

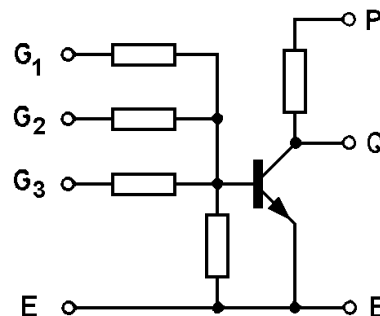
Integrierte Schaltungen

Digitale RTL-, DTL-, TTL- und CMOS-Schaltungen

Nach der Erfindung des Transistors (1949) waren die Digitalen **Integrierten Schaltungen** (englisch **Integrated Circuit, IC**) der zweite Meilenstein in der Entwicklung der modernen Halbleitertechnologie.

Die ersten Schaltungen waren vom **RTL-Typ (Resistor-Transistor-Logik)**.

Solange an allen an der Basis des Schalttransistors angeschlossenen Widerständen 0 Volt anliegen (Low-Pegel oder logische 0), ist der Transistor gesperrt und sein Ausgang liegt auf Betriebsspannungspotential (High-Pegel, logische 1). High-Pegel an einem oder mehreren Eingängen schaltet den Ausgang auf LOW. Dies ist die **negierte ODER-Funktion**, englisch **NOR**.

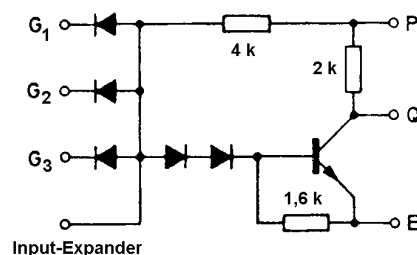


Eine andere **NOR**-Schaltung zeigt das Bild zur Frage TC706 des Fragenkataloges Technik Klasse A. Solche Schaltungen nennt man "wired-or". Die **NAND**-Schaltung der Frage TC705 kommt in der Praxis nicht vor.

Der Hauptnachteil der RTL-Logik war die geringe Geschwindigkeit, resultierend aus der Zeitverzögerung, die beim Umladen der Basis-Emitter-Kapazität über die Widerstände an der Basis des Schalttransistors auftraten. Diese Logik wurde daher sehr bald von der **DTL-Logik (Dioden-Transistor-Logik)** und später der **TTL-Logik (Transistor-Transistor-Logik)** abgelöst.

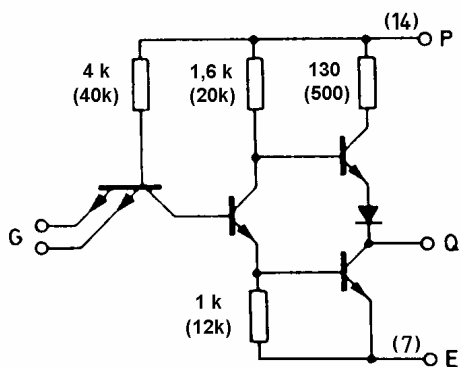
Die Funktion der **DTL-Logik** ist recht einfach am Beispiel des **NAND-Gatters** (Nicht-UND-Gatter) erklärt:

Solange an mindestens einer der Dioden an den Eingängen (G) Null Volt (Potential des (E)-Anschlusses, Masse) anliegen, fließt der vom Anschluss (P) über den Widerstand kommende Strom durch diese Diode(n) nach Masse. Am Verbindungspunkt der Anoden dieser Eingangsdiode(n) liegen dann etwa 0,7 Volt. Der Transistor bekommt keinen Basisstrom, ist gesperrt und am Kollektor liegen +5V (Logikschaltungen werden bevorzugt mit +5V betrieben).



