

Prozessoptimierung am tpt Gold-Bonder

Konstantin Schneider

07. Nov 2021

Contents

1. Einleitung	3
2. Probenherstellung	4
I. Gatedurchbrüche	6
3. Messaufbau	6
3.1. Keysight B1500A (100V)	6
3.2. Keithley Sourcemeter 2450 (200V)	7
4. Screening Experiment	8
4.1. Versuchsplanung	9
4.2. Durchführung	11
4.3. Auswertung	12
5. Test der optimalen Parameterwerte	17
5.1. Cr/Au	17
5.2. Cr/Pd/Au	21
6. Fazit	21
II. Pull-Test	22
7. Pulltester	22
8. Optimierung der Haltekraft	25
8.1. Versuchsplanung	25
8.2. Durchführung	26
8.3. Auswertung	26
9. Fazit	30

1. Einleitung

Die neuen Wire-Bonder der Firma *tpt* führen regelmäßig zu einer Beschädigung der isolierenden SiO_2 -Schicht von Proben auf Si/SiO_2 . Durch Anlegen einer Spannung an das Backgate (bulk Si) kann es durch diese Beschädigung zu einem Durchschlag (Gate-Durchbruch) kommen. Der Einfluss des Bondens mit dem *tpt* Aluminium-Bonder auf die Wahrscheinlichkeit eines Gate-Durchbruchs wurde in meiner Bachelorarbeit untersucht. Für eine genaue Untersuchung des Verhaltens am *tpt* Gold-Bonder blieb jedoch keine Zeit.

```
knitr:::include_graphics(here:::here("static/img/gatebreak/gb-example.jpg"))
```

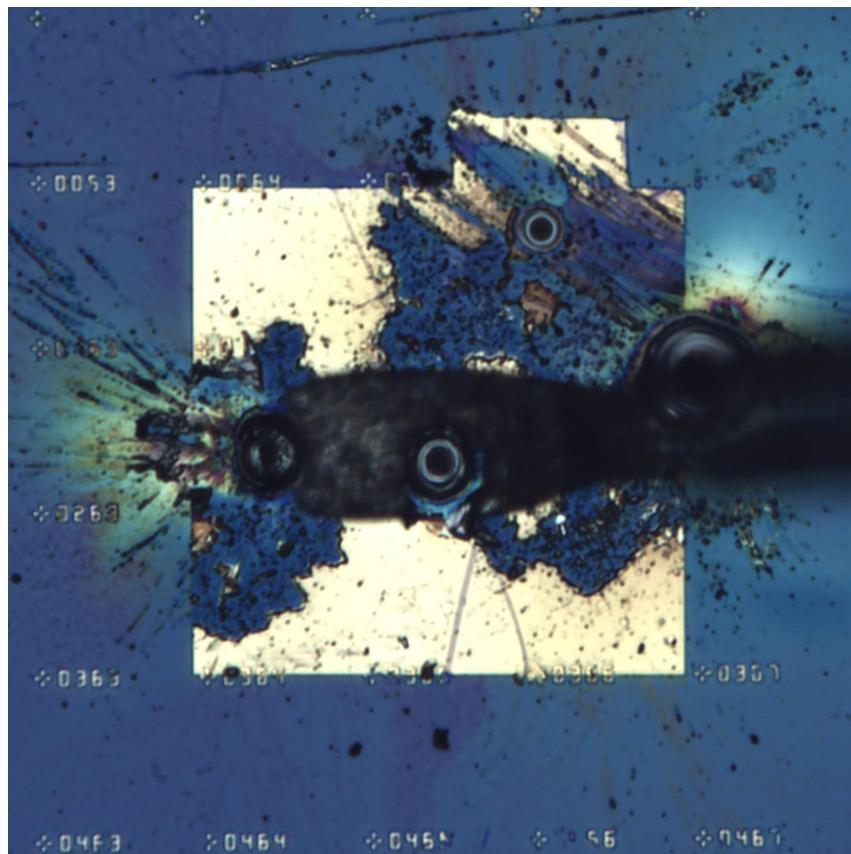


Figure 1: Gate-Durchbruch an einem Al/Au-Bond aus meiner Bachelorarbeit (*tpt* Al-Bonder).

Ziel dieser Arbeit ist es daher festzustellen, ob das Bonden mit dem *tpt* Gold-Bonder zu Gate-Durchbrüchen führen kann. Dabei ist der Einfluss der wesentlichen Bondparameter auf die Wahrscheinlichkeit eines Gate-Durchbruchs von besonderem Interesse.

2. Probenherstellung

```
library(tidyverse)
```

Um den Einfluss des Wire-Bondens am tpt Gold-Bonder auf Gate-Durchbrüche zu untersuchen, wurden Chips mit Bondpads aus Gold/Chrom versehen. Hierfür wurden Chips aus Si/SiO₂ verwendet. Diese wurden gereinigt, belackt und mittels Elektronenstrahllithografie "beschrieben". Anschließend wurden Bondpads aus Chrom/Gold aufgedampft. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden genauer erläutert.

2.0.0.1. Reinigung Die Proben wurden zunächst wie folgt chemisch gereinigt:

- **Schritt 1:** 30s Aceton in Ultraschallbad.
- **Schritt 2:** In Aceton schwenken.
- **Schritt 3:** Mit Isopropanol spülen.
- **Schritt 4:** Mit Stickstoff trocknen.

Um organische Verunreinigungen zu entfernen, wurden die Proben im Anschluss zusätzlich für fünf Minuten bei 57% Leistung im (alten) Plasmaversacher gereinigt.

2.0.0.1.1. Spin-Coating Für die Lithographie wurde der positive e-Resist Lack CSAR der Firma *All-resist* verwendet. Um beim Spin-Coating eine möglichst gleichmäßige Schichtdicke zu erreichen wurden unterschiedliche Kombinationen der relevanten Parameter variiert. Dies resultierte in den Parameterwerten aus Tabelle 1, welche zuverlässig zu guten Ergebnissen führten.

```
knitr:::kable(
  tribble(
    ~"Schritt", ~"RPM", ~"Ramp", ~"Dauer", ~"Tropfen",
    "1", "-/-", "-/-", "-/-", "1-2",
    "2", "4000", "800", "5", "-/-",
    "3", "4000", "-/-", "20", "1-2",
    "4", "6000", "800", "30", "-/-"
  ),
  caption = "CSAR Spin-Coating Parameter."
)
```

Nach dem Belacken kamen die Proben bei 150 deg C für 60s auf eine Heizplatte (*Soft Bake*).

Table 1: CSAR Spin-Coating Parameter.

Schritt	RPM	Ramp	Dauer	Tropfen
1	-/-	-/-	-/-	1-2
2	4000	800	5	-/-
3	4000	-/-	20	1-2
4	6000	800	30	-/-

2.0.0.2. Lithographie

2.0.0.2.1. Dosis Um eine gute Dosis für CSAR zu finden, wurde ein Dose-Test von 40 bis 150 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass ab einer Dosis von ca. 50 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ kein Unterschied zwischen verschiedenen Dosen mehr zu erkennen ist.

Das Datenblatt empfiehlt 65 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Da die Schichtdicke am Rand der Proben zunimmt, und die Proben meist flächendeckend mit Bondpads versehen wurden, wurde eine Dosis von 80 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ verwendet.

2.0.0.2.2. Entwickeln

- **Schritt 1:** 60s in Entwickler (AR 600-546).
- **Schritt 2:** 60s in Isopropanol schwenken.
- **Schritt 3:** Mit Isopropanol spülen.
- **Schritt 4:** Mit Stickstoff trocknen.

2.0.0.3. Bedampfen

- **Schritt 1:** 30s in Remover (AR 600-71, Raumtemperatur).
- **Schritt 2:** Lift-Off.
- **Schritt 3:** Mit Isopropanol spülen.
- **Schritt 4:** Mit Stickstoff trocknen.

2.0.0.4. Aufkleben Die Chips wurden mit Kleber (?) auf einen Chipträger geklebt. Zum Aushärten des Klebers, wurden sie anschließend für 45 Minuten bei 150 Grad Celsius auf eine Heizplatte gelegt.

Part I.

