

Plaatvormen

(not) safe for designers? - XIII

Tempelman, Erik

Publication date

2021

Document Version

Final published version

Published in

De Constructeur

Citation (APA)

Tempelman, E. (2021). Plaatvormen: (not) safe for designers? - XIII. *De Constructeur*, 61(5), 26-29.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

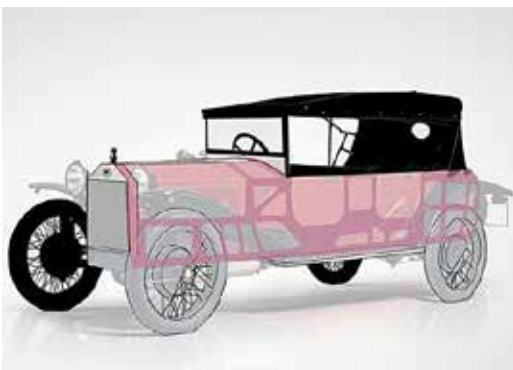
Plaatvervormen

(NOT) SAFE FOR DESIGNERS – XIII

Eind 1918 diende automobiel-pionier Vincenzo Lancia een patent in voor een verbeterde uitvoering van de zelfdragende carrosserie voor personenauto's. Dit concept zelf was niet nieuw – Lagonda had het eerder al eens geprobeerd, met minimaal succes – maar Lancia's slim doordachte versie ontketende een ware revolutie in de autotechniek.

ERIK TEMPELMAN, ADVIESBUREAU ERIKTEMPELMAN.COM,
UNIVERSITAIR HOOFDDOCENT TU DELFT – INDUSTRIEEL
ONTWERPEN

Hij bouwde er de Lancia Lambda mee (afbeelding 1). Mede dankzij de lichtere en lagere bouwwijze vergeleken met de toen gangbare 'body-on-frame' auto's werd de Lambda een daverend succes, zowel als raceauto en als limousine. Het was in feite de eerste 'echte' auto. Maar hij was wel lastig te maken. Om hun constructieve functie te kunnen uitvoeren, moest de plaatstalen carrosseriedelen immers perfect passen. Echter, omdat staal na het vervormen onvoorspelbaar terugveert, vroeg die strakke pasvorm veel nabewerking. Een tijdgenoot zoals de Ford Model T, met een niet-dragend koetswerk op een apart chassis, had hier geen last van.



Afbeelding 1 De Lancia Lambda – in feite de 'eerste' echte auto – werd een daverend succes, zowel als raceauto en als limousine. (Illustratie: Koos Eissen)



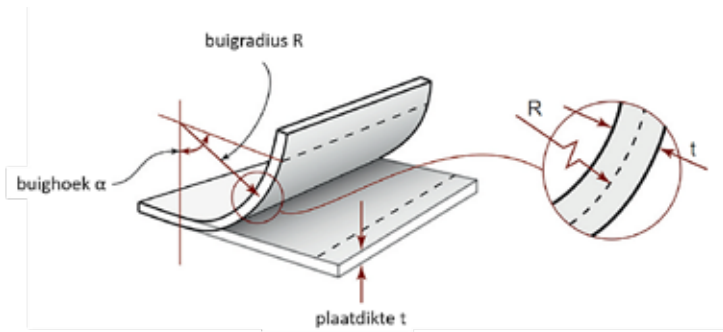
Afbeelding 2 Ook de Citroën Traction Avant had een zelfdragende carrosserie. (Illustratie: Koos Eissen)

Terwijl Lancia zo'n 2.000 Lambda's per jaar wist te produceren, maakte Ford jaarlijks 2 miljoen T-Fords... een wereld van verschil.

'Buddisme'

Wie in de *roaring twenties* goed naar die relatief zeldzame Lambda's keek, was Edward Budd. Hij zag de potentie van de uit staalplaat gestampte zelfdragende carrosserie, en liet zijn firma alle benodigde technologie ontwikkelen om dergelijke auto's snel en goedkoop te kunnen maken. Met succes, want hoewel slechts weinigen dit bedrijf kennen, zou het 'Buddisme' op termijn de standaard worden waarnaar haast alle auto's werden ontworpen en gebouwd. Om de adoptie van zijn technologie te versnellen, liet Budd ook nog een eigen carrosserie ontwikkelen, als voorbeeld van wat er mogelijk was. Dat ontwerp trok de aandacht van weer een andere visionair, André Citroën. Die ontwikkelde er de legendarische Traction Avant mee (afbeelding 2), eveneens met zelfdragende constructie. De Lambda had haar eerste opvolger gevonden – er zouden er nog talloze volgen.