Damit der Transistor leitend wird, braucht er mindestens +0,7 V an seiner Basis. Das wird erst dann erstmalig erreicht, wenn **alle** Eingangsspannungen größer als etwa 1,4 Volt sind. Am Verbindungspunkt herrscht dann ein Pegel von 2,1 V, so dass bei einem Spannungsabfall von 2 x 0,7 V über den in Serie mit der Basis liegenden Dioden gerade 0,7 V für die Basis-Emitter-Diode übrig bleiben.

Bei höheren Eingangspegeln als 1,4 V (High-Pegel) sind alle Eingangsdiode(n) gesperrt und der Transistor erhält den maximal möglichen Eingangsstrom. Er schaltet durch und der Pegel am Kollektor geht von +5V auf ca. 0V (Low-Pegel).



Bei der **TTL-Schaltung** (Widerstandswerte in Klammern gelten für die Low-Power-TTL-Familie) funktioniert das Ganze im Prinzip genau so. Die Unterschiede sind:

- Die Endstufe ist eine Totem-Pole-Gegentakt-Schaltung, bei der einer der beiden Transistoren immer leitend, der andere gesperrt ist. Dadurch können Lastkapazitäten wesentlich schneller umgeladen werden, was kürzere Schaltzeiten bringt.
- An Stelle der beiden Dioden vor der Basis des Schalttransistors ist eine Transistor-Stufe getreten, die die beiden Endstufentransistoren ansteuert.
- Und statt der Eingangsdiode(n) wird ein Transistor mit mehreren Emittoren in Basisschaltung verwendet. Die Vorteile dieser Schalttechnik sind:

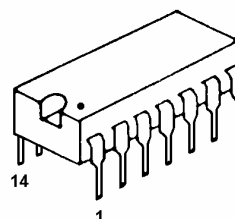
- a) in Basisschaltung ist die Grenzfrequenz einer Verstärkerstufe etwa um den Faktor 100 höher als in Emitterschaltung. Das bedeutet eine höhere Schaltgeschwindigkeit.
- b) Die Kollektor-Basis-Diode ist immer leitend. Allerdings wird die Kollektor-Basis-Diode (und damit der Transistor) bei positiven Eingangsspannungen 'invers' betrieben. Der Basisstrom fließt direkt über den Kollektor zur Steuerstufe. Über die Eingangs-Emitter fließt KEIN Strom, da deren Zener-Spannung höher als 5V ist.

Gehäuseformen

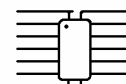
Das am weitesten verbreitete **Gehäuse** ist das Dual-In-Line (DIL) Gehäuse. Der Pinabstand beträgt 1/10" oder 2,54 mm und die beiden Reihen haben einen Abstand von 3/10" (7,62 mm). Der Betriebsspannungsanschluss (+5 V) liegt am Kopf des Gehäuses gegenüber Pin 1, bei DIL 14 also Pin 14, bei DIL 16 ist es Pin 16. Der Masseanschluss liegt diagonal gegenüber bei Pin 7 bzw. Pin 8.

Das "flat pack"-Miniaturgehäuse der IC-Frühzeit ist dem Surface-Mount-Devive (SMD) Gehäuse (auch mit SMT für Surface Mount Technology bezeichnet) gewichen. Es stellt heute den Löwenanteil in der kommerziellen Fertigung.

DIL 14 (TO-116)



flat pack (TO-84)



Nachfolge-Technologien

Alle Technologien hier aufzuzählen würde zu weit führen. Daher werden nur die Familien genannt, die eine gewisse Marktbedeutung erreichten. Die letzten drei Familien finden heute noch Verwendung.

