

Materialtestado I: la tirstesto

Johannes Mueller*

15-a de aprilo, 2014

Tio ĉi estas la unua artikolo de serio pri materialtestado. La serio okupiĝas pri la ecoj de materialoj ĉefe sur la fenomenaj nivelo.

En tiu ĉi unua artikolo ni ekkonos la plej gravajn kaj la plej instruan metodon por testi materialojn, la tirsteston. Ni vidos, kiel ĝi funkcias, kiajn parametrojn ĝi bezonas, kiajn rezultojn ĝi donas kaj diskutos la signifon de la eblaj rezultoj. Ni komparos, kiel en la tirstesto kondukatas malsamaj materialoj.

1 Enkonduko

Unu el la plej gravaj demandoj pri materialoj uzataj en la inĝenierado estas, kiom altan meĥanikan streĉon la materialo eltenas. Evidenta metodo respondi la demandon estas fari teston. Oni povas apliki streĉon al la materialo kaj vidi, ĉu ĝi rompiĝas aŭ ne. Sed materialo pro streĉo ne nepre rompiĝas sed ankaŭ deformiĝas. Malsamaj materialoj deformiĝas malsame ĝis la rompiĝo. Ekzemple metaloj kondukatas malsame kompare al gumoj kaj ceramoj.

Por studi tian konduton, oni inventis la tirsteston. Jam aperis esperantlingva publikaĵo, kiu kovras la tirsteston, kadre de la konferenco KAEST 2009 [1]. Ĝi fokusas pli al la enmateriala strukturo ol al la fenomeno en la dilata konduto. Kiel la nomo tirstesto indikas oni tiras la materialon. En la praktiko oni kutime dilatas la materialon kaj mezuras la streĉon bezonatan streĉon por atingi certan dilaton. Oni altigas la dilaton kaj samtempe mezuras la streĉon ĝis la materialo rompiĝas. Sed unue oni devas difini la parametrojn.

*Johannes.Mueller@esperanto.de

2 La parametroj de tirstesto

2.1 La streĉo

Kiam oni konstruas ekzemple librobretaron, oni ne volas, ke la bretoj kurbiĝos pro la pezo de la libroj surmetotaj. Evidenta solvo estas elekti sufiĉe dikajn bretojn. Sed kial pli dikaj bretoj malpli kurbiĝas pro la sama pezo de la samaj libroj? La forto, kiun la breto devas elteni estas la sama depende de la pezo de la libro, sed la streĉo, kiun la materialo devas elteni estas des pli granda ju pli maldika estas la breto. La pezo de la libroj aplikas forton F kaj la forto kaŭzas streĉon σ en la breto.

La ekzemplo de la librobreto jam estas iom tro komplika, ĉar temas pri fleksa streĉstato. Fleksaj streĉstatoj estas heterogenaj, t.e. ke la materialo ne ĉie spertas la saman streĉon. En la tirstesto la afero estas pli simpla, ĉar la streĉstato estas homogena. Oni dilate tiras specimenon per forto F . La specimeno havas konstantan sekcareon A . La streĉo estas difinita kiel

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (1)$$

Do la sama forto F kaŭzas al pli granda specimeno, t.e. A estas pli granda malpli grandan streĉon σ .

Ni imagu du rondajn specimenojn. Grandan kun diametro $D_1 = 6$ mm kaj malgrandan kun $D_2 = 3$ mm. Do iliaj sekcareoj estas

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} \approx 28,3 \text{ mm}^2 \quad A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} \approx 7,1 \text{ mm}^2. \quad (2)$$

Se oni aplikas al tiuj du specimenoj forton de dek kilo-neŭtonoj $F = 10$ kN, la streĉoj en la specimenoj estas:

$$\sigma_1 = \frac{F}{A_1} = \frac{10 \text{ kN}}{28,3 \text{ mm}} \approx 353,4 \text{ N/mm}^2 = 353,4 \text{ MPa}. \quad (3)$$

