

# Lebensdauer von Organischen Feldeffekttransistoren



## Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Naturwissenschaften

(Dr. rer. nat.)

eingereicht im Fachbereich C - Mathematik und Naturwissenschaften der  
Bergischen Universität Wuppertal

von

**Tobias Lau**

aus

Leinfelden-Echterdingen

Leinfelden-Echterdingen, Juni 2013

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20140106-103028-6

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20140106-103028-6>]

Diese Arbeit entstand im Zeitraum vom 01.03.2009 bis zum 29.02.2012 im Rahmen des Doktorandenprogramms der Robert Bosch GmbH bei der zentralen Forschungs- und Vorausentwicklung am Standort Waiblingen und am Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie des Fachbereichs C - Mathematik und Naturwissenschaften der Bergischen Universität Wuppertal unter Anleitung von Prof. Dr. Ullrich Scherf (Universität Wuppertal) und Dr. Metin Koyuncu (Robert Bosch GmbH).

1. Gutachter: Prof. Dr. Ullrich Scherf

2. Gutachter: Prof. Dr. Thomas Riedl

Eingereicht am 23.07.2013

Tag der mündlichen Prüfung: 15.10.2013



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>1</b>
<b>1. Einleitung und Motivation</b>	<b>9</b>
<b>2. Messplatz zur automatisierten elektrischen Charakterisierung</b>	<b>11</b>
2.1. Hardware des Messplatzes . . . . .	12
2.2. Software zur Steuerung des Messplatzes . . . . .	15
<b>3. Auswertung der Messdaten</b>	<b>21</b>
3.1. Extraktion der Mobilität . . . . .	25
3.2. Algorithmus zur Geradenanpassung . . . . .	31
3.3. Extraktion der Schwellspannung . . . . .	33
3.4. Ermittlung der verbleibenden OFET-Parameter . . . . .	37
3.5. Datenverwaltung in Matlab . . . . .	39
<b>4. Materialien und Probenpräparation</b>	<b>43</b>
4.1. Substrat . . . . .	46
4.2. Source- und Drain-Elektroden . . . . .	46
4.3. Self-Assembled Monolayer . . . . .	47
4.4. Halbleiter . . . . .	47
4.5. Dielektrikum . . . . .	48
4.6. Gate . . . . .	48
4.7. Probenherstellung . . . . .	49
<b>5. Versuchsplanung und elektrische Charakterisierung</b>	<b>51</b>
5.1. Lagerung der Proben . . . . .	51
5.2. Elektrische Charakterisierung . . . . .	56
5.3. Elektrische Defektkriterien . . . . .	61

<b>6. Nullzustand der elektrischen Eigenschaften</b>	<b>63</b>
6.1. Kennlinien im Nullzustand . . . . .	63
6.2. On-Strom . . . . .	66
6.3. Mobilität . . . . .	71
6.4. Off-Strom . . . . .	80
6.5. On/Off-Verhältnis . . . . .	85
6.6. Schwellspannung . . . . .	87
6.7. Gate-Leckströme . . . . .	95
<b>7. Elektrische Eigenschaften während der Alterung</b>	<b>99</b>
7.1. Alterung der elektrischen Parameter . . . . .	99
7.1.1. Alterung des On-Stroms . . . . .	100
7.1.2. Alterung der Mobilität . . . . .	102
7.1.3. Alterung des Off-Stroms . . . . .	106
7.1.4. Alterung des On/Off-Verhältnisses . . . . .	108
7.1.5. Alterung der Schwellspannung . . . . .	110
7.1.6. Alterung des Gate-Leckstroms . . . . .	114
7.2. Detaillierte Diskussion der Alterungsmechanismen . . . . .	117
7.2.1. Lagerung im Ofen . . . . .	117
7.2.2. Lagerung in der Klimakammer . . . . .	132
7.2.3. Umgebungslagerung ( <i>Shelf-Life</i> ) . . . . .	137
7.2.4. Referenz: Exsikkator mit Trockenmittel . . . . .	144
7.2.5. Referenz: Exsikkator mit Argon Atmosphäre . . . . .	147
<b>8. FT-IR Analyse und Korrelation mit den elektrischen Eigenschaften</b>	<b>151</b>
8.1. Diskussion der FT-IR Spektren . . . . .	152
8.2. Korrelation zwischen FT-IR Spektren und elektrischen Messungen . . . . .	157
<b>9. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>161</b>
9.1. Nullzustand . . . . .	161
9.2. Alterung . . . . .	163
9.3. Ausblick . . . . .	165
<b>A. Publikationsliste</b>	<b>173</b>
<b>B. Danksagung</b>	<b>175</b>





