



**CAPACITOR  
COMPETENCE**  
*since 1958*

# **MIT ABSTAND AM BESTEN – SPANNUNGSFESTIGKEIT VON ELKOS**

**Fachartikel von Dr. Arne Albertsen**



ENGINEERED SOLUTIONS

**JIANGHAI EUROPE**  
Electronic Components GmbH

## Mit Abstand am besten – Spannungsfestigkeit von Elkos

Dr. Arne Albertsen, Jianghai Europe Electronic Components GmbH

### Einleitung

Aluminium-Elektrolytkondensatoren („Alu-Elkos“, „Elkos“) stellen einen wichtigen Bestandteil vieler Geräte der Leistungselektronik dar. Erhöhte Anforderungen an die Energieeffizienz, die expandierende Nutzung erneuerbarer Energie und der stetig wachsende Elektronikanteil im Automobilbau haben die weite Verbreitung dieser Bauelemente vorangetrieben.

In vielen Applikationen hängen Lebensdauer und Zuverlässigkeit des Gerätes direkt von den entsprechenden Parametern der Elkos ab [4]. Während frühere Beiträge [1], [2] des Autors das Thema Lebensdauerabschätzung und Zuverlässigkeit beleuchteten (und dabei auch auf die Abhängigkeit dieser Größen von der Betriebsspannung eingingen), zeigt der vorliegende Artikel die Ursachen für die Grenzen der Spannungsfestigkeit von Elkos und nennt die Spannungsbereiche, die für einen sicheren Betrieb eingehalten werden müssen.

Ein wichtiger Parameter bei der Anwendung von Elkos ist ihre Spannungsfestigkeit, die üblicherweise als Bemessungs-, Nenn-, Betriebs-, oder Überspannung bzw. in Sonderfällen auch als Impuls- sowie als Transientenspannung spezifiziert wird. Ein Überschreiten der Spannungsfestigkeit – selbst, wenn dies nur für einige Millisekunden erfolgt – kann zu einem sofortigen Ausfall des Kondensators führen oder seine Leistungsfähigkeit während der verbleibenden Lebensdauer vermindern. In vielen Applikationen lässt sich die höchste auftretende Spannungsbelastung nicht vorhersehen. Beispiele für mögliche Ursachen einer erhöhten Spannungsbelastung gegenüber der regulären Betriebsspannung sind:

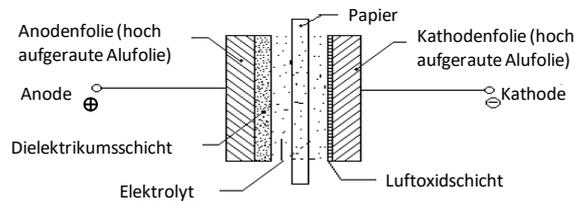
- Spannungsspitzen aufgrund von induktiv induzierten Schalttransienten
- Rückspeisung aus geregelten Motoren
- Hochohmige Generatoren mit wechselnden Lasten
- Unsymmetrische Belastungszustände oder Phasenanschlussfehler bzw. Ausfall einer Phase
- Anschlussfehler (Fehler bei der Verkabelung, z.B. bei Baustellenstromversorgungen)
- (zerstörende) Überspannungstests wie UL508C „Breakdown of Components Test“

Ein Lösungsansatz besteht darin, die Bemessungsspannung der Elkos so zu wählen, dass sie weit oberhalb der erwarteten Maximalspannung in der Applikation liegt. Dem stehen jedoch die üblichen Forderungen nach Miniaturisierung und Kostenoptimierung entgegen. Um den „Sicherheitsabstand“ erfolgreich und ohne Einbußen bei der Zuverlässigkeit zu vermindern, sind ein Verständnis sowohl der Eigenschaften der zu realisierenden Schaltung als auch des einzusetzenden Elkos notwendig. Um die Eigenschaften der Schaltung vollständig zu charakterisieren, sind Messungen in Ergänzung zu Simulationen hilfreich („Messen“ bedeutet hier „Wissen“). Um die Definitionen und Grenzen der Spannungsfestigkeit von Elkos zu veranschaulichen, betrachten wir zunächst Aufbau und Herstellung.

