

FFI RAPPORT

PIEZOELEKTRISK STRØMFORSYNING FOR ENGANGSBRUK

LORENTZEN Frode, JØDAHL Hege

FFI/RAPPORT-2003/00307

FFIBM/837/130

Godkjent
Kjeller 9. desember 2004

Stein Grinaker
Forskningsjef

**PIEZOELEKTRISK STRØMFORSYNING FOR
ENGANGSBRUK**

LORENTZEN Frode, JØDAHL Hege

FFI/RAPPORT-2003/00307

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT (FFI)
Norwegian Defence Research Establishment

UNCLASSIFIED

P O BOX 25
 NO-2027 KJELLER, NORWAY
REPORT DOCUMENTATION PAGE

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2003/00307 1a) PROJECT REFERENCE FFIBM/837/130	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED 2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	3) NUMBER OF PAGES 55		
4) TITLE PIEZOELEKTRISK STRØMFORSYNING FOR ENGANGSBRUK Piezoelectric Power Supply for single-use applications				
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) LORENTZEN Frode, JØDAHL Hege				
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)				
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> a) <u>piezo electricity</u> b) <u>power supply</u> c) <u>high velocity projectile</u> d) <u>modelling</u> e) _____ </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> IN NORWEGIAN: a) <u>piezoelektrisitet</u> b) <u>strømforsyning</u> c) <u>høyhastighetsprosjektil</u> d) <u>modellering</u> e) _____ </td> </tr> </table>			a) <u>piezo electricity</u> b) <u>power supply</u> c) <u>high velocity projectile</u> d) <u>modelling</u> e) _____	IN NORWEGIAN: a) <u>piezoelektrisitet</u> b) <u>strømforsyning</u> c) <u>høyhastighetsprosjektil</u> d) <u>modellering</u> e) _____
a) <u>piezo electricity</u> b) <u>power supply</u> c) <u>high velocity projectile</u> d) <u>modelling</u> e) _____	IN NORWEGIAN: a) <u>piezoelektrisitet</u> b) <u>strømforsyning</u> c) <u>høyhastighetsprosjektil</u> d) <u>modellering</u> e) _____			
THESAURUS REFERENCE: 8) ABSTRACT This report deals with the possibilities of using piezoelectric elements as generators for the internal electronics in programmable medium calibre ammunition. A theoretical study of the material has been done and summarized in chapter 1. System models have been made in Spice and Matlab. Both are described in chapter 3. Laboratory tests on the single layer ceramic element P841 have been performed, and the results of both tests and simulations are given in chapter 5.				
9) DATE 2004-12-09	AUTHORIZED BY This page only Stein Grinaker	POSITION Director of Research		

ISBN 82-464-0901-8

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
2	PIEZOELEKTRISKE ELEMENTER	8
2.1	Historikk	8
2.2	Elementets virkemåte	8
2.3	Kretsekvivalent	9
2.4	Forholdet mellom kraft og ladning	10
2.5	Kapasitansen til elementet	11
2.6	Koblingskoeffisienten, k	12
2.7	Generert energi	12
2.8	Lineært / ulineært område	13
3	MODELLERING AV PIEZOELEKTRISKE ELEMENTER	14
3.1	Matlabmodellen	14
3.1.1	Beregning av sentripetalkraften, F_s	15
3.2	AIM-Spice modellen	16
3.2.1	Spenningsforløpet til VIN	17
3.2.2	Beregning av C_p	17
3.2.3	Simuleringer med ikke ideell kondensator	17
3.2.4	Diodeparametrene	18
4	LABFORSØK	19
4.1	Oppsett	19
4.1.1	Montering av elementet	19
4.1.2	Stablede elementer	21
4.1.3	Kontakttid	21
4.1.4	Oscilloskop, LabVIEW	21
4.2	Utførelse	22
4.2.1	Dropp av kula	22
4.3	Beregning av kraften	22
4.3.1	Målt retardasjon	22
4.3.2	Beregninger med MSC.Marc	23
4.4	Feilkilder	25
4.4.1	Metning i kondensatoren og brytningsspenning i diodene	25
4.4.2	Feilberegning av kraften	25
4.4.3	Følger av porøst element	25
4.4.4	Elementet reagerer ikke helt lineært	26
4.4.5	Små svingninger i fjæra	26
4.4.6	For tynn kobberskive	26

5	RESULTATER	27
5.1	Oppsummering	27
5.2	Filsystem	31
6	VIDERE ARBEID	33
6.1	Stablede elementer, Lab og simulering	33
6.2	Labforsøk med Piezofilm	33
6.3	Andre måter å plassere/belaste elementet på	33
6.3.1	Forspenning	34
6.4	Forbedring av modellene	34
7	KONKLUSJON	35
	Litteratur	36
	APPENDIKS	37

APPENDIKS

A	KODER FOR MODELLERING	37
A.1	MATLAB-kode for krefter ved utskytning	37
A.2	MATLAB-kode for krefter ved lab	40
A.3	SPICE-kode	42
B	HØYHASTIGHETSKAMERA	43
C	BEREGNINGER UTFØRT MED MSC.MARC	45
D	DATABLAD FOR P841	52
E	BILDER AV TESTOPPSETTET	55
	FORDELINGSLISTE	57

PIEZOELEKTRISK STRØMFORSYNING FOR ENGANGSBRUK

1 INNLEDNING

I programmerbar ammunisjon er det nødvendig med tilførsel av elektrisk energi i prosjektet. Denne rapporten tar for seg muligheten for å bruke akselerasjonskraften under utskytning til å generere denne energien. Ved bruk av piezoelektriske elementer er det mulig å omforme denne energien direkte over til elektrisk ladning. Generatoren må kunne levere en effekt på opp mot 10 mJ med et spenningsnivå som gjør den brukelig for resten av elektronikken. Det stilles også krav til hvor fort etter avfiring denne effekten skal kunne leveres.

Det er utført en forstudie på piezoelementet og dets virkemåte. Siden det ikke forekommer høye frekvenser eller ekstremt store krefter i det miljøet elementet er tenkt å operere i, er det gått ut fra at det alltid vil befinne seg i det lineære området.

For å få mest mulig ut av en eventuell prøveskytningen med piezoelementet, er det viktig å ha en god modell av systemet på forhånd. Det er blitt utarbeidet to modeller av piezoelementet, en i Matlab og en i AIM-Spice. Matlab er et vektorbasert regneprogram, mens AIM-Spice er et analogt simuleringsprogram.

Det er også gjort en rekke labforsøk for å bekrefte modellene og systemet rundt.

2 PIEZOELEKTRISKE ELEMENTER

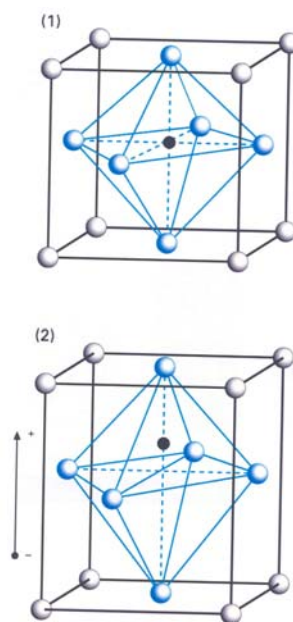
2.1 Historikk

Elektrifisering under oppvarming av turmalinkrystaller har vært kjent siden 1800-tallet. Rundt 20 år senere ble denne effekten også observert ved andre typer krystaller. Egenskapen ble kalt pyroelektrisitet (eng. pyroelectricity). Piezoelektrisiteten, gresk for ”trykk”-elektrisitet, ble oppdaget i 1880 av Pierre og Jacques Curie, og var et resultat av tidligere forskning på krystallsymmetri. I løpet av 1960-åra hadde forskere funnet svake piezoelektriske egenskaper i blant annet hvalbein og sener. Dette banet vei for videre leting etter denne egenskapen i andre organiske materialer, og det ble etter hvert også funnet i syntetiske materialer som polarisert fluorpolymer og polyvinylidenklorid (PVDF) (1).

2.2 Elementets virkemåte

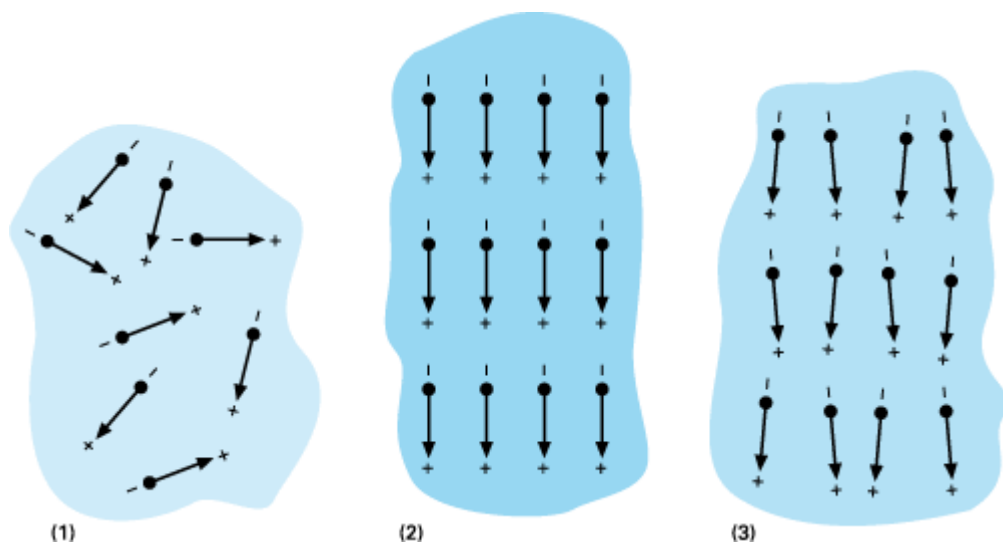
Piezoelektrisitet er en interaksjon mellom elektriske og mekaniske systemer. Når et piezoelektrisk materiale utsettes for en ytre kraftpåvirkning vil den generere en ladning med en polaritet avhengig av kraftens retning. Ladningen oppstår som følge av at elementet ønsker å bevare sin opprinnelige form.

Keramiske materialer er som regel bygget opp av tilfeldig orientert mikroskopiske krystallpartikler (krystallitt). Karakteristikken til krystallet i sin helhet er derfor avhengig av krystallittenes orientering i forhold til hverandre. Ved kraftpåvirkning på et piezoelektrisk materiale vil det høyt polariserte ionet i midten (B-Site ion) forflyttes fra senterposisjonen, slik som vist i Figur 2-1 (2). Dette fører til en polarisering i materialet, og derav en ladning.



Figur 2-1 Forskyvning av et polarisert ion i en krystallitt, markert med sort i figuren

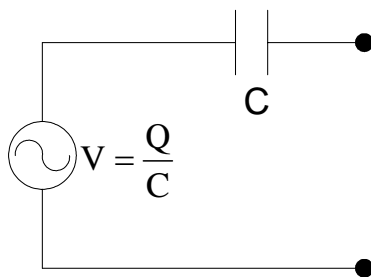
For at et materiale skal være piezoelektrisk er det derfor avhengig av en viss "enveishet" i strukturen. Dette er grunnen til "poling" under produksjonen av piezoelektrisk materiale som for eksempel Bly-Zirkonat-Titanat, PZT. Ved poling, som er illustrert i Figur 2-2 (2), utsettes oppvarmet ferroelektrisk materiale for et elektrisk felt. Det elektriske feltet gjør at materialet ekspanderer langs feltets akse, mens det normalt på feltet trekker seg sammen. Dette fordi dipolene i stoffet retter seg inn og vil omtrent holde denne strukturen etter avkjøling. Materialet vil nå ha piezoelektriske egenskaper så lenge det ikke utsettes for påkjenninger som overstiger dets begrensninger.



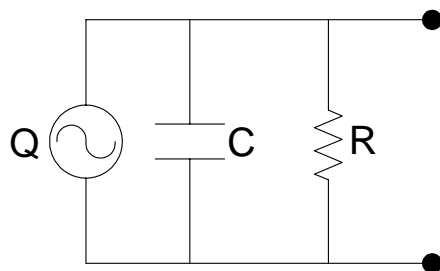
Figur 2-2 (1) Ferroelektrisk materiale før "poling", (2) under og (3) etter

2.3 Kretsekvivalent

Et piezoelement kan enten sees på som en kraftavhengig spenningskilde i serie med en kondensator, som vist i Figur 2-3, eller som en ladningsgenerator i parallell med en kondensator, som vist i Figur 2-4. Ved lave frekvenser blir den interne motstanden R så stor at den kan sees bort fra (1).



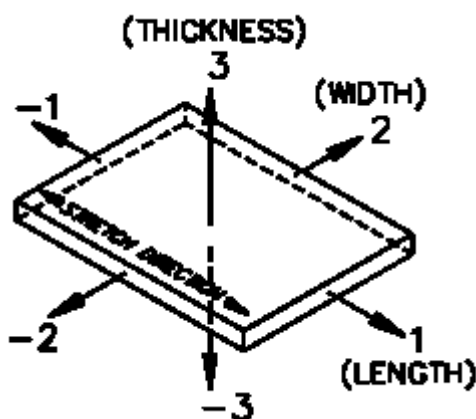
Figur 2-3 Ekvivalent krets for piezoelement ved bruk av spenningsgenerator



Figur 2-4 Ekvivalent krets for piezoelement ved bruk av ladningsgenerator

2.4 Forholdet mellom kraft og ladning

Hvor mye ladning et piezoelement vil generere er ikke bare avhengig av størrelsen på kraften, men også hvilken aksial retning kraften har. Et piezoelements akser er nummerert slik som vist i Figur 2-5 (1).



Figur 2-5 Orientering av akser

Spenningen generert av et piezoelementet i en åpen krets er i (1) gitt som:

$$V = g_{3n} X_n t \quad (2.1)$$

- V generert spenning
- g piezoelektrisk konstant for aktuelle akser,
(elektrisk felt V)/(tilført mekanisk spenning N)
- 3 aksen til elektrisk felt (aksen der elektrodene er festet)
- n aksen til påtrykt kraft
- X_n trykk påført i retning n (F_n/A)
- t materialets tykkelse langs aksen til det elektriske feltet

Ladningstettheten er gitt som:

$$D = \frac{Q}{A} = d_{3n} X_n \quad (2.2)$$

D	ladningstetthet
Q	generert ladning
A	areal av elektrodene
d	piezoelektrisk konstant for aktuelle akser, (ladningstetthet for kortsluttet krets C)/(tilført mekanisk spenning N)
3	aksen til elektrisk felt (aksen der elektrodene er festet)
n	akse til påtrykt kraft
X_n	trykk påført i retning n (F_n/A)

2.5 Kapasitansen til elementet

En av de viktigste egenskapene piezomateriale har er dets evne til å ta vare på ladning. Kapasitansen til materialet kan uttrykkes som følger (1):

$$C = \varepsilon \frac{A}{t} \quad (2.3)$$

C	kapasitansen
A	overlappende areal, dvs. arealet av elektrodene
t	piezoelementets tykkelse
ε	$\varepsilon_r \varepsilon_0$, der ε_r er relativ permittivitet, og ε_0 er permittivitet i vakuum (8.854×10^{-12})

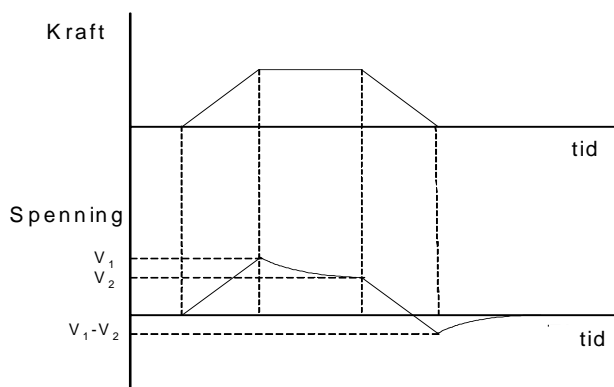
Ut ifra ligningene (2.1) og (2.2) kan en også finne kapasitansen til å bli:

$$C = \frac{d_{3n} A}{g_{3n} t} \quad (2.4)$$

Kapasitansen fører til at elementet får en tidskonstant, og et forhold mellom kraft og spenning/ladning over tid som vist i Figur 2-6.

