



networking



advanced materials

Versuch:

Inverser Piezoeffekt

- Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe -

Prof. Dr. -Ing. Frank Mücklich

Wer braucht „Piezos“?

Der Piezoeffekt – was ist das? Und wofür lässt er sich nutzen?

Im Alltag benutzen wir viele ganz unterschiedliche Geräte. Die meisten von ihnen benötigen „Strom“ (bzw. physikalisch korrekt: elektrische Energie), doch was passiert mit dem Strom? Der Strom wird in vielen Geräten in andere Energieformen umgewandelt: z.B. in Licht (Lichtenergie bzw. elektromagnetische Energie), in Wärme (Wärmeenergie) oder in Bewegung (mechanische Energie). Doch wie funktioniert diese Energieumwandlung eigentlich genau? Die Möglichkeiten der Energieumwandlung sind sehr vielfältig. Sie nutzen aber alle physikalische Phänomene oder besondere Materialeigenschaften aus, die sich mit physikalischen Gesetzen beschreiben lassen.

Was haben z.B. ein Lautsprecher und eine Ultraschalluntersuchung bei einem Arzt gemeinsam? Wozu braucht man in Autos Beschleunigungssensoren und was hat ein Feuerzeug mit diesen zu tun? An diesen Fragen lässt sich erkennen, wie unterschiedlich man diese physikalischen Gesetze ausnutzen kann, denn allen diesen Geräten und Anwendungen liegt der **Piezoeffekt** bzw. der **inverse Piezoeffekt** zu Grunde. So genannte **piezoelektrische** Materialien ermöglichen es mechanische in elektrische Energie oder umgekehrt elektrische in mechanische Energie umzuwandeln.



Lautsprecher: Insbesondere in Hochtönern werden Piezokristalle genutzt



Beschleunigungssensor mit Piezokristall



Feuerzeug mit Piezo-Zündung



Auf diesem Piezo-Druckkopf eines Tintenstrahldruckers werden Hunderte mikroskopisch kleiner Düsen über eine raffinierte Elektronik angesteuert.



Ultraschallerzeugung mit Piezokristallen

Versuchsbeschreibung

Der Versuchsaufbau ist in unten in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Ein piezoelektrischer Biegeaktuator (Biegebalken), der über eine Gleichspannungsquelle angesteuert wird, ist in einer entsprechenden Halterung eingespannt. Das Applizieren einer Gleichspannung auf den Aktuator führt zu dessen Krümmung. Da diese Auslenkung sehr minimal ist und daher mit dem bloßen Auge schwer zu erkennen ist, wird diese indirekt mit Hilfe eines Laserpointers sichtbar gemacht. Letzterer wird auf einen Spiegel am freien Ende des Biegebalkens gerichtet. Die Reflexion wird dann auf einem Schirm detektiert. Die Positionsänderung der Reflexion in Folge der Auslenkung des Balkens ist wesentlich größer verglichen mit der Auslenkung des Aktuators und kann daher problemlos mit bloßem Auge erkannt werden.

