

Bipolare digitale Schaltkreise der UdSSR in TTL-Struktur

Dipl.-Ing. KLAUS-PETER GÖHLER

Höhere Zuverlässigkeit, geringerer Platzbedarf und niedrige Preise sind Forderungen, die zur Entwicklung der integrierten Schaltungstechnik führten.

Insbesondere bei logischen Schaltungen der Datenverarbeitung und anderen Anwendungsgebieten hat sich der Einsatz integrierter Bauelemente schnell durchgesetzt. Von den verschiedensten Schaltungsarten in integrierter Technik kommt der bipolaren TTL- oder auch T²-Logik in Silizium-Planar-Epitaxie-Technik eine besondere Bedeutung zu. Die enge Zusammenarbeit mit der UdSSR ermöglicht der Geräteindustrie, neben den Reihen D 10 und D 20, weitere TTL-Schaltkreise einzusetzen.

Das Angebot sowjetischer TTL-Schaltkreise umfaßt gegenwärtig acht Serien, zu denen über 100 integrierte Schaltkreise gehören.

- Serie 106
- Serie 130
- Serie 133 und 155
- Serie 134
- Serie 136 und 158
- Serie 141

In der Tafel 1 sind die wichtigsten Vertreter der TTL-Reihen mit ihren Kurzdaten angeführt.

Serie 106

Die Schaltkreise dieser Serie sind in Flat-pack-Gehäusen (sowjetische Standardbezeichnung 101 CT-14-1) verpackt. Ihre Funktionsfähigkeit wird innerhalb des Temperaturbereiches von -60°C bis +125°C garantiert. Die Serie 106 umfaßt fünf Gruppen Expander und eine Gruppe J-K-Flip-Flops. Zu jeder Gruppe gehören 8 Schaltkreise, die sich nicht in der Funktion, sondern nur in einigen elektrischen Werten, wie Leistungsverbrauch, Verzögerungszeit und Eingangslastfaktor (fan-in), differenzieren. Die relativ geringen Verlustleistungen und niedrigen Verzögerungszeiten finden neben dem Einsatz in der Automatisierung besonders in der Rechentechnik Anwendung.

Elektrische Parameter der Serie 106:

Betriebsspannung: $5 V \pm 10\%$
 Ausgangsspannung „log 1“: $\geq 2,3 V$
 Ausgangsspannung „log 0“: $\leq 0,3 V$
 Ausgangslastfaktor (fan-out): 10
 Störabstand: 0,6 V

In der Tafel 1 wird aus jeder Gruppe der Serie 106 ein Vertreter mit den Maximalwerten der Verlustleistung und Ausschaltverzögerungszeit vorgestellt.

Serie 133/155

Mit Einführung der elektronischen Datenverarbeitung haben sich international einige TTL-Grundgatter zu einer vielseitig einsetzbaren Standardreihe entwickelt, zu der u. a. die Reihe D 10 vom VEB Kombinat Halbleiterwerk Frankfurt, die Reihen MH 74 und MH 54 von Tesla aus der ČSSR sowie die Serien 133 und 155 aus der UdSSR gehören.

Die beiden sowjetischen Serien enthalten gleiche logische Funktionen und unterscheiden sich nur im Gehäuse und im Betriebstemperaturbereich:

Serie 133:
 Flat-pack-Gehäuse (101 CT 14-1)
 Betriebstemperatur: $-60^\circ C \dots +125^\circ C$

Serie 155:
 Dual-in-line-Plastgehäuse (301 ПЛ 14-1)
 Betriebstemperatur: $-10^\circ C \dots +70^\circ C$

Elektrische Daten:

Betriebsspannung:
 $5 V \pm 10\%$ (Serie 133)
 $5 V \pm 5\%$ (Serie 155)
 max. Verlustleistung pro Gatter:
 25 mW
 max. Verzögerungszeit bei $C_{Last} = 15 nF$:
 31 ns (22 ns)

Störabstand:

0,9 V
 Fan-out:
 10 (30 für 1 AB 336/556)
 min. Eingangsstrom bei „log 0“:
 1,6 mA

min. Eingangsstrom bei „log 1“:
 0,07 mA (Serie 133)
 min. Eingangsstrom bei „log 1“:
 0,09 mA (Serie 155)
 min. Ausgangsspannung bei „log 0“:
 0,35 V (Serie 133)
 min. Ausgangsspannung bei „log 0“:
 0,4 V (Serie 155)
 max. Ausgangsspannung bei „log 1“:
 2,4 V