### Aufbau und Herstellung von Elkos

Aluminium-Elektrolytkondensatoren vereinen Spannungsfestigkeiten im Bereich von wenigen Volt bis zu ca. 750 V und einen weiten Kapazitätsbereich von 1  $\mu\text{F}$  bis über 1 F bei gleichzeitig kompaktem Aufbau. Eine hoch aufgeraute Anodenfolie mit einer dünnen

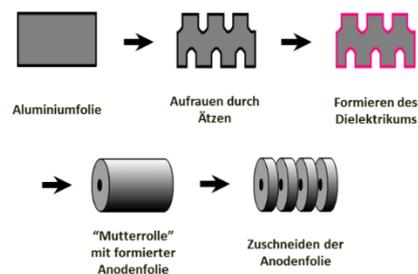
Dielektrikumsschicht wird dabei vollflächig von einer passgenauen Kathode, der Elektrolytflüssigkeit, kontaktiert (Abb. 1).



**Abb. 1: Innerer Aufbau eines Alu-Elkos**

Die Herstellung von Elkos umfasst im Wesentlichen die folgenden Schritte:

1. Ätzen – hoch reine Aluminiumfolien einer Dicke von 20 ~ 100 µm sind das Ausgangsmaterial der späteren Anoden- und Kathodenfolien. Der Ätzvorgang erhöht die Oberfläche des Anodenmaterials je nach Spannungsfestigkeit bis zu 140-fach. Bereits zu diesem frühen Zeitpunkt im Produktionsablauf entscheidet sich wesentlich, ob der Elko später den hohen Anforderungen in Bezug auf Spannungsfestigkeit, Zuverlässigkeit, Stromtragfähigkeit und Langlebigkeit in professionellen Industrieanwendungen gerecht werden kann. Der Hersteller muss an dieser Stelle entscheiden, ob ein niedriger Produktpreis im Vordergrund steht oder ob er die Bedeutung der Porenstruktur für die Anwendung bzw. den Qualitätsanspruch des Endkunden erkennt und die teilweise erheblichen Mehrkosten in Material und Prozess in Kauf nimmt, um ein stabiles Qualitätsprodukt zu fertigen. Die Porenstruktur des Anodenmaterials in Verbindung mit der Erfahrung des Herstellers (und nicht allein die Formierspannung) kennzeichnet einen verantwortungsbewussten Qualitätshersteller.
2. Formieren – die Anodenfolie trägt die Dielektrikumsschicht des Elkos, das Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), welches in einem elektrochemischen Verfahren auf die aufgeraute Anodenfolie aufwächst. Das Verfahren wird als anodische Oxidation oder auch Formierung bezeichnet. Die Güte der Formierung, d.h. eine gleichmäßig dicke und vollständige Überdeckung der Anodenmaterials mit Aluminiumoxid, ist dabei ein wesentlicher Schlüssel zur hohen Zuverlässigkeit der Bauteile im Betrieb, denn je weiter die Formierspannung oberhalb der Nennspannung liegt, desto mehr sinkt die Wahrscheinlichkeit eines dielektrischen Durchschlages. Praktische Werte für das Verhältnis aus Formierspannung zu Nennspannung liegen bei Jianghai Elkos typischerweise im Bereich 1,25 (Niedervolt) bis 1,60 (Hochvolt). Die Schichtdicke beträgt ca. 1,4 nm/V, also z.B. ca. 900 nm für einen Elko mit 450 V Spannungsfestigkeit, entsprechend weniger als dem Hundertstel der Dicke eines menschlichen Haares.
3. Zuschneiden – die geätzte und formierte Folie wird auf sog. „Mutterrollen“ mit einer Breite von ca. 50 cm bereitgestellt. Aus diesen Mutterrollen entstehen beim Zuschneiden die Folienstreifen für Anoden- und Kathodenmaterial in der jeweils benötigten Breite.