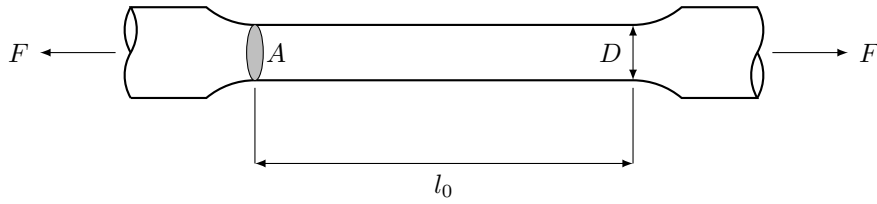
$$\sigma_2 = \frac{F}{A_2} = \frac{10 \text{ kN}}{7,1 \text{ mm}} \approx 1414,7 \text{ N/mm}^2 = 1414,7 \text{ MPa}. \quad (4)$$

La unuo de streĉo do estas N/mm^2 aŭ MPa (mega-paskaloj). Por ne rompiĝi pro nia tiro la granda specimeno devas esti el materialo eltenanta tirstreĉon de 353,4 MPa. La materialo de la malgranda specimeno devus eltiri la kvaroblon, 1414,7 MPa.

2.2 La dilato

Imagu, ke vi havas du bendojn el gumo. Unu estas dek centimetrojn longa kaj la alia kvindek centimetrojn. La mallongan bendon vi povas tiri al fina longeco de eble kvardek centimetroj antaŭ ol ĝi rompiĝas. La longan vi analoge povas tiri al ducent centimetroj. Do ambaŭ bendojn vi povas tiri al fina longeco kvarobla de la komenca longeco. Evidente ni devas rilatigi la dilaton ϵ de specimeno al la komenca longeco l_0 . La dilato estas difinita jene

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}. \quad (5)$$



Bildo 1: Skemo de tirspeĉimeno. F estas la aplikata tirforto.

En tiu ekvacio $\Delta l = l - l_0$ estas la diferenco inter la longeco l , al kiu ni dilatis la speĉimemon kaj ties komenca longeco l_0 .

Ni rigardu ekzemple niajn du gumbendojn: La mallongan ni tiris de komenca longeco $l_0 = 10$ cm al fina longeco $l_{\text{fin}} = 40$ cm. La fina dilato ϵ_{fin} do estas

$$\epsilon_{\text{fin}} = \frac{\Delta l_{\text{fin}}}{l_0} = \frac{l_{\text{fin}} - l_0}{l_0} = \frac{40 \text{ cm} - 10 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = \frac{30 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 3. \quad (6)$$

Analoge por la longa gumobendo:

$$\epsilon_{\text{fin}} = \frac{\Delta l_{\text{fin}}}{l_0} = \frac{l_{\text{fin}} - l_0}{l_0} = \frac{200 \text{ cm} - 50 \text{ cm}}{50 \text{ cm}} = \frac{150 \text{ cm}}{50 \text{ cm}} = 3. \quad (7)$$

Do ni konstatas, ke la gumo eltenas rompiĝan dilaton $\epsilon_{\text{fin}} = 3 = 300\%$. Ni plie konstatas, ke la dilato estas sendimensia kvanto, t.e. ĝi ne havas fizikan unuon.

3 La testprocezo

3.1 La speĉimeno

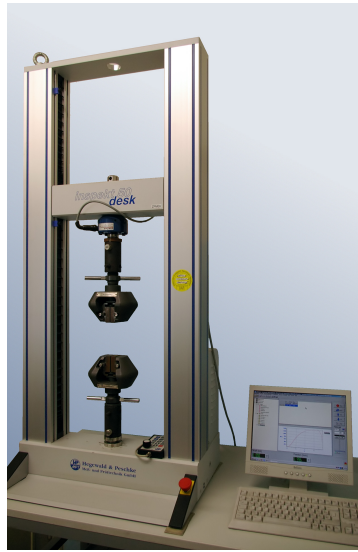
La speĉimeno estas skeme montrata en bildo 1. Ĝi havas la formon kiu similas al ostoj porhunda. Tiu formo utilas, ĉar la streĉo en la mezura longeco l_0 , la maldika parto, estas homogenaj. La skemita speĉimeno estas ronda. Ankaŭ ekzistas lajaj speĉimenoj, por testi lajajn materialojn.