Vandaag de dag is het Buddisme tot schier onvoorstelbare verfijning doorontwikkeld, mede geholpen door verbeteringen in de materialen – lees: staal, maar ook aluminium, magnesium en composieten – die de autopioniers van toen met verbazing zouden slaan. Maar ook in bijvoorbeeld de verpakkingindustrie is de plaatvervorming tot ongekende



Afbeelding 3 De variabelen in het buigproces.

hoogten gestegen. Sterker nog, het welbekende aluminium drankblikje, met productieaantallen van honderden miljarden per jaar (!), mag zelfs gelden als één der meest geperfectioneerde producten aller tijden¹. Toch is het wezen van de plaatvervorming niet zo ingewikkeld uit te leggen. Dit artikel helpt u verder.

Enkelgekromde producten: de MBR

Afbeelding 3 toont u in zijaanzicht een plaat van dikte t die over een hoek $\alpha = 90^\circ$ wordt gebogen, resulterend in een buigradius R . Elementaire geometrie voorspelt dat er aan de buitenzijde een rek zal optreden gelijk aan $\varepsilon = t/2R$. Aan de binnenzijde treedt dezelfde rek op, maar dan negatief, dat wil zeggen stuik. In eerste benadering willen we deze rekken onder de breukrek ε_{\max} van het materiaal houden. Hoe 'scherp' kunnen we buigen? Wel, de zogenaamde minimale buigradius vinden we als volgt: $MBR = t/2 \varepsilon_{\max}$. Een staalplaat van 2 mm dik zouden we dus, als gegeven is dat $\varepsilon_{\max} = 0,4 = 40\%$ een radius van 2,5 mm kunnen geven. Scherper gaat niet, althans, niet volgens deze eerste, elementaire formule.

In de praktijk is dit een te simpel model. We kunnen om diverse redenen scherper buigen – zeker bij staal, dat het insnoeren lang volhoudt² en lokaal daardoor fors meer vervorming kan weerstaan dan die ε_{\max} voorspelt. Voor sommetjes op het spreekwoordelijke bierviltje werkt de formule echter prima. Met enige creativiteit kunnen we hem ook inzetten voor het buigen van buizen: dan moeten we de plaatdikte t vervangen door de diameter van de buis.

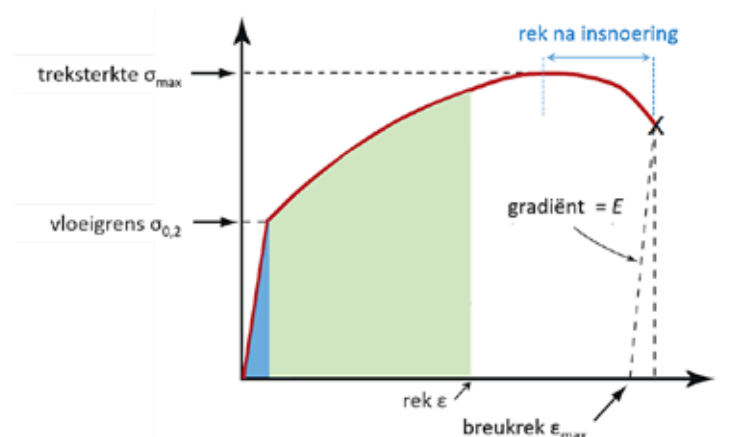
Enkelgekromde producten: terugvering

Binnenin de plaat zijn de vervormingen uiteraard veel kleiner, en zelfs nul op de neutrale lijn precies in het midden. Bovendien bestaan de vervormingen uit een (klein) elastisch deel en een (groot) plastisch deel. Dat laatste is permanent, maar dat eerste niet. De plaat veert daardoor na het buigen iets terug. Als we buigen met een buighoek $\alpha = 90^\circ$, dan zal de uiteindelijke hoek iets minder

1 Aanrader: <https://www.youtube.com/watch?v=hUhis2F-Buw&t=4s>

2 De trekkromme toont of er van dergelijke 'diffuse insnoering' sprake is: de kromme loopt dan na het bereiken van het hoogste punt nog relatief ver naar rechts door. Aangegeven in afbeelding 4 in blauw.

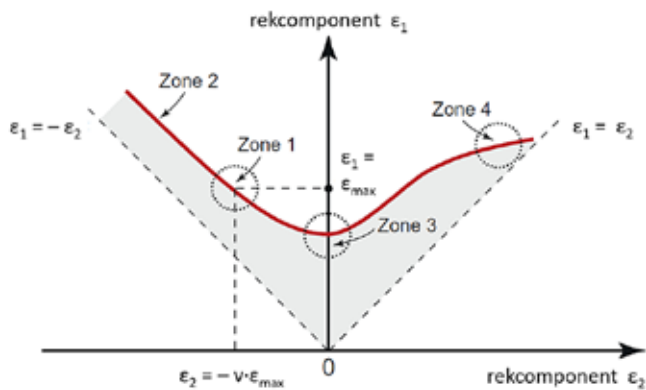
Afbeelding 4 De trekkromme van een metaal.



scherp zijn – typisch enkele graden groter. Hoeveel groter, wel, dat zouden we natuurlijk graag willen voorspellen, teneinde een tijdrovende hoop 'trial-and-error' te vermijden. Echter, zelfs voor het ogenschijnlijk simpele geval van een vlakke plaat in buiging is deze precieze terugvering lastig te voorspellen. Het houdt verband met de verhouding tussen elastische en plastische vervormingsenergie. Op het niveau van het materiaal kunnen we deze concepten visualiseren aan de hand van de trekkromme, zoals schematisch weergegeven in afbeelding 4.

De elastische energiecomponent, per eenheid volume, is gelijk aan $U_{el} = \sigma_y^2/2E$. Het is het oppervlak onder de trekkromme tot aan de vloeigrens, aangegeven in blauw. Hierin zien we de vloeigrens $\sigma_{0,2}$ terug, en (via de Wet van Hooke) de stijfheid E . De plastische energiecomponent U_{pl} hangt af van hoe scherp we buigen, dat wil zeggen hoe groot de optredende rekken zijn. Het is het oppervlak onder de trekkromme tussen de maximale elastische rek dat wil zeggen $\sigma_{0,2}/E$ en de maximaal optredende plastische rek dat wil zeggen ε . In de afbeelding is dit oppervlak als lichtgroen aangeduid. In de regel is bij het plaatvervormen trouwens $U_{el} \ll U_{pl}$. Helder, als u bedenkt dat de elastische rek die een metaal kan weerstaan zeer klein is (0,1-0,5%) vergeleken met de plastische rek (10-50%). We kunnen nu makkelijk afleiden dat we een relatief hoge verhouding U_{el}/U_{pl} zullen krijgen als we (i) een stug materiaal hebben (hoge vloeigrens), (ii) een slap materiaal hebben (lage stijfheid), (iii) grote buigradii hantieren, of (iv) een combinatie van deze factoren hebben.

Snel terug naar de praktijk! Het buigen zelf kan op diverse manieren worden uitgevoerd. Elk heeft zijn voor- en nadelen: zo is strekbuigen het duurst, maar geeft duidelijk minder terugvering dan het kanten op een doorsnee kantbank. Ook bij het rolvormen – een onmisbaar proces, met tal van



Afbeelding 5 De grensvervormingskromme (GVK).

toepassingen – hebben we feitelijk te maken met buiging. Het resultaat is in alle gevallen een enkelgekromd product. Simulaties van al deze processen zijn inmiddels goed mogelijk en verdienen zeker de aanbeveling.