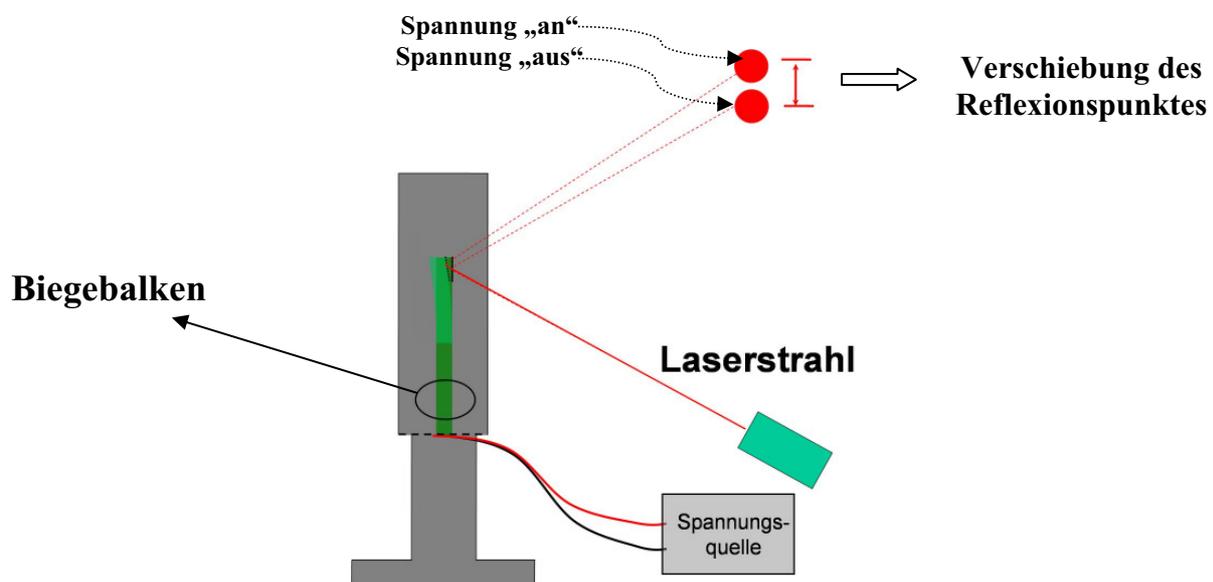


Abbildung 1: Versuchsaufbau des Biegebalkenexperiments

Aufgabenstellungen des Versuches ist es eine Relation zwischen Größe der angelegten Spannung und Auslenkung des Aktuators aufzustellen.

Der Versuchsaufbau besteht aus:

- Biegeaktuator
- Spannungsquelle
- Halterung
- Laserpointer

Suchen Sie sich zusätzlich eine technische Anwendung aus der Einleitung aus und versuchen Sie zu erklären, wozu der Piezoeffekt in der gewählten Anwendung ausgenutzt wird! Zur Wahl stehen folgende Anwendungen: Lautsprecher (oder Mikrofon), Beschleunigungssensor, Ultraschallkopf, Piezo-Feuerzeug oder Druckerkopf eines Tintenstrahldruckers. Entscheiden Sie, ob im jeweiligen Fall der „direkte“ oder der „inverse“ Piezoeffekt ausgenutzt wird.

Der Piezoelektrische Effekt

Werden piezoelektrische Materialien durch eine mechanische Spannung deformiert, so wird das Material polarisiert. Es entstehen also Oberflächenladungen und ein elektrisches Feld baut sich auf (**direkter piezoelektrischer Effekt**). Werden die Elektroden kurzgeschlossen, gleichen sich die Oberflächenladungen in Form eines Stromes aus.

Der Piezoeffekt ist umkehrbar, d.h. ein elektrisches Feld führt zu einer Verformung eines piezoelektrischen Materials. Man spricht dann vom **inversen piezoelektrischen Effekt**.

Ob ein Material nun piezoelektrisch ist oder nicht, ist von der Kristallstruktur des Materials abhängig. Entscheidende Voraussetzung ist eine **asymmetrische Kristallstruktur** (vgl. Abbildung 2). Dies bedeutet, dass sich der Ladungsschwerpunkt des Kationen- und Anionengitters gegen

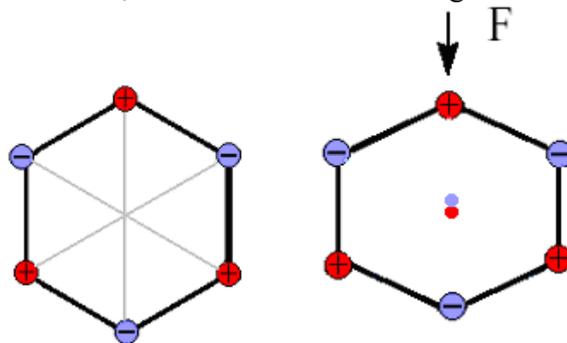


Abbildung 2: Asymmetrische Gitterstruktur: bei Kraftereinwirkung verschieben sich die Ladungsschwerpunkte des Kationen- und Anionengitters gegeneinander

Diese relative Verschiebung der positiven und negativen Ionenladungen verursacht eine Polarisation des Kristalls.

Der Piezoeffekt tritt in einigen natürlichen Materialien wie z.B. Quarz auf, der Effekt ist hier allerdings sehr klein. In technischen Anwendungen ebenso wie in diesem Versuch werden zumeist Piezokeramiken wie z.B. Bariumtitanat (BaTiO_3) oder Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) verwendet (vgl. Abbildung 3).