Verzögerungszeiten:

	max. Einschaltverzögerung (ns)	max. Ausschaltverzögerung (ns)
1 AB 331,		
1 AB 333...338:	12	22
1 AB 332,		
1 AP 331...333:	15	26
1 AB 552:	18	30
1 AB 551,		
1 AB 553...555:	15	30
1 AB 557...558:		
1 AB 556:	40	40
1 AP 551...552:	18	35
1 AP 553:	24	45

Die Schaltkreise werden auch selektiert mit $t_{pd1} = 22 ns$ angeboten. Die logischen Funktionen zu jedem Typ enthält die Tafel 1. Wie aus der Aufstellung ersichtlich, weist die Serie 133 neben einem erweiterten Temperaturbereich schnellere Zeiten der Signalverzögerung auf. Beide Serien werden bereits in verschiedenen Betrieben eingesetzt.

Erprobungsuntersuchungen der Serie 155

Im Auftrage des VEB Elektronikhandel Berlin – Zentrale Leitstelle für Applikation wurde vom VEB Kombinat Robotron, GFZ, Fachgebiet Geräte, Karl-Marx-Stadt eine größere Stückzahl sowjetischer bipolarer TTL-Schaltkreise der Serie 155 auf ihren praktischen Einsatz untersucht. Zur Verfügung standen aus dieser Serie die Schaltkreistypen 1 AB 551...554, 1 AB 556 und 1 AP 551. In der Tafel 2 sind die gemessenen Ergebnisse den Kennwerten der Datenblätter gegenübergestellt.

Abhängigkeit der Verzögerungszeiten von der Massekapazität:

Die Messung erfolgte nach dem Schaltungsaufbau Bild 1.

Für die gesamte Baureihe gibt das sowjetische Datenblatt einen Anstieg von

t_{pd0} : 4...5 ns/100 pF

t_{pd1} : 9 ns/100 pF (an Bild 2)

Diese Werte wurden durch Messungen bestätigt. Eine Belastungsänderung übt nahezu keinen Einfluß auf die Steilheit des Anstieges aus.

Abhängigkeit der Verzögerungszeiten von der Umgebungstemperatur:

Nach den Datenblättern (s. a. Bild 3) steigt die Ausschaltverzögerung t_{pd1} zwischen 25°C und 70°C um etwa 1,78 ns/10 grad

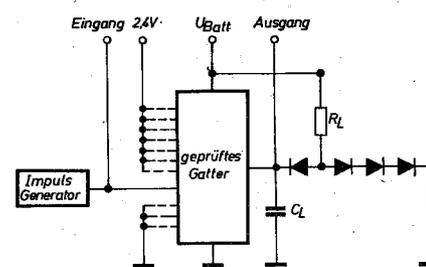


Bild 1: Prüfschaltbild zur Messung der Verzögerungszeit

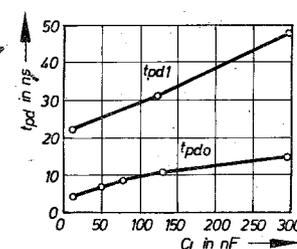


Bild 2: Abhängigkeit der Einschalt- (t_{pd0})- und Ausschaltverzögerungszeit (t_{pd1}) von der Massekapazität

Tafel 1: Familien der TT-Logik

Serie 133/155	P _{c max} (mW)	t _{pd1 max} (ns)	Serie 136/158	P _{c max} (mW)	t _{pd1 max} (ns)	Serie 134	P _{c max} (mW)	t _{pd1 max} (ns)	
1 LB 333 1 LB 338 1 LB 334 1 LB 331	25 25 25 25	31 31 31 22	1 LB 363 1 LB 364 1 LB 361	12 12 8	60 60 60	1 LB 341 1 LB 342 (plus NOT)	8 6	100 100	4×2 E NAND 4×2 E NAND m. off. Koll. 3×3 E NAND 2×4 E NAND
1 LB 332 1 LB 336	25 40	26 29	1 LB 362	4	60				1×8 E NAND 2×4 E NAND Leistungsgatter
1 LP 331 1 LP 333	34,5 55	26 38	1 LP 361 1 LP 363	11 11	80 60	1 LP 341 1 LP 343	5 4	100 100	2×(2×2) E AND/OR Inv., Exp. 1×(4×2) E AND/OR Inv., Exp.
1 LP 331 1 LP 333 1 LB 335 1 LP 332 1 LP 332 1 LB 337	 25 34,5 41	 26,5 26 	1 LP 361 1 LP 363						2×4 E Exp. 1×8 E Exp. 1×4 E NAND 2×2 E AND/OR Inv., Exp. 1×4 E Exp. 2×4 E NAND m. off. Koll.
1 TK 331 1 TK 332	100					1 TK 341 1 TK 342			JK-Flip-Flop D-Flip-Flop
-60°C...+125°C Serie 155: -10°C...+70°C			-60°C...+125°C Serie 158: -10°C...+70°C			-60°C...+125°C			Betriebstemperaturbereich

Serie 130	P _{c max} (mW)	t _{pd1 max} (ns)	Serie 106	P _{c max} (mW)	t _{pd1 max} (ns)	Tesla (CSSR)	P _c (mW)	t _{pd1 max} (ns)	D 10 (DDR)	t _{pd1 max} (ns)	
1 LB 303 1 LB 304 1 LB 301 1 LB 302 1 LB 306	176 132 8,8 44 120	11 11 11 12 15,5				MHA 111 MHB 111 MHC 111 MHD 111 MHE 111	10 10 10 10 25	29 29 29 29 29	D 100 D 103* D 110 D 120 D 130 D 140	22 22 22 22 22 22	4×2 E NAND 4×2 E NAND m. off. Koll. 3×3 E NAND 2×4 E NAND 1×8 E NAND 2×4 E NAND Leistungsgatter
1 LP 301 1 LP 303	100 70	13,5 13,5				MHF 111 MHG 111		29 29	D 150	22	2×(2×2) E AND/OR Inv., Exp. 1×(4×2) E AND/OR Inv., Exp.
1 LP 301			1 LP 065 A 1 LP 061 A	18 13	13 13	MYA 111			D 160	30	2×4 E Exp. 1×8 E Exp. 1×4 E NAND 2×2 E AND/OR Inv., Exp. 1×4 E Exp. 2×4 E NAND m. off. Koll.
						MJA 111 MJB 111		50 40	D 172	50	JK-Flip-Flop D-Flip-Flop
1 LP 304	50	13,5	1 LB 061 A 1 LB 065 A 1 LP 061 A 1 TP 061 A	18 18 24 36	20 23 20 20						2×4 E AND/OR Inv., Exp. 2×3 E NAND m. Exp. 1×8 E NAND m. Exp. 1×8 E AND/OR Inv., Exp. JK-Flip-Flop
-60°C...+125°C			-60°C...+125°C			0°C...+70°C MH 54...: -65°C...+70°C MH 84...: -25°C...+85°C			0°C...+70°C		Betriebstemperaturbereich * Anschlüsse vertauscht

Tafel 2: Vergleich der gemessenen Kennwerte mit den angegebenen Werten in den Datenblättern (in Klammern)