Setter en ligning 2.3 og 2.4 lik hverandre får en relasjonen mellom de piezoelektriske konstantene til å bli:

$$g_{3n} = \frac{d_{3n}}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \quad (2.5)$$



Figur 2-6 Typisk respons for et piezoelement under påvirkning av en kraft

2.6 Koblingskoeffisienten, k

Koblingskoeffisienten k forteller hvor mye energi som går tapt i piezoelementet fra overgangen fra elektrisk til mekanisk energi, og omvendt. Koeffisienten er ofte oppgitt i databladet for elementene og kan uttrykkes som (1):

$$k = \sqrt{\frac{\text{Lagret _ mekanisk _ energi}}{\text{Tilført _ elektrisk _ energi}}} \quad (2.6)$$

eller

$$k = \sqrt{\frac{\text{Lagret _ elektrisk _ energi}}{\text{Tilført _ mekanisk _ energi}}} \quad (2.7)$$

k_{33} vil for eksempel være koblingskoeffisient for påtrykk langs akse 3.

2.7 Generert energi

Siden piezo elementet har kapasitive egenskaper er det lett å regne ut hvor mye energi elementet genererer ved påført kraft. Energien i en kondensator er gitt som:

$$W = \frac{Q^2}{2C} \quad (2.8)$$

der C er kapasitansen og Q er ladningen. Hvis Q erstattes med ligning (2.2) og C med ligning (2.4), blir det nye uttrykket for generert energi som følger:

$$W = \frac{d_{3n} g_{3n} F^2 t}{2A} \quad (2.9)$$

Som vist i Figur 2-6 faller spenningen under null volt som følge av at elementet lades ut over tid. Denne effekten kan utnyttes ved bruk av en likeretter i systemet. Likeretteren vil da omforme alle negative spenninger til positive og dermed utnytte energien både under kompresjon og ekspansjon av elementet. En tilnærmet dobling av utnyttelsen er dermed mulig.

2.8 Lineært / ulineært område

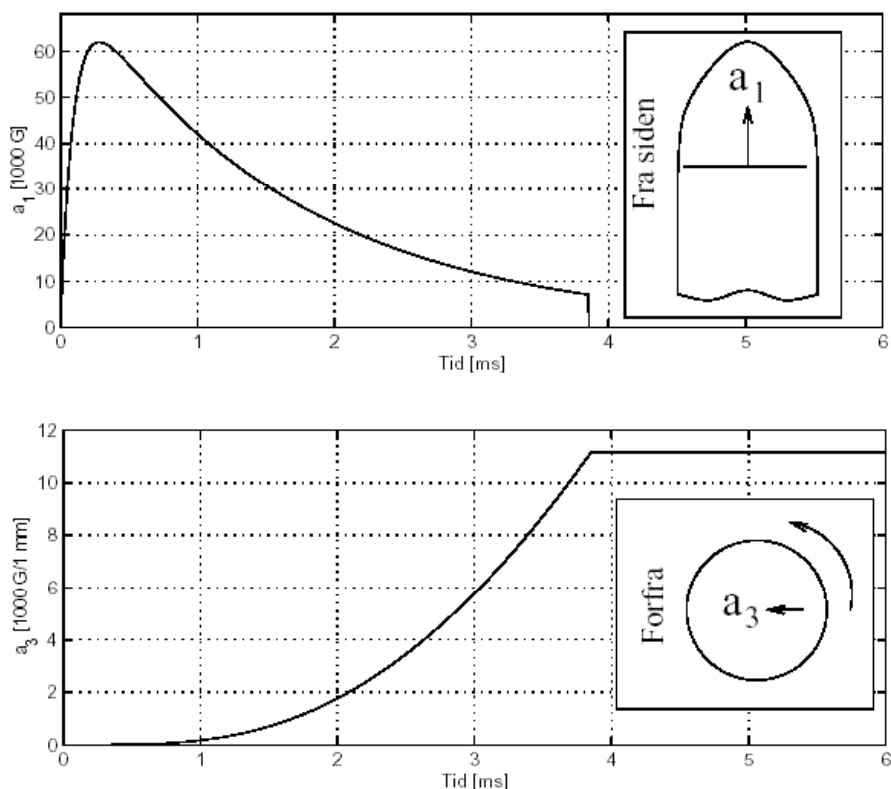
Så lenge elementet opererer i det lineære området kan oppførselen beskrives ut fra likningene 2.1 og 2.2. Hvis elementet utsettes for høye frekvenser eller større krefter kan elementets oppførsel avvike fra disse formlene. Det kan da bli nødvendig å ta hensyn til andre effekter også, som blant annet hysteres. For den tenkte implementeringen i dette prosjektet ser det ut til at elementet vil holde seg i det lineære området, og det er derfor gått ut fra dette under det videre arbeidet.

3 MODELLERING AV PIEZOELEKTRISKE ELEMENTER

Det er utarbeidet to modeller av systemet, en i Matlab og en i AIM-Spice. Piezoelementet som er modellert er et keramisk element av type P841 (datablad gitt i appendiks D). Det er det samme elementet som er brukt i forsøkene beskrevet i kapittel 4.

3.1 Matlabmodellen

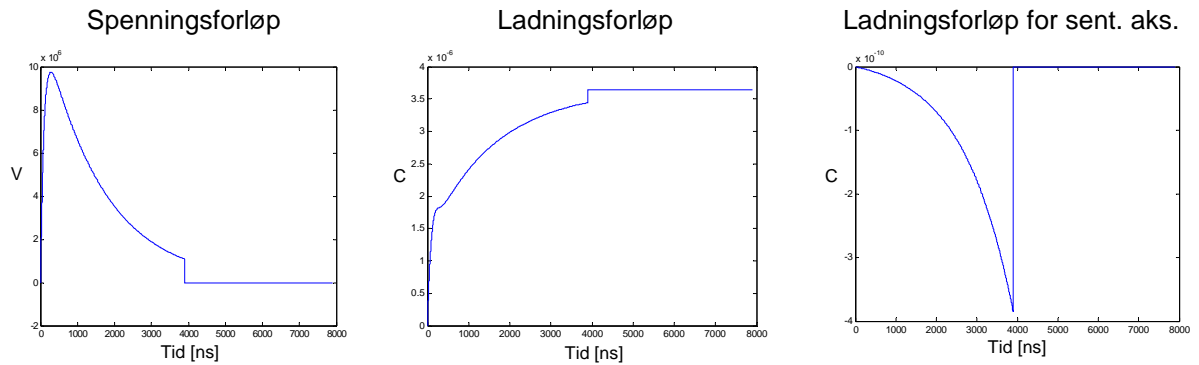
Matlabmodellen var den første som ble laget. Den viste seg å være en litt for enkel modell av systemet, siden den ikke modellerer kapasitanser riktig, samt at den kun tar for seg ideelle dioder. Uansett gir modellen et inntrykk av hvordan spennings- og ladningskurvene forløper seg under utskytning. Sentripetalkraften er også tatt med i denne modellen, men den ser ut til å være neglisjerbar i forhold til ”setback”-akselerasjonen. Kraftene prosjektilet utsettes for under utskytning er som vist i Figur 3-1 (6). Matlabkoden er gitt i appendiks A.1 og A.2. Det er oppgitt to koder siden A.1 tar for seg krefter under utskytning og etterfølgende retardasjon, mens A.2 tar for seg krefter under labforsøkene.



Figur 3-1 Setback-akselerasjon og sentripetalkraft under utskytning for 30 mm

Modellen virker på den måten at det for hver endring i akselerasjonen gis en resulterende endring i spenning og ladning. Endringene blir beregnet ut fra likningene 2.1 og 2.2 i kapittel

2.4. Det ble gjort på denne måten for enklere å kunne bygge ut modellen. Likeretteren er modellert ideell og den totale ladningsendringen er derfor alltid positiv. Det er heller ikke tatt hensyn til tap i systemet. I Figur 3-2 er det vist simuleringresultater av forløpet til spenning og ladning under utskytning. Det er her gått ut fra en masse på 10 gram som trykker ned på elementet. I tilfellet for spenningskurven er kretsen åpen, mens den for ladningskurven er tilnærmet kortsluttet. Det er den totale ladningen generert som vises i ladningsforløpet.



Figur 3-2 Modellert spennings- og ladningsforløpet til piezoelementet under utskytning

3.1.1 Beregning av sentripetalkraften, F_s

Sentripetalkraften, F_s , som piezoelementet utsettes for som følge av rotasjonen til prosjektilet, er gitt av Newtons andre lov:

$$\text{Kraft} = \text{masse} \cdot \text{akselerasjon}, \quad F = ma \quad (3.1)$$

$$\text{masse} = \text{volum} \cdot \text{massetetthet}, \quad m = V \rho \quad (3.2)$$

Volumet til piezoelementet kan skrives som:

$$V = \int_0^R 2\pi r t dr \quad (3.3)$$

der r er avstanden fra sentrum, R er den totale radien til piezoelementet og t er tykkelsen. Massen blir da:

$$m = \int_0^R 2\pi r t dr \cdot \rho, \quad m_r = 2\pi r t \cdot \rho \quad (3.4)$$

der m_r er den tenkte massen mellom radius r og $r+dr$.

Videre er sentripetalakselerasjonen gitt som:

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (3.5)$$

der farten v er:

$$\text{fart} = \frac{\text{strekning}}{\text{tid}} \rightarrow v = \frac{2\pi r}{T} \rightarrow v = 2\pi r f \quad (3.6)$$

T er tiden på en omdreining, og f er frekvensen på rotasjonen.

Akselerasjonen ved radius r kan da skrives som:

$$a_r = \frac{(2\pi r f)^2}{r} \quad (3.7)$$

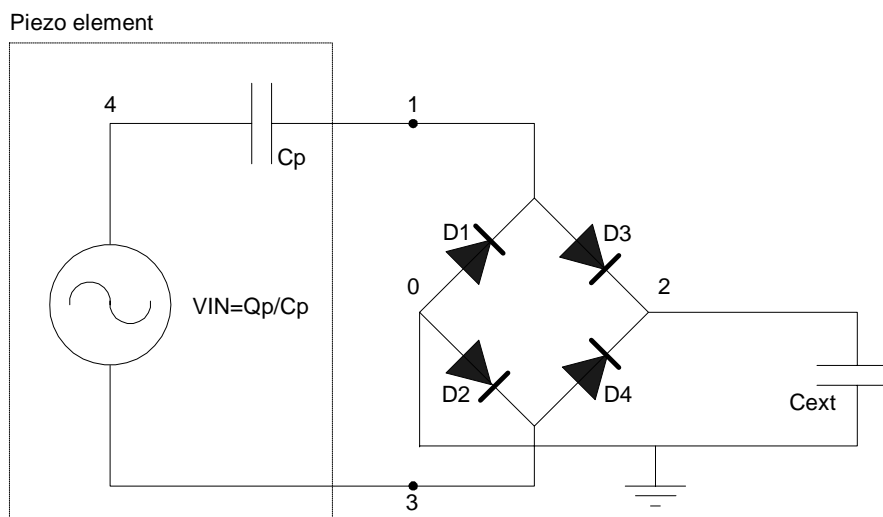
Den totale sentripetalkraften kan derfor skrives på følgende måte:

$$F_s = \int_0^R 2\pi r t \rho \cdot \frac{(2\pi r f)^2}{r} dr \rightarrow F_s = \frac{8}{3} \pi^3 t \rho f^2 R^3 \quad (3.8)$$

Dette er en forenklet måte å finne F_s på, men det gir en indikasjon på hvilke krefter en kan forvente. Med en maksimal rotasjonshastighet på 1600 Hz, vil piezoelementet ifølge (3.8) generere en ladning på $-1.1 \cdot 10^{-10}$ C i motsetning til $2.0 \cdot 10^{-6}$ C som følger av setback-akselerasjonen vist i Figur 3-2. Det er derfor antatt at sentripetalkraften har en minimal til ingen innvirkning på den genererte ladningen.

3.2 AIM-Spice modellen

Siden Matlabmodellen viste seg å være for enkel ble det i tillegg lagd en ny modell i AIM-Spice. AIM-Spice er et analogt simuleringsprogram og er derfor bedre egnet til å kunne se på innvirkningen av ikke-ideelle komponenter. Piezoelementet ble modellert som en spenningskilde i serie med en kapasitans gitt av ligning 2.4. Et kretsskjema for denne modellen er vist i Figur 3-3. C_p er kapasitansen til piezoelementet og C_{ext} er den eksterne kapasitansen ladningen blir overført på. Koden er gitt i appendiks A.3.



Figur 3-3 Kretsskjema for Spicemodellen

3.2.1 Spenningsforløpet til VIN

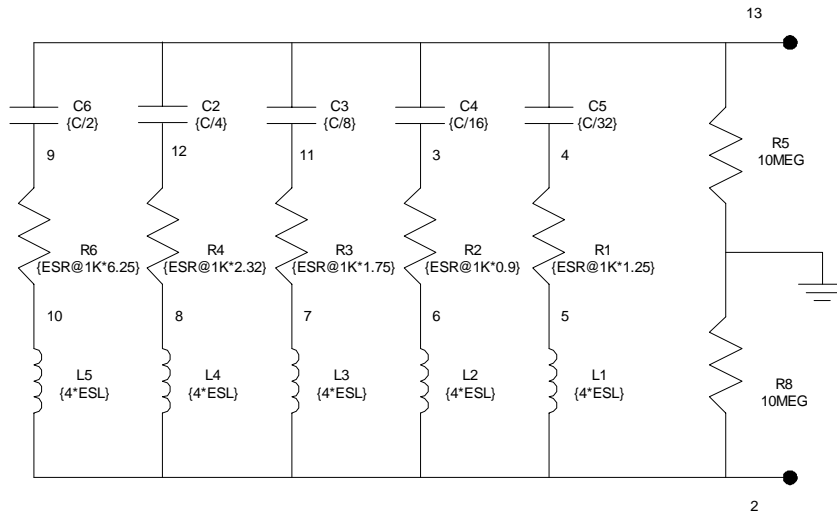
Spenningsforløpet til VIN ble modellert som en halv sinusperiode med en periodetid på ca 6,4 ms og en maksimumsverdi lik resulterende spenning for maksimal kraft. Det ble også prøvd ut forløp mer lik det som er forventet under utskytning, men siden det ikke er modellert med noe tap i systemet ga disse simuleringene samme resultat.

3.2.2 Beregning av C_p

Kapasitansen til piezoelementet ble både målt med multimeter og beregnet ut fra ligning 2.4. Med de data som er oppgitt for P841-elementet ble C_p beregnet til 1.8 nF, og målt til 2 nF. Den beregnede verdien var den som ble brukt i modellen.

3.2.3 Simuleringer med ikke ideell kondensator

Det ble opprinnelig brukt en standard modell for kapasitansene, men ved sammenligning av de målte og simulerte dataene ble det observert store avvik. I motsetning til hva som var forventet ble det aldri målt spenninger over 40 V under labforsøkene uansett kondensator. Simuleringer gjort med standardmodellen for kapasitanser ga ingen begrensning på maksimal spenning over C_{ext} . Det ble derfor gjort simuleringer med en modell med mindre ideelle kapasitive egenskaper som vist i Figur 3-4 (4). Ingen endringer ble observert. Spenningstaket skyldes derfor trolig diodene brukt under forsøkene.



Figur 3-4 Spicemodell av en ikke-ideell kapasitans

3.2.4 Diodeparametrene

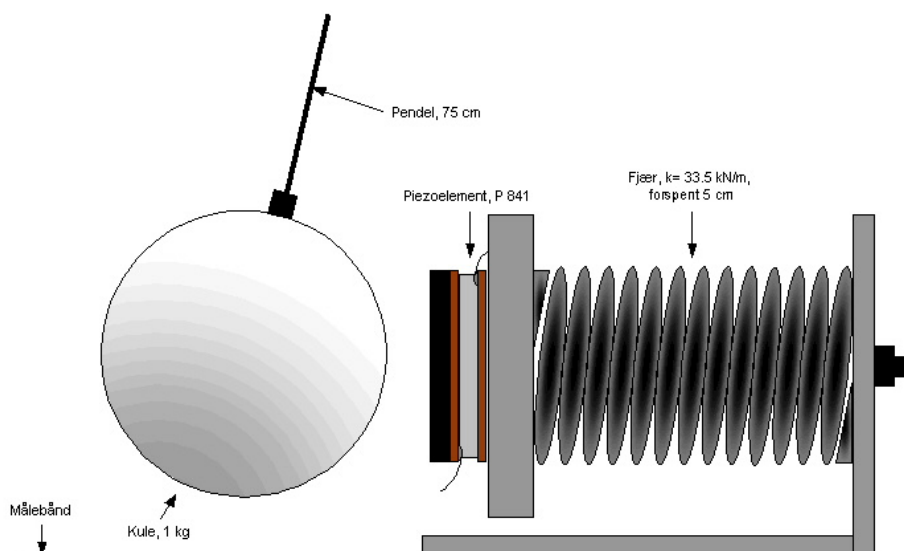
I Matlabmodellen er diodene helt ideelle, det vil si at de har verken tap eller terskelspenning. I Spicemodellen ble en standard modell for diode brukt. Brytningsspenningen, b_v , ble satt til 1000V.