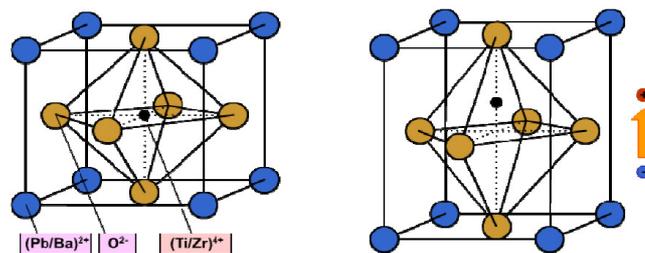


Abbildung 3: Kristallstruktur einer PZT-Keramik im symmetrischen (links) und asymmetrischen (rechts) Zustand

Zusatzinformationen für den/die Lehrer/in

Genauere Erläuterung der Theorie des Piezoeffektes

Mathematisch betrachtet gilt für den direkten Piezoeffekt: $D = d \cdot T$

Die Polarisierung bzw. die dielektrische Verschiebung D ist also in erster Näherung linear von der mechanischen Spannung T abhängig. Die Proportionalitätskonstante d heißt piezoelektrischer Koeffizient.

Für den inversen Piezoeffekt gilt analog, dass die Längenänderung S proportional zum wirkenden elektrischen Feld E ist: $S = d \cdot E$

Der piezoelektrische Koeffizient ist für den direkten und inversen Piezoeffekt identisch.

Dem Piezoeffekt ist generell noch die Elektrostriktion überlagert, die aber für die meisten Piezoelektrika vernachlässigbar ist.

Ferroelektrische Keramiken bilden eine spezielle Untergruppe der Piezoelektrika. Sie besitzen unterhalb einer charakteristischen Temperatur T_0 auch ohne eine äußere mechanische Beanspruchung eine spontane Deformation und eine spontane Polarisierung, d.h. jede Elementarzelle besitzt ein Dipolmoment. Im elektrischen Wechselfeld zeigen sie eine dielektrische Hysterese $P(E)$, deren Ursache in der Dynamik einer komplexen Domänenstruktur liegt. Nach Einwirkung eines elektrischen Feldes nehmen Ferroelektrika nicht wieder den Ausgangszustand $P=0$ an, sondern den Zustand einer remanenten Polarisierung P_r in Richtung des zuvor angelegten Feldes ein. Durch irreversible Domänenwandverschiebungen oder Polarisierungssprünge wachsen günstig orientierte Domänen auf Kosten ungünstig orientierter, so dass die piezoelektrische Eigenschaft auch im feldfreien Fall erhalten bleibt. Ferroelektrische Substanzen zeigen auch unter dem Einfluss eines mechanischen Wechselfeldes einen irreversiblen Verlauf $S(E)$, es entsteht eine so genannte Schmetterlingskurve (vgl. Abbildung 4).

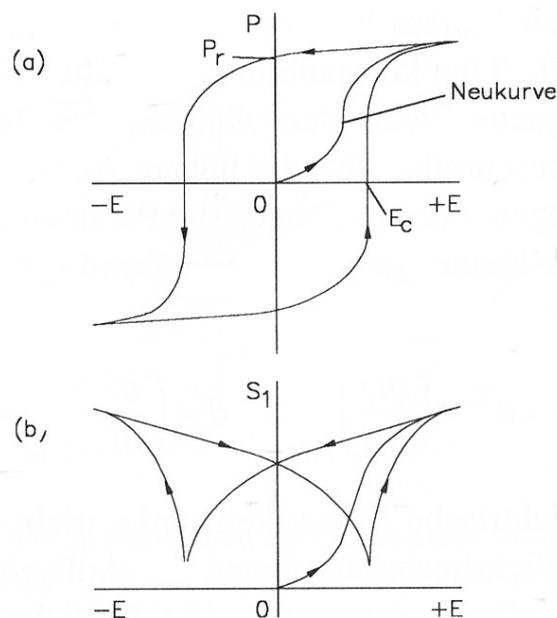


Abbildung 4: (a) Dielektrische Hysterese $P(E)$ mit Koerzitivfeldstärke E_C und remanenter Polarisierung P_r und (b) Schmetterlingskurve $S(E)$

Lehrer - Blatt 2

Eine Erwärmung über die Umwandlungstemperatur T_0 (thermische Depolarisation) zerstört die durch das Polen aufgebrachte Vorzugsrichtung der Domänenstruktur.