		1 LB 553	1 LB 554	1 LB 551	1 LB 552	1 LB 556	1 LP 551
Ausgangsspannung	U _{ao} (mV)	299 (≤ 400)	358 (≤ 400)	220 (≤ 400)	159 (≤ 400)	357 (≤ 400)	178 (≤ 400)
	U _{al} (mV)	2,79 (≥ 2,4)	2,94 (≥ 2,4)	2,96 (≥ 2,4)	2,99 (≥ 2,4)	2,73 (≥ 2,4)	2,82 (≥ 2,4)
Eingangstrom	I _{eo} (mA)	1,44 (≤ 1,6)	1,25 (≤ 1,6)	1,38 (≤ 1,6)	1,51 (≤ 1,6)	1,41 (≤ 1,6)	1,46 (≤ 1,6)
	I _{ef} (μA)	72,2 (≤ 90)	46,2 (≤ 90)	88 (≤ 90)	52,7 (≤ 90)	68,8 (≤ 90)	104 (≤ 90)
max. Ausgangskurzschlußstrom	I _{ao} (mA)	36,4	28,2	34,9	30,5	67	31,7
max. Gesamtstromaufnahme	I _{uBo} (mA)	26,3	17,75	12,3	6,2	18,6	14,2
	I _{uB1} (mA)	5,9	4,8	4,43	1,36	5,82	5,64
Verzögerungszeiten: (± 1 ns)	t _{pdo} (ns)	13,5 (≤ 15)	15 (≤ 15)	14 (≤ 15)	13,5 (≤ 18)	23,5 (≤ 40)	12 (≤ 18)
	t _{pd1} (ns)	30 (≤ 30)	27 (≤ 30)	29 (≤ 30)	22,5 (≤ 30)	31 (≤ 40)	21,5 (≤ 35)
logische Funktion		4×2 NAND	3×3 NAND	2×4 NAND	1×8 E NAND	2×4 E Leistungs-NAND	Dual 2×2 E exp. UND/ODER Inverter

an, während die Einschaltverzögerungszeit t_{pd0} im gleichen Temperaturbereich um etwa $0,22 \text{ ns}/10 \text{ grd}$ abfällt. Für t_{pd1} wurde in diesem Temperaturbereich ein Anstieg von $0,88 \text{ ns} \cdot 1,67 \text{ ns}/10 \text{ grd}$ und für t_{pd0} ein Abfall von $0,3 \cdot 0,4 \text{ ns}/10 \text{ grd}$ abhängig vom Typ gemessen.

Übertragungskennlinie $U_a = f(U_e)$:

Der konstante Wert der Ausgangsspannung U_a wurde bei allen gemessenen Typen bei einer Eingangsspannung von $1,5 \cdot 1,6 \text{ V}$ erreicht.

Eingangskennlinie $U_e = f(I_e)$:

Im Bild 4 ist die Abhängigkeit $U_e = f(I_e)$ dargestellt.

Die Durchbruchspannungen lagen für negative Eingangsspannung bei $-1,3$ bis $-2,3 \text{ V}$ und für positive Eingangsspannung bei $-8 \text{ V} \cdot \cdot \cdot 9,6 \text{ V}$.

Ausgangskennlinie $U_{a0} = f(I_a)$:

Die Ausgangskennlinie wurde aufgenommen, indem dem auf logisch 0 liegenden Ausgang ein bestimmter Strom aufgeprägt wurde.

Die Abhängigkeit beider Werte ist linear und hat einen Anstieg von $6 \text{ mV} \cdot \cdot \cdot 9 \text{ mV}/\text{mA}$.

Ausgangskennlinie $U_{a1} = f(I_a)$:

Die Kennlinie wurde aufgenommen, indem der auf „log 1“ liegende Ausgang als Stromquelle fungierte.

Für die Abhängigkeit ergibt sich entsprechend der Funktion ein Abfall von 23 mV bis $130 \text{ mV}/\text{mA}$.

Abhängigkeit der Übertragungskennlinie von der Umgebungstemperatur:

Zwischen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $70 \text{ }^\circ\text{C}$ betrug der gemessene Temperaturgang etwa $3 \text{ mV}/\text{grd}$.

Serie 141

Gegenüber den Grundgattern der TTL-Struktur weist die Serie 141 einen höheren Integrationsgrad auf. Diese Reihe enthält drei Schieberegister in Dual-in-line-Gehäuse mit den Bezeichnungen:

- 1 ЯМ 411 – 32 bit (8×4)
- 1 ЯМ 412/413 – 16 bit (4×4)

Technische Daten:

Betriebstemperatur: $-10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \cdot \cdot +70 \text{ }^\circ\text{C}$

Betriebsspannung: $5 \text{ V} \pm 10\%$

Eingangsspannung

pro Adreßzeile:

- bei „log 1“ $+3,2 \text{ V} \pm 10\%$
- bei „log 0“ $+1,8 \text{ V} \pm 10\%$

Verlustleistung

pro Zelle:

- bei „log 1“ 3 mW
- bei „log 0“ $0,7 \text{ mW}$

Lesestrom

- bei „log 1“: $0,45 \text{ mA}$
- bei „log 0“: $0,16 \text{ mA}$

Strom in die Adreß-

zeile bei „log 0“:

- I_x $8,5 \text{ mA}$
- I_y $4,5 \text{ mA}$

bei „log 1“:

- $-I_x$ $0,1 \text{ mA}$
- $-I_y$ $0,3 \text{ mA}$

Lesezeit für „log 1“: 20 ns

Störabstand pro

Adreß-Zeile: 1 V

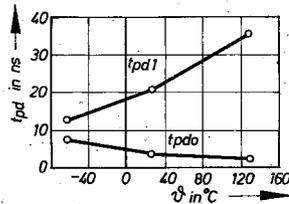


Bild 3: Abhängigkeit der Einschalt- (t_{pd0})- und Ausschaltverzögerungszeit (t_{pd1}) von der Lastkapazität (C_L)

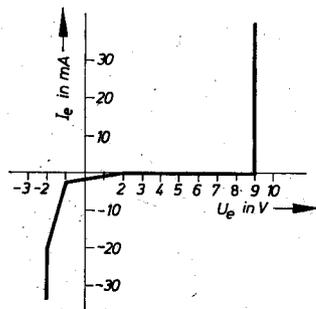


Bild 4: Eingangskennlinie $U_e = f(I_e)$ des Schaltkreises 1 ЯБ 551 ($U_B = 5,0 \text{ V}$)

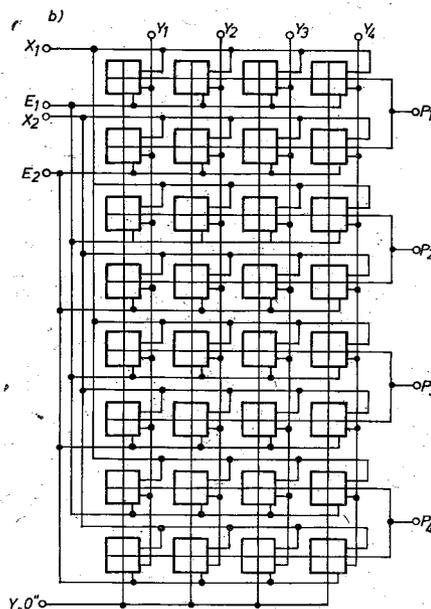
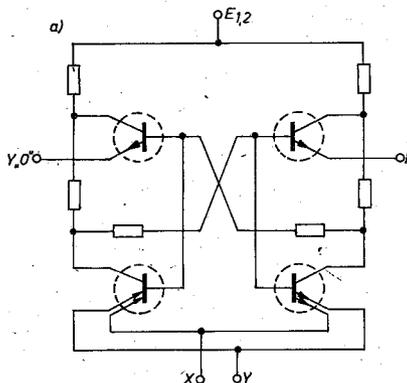


Bild 5: Der Schaltkreis 1 ЯМ 411
a) Speicherzelle für 1 Bit; b) Speichermatrix

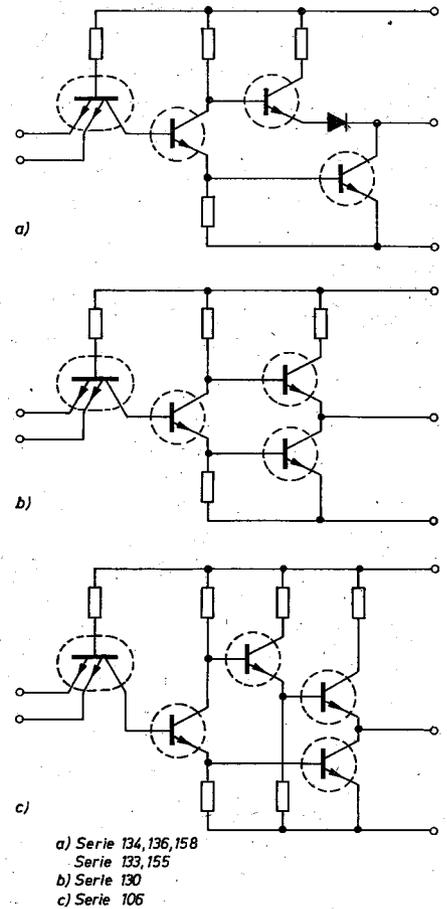


Bild 6: Varianten des TTL-Gatters: NAND
a) Serie 134, 136, 158; Serie 133, 155; b) Serie 130; c) Serie 106

Bild 5 zeigt die 1 Bit Adress-Zeile und die gesamte Matrix des Schaltkreises 1 ЯМ 411.