**Abb. 2: Prozessschritte von der Alufolie zum Anodenmaterial**

4. Wickeln (Abb. 3.1) – Anbringen der elektrischen Anschlussföhnchen an die Folien (Quetschung/Kaltschweißen) und Wickeln von Anode, Papier (Abstandhalter, ggf. mehrlagig), Kathode. Auch die Auswahl des Papierses und die Strukturen der Kathodenfolie haben einen erheblichen Einfluss auf die spätere Leistungsfähigkeit des Bauteils. Der Aufbau des Wickels sowie die Art der inneren und äußeren Anschlüsse bestimmen zudem die parasitäre Induktivität mit. Zwar ist es oftmals gewünscht, die Halbleiter durch niederinduktive Kondensatoren zu entlasten, jedoch könnte der Elko deutlich sensibler auf Spannungsimpulse reagieren bis hin zur Schädigung. Es sollte daher abgewogen werden, ob die Verwendung niederinduktiver Elkos in jedem Fall sinnvoll ist.
5. Imprägnieren (Abb. 3.2) – die Poren des im Wickel enthaltenen Papierses und die gesamte Oberfläche der Anodenfolie werden mit der flüssigen Kathode, dem Elektrolyten, benetzt.
6. Einhausung des Wickels mit Dichtgummi im Becher (Abb. 3.3; bei Snap-in und Schraubanschlusstypen: Herstellen einer elektrischen Verbindung zwischen den Anschlussföhnchen und den Löt- bzw. Schraubanschlusselektroden).
7. Verschlussbördelung der Dichtung und Schrumpfschlauchisolierung (Abb. 3.4).
8. Nachformieren (Abb. 3.5; „Aging“, „Post-forming“, „Burn-in“) zur Ausheilung von Beschädigungen der Oxidschicht während des Herstellprozesses. Hauptgründe für eine Nachformierung sind unformierte Schnittkanten der Anodenfolie und die durch ihre Sprödigkeit während des Wickelns gerissene Oxidschicht, sowie (in kleinerem Maße) Beschädigungen im Bereich der Verbindungsstellen für die Anschlussföhnchen.
9. 100% Qualitätskontrolle (Abb. 3.6) der vitalen Parameter (Kapazität, Verlustfaktor, Leckstrom).

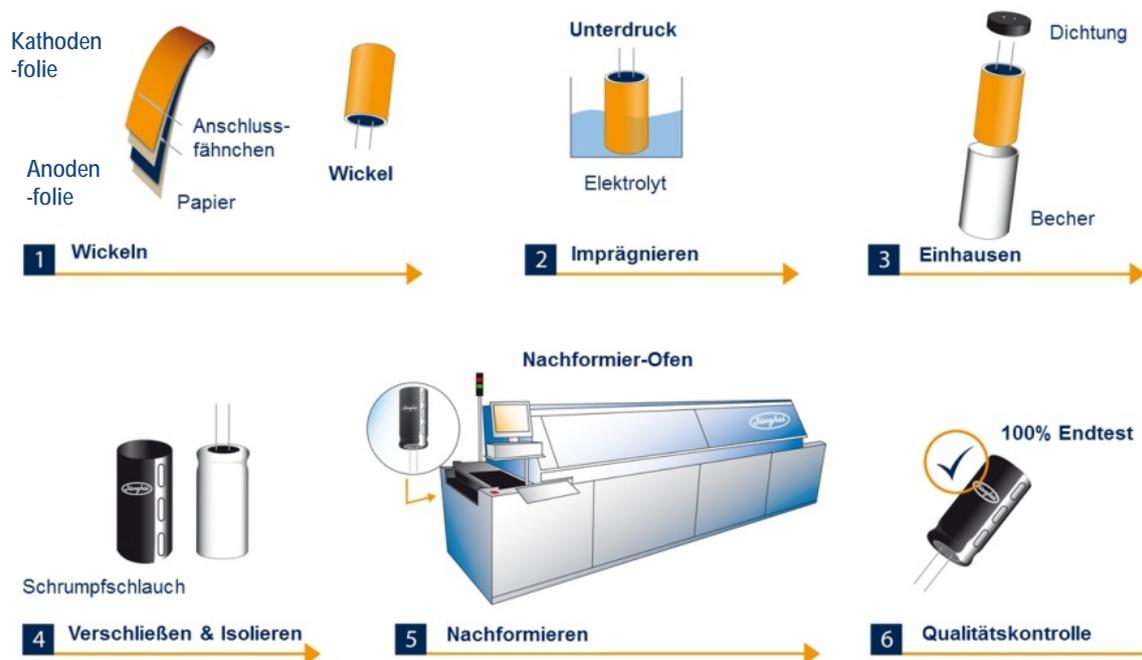
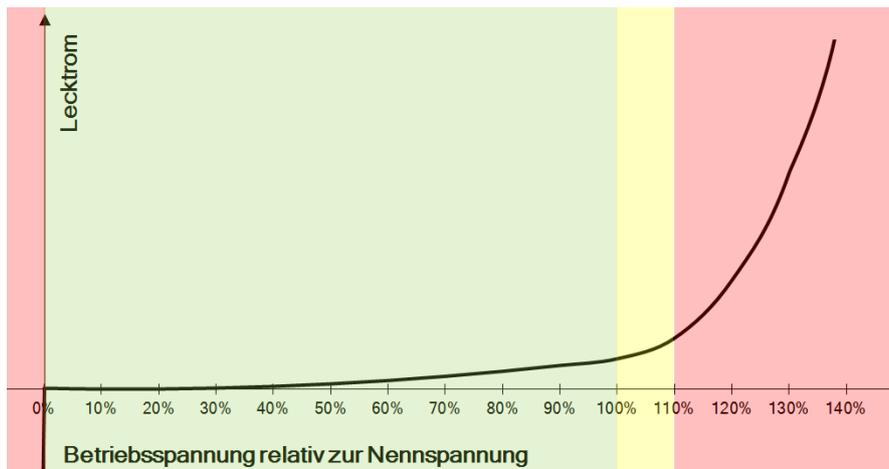