3.2 La testmaŝino

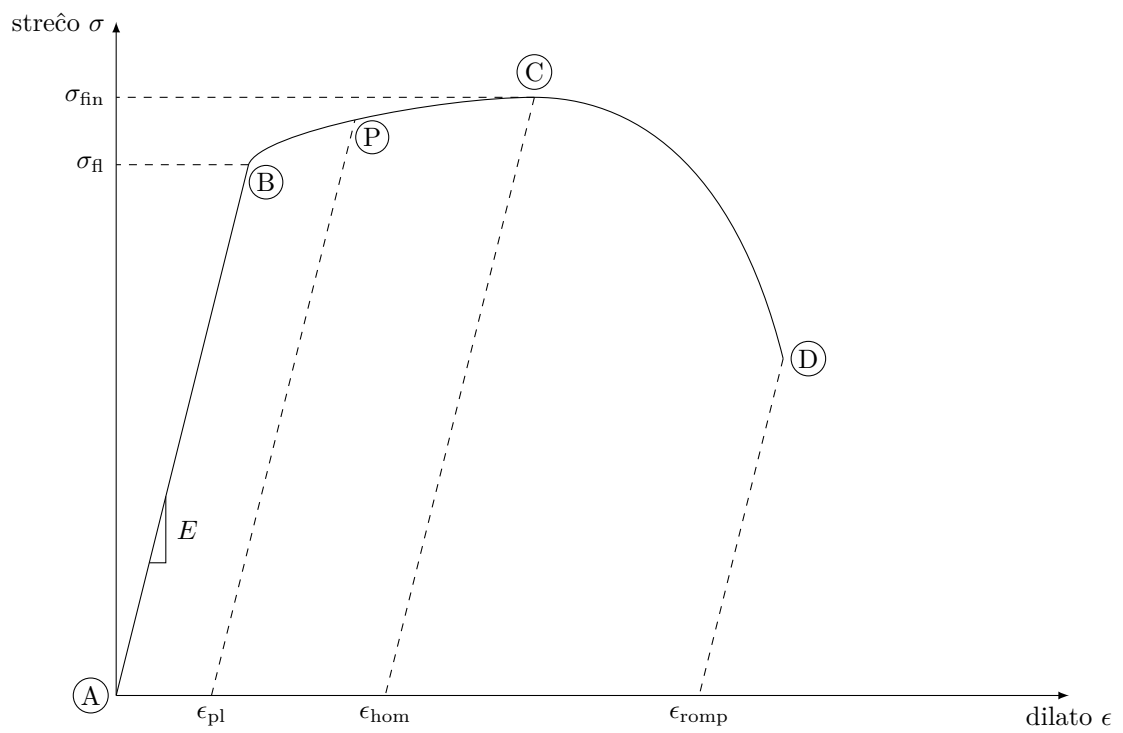
Ekzempla tirmaŝino estas videbla en bildo 2. La speĉimeno estas muntata inter la du jungiloj. La transversa trabo estas suprenigata per motoro. Tiel estas tirata la jungita speĉimeno. Komputilo kaptas la mezuraĵojn kaj protokolas la tutan procezon.

3.3 Testo kaj rezulto

La tirmaŝino dilatas la speĉimemon je konstanta rapideco kaj samtempe mezuras la forton aplikatan. Konate la sekcareon ĝi povas kalkuli la streĉon. El la dilata kaj la streĉa signaloj oni desegnas la t.n. streĉ-dilat-diagramon skeme montratan en bildo 3.



Bildo 2: Bildo de tirmaŝino [3]. La komputilo protokolas la mezuraĵon.



Bildo 3: Rezulto de tirstesto: la streĉ-dilat-diagramo

La testo komenciĝas ĉe la punkto A. Tirante la specimenon oni sekvas la kurbon tra la punktoj B, C, D. En punkto D la specimeno rompiĝas. Do kio okazas sur la kurbo survoje al la rompiĝo?

3.3.1 La elasta dilato

Inter punktoj A kaj B okazas la t.n. elasta dilato. Tio signifas, ke la dilato estas reinversebla. Se oni ĉesigas la teston antaŭ punkto B la specimeno elaste reformiĝas, t.e. ĝi reekhavos sian originan formon kaj longecon. Dum la elasta fazo la rilato inter streĉo kaj dilato estas lineara. La koeficiento nomiĝas elast-modulo. Ĝi estas priskribota pli detale en sekcio 4.2.1.