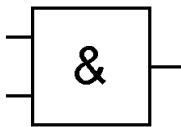
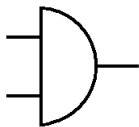
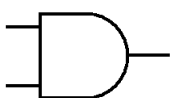
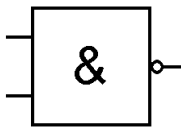
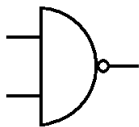
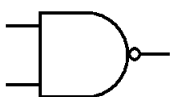
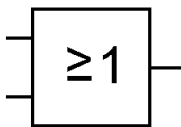
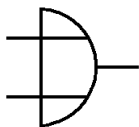

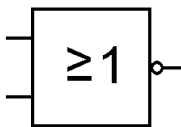
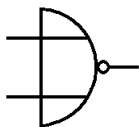
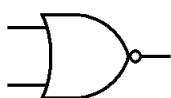
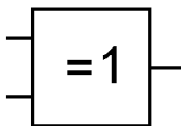
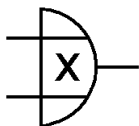

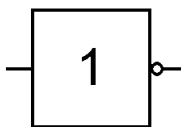
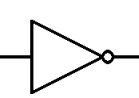
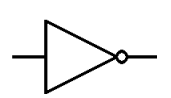
ECL	Emitter coupled Logic	Eine sehr schnelle Logikfamilie, die allerdings mit -5,2 V betrieben wurde und heute nicht mehr eingesetzt wird
L-TTL	Low-Power TTL 74 L xx	Eine TTL-Technologie mit geringerer Stromaufnahme und geringerer Schaltgeschwindigkeit (siehe die Bauelemente-werte im TTL-Schaltbild in Klammern).
LS-TTL	Low-Power-Schottky-TTL 74 LS xx	Familie mit gleicher Stromaufnahme wie L-TTL und Schaltzeiten wie normale TTL. War lange Zeit DIE Standardfamilie.
F-TTL	Fast-TTL 74 F xx	Schneller als TTL aber auch höhere Stromaufnahme. Schon bald durch S-TTL abgelöst.
S-TTL	Schottky-TTL 74 S xx	Schnellere Technologie als TTL bei gleicher Stromaufnahme.
AS-TTL	Advanced-Schottky-TTL 74 AS xx	Schnellste TTL-Technologie mit relativ hoher Stromaufnahme
CMOS	Familie mit MOS-Transistoren 40xx und 45xx	Hauptvorteil: sehr geringe Stromaufnahme und großer Betriebsspannungsbereich von +3 V bis +15 V . Ist relativ langsam (ähnlich L-TTL). Die Familie enthielt weitere komplexe Schaltungen, die in der TTL-Serie fehlten.
HC-MOS	High-Speed-MOS-Familie 74 HC xx und 74 HC xxxx	So schnell wie LS-TTL bei geringerer Stromaufnahme. Löste LS-TTL und CMOS weitgehend ab, da Schaltungen beider Familien enthalten sind. Betriebsspannungsbereich von +2 bis +6 Volt .
HCT-MOS	High-Speed-MOS-Familie 74 HCT xx und 74 HCT xxxx	Wie HC-MOS, jedoch mit TTL-Ein- und Ausgangspegeln und 5 ± 0,5 Volt Betriebsspannung (Direkter Ersatz von LS-TTL).

Die CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) Schaltungen sind heute die einzigen für Neuentwicklungen eingesetzten digitalen IC-Familien. Wesentliche Vorteile sind die höhere Schaltgeschwindigkeit, die geringere Stromaufnahme und - bei CMOS und HC-MOS - die weiten Betriebsspannungsbereiche, die auch Batteriebetrieb erlauben.

Logische Funktionen

Einfache logische Schaltungen sind **AND** (UND), **OR** (ODER) und **XOR** (exklusiv-oder EXOR) und der einfache Inverter **NOT** (NICHT). Letzteren findet man auch oft in Kombination mit AND (-> **NAND**) und OR (-> **NOR**). Die Invertierung wird durch einen kleinen Kreis am jeweiligen Anschluss (Eingang und/oder Ausgang) dargestellt.

Die Tabelle zeigt das DIN/EN/IEC-Symbol, das früher in DL übliche Symbol und das in US-Veröffentlichungen nach wie vor verwendete frühere IEEE-Symbol sowie die Wahrheitstabelle.