Abb. 3: Prozessschritte vom Vormaterial zum Elko

Insbesondere die Prozessschritte des Formierens und Nachformierens haben großen Einfluss auf die Spannungsfestigkeit von Elkos im Betrieb. Jianghai verfolgt hier das Ziel, einen hinreichenden Sicherheitsabstand der Formierspannung zur Nennspannung und stets ausreichende Spannungen und Verweildauern beim Nachformieren zu gewährleisten, um eine hohe Zuverlässigkeit zu erzielen. Da die Formierspannung nicht im Datenblatt angegeben wird, fällt es dem Endanwender nicht leicht, diese als Vergleichsparameter zu bewerten. Indirekt lassen sich jedoch durch gezieltes Nachfragen beim Hersteller und den Vergleich der Leckströme Schlüsse auf die Auslegungsphilosophie des jeweiligen Anbieters ziehen. Angesichts steigender Material- und Energiepreise beobachtet man vermehrt, dass sogar namhafte Hersteller die Formierspannung bei laufenden Serien senken. Jianghai betrachtet derartige Bestrebungen zur Kostenoptimierung aus Qualitätssicht als nicht vertretbar.

### Definitionen der Spannungsfestigkeit

Spannungen außerhalb des zulässigen Bereichs (grün bzw. gelb gefärbter Bereich in Abb. 4) können bereits bei einmaligem Auftreten zu bleibenden Schäden des Elkos führen. Für den sicheren und zuverlässigen Betrieb von Elkos sind daher die folgenden Definitionen von zentraler Bedeutung.



**Abb. 4: Qualitativer Verlauf des Betriebsleckstroms in Abhängigkeit von der Spannung für einen Hochvolt-Elko**

Umpolspannung (reverse voltage, IEC 60384-4, 4.15)

Alu-Elkos als gepolte Bauelemente müssen stets mit korrekter Polarität angeschlossen werden. Eine Umpolung bedeutete, dass die dünne (Luft-) Oxidschicht auf der Kathodenfolie die Aufgabe des Dielektrikums übernehmen würde. Da die Dicke der Lufoxidschicht sehr gering ist, weist sie typischerweise eine „Spannungsfestigkeit“ von 0,7 ~ 3 Volt auf. Ein Überschreiten dieser Spannung löst eine elektrochemische Reaktion zum Wachstum der Oxidschicht auf der Kathodenfolie aus, die mit der Bildung von Wasserstoffgas und Wärme einhergeht. Eine Umpolung kann somit (je nach Spannung und Stromangebot) zur Zerstörung des Bauteils durch Überhitzung, Überdruck und dielektrische Durchschläge führen. Jianghai erlaubt daher keinen Betrieb von Elkos an einer Umpolspannung (roter Bereich links in Abb. 4).