Der Piezoeffekt in den Anwendungen

Lautsprecher (oder Mikrofon)

Weit verbreitete Anwendung erfahren piezoelektrische Materialien als elektromechanische Wandler für Hochtonlautsprecher in HiFi- und Stereosystemen. Im Vergleich zu elektromagnetischen Lautsprechern zeichnen sie sich durch höhere Leistung und Zuverlässigkeit sowie durch leichtere Bauweise aus.

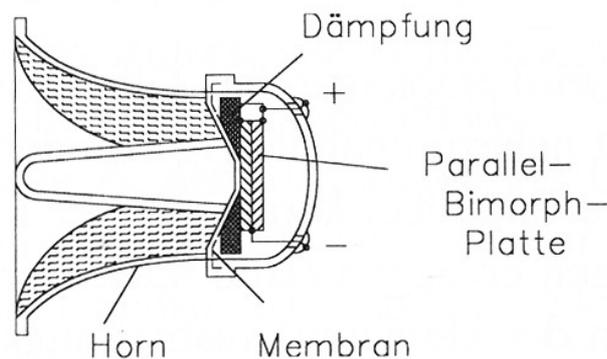


Abbildung: Querschnitt eines piezoelektrischen Hochtonlautsprechers

Die Abbildung zeigt den Querschnitt durch einen typischen piezoelektrischen Hochtonlautsprecher. Der Wandler wird durch eine kreisförmige Scheibe aus einer Parallel-Bimorph-Platte realisiert. Unter dem Einfluss einer elektrischen Wechselspannung biegt sich die Scheibe in Abhängigkeit von Stärke und Polarität des Signals und treibt periodisch eine Lautsprechermembran an, die Schallwellen erzeugt. In einem Lautsprecher wird also der inverse Piezoeffekt ausgenutzt.

Dagegen kann der direkte Piezoeffekt zum Bau eines Mikrofons genutzt werden. Ein Piezomikrofon ist eine Mikrofonbauform, deren Wandlerprinzip auf den Eigenschaften piezoelektrischer Elemente beruht. Eine Membran folgt den Druckschwankungen des Schalls. Sie ist mechanisch mit einem piezoelektrischen Element gekoppelt. Es wird durch die Druckschwankungen minimal verformt und gibt diese als elektrische Spannungsschwankungen aus. Als piezoelektrisches Material wird meistens die Piezokeramik Blei-Zirkonium-Titanat (PZT) verwendet.

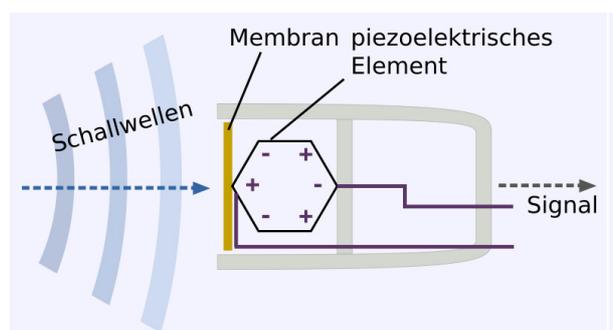


Abbildung: Aufbau eines Piezomikrofons

Solche Mikrofone waren in den 30er bis 50er Jahren des 20. Jahrhunderts populär. Sie sind mechanisch robust und haben Vorteile durch ihre simple Bauweise. Ein großer Nachteil dieser Wandlertechnik ist der hohe Klirrfaktor. Sie eignen sich prinzipiell nicht für hochqualitative Aufnahmen und konnten sich auch in der Telekommunikationstechnik nicht gegen das Kohlemikrofon durchsetzen. Die Schwingungswandlung durch piezoelektrische Elemente ist hingegen bei Kontaktschallwandlern (Tonabnehmer in Plattenspielern und für Instrumente, Körperschallaufnehmer, Schwingungsaufnehmer) weit verbreitet. Die hier zur Verfügung stehenden Kräfte sind in der Regel wesentlich größer und führen zu besseren Übertragungseigenschaften als es bei Luftschall der Fall ist.