Gatter	DIN/EN	DIN (alt)	US (alt)	Logiktablelle															
AND				<table border="1"> <thead> <tr> <th>E1</th> <th>E2</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	E1	E2	A	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
E1	E2	A																	
0	0	0																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	1																	
NAND				<table border="1"> <thead> <tr> <th>E1</th> <th>E2</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	E1	E2	A	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
E1	E2	A																	
0	0	1																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	0																	
OR				<table border="1"> <thead> <tr> <th>E1</th> <th>E2</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	E1	E2	A	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
E1	E2	A																	
0	0	0																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	1																	
NOR				<table border="1"> <thead> <tr> <th>E1</th> <th>E2</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	E1	E2	A	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
E1	E2	A																	
0	0	1																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	0																	
XOR				<table border="1"> <thead> <tr> <th>E1</th> <th>E2</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	E1	E2	A	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
E1	E2	A																	
0	0	0																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	0																	
NOT				<table border="1"> <thead> <tr> <th>E</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	E	A	0	1	1	0									
E	A																		
0	1																		
1	0																		

Die für komplexere Schaltungen verwendeten Symbole (Speicher, Register, Flip-Flop, Addierer etc.) entnimmt man den entsprechenden Datenblättern der Bauelementehersteller. Für Amateurfunkprüfungen sind sie allerdings nicht relevant. Dort erden nur die heutigen DIN/EN/IEC-Symbole für Gatter und die Kenntnis der Wahrheitstabellen verlangt. Letztere sollte man sich also jederzeit selbst herleiten können.

Die folgende Schaltung stammt aus dem **Fragenkatalog Technik Klasse A, TC704**. Die Frage lautet:

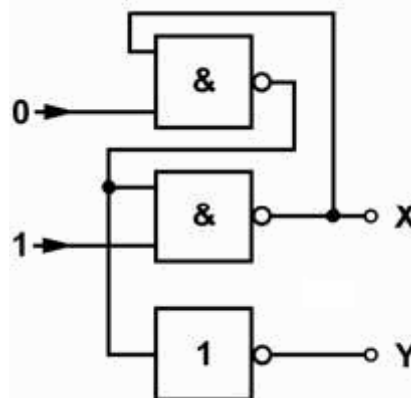
Welche Pegel haben die Ausgänge X und Y ?

Zur Beantwortung macht man sich zunächst klar, um welche Arten von Gattern es sich handelt und wie die Wahrheitstabellen dazu aussehen.

Es sind zwei NAND-Gatter und ein NOT-Element (Inverter). Beim oberen NAND ist die Sache klar: Da ein Eingang auf Null liegt, ist der Pegel am anderen Eingang nicht relevant. Der Ausgang liegt folglich auf "1".

Damit liegen beim unteren NAND beide Eingänge auf "1", so dass der Ausgang X auf Null liegt. Der Eingang des Inverters liegt - genau wie der obere Eingang des unteren NAND - auch auf "1", so dass der Ausgang Y auf Null liegt. Die richtige Antwort ist also:

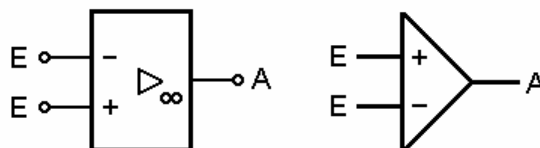
X = 0; Y = 0



Analoge Integrierte Schaltungen

Der Hauptvertreter der analogen integrierten Schaltungen ist der **Operationsverstärker**, kurz **OP**. Operationsverstärker werden heute fast ausschließlich in MOS-Technologie hergestellt. Die entscheidenden Vorteile gegenüber früheren Lösungen sind der niedrige Stromverbrauch und der vernachlässigbar kleine Eingangsstrom.

Ein OP besitzt zwei Eingänge, die mit einem + und einem - Symbol gekennzeichnet werden. Die Spannungsdifferenz zwischen diesen beiden Eingängen wird typisch um 60 dB verstärkt - man kann also fast von "unendlich" (Zeichen ∞) sprechen.