Dubbelgekromde producten: de GVK

Pannen, motorkappen, bierblikjes, ze hebben allemaal gemeen dat het dubbelgekromde vormen zijn. Om dit soort vormen te maken, dienen we het ingaande plaatmateriaal bloot te stellen aan krachten en vervormingen in twee onafhankelijke richtingen. Dit kan ofwel door de combinatie van trek plus druk, ook wel dieptrekken genoemd, ofwel door de combinatie van trek plus trek, ook bekend als strekken. Bij buiging was dit anders: daar leggen we alleen een vervorming op in één richting. Nog een verschil is dat we bij dubbelgekromde producten het hele plaatmateriaal vervormen, terwijl we bij buiging alleen het materiaal in de buigzone betrokken is. Dubbele kromming vraagt daardoor fors hogere krachten en dus relatief zware en dure matrijzen.

Materiaalkundig gezien moeten we nu ons concept van breukrek uitbreiden. Hiervoor is de grensvervormingskromme (GVK) uitgevonden, weergegeven in het grensvervormingsdiagram (... dit begrip wordt doorgaans **niet** afgekort). In zo'n diagram wordt de ene opgelegde rekcomponent, die we aanduiden als ϵ_1 en die altijd positief is, naar boven uitgezet, en zien we de andere opgelegde component ϵ_2 , die negatief dan wel positief kan zijn, op de horizontale as terug. Afbeelding 5 geeft een voorbeeld. In dit diagram zien we allereerst de breukrek terug: we hebben dan $\epsilon_1 = \epsilon_{\max}$, en via de dwarscontractie³ vinden we voor een isotroop materiaal⁴ $\epsilon_2 = -0,5 \epsilon_{\max}$.

Merk overigens op dat we in deze diagrammen doorgaans ware rekken uitzetten in plaats van nominale rekken. De ware rek is dan gedefinieerd als $\epsilon = \ln(L_N/L_0)$, dus als de natuurlijke logaritme van de nieuwe lengte L_N gedeeld door de oude lengte L_0 . Dit heeft tot voordeel dat we de bijbehorende derde rekcomponent ϵ_3 , dat wil zeggen de rek in de dikterichting, eenvoudig kunnen vinden via de Wet van Behoud van Volume: $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$. Indien

gewenst kunnen nominale en ware rekken ook eenvoudig in elkaar omgerekend worden.

De breukrek geeft dus een punt in het diagram, voorkomend uit een éénassige spanningstoestand de trekproef (= zone 1). Dubbelgekromd vormen vraagt zoals gezegd een tweeeassige spanningstoestand. In plaats van een enkel punt hebben we dan een lijn: de grensvervormingskromme. Onder de lijn treedt geen breuk op, boven de lijn wel. Interessant genoeg kunnen we wezenlijk meer vervormen in de ene richting dat wil zeggen $\epsilon_1 > \epsilon_{\max}$ als we tegelijkertijd in de andere richting meer stuik aanbrengen dan dat 'vanzelf', door dwarscontractie, zou gebeuren dat wil zeggen $\epsilon_2 < -0,5 \epsilon_{\max}$. De GVK loopt immers naar linksboven nog een stukje door (= zone 2). Deze combinatie van vervormingen zien we bij het dieptrekken, waar we bijvoorbeeld een pan maken uit een cirkelvormige plaat. Afbeelding 6 geeft schematisch weer wat het ingaande materiaal overkomt.

Let op!

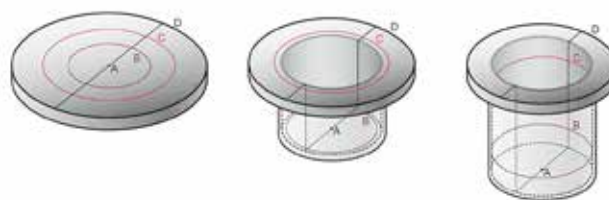
Dit alles leent zich opnieuw voor conceptuele sommetjes, waarmee we snel kunnen voorspellen of een gewenste geometrie überhaupt te maken is, gegeven de GVK van het materiaal. Het is uiteraard ook prima te simuleren. Maar pas op: plaatvervormen is niet alleen een kwestie van rek maar ook van kracht! Feitelijk moet bijvoorbeeld bij het dieptrekken de vervorming in de flens gedragen worden door de kracht die de matrijs op de bodem en wand van de beker uitoefent. In het extreme geval, wrijving daargelaten, hangt alles af van de bekerwand – en deze kan niet de hele flens achter zich aan blijven trekken! In de praktijk moeten we daarom zo'n product in meerdere stappen maken, van breed naar steeds smaller. Het helpt daarbij als het materiaal een lage vloeigrens heeft maar juist een hoge treksterkte, en een goed dieptrekstaal is dan ook niet alleen te typen in termen van de rekken die het kan weerstaan maar ook in termen van spanningen.