Bemessungsspannung und überlagerte Wechselspannung (Nennspannung, rated voltage, IEC 60384-4, 2.2.3 ~ 2.2.5)

Die Bemessungsspannung ist auf den Kondensator aufgedruckt und im Datenblatt angegeben. Sie stellt den maximal zulässigen Wert im gesamten Temperaturbereich des Elkos dar. Die kontinuierlich am Kondensator anliegende Betriebsspannung (inklusive einer überlagerten Wechselspannung) soll nicht den Wert der Bemessungsspannung übersteigen. Der Scheitelwert aus überlagerten Wechselspannung und Gleichspannung muss sich stets im grünen Bereich der Abbildung 4 befinden, wobei der Bemessungs-Wechselstrom nicht überschritten werden darf.

Spitzenspannung (surge voltage, IEC 60384-4, 4.14)

Die Spitzenspannung kennzeichnet den maximalen Spannungswert, der innerhalb der Elko-Lebensdauer mit einer Häufigkeit von 1000 Zyklen bei einer Verweildauer von 30 Sekunden und einer Pause von 5 Minuten und 30 Sekunden angelegt werden darf, ohne dass es zu sichtbaren Schäden am Elko oder einer Kapazitätsänderung von mehr als 15% kommt. Bei Kondensatoren für erhöhte Anforderungen (der Normalfall bei professionellen Industrieanwendungen) erfolgen maximal fünf Prüfungen bei oberer Kategorietemperatur pro Stunde. In der Regel gelten für Elkos mit einer Bemessungsspannung von bis zu 315 Volt Spitzenspannungen vom 1,15-fachen der Bemessungsspannung und für Elkos mit einer Bemessungsspannung von mehr als 315 Volt gelten

Spitzenspannungen vom 1,10-fachen der Bemessungsspannung (gelber Bereich in Abbildung 4). Jianghai erzielt die Spitzenspannungsfestigkeit durch sorgfältiges Nachformieren bei einer hinreichend hohen Nachformierspannung. Werden geringere Spitzenspannungen in den Datenblättern ausgewiesen, so kann dies ein Hinweis auf einen kostenoptimierten Fertigungsprozess sein (kürzere Zeiten und/oder niedrigere Formierspannungen im Ofen) oder auf Porenstrukturen, die zwar durch die Formierspannung anfänglich auf eine hohe Spannungsfestigkeit gebracht wurden (und damit als neues Bauteil kaum von Elkos höherer Qualität unterscheidbar sind), jedoch über die Lebensdauer zu einer größeren Drift der Parameter neigen und deshalb nicht durch Spitzenspannungen belastet werden dürfen. Selbst wenn diesen Bauteilen sehr hohe oder erweiterte zulässige Stromprofile zugewiesen werden, können unerwartet auftretende Spannungsimpulse in einem stark belasteten Stromlastprofil einen plötzlichen Elko-Ausfall verursachen.

#### Transienten-Überlastspannung (transient voltage, IEC 60384-4, 4.22)

Eine Überschreitung der Spitzenspannung liegt außerhalb des im Datenblatt angegebenen Betriebsbereiches (roter Bereich rechts in Abb. 4). Dennoch können Elkos im Prinzip kurzzeitig sehr hohen, transienten Überspannungen mit begrenztem Energieinhalt widerstehen. Spannungen jenseits der Spitzenspannung führen zu hohen Leckströmen und einer Spannungsbegrenzung ähnlich einer Zenerdiode [3]. Wenn die elektrische Feldstärke zu hoch für den Elektrolyten wird, kann es unmittelbar zu einem Kurzschluss kommen. Aber selbst falls der Elektrolyt noch standhält, führen die elektrochemischen Formierungsvorgänge an der Oberfläche der Anodenfolie zur Erwärmung und Wasserstoffgasbildung, so dass nach einer gewissen Zeit das Sicherheitsventil anspricht.

Wenn in einer Applikation definierte Transienten zu erwarten sind, verfügt Jianghai über technische Möglichkeiten zur Optimierung von Folien, Elektrolyt, Papier und dem Prozess, um hier eine spezifische Lösung im Rahmen der physikalischen Grenzen zu schaffen. Da fast alle Materialien und Prozessschritte einen Einfluss auf die Stabilität des Bauteils und seine Spannungsfestigkeit haben, ergibt sich ein komplexes Ineinandergreifen aller Parameter bei der Auslegung der Bauteile. Jianghai bietet seinen Kunden eine enge Zusammenarbeit an, um optimale Lösungen für Technik und Einkauf zu entwickeln.