Gatedurchbrüche

3. Messaufbau

Es wurden Gate-Durchbrüche durch einen Spannungssweep von 0 bis 100V, bzw. 0 bis 200V, provoziert. Hierfür wurden zwei unterschiedliche Messaufbauten verwendet: Ein Keysight B1500A Device Tester für Messungen bis 100V, und ein Keithley 2450 SourceMeter für Messungen bis 200V.

3.1. Keysight B1500A (100V)

Spannungssweeps bis 100V wurden an einem Keysight B1500A durchgeführt. Hierfür wurde die Spannung über SMU1-Force an Kontakt 12 der Proben gelegt, während die zu testenden Bonds auf Masse gelegt wurden.

Am Keysight B1500A nicht möglich, Spannungen von über 100V anzulegen.

```
knitr::include_graphics(here::here("static/img/gatebreak/gb-setup-
  ↵ keysight.jpg"))
```

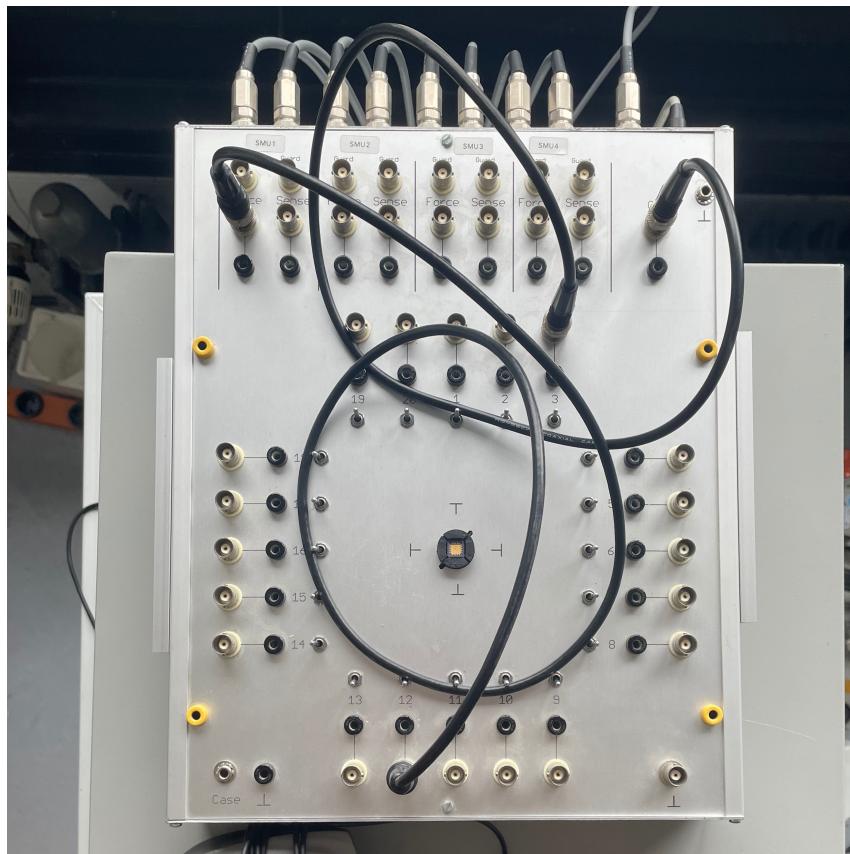


Figure 2: Messaufbau am Keysight B1500A.

3.2. Keithley Sourcemeter 2450 (200V)

Für Messungen bis 200 Volt wurde ein Keithley 2450 SourceMeter verwendet. Dieses erlaubt es direkt am Gerät einen Spannungssweep bis 200 Volt zu erstellen. Schließt man das Keithley 2450 über Ethernet an das LAN Netzwerk der Uni an, kann man das Gerät über ein Webinterface fernsteuern. Hierfür muss die IP-Adresse des Keithleys abgelesen werden (*HOME → COMMUNICATION → LAN*). Dieses Webinterface ist relativ rudimentär, erlaubt es aber die Messdaten direkt aus dem Buffer zu speichern.

```
knitr:::include_graphics(  
  here::here("static/img/gatebreak/gb-setup-keithley.jpg"))  
)
```

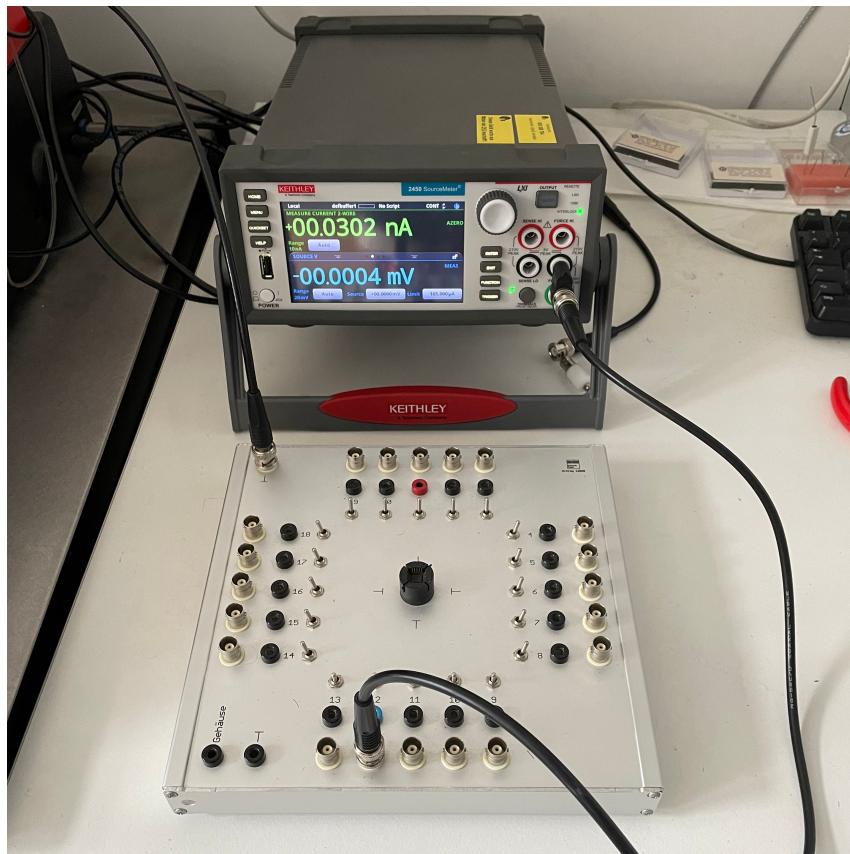


Figure 3: Messaufbau am Keithley 2450. (Bild austauschen. Falsch verkabelt...)

Für die Messungen der Kennlinien wurde die Spannung an Kontakt 12 der Chipträger angelegt. Die Bonds wurden über einen ESD-Stecker an der Netzsteckdose auf Masse gelegt.

4. Screening Experiment

```
library(tidyverse)
library(parsnip)
library(patchwork)

data_screening <- read_rds(
  here::here("data/gatebreak/gb-screening.rds")
)
load(here::here("data/gatebreak/gb_screening_regression.rda"))
load(here::here("data/gatebreak/gb_screening_plots.rda"))
```

4.1. Versuchsplanung

Um festzustellen, welche Parameter am Gold-Bonder vermehrt zu Gate-Durchbrüchen führen, wurde zunächst ein Screening Experiment durchgeführt. Hierbei wurden die folgenden Faktoren im Rahmen eines Teilstudioplans mit Auflösung III variiert:

- Ultraschallleistung
- Bondzeit
- Bondkraft
- Temperatur
- Schichtdicke: Gold
- Schichtdicke: Chrom

Die verwendeten Parameterwerte und gemessenen Levelkombinationen, können Tabelle 2 entnommen werden. Diese orientierten sich an den empfohlenen Werten des Herstellers (siehe Abbildung 4).

