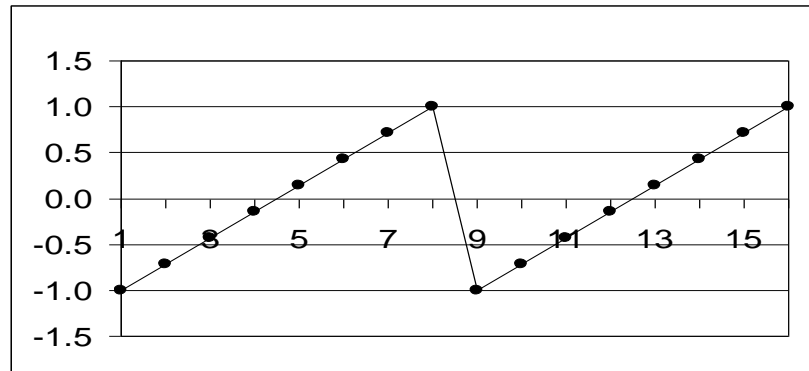
Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/1 ; 16/3 ; 16/5 ; 16/7												
E											A	
-0.53	-0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
-0.53	-0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
-0.53	-0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
-0.53	-0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
-0.53	-0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
-0.53	-0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
-0.53	-0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
-0.53	-0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	
0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	
0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	
0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	
0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	
0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	
0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	
0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/2 ; 16/6							
E							A
-0.27	-0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.27	-0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.27	-0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.27	-0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00
0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00
0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00
0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00
-0.27	-0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.27	-0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.27	-0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.27	-0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00
0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00
0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00
0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/4					
E					A
-0.13	-0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.13	-0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
0.13	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00
0.13	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00
-0.13	-0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.13	-0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
0.13	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00
0.13	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00
-0.13	-0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.13	-0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
0.13	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00
0.13	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00

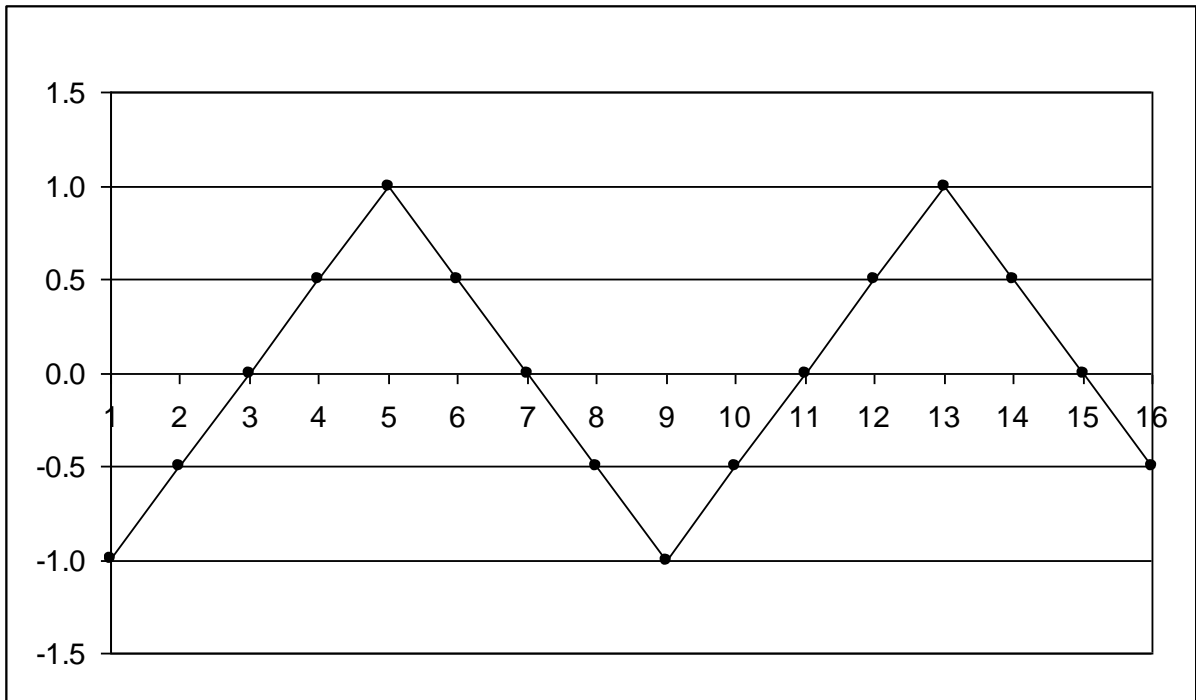
Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/8			
E			A
-0.07	-0.07	0.00	0.00
0.07	0.00	0.07	0.00
-0.07	-0.07	0.00	0.00
0.07	0.00	0.07	0.00
-0.07	-0.07	0.00	0.00
0.07	0.00	0.07	0.00
-0.07	-0.07	0.00	0.00
0.07	0.00	0.07	0.00
-0.07	-0.07	0.00	0.00
0.07	0.00	0.07	0.00
-0.07	-0.07	0.00	0.00
0.07	0.00	0.07	0.00