## **Zusammenfassung**

Aluminium-Elektrolytkondensatoren beeinflussen durch ihre individuelle Spannungsfestigkeit die Zuverlässigkeit der Geräte, in denen sie eingesetzt sind. Die Kenntnis einiger wesentlicher Parameter dieser Bauelemente, die durch den in ihnen enthaltenen flüssigen Elektrolyten eine Besonderheit unter den elektronischen Bauteilen darstellen, ist zur sicheren Auslegung von Geräten unabdingbar.

Die typischen Einflussfaktoren sowie die Definitionen der Spannungsfestigkeit werden erläutert. Als Hilfsmittel zum erfolgreichen Einsatz steht eine qualitative Grafik der für Elkos zulässigen und kritischen Spannungsbereiche zur Verfügung.

Die Anwendbarkeit der allgemein formulierten Leitlinien hängt im Einzelfall von der Baureihe und der Applikation ab. Daher sind eine intensive Projektbegleitung und Bestätigung der Anforderungen für die jeweilige Applikation durch den Elko-Hersteller immer erforderlich.

## Literatur

- [1] Albertsen, A., Lebe lang und in Frieden! Hilfsmittel für eine praxisnahe Elko-Lebensdauerabschätzung, Elektronik Components 2009, 22-28 (2009)
- [2] Albertsen, A., Auf eine sichere Bank setzen – Zuverlässigkeit von Elektrolytkondensatoren, Elektronik Components 2010, 14-17 (2010)
- [3] Imam, A.M., Condition Monitoring of Electrolytic Capacitors for Power Electronics Applications, Dissertation, Georgia Institute of Technology (2007)
- [4] Venet, P., A. Lahyani, G. Grellet, A. Ah-Jaco, Influence of aging on electrolytic capacitors function in static converters: Fault prediction method, Eur. Phys. J. AP 5, 71-83 (1999)

## Unternehmen

Die Jianghai Europe Electronic Components GmbH mit Sitz und Warenlager in Krefeld und Kempen unterstützt die europäischen Kunden der Nantong Jianghai Capacitor Co., Ltd. (Jianghai) in Nantong, China. Jianghai wurde im Jahre 1958 gegründet. Während Jianghai am Anfang vor allem spezielle chemische Produkte (wie z.B. Elektrolytsysteme) entwickelte und produzierte, kamen ab 1970 Aluminium-Elektrolytkondensatoren und geätzte und formierte Anodenfolien hinzu. Folien-, Polymer-, Doppelschicht und Lithium-Ionen Kondensatoren komplementieren das Produktportfolio. Jianghai ist der größte chinesische Elko-Hersteller und zählt im weltweiten Vergleich zu den drei führenden Herstellern von Snap-in und Schraubanschlusselkos.

## Autor



Dr. Arne Albertsen studierte Physik mit dem Schwerpunkt Angewandte Physik an der Universität Kiel. Nach Diplom (1992) und Doktorarbeit (1994) über die Messung und Analyse von Stromzeitreihen aus Ionenkanälen in biologischen Membranen wechselte er in die Industrie, wo er in verschiedenen Bereichen des umwelt- und verfahrenstechnischen Anlagenbaus tätig war. Seit 2001 widmet er sich als Mitarbeiter führender Hersteller (BCcomponents bzw. Vishay und KOA) dem Marketing und Vertrieb von passiven und diskreten aktiven Bauelementen. Seit November 2008 zeichnet er als Senior Sales Manager bei Jianghai Europe Electronic Components GmbH (Krefeld) verantwortlich für die Betreuung europäischer Key-Account-Kunden. Die Schwerpunkte der Tätigkeit von Dr. Albertsen liegen im Bereich des Design-ins und der Anwendungsunterstützung für Kondensatoren in professionellen Industrieapplikationen. Dr. Albertsen ist seit 2011 ehrenamtlich als Experte für Elektrolytkondensatoren und stellvertretender Obmann im Normungsgremium „K611“ der DKE Deutschen Kommission Elektrotechnik im DIN und VDE tätig.

[www.jianghai-europe.com](http://www.jianghai-europe.com)

[a.albertsen@jianghai-europe.com](mailto:a.albertsen@jianghai-europe.com)

Icons Titelseite: Freepik