4 LABFORSØK

Det ble gjort en rekke labmålinger for å få bekreftet at modellene beskrevet i kapittel 3 stemmer.

4.1 Oppsett

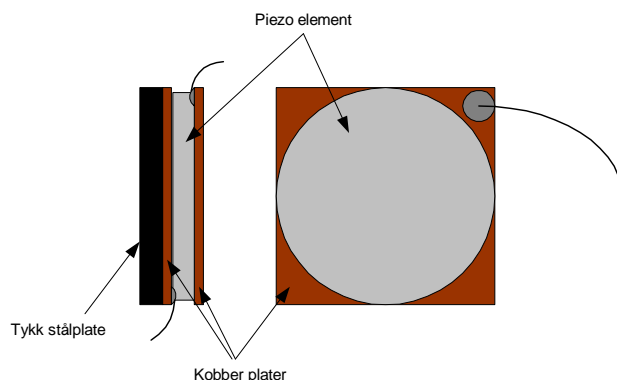
Oppsettet var som vist i Figur 4-1 og ble støttet videre av en ambolt inntill en murvegg. Måleutstyret og elektronikken er ikke tatt med. Bilde av hele oppsettet er gitt i appendiks E. For å simulere setback-kraften under utskytning ble det brukt en kule opphengt i en snor som treffer piezoelementet i pendelbanens laveste punkt. Kule som ble brukt hadde en vekt på 1 kg, og lengden på pendelen var 75 cm. Fjæra ble forspent ved hjelp av en strammebolt langs innsiden av fjæra. Piezoelementet som ble brukt var av type P841, det samme som ble brukt under simuleringene.



Figur 4-1 Oppsett for test av piezoelement

4.1.1 Montering av elementet

Det ble først prøvd ut bruk av kvadratiske kobberplater på hver side av elementet. Videre ble ledningene til resten av elektronikken tilkoblet disse platene. Den ytterste platen hadde i tillegg pålimt en ekstra tykk stålplate for å fordele trykket. Kontakten mellom kobberplatene og piezoelementet ble sørget for med ledende maling, og det hele ble holdt sammen av teip. Figur 4-2 viser oppsettet.

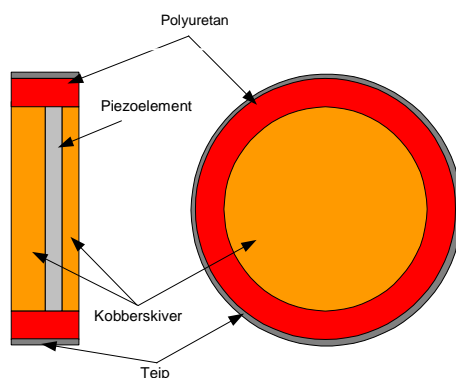


Figur 4-2 Piezoelement med kvadratiske kobberplater på hver side, og stålplate på den siden som vender mot stålkulen under forsøk

Det ble erfart at elementet fort gikk i oppløsning med dette oppsettet. Splinter av piezoelementet begynte å vise seg gjennom tapen allerede etter et par forsøk. For å hindre piezoelementet i å sprekke opp ble det prøvd å bruke ledende lim isteden for maling. Dette viste seg å være forholdsvis vellykket, men elementet tålte fortsatt for få støy.

Det ble videre prøvd ut å kapsle piezoelementet inn i fyllmasse i tillegg til bruk av lim. Det ble først prøvd ut bruk av Araldit som innkapslingsmateriale. Det fungerte i den forstand at elementet ikke knuste, men det var et altfor hardt materiale og dempet derfor for mye av støtet.

Det ble til slutt forsøkt å støpe elementet med kobberplatene inn i Polyuretan. Dette viste seg å gi et bedre resultat, men spenningsutslaget var fortsatt et stykke unna tidligere målinger uten fyllmasse rundt. Det ble antatt at støpemassen som havnet mellom platene dempet en del av støtet. Nye dreide kobberskiver ble derfor prøvd ut. Det hele ble støpt inn i Polyuretan og surret hardt inn med teip som vist i Figur 4-3. Dette viste seg å fungere bedre, og det var denne konfigurasjonen som ble brukt under målingene.



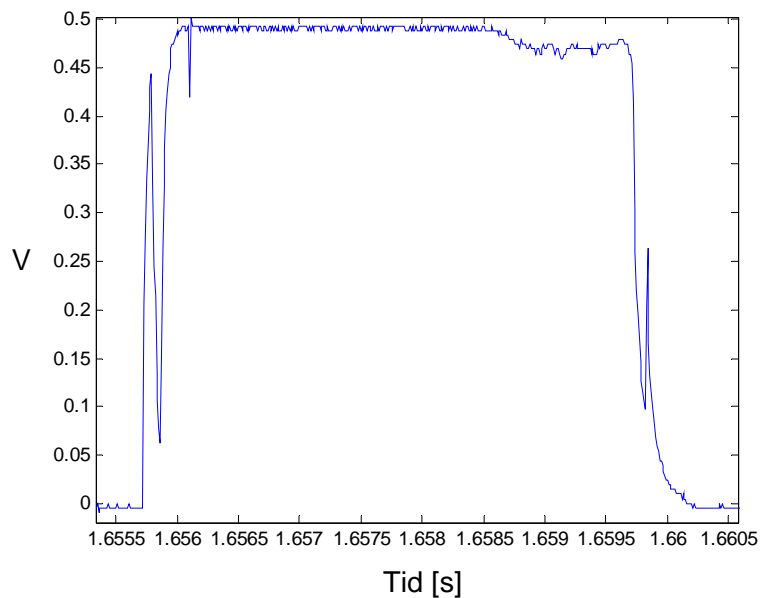
Figur 4-3 Piezoelement innstøpt i Polyuretan mellom to dreide kobberskiver

4.1.2 Stablede elementer

Det er også gjort forsøk med å stable 2 og 4 elementer oppå hverandre med aluminiumsfolie mellom lagene. Grunnet piezoelementets porøsitet ble det ikke forsøkt dropp over 30 cm med dette oppsettet.

4.1.3 Kontakttid

I kanonen er tiden det tar fra avfyring til prosjektilet forlater løpet rundt 4 ms. Det var derfor ønskelig at kontakttiden under laboratorieforsøkene var omtrent den samme. Kontakttiden er mulig å justere ved å endre på forspenningen av fjæra. For å måle kontakttiden ble det brukt et 4.5 V batteri tilkoblet kula og den ytterste plata inntil piezoelementet via en motstand. Når kula treffer plata blir kretsen sluttet og en spenning kan leses av. En typisk spenningskurve for dette er vist i Figur 4-4. Ved å forspenne fjæra 5 cm ble kontakttiden omtrent 4 ms. Forspenningen ble ikke justert for hver dropphøyde så kontakttiden varierte noe.



Figur 4-4 Typisk spenningsforløp ved måling av kontakttid

4.1.4 Oscilloskop, LabVIEW

Under målingene ble det brukt en bærbar PC, med et PCMCIA oscilloskop fra National Instruments. Programmet LabVIEW fra samme selskap ble brukt til å logge dataene. Samplingsraten som ble brukt var på 100000 sampler per sekund. Maksimal inngangsspenning på kortet var 10 V, så en 10:1 spenningsdeler ble tilkoblet proben. Måledataene ble lagt i en tekstfil som senere ble lest inn i Matlab for grafisk fremvisning samt for å finne den maksimale spenningen som ble målt.

4.2 Utførelse

4.2.1 Dropp av kula

Kula ble sluppet fra tre forskjellige høyder. For hver høyde ble syv forskjellige kondensatorverdier for C_{ext} prøvd ut. Det ble gjort minimum to målinger for hver høyde og kondensator, og en ekstra måling der store avvik ble observert. Lengden på tilbakeslaget ble også registrert. Det ble prøvd å holde antall målinger nede siden levetiden til piezoelementet var begrenset. For å få dropphøyden så lik som mulig ble kula sluppet fra en vaier festet i motstående vegg. Forsøkene startet ved den laveste høyden.

4.3 Beregning av kraften

Siden formlene for elementets oppførsel bruker kraftverdier var det nødvendig å beregne kraften elementet ble utsatt for. Dette skulle vise seg å bli problematisk siden det ikke dreide seg om et fullkomment elastisk støt, noe som blant annet skyldes piezoelementet og forspenningen av fjæra. Det ble prøvd ut tre forskjellige metoder for å beregne kraften. De to første metodene ga forholdsvis overensstemmende resultater. Den ene metodene baserte seg på beregninger ut fra energitapet til kula under støtet mens den andre gikk ut på å fysisk måle det maksimale fjærutslaget. Den siste metoden brukte data fra målingene av kontakttiden til å beregne kraften. Resultatene fra denne fremgangsmåten avvek fra de to foregående metodene med en faktor på 20. Det viste seg at den siste metoden var den som ga klart riktigst resultat. Fremgangsmåten var som forklart i avsnitt 4.3.1. Beregninger utført med MSC.Marc ga tilsvarende resultater for påtrykt kraft (se avsnitt 4.3.2)

Det ble ikke funnet noen ordentlig forklaring på hvorfor beregningene basert på energitapet til kula og maksimalt fjærutslag ikke førte frem. Trolig skyldes det at piezoelementet også må sees på som en fjær med en veldig høy fjærkonstant.

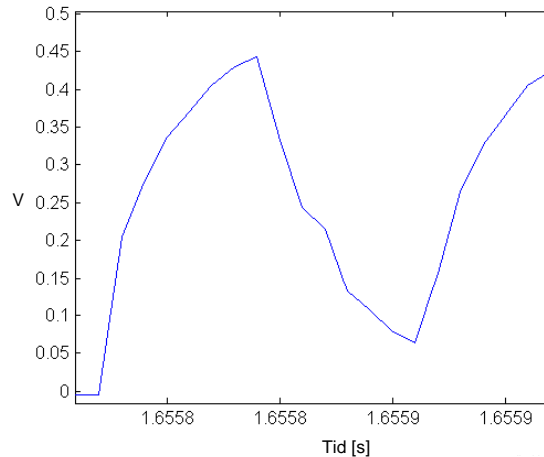
4.3.1 Målt retardasjon

I Figur 4-4 kan en se at kontakten brytes en kort periode nesten rett etter at kula treffer elementet. Dette tidsrommet er blåst opp i Figur 4-5. Ideelt sett skulle kula ha beholdt kontakten under hele støtet. Hvis en antar at kula i dette tidspunktet står tilnærmet stille kan en regne ut retardasjonen til kula. Denne metoden gir mye høyere verdi for kraften enn de tre foregående metodene, og gir verdier som stemmer rimelig godt overens med de målte spenningsverdiene.

Med en dropphøyde på 73.5 cm og en kontaktid på 100 μs , ga denne metoden en kraft på 38000N:

$$v = \sqrt{2gh} = 3,8 \text{ m/s}$$

$$F = ma = 1 * 3,8 / 100 \mu\text{s} = 38000 \text{ N}$$



Figur 4-5 Tidsrommet fra kula får kontakt til kontakten brytes igjen

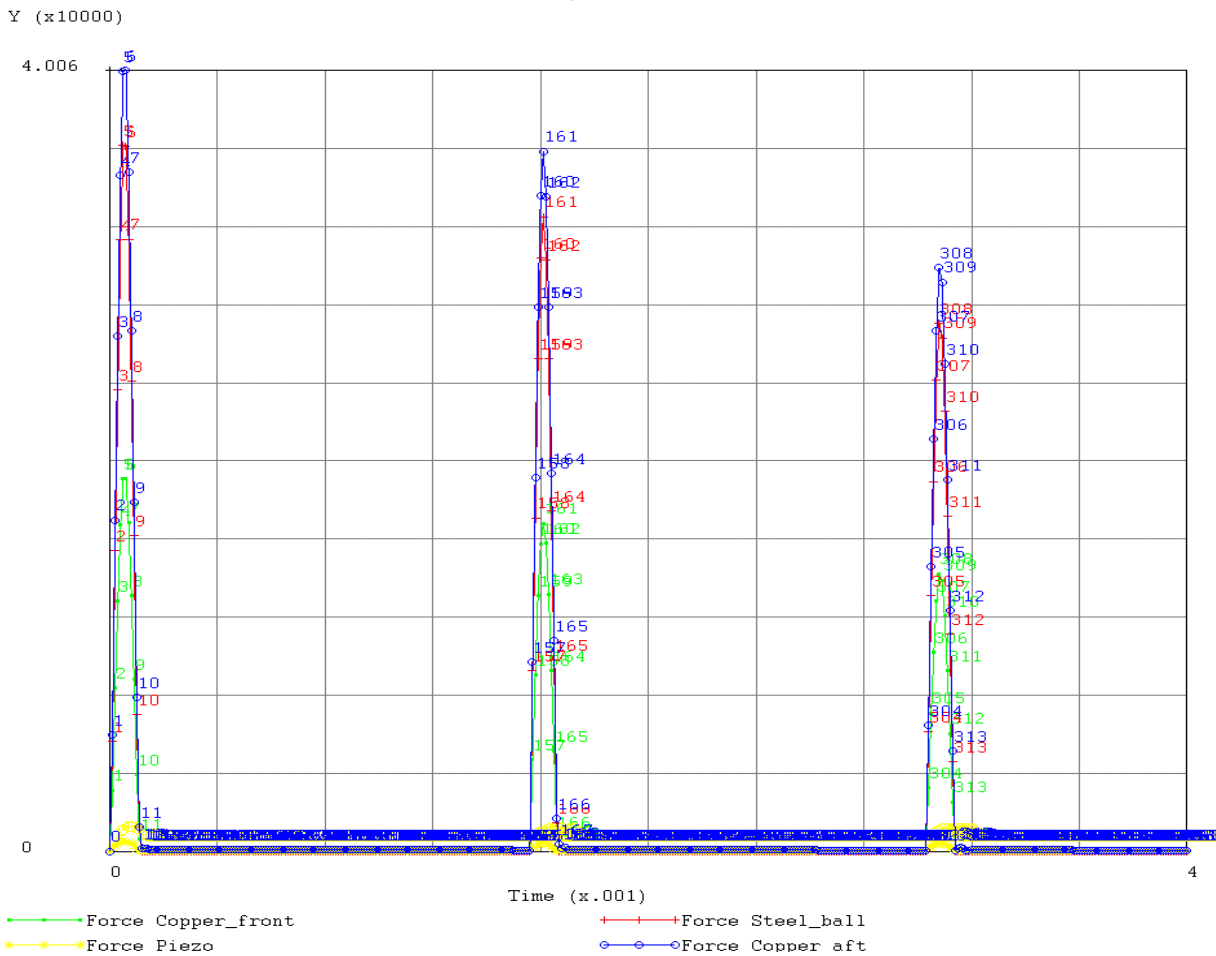
Siden det kun var en antagelse at kula ville stå tilnærmet stille under spenningsdroppet i Figur 4-4 ble det gjort et forsøk på å observere akkurat hva som skjedde under støtet. Dette ble gjort ved hjelp av et høyhastighetskamera. Støtet ble filmet med en tidsoppløsning på både 2 og 3 tusen bilder i sekundet, dvs. ca. 9 bilder av støtet ved høyeste oppløsning. Dette var ikke nok til å direkte se når spenningsdroppet fant sted, men det holdt til å gi en indikasjon på hva som skjedde under støtet. Det ble limt fast et målebånd ved siden av elementet til bruk som referanse under filmingen. Bildene som ble tatt tyder på at antagelsen kan stemme. Filming med en tidsoppløsning på 2000 bilder i sekundet og målt kontakttid for dette støtet er gitt i appendiks B.