Fig. 13 Rampenfunktion (Sägezahn, Basis ist Grundfrequenz)



Eingangssequenz			Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/2 ; 16/6							Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/4					Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/8				
Element	Phasenwinkel	Wert	E							A	E					A			
E1	0.00	-1.00	-0.57	-0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.29	-0.29	0.00	0.00	0.00	-0.14	-0.14	0.00	0.00
E2	0.39	-0.71	-0.57	-0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.29	-0.29	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.14	0.00
E3	0.79	-0.43	-0.57	-0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.29	0.00	-0.14	-0.14	0.00	0.00
E4	1.18	-0.14	-0.57	-0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.29	0.00	0.14	0.00	0.14	0.00
E5	1.57	0.14	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	-0.29	-0.29	0.00	0.00	0.00	-0.14	-0.14	0.00	0.00
E6	1.96	0.43	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	-0.29	-0.29	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.14	0.00
E7	2.36	0.71	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.29	0.00	0.00	0.29	0.00	-0.14	-0.14	0.00	0.00
E8	2.75	1.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.29	0.00	0.00	0.29	0.00	0.14	0.00	0.14	0.00
E9	3.14	-1.00	-0.57	-0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.29	-0.29	0.00	0.00	0.00	-0.14	-0.14	0.00	0.00
E10	3.53	-0.71	-0.57	-0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.29	-0.29	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.14	0.00
E11	3.93	-0.43	-0.57	-0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.29	0.00	-0.14	-0.14	0.00	0.00
E12	4.32	-0.14	-0.57	-0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.29	0.00	0.14	0.00	0.14	0.00
E13	4.71	0.14	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	-0.29	-0.29	0.00	0.00	0.00	-0.14	-0.14	0.00	0.00
E14	5.11	0.43	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	-0.29	-0.29	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.14	0.00
E15	5.50	0.71	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.29	0.00	0.00	0.29	0.00	-0.14	-0.14	0.00	0.00
E16	5.89	1.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.29	0.00	0.00	0.29	0.00	0.14	0.00	0.14	0.00

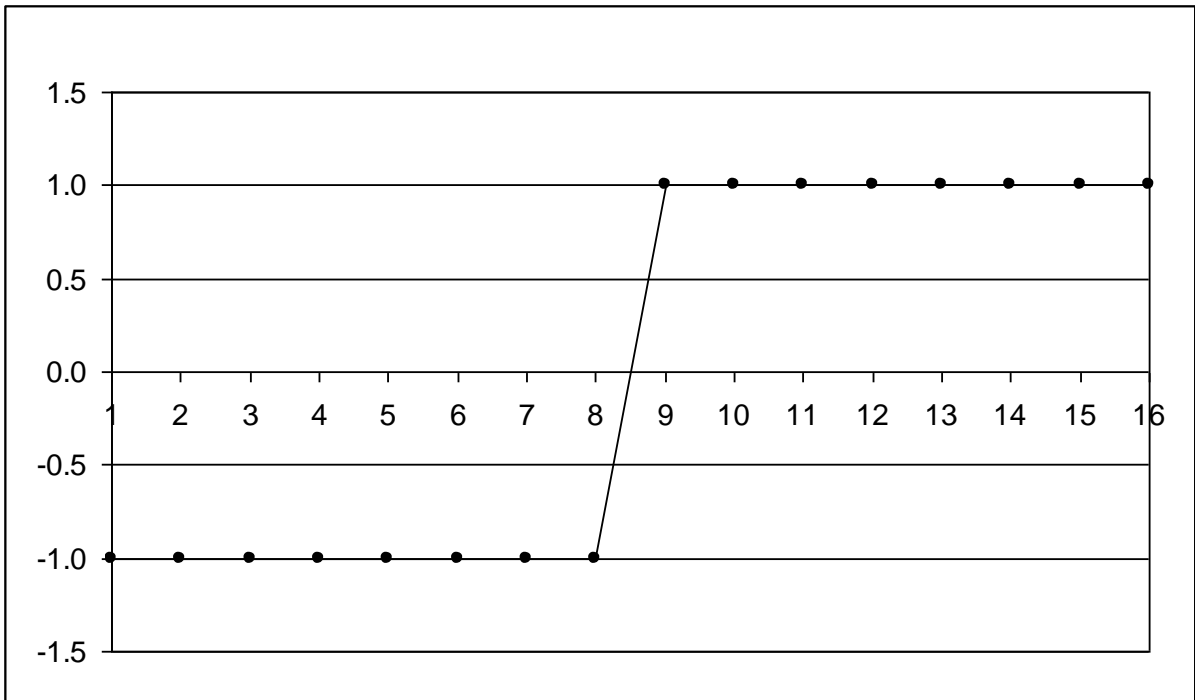
Fig. 14 Rampenfunktion (Sägezahn, Basis ist doppelte Grundfrequenz)