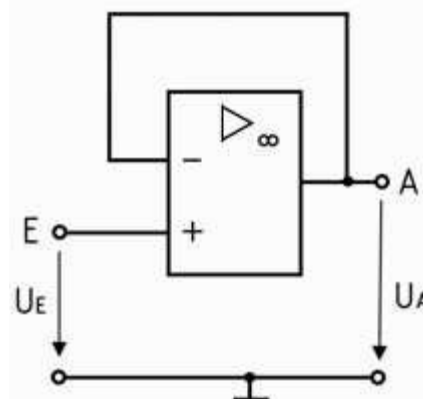
Das zeigt sich auch im Schaltzeichen, das im Fragenkatalog verwendet wird (links). Das in Schaltbildern zu findende Symbol (rechts) beschränkt sich auf das Dreieck, das schon vom NOT-Glied bekannt ist und das sich auch im offiziellen Symbol zu Kennzeichnung der Funktion wieder findet. Ob der Plus-Eingang oben und der Minus-Eingang unten oder umgekehrt gezeichnet wird, hängt davon ab, wie eine Schaltung am übersichtlichsten dargestellt werden kann. Die Eingangs-Kennzeichnungen + und - dürfen aber nie fehlen, da sie für das Verständnis der Funktion unerlässlich sind.

Wegen der hohen Verstärkung eines OP wird dieser praktisch immer in einer gegengekoppelten Schaltung betrieben. Die Gegenkopplung erfolgt vom Ausgang auf den Minus-Eingang. Eine Verbindung auf den Plus-Eingang würde zur Selbsterregung (-> Oscillator) führen. Die drei typischen Anwendungen finden auch im Fragenkatalog ihren Niederschlag. Zur Berechnung kann man ohne weiteres annehmen, dass die Spannung zwischen den Eingängen - verglichen mit der Ausgangsspannung - praktisch Null ist und dass die Eingangsströme ebenfalls Null sind.

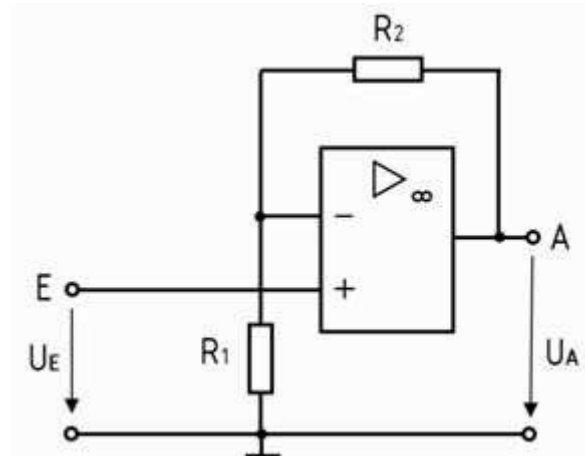
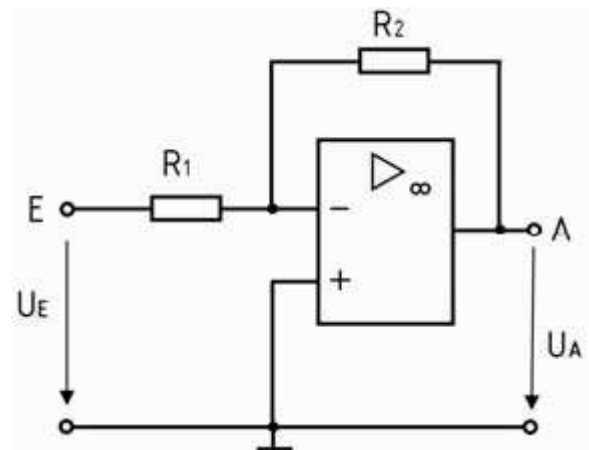
Operationsverstärker sind Breitbandverstärker. Sie verstärken Gleichspannungen genau so wie Wechselspannungen. Damit es durch die Gegenkopplung nicht zu unerwünschten Schwingungen kommt, ist der nutzbare Frequenzbereich auf einige 100 kHz begrenzt. Es gibt aber auch Typen, die noch Videosignale bis 5 MHz sauber verstärken.