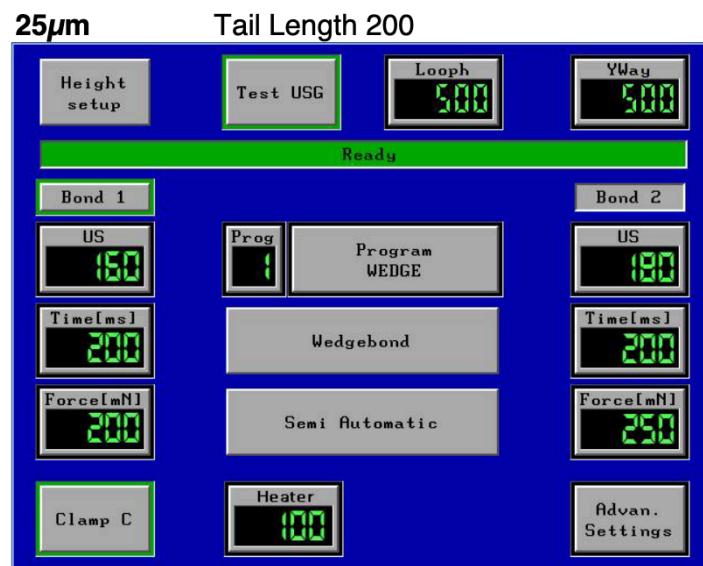
```
data_screening |>
  select(ultrasound:temperature) |>
  drop_na() |>
  unique() |>
  arrange(-ultrasound) |>
  knitr::kable(
    align = "cccccc",
    caption = "Parameterwerte des Screening Experiments."
  )
```



```
knitr:::include_graphics(
  here::here("static/img/tpt_recommended.png")
)
```

Table 2: Parameterwerte des Screening Experiments.

ultrasound	time	force	gold	chrome	temperature
280	180	180	40	2	150
280	180	280	40	10	100
280	280	280	160	10	150
280	280	180	160	2	100
230	230	230	100	6	125
180	280	280	40	2	150
180	180	180	160	10	150
180	280	180	40	10	100
180	180	280	160	2	100

**Figure 4:** Empfohlene Werte aus dem Handbuch des tpt HB-10 Bonders für Golddraht.

Aufgrund der Ergebnisse meiner Bachelorarbeit wurde vermutet, dass vor Allem die Ultraschallleistung und Bondzeit einen wesentlichen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit eines Gate-Durchbruchs haben.

4.2. Durchführung

Es wurden pro Levelkombination der Schichtdicke von Gold und Chrom jeweils zwei Proben mit Bondpads hergestellt (siehe Abbildung 5). Diese wurden anschließend anhand des Versuchsplans mit Bonds versehen, wobei darauf geachtet wurde, jedes Bondpad nur einmal zu verwenden.

Mit dem Keysight B1500A wurde an jedem Bond einzeln ein Spannungssweep von 0 bis 100 Volt angelegt. Nach jeder Messung wurde der gemessene Bond mikroskopisch begutachtet. Hierbei hat sich gezeigt, dass es teilweise zu Gate-Durchbrüchen kam, die rein an den Messdaten nicht erkannt worden wären.

```
knitr:::include_graphics(  
  here::here("static/img/gatebreak/gb-litho-check.png"))  
)
```

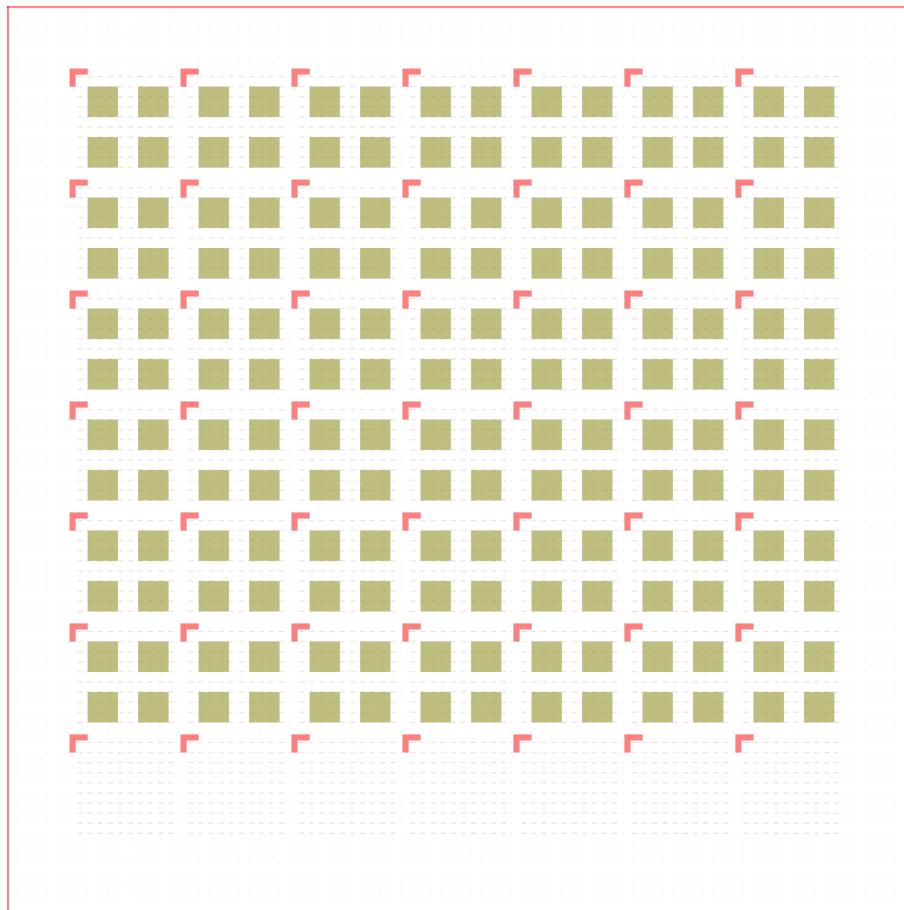


Figure 5: Verwendete Probengeometrie zum Messen von Gate-Durchbrüchen.

Da es sich mit Gate-Durchbruch Ja/Nein, um eine kategorische Antwort handelt, wurde der Versuchsplan fünfmal wiederholt. Dadurch konnte in der Auswertung die relative Anzahl an Gate-Durchbrüchen untersucht werden.

4.3. Auswertung

Von insgesamt 55 Messungen führten 11 Messungen zu einem Gate-Durchbruch. Die Kennlinien der Gate-Durchbrüche können Abbildung 6 entnommen werden.

Die Kennlinien zeigen, dass Gate-Durchbrüche ohne eine optische Kontrolle leicht hätten übersehen können, da ein Gate-Durchbruch allein an den Daten teils nicht zu erkennen ist (vergleiche Messung 46).

```
plot_screening_kennlinie
```