Serien 134, 136/158

Ist der Einsatz leistungsarmer Logikbausteine erforderlich, wobei relativ langsame Schaltzeiten in Kauf genommen werden können, so bieten sich für derartige Verwendungszwecke die low-power-Serien 134, 136 bzw. 158 an.

Durch Vergrößerung der Widerstände in den Schaltkreisen der low-power-Reihen gegenüber der normalen Reihe (Serie 133/155) um etwa den Faktor 10 werden bei der Serie 134 eine max. Verlustleistung von $P_{cmax} = 4 \cdot 8 \text{ mW}$ (je nach logischer Funktion) und eine Verzögerungszeit von $t_{pd1} = 100 \text{ ns}$ erreicht. Diese Serie in Flat-pack verpackt enthält neben Grundgattern auch JK-Flip-Flops. Der Betriebstemperaturbereich der Serie 134 und 136 umfaßt den Bereich von $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+125 \text{ }^\circ\text{C}$.

Zur TTL-Serie 136 im Flat-pack-Gehäuse wird mit den gleichen logischen Funktionen die parallele Serie 158 im Dual-in-line-Gehäuse mit einem Arbeitstemperaturbereich von $-10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \cdot \cdot +70 \text{ }^\circ\text{C}$ angeboten. Die max. Verlustleistung der beiden äquivalenten Serien beträgt $P_{cmax} = 3 \text{ mW}$ und die Verzögerungszeit $t_{pd1max} = 120 \cdot 165 \text{ ns}$.

In der Tafel 1 sind die Serien 134 und 136

mit den einzelnen Schaltkreistypen aufgeführt.

Elektrische Daten der Serien 134, 136/158:

Betriebsspannung: $\pm 5 V \pm 10\%$
Fan-out: 10
Störabstand: $\leq 0,5 V$

Serie 130

Den Gegensatz zur langsamen Logik bildet die schnelle Logik mit der Serie 130. Für diese Serie im Flat-pack-Gehäuse wird die Funktionsfähigkeit innerhalb des Temperaturbereiches von $-60^\circ C$ bis $+125^\circ C$ garantiert.

Elektrische Daten:

Betriebsspannung: $5 V \pm 10\%$
Verlustleistung: $\leq 176 mW$
Ausschaltverzögerungszeit: $\leq 15,5 ns$
Ausgangsspannung „log 1“: $\geq 2,4 V$
Ausgangsspannung „log 0“: $\leq 0,4 V$
Fan-out: 10
Störabstand: $0,4 V$

Die Schaltkreise finden in der schnellen Datentechnik einen bevorzugten Einsatz,

allerdings erfordern sie einen erheblichen Mehraufwand auf der Stromversorgungsseite verbunden mit einem erhöhten Platzbedarf.

Bild 6 veranschaulicht die schaltungstechnische Realisierung der NAND-Gatter in den einzelnen TTL-Serien.

Der vorliegende Artikel stellt eine Übersicht dar und sollte als Anregung für den Einsatz der verschiedenen Logikserien geben. Ergeben sich für den Anwender spezielle Fragen, so können diese mit den Mitarbeitern der Zentralen Leitstelle für Applikation des VEB Elektronikhandel Berlin geklärt werden.

Kapazitiver Winkelcodierer

Dipl.-Ing. GÜNTER DEUTSCHMANN

Mitteilung aus dem FZ des VEB Kombinat Zentronik

Allgemeines

Winkelcodierer werden dort eingesetzt, wo einer bestimmten Winkelstellung eines drehbaren Teils ein bestimmtes digitales Signal zugeordnet werden soll.

Verbreitete Anwendungsgebiete sind z. B.:

- Positionskontrolle bei numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen
- periphere Geräte der EDV, z. B. Schnelldrucker mit rotierenden Typenwalzen
- Drehzahlmessung bzw. -regelung.