4.3.2 Beregninger med MSC.Marc

MSC.Marc er en numerisk solver basert på elementmetoden som også kan gjøre beregninger på piezoelektriske materialer og koblede mekanisk/elektrostatisk analyse. Det er utført noen innledende beregninger med dette programmet for å se om det var egnet til denne formen for analyse. Resultatet av disse beregningene er gitt i appendiks C.

Modelleringen av støtet med dropphøyde 73,5 cm viste at kraftforløpet er oppstykket (se Figur 4-6). Første sammenstøt mellom kule og kobberplate varer i ca 120 μ s, og det går ca 1,5 ms før neste sammenstøt. Varigheten på første sammenstøt stemmer veldig bra med målingene som er utført for kontakttiden (Figur 4-5).

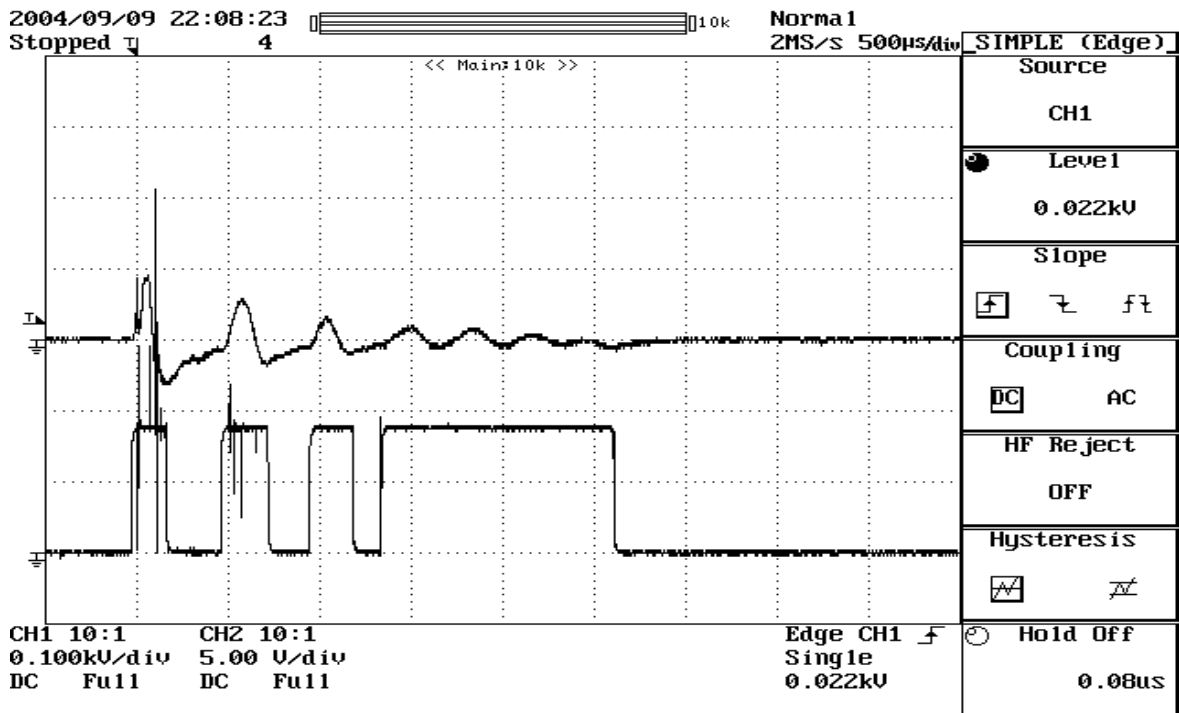
Kraften på bakre kobberplate er oppe i 40000 N ved første sammenstøt, noe som stemmer veldig bra med beregningene basert på målt retardasjon (kraft på 38000 N).



Figur 4-6 Kontaktkraft vs tid ved simulering i MSC.Marc i tiden 0-4 ms etter sammenstøt, dropphøyde 73,5 cm. Tallene i figuren angir tiden

Beregningene med MSC.Marc tar kun for seg piezoelementet, uten noen tilkobling til likeretter og kondensator. Kurver fra et tilsvarende labforsøk med dropphøyde 73,5 cm er vist på Figur 4-7 (stålplate i stedet for kobberplate i front). Tiden på første sammenstøt er også her ca 120 μ s. Tiden mellom sammenstøtene er noe kortere en simulert, ca 500 μ s (mot 1,5 ms simulert), men forløpet stemmer veldig bra. Når det gjaldt generert spenning var det ikke så godt samsvar mellom beregnede og målte verdier. Dette kan skyldes at det mangler noe data på de piezoelektriske egenskapene som er lagt inn i modellen. Det kan også være begrensninger som maksimal spenning over piezoelementet, som ikke er oppgitt i databladet.

Ut fra disse sammenligningene kan vi si at MSC.Marc egner seg godt for modellering og simulering av krefter og tidsforløp ifm piezoelementer. For korrekt beregning av generert spenning må det litt mer arbeid til.



Figur 4-7 Kurver fra måling med oscilloskop ved dropp på 73,5 cm. Den øvre kurven viser spenning over piezoelementet, med 1000 V per rute (spenningen er delt på 10 i forhold til oppsett på skopet). Den nedre kurven viser kontakttiden mellom kula og kobberplatene

4.4 Feilkilder

Det ble registrert en del avvik mellom de målte og beregnede verdiene som modellene ga ut. Under er det tatt med forskjellige elementer som kan ha bidratt i større eller mindre grad til disse avvikene.

4.4.1 Metning i kondensatoren og brytningsspenning i diodene

Det er begrenset hvor høy spenning en kondensator og en diode kan tåle. Det store avviket mellom beregnet og målt verdi for de minste kondensatorene skyldes antagelig dette. Det har ikke lyktes å oppdrive datablad for de komponentene som ble brukt.

4.4.2 Feilberegning av kraften

Selv om metoden beskrevet i 4.3.1 gir en rimelig riktig verdi, er antagelsen om at kula står stille når den mister kontakten ikke direkte bevist under forsøk. Beregninger i MSC.Marc ga tilsvarende verdier, med et tidsforløp som stemmer bra overens med forsøkene.

4.4.3 Følger av porøst element

Da målingene var ferdig og innpakningen til piezoelementet fjernet, viste det seg at elementet ikke hadde tålt påkjenningen. Selv om elementet ga ut spenning under hele forsøket, er det lite sannsynlig at dette ikke har innvirket på resultatene. Det ble gjort et enkelt labforsøk for å få et lite innblikk i hvor mye ladning som blir generert som følge av at elementet sprekker. Elementet

ble plassert i en skrutvinge tilkoblet en likeretter og en kondensator på $0.68 \mu\text{F}$. Når tvinga var så stram at det var rett før elementet sprakk, ble kondensatoren ladet ut og eventuell generert ladning fjernet. Deretter ble den siste strammingen gjort til elementet sprakk og maks spenning ble avlest. Det ble målt en gjennomsnittsspenning på 1.6 V .

4.4.4 Elementet reagerer ikke helt lineært

Det er antatt at elementet vil oppføre seg lineært under de belastningene det ble påført under forsøkene, men siden elementet har sprukket er nok denne antagelsen litt for optimistisk.

4.4.5 Små svingninger i fjæra

Når kula treffer elementet vil fjæra presses bakover, men under måling av kontakttid viser det seg at kula støter mot elementet flere ganger. Dette kan føre til at spenningen blir ”pumpet” opp på grunn av likeretteren.

4.4.6 For tynn kobberskive

Etter at labmålingene var gjort viste det seg at den tykke kobberskiva hadde blitt buet. Dette har ført til at arealet kraften har blitt fordelt på har variert under forsøket. Jo mindre areal kraften virker på jo større ladning vil elementet levere. Dette er utdypet mer i kapittel 6.3.

5 RESULTATER

5.1 Oppsummering

De målte og beregnede verdiene er oppsummert i Tabell 5.1 og Tabell 5.2. Grafer av disse dataene er gitt i Figur 5-1 til Figur 5-5.

Høyde (cm)	F (N)	Kondensator (uF)	Spenning (V)	Utregnet spenning (V)	Spice (V)	Matlab (V)	Energi målt (J)	Energi utregnet (J)	Nødvendig masse (g)	Energi i piezoelement (J)
Verdier ved dropp på 73.5 cm høyde										
73,5	37975,0	0,00056	37,7	40687,50	1000*	40736	3,98E-07	4,64E-01	62	0,0351
73,5	37975,0	0,01000	34,25	2278,50	1000*	2281	5,87E-06	2,60E-02	62	0,0351
73,5	37975,0	0,10000	28,75	227,85	206	228	4,13E-05	2,60E-03	62	0,0351
73,5	37975,0	0,68000	27,9	33,51	31,5	33,5	2,65E-04	3,82E-04	62	0,0351
73,5	37975,0	1,00000	22	22,79	21,4	22,8	2,42E-04	2,60E-04	62	0,0351
73,5	37975,0	1,50000	18,35	15,19	14,3	15,2	2,53E-04	1,73E-04	62	0,0351
73,5	37975,0	3,30000	11,2	6,90	6,5	6,9	2,07E-04	7,87E-05	62	0,0351
Verdier ved dropp på 30 cm høyde										
30,0	24261,0	0,00056	31,5	25993,93	1000*	26025	2,78E-07	1,89E-01	40	0,0143
30,0	24261,0	0,01000	33	1455,66	950	1457	5,45E-06	1,06E-02	40	0,0143
30,0	24261,0	0,10000	30	145,57	132	145,7	4,50E-05	1,06E-03	40	0,0143
30,0	24261,0	0,68000	19,25	21,41	20,1	21,4	1,26E-04	1,56E-04	40	0,0143
30,0	24261,0	1,00000	10,3	14,56	13,7	14,6	5,30E-05	1,06E-04	40	0,0143
30,0	24261,0	1,50000	10	9,70	9,1	9,7	7,50E-05	7,06E-05	40	0,0143
30,0	24261,0	3,30000	5,4	4,41	4,2	4,4	4,81E-05	3,21E-05	40	0,0143
Verdier ved dropp på 0.5 cm høyde										
0,5	482,0	0,00056	6,85	516,43	43	517	1,31E-08	7,47E-05	1	5,6601E-06
0,5	482,0	0,01000	6,8	28,92	18,6	29	2,31E-07	4,18E-06	1	5,6601E-06
0,5	482,0	0,10000	2,2	2,89	2,6	2,9	2,42E-07	4,18E-07	1	5,6601E-06
0,5	482,0	0,68000	0,5	0,43	0,4	0,43	8,50E-08	6,15E-08	1	5,6601E-06
0,5	482,0	1,00000	0,36	0,29	0,26	0,29	6,48E-08	4,18E-08	1	5,6601E-06
0,5	482,0	1,50000	0,22	0,19	0,18	0,19	3,63E-08	2,79E-08	1	5,6601E-06
0,5	482,0	3,30000	0,13	0,09	0,081	0,089	2,79E-08	1,27E-08	1	5,6601E-06
Beregnete verdier ved utskytning										
0,0	6082,0	0,00056		6516,00	555			1,19E-02	10	0,0009
0,0	6082,0	0,01000		365,00	238			6,66E-04	10	0,0009
0,0	6082,0	0,10000		36,50	33			6,66E-05	10	0,0009
0,0	6082,0	0,68000		5,37	5			9,79E-06	10	0,0009
0,0	6082,0	1,00000		3,65	3,4			6,66E-06	10	0,0009
0,0	6082,0	1,50000		2,40	2,3			4,44E-06	10	0,0009
0,0	6082,0	3,30000		1,10	1			2,02E-06	10	0,0009
Nødvendig kraft for tilstrekkelig energioverføring til kondensatoren										
0,0	5578	0,00056		5976				4,64E-01	9	0,0008
0,0	23570	0,01000		1414				4,64E-01	39	0,0135
0,0	74536	0,10000		447				4,64E-01	123	0,1354
0,0	194365	0,68000		171				4,64E-01	320	0,9204
0,0	235702	1,00000		141				4,64E-01	388	1,3535
0,0	288675	1,50000		115				4,64E-01	475	2,0303
0,0	428174	3,30000		78				4,64E-01	704	4,4666

*Modellen for kapasitansene som ble brukt i Spice hadde et spenningstak på 1000 V

Toppverdier for:

	Matlab	AIM-Spice
F1	482	V1 78
F2	24261	V2 3940
F3	37975	V3 6168
F_skudd	6082	V_skudd 988

Alle målingene er gjort med PIEZOKERAMIK-SCHEIBE P 841

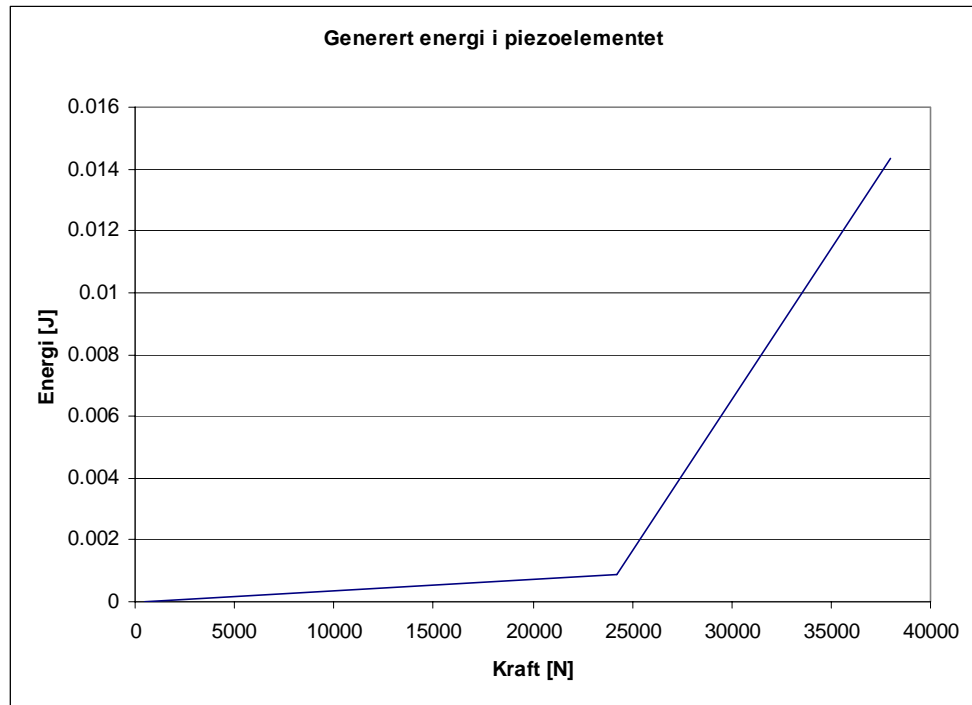
Tabell 5.1 Oppsummering av målte og beregnede verdier