Eingangssequenz		
Element	Phasenwinkel	Wert
E1	0.00	-1.00
E2	0.39	-0.50
E3	0.79	0.00
E4	1.18	0.50
E5	1.57	1.00
E6	1.96	0.50
E7	2.36	0.00
E8	2.75	-0.50
E9	3.14	-1.00
E10	3.53	-0.50
E11	3.93	0.00
E12	4.32	0.50
E13	4.71	1.00
E14	5.11	0.50
E15	5.50	0.00
E16	5.89	-0.50

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/2 ; 16/6						
E						A
-1.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.50	-1.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	-1.00	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00
0.50	-1.00	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00
1.00	0.00	0.50	0.50	0.50	-0.50	0.00
0.50	0.00	0.00	0.50	0.50	-0.50	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	-0.50	0.00
-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.50	0.00
-1.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.50	-1.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	-1.00	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00
0.50	-1.00	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00
1.00	0.00	0.50	0.50	0.50	-0.50	0.00
0.50	0.00	0.00	0.50	0.50	-0.50	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	-0.50	0.00
-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.50	0.00

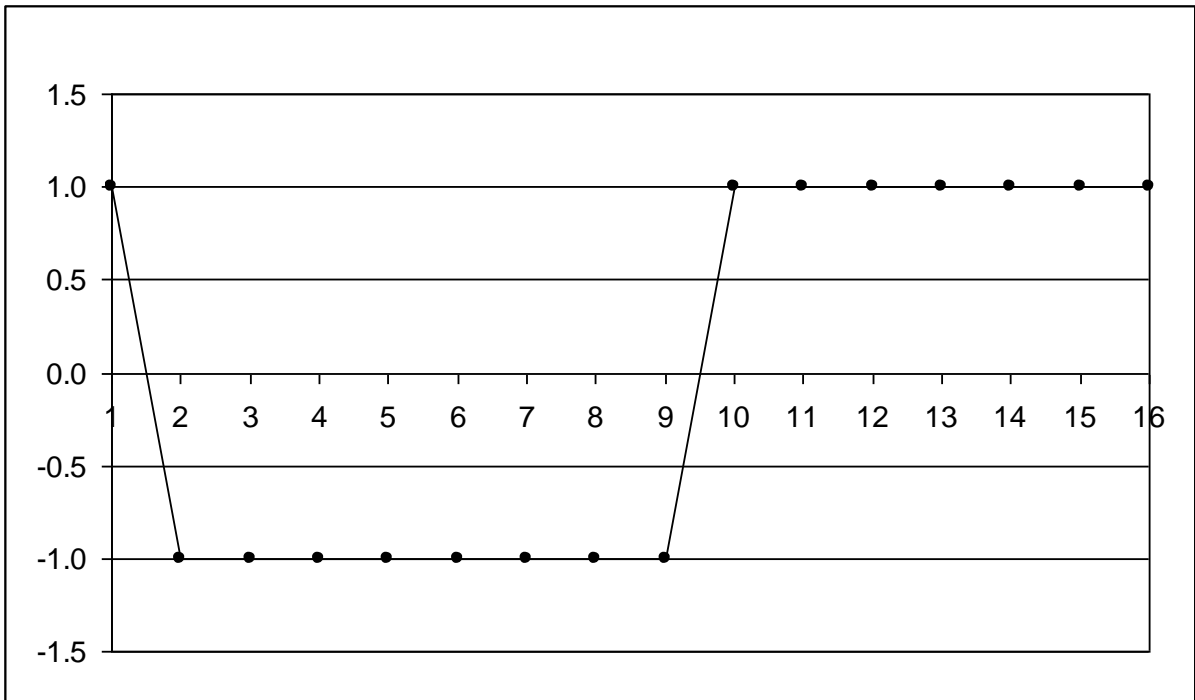
Fig. 15 Dreieckfunktion (Basis ist doppelte Grundfrequenz)



Eingangssequenz		
Element	Phasenwinkel	Wert
E1	0.00	-1.00
E2	0.39	-1.00
E3	0.79	-1.00
E4	1.18	-1.00
E5	1.57	-1.00
E6	1.96	-1.00
E7	2.36	-1.00
E8	2.75	-1.00
E9	3.14	1.00
E10	3.53	1.00
E11	3.93	1.00
E12	4.32	1.00
E13	4.71	1.00
E14	5.11	1.00
E15	5.50	1.00
E16	5.89	1.00