Wesentlich für die Beurteilung der Funktionsgüte eines bestimmten Systems sind folgende Eigenschaften:

- Genauigkeit der Signalbildung, d. h. der definierten Zuordnung des digitalen Signals zu bestimmten Winkelstellungen
- Zuverlässigkeit
- weitgehende Unabhängigkeit von Änderungen der Betriebsparameter (Versorgungsspannung, Temperatur, mechanische Einstellung, Alterung)
- hohes Auflösungsvermögen
- Verschleißfreiheit
- geringer Abgleichaufwand.

Überblick über die gebräuchlichsten Verfahren

Nachdem die ursprünglich benutzten elektromechanischen Codiersysteme weitgehend durch fotoelektrische Systeme abgelöst wurden, schien zunächst ein ideales Abtastverfahren gefunden zu sein, das die elektromechanischen Verfahren bezüglich erreichbarer Lesefrequenz, Sicherheit, Verschleißfreiheit und Auflösung weit in den Schatten stellte.

Dennoch zeigte sich bald, daß auch das fotoelektrische Verfahren, insbesondere

unter rauen Betriebsbedingungen, eine Reihe negativer Eigenschaften aufweist, so z. B.:

- Alterung der Lampe und der Fotoelemente
- Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit der Fotoelemente
- geringe Lebensdauer der Lampe bei mechanischer Beanspruchung (Schwingungen).

So entstanden parallel zur Weiterentwicklung der fotoelektrischen Verfahren mehrere Abtastsysteme, die auf anderen physikalischen Effekten beruhen.

Bekannt geworden sind z. B.:

- magnetische Verfahren, die die Magnetfeldabhängigkeit bestimmter Materialien ausnutzen (Sättigungserscheinungen bei Ferriten, Halleffekt) [1] [2] [3]
- induktive Verfahren, die auf der Impedanzänderung von HF-gespeisten Spulen infolge Wirbelstrombildung in benachbarten Leitern beruhen [4] [5] [6]
- kapazitive Verfahren, die die Änderung der Koppelkapazitäten zwischen einem die Codierung tragenden Teil und einer Abtastsonde auswerten [7] [8] [9].

Diese Verfahren sind, soweit sie die Codeinformation zunächst in eine Amplitudenschwankung umsetzen, naturgemäß empfindlich gegen solche äußeren Störeinflüsse, die sich auf die Amplitude auswirken und die in der Praxis nie auszuschließen sind, wie z. B. Schwankungen der Betriebsspannung, der Parameter der Auswerteschaltung oder Änderungen des Abstandes zwischen Abtastelement und Codeträger.

Gelingt es dagegen, die Codierung so in

eine HF-Spannung umzusetzen, daß die Phase die Information enthält, wird eine weitgehende Unabhängigkeit von diesen Störgrößen erreicht.

Prinzipiell ist dafür sowohl das kapazitive als auch das induktive Verfahren anwendbar, doch ist das induktive Verfahren aus physikalischen und konstruktiven Gründen dem kapazitiven unterlegen (Auflösung, Genauigkeit, Unabhängigkeit von Temperatur und äußeren Magnetfeldern). Deshalb wird nachfolgend die Funktion, Auslegung und praktische Ausführung eines kapazitiven, phasenempfindlichen Abtastsystems beschrieben.

Phasenempfindliches kapazitives Abtastverfahren

Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip soll anhand einer regelmäßigen L-0-Codierung erläutert werden.

Für die im Bild 1 dargestellte Anordnung läßt sich unter Zufügung von zwei festen Brückkapazitäten (C_1, C_2), einer Massekapazität C_m und eines HF-Generators die (stark vereinfachte) Ersatzschaltung nach Bild 2 angeben.

C_3 und C_4 sind dabei die Kapazitäten zwischen Abtastsonde und L-Taktfläche (C_3) bzw. 0-Taktfläche (C_4), deren Wert sich beim Vorbeilauf der Codescheibe bei regelmäßiger L-0-Codierung und Betrieb in Nähe der Auflösungsgrenze annähernd sinusförmig ändert (Bild 3).

Für die Brückenausgangsspannung nach Bild 2 gilt bei $C_{3,4} \ll C_{1,2}$; $C_{3,4} \ll C_m$ und $C_1 = C_2$ ganz allgemein:

$$u_a = u_1 \frac{C_3 - C_4}{C_m} \quad (1)$$

bzw. mit