Høyde (cm)	F (N)	Kondensator (uF)	Spenning (V)	Spice (V)	Energi målt (J)	Energi utregnet (J)	Energi i piezoelement (J)
Verdier for dropp på 0.5 cm høyde, med dobbelt stablet element							
0,5	482,0	0,00056	7,79	50	1,70E-08	2,99E-04	1,1320E-05
0,5	482,0	0,01000	8,1	27,1	3,28E-07	1,67E-05	1,1320E-05
0,5	482,0	0,10000	2,83	4,9	4,00E-07	1,67E-06	1,1320E-05
0,5	482,0	0,68000	0,73	0,8	1,81E-07	2,46E-07	1,1320E-05
0,5	482,0	1,00000	0,49	0,5	1,20E-07	1,67E-07	1,1320E-05
0,5	482,0	1,50000	0,39	0,4	1,14E-07	1,12E-07	1,1320E-05
0,5	482,0	3,30000	0,15	0,16	3,71E-08	5,07E-08	1,1320E-05
Verdier for dropp på 30 cm høyde, med dobbelt stablet element							
30,0	24261,0	0,00056	32,8	1000*	3,01E-07	7,57E-01	0,0287
30,0	24261,0	0,01000	35,5	1000*	6,30E-06	4,24E-02	0,0287
30,0	24261,0	0,10000	31,4	253	4,93E-05	4,24E-03	0,0287
30,0	24261,0	0,68000	27,2	39,5	2,52E-04	6,23E-04	0,0287
30,0	24261,0	1,00000	22,3	27,2	2,49E-04	4,24E-04	0,0287
30,0	24261,0	1,50000	19,3	18,2	2,79E-04	2,83E-04	0,0287
30,0	24261,0	3,30000	10,1	8,4	1,68E-04	1,28E-04	0,0287
Verdier for dropp på 0.5 cm høyde, med firdobbelt stablet element							
0,5	482,0	0,00056	7,1	54	1,41E-08	1,19E-03	2,2640E-05
0,5	482,0	0,01000	6,8	32,5	2,31E-07	6,69E-05	2,2640E-05
0,5	482,0	0,10000	3,1	9,1	4,81E-07	6,69E-06	2,2640E-05
0,5	482,0	0,68000	0,73	1,5	1,81E-07	9,84E-07	2,2640E-05
0,5	482,0	1,00000	0,44	1	9,68E-08	6,69E-07	2,2640E-05
0,5	482,0	1,50000	0,34	0,7	8,67E-08	4,46E-07	2,2640E-05
0,5	482,0	3,30000	0,15	0,3	3,71E-08	2,03E-07	2,2640E-05
Verdier for dropp på 30 cm høyde, med firdobbelt stablet element							
Ble ikke utført målinger på denne høyden grunnet elementenes porøsitet							
*Modellen for kapasitansene som ble brukt i Spice hadde et spenningstak på 1000 V							
Toppverdier for:							
	Matlab		AIM-Spice				
F1	482	V1		78			
F2	24261	V2		3940			
F3	37975	V3		6168			
F_skudd	6082	V_skudd		988			
Alle målingene er gjort med PIEZOKERAMIK-SCHEIBE P 841							

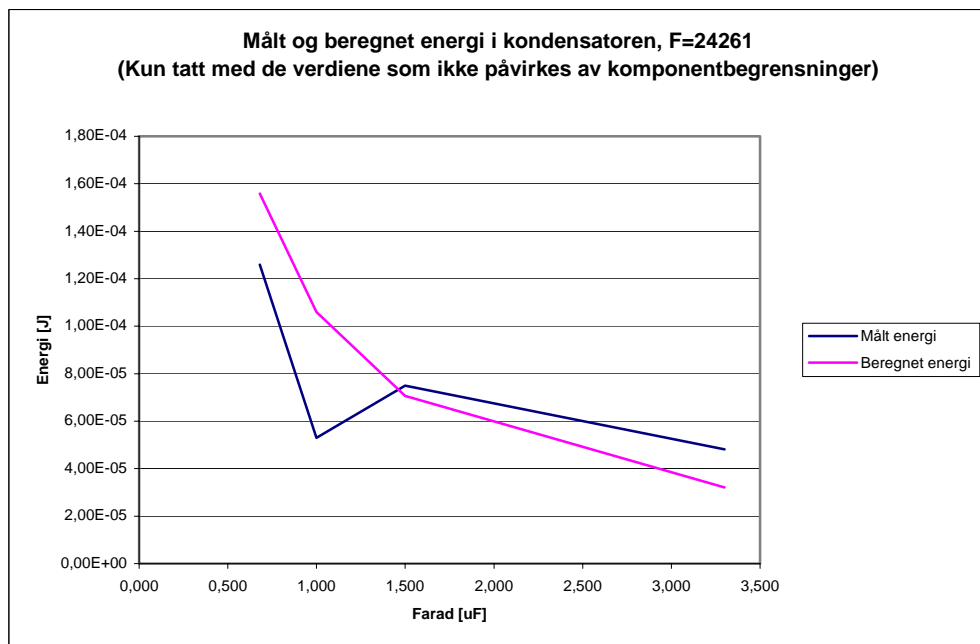
Tabell 5.2 Oppsummering av målte og beregnede verdier for stablede elementer

Forklaring til tabellene

Høyde	Høydeforskjellen fra pendelbanens høyeste og laveste punkt
F	Kraften kula påvirker piezoelementet med
Kondensator	Kapasitansen til kondensatoren ladningen føres over på, C_{ext}
Spenning	Spenningen målt over kondensatoren
Utregnet spenning	Spenningen utregnet ved bruk av ligning 2.1, og total ladningsoverføring
Spice	Spenningen oppnådd ved AIM-Spice simuleringer, med V1, V2 og V3 som påtrykket spenning
Matlab	Spenningen oppnådd ved Matlab simuleringer, med F1, F2 og F3 som påtrykket kraft
Energi målt	Energien beregnet ut fra spenningen målt på kondensatoren
Energi Utregnet	Energien beregnet ut fra utregnet spenning
Nødvendig masse	Massen nødvendig for å oppnå den aktuelle kraften F1, F2 eller F3 ved utskytning
Energi i piezoelementet	Den utregnede energien produsert i piezoelementet

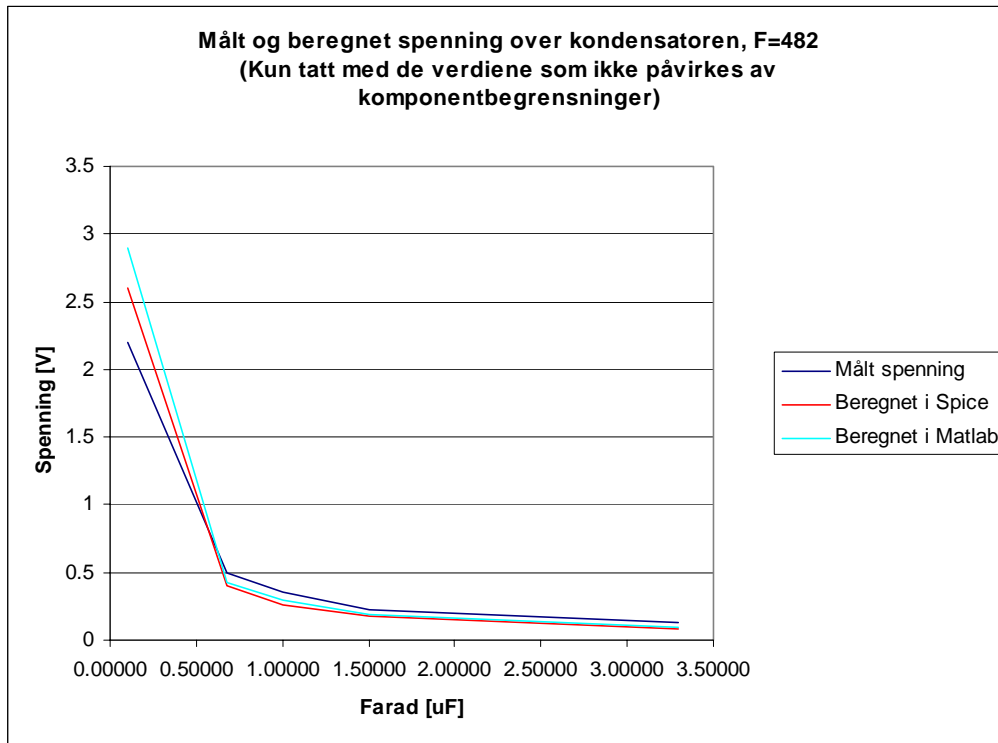


Figur 5-1 Generert energi i piezoelementet som funksjon av kraften

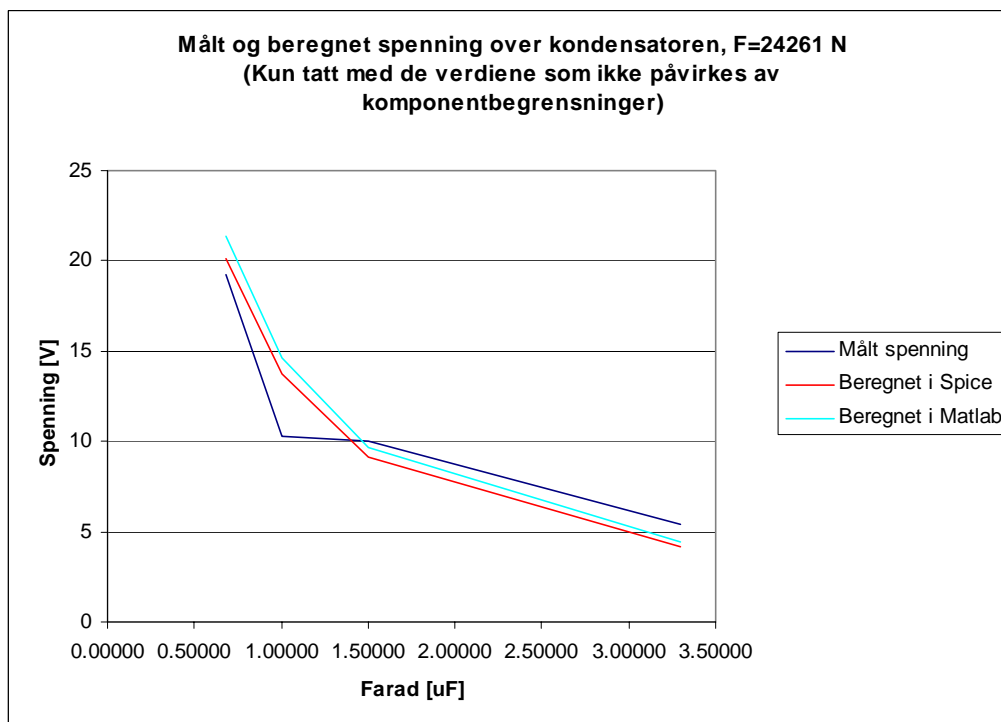


Figur 5-2 Målt og beregnet energi i kondensatorene ved dropp på 30 cm

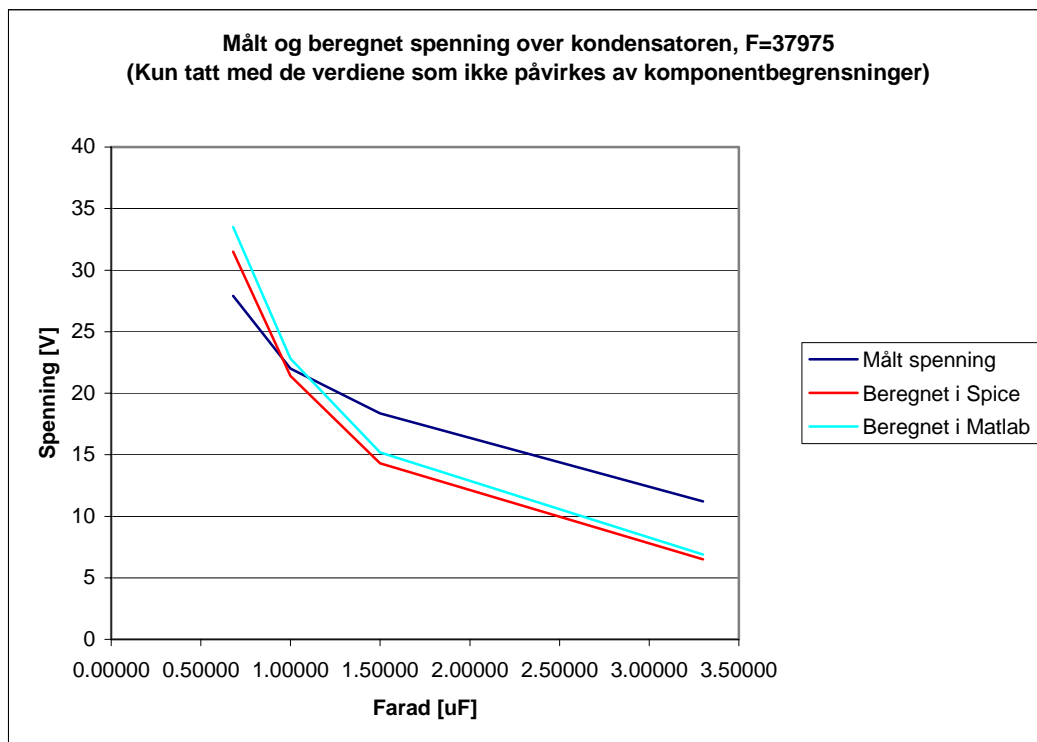
Vi ser i Figur 5-2 at energien overført til kondensatoren minker med størrelsen. Årsaken til dette er at maksimal energioverføring oppstår hvis kondensatorene har samme kapasitans. Piezoelementets kapasitans er på ca 1,8 nF. Droppet ved 1 uF skyldes trolig at denne kondensatoren var av dårligere kvalitet enn de andre.



Figur 5-3 Forholdet mellom målte og beregnede verdier ved dropp på 0.5 cm



Figur 5-4 Forholdet mellom målte og beregnede verdier ved dropp på 30 cm



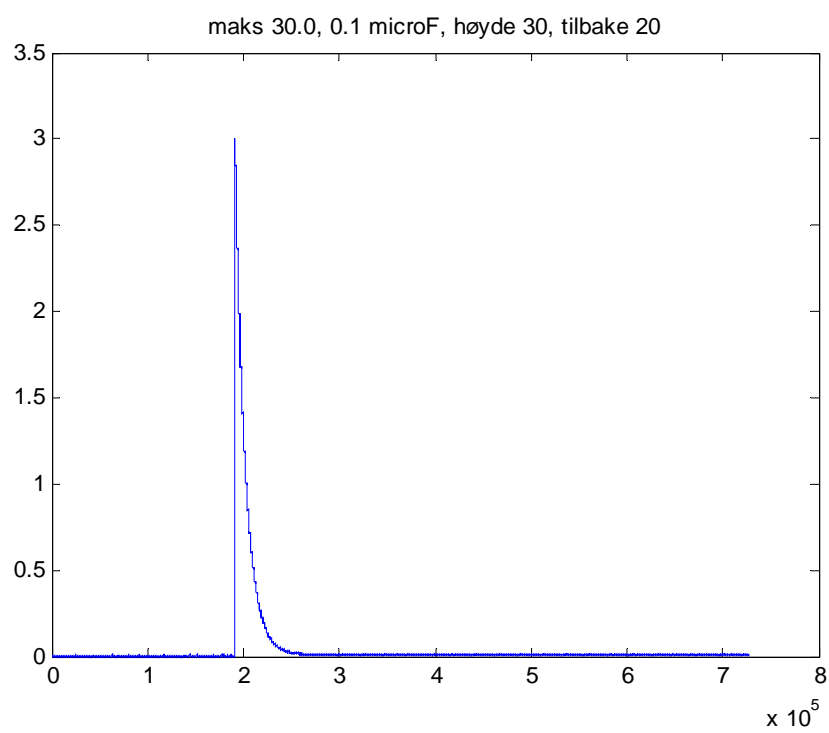
Figur 5-5 Forholdet mellom målte og beregnede verdier ved dropp på 73.5 cm

Vi ser ut fra de målte og beregnede spenningene at resultatene stemmer rimelig bra overens. Avvikene i Figur 5-5 skyldes trolig at elementet sprekker opp samt at kraften kan være feilberegnet.

5.2 Filsystem

Måleresultatene er inndelt i egne filmapper for hver av de tre dropphøydene. De er videre inndelt i syv undermapper for hver av kondensatorene som ble brukt. Tittelen på grafen i målefila starter med maks spenning målt, kondensator brukt, dropphøyde og hvor langt tilbake kula spratt. Det er her ment lengden avlest på målebåndet vist i Figur 4-1, og ikke høyden kula spretter tilbake til.

Et eksempel på en målefil er gitt i Figur 5-6



Figur 5-6 Eksempel på en målefil

6 VIDERE ARBEID

6.1 Stablede elementer, Lab og simulering

Ut fra labmålingene og simuleringene har det vist seg at mesteparten av energien går tapt under overføring til kondensatoren. Dette skyldes det store spriket i kapasitans mellom enhetene. Om et piezoelement skal brukes som generator blir det sannsynligvis helt nødvendig å stable flere elementer oppå hverandre for å minke dette spriket. Forsøk med dette på labben, ut over det som er blitt gjort til nå, vil derfor være hensiktsmessig. Maksimal utnyttelse på 50 % er oppnåelig hvis kapasitansene er like [5].

6.2 Labforsøk med Piezofilm

Det elementet det er blitt gjort forsøk på til nå er av en keramisk type med en tykkelse på 2mm, noe som gjør den lite egnet til å stables. Forsøk med piezoelement av den tynne filmtypen ville derfor vært mer interessant.