3.3.2 La plasta deformiĝo

Se oni preteriras punkton B, ekk okazas la t.n. plasta deformiĝo. Tio signifas, ke la deformiĝo estas nerenversebla. Se oni ĉesigas la teston inter punktoj B kaj C, ekzemple en punkto P, la specimeno ne sekvas la saman vojon reen, sed ĝi reformiĝas elaste, do sekvas linion paralelan al la elasta dilato priskribita en sekcio 3.3.1. Do ĝi ne reatingos punkton A, sed restos plasta dilato ϵ_{pl} .

3.3.3 La koliĝo

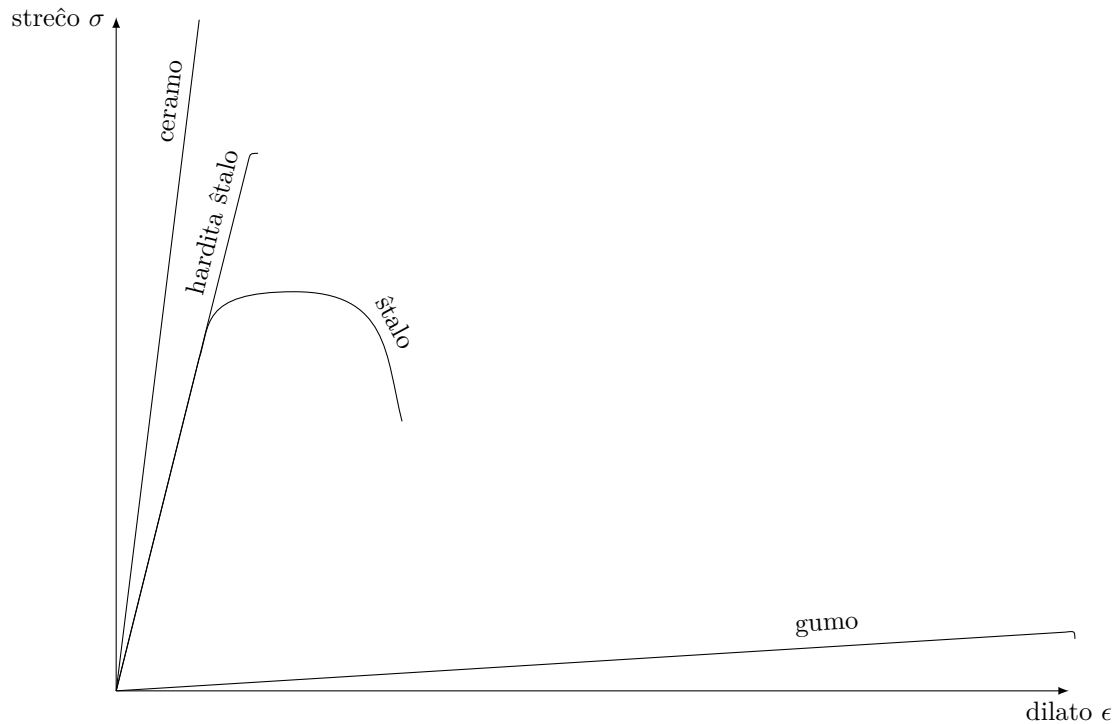
Kiam la materialo preteriras punkton C la streĉo ŝajnas malaltiĝi. Tio estas parte nur ŝajna efiko, ĉar la maŝino ne povas rekte mezuri la streĉon, sed nur la forton kaj kalkulas per la konata sekcareo la streĉon. Post punkto C okazas du efikoj: la materialo damaĝiĝas kaj en iu loko sur la mezurlongo la sekcareo malgrandiĝas. La maŝino tamen kalkulas kun la origina pli granda sekcareo. Tio laŭ ekvacio 1 ŝajnigas pli malgrandan streĉon ol la vera streĉo. Tiun efikon oni nomas koliĝo.

La materialo damaĝiĝas pli kaj pli kaj samtempe la loka sekcareo malgrandiĝas pli kaj pli kaj iam en punkto D la materialo rompiĝas. La tuta procezo de punkto C ĝis D estas la koliĝo.