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/1 ; 16/3 ; 16/5 ; 16/7											
E											A
-1.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00

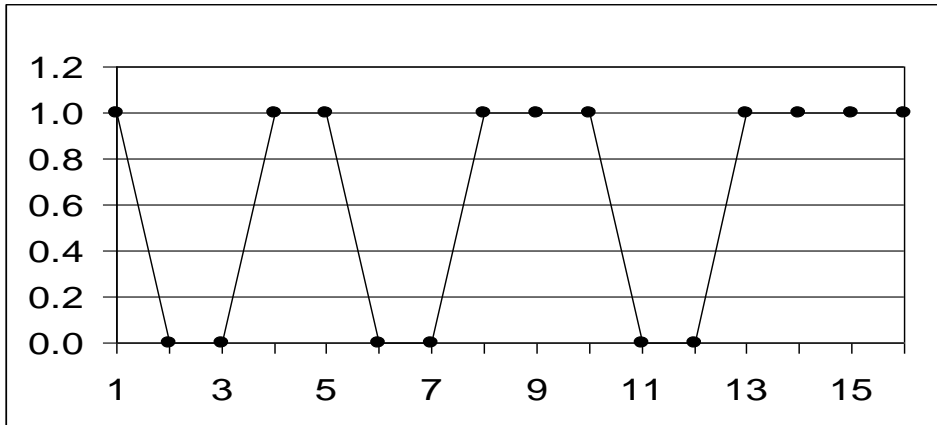
Fig. 16 Rechteckfunktion (Anfangsphase Null, Basis ist Grundfrequenz)



Eingangssequenz		
Element	Phasenwinkel	Wert
E1	0.00	1.00
E2	0.39	-1.00
E3	0.79	-1.00
E4	1.18	-1.00
E5	1.57	-1.00
E6	1.96	-1.00
E7	2.36	-1.00
E8	2.75	-1.00
E9	3.14	-1.00
E10	3.53	1.00
E11	3.93	1.00
E12	4.32	1.00
E13	4.71	1.00
E14	5.11	1.00
E15	5.50	1.00
E16	5.89	1.00

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/1 ; 16/3 ; 16/5 ; 16/7											
E											A
1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	1.00	-2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	1.00	-2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	1.00	-2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	1.00	-2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	1.00	-2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	1.00	-2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	1.00	-2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.00	0.00	-2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00

Fig. 17 Rechteckfunktion (phasenverschoben, Basis ist Grundfrequenz)



Eingangssequenz		
Element	Phasenwinkel	Wert
E1	0.00	1.00
E2	0.39	0.00
E3	0.79	0.00
E4	1.18	1.00
E5	1.57	1.00
E6	1.96	0.00
E7	2.36	0.00
E8	2.75	1.00
E9	3.14	1.00
E10	3.53	1.00
E11	3.93	0.00
E12	4.32	0.00
E13	4.71	1.00
E14	5.11	1.00
E15	5.50	1.00
E16	5.89	1.00

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/1 ; 16/3 ; 16/5 ; 16/7												
E												A
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.50	0.00	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	-0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	0.00	-0.50	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	-0.50	0.50	0.50	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.50	0.00	-0.50	0.50	0.50	-0.50	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.50	0.00	-0.50	0.50	0.50	-0.50	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	-0.50	0.50	0.50	-0.50	-0.50	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	-0.50	0.50	0.50	-0.50	-0.50	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	0.00	0.00	0.50	0.50	-0.50	-0.50	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	-0.50	-0.50	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.50	-0.50	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.50	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/2 ; 16/6							
E							A
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.25	0.00	0.00	-0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.25	0.00	0.00	-0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	-0.25	0.00	0.25	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	-0.25	0.00	0.25	0.00	0.00
0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00
0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.25	0.00	0.00	-0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.25	0.00	0.00	-0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	-0.25	0.00	0.25	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	-0.25	0.00	0.25	0.00	0.00
0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00
0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/4						
E						A
0.38	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.13	0.38	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.38	0.00	-0.50	0.13	0.00	0.00	0.00
0.13	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00
0.38	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.13	0.38	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.38	0.00	-0.50	0.13	0.00	0.00	0.00
0.13	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00
0.38	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.13	0.38	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.38	0.00	-0.50	0.13	0.00	0.00	0.00
0.13	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00
0.38	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.13	0.38	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.38	0.00	-0.50	0.13	0.00	0.00	0.00
0.13	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00

Abspaltung der Anteile mit der Periodenlänge 16/8					
E					A
0.63	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
0.63	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00
0.63	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
0.63	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00
0.63	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
0.63	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00
0.63	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
0.63	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00
0.63	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
0.63	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00
0.63	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
0.63	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00
0.63	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
0.63	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00
0.63	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
0.63	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00

Fig. 18 arbiträre binäre Sequenz