Beschleunigungssensor

Beschleunigungssensoren sind aus piezokeramischen Sensorplättchen aufgebaut, die die Beschleunigungskräfte in elektrische Signale umwandelt. Beim eigentlichen Sensor handelt es sich im Prinzip um einen Kraftsensor, der den direkten Piezoeffekt nutzt. Der Zugang zur Beschleunigung wird mit Hilfe einer seismischen Masse erreicht, die an der Keramik befestigt ist. Beispielhaft ist in der Abbildung ein zylindrischer Beschleunigungssensor dargestellt. Der Sensor ist an der Innenseite fixiert, an der äußeren Oberfläche ist eine elektrisch leitende Masse angebracht, an der eine Spannung abgegriffen werden kann. Bei Beschleunigung in axialer Richtung kommt es zu einer Scherung der Piezokeramik und damit zu einem Signal. Radiale Beschleunigungen sind mit solch einem Beschleunigungssensor nicht messbar, da die Beanspruchung in diese Richtung zu gering wäre.

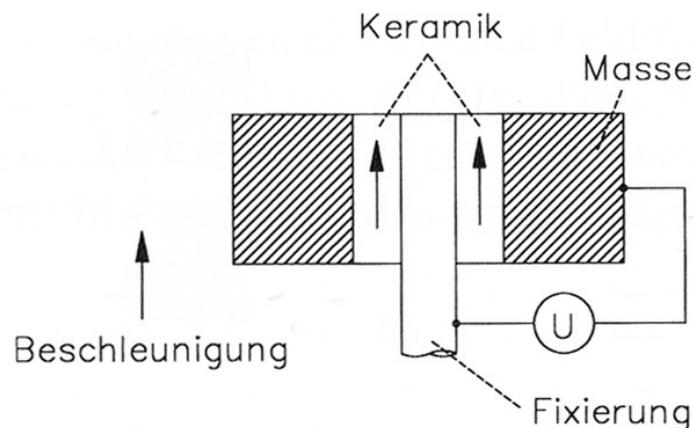
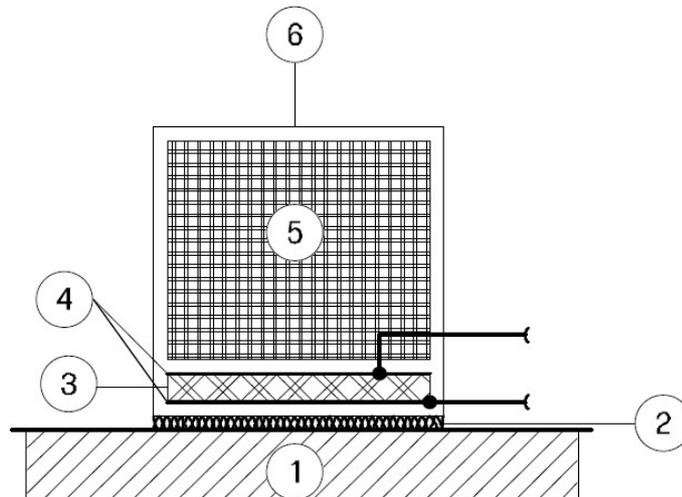


Abbildung: Prinzip eines Beschleunigungssensors

Ultraschallkopf

Die Ultraschallerzeugung beruht auf dem inversen Piezoeffekt. Man regt durch eine elektrische Wechsellspannung an den Oberflächen den piezoelektrischen Kristall zum Schwingen an und erzeugt damit eine mechanische Schwingung, die Druckschwankungen in Form von Ultraschall verursacht. In der Anwendung dient der Ultraschallkopf fast immer auch gleichzeitig dem Nachweis von Ultraschall, man spricht deshalb auch von Ultraschallwandlern oder Ultraschallsonden.