---

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Foto des Messaufbaus zur automatisierten OFET Charakterisierung. Das Inset zeigt eine Detailaufnahme der Federkontaktstifte im verwendeten Messadapter.	12
2.2. Schematische Darstellung des für die OFET Kontaktierung benutzten Messadapters. Der CAD Entwurf stammt von Feinmetall. . . . .	13
2.3. Schematische Darstellung der Verkabelung des Messplatzes. Hierbei sind die Innenleiter der BNC Kabel in rot und die Außenleiter in schwarz dargestellt. HI steht für den positiven, LO für den negativen Ausgang der Spannungsquelle, G für den Guard Anschluss, welcher auf das selbe Potential wie HI gelegt wird. Der Mantel der BNC Kabel wird an den Guard angeschlossen, damit die Messungen nicht durch Leckströme über das Dielektrikum des BNC Kabels beeinflusst werden. . . . .	14
2.4. Darstellung des Konzeptes der zur Ansteuerung des Messplatzes erstellten Software. . . . .	16
3.1. Zwei verschiedene Auswertungsmethoden zur Ermittlung der Mobilität aus den Transferkennlinien. Teil (a) zeigt die gemessenen Transferkennlinien im linearen- (blau) und Sättigungsbereich (rot) in logarithmischer Auftragung. Teil (b) zeigt die nach Gleichung (3.8) und (3.11) punktweise aus den Kennlinien ermittelte Mobilität $\mu$ des OFETs. Als Plateaus sind die aus der Geradenanpassung in Teil (c) ermittelten mittleren Mobilitätswerte aufgetragen. Die Messung von „Aus“ nach „An“ wird als „hin“-Messung bezeichnet und mit einer durchgezogenen Linie dargestellt, die Messung von „An“ nach „Aus“ als „rück“-Messung bezeichnet und gestrichelt dargestellt. . . . .	26
3.2. Auswertung der Transferkennlinie eines OFETs mit einer anderen Materialkombination aus Dielektrikum und Halbleiter. Die Geometrie ist gleich zum OFET in Abbildung (3.1). . . . .	30

3.3. Anschauliche Darstellung der Funktionsweise des zur Geradenanpassung benutzten Algorithmus. . . . .	32
3.4. Darstellungen der Transferkennlinien eines OFETs mit sehr hohem <i>Bulk</i> -Strom. <i>I<sub>Bulk</sub></i> ist vor allem für die Kennlinie in Sättigung sehr hoch, da hier <i>V<sub>DS</sub></i> wesentlich höher ist als im linearen Bereich. . . . .	36
3.5. Anschauliche Darstellung der Ermittlung der OFET-Parameter <i>I<sub>On</sub></i> bzw. <i>I<sub>Max</sub></i> , <i>I<sub>Off</sub></i> und <i>I<sub>G,Max</sub></i> . Diese Parameter lassen direkt aus den gemessenen Kennlinien ablesen. . . . .	38
3.6. Strukturierung der Verwaltung der Messdaten und Metadaten für die OFETs auf einer Probe. . . . .	40
3.7. Zusammenhang zwischen Chargen und Proben mit ihren jeweiligen Indizes. Die weitere Indizierung der einzelnen Proben erfolgt dann wie in Abbildung (3.6) dargestellt. . . . .	41
4.1. Schematischer Schnitt durch einen OFET im verwendeten Layout. . . . .	44
4.2. Draufsicht auf eine vollständig prozessierte Probe. Die Kantenlänge beträgt 30 x 38 <i>mm</i> <sup>2</sup> (H x B) auf einer 125 <i>µm</i> dicken PEN Folie. . . . .	45
4.3. Prozessierung der Gate-Schicht (von links nach rechts): Die Probe wird über ein Haltevakuum fixiert, die Gate-Maske aufgesetzt und unter dem Mikroskop an entsprechenden Passermarken ausgerichtet. Danach wird die Position der Maske über einen Halterahmen fixiert und der gesamte Block aus Probenhalter, Probe, Maske und Halterahmen in die Sputterkammer gelegt. Nach dem Sputtern wird die Maske entfernt und die gewünschte Gate Struktur bleibt auf der Probe zurück. . . . .	49
5.1. Schematische Darstellung der Alterungsversuche, geordnet nach den beiden Alterungsfaktoren Atmosphäre und Temperatur. Die Farbgebung der verschiedenen Lagerungen beschreibt die im Vorfeld vermutete Schwere der auf den OFET einwirkenden Belastungen. . . . .	53
5.2. Darstellung der verschiedenen OFET-Geometrien auf einer Probe wie in Abbildung (4.2) dargestellt. Oben: Kammstrukturen, unten: runde Geometrien. . . . .	54
5.3. Einfluss von verschiedenen <i>Delays</i> auf die Messung einer Transferkennlinie. Die jeweils verwendeten <i>Delays</i> sind im Detail in der unteren Tabelle dargestellt. . . . .	57
6.1. Vergleich der Transfer- und Ausgangskennlinien von drei unterschiedlichen Geometrien im Nullzustand nach der Prozessierung. Messung von „Off“ nach „On“ als durchgezogene und Messung von „On“ nach „Off“ als gestrichelte Linie. . . . .	65

6.2. Auftragung des On-Stroms der Transferkennlinien im linearen- ( $V_{DS} = -5V$ ) und Sättigungsbereich ( $V_{DS} = -40V$ ) gegen das $\frac{W}{L}$ Verhältnis der verschiedenen OFET-Geometrien. . . . .	68
6.3. Darstellung des mit $\frac{W}{L}$ normierten On-Stroms, