

①9



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

①1 CH 669 048 A5

⑤1 Int. Cl.4: G 01 R 27/26
G 01 R 17/02

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

// G 01 G 9/00, G 01 L 1/14

①2 PATENTSCHRIFT A5

②1 Gesuchsnummer: 489/86

⑦3 Inhaber:
Mettler Instrumente AG, Greifensee

②2 Anmeldungsdatum: 07.02.1986

②4 Patent erteilt: 15.02.1989

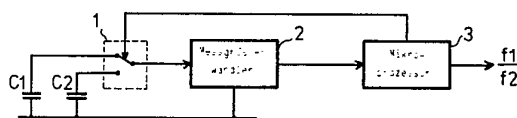
④5 Patentschrift
veröffentlicht: 15.02.1989

⑦2 Erfinder:
Doorenbosch, Frank, Dr., Uster

⑤4 Verfahren zur Messung des Verhältnisses einer messgrößenabhängigen Kapazität zu einer Referenzkapazität und Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

⑤7 Die Messung erfolgt durch Umwandlung der Kapazitätswerte in eine Signalschwingung und Berechnung des Verhältnisses der Frequenzwerte. Die beiden Kapazitäten (C1, C2), beispielsweise eines kapazitiven Kraftsensoren, werden mit einer um Grössenordnungen kleineren Frequenz (10 Hz) als die mittlere Frequenz (16 kHz) der Signalschwingung abwechselnd in den Eingangskreis eines Messgrössenwandlers (2) eingeschaltet. Dabei werden die Frequenzwerte (f1, f2) der nacheinander anfallenden Signalschwingungen durch Auszählen der Perioden in einem der jeweiligen Einschaltdauer (100 ms) einer Kapazität entsprechend festgelegten Zeitraum gemessen.

Unter Verwendung eines Kippschwingungserzeugers mit der zu messenden Kapazität als frequenzbestimmender Grösse, bei dem jeweils nur ein mittlerer Rampenteil der Ladespannung an der Kapazität für die Messung ausgenutzt wird, lassen sich mit diesem Verfahren hohe Messgenauigkeiten erreichen.



PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Messung des Verhältnisses einer messgrößenabhängigen Kapazität zu einer Referenzkapazität durch Umwandlung der Kapazitätswerte in Frequenzwerte einer Signalschwingung und Ermittlung des Verhältnisses der Frequenzwerte, dadurch gekennzeichnet, dass die beiden Kapazitäten mit einer um Größenordnungen kleineren Frequenz als die mittlere Frequenz der Signalschwingung abwechselnd in den Eingangskreis eines Messgrößenwandlers eingeschaltet werden, dass die Frequenzwerte der nacheinander anfallenden Signalschwingungen durch Auszählen der Perioden in einem der jeweiligen Einschaltdauer einer Kapazität entsprechend festgelegten Zeitraum gemessen werden und dass das Verhältnis der gemessenen Frequenzwerte durch Berechnung ermittelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die zu messende Kapazität periodisch aufgeladen und entladen und die Änderungsgeschwindigkeit der Lade- oder Entladespannung durch die Frequenz einer periodischen Signalschwingung dargestellt wird, wobei als Mass für die Änderungsgeschwindigkeit der Lade- bzw. Entladespannung die Zeitspanne zwischen zwei Zeitpunkten dient, in denen die Spannung an der Kapazität einen unteren und einen oberen Schwellwert durchläuft, dadurch gekennzeichnet, dass für die Messung der Änderungsgeschwindigkeit der Lade- bzw. Entladespannung eine Zeitspanne (t_m) gewählt wird, die kleiner ist als die Dauer (t_l) einer Lade- bzw. Entladephase.

3. Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, bei der der Messgrößenwandler (2) einen Kippschwingungserzeuger mit der zu messenden Kapazität als frequenzbestimmender Grösse aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass im Eingangskreis des Kippschwingungserzeugers ein Umschalter (1) zum abwechselnden Einschalten der zu messenden Kapazitäten (C_1 , C_2) und am Ausgang derselben ein Mikroprozessor (3) vorgesehen ist, der den Umschalter steuert und der Mittel zur Erfassung der Frequenzwerte der vom Kippschwingungserzeuger gelieferten Signalschwingungen und zur Berechnung des Frequenzverhältnisses aufweist.

4. Einrichtung nach Anspruch 3 zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 2, bei der der Kippschwingungserzeuger eine Lade- und eine Entladeschaltung (I_1 , I_2 , S_1) für die zu messende Kapazität (C) aufweist, sowie eine erste, zwei Schaltschwellen aufweisende Schwellertschaltung (K_1 , S_2), welche die Ladeschaltung periodisch ein- und ausschaltet, wenn die Spannung an der Kapazität die untere bzw. obere Schaltschwelle (Ur_1 , Ur_5) erreicht, dadurch gekennzeichnet, dass eine zweite Schwellertschaltung (K_2 , S_3 , S_4 , S_5) mit wenigstens zwei weiteren Schaltschwellen (Ur_2 , Ur_4) für die Lade- bzw. Entladespannung vorgesehen ist, welche weiteren Schaltschwellen wertmässig zwischen den beiden Schaltschwellen der ersten Schwellertschaltung liegen, dass die zweite Schwellertschaltung einen Rechteckimpulsgenerator (IZ , FF) umfasst, der wenigstens ein Rechtecksignal erzeugt, bei dem die Länge der Impulse oder der Impulspausen durch die Zeitpunkte bestimmt ist, in denen die Spannung an der Kapazität zwei zeitlich benachbarte Schaltschwellen (Ur_2 , Ur_4) der zweiten Schwellertschaltung gleichsinnig durchläuft, wobei jeweils die Länge eines Impulses oder einer Impulspause ein Mass für die Änderungsgeschwindigkeit der Ladespannung darstellt, und dass der Rechteckimpulsgenerator einen Schwingungsgenerator (DS) zur Erzeugung einer Dreieckschwingung steuert, welcher den Lade- oder den Entladestrom der Ladeschaltung so regelt, dass das Tastverhältnis des Rechtecksignals konstant, insbesondere 1 ist.

5. Einrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Schwellertschaltung einen Komparator (K_2) aufweist, an dessen Eingängen einerseits die Spannung an der Kapazität (C) und andererseits jeweils eine einen Schwellwert darstellende Referenzspannung (Ur_2 , Ur_4) wirksam sind und der an seinem Ausgang jeweils einen Impuls abgibt, wenn die

Ladespannung die Referenzspannung überschreitet, dass ferner an den Ausgang des Komparators ein Impulszähler (IZ) angeschlossen ist, der mehrere Ausgänge (0, 1, 2) aufweist, die in der Reihenfolge der innerhalb einer Ladeperiode aufeinanderfolgenden Eingangsimpulse aktiviert werden und Impulse abgeben, deren Dauer durch zwei aufeinanderfolgende Eingangsimpulse begrenzt ist, dass ferner den Ausgängen des Impulszählers Schalter (S_3 , S_4 , S_5) einzeln zugeordnet sind, die während der Dauer der betreffenden Ausgangsimpulse geschlossen sind und dabei jeweils eine Referenzspannung an den betreffenden Eingang des Komparators legen, welche den nächstfolgenden Schwellwert darstellt, und dass der Schwingungsgenerator (DS) zur Erzeugung einer Dreieckschwingung an jenen Ausgang (2) des Impulszählers (IZ) angeschlossen ist, der jeweils den letzten Impuls innerhalb einer Ladeperiode (t_l) abgibt.

6. Einrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Schwellertschaltung (K_2 , S_2 , S_3 , S_4) einen wertmässig in der Mitte zwischen den beiden Schwellwerten (Ur_1 , Ur_5) der ersten Schwellertschaltung (K_1 , S_2) liegenden Schwellwert aufweist und dass jener Ausgang (1) des Impulszählers (IZ), der aktiviert wird, wenn die Ladespannung diesen mittleren Schwellwert überschreitet, über einen Impulsformer (IF) mit einer Tastspeicherschaltung (TS) verbunden ist, welche den Pegel der Dreieckschwingung als Regelgrösse für die Steuerung des Stromes (I_1) der Lade- oder Entladeschaltung ermittelt.

7. Einrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Schwellertschaltung einen Komparator (K_2) aufweist, an dessen Eingängen einerseits die Spannung an der Kapazität (C) und andererseits jeweils eine von zwei, einen unteren und einen oberen Schwellwert darstellenden Referenzspannungen (Ur_2 , Ur_4) wirksam sind und dessen Ausgangssignal eine Flip-Flop-Schaltung (FF) steuert, und dass das von der Flip-Flop-Schaltung erzeugte Rechtecksignal einerseits einen Umschalter (S_8) für den Wechsel der beiden Referenzspannungen und andererseits den Schwingungsgenerator (DS) zur Erzeugung einer Dreieckschwingung steuert.

BESCHREIBUNG

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung des Verhältnisses einer messgrößenabhängigen Kapazität zu einer Referenzkapazität durch Umwandlung der Kapazitätswerte in Frequenzwerte einer Signalschwingung und Ermittlung des Verhältnisses der Frequenzwerte. Das Verfahren ist beispielsweise anwendbar bei Waagen mit kapazitivem Kraftsensor.

Die Umwandlung von Kapazitätswerten in Frequenzwerte einer Signalschwingung ist an sich bekannt. In der Regel dient als Messgrößenwandler ein Schwingungserzeuger, insbesondere ein Kippschwingungserzeuger mit anschliessendem Schwingungsformer, dessen frequenzbestimmende Grösse die zu messende Kapazität ist und dessen Ausgangsfrequenz dem Kapazitätswert umgekehrt proportional ist (DE 30 11 594 A1, US 4 295 091). Für die Bestimmung von Kapazitätsverhältnissen oder -differenzen werden nach bekannten Verfahren die Kapazitätswerte der zu vergleichenden Kapazitäten gleichzeitig gemessen, wobei aus den sich ergebenden Frequenzwerten das Verhältnis bzw. die Differenz gebildet wird (US 4 392 382 und 4 398 426, DE 29 21 614 A1), oder es wird eine Signalschwingung erzeugt, deren Frequenz durch die zu vergleichenden Kapazitäten zugleich bestimmt wird und ein Mass für die Differenz der Kapazitätswerte bildet (DE 23 46 307). Zur Durchführung dieser Verfahren sind im ersten Fall zwei separate Messgrößenwandler und im zweiten Fall die für die Frequenzbestimmung massgeblichen Teile eines im übrigen gemeinsamen Messgrößenwandlers zweifach vorhanden. Dieser Umstand führt infolge des im allgemeinen unterschiedlichen Verhaltens

(z.B. Temperatursprung) zweier an sich gleich aufgebauter elektronischer Schaltungen zu Ungenauigkeiten in der Vergleichsmessung. Zudem ist die Kompensation solcher Systemfehler schwierig und aufwendig.

Die Erfindung hat zum Ziel, die Messgenauigkeit bei der Kapazitätsverhältnismessung nach dem eingangs genannten Verfahren zu erhöhen.

Das erfindungsgemässe Verfahren besteht darin, dass die beiden Kapazitäten mit einer um Grössenordnungen kleineren Frequenz als die mittlere Frequenz der Signalschwingung abwechselnd in den Eingangskreis eines Messgrössenwandlers eingeschaltet werden, dass die Frequenzwerte der nacheinander anfallenden Signalschwingungen durch Auszählen der Perioden in einem der jeweiligen Einschaltdauer einer Kapazität entsprechend festgelegten Zeitraum gemessen werden und dass das Verhältnis der gemessenen Frequenzwerte durch Berechnung ermittelt wird.

Die Verwendung eines einzigen Messgrössenwandlers bedeutet, dass für die Messung der beiden Kapazitäten ein und dieselbe Schaltungsanordnung benützt wird, wodurch Systemfehler vermieden werden. Langzeitänderungen (Drifteffekte, Niederfrequenzrauschen) haben auf das Messergebnis keinen Einfluss, da für die Messung eines Kapazitätswertes eine Messzeit von z.B. 100 ms ausreicht.

Es ist zwar an sich bekannt, die beiden Kapazitäten abwechselnd in den Eingangskreis eines Messgrössenwandlers einzuschalten, um Systemfehler zu vermeiden. Bei einer bekannten Lösung dieser Art (DE 35 09 507 A1) werden die Kapazitäten nacheinander einmal aufgeladen und entladen, wobei das durch die Dauer der Umladeperioden sich ergebende Tastverhältnis einer von den Umkehrpunkten der Spannungen an den Kapazitäten abgeleiteten Rechteckschwingung als Mass für das Kapazitätsverhältnis dargestellt wird. Es handelt sich dabei um eine innerhalb jeweils einer Umladeperiode vorzunehmende Kurzzeitmessung, an die im Vergleich zu einer Frequenzmessung keine hohen Ansprüche hinsichtlich der Messgenauigkeit gestellt werden können, insbesondere wegen der kurzen Einschwingzeiten und den mit der Umschaltung verbundenen Verzögerungszeiten, die in das Messresultat voll eingehen. Eine Erhöhung der Einschaltdauer auf jeweils ein Mehrfaches der Dauer einer Umladeperiode brächte bei diesem Messverfahren keine Vorteile, da sich die verfahrensbedingten Messfehler in jeder Umladeperiode wiederholen und summieren.

Zur Ermittlung eines Frequenzwertes wird die Periodendauer der Signalschwingung gemessen, wobei durch die Auszählung der Perioden über einen bestimmten Zeitraum ein Mittelwert der Periodendauer gewonnen wird. Dieses Verfahren liefert genauere Ergebnisse als beispielsweise die Messung der Umladezeit oder des Verhältnisses der Ladezeit zur Umladezeit beim sogenannten Kondensator-Umladeverfahren. Damit der Einschwingvorgang zu Beginn der Einschaltdauer einer Kapazität auf die Messgenauigkeit keinen Einfluss hat, wird der eigentliche Messvorgang vorzugsweise erst dann eingeleitet, wenn die Signalschwingung einen stationären Schwingungszustand erreicht hat. Dies ist erfahrungsgemäss bei einer mittleren Schwingungsfrequenz von z.B. 16 kHz nach einem Bruchteil (z.B. 1%) der Einschaltdauer von beispielsweise 100 ms der Fall, so dass der grösste Teil (z.B. 99%) der Einschaltdauer als Messzeit zur Verfügung steht.

Der eigentliche Messvorgang besteht in an sich bekannter Weise darin, dass die zu messende Kapazität periodisch aufgeladen und entladen wird und die vom Kapazitätswert abhängige Änderungsgeschwindigkeit der Lade- oder Entladespannung (bzw. des Lade- oder Entladestromes) durch die Frequenz einer periodischen Signalschwingung dargestellt wird. Als Mass für die Änderungsgeschwindigkeit der Lade- bzw. Entladespannung dient dabei die Zeitspanne zwischen zwei Zeitpunkten, in denen die Spannung an der Kapazität einen unteren und einen oberen

Schwellwert durchläuft. Für den periodischen Wechsel von Lade- und Entladephase dient üblicherweise eine Schwellwertschaltung, welche jeweils anspricht, wenn die Spannung an der Kapazität die Schwellwerte erreicht. Mit der Schwellwertschaltung kann ein Rechtecksignal so gesteuert werden, dass die Länge der Impulse oder der Impulspausen der Zeitspanne entspricht, welche ein Mass für die Änderungsgeschwindigkeit der Lade- bzw. Entladespannung bildet. Bei der Auswertung des Rechtecksignals ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Schwellwertschaltung Schaltverzögerungen aufweist, welche das Rechtecksignal in bezug auf die Anfangs- und Endzeiten der Impulse beeinflussen können. Bei bekannten Verfahren wird in naheliegender Weise die Steuerung des Rechtecksignals von den Richtungswechseln der Spannung an der Kapazität abgeleitet und somit die ganze Dauer einer Lade- bzw. Entladephase in die Messung einbezogen. Infolge des Richtungswechsels der Spannung an der Kapazität verläuft die Spannungsänderung beim Erreichen des unteren und des oberen Schwellwertes in verschiedenen Richtungen. Es hat sich nun gezeigt, dass die von der Umschaltung am oberen und unteren Schwellwert herrührenden Schaltverzögerungen sich addieren und das Rechtecksignal in frequenzbestimmender Weise beeinflussen, wenn die beiden Schwellwerte von der Spannung an der Kapazität mit gegensinnigem Verlauf erreicht werden, wie das bei der beschriebenen bekannten Lösung des EP 0 149 277 A1 der Fall ist, dass aber die beiden Schaltverzögerungen sich kompensieren, wenn die Lade- oder Entladespannung zwei unterschiedliche Schwellswellen gleichsinnig durchläuft.

Aus diesem Grund wird gemäss einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemässen Verfahrens für die Messung der Änderungsgeschwindigkeit der Lade- bzw. Entladespannung eine Zeitspanne gewählt, die kleiner ist als die Dauer einer Lade- bzw. Entladephase. Durch dieses Verfahren mit gegenüber der Lade- bzw. Entladephase zeitlich reduzierter Messphase wird ausser einer Kompensation der genannten Schaltverzögerungen erreicht, dass der praktisch undefinierbare Spannungsverlauf im Bereich der Richtungsumkehr nicht in die Messung einbezogen wird. Auf diese Weise lässt sich die Messgenauigkeit also weiter erhöhen.

Die Erfindung betrifft auch eine Einrichtung zur Durchführung des erfindungsgemässen Verfahrens. Diese Einrichtung hat einen Messgrössenwandler, der einen Kippschwingungserzeuger mit der zu messenden Kapazität als frequenzbestimmender Grösse aufweist, und ist dadurch gekennzeichnet, dass im Eingangskreis des Kippschwingungserzeugers ein Umschalter zum abwechselnden Einschalten der zu messenden Kapazitäten und am Ausgang derselben ein Mikroprozessor vorgesehen ist, der den Umschalter steuert und der Mittel zur Erfassung der Frequenzwerte der vom Kippschwingungserzeuger gelieferten Signalschwingungen und zur Berechnung des Frequenzverhältnisses aufweist.

Der Messgrössenwandler ist beispielsweise mit einem Kippschwingungserzeuger ausgerüstet, der in bekannter Weise eine Lade- und eine Entladeschaltung für die zu messende Kapazität aufweist, sowie eine erste, zwei Schaltschwellen aufweisende Schwellwertschaltung, welche die Ladeschaltung periodisch ein- und ausschaltet, wenn die Spannung an der Kapazität die untere bzw. obere Schaltschwelle erreicht (EP 0 149 277 A1). Eine bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemässen Einrichtung zur Durchführung des beschriebenen Verfahrens mit gegenüber der Lade- bzw. Entladephase reduzierter Messphase besteht nun darin, dass eine zweite Schwellwertschaltung mit wenigstens zwei weiteren Schaltschwellen für die Lade- bzw. Entladespannung vorgesehen ist, welche weiteren Schaltschwellen wertmässig zwischen den beiden Schaltschwellen der ersten Schwellwertschaltung liegen, dass die zweite Schwellwertschaltung einen Rechteckimpulsgenerator umfasst, der wenigstens ein Rechtecksignal erzeugt, bei dem die Länge der Impulse

oder der Impulspausen durch die Zeitpunkte bestimmt ist, in denen die Spannung an der Kapazität zwei zeitlich benachbarte Schaltschwellen der zweiten Schwellertschaltung gleichsinnig durchläuft, wobei jeweils die Länge eines Impulses oder einer Impulspause ein Mass für die Änderungsgeschwindigkeit der Lade- bzw. Entladespannung darstellt, und dass der Rechteckimpulsgenerator einen Schwingungsgenerator zur Erzeugung einer Dreieckschwingung steuert, welche den Ladestrom der Ladeschaltung so regelt, dass das Verhältnis von Impulspause zu Impulsdauer des Rechtecksignals konstant, insbesondere 1 ist. Die Regelung des Ladestroms zur Erzielung eines konstanten Tastverhältnisses ist notwendig, um eine konstante Periodendauer und damit eine genaue Frequenzmessung zu gewährleisten.

Nachstehend wird das erfindungsgemässe Verfahren anhand der Zeichnung, welche Ausführungsbeispiele der erfindungsgemässen Einrichtung darstellt, näher erläutert. In der Zeichnung bedeuten:

Fig. 1 Blockschaltbild der Einrichtung zur Kapazitätsverhältnismessung nach der Erfindung,

Fig. 2 Vereinfachtes Schaltungsschema eines Messgrössenwandlers gemäss einer ersten Ausführungsform,

Fig. 3 Diagramm des zeitlichen Verlaufs elektrischer Grössen an verschiedenen Schaltungspunkten des Messgrössenwandlers nach Fig. 2,

Fig. 4 Vereinfachtes Schaltungsschema eines Messgrössenwandlers gemäss einer zweiten Ausführungsform und

Fig. 5 Diagramm des zeitlichen Verlaufs elektrischer Grössen an verschiedenen Schaltungspunkten des Messgrössenwandlers nach Fig. 4.

Die Messeinrichtung nach Fig. 1 dient zur laufenden Messung des Verhältnisses der Kapazitäten C_1 und C_2 , deren Kapazitätswert in der Grössenordnung von beispielsweise 10 pF liegt, wobei C_1 eine messgrössenabhängige Kapazität und C_2 eine Referenzkapazität beispielsweise eines kapazitiven Kraftsensors sind. Durch einen elektronischen Umschalter 1 werden die beiden Kapazitäten C_1 und C_2 abwechselnd in den Eingangskreis eines Messgrössenwandlers 2 eingeschaltet, der einen Kipp-schwingungserzeuger mit der jeweils zu messenden Kapazität als frequenzbestimmender Grösse aufweist. Die jeweils eingeschaltete Kapazität wird dabei periodisch aufgeladen und entladen, wobei die Änderungsgeschwindigkeit der Lade- oder Entladespannung durch die Frequenz einer Signalschwingung dargestellt wird. Die jeweils nacheinander anfallenden Signalschwingungen mit den Kapazitätswerten entsprechenden Frequenzwerten f_1 und f_2 werden zur Auswertung einem Mikroprozessor 3 direkt oder über einen nicht dargestellten Frequenzzähler zugeführt. Dieser enthält Mittel zur Erfassung der Frequenzwerte und zur Berechnung des Frequenzverhältnisses f_1 / f_2 . Die jeweilige Frequenz wird durch Auszählen der Perioden in einem der Einschalt-dauer einer Kapazität entsprechend festgelegten Zeitraum ermittelt. Zudem steuert der Mikroprozessor 3 den Umschalter 1 mit einer Umschaltfrequenz von z.B. 10 Hz, die um Grössenordnungen kleiner ist als die mittlere Frequenz der Signalschwingung, welche beispielsweise 16 kHz beträgt. Die Kapazitäten C_1 und C_2 sind also abwechselnd während je etwa 100 ms in den Eingangskreis des Messgrössenwandlers 2 eingeschaltet. Bei der nachfolgenden Beschreibung des Messgrössenwandlers ist der Umschalter 1 nicht dargestellt.

Der Kipp-schwingungserzeuger des Messgrössenwandlers 2 weist in beiden Ausführungsbeispielen nach den Fig. 2 und 4 eine Lade- und eine Entladeschaltung für die zu messende Kapazität C (C_1 oder C_2) auf, bestehend aus einer variablen Stromquelle I_1 , einer Konstantstromquelle I_2 und einem elektronischen Umschalter S_1 ; ferner eine erste Schwellertschaltung mit zwei Schaltschwellen, bestehend aus einem Komparator K_1 und einem elektronischen Umschalter S_2 , über den dem Komparator K_1 die Referenzspannungen Ur_1 und Ur_5 wahlweise zu-

geführt werden. Das Ausgangssignal des Komparators K_1 steuert die beiden Umschalter S_1 und S_2 .

In der in den Fig. 2 und 4 dargestellten Schaltung der Umschalter S_1 und S_2 wird die Kapazität C durch die Stromquelle I_1 entladen, wobei vorausgesetzt sei, dass die Stromquelle I_1 stärker ist als die Stromquelle I_2 . Sobald die Spannung U_c an der Kapazität C den Referenzpegel Ur_1 erreicht, steuert der Komparator K_1 die beiden Umschalter S_1 und S_2 in die andere Schaltstellung. Die Kapazität C wird nun durch die Stromquelle I_2 geladen, bis die Ladespannung U_c den Referenzpegel Ur_5 erreicht, worauf die Umschalter S_1 und S_2 wieder in ihre ursprüngliche Schaltstellung gelangen. Den Verlauf der resultierenden Sägezahnspannung U_c zeigt Fig. 3 bzw. Fig. 5.

Als Mass für die Änderungsgeschwindigkeit der Ladespannung dient die Zeitspanne zwischen zwei Zeitpunkten, in denen die Spannung U_c an der Kapazität C einen unteren und einen oberen Schwellwert durchläuft. Damit nun der unkontrollierbare Verlauf der Sägezahnspannung an ihren Umkehrpunkten auf das Messergebnis keinen Einfluss haben kann, wird für die Messung der Änderungsgeschwindigkeit der Ladespannung eine Zeitspanne t_m gewählt, die kleiner ist als die Dauer t_l einer Lade- (Fig. 3 und 5). Selbstverständlich kann in analoger Weise auch die Änderungsgeschwindigkeit der Entladespannung anstelle derjenigen der Ladespannung gemessen werden.

Zur Durchführung dieses Messverfahrens mit gegenüber der Lade- (Fig. 3) oder Entlade- (Fig. 5) phase t_l zeitlich reduzierter Messphase t_m ist beim Messgrössenwandler in der Ausführungsform nach Fig. 2 eine zweite Schwellertschaltung mit drei weiteren Schaltschwellen für die Ladespannung vorgesehen, welche weiteren Schaltschwellen wertmässig zwischen den beiden Schaltschwellen Ur_1 und Ur_5 der ersten Schwellertschaltung mit dem Komparator K_1 liegen. Die zweite Schwellertschaltung weist einen Komparator K_2 auf, an dessen Eingängen einerseits die Spannung U_c an der Kapazität C und andererseits jeweils eine einen Schwellwert darstellende Referenzspannung Ur_2 , Ur_3 bzw. Ur_4 wirksam sind und der an seinem Ausgang jeweils einen Impuls abgibt, wenn die Ladespannung einen Referenzpegel überschreitet. An den Ausgang des Komparators K_2 ist ein Rechteckimpulsgenerator in Form eines Impulszählers IZ angeschlossen, der drei Ausgänge 0, 1 und 2 aufweist, die in der Reihenfolge der innerhalb einer Ladeperiode aufeinanderfolgenden Eingangsimpulse aktiviert werden und Impulse abgeben, deren Dauer durch zwei aufeinanderfolgende Eingangsimpulse begrenzt ist. Den Ausgängen 0, 1 und 2 des Impulszählers IZ sind elektronische Schalter S_4 , S_5 und S_3 einzeln zugeordnet, die jeweils während der Dauer der betreffenden Ausgangsimpulse des Impulszählers IZ geschlossen sind und eine Referenzspannung an den betreffenden Eingang des Komparators K_2 legen, welche den nächstfolgenden Schwellwert darstellt. Während jeder Lade- (Fig. 3) oder Entlade- (Fig. 5) phase stehen so an den Ausgängen 0, 1 und 2 in dieser Reihenfolge Impulse, so dass die Schalter S_4 , S_5 und S_3 nacheinander geschlossen werden und jeweils die betreffenden Referenzspannungen Ur_3 , Ur_4 und Ur_2 am Komparator K_2 nacheinander zum Einsatz bringen (Fig. 3).

Die Länge t_m der Impulspause zwischen den am Ausgang w des Impulszählers IZ auftretenden Impulsen ist durch Zeitpunkte bestimmt, in denen die Spannung U_c an der Kapazität C zwei zeitlich benachbarte Schaltschwellen Ur_2 und Ur_4 der zweiten Schwellertschaltung gleichsinnig durchläuft, und bildet damit ein genaues Mass für die Änderungsgeschwindigkeit der Ladespannung und folglich für den Kapazitätswert der Kapazität C .

Der Messgrössenwandler nach Fig. 2 umfasst in an sich bekannter Weise eine Regelschaltung, welche den Strom der variablen Stromquelle I_1 , im vorliegenden Fall also den Entladestrom der Kapazität C so regelt, dass das Tastverhältnis der am Ausgang des Impulszählers IZ auftretenden Rechteckschwingung, welche das Ausgangssignal des Messgrössenwandlers darstellt, konstant, insbesondere 1 ist. Bei konstantem Tastverhält-

nis ist nicht nur die Dauer der Impulspause, sondern auch die Frequenz des Ausgangssignals ein Mass für die Änderungsgeschwindigkeit der Spannung U_c an der Kapazität C . Diese Frequenz ist lediglich abhängig von der Kapazität C , der Konstantstromquelle I_2 und den Referenzspannungen U_{r2} und U_{r4} .

Die Regelschaltung umfasst einen Schwingungsgenerator DS zur Erzeugung einer Dreieckschwingung, welcher aus einer Kapazität C_3 , zwei Konstantstromquellen und einem elektronischen Umschalter S_6 besteht. Der Umschalter S_6 wird vom Ausgangssignal des Messgrössenwandlers (Ausgang 2 des Impulszählers I_Z) gesteuert und nimmt während der Impulspausen des Ausgangssignals die in Fig. 3 gezeigte Schaltstellung ein. In dieser Phase wird die Kapazität C_3 durch die Stromquelle I_3 , die etwa doppelt so stark ist wie die Stromquelle I_4 , entladen. Während der Impulsdauer des Ausgangssignals befindet sich der Umschalter S_6 in der anderen Schaltstellung, wobei die Kapazität C_3 durch die Stromquelle I_4 geladen wird. Solange das Tastverhältnis des Ausgangssignals 1 ist, hat die Dreieckschwingung einen konstanten Spannungspegel (Fig. 3).

Veränderungen dieses Spannungspegels werden nun mittels einer Tastspeicherschaltung TS erfasst, der eine Kapazität C_4 zugeordnet ist und welche jeweils in der Mitte jeder Ladeperiode wirksam ist. Zu diesem Zweck ist die Referenzspannung U_{r3} vorgesehen, welche eine wertmässig in der Mitte zwischen den beiden Schaltschwellen U_{r1} , U_{r5} der ersten Schwellertschaltung liegende Schaltschwelle darstellt. Wenn die Ladespannung U_c an der Kapazität C diese Schaltschwelle U_r überschreitet, so wird der Ausgang 1 des Impulszählers I_Z aktiviert. Der dabei entstehende Impuls wird einem Impulsformer IF zugeführt, der einen von der Anstiegsflanke des Eingangsimpulses abgeleiteten Kurzzeitimpuls konstanter Dauer abgibt, welcher zur Steuerung eines elektronischen Schalters S_7 dient. Dieser Schalter S_7 verbindet für die Dauer des Steuerimpulses den Schwingungsgenerator DS mit der Tastspeicherschaltung TS , wobei der abgetastete Wert des Spannungspegels der Dreieckschwingung auf die Tastspeicherschaltung TS übertragen wird. Mit dem Ausgangssignal der Tastspeicherschaltung TS wird die Stromstärke der Stromquelle I_1 so gesteuert, dass der Spannungspegel der Dreieckschwingung nach einer gewissen Einschwingzeit (etwa 1 ms) des Messgrössenwandlers einen konstanten Wert annimmt.

Die Arbeitsweise der beschriebenen Regelschaltung lässt sich z.B. an der Wirkung erläutern, welche die Einschaltung eines ohmschen Widerstandes in Reihe zur Kapazität C zur Folge hat. Solange dieser Widerstand den Wert Null hat, verläuft die Sägezahnspannung U_c gemäss der Darstellung in der linken Hälfte der Fig. 3, während in der rechten Hälfte dieser Figur die Änderungen im zeitlichen Spannungsverlauf sichtbar sind, welche entstehen, wenn der Widerstand einen endlichen Wert an-

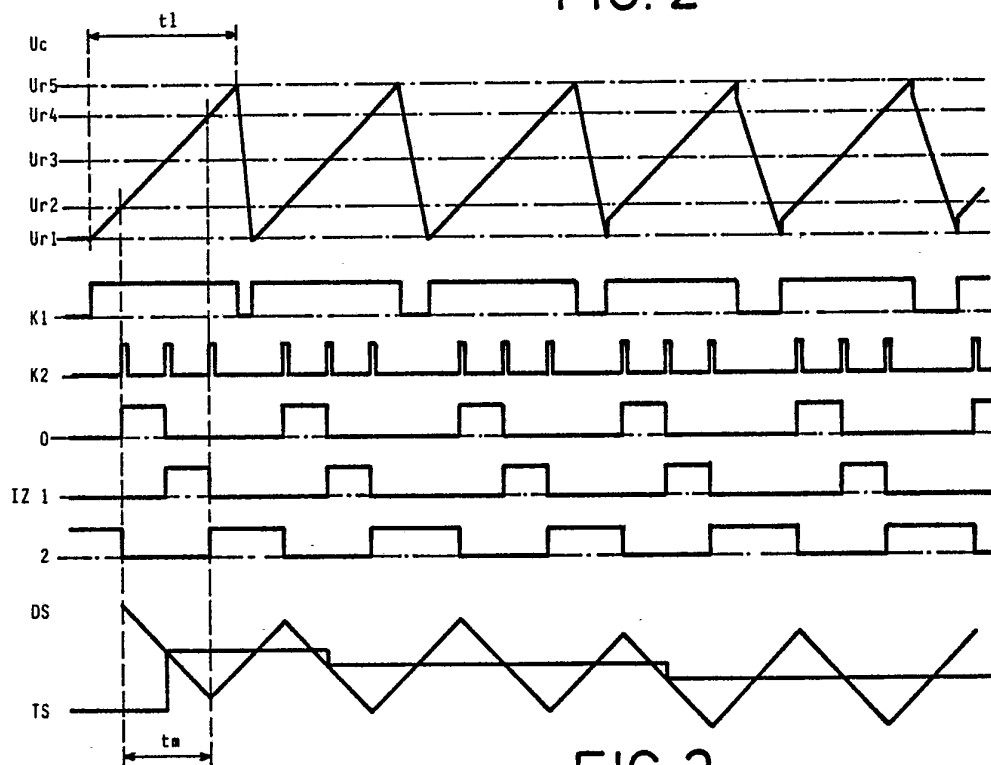
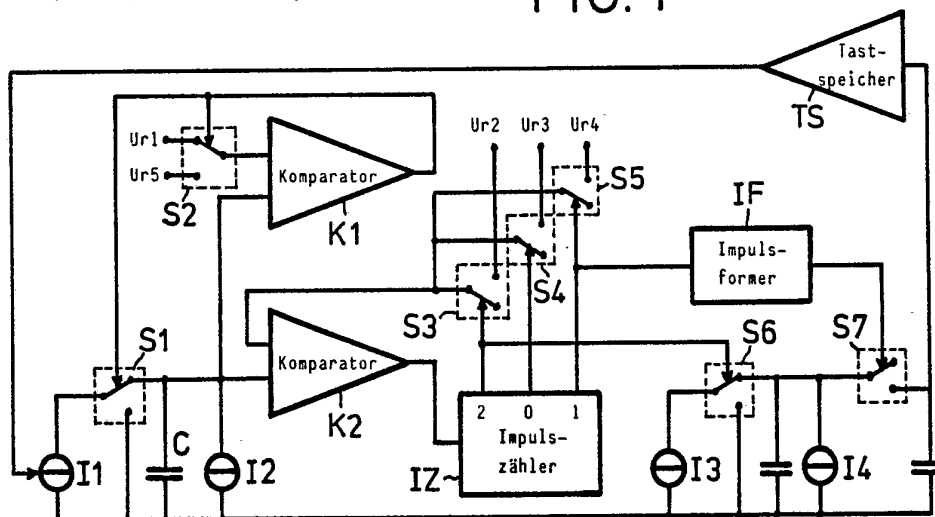
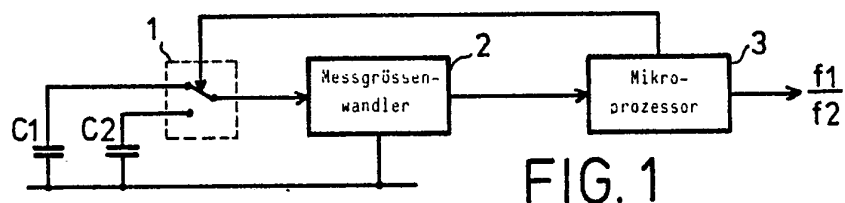
nimmt. Beim Übergang vom einen in den anderen Zustand ändert sich die Frequenz der Sägezahnspannung, aber auch das Tastverhältnis des Ausgangssignals und damit der Spannungspegel der Dreieckschwingung DS . Durch die Regelschaltung wird dieser Spannungspegel ausgeglichen und so Frequenz und Tastverhältnis auf die ursprünglichen Werte zurückgeführt.

Der Messgrössenwandler nach Fig. 4 arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie derjenige nach Fig. 2, eignet sich aber besser für eine Ausführung in Form einer integrierten Schaltung. Der Kippschwingungserzeuger ist im wesentlichen gleich aufgebaut, mit dem Unterschied, dass der Rechteckimpulsgenerator der zweiten Schwellertschaltung eine vom Komparator K_2 angesteuerte Flip-Flop-Schaltung FF ist, welche den Umschalter S_8 für den Wechsel der beiden im Komparator K_2 wirksamen Referenzspannungen U_{r2} und U_{r4} steuert und das Ausgangssignal des Messgrössenwandlers liefert. Die Dauer der Impulspause dieses Rechtecksignals ist ein Mass für den Kapazitätswert der Kapazität C . Zudem steuert die Flip-Flop-Schaltung FF in gleicher Weise wie bei der Ausführungsform nach Fig. 2 einen Schwingungsgenerator DS zur Erzeugung einer Dreieckschwingung, welche für die Regelung der variablen Stromquelle I_1 benützt wird. Wiederum dient diese Regelung dazu, das Tastverhältnis des Rechtecksignals auf dem Wert 1 konstant zu halten, so dass die Frequenz des Ausgangssignals ein Mass für den Kapazitätswert der Kapazität C darstellt.

Die Regelung bewirkt, dass die Änderungsgeschwindigkeit der Entladespannung an der Kapazität C in Abhängigkeit vom Mittelwert der Dreieckschwingung verändert wird. Unter dem Einfluss der Dreieckschwingung am Steuereingang der Stromquelle I_1 tritt auch eine Verzerrung im Verlauf der Sägezahnspannung auf, welche aber das Messverfahren nicht weiter beeinflusst.

Es kann unter Umständen zweckmässig sein, die Komparatoren K_1 und K_2 für einen Stromvergleich anstelle eines Spannungsvergleichs auszulegen. Diese Technik vereinfacht den Schaltvorgang für die Referenzspannungen. Im weiteren empfiehlt es sich, die zu messende Kapazität C nicht direkt an die Komparatoren K_1 und K_2 , sondern in an sich bekannter Weise in den Gegenkopplungskreis eines im Eingangskreis des Messgrössenwandlers vorgesehenen Operationsverstärkers einzuschalten, um den Einfluss von Streukapazitäten auf ein Minimum zu beschränken.

Mit dem beschriebenen Messverfahren unter Verwendung eines Messgrössenwandlers nach Fig. 2 oder 4 lassen sich bei der Kapazitätsverhältnismessung Genauigkeiten erzielen, die einer Auflösung von etwa 100 000 Punkten entsprechen. Bei Erhöhung der Messdauer lässt sich eine entsprechend höhere Auflösung erzielen.



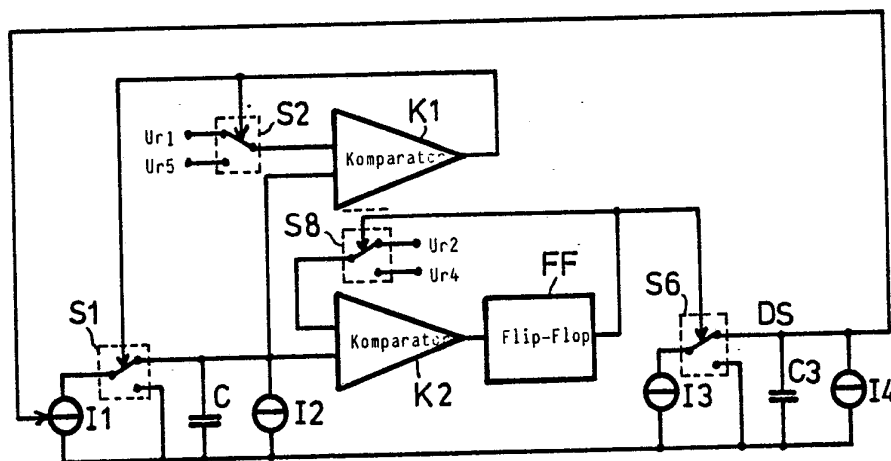


FIG. 4

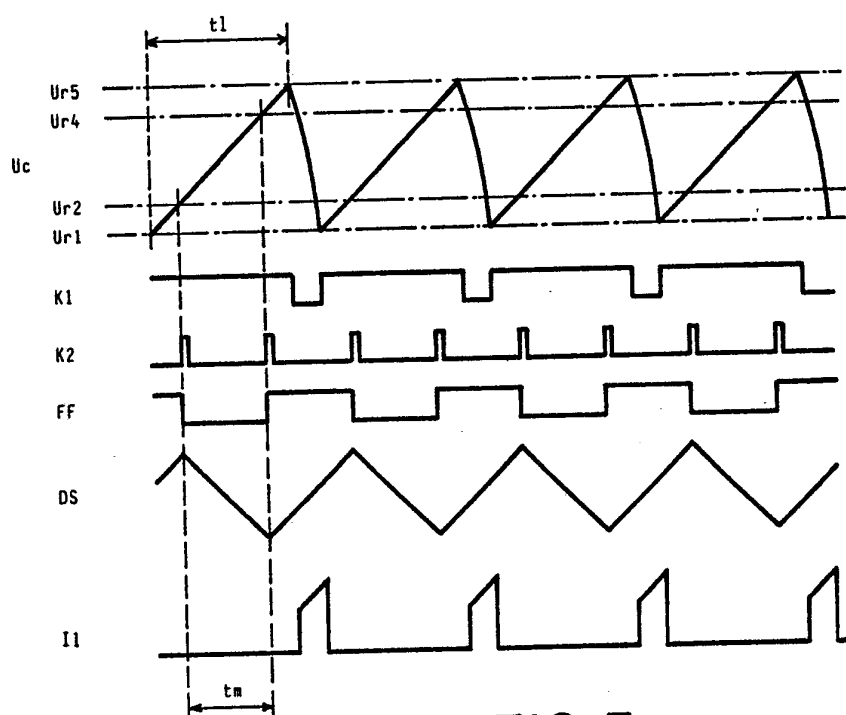


FIG. 5