6.3 Andre måter å plassere/belaste elementet på

Det er hittil kun gjort labmålinger på krefter langs akse 3, og da også ved å belaste hele elementets overflate. Om en minsker arealet kraften virket på samt beholder elementets størrelse vil kapasitansen til elementet være den samme mens virkningen av kraften vil øke.

Elementets kapasitans er gitt av:

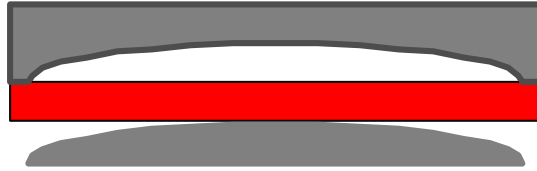
$$C = \frac{d_{3n} A_p}{g_{3n} t} \quad (6.1)$$

Vi har videre at:

$$\frac{Q}{A_p} = d_{mn} X_n \rightarrow Q = d_{mn} F \frac{A_p}{A_k} \quad (6.2)$$

der A_p er arealet til piezo elementet og A_k er arealet kraften virker på.

Andre muligheter er som vist i Figur 6-1.

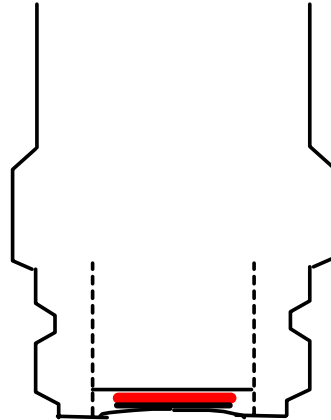


Figur 6-1 Alternativ montering, piezoelementet er farget rødt

Det er vanskelig å forutsi utfallet av disse monteringsformene uten labforsøk.

6.3.1 Forspenning

Det hadde vært interessant å se på effekten av å forspenne piezoelementet. Det skal visstnok gjøre det mulig å hente inn tre til fire ganger så mye energi ut av elementet [5], siden polariseringsenergien frigjøres når elementet presses helt til bristepunktet. Elementet vil da kun tåle å bli brukt en gang, og bruk av en likeretterbero vil derfor bli overflødig.



6.4 Forbedring av modellene

Mye kan gjøres med tanke på forbedring av modellene. Særlig gjelder dette Spicemodellen. Karakteristikken til kapasitansene og diodene som er brukt under forsøkene er neppe helt overensstemmende med de som er brukt i simuleringene. Det hadde også vært interessant å se om det er mulig å få en DC/DC-omformer med i modellen. Siden AIM-Spice-versjonen som er brukt er et gratisprogram er det begrenset hvor mange noder systemet kan ha.

7 KONKLUSJON

Resultatene av målingene tyder på at selve elementet er i stand til å generere nok energi, men at det meste av denne energien går tapt i overføringen til kondensatoren. Selv om det elementet som er prøvd ut til nå ikke egner seg for bruk i en generator, vil muligens andre tynnere materialer med muligheter for å stables levere nok energi.

Ut fra måleresultatene ser det ut til at piezoelementet vil oppføre seg forholdsvis lineært innenfor de kreftene en ser for seg under utskytning. Det vil derfor være store muligheter for at en kan forutsi resultatene av en prøveskytning med de modellene som er utarbeidet. Det anbefales å utføre flere simuleringer og laboratoriemålinger med mer egnede piezoelementer før første prøveskytning.

Litteratur

- (1) Measurement Specialities (1999): Piezo Film Sensors, Technical Manual.
- (2) Fundamentals Of Piezoelectricity And Piezo Actuators ():
<http://www.physikinstrumente.com>.
- (3) Piezo Systems Inc. Cambridge Massachusetts (): Introduction to piezoelectricity.
- (4) Steven M. Sandler (): Analytical Engineering Inc. An improved Spice Capacitor Modell
- (5) Richard P. Oberlin, T. Soranno (2001): United States Patent.
- (6) Johnny Njålstad (2000): Akselerasjonsforløp i rør og bane for 30 mm granat,
FFI/316801/11, Ugradert

APPENDIKS

A KODER FOR MODELLERING

A.1 MATLAB-kode for krefter ved utskytning

```
function akssim

%Data for piezo element
radius = 0.01; %Piezo elementets radius
areal = pi*(radius)^2; %Areal (m^2) på overflaten av piezo elementet
T = 2*10^-3; %Tykkelsen (m) av piezo elementet
p = 7.6*10^3; %Massetethet for materialet (kg/m^2) P841
RC = 2000; %For ved 100 grd. C
m = 10*10^-3; % Vekt (kg) av elementet

g33 = 25.5*10^-3; %Piezoelektriske konstanter for materialet P841
g31 = -10.5*10^-3;
d33 = 300*10^-12;
d31 = -109*10^-12;

%Konstanter
g = 9.81; %Tyngdekraften

%Data for aksellerasjons vektorene
alp = 0:3.9*10^3;
alu = 0:4*10^3;
salp = 0:3.9*10^3;
salu = 0:4*10^3;
sa = zeros(1,length(salp)+length(salu)-1);
a = zeros(1, length(alp)+length(alu)-1);

%Spennings og ladnings vektorer
sV = zeros(1,length(salp)+length(salu)-1);
V = zeros(1,length(alp)+length(alu)-1);
sQ = zeros(1,length(salp)+length(salu)-1);
Q = zeros(1,length(alp)+length(alu)-1);
Qtot = zeros(1,length(alp)+length(alu)-1);

%Generering av akselerasjons vektoren
for i = 1:length(alp)
    alp(i)=78559*(1-exp(-i*0.01))*exp(-i*0.000625); %Aks i løpet
end
```

```

for i = 1:length(alu)
    alu(i)=-33+15*(1-exp(-i*10^-3)); %Aks i luft
end

a(1:length(alp))=alp;
a(length(alp):length(a))=alu;

subplot(3,3,1), plot(a)
axis([0 length(a) -35 62500])
title('Akselerasjon, g')

%Piezoelektrisk respons
for i = 2:length(a)
    deltaV = g33*((g*a(i)*m)/areal)*T - V(i-1);
    Q(i) = d33*g*a(i)*m;
    if a(i-1) < a(i)
        V(i) = V(i-1) + abs(deltaV);
        deltaQ = Q(i) - Q(i-1);
        Qtot(i) = Qtot(i-1) + abs(deltaQ);
    elseif a(i-1) > a(i)
        V(i) = V(i-1) - abs(deltaV);
        deltaQ = Q(i) - Q(i-1);
        Qtot(i) = Qtot(i-1) + abs(deltaQ);
    end
end

subplot(3,3,2), plot(V)
title('V respons')
subplot(3,3,3), plot(Qtot)
title('Qtot respons')

%Generering av sentripetal akselerasjonen
for i = 1:length(salp)
    salp(i)=1450*exp((3.1*(i*10^-6)-0.0039)/0.0039)-533.8; %Sent.Aks i løpet
end

for i = 1:length(salu)
    salu(i)=max(salp); %Sent.Aks i luft
end

sa(1:length(alp))=salp;
sa(length(salp):length(sa))=salu;

subplot(3,3,4), plot(sa)
title('Sentripetal akselerasjon')

for i = 2:length(sa)
    Fs = (2/3)*pi*p*T*g*sa(i)*radius^3;
    deltaV = (g31*Fs*T) - sV(i-1);

```



```

deltaQ = (d31*Fs) - sQ(i-1);
if sa(i-1) < sa(i)
    sV(i) = sV(i-1) + deltaV;
    sQ(i) = sQ(i-1) + deltaQ;
end
end

subplot(3,3,5), plot(sV)
title('V respons, sent. aks.')
subplot(3,3,6), plot(sQ)
title('Q respons, sent. aks.')

for i = 1:length(a)
    Vsum(i) = sV(i) + V(i);
    Qsum(i) = sQ(i) + Qtot(i);
end

subplot(3,3,8), plot(Vsum)
title('Endelig spenning')
subplot(3,3,9), plot(Qsum)
title('Endelig ladning')

% Beregning av Fs
% Fn = masse * akselerasjon
% masse = volum * massetetthet, = m^3 * p
% Volum = int(2*pi*r*T, r, 0, radius)
% Massen integrert blir da:
% m = int(2*pi*r*T*p, r, 0, radius)
% Akselerasjonen er gitt som v^2/r
% v = strekning/tid, (2*pi*r)*f
% v stiger proporsjonalt med r
% Akselerasjonen blir da
% a = int(a(i)*r, r, 0, radius)
% Dette gir
% Fs = m*a
% Fs = int((2*pi*r*p*T)*(a(i)*r), r, 0, radius)
% Fs = 2*pi*p*T*a(i)*int(r^2, r, 0, radius)
% Fs = (2/3)*pi*p*a(i)*T*r^3

% Lab

Cext = 0.68E-6;

% Den totale ladningen generert av elementet ved bruk av bro.
Qmax = max(Qsum)

% Forventet spenning på ekstern kondensator (Cext)

W = Qmax^2/Cext

```

A.2 MATLAB-kode for krefter ved lab

```

%function akssimtest

%Data for piezo element
radius = 0.01; %Piezo elementets radius
areal = pi*(radius)^2; %Areal (m^2) på overflaten av piezo elementet
T = 2*10^-3; %Tykkelsen (m) av piezo elementet
p = 7.6*10^3; %Massetetthet for materialet (kg/m^2) P841
RC = 2000; %For ved 100 grd. C
m = 10*10^-3; %Vekt (kg) av elementet

g33 = 25.5*10^-3; %Piezoelektriske konstanter for materialet P841
g31 = -10.5*10^-3;
d33 = 300*10^-12;
d31 = -109*10^-12;

%Konstanter
g = 9.81; %Tyngdekraften

%Generering av akselerasjons vektoren
F=zeros(1,4.3*10^3);

for i = 1:length(F)
    %F(i) = 1675+100*sin(i/(1/3.144*length(F)));
    F(i) = 23566*sin(i/(1/3.144*length(F)));
end
subplot(2,1,1), plot(F)

title('Kraft, F')
V = zeros(1,length(F));
Q = zeros(1,length(F));
Qtot = zeros(1,length(F));

%Piezo elektrisk respons
for i = 2:length(F)
    Q(i) = d33*F(i);
    if F(i-1) < F(i)
        deltaQ = Q(i) - Q(i-1);
        Qtot(i) = Qtot(i-1) + abs(deltaQ);
    elseif F(i-1) > F(i)
        deltaQ = Q(i) - Q(i-1);
        Qtot(i) = Qtot(i-1) + abs(deltaQ);
    end
end
end

```

```
%subplot(3,1,2), plot(V)
%title('V respons')
subplot(2,1,2), plot(Qtot)
title('Q respons')

%Lab

Cext = 0.01*10^-6;

%Den totale ladningen generert av elementet ved bruk av bro.
Qmax = max(Qtot)

%Forventet spenning på ekstern kondensator (Cext)

%Piezo elementets kapasitans
Cp = (d33*areal)/(g33*T)

Vmax= Qmax/Cext

%Generert energi, går ut fra at all ladning overføres
W = Qmax^2/(2*Cext)
```

A.3 SPICE-kode

Kode for generator

```

Full-wave bridge rectifier
VIN 3 4 SIN (0 120 150 0S 0); (tilsvare utskytning med 10g vekt)
Cp 4 1 1.8n
;VIN2 3 5 SIN (0 3940 150 0S 0); (tilsvare utskytning med 10g vekt)
;Cp2 5 1 1.8n
;VIN3 3 6 SIN (0 3940 150 0S 0); (tilsvare utskytning med 10g vekt)
;Cp3 6 1 1.8n
;VIN4 3 7 SIN (0 3940 150 0S 0); (tilsvare utskytning med 10g vekt)
;Cp4 7 1 1.8n
;X1 4 1 clr {C=1.8n ESR@1K=.6u ESL=0.003N}
D1 0 1 diode1; (beskrevet i .modell diode1)
D2 0 3 diode1
D3 1 2 diode1
D4 3 2 diode1
;X2 2 0 clr {C=3.3u ESR@1K=.0035 ESL=0.2N}
;X2 2 0 clr {C=1.5u ESR@1K=.0035 ESL=0.2N}
;X2 2 0 clr {C=1u ESR@1K=.0035 ESL=0.2N}
;X2 2 0 clr {C=0.68u ESR@1K=.0035 ESL=0.2N}
;X2 2 0 clr {C=0.1u ESR@1K=.001 ESL=0.07N}
;X2 2 0 clr {C=0.01u ESR@1K=.001 ESL=0.07N}
;X2 2 0 clr {C=0.00056u ESR@1K=.001 ESL=0.07N}

.model diode1 d bv=1000

```

Kode for kondensator

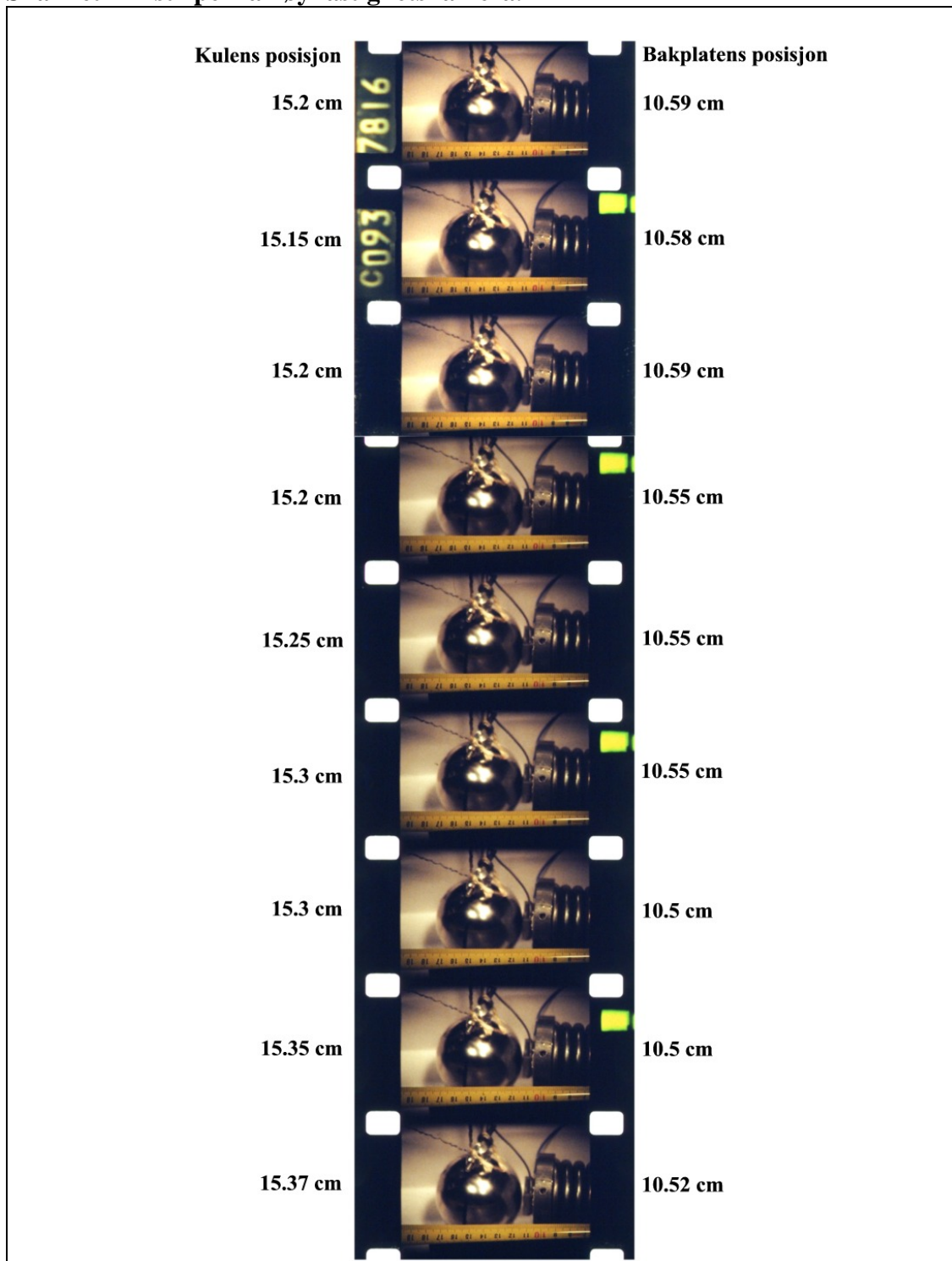
```

.subckt clr 13 2
C3 13 11 {C/8}
C4 13 3 {C/16}
C5 13 4 {C/32}
R1 4 5 {ESR@1K*1.25}
R2 3 6 {ESR@1K*0.9}
R3 11 7 {ESR@1K*1.75}
R4 12 8 {ESR@1K*2.32}
C6 13 9 {C/2}
R5 13 0 10MEG
R6 9 10 {ESR@1K*6.25}
L1 5 2 {4*ESL}
L2 6 2 {4*ESL}
L3 7 2 {4*ESL}
L4 8 2 {4*ESL}
L5 10 2 {4*ESL}
R8 2 0 10MEG
C2 13 12 {C/4}
.ENDS

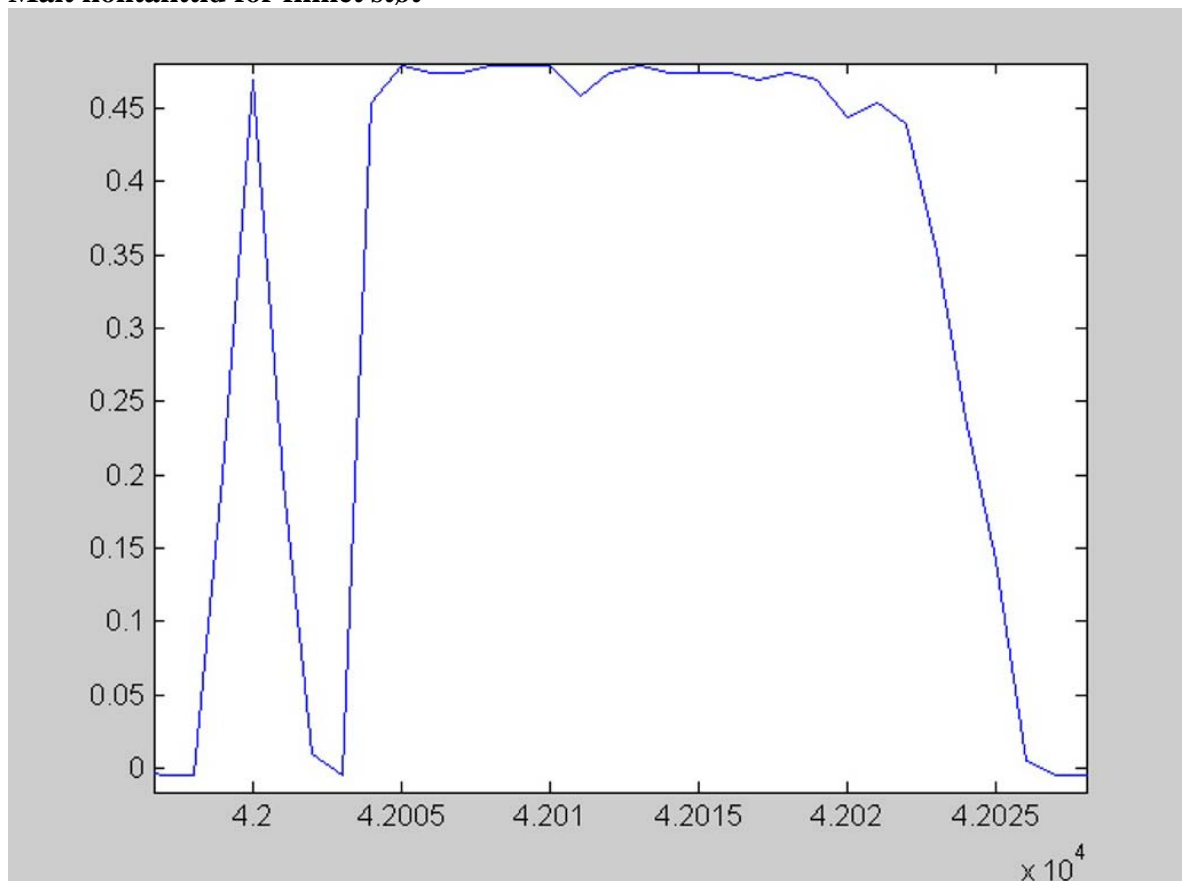
```

B HØYHASTIGHETSKAMERA

Skannet filmstripe fra høyhastighetskamera.



Bildene starter fra kontakttidspunkt til kula slipper elementet på vei ut igjen. Det er et grønt merke på høyre side av filmen for hvert tusenedels sekund.

Målt kontakttid for filmet støt

Kontakttiden ble målt til omtrent 2.5 ms. Grunnen til at kontakttiden her er kortere enn de målt under labforsøkene skyldes trolig at oppsettet har vært flyttet på i mellomtiden. Spenningsforløpet er uansett identisk med de foregående målingene.

C BEREGNINGER UTFØRT MED MSC.MARC

FFI Forsvarets
forskningsinstitutt

Beregning av piezo-elektriske komponenter ved bruk av MSC.Marc

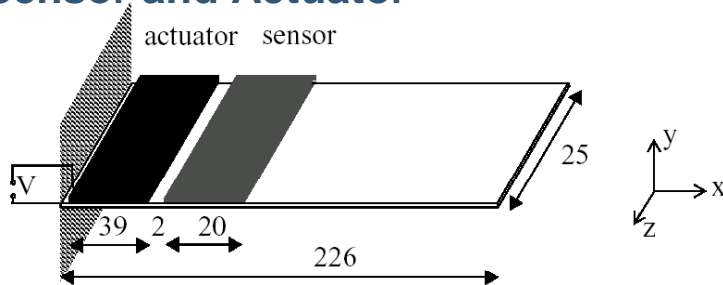
Alexander Fjeldly



Bakgrunn

- En piezo-elektrisk strømforsyning er tenkt brukt som generator i programmerbar ammunisjon
- En arbeidspakke underlagt 837 Proam Airburst teknologi-program har som oppgave å vurdere om piezo-elektriske elementer kan benyttes
- Man ønsker et verktøy for å beregne oppførselen til piezo-elektriske elementer. MSC.Marc er en numerisk solver basert på elementmetoden som også kan gjøre beregninger på piezo-elektriske materialer og koblede mekanisk/elektrostatisk analyser.
- Hensikten med dette dokumentet er å belyse mulighetene i MSC.Marc og å vurdere om MSC.Marc kan benyttes i Prosjekt 837. En midlertidig lisens for Marc.Electric ble derfor innhentet fra MSC.Software.

Eksempel fra MSC: “Cantilever Plate with Piezoelectric Sensor and Actuator”



- **Parameters**

- The PIEZO parameter is included to indicate a piezoelectric analysis, and the ASSUMED ST parameter is included to indicate an assumed strain analysis to improve the bending behavior of the element.

- **Elements**

- Element type 161 is used for the piezoelectric material and element type 11 for aluminum in the plane strain analysis. For the plane stress analysis elements 160 and 3 are used, respectively.

- **Boundary Conditions**

- The left side of the plate is clamped. The potential at the bottom of the actuator and sensor are held at 0.

- **Loads**

- A potential of 1V is applied at the top of the actuator

- **Material Properties**

- The aluminum is isotropic with Young’s modulus of 68GPa and Poisson’s ratio of 0.32.
- The properties of the piezoelectric material are given in the following matrices

Elastic stiffness

$$S = \begin{bmatrix} 12.6 & 8.41 & 7.95 & 0 & 0 & 0 \\ 8.41 & 12.6 & 8.41 & 0 & 0 & 0 \\ 7.95 & 8.41 & 12.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.33 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.3 \end{bmatrix} 10^{10} \text{Pa}$$

Piezoelectric coupling (Stress-Charge)

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 17 & 0 & 0 \\ 6.5 & -23.2 & 6.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17 & 0 \end{bmatrix} \text{C/m}^2$$

Electric permittivity

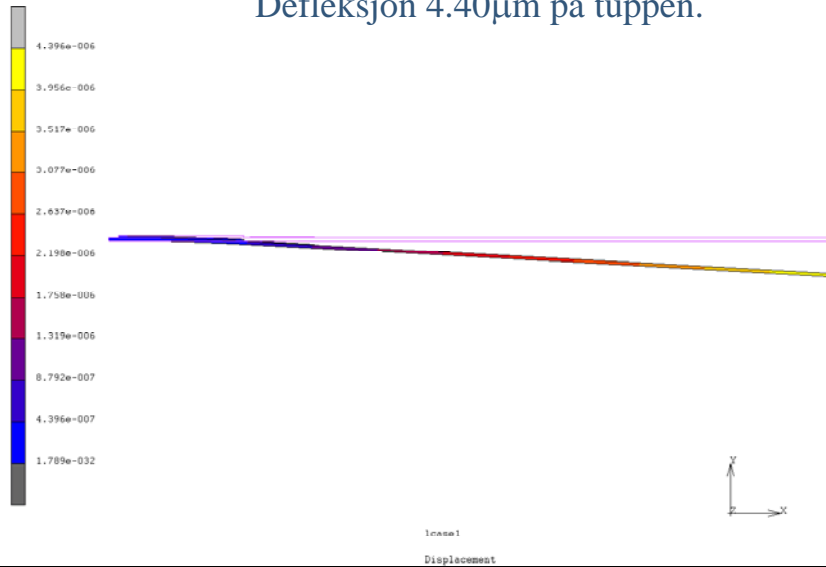
$$\epsilon = \begin{bmatrix} 1.503 & 0 & 0 \\ 0 & 1.3 & 0 \\ 0 & 0 & 1.503 \end{bmatrix} \text{F/m}$$

•Contact

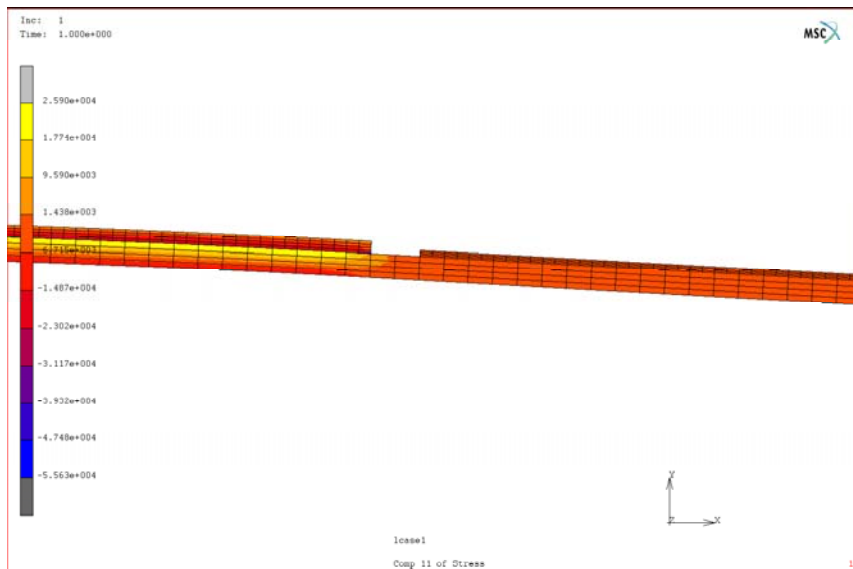
- The actuator and the sensor are glued to the cantilever plate.
- There is no electrical contact since the aluminum is modeled with mechanical elements, and the potential is fixed at 0 for both the actuator and the sensor.

•Results

Defleksjon $4.40\mu\text{m}$ på tuppen.

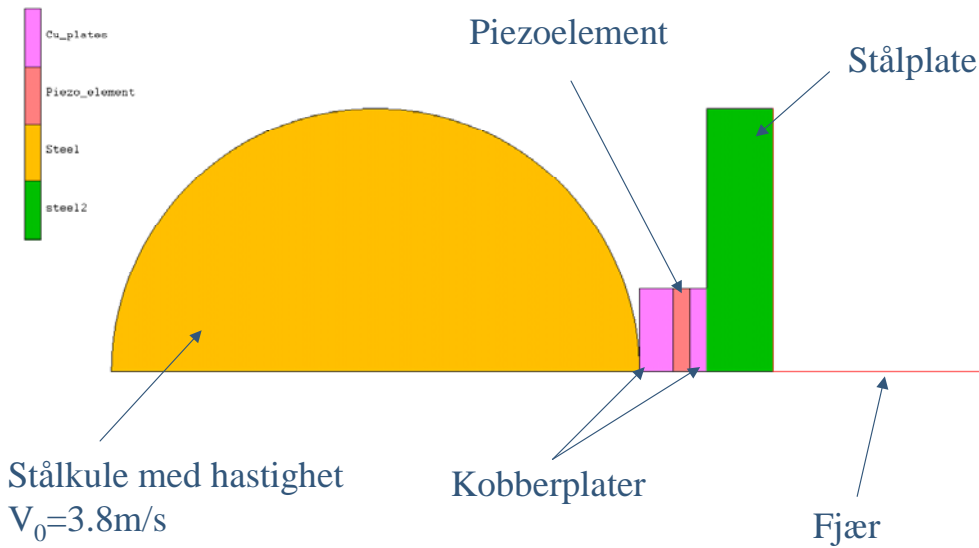


Mekanisk spenning i plate [Pa]

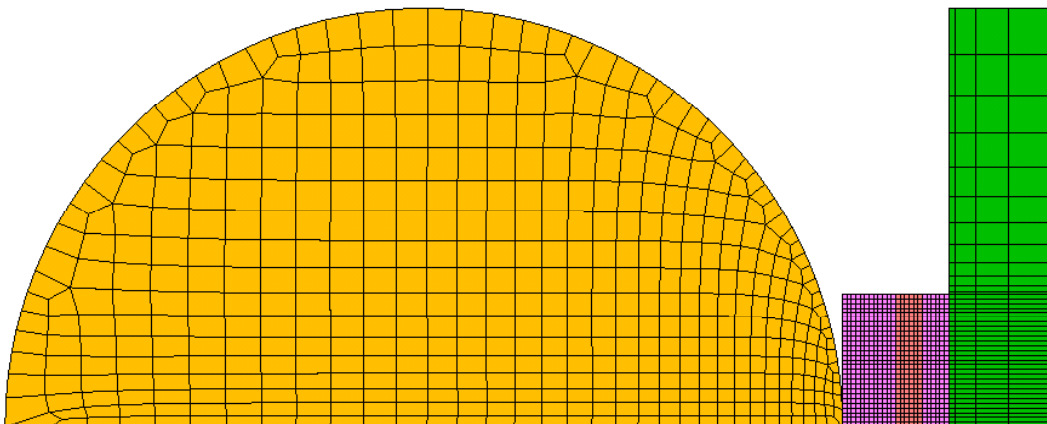


Modellering av støt mot Piezoelektrisk element

NB! Aksesymmetrisk modell



Element tetthet



• Randbetingelser

- Kobberplatene, piezoelement og bakre stålplate har "limt" kontakt
- Stålkula treffer fremre kobberplate og støtet forplanter seg bakover
- Fjæra ble modellert med en elastisk forbindelse til en node. Den elastiske forbindelsen ble tilegnet en kraft vs. forskyvning som vist på neste side.
- Stålkula fikk en initiell hastighet på 3.8m/s, tilsvarende dropp på 73.5 cm
- Rent elastisk støt

• Material

- Kobber er modellert som isotropt med elastisitetsmodul 120GPa, Poissons tall 0.3 og tetthet 8960 kg/m³
- Stål er modellert som isotropt med elastisitetsmodul 210GPa, Poissons tall 0.3 og tetthet 7800 kg/m³
- Piezoelektrisk materiale er modellert som anisotropt med følgende input:

Elastic stiffness

$$S = \begin{bmatrix} 10.7 & 4.9 & 4.9 & 0 & 0 & 0 \\ 4.9 & 10.7 & 4.7 & 0 & 0 & 0 \\ 4.7 & 4.7 & 9.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.3 \end{bmatrix} 10^{10} \text{Pa}$$

Piezoelectric coupling (Stress-Charge)