Handtekening van het metaal

Terug naar de GVK. Ter rechterzijde, waar beide rekken positief zijn, zien we dat we opnieuw verder kunnen gaan dan de breukrek ϵ_{\max} voorspelt (= zone 4). Dit treedt op bij het strekken. Echter, wanneer we de dwarscontractie verhinderen, dus wan-

3 De dwarscontractiecoëfficiënt is in het elastische gebied zo'n 0,25-0,35, afhankelijk van het metaal, maar is in het plastische gebied exact gelijk aan 0,5.

4 Metalen platen zijn doorgaans niet isotroop, maar als gevolg van het thermo-mechanisch proces dat ze hebben doorgemaakt duidelijk anisotroop. Dit wordt primair gekenmerkt door de zogeheten R-waarde van de plaat. Gebruik de bovenstaande uiteenzetting daarom met voorzichtigheid.



Afbeelding 6 De materiaalvervorming bij het dieptrekken (dikte 10x overdreven).

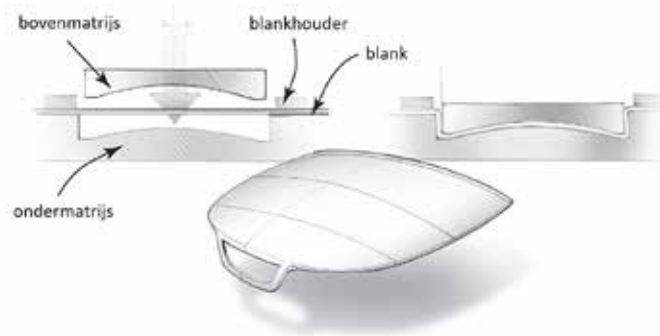
neer $\varepsilon_2 \approx 0$, dan kunnen we juist wezenlijk minder vervormen. Bij het matrijpersen wordt in de regel het meeste van de ingaande plaat gestrekt, maar is er vaak ook een deel dat de dieptrek-rekken ondergaat – en dan ligt daar altijd een zone tussen waar $\varepsilon_2 \approx 0$ en waar we dus beperkte vervormbaarheid hebben (= zone 3). Oppassen dus. Hoe dan ook, de GVK is als het ware de ‘handtekening’ van het metaal en vormt de minimaal benodigde informatie om een dubbelgekromd product op maakbaarheid te kunnen beoordelen. Het ene materiaal leent zich mogelijk beter voor dieptrekken dan strekken, het andere – dat mogelijk een vergelijkbare breukrek heeft als het eerste! – heeft dit wellicht omgekeerd. Breukrek vertelt hier dus niet het hele verhaal.

Dubbelgekromde producten: terugvering

Ook bij bijvoorbeeld motorkappen (afbeelding 7) hebben we te maken met terugvering. Dit was het basisprobleem waar Vincento Lancia mee worstelde en dat, ondanks alle Budd-technologie en de miljarden aan verdere ontwikkeling sindsdien, nog steeds speelt. Terugvering heeft nu twee componenten: eentje in het vlak van de plaat, en eentje dwars op dat vlak. Het is die laatste die de bij de assemblage vaak zoveel tolerantieproblemen veroorzaakt. De oplossing is gelegen in een combinatie van geld en vernuft. Allereerst wordt een product zoals zo'n motorkap niet in één keer geperst, maar in meerdere slagen – voor complexe delen wel tot vijf of meer. Voorvormen, navormen, nadrukken, uitstanzen, dat zijn typisch de bedoelingen van elke slag. Hierbij wordt ook netjes uitgerekend wat de rek in de dikterichting ε_3 precies is en daar wordt bij de matrijsfabricage rekening gehouden: dit is wat ‘matched die forming’ inhoudt. En ja, goedkoop is dat niet⁵. Ook simulatie-technisch is er veel mogelijk, met als niet onbelangrijk aspect dat ook het crashgedrag van autoconstructies goeddeels afhangt van de vervormbaarheid van het basismetaleel – gedrag dat uiteraard óók weer gedetailleerd wordt gesimuleerd. Tenslotte is er het materiaalvernuft, in het bijzonder de thermo-mechanisch gewalste micro-gelegerde staalsoorten, waarmee vooral sinds de jaren '80 veel mogelijk is geworden dat voorheen niet kon. En dit voert ons naar het laatste onderwerp om in dit artikel te behandelen.

Sterkte versus vervormbaarheid

Constructiemetaleen zijn een compromis tussen sterkte en vervormbaarheid. Hoe sterker het staal, hoe minder het kan rekken, en hoe beperkter de GVK zal zijn. Aluminium heeft hetzelfde probleem, en in de jaren '90 kon AUDI ook alleen een voldoende sterke carrosserie voor de A8 maken door de hele constructie na assemblage integraal een urenlange warmtebehandeling te geven. Maar, de industrie zit niet stil, zeker als het om auto's gaat. Bij gevolg is staal in een generatie tijd



Afbeelding 7 Een motorkap als matrijpers-product. (Illustratie: Marin Licina)

twee maal zo sterk geworden, bij gelijke vervormbaarheid en prijs. Wat ooit hogesterktestaal heette, is nu feitelijk de standaard. Eervolle vermelding verdienen de martensitische staalsoorten, die warm worden geperst, in één slag, voor maximale vormvrijheid, en die bij contact met de koudere matrijs afschrikken om op hun zeer hoge eindsterkte te komen. Werkelijk verbluffende procestechnologie – en dat in zeer hoge aantallen! Ook het zogeheten TRIP-staal mag er zijn, want dat biedt een nieuwe combinatie van sterkte en vervormbaarheid, bij redelijk behoud van prijs. Mede door deze ontwikkelingen werd de VW Golf in zijn zevende generatie voor het eerst lichter dan zijn voorganger. Ook de aluminiumindustrie zit niet stil. Voor de Audi A2 was de warmtebehandeling bijvoorbeeld zodanig verkort dat deze deels samen kon vallen met het aflakken. En ALCOA ontwikkelde speciaal voor Ford een nieuwe legering om daar de gloednieuwe F150 body van te maken. Licht metaal in een zware truck, wie had dat gedacht? ALCOA bouwde er zelfs een aparte fabriek voor, zodat de F150 zijn positie als bestseller zeker kon stellen. Het wachten is nu op de vrijgave van deze technologie voor andere markten.

Bronnen voor verder onderzoek

Wie het zich kan permitteren, schaf “ASM Handbook Vol. 14B: Metalworking: Sheet Forming” aan – zonder meer hét standaardwerk. Mocht de prijs u afschrikken, surf dan eens naar www.fdp.nl, de website van de Federatie Dunne Plaat, onze nationale brancheorganisatie. Andere waardevolle sites zijn de gezworen concurrenten www.worldautosteel.org en www.european-aluminium.eu. Het al eerder genoemde ‘Manufacturing and Design’ is eveneens een aanknopingspunt – we zullen dit boek verder in deze serie niet meer noemen. Hebt u toegang tot academische publicaties, dan verdienen het *International Journal of Material Forming* en *Materials Today* de aanbeveling. ●

Dank aan Pieter van der Wolk van TATA R&D voor correcties en advies. Overblijvende fouten komen geheel voor rekening van de auteur.

Volgende keer: smeden

⁵ Wellicht goed om te weten dat Citroën failliet ging aan de Traction Avant. Dankzij Michelin kom het bedrijf uiteindelijk een doorstart maken maar de industrie was gewaarschuwd: plaatwerk wordt nog steeds zoveel mogelijk gedeeld tussen verschillende modellen (bijvoorbeeld bij het VW MQB-platform) of zelfs verschillende merken.