Die im Fragenkatalog Technik Klasse A aufgeführten drei Grundschaltungen sollen nun kurz erläutert werden.

Die erste Schaltung ist der Spannungsfolger oder Impedanzwandler. U_A ist gleich U_E , der Eingangswiderstand ist sehr hochohmig und der Ausgangswiderstand sehr niederohmig.



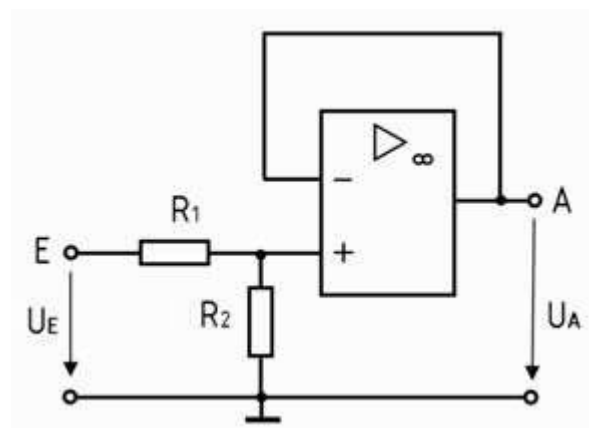
Die zweite Schaltung (rechts) ist der invertierende Spannungsverstärker. Ausgangs- und Eingangsspannung sind in Gegenphase. Der Eingangswiderstand ist gleich R_1 , da der Minus-Eingang de facto an Masse liegt, obwohl der Strom durch R_1 in Wirklichkeit über R_2 zum (oder vom) Ausgang fließt. Die Verstärkung beträgt $v = R_2 / R_1$ und der Ausgangswiderstand ist niederohmig.



Die dritte Grundsaltung (oben) ist dem Spannungsfolger sehr ähnlich. Ausgangs- und Eingangsspannung sind gleichphasig. Der vom Ausgang durch die Serienschaltung $R_2 + R_1$ nach Masse fließende Strom muss so groß sein, dass sich am Verbindungspunkt der Widerstände die gleiche Spannung einstellt, die am Plus-Eingang angelegt wird. Die Verstärkung ist dann $v = (R_1 + R_2) / R_1$. Verglichen mit dem invertierenden Verstärker sind eigentlich nur die Verbindungen vom Eingangsanschluss und Masse zum Plus-Eingang des OP und zum freien Ende von R_1 vertauscht. Der Eingangswiderstand ist auch hier hochohmig.

Eine weitere Schaltung aus dem Fragenkatalog ist eine Abwandlung des Spannungsfolgers, der hier an einen Spannungsteiler angeschlossen ist. Die Gesamt-"Verstärkung" ist kleiner als Eins und entspricht dem Teilungsverhältnis des Spannungsteilers:

$$v = U_A / U_E = R_2 / (R_1 + R_2)$$



OPs werden (wie auch die Digitalschaltungen) überwiegend in Dual-in-Line-Gehäusen oder deren SMD-Äquivalenten angeboten Einzel- und zweifach-OPs haben 8 PINs. Vierfach-OPs finden in 14-poligen Gehäusen Platz.

Die Betriebsspannungsanschlüsse der OPs werden übrigens in Stromläufen üblicherweise nicht oder an anderer Stelle gezeichnet. Üblich ist es, den OP zwischen einer positiven und einer negativen Versorgungsspannung zu betreiben, damit die (Gleich- und Wechselfspannungs-) Signale gegenüber Masse beide Polaritäten annehmen können.