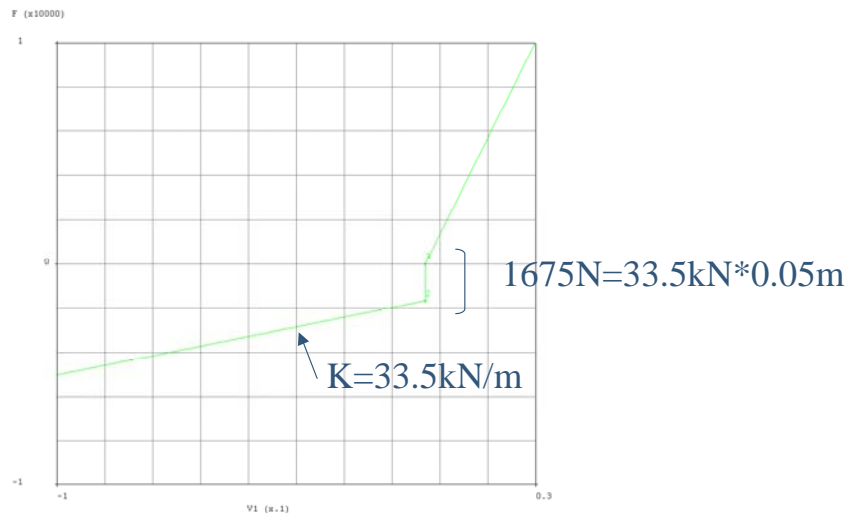
$$e = \begin{bmatrix} 22.17 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.34 \\ 0 & 0 & 0 & 2.34 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{C/m}^2$$

Electric permittivity

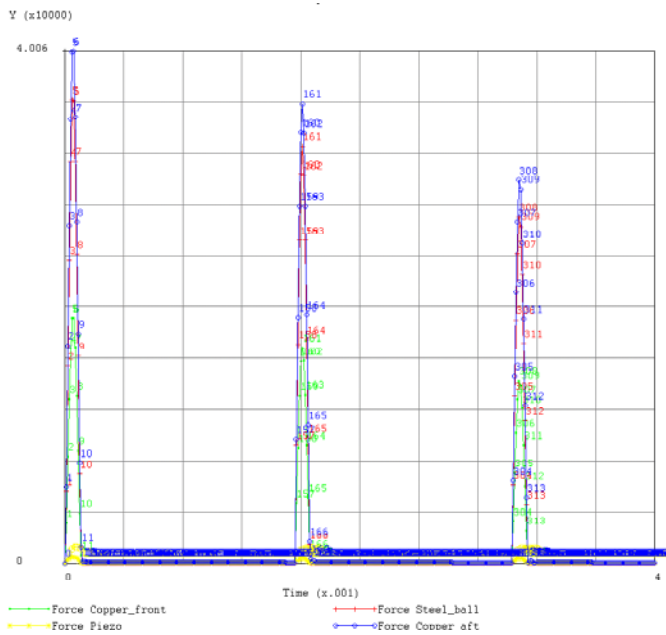
$$\epsilon = \begin{bmatrix} 1.3 & 0 & 0 \\ 0 & 1.3 & 0 \\ 0 & 0 & 1.3 \end{bmatrix} \text{F/m}$$

Modellering av fjær:

- Fjæra hadde en forspenning via en strammebolt på ca 5cm
- Kraft vs forskyvning ble antatt som i figur nedenfor.



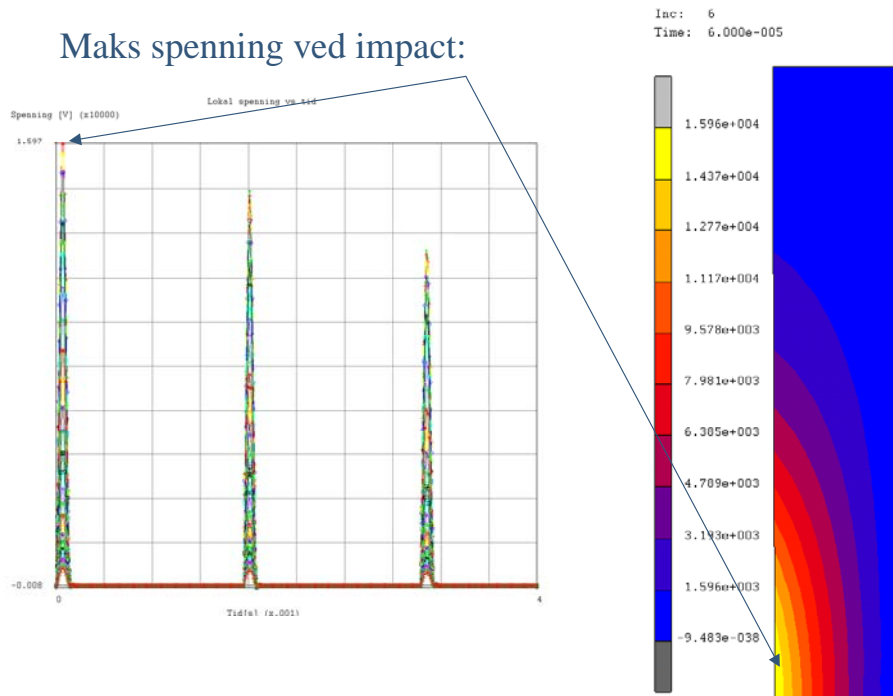
Resultater



- Kontaktkraft vs tid over 4ms
- Ser at første impact varer i ca 120 μ s
- Neste impact kommer etter ca 1.56ms

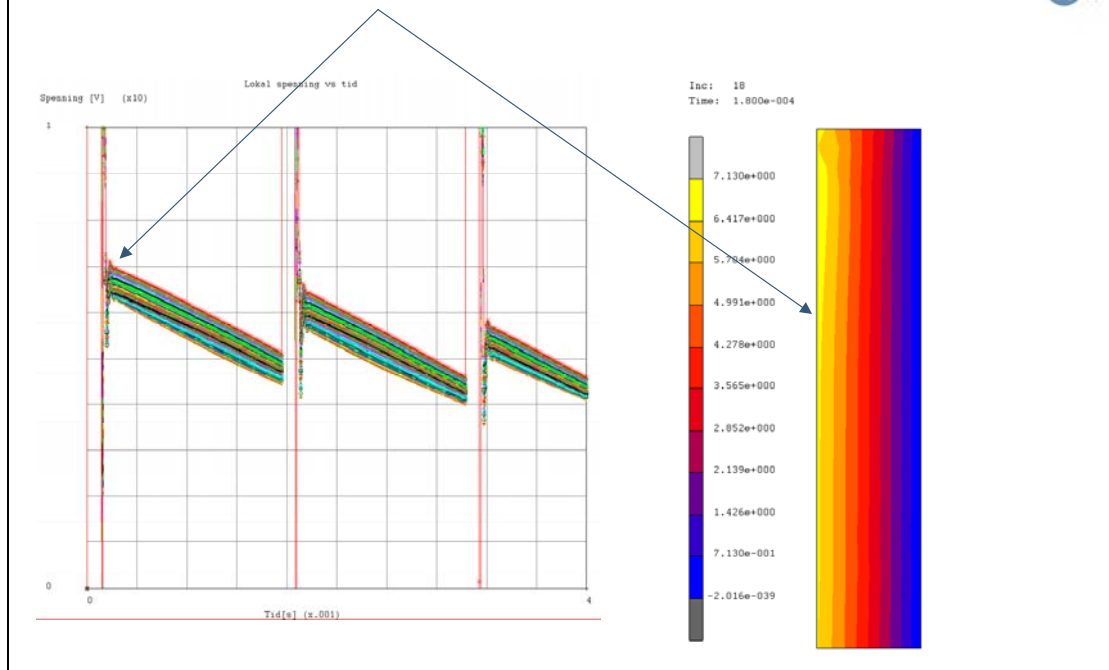
Spenning generert på randa av piezo elementet [V]

Maks spenning ved impact:



Spenning generert på randa av piezo element [V]

Utjevnet spenning en tid etter impact



Konklusjon

- MSC.Marc har gode muligheter for å regne på koblede mekanisk/piezo elektriske problemstillinger
- Beregningene ble utført på kort tid med en lisens på utlån fra MSC.
- Å sette opp en beregning går relativt greit. Man må regne om dataene fra leverandøren av piezo elektriske celler over til data som kan settes inn i MSC.Marc. (Her er det mangler i forhold til den input MSC.Marc krever og det leverandøren av elementet oppgir.)
- Man være nøye med å modellere med riktige randbetingelser i forhold til det man sammenlikner med. (Fjærstivhet, kulehastighet osv)
- I selve analysen må man jobbe mer med betingelsene ved impact. For store eller for små tidssteg i analysen kan føre til problemer med konvergens og i noen tilfeller feil resultat.
- En mer grundig analyse og sammenlikning med eksperimenter burde gi god overensstemmelse, men man må regne med å bruke litt tid på dette. Man må nok også finne seg i å manipulere med input for å oppnå god overensstemmelse

D DATABLAD FOR P841

1. Piezokeramik in Blocktechnik PPK

1. Piezoceramic in Block Technique PPK

Materialien, Technische Daten / Materials, Technical Data

	Symbol Symbol	Einheit Unit	11	21	22	23	26	51	62
Thermische Daten/Thermal Data									
Curietemperatur Curie temperature	θ_c	°C	175	220	260	350	220	325	340
Mechanische Daten/Mech. Data									
Dichte Density	ρ	10 ³ kg/m ³	8,1	7,7	7,9	8,0	7,7	8,0	8,0
Steifigkeitskonstante Stiffness Constant	s_{33}^E s_{11}^E	10 ⁻¹² /Pa	19,0 15,9	18,7 15,4	15,1 14,0	13,2 14,7	15,6 14,7	13,7 11,6	12,8
Güte Mechanical Quality Factor	Q_m		70	80	80	100	80	1200	1900
Frequenzkonstanten Frequency Constants	N_p N_1 N_3	m/s			2000	2180			
Depolarisierungsdruck Depolarisation Pressure	-	10 ⁶ Pa						100	300
Elektrische Daten/Electrical Data									
Relative Dielektrizitätskonstante Relative Permittivity	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$		5000	2800	2100	1170	2690	1300	1200
Spezifischer Widerstand (25 °C) Specific Resistance (25 °C)	ϕ	10 ⁹ Ωm	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100
Dielektrischer Verlustfaktor Dielectric dissipation factor	$\tan \delta$	10 ⁻³	20	30	30	20	30	3	3
Elektromech. Daten/Electromech. Data									
Kopplungsfaktoren Coupling Factors	k_{33} k_{15} k_p k_{31}		0,72	0,74	0,67	0,74	0,67	0,64	0,66
				0,55	0,55		0,37	0,55	
				0,70	0,62	0,65	0,60	0,60	
			0,43	0,40	0,35	0,37	0,35	0,35	0,20
Piezoelektrische Ladungskonst. Piezoelectric Charge Constant	d_{33} $-d_{31}$	10 ⁻¹² C/N	680 350	500 250	350 170	300 130	410 190	220 120	210 60
Piezoelektrische Spannungskonst. Piezoelectric Voltage Constant	g_{33} $-g_{31}$	10 ⁻³ Vm/N	14 8	20 10	19 9	40 20	17 8	26 12	24 11
Temperaturverhalten/Temp. Stability									
Frequenzkonstante Frequency Constant	Tk_{N1}	10 ⁻⁶ /K					-270	-180	-80
Kopplungsfaktor Coupling Factor	Tk_{31}	10 ⁻⁶ /K			600				
Dielektrizitätskonstante Permittivity	$Tk_{\epsilon_{33}}$	10 ⁻⁶ /K		5600	3320		5100	4000	
Zeitliche Stabilität/ Aging Rate									
Frequenzkonstante Frequency Constant	relative Änderung pro Zeitdekade in %				5			< 5	
Kopplungsfaktor Coupling Factor	relative Change per Time Decade in %		-2	-2		-2	-2	-1	
Rel. Dielektrizitätskonstante rel. Dielectric Constant			-1	-3	-2		-2	-5	-3

3. Piezokeramik in Preßtechnik PKT
3. Piezoceramic in Pressing Technique PKT
Materialien, Technische Daten
Materials, Technical Data

	Symbol	Einheit	P 840	P 841	P 850	P 856	P 880
Thermische Daten/Thermal Data							
Curietemperatur	θ_c	°C	325	320	360	150	310
Curietemperature							
Mechanische Daten/Mech. Data							
Dichte	ρ	10^3 kg/m^3	7,6	7,6	7,7	7,5	7,6
Density							
Steifigkeitskonstante	s_{33}^E	$10^{12} / \text{Pa}$	14,7	15,9	18,5	22,2	13,9
Stiffness Constant	s_{11}^F		12,5	13,2	15,9	17,2	11,1
Güte	Q_m		500	1400	80	72	1000
Mechanical Quality Factor							
Frequenzkonstanten	N_p	m/s	2130	2055	1980		2120
Frequency Constants	N_1	m/s	1524	1700	1500		1725
	N_3	m/s	2005	2005	2032	1980	2110
Depolarisierungsdruck	-	10^6 Pa					
Depolarisation Pressure							
Elektrische Daten/Electrical Data							
Relative Dielektrizitätskonstante	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$		1250	1350	1750	4100	1000
Relative Dielectric Constant	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$			1490	1790		
Dielektrischer Verlustfaktor	$\tan \delta$	10^{-3}	4	3,5	14	27	3,5
Dielectric dissipation factor							
Elektromech. Daten/Electromech. Data							
Kopplungsfaktoren	k_{33}		0,72	0,68	0,72	0,73	0,62
Coupling Factors	k_t			0,48	0,49		
	k_p		0,59	0,60	0,63	0,65	0,50
	k_{31}		0,35	0,33	0,36	0,36	0,30
Piezoelektrische Ladungskonst.	d_{33}	10^{-12} C/N	290	300	400	620	215
Piezoelectric Charge Constant	$-d_{31}$		125	109	175	260	95
Piezoelektrische Spannungskonst.	g_{33}	10^{-3} Vm/N	26,5	25,5	26	18,5	25
Piezoelectric Voltage Constant	$-g_{31}$		11	10,5	12,4	8,1	10

Besondere Eigenschaften, Anwendungen

P 840 / P841

- Hohe Kopplungsfaktoren
- Hohe mechanische Güte
- Niedrige dielektrische und mechanische Verluste bei hoher Ansteuerspannung

Anwendungsbeispiele:

Ultraschall-Reinigungsanlagen
Zerstäuber
Piezotransformatoren
Leistungs-Ultraschallwandler
Zündelemente (Quetsch)
Druckaufnehmer
Unterwasserakustik

P 850

- Hohe Kopplungsfaktoren
- Hohe Ladungsempfindlichkeit

Anwendungsbeispiele:

Zündelemente (Schlag)
Druckaufnehmer
Beschleunigungsaufnehmer
Hydrofone
Fernsteuersysteme
Stellglieder in Stapelbauweise

P 856

- Hohe Dielektrizitätskonstante
- Hohe Kopplungsfaktoren
- Hohe piezoelektrische Ladungskonstante

Anwendungsbeispiele:

Stellglieder in Stapelbauweise
Zündelemente (Schlag)
Bimorphelemente

P 880

- Hohe Kopplungsfaktoren
- Hohe mechanische Güte
- Geringer Verlustfaktor
- Geeignet für hohe elektrische Spannung und mechanische Lasten

Anwendungsbeispiele:

Ultraschallschweißern
Dispersieren

Special Characteristics, Applications

P 840 / P 841

- High couplings factors
- High mechanical Q-factor
- Low dielectric and mechanical losses at high electric drive

Examples of application:

Ultrasonic cleaning
Vaporizers
Piezo transformers
High-power ultrasonic generators
Gas ignitor (squeeze)
Pressure gauges
Underwater acoustics

P 850

- High coupling factors
- High charge sensibility

Examples of application:

Gas ignitors (impact)
Pressure gauges
Accelerators
Hydrophones
Remote control systems
Piezo-stacks for micro-positioning

P 856

- High permittivity
- High coupling factors
- High charge constant

Examples of application:

Piezo-stacks for micro-positioning
Gas ignitors (impact)
Bimorphs

P 880

- High coupling factors
- High mechanical Q-factor
- Low dissipation factor
- Compatible with high voltages and mechanical loads

Examples of application:

Ultrasonic welding
Dispersion

E BILDER AV TESTOPPSETTET