- | | |
|---------------------|---------------------------|
| ① Bauteil | ④ aufgedampfte Elektroden |
| ② Koppelmedium | ⑤ Dämpfungskörper |
| ③ Schwingermaterial | ⑥ Prüfkopfgehäuse |

Abbildung: schematischer Aufbau eines Ultraschallwandlers

Die Abbildung zeigt den schematischen Aufbau eines Ultraschallwandlers. Als Material für den Schwinger wird beispielsweise Bariumtitanat eingesetzt. Auf die Oberflächen des piezoelektrischen Materials sind Elektroden aufgedampft, die über eine elektrische Anpassung an das Ultraschallgerät angekoppelt werden. Als mechanischer Träger für den Ultraschallwandler dient ein Dämpfungskörper, der gleichzeitig die Aufgabe hat, Ultraschall, der entgegen der gewünschten Ausbreitungsrichtung abgestrahlt wird, weitgehend zu dämpfen. Der Ultraschall wird über ein Koppelmedium in den Prüfling eingeschallt und auch über dieses Koppelmedium wieder empfangen.

Bei Arbeitsfrequenzen von einigen MHz werden Ultraschallwandler in der medizinischen Diagnostik und in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt.

Piezo-Feuerzeug

In Piezofeuerzeugen befindet sich ein Piezokristall, der anstatt eines Reibsteines zur Funkenzeugung dient. Dazu wird im Piezo-Zündelement eine Feder gespannt, die durch einen Tastendruck einen Stößel auf den Piezokristall schlägt. Dieser Stoß erzeugt im Kristall große Spannungen von bis zu 15kV. Diese hohen Spannungen reichen aus, um zwischen zwei Metallkontakten, die am Piezokristall befestigt sind, einen Funken zu erzeugen, der das vorbeiströmende Gas entzündet. Das Prinzip beruht also auf dem „direkten“ Piezoeffekt.

Druckerkopf

Piezodrucker sind hochauflösende Tintenstrahldrucker, die mit Hilfe der Eigenschaft von Piezokristallen, sich unter elektrischer Spannung zu verformen, Drucktinte durch eine feine Düse pressen.

Der Piezodrucker verfügt über einen Druckkopf, bei dem jeder Kanal bzw. jede Düse mit einer Piezo-Keramik ausgerüstet ist. Diese verkürzt sich beim Anlegen eines elektrischen Signals in der Länge, wodurch sich die Tintenkammer vergrößert und mit Tinte füllt. Durch Wegnehmen des elektrischen Signals dehnt sich die Piezo-Keramik wieder in seine ursprüngliche Länge aus und erzeugt in der Tintenkammer einen leichten Überdruck, wodurch ein Tintentropfen aus der Kammer ausgestoßen wird. Das Tropfenvolumen lässt sich über den angelegten elektrischen Impuls steuern. Die Arbeitsfrequenz eines Piezokristalls reicht bis zu 16.000 Hz. Zur Tropfenerzeugung nutzt man also den inversen Piezoeffekt aus.

Der Piezodrucker wird in der Kennzeichnungstechnik z.B. für die Verpackungsbeschriftung und Adressierung/ Personalisierung genutzt. D.h. überall dort, wo eine sehr gute Schriftqualität gefordert ist, sind Piezo Drucker die richtige Wahl. Er steht damit in Konkurrenz zur Bubble-Jet-Technik, bei der die Tropfenbildung durch Erhitzung geschieht.

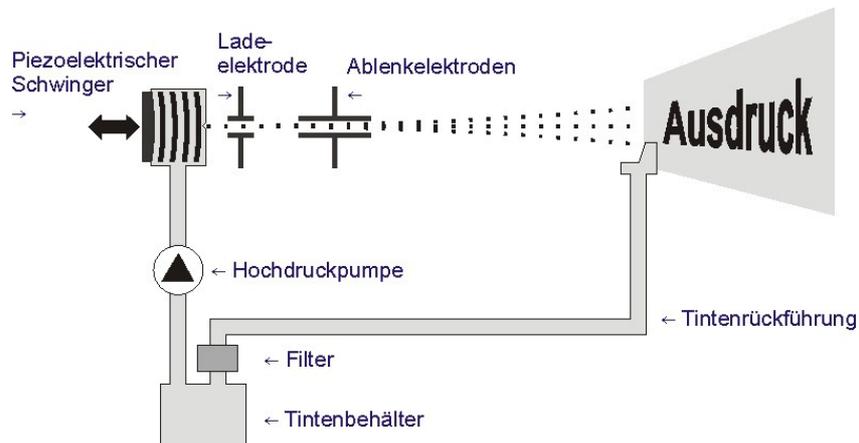


Abbildung: Prinzip des Druckkopfes eines Tintenstrahldruckers