4 Interpreto de la rezulto

4.1 Ekzemplaj diagramoj

En bildo 4 oni vidas skeme la malsaman konduton de malsamaj materialoj. La ceramoj estas rompiĝema, t.e. ke ili ne deformiĝas plaste. Ŝtaloj estas bone hardeblaj materialoj. Molaj ŝtaloj eltenas ioman platan deformiĝon. Ju pli oni hardas ŝtalon, des pli altiĝas la eltenebla streĉo kaj des pli malaltiĝas la eltenebla dilato.



Bildo 4: Ekzemplaj kondutoj por malsamaj materialoj

4.2 Ellegeblaj-kvantoj

Materialsociencistoj uzas la streĉ-dilat-diagramon por ellegi gravajn evalorojn de la materialoj. Ni sekve ekkonu la plej gravajn.

4.2.1 La elast-modulo

La esprimo “elasta” estas konata en la ĉiutaga lingvo. Ĉiu scias, ke gumo estas pli elasta ol ceramo. Rigardante la diagramon en bildo 4 ni vidas la diferencon. La elasta parto de la cerama kurbo estas multe pli kruta ol tiu de la gumo. Tiun krutecon oni nomas elast-modulo. Kiel ni jam diris en sekcio 3.3.1 ĝi estas la koeficiento de la lineara rilato inter streĉo σ kaj dilato ϵ :

$$\sigma = E\epsilon \iff E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (8)$$

Ĉar la dilato ϵ estas sendimensia kvanto (vd. sekcio 2.2) la dimensio de la elast-modulo E estas la sama kiel tiu de σ , nome $\text{kN/mm}^2 = \text{GPa}$. Jen ekzemplaj valoroj:

- ceramoj: 300 GPa – 500 GPa
- ŝtalo: 200 GPa
- aluminio: 70 GPa
- plasto: 2 GPa – 10 GPa

- gumo: $< 1 \text{ GPa}$

4.2.2 La flustreĉo – la elasta limo

La flustreĉo σ_{fl} estas la streĉo, kiun oni povas apliki al la materialo, sen ke ĝi deformiĝu nerenverseble. Se oni ne preteriras la flustreĉon, la materialo deformiĝas nur elaste kaj do reformiĝas al sia origina formo post senŝarĝigo. Tio ne signifas, ke se oni ne preteriras la flustreĉon la materialo nepre transvivas. Se oni multfoje ŝarĝas la materialon kaj eĉ neniam transiras la flustreĉon la materialo iam povas rompiĝi pro laciĝo. La temon de materiallaciĝo ni kovros en aparta artikolo.

La flustreĉo estas grava indiko por la mekanikaj kapabloj de materialo. Tipaj valoroj estas:

- ŝtalo: 300 MPa
- hardita ŝtalo: 1200 MPa
- solidega ŝtalo: 2100 MPa
- ceramoj: ĝis 3600 MPa
- aluminio: 100 MPa
- teknika aluminio: ĝis 300 MPa
- plasto
- glaso

4.2.3 La fina tirstreĉo

La tirstreĉo σ_{fin} estas la plej alta streĉo, kiun la materialo povas elteni. Pli altan streĉon oni ne povas apliki, ĉar la materialo rompiĝus. Ĝi kutime estas iomete pli alta ol la flustreĉo (vd. sekcio 4.2.2).

4.2.4 La homogena dilato

La homogena dilato ϵ_{hom} estas la dilato, al kiu oni povas tiri la materialon, antaŭ ol ĝi koliĝas (vd. sekcio 3.3.3). Do la sekcareo ĝis la atingo de la homogena dilato restas homogena laŭ la tuta longeco de la specimeno. Se oni preterpasas la homogenan dilaton, la materialo komencas koliĝi. Kutime oni konsideras, ke en la plej alta punkto de la streĉ-dilat-diagramo oni atingis la finan tirstreĉon kaj la homogenan dilaton, sed tio ne tute ĝustas, ĉar la difinoj de streĉo kaj dilato estas malakurataj. Pli akuratajn difinojn ni ekkonos en sekcio 4.3.1.

4.2.5 La rompdilato

La rompdilato ϵ_{romp} estas la maksimuma dilato, al kiu oni povas dilati la materialon. Kvankam ĝi ne havas rektan teknikan signifon ĝi tamen estas grava indikilo por la dilatebleco de materialoj. Tipaj valoroj estas:

- ŝtalo: 60 %
- hardita ŝtalo: 10 %
- solidega ŝtalo: 3 %
- ceramoj: < 1 %

4.3 Pliaj konsideroj

4.3.1 Vera dilato kaj vera streĉo

La streĉo kaj la dilato laŭ la difinoj de ekvacioj (1) kaj (5) estas praktike bone uzablaj sed ne tute precizaj. Oni nomas ilin la teknika streĉo σ_t resp. la teknika dilato ϵ_t . Kontraste al tiuj ankaŭ ekzistas la veraj streĉo resp. dilato.

Unue ni konsideras la veran dilaton. Ni rerigardu ekvacion (5):

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Se ni imagas, ke ni jam dilatis nian specimenon al la longeco l kaj ankoraŭ tiras plie Δl , la aldonita dilato rilatas laŭ ekvacio (5) al la origina longeco l_0 kaj ne al la aktuala longeco l . La materialo ne interesiĝas pri la origina longeco de la specimeno, sed pri la kvanto de la aldonata dilato. Do ni rilatu la aldonitan longecon Δl al la aktuala longeco l . La aldonita dilato do estus

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta l}{l}.$$

Ni nun povas konsideri senfine malgrandajn paŝojn kaj ricevas

$$d\epsilon = \frac{dl}{l} \tag{9}$$

$$\implies \epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{\Delta l + l_0}{l_0}\right) \tag{10}$$

$$\implies \epsilon = \ln(1 + \epsilon_t) \tag{11}$$

La vera streĉo konsideras la t.n. volumkonstantecon de la specimeno. Se ni dilatas la specimenon en unu direkto, ni do plilongigas ĝin. Ĉar la volumo restas konstanta, la sekcareo A de la specimeno devas malgrandiĝi. Se ni ne konsideras tiun malgrandiĝon ekvacio (1) ŝajnis al ni tro malaltan streĉon. Do ni konsideru, ke la specimeno havas konstantan volumon

$$V = lA = l_0A_0.$$

Se ni tiras la specimenon je Δl la sekcareo malgrandiĝas do je

$$l_0 A_0 = V = (l_0 + \Delta l) A \iff A = A_0 \frac{l_0}{l_0 + \Delta l}. \quad (12)$$

La vera streĉo laŭ ekvacioj (1) kaj (12) estas

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \sigma_t (1 - \epsilon_t) \quad (13)$$

4.3.2 La formulsignoj

La formulsignoj uzataj en tiu ĉi artikolo estas elektitaj tiel, ke ĝi spegulu laŭeble la internaciajn kutimojn. Naciaj lingvoj havas siajn proprajn kutimojn. La indeksoj de la formulsignoj estas esperantigitaj, ĉar ne ekzistas internacia normo por ili.

5 Konkludo kaj antaŭrigardo

Ni ekkonis la plej simplan metodon por testi la mekanikan kapablon de materialo kaj studis la malsamajn kondutojn de malsamaj materialoj. La tirstesto estas limigita al unudirekta kaj statika ŝarĝo. En la kutima uzo de materialo estas aliaj kondiĉoj. La ŝarĝo estas plurdirekta kaj dinamika. Speciale la dinamika ŝarĝado havas grandan efikon al la materialo. Se oni cikle ŝargas kaj malstreĉas materialon aŭ cikle ŝanĝas la streĉon en la materialo la materialo rompiĝas, kvankam oni estas en la elasta fazo. Tiun efikon oni nomas laciĝo de materialo. Ĝi estu la temo de venonta artikolo de tiu ĉi serio.

Citaĵoj

- [1] J. Mueller. “Materialaj ecoj de metalaj materialoj”. En: *Instrumento por fakuloj*. KAEST. Kava-Pech, 2009.
- [2] J. Rösler, H. Harders kaj M. Bäker. *Mechanisches Verhalten Der Werkstoffe*. Vieweg Studium. Vieweg Verlag, Friedr. & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2008.
- [3] Wikipedia, eld. *Zugversuch*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Zugversuch>.