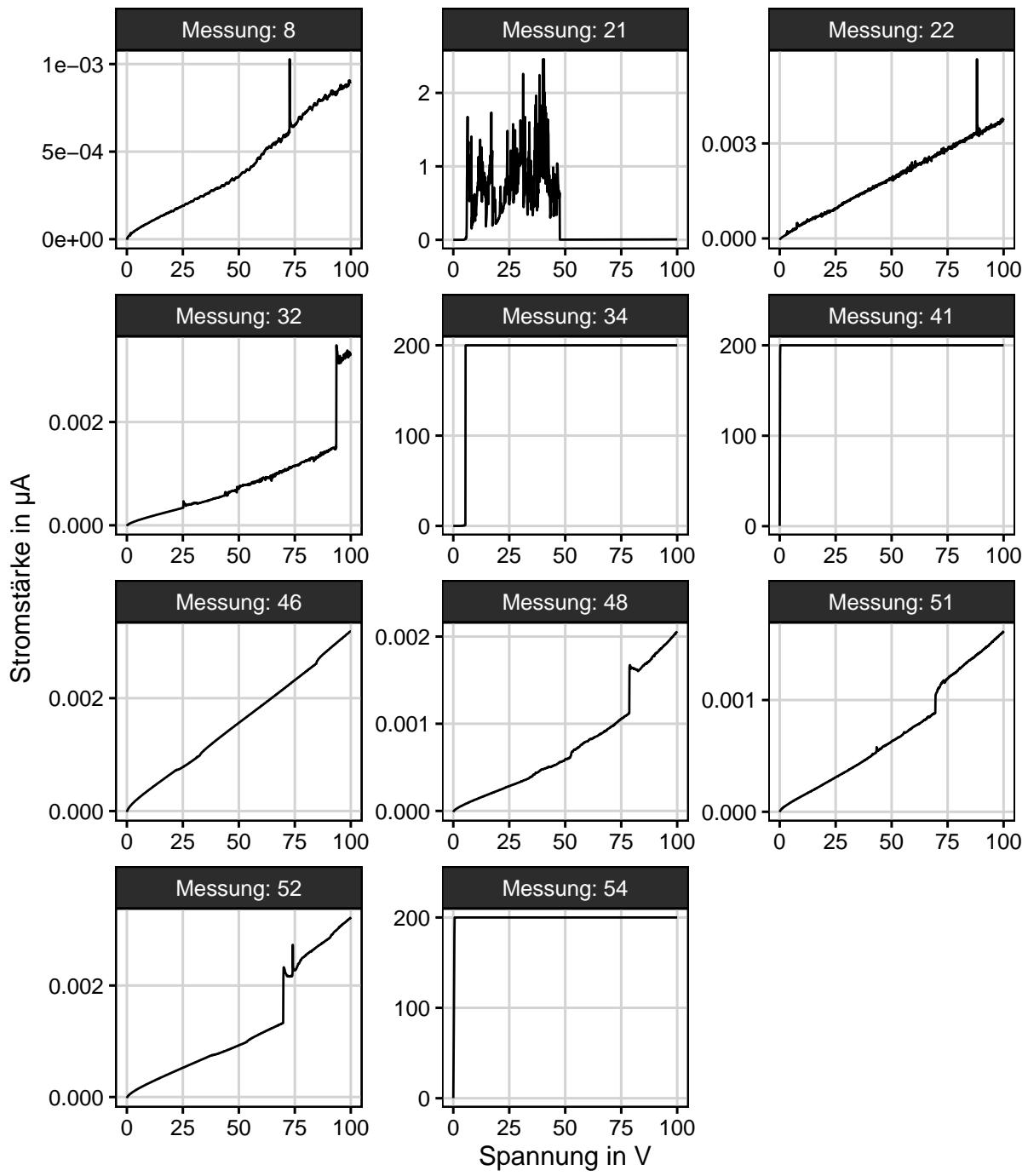


Figure 6: Kennlinien aller gemessenen Gate-Durchbrüche.

Abbildung 7 zeigt die Effekt-Plots der untersuchten Einflussgrößen. In diesem wurden die Mittelwerte der Messungen der einzelnen Level gebildet. Die Steigung des Plots signalisiert die Größe des Effekts einer Einflussgröße.

```
plot_screening_effect
```

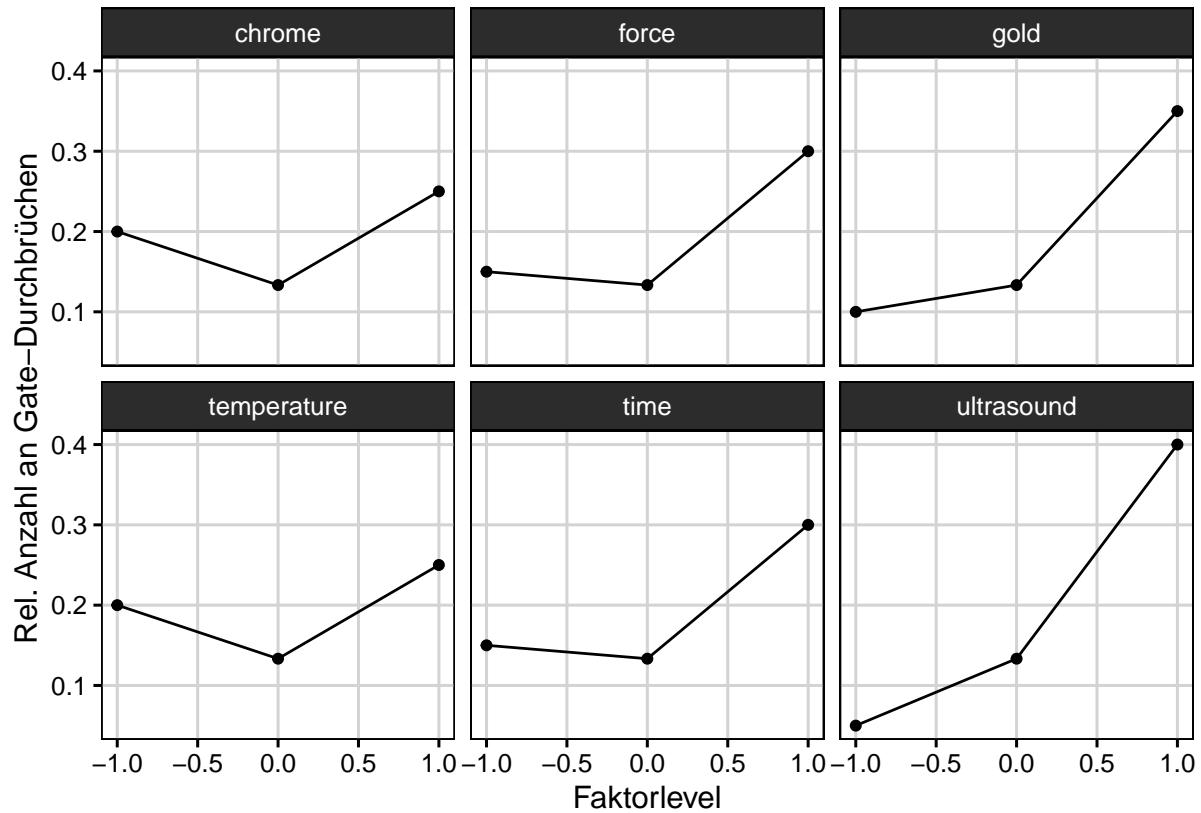


Figure 7: Effektplot der untersuchten Faktoren. Die Steigung ist ein Maß für die Stärke eines Effekts.

4.3.1. Regression

Eine Grundvoraussetzung der linearen Regression ist eine Normalverteilung der Zielgröße. Da die Zielgröße "Gate-Durchbruch = Ja/Nein" kategorisch ist wurde diese über den Mittelwert aus 5 Messungen in eine Wahrscheinlichkeit umgerechnet. Dadurch folgen die Daten allerdings nun einer Binomialverteilung. Dies wurde über eine Arcsin-Transformation korrigiert.

$$P(\text{Gate-Durchbruch})_{\text{trans.}} = \arcsin \left(\sqrt{P(\text{Gate-Durchbruch})} \right)$$

Somit ist eine Normalverteilung der Messergebnisse gegeben (Shapiro-Wilk: $p = 0.172$).

Es wurde eine lineare Regression mit allen untersuchten Einflussgrößen verwendet, um die Daten zu nähern. Tabelle 3 zeigt das Ergebnis dieser Regression.

Table 3: Regressionstabelle.

term	estimate	std.error	statistic	p.value
(Intercept)	0.395	0.051	7.679	0.001
ultrasound	0.282	0.055	5.165	0.004
force	0.111	0.055	2.029	0.098
gold	0.166	0.055	3.042	0.029

Table 4: Statistiken der Regession.

r.squared	adj.r.squared	statistic	p.value	df
0.889	0.822	13.35	0.008	3

Keiner der Faktoren besitzt statistische Signifikanz ($p < 0.05$), daher wurde die Regression schrittweise um nicht signifikante Terme reduziert.

```
model_screening |>
  tidy() |>
  knitr::kable(
    digits = 3,
    caption = "Regressionstabelle."
  )
```

Die finale Regression beinhaltet die Faktoren Ultraschallleistung, Bondkraft und Golddicke (siehe Tabelle ??) und bildet die Daten gut ab ($R^2_{\text{adj.}} = 88.9\%$, $p = 0.008$, vgl. Tabelle 4). Dabei weisen Ultraschallleistung und die Dicke der Goldschicht einen statistisch signifikanten Effekt auf ($p < 0.05$). Die Bondkraft besitzt keinen statistisch signifikanten Effekt, verbessert allerdings den Fit der Regression.

```
model_screening |>
  glance() |>
  select(r.squared, adj.r.squared, statistic, p.value, df) |>
  knitr::kable(
    digits = 3,
    caption = "Statistiken der Regession."
  )
```

Die finale Regressions-Funktion lautet:

```

model_screening |>
  extract_fit_engine() |>
  equationatic::extract_eq(
    swap_var_names = c(
      "ultrasound" = "US",
      "force" = "F",
      "gold" = "AU",
      "gate_break_corrected" = "P(Gate-Durchbruch)_trans."
    ),
    wrap = TRUE,
    terms_per_line = 3,
    use_coefs = TRUE,
    coef_digits = 3,
    fix_signs = TRUE
)

```

$$\hat{P}(\text{Gate-Durchbruch})_{\text{trans.}} = 0.395 + 0.282(\text{US}) + 0.111(\text{F}) + 0.166(\text{AU}) \quad (1)$$

```
plot_screening_contour
```

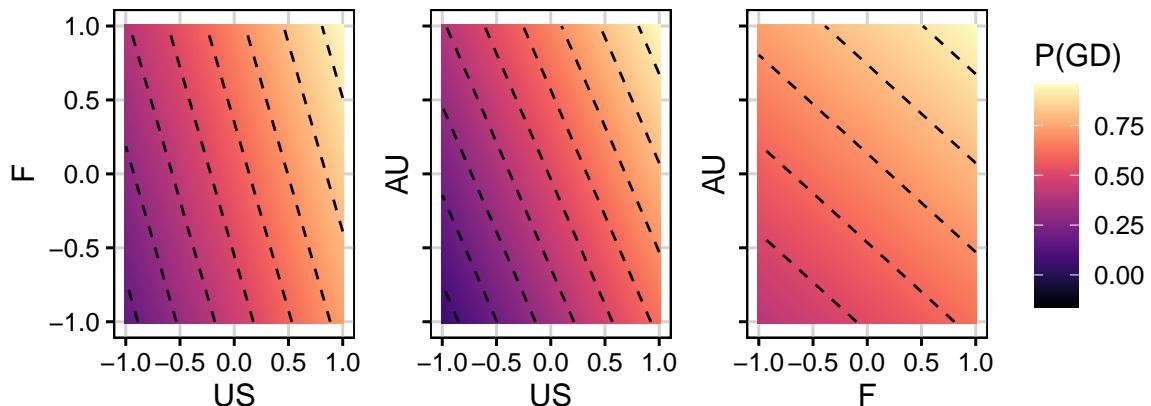


Figure 8: Contour-Plot der Regressionsfunktion.

5. Test der optimalen Parameterwerte

```
library(tidyverse)

data_mock <-
  read_rds(here::here("data/gatebreak/gb_mock.rds"))

load(here::here("data/gatebreak/gb_mock_plots.rda"))
```

5.1. Cr/Au

Um die Ergebnisse des Screening Experiments zu überprüfen, wurden mehrere Chips mit Cr/Au Bond-pads versehen. Diese sind kurzgeschlossen (siehe Abbildung 9), und erlauben es so, mehrere Bonds auf einmal zu prüfen. Dies soll eine reale Anwendung simulieren, bei der mehrere Kontakte an einer Probe benötigt werden.

```
knitr::include_graphics(
  here::here("static/img/gatebreak/gb-litho-mock.png")
)
```

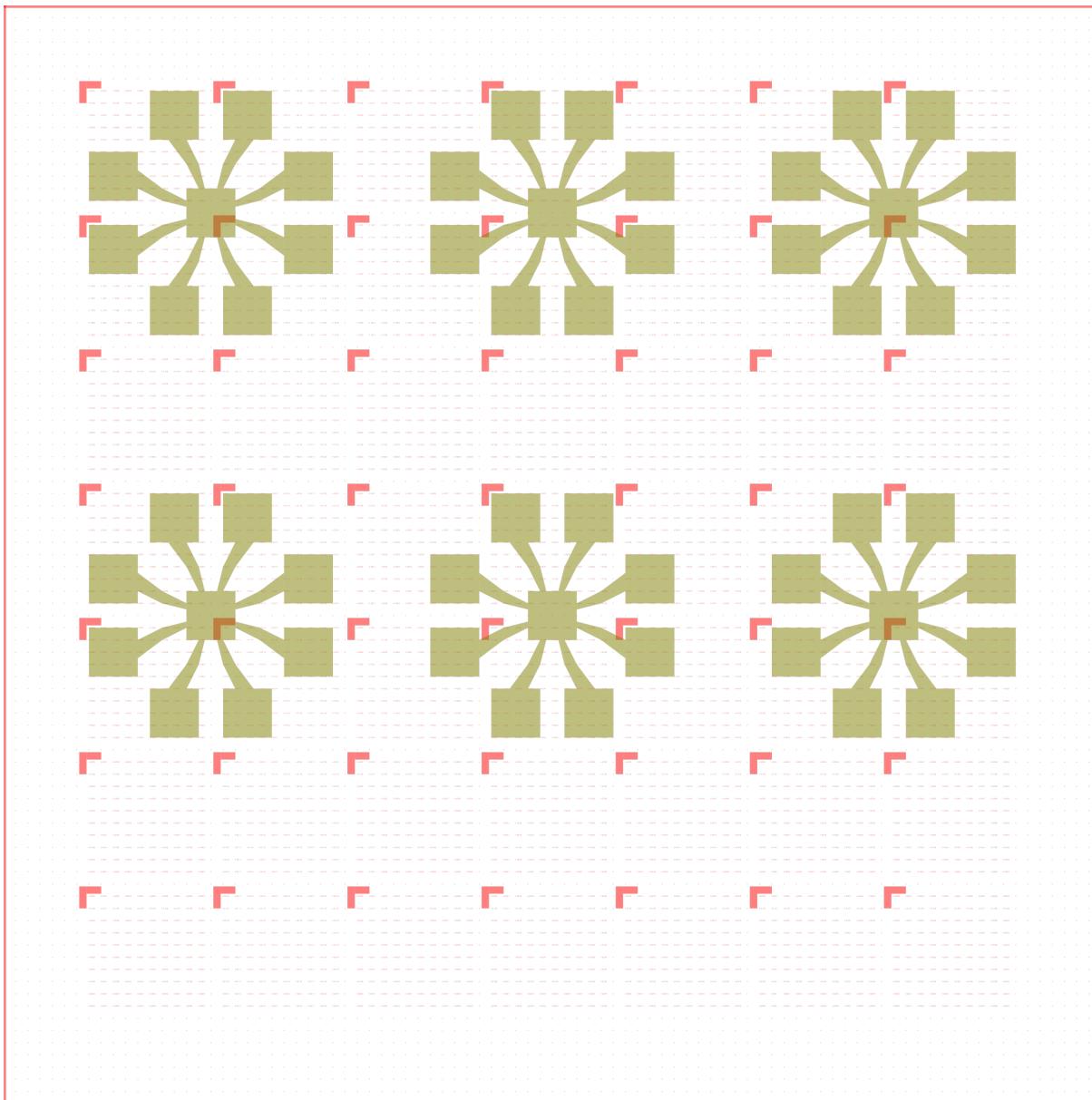


Figure 9: Lithographie-Muster zum Testen der optimalen Parameterwerte.

5.1.1. Durchführung

Für die Messung wurden alle Bondpads einer Probe mit Bonds versehen. Hierbei wurde ein Bond wiederholt, falls er fehlgeschlagen ist. Hierbei haben 33 von 35 Bonds gehalten.

Die verwendeten Parameterwerte waren:

```
tribble(
  ~"US", ~"T", ~"F", ~"AU", ~"CR", ~"Temp",
  110, 150, 200, "40 nm", "2 nm", "100 °C"
) |>
knitr::kable(
  align = "c"
)
```

US	T	F	AU	CR	Temp
110	150	200	40 nm	2 nm	100 °C

Die Messungen wurden an einem Keithley SourceMeter 2450 durchgeführt. Hierfür wurde an jede Probe ein Spannungssweep von 0 bis 200 Volt angelegt. Dies wurde für jede Probe dreimal wiederholt und zusätzlich jeweils eine Blindmessung aufgenommen.

5.1.2. Auswertung

Abbildung 10 zeigt die Kennlinien der Durchgeführten Messungen. Hierbei zeigt Messung 1 an Chip 1 einen Gate-Durchbruch bei 199.5 Volt. Dies hatte einen Einfluss auf Messung 3 an Chip 1: Ab ca. 100 Volt beginnt ein Leckstrom zu fließen.

Die restlichen Messungen stimmen gut überein: Bei 35.5 Volt existiert ein Peak, welcher auch in den Blindmessungen festgestellt wurde (siehe Abbildung 11). Im Vergleich zu den Blindmessungen wurde an den Messungen an den Proben ein Blindstrom ab ca. 150 Volt festgestellt. Die Steigung des Blindstroms nimmt von Messung 1 bis 3 ab.

```
plot_crau_kennlinie
```

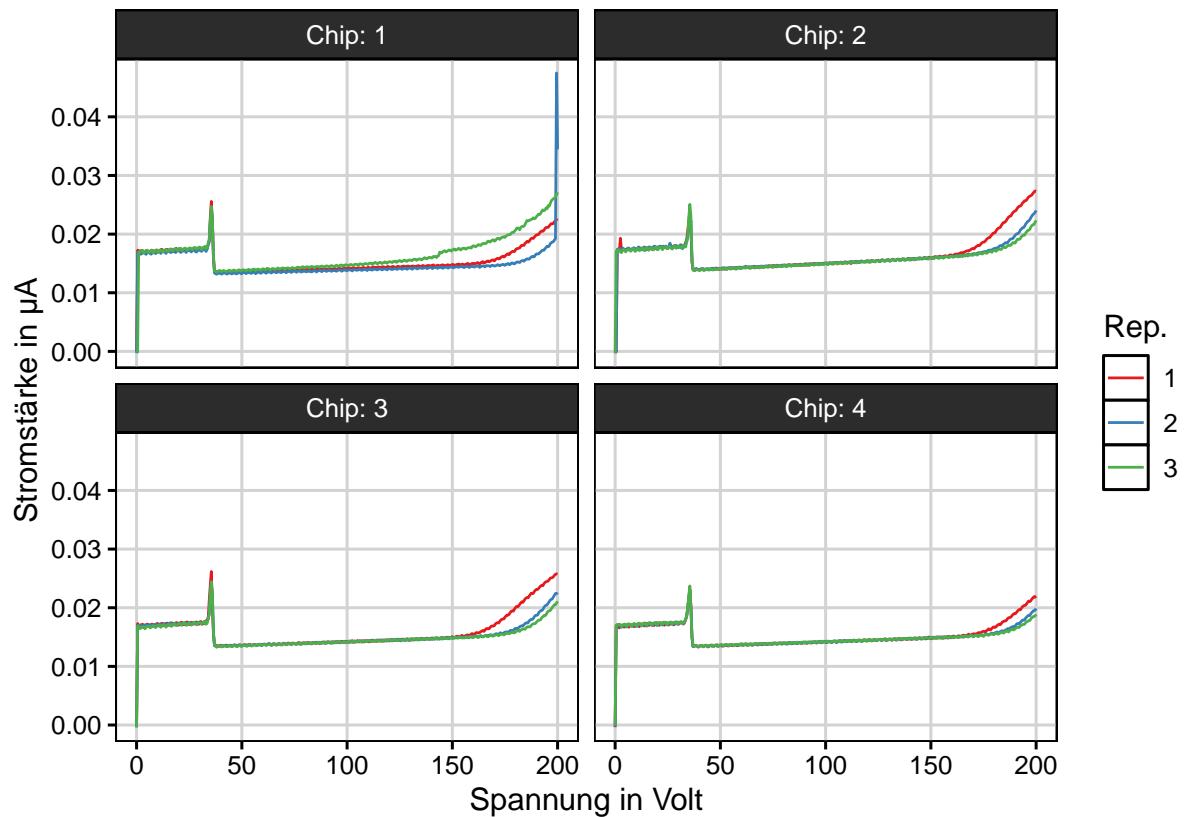


Figure 10: Kennlinien der Messungen an 8 Bonds gleichzeitig. Die Kennlinie der ersten Messung an Chip 1 weißt einen Gate-Durchbruch auf.

```
plot_crau_blind
```

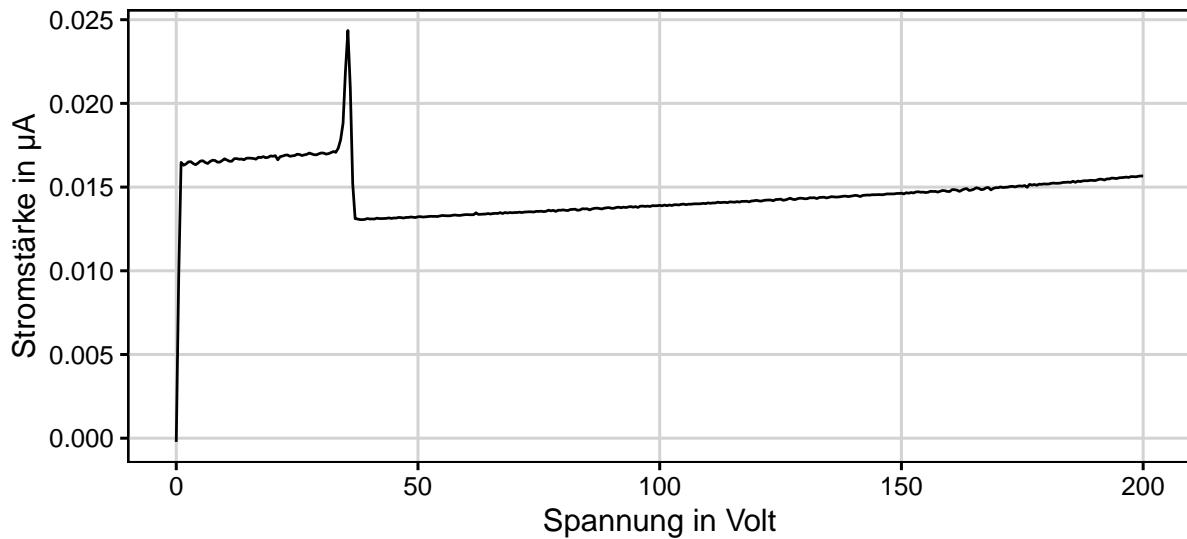


Figure 11: Gemittelte Kennlinie der Blindmessungen.

5.2. Cr/Pd/Au

6. Fazit

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Erkenntnisse meiner Bachelorarbeit auch für den Gold-Bonder gelten. So steigt die Wahrscheinlichkeit eines Gate-Durchbruchs mit einer Erhöhung der Bondparameter. Dabei hat die Ultraschallleistung den größten Effekt.

Die Schichtdicke von Chrom hat keinen großen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit eines Gate-Durchbruchs. Die Schichtdicke von Gold dagegen, weiß einen messbaren Effekt auf: Durch eine Erhöhung der Schichtdicke, steigt die Wahrscheinlichkeit eines Gate-Durchbruchs. Dieses Ergebnis stimmt zwar mit meiner Bachelorarbeit überein, ist allerdings kontraintuitiv und kann nicht erklärt werden.

Meine abschließende Empfehlung ist daher: Um einen Gate-Durchbruch möglichst zu vermeiden, sollte der Gold-Bonder verwendet werden. Dieser bietet im Vergleich zum Aluminium-Bonder den Vorteil, dass an ihm mit sehr viel geringerer Ultraschallenergie (US, T) gebondet werden kann.

Die Schichtdicke der Bondpads zu erhöhen hat zudem nicht den erwarteten Effekt einer Verringerung der Wahrscheinlichkeit eines Gate-Durchbruchs. Stattdessen konnte ich die besten Ergebnisse (ein Gate-Durchbruch aus 32 Bonds) mit einer Schichtdicke von 2 nm Chrom und 40 nm Gold erreichen.

Part II.

Pull-Test

7. Pulltester

Mit einem Pull-Test kann die Qualität eines Bonds mechanisch geprüft werden. Hierfür wird ein feiner Haken unter den Loop eines Bonds geführt und langsam angehoben. Die Zugkraft, die auf den Draht wirkt, wird dabei gemessen.

Es wird zwischen zwei Arten des Pull-Tests unterschieden: Beim nicht-destruktiven Pull-Test wird die Zugkraft bis auf einen Maximalwert erhöht. Erhöht man die Zugkraft dagegen, bis entweder der erste oder zweite Bond vom Chip reißt, handelt es sich um einen destruktiven Pull-Test.

Der hier verwendete Pull-Tester wurde von Michael Weigl in Rücksprache mit mir entworfen und gebaut. Maßgebendes Vorbild war hierbei der Pull-Tester der Firma *tpt*.

```
knitr:::include_graphics(  
  here::here("static/img/pulltest/pt-setup-1.jpg"))  
)
```



Figure 12: Federwaage des Pulltesters.

```
knitr:::include_graphics(  
  here::here("static/img/pulltest/pt-setup-2.jpg"))  
)
```

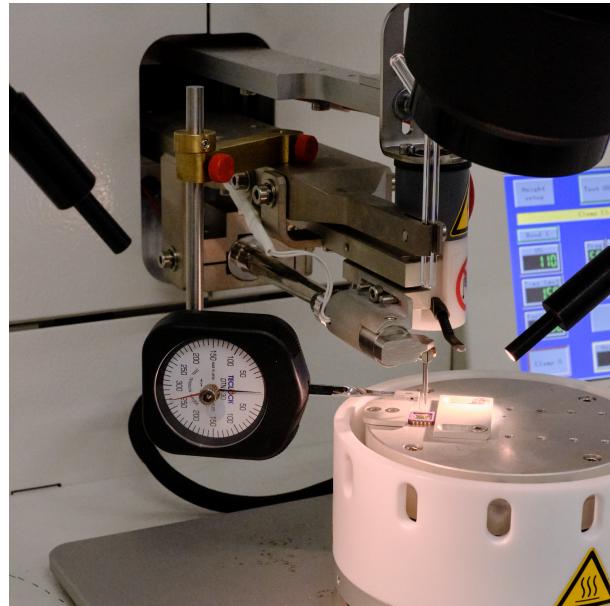


Figure 13: Federwaage des Pulltesters.

```
knitr:::include_graphics(  
  here::here("static/img/pulltest/pt-setup-3.jpg"))  
)
```

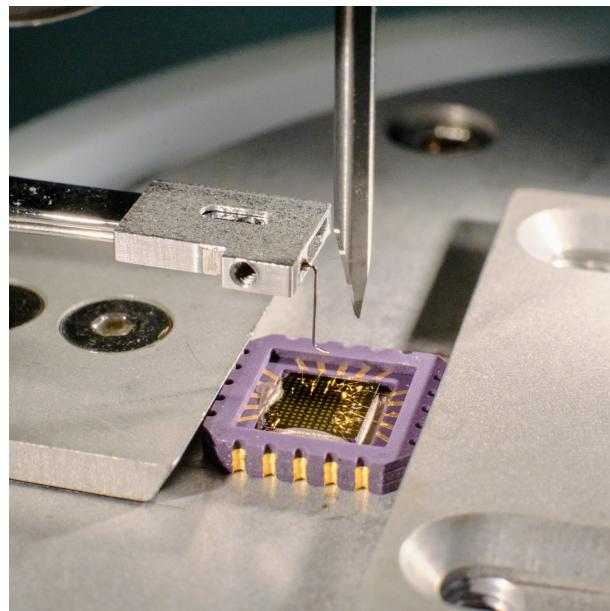


Figure 14: Federwaage des Pulltesters.

Einen geeigneten Haken zu finden, der fein genug ist, um ohne Schwierigkeiten unter den Loop eines Bonds passt, stellte sich als schwierig heraus. Die beste Lösung die wir gefunden haben, ist die Verwendung einer feinen Messspitze. Diese habe ich vorsichtig zurechtgebogen, um einen Haken zu formen (siehe Abbildung 15).

```
knitr:::include_graphics(  
  here::here("static/img/pulltest/pt-tip.jpg"))  
)
```



Figure 15: Haken des Pulltesters: Eine vorsichtig vergebogene Messspitze.

8. Optimierung der Haltekraft

```
library(tidyverse)

load(here:::here("data/pulltest/pt_bbd.rda"))
load(here:::here("data/pulltest/pt_bbd_regression.rda"))
load(here:::here("data/pulltest/pt_bbd_plots.rda"))
```

Es soll die maximale Haltekraft eines Bonds durch Pull-Tests und Methoden der statistischen Versuchsplanung optimiert werden.

8.1. Versuchsplanung

Da nach optimale Parameterwerte gesucht werden, ist ein vollständiger Versuchsplan mit zwei Leveln pro Faktor nicht mehr ausreichend. Um mittels eines quadratischen Modells optimale Parameterw-

erte zu finden, werden mindestens drei Level pro Faktor benötigt. Der Arbeitsaufwand kann dabei durch ein *Central Composite Design* (CCD) bzw. ein *Box-Behnken-Design* (BBD) minimiert werden.

Ich habe mich hier für ein BBD entschieden, da dieses keine extreme Levelkombinationen (alles hoch/alles niedrig) vermeidet. Diese Levelkombinationen sind weniger interessant, da bekannt ist, dass diese nur selten zu brauchbaren Bonds führen. Zudem wird dass Bondtool geschont, da keine exzessiven Parameterwerte am Bonder verwendet werden müssen.

Die Parameter von Interesse sind:

- Ultraschallleistung
- Bondzeit
- Bondkraft
- Schichtdicke: Gold
- Schichtdicke: Chrom
- Temperatur des Probenhalters

8.2. Durchführung

Es wurden 9x2 Proben flächendeckend mit Cr/Au bedampft und auf Chipträger geklebt. Die Chips wurden anschließend anhand des Versuchsplans mit Bonds versehen, deren Qualität durch einen destruktiven Pull-Test getestet wurden.

8.3. Auswertung

Abbildung 16 zeigt die gemessene maximale Zugkraft gegen die Versuchsreihenfolge aufgetragen. Die horizontalen Linien signalisieren den Mittelwert der Messungen mit einer Einstellung des Bondtools. Dies zeigt, dass das Justieren des Bondtools einen großen Einfluss auf die Qualität der Bonds hatte. Besonders nach der ersten Justierung kam es zu einem starken Abfall der mittleren Haltekraft.

```
plot_bbd_runorder
```

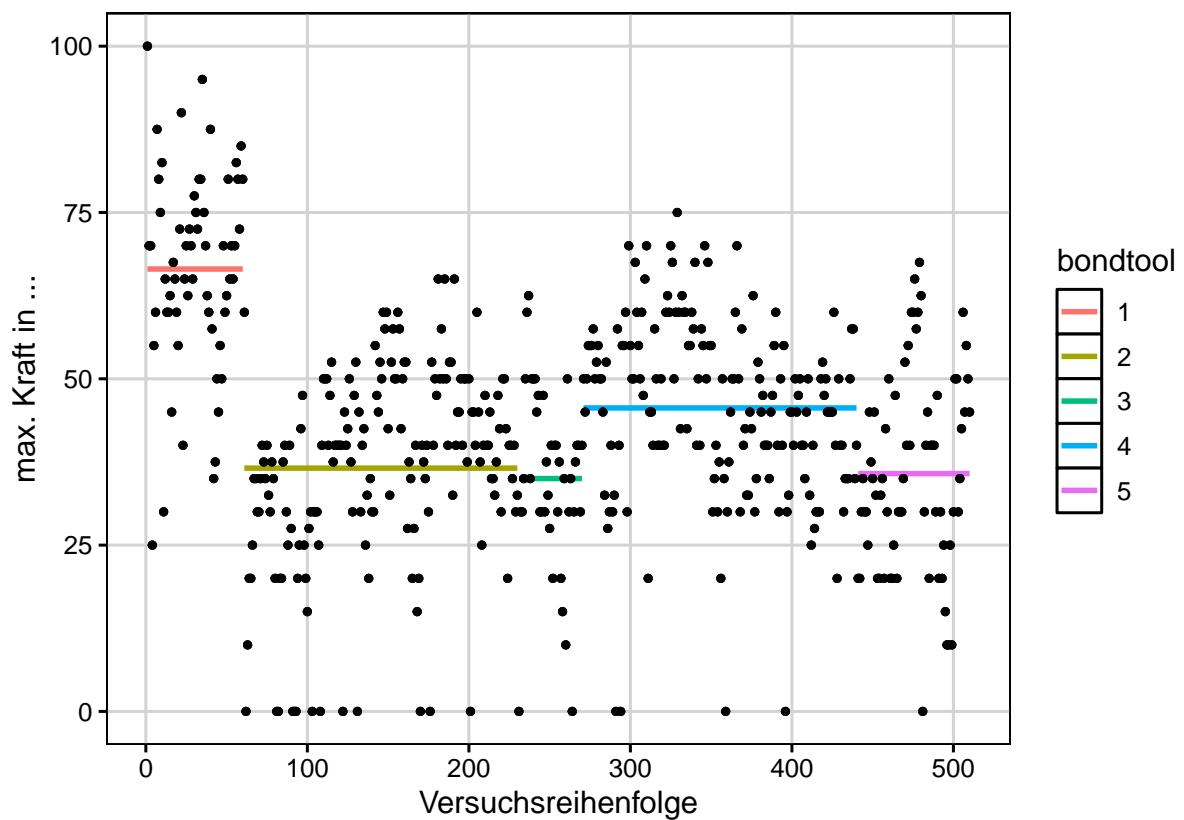
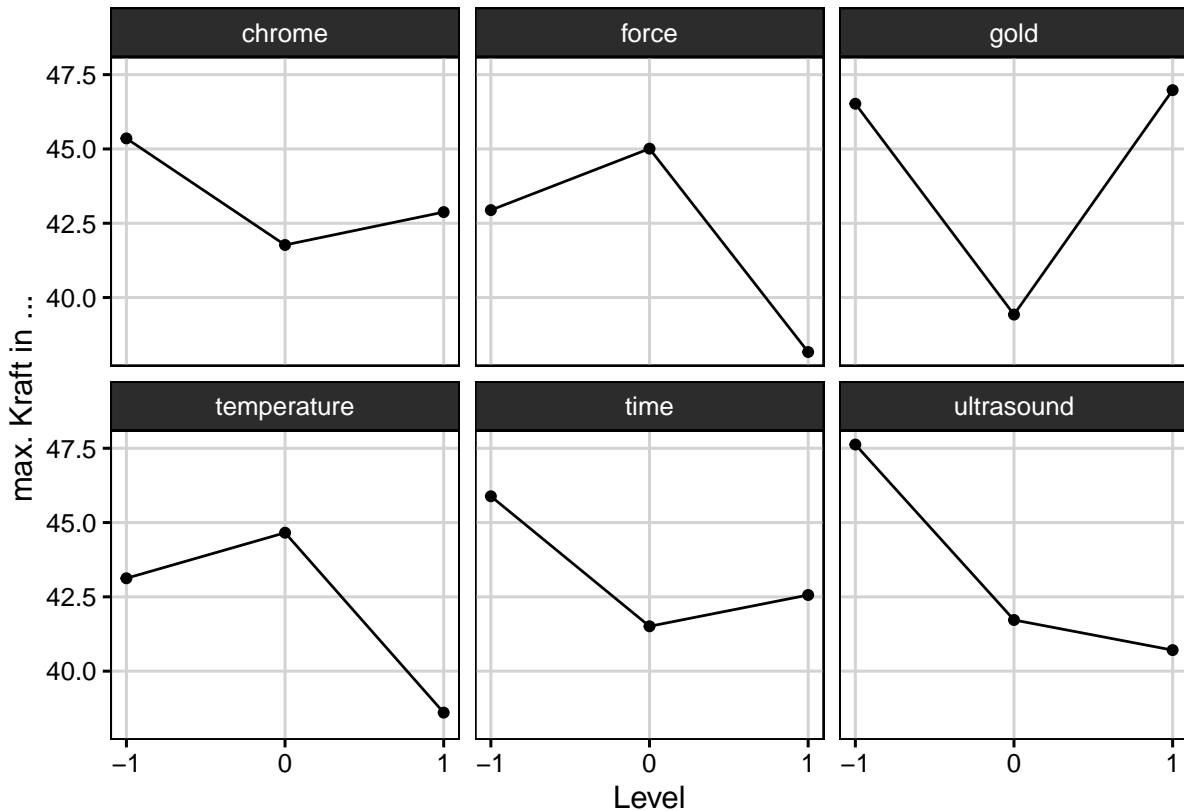


Figure 16: Plot der Versuchsreihenfolge. Im Idealfall sollte kein Muster zu erkennen sein, allerdings hat eine Justierung des Bondtools eindeutig einen Einfluss auf die Qualität der Bonds.

```
plot_bbd_effect
```



8.3.1. Regression

```
model_bbd |>
  glance() |>
  knitr::kable()
```

r.squared	adj.r.squared	sigma	statistic	p.value	df	logLik	AIC	BIC	deviance
0.4841147	-0.1724666	14.38831	0.7373263	0.7787796	28	-186.9131	433.8262	491.781	4554.518

```
model_bbd |>
  tidy() |>
  drop_na() |>
  knitr::kable()
```

term	estimate	std.error	statistic	p.value
(Intercept)	284.6922482	208.4356867	1.3658518	0.1857874
run.order	-0.1682052	0.1917759	-0.8770924	0.3899141
ultrasound	0.4653871	0.8695193	0.5352234	0.5978646
time	-1.0539409	1.0649803	-0.9896342	0.3331133
force	-0.2723444	0.9361758	-0.2909116	0.7738438
temperature	-0.3382991	0.8138080	-0.4156990	0.6816571
chrome	-15.4049038	9.2596635	-1.6636570	0.1103623
gold	-2.0711556	1.3016319	-1.5911992	0.1258329
I.ultrasound^2	-0.0003382	0.0020164	-0.1677157	0.8683391
I.time^2	0.0009773	0.0021395	0.4568122	0.6522845
I.force^2	-0.0004797	0.0019429	-0.2469206	0.8072593
I.temperature^2	-0.0000505	0.0020149	-0.0250719	0.9802236
I.chrome^2	0.2466827	0.3113169	0.7923846	0.4365982
I.gold^2	0.0107551	0.0055079	1.9526785	0.0636965
ultrasound:time	-0.0011470	0.0020713	-0.5537614	0.5853271
ultrasound:force	-0.0007290	0.0020887	-0.3490110	0.7303993
ultrasound:temperature	0.0002644	0.0022572	0.1171244	0.9078242
ultrasound:chrome	0.0038486	0.0264323	0.1456004	0.8855627
ultrasound:gold	-0.0011695	0.0025573	-0.4573343	0.6519150
time:force	0.0018413	0.0020564	0.8953695	0.3802819
time:temperature	-0.0005225	0.0019816	-0.2636628	0.7944937
time:chrome	0.0446069	0.0182235	2.4477611	0.0228182
time:gold	0.0032088	0.0034922	0.9188549	0.3681366
force:temperature	0.0008188	0.0014586	0.5613684	0.5802204
force:chrome	0.0168857	0.0259521	0.6506498	0.5220105
force:gold	0.0000000	0.0033078	0.0000142	0.9999888
temperature:chrome	0.0055941	0.0255715	0.2187619	0.8288522
temperature:gold	0.0024249	0.0034635	0.7001360	0.4911806
chrome:gold	-0.0188015	0.0426192	-0.4411523	0.6634078

9. Fazit

Der Effekt der Bondparameter und Schichtdicken der Bondpads ist im gemessenen Bereich klein, im Vergleich zum Einfluss des Bondtools. So haben Änderungen am Bondtool zu einer starken Verfälschung der Ergebnisse geführt.

Es wäre sinnvoll, ein RSM-Experiment mit einem neuen, unbenutzten Bondtool zu wiederholen. So könnte der Einfluss der Bondparameter besser untersucht werden. Um den Versuchsaufwand zu reduzieren, könnte hierbei eine feste Temperatur von 100 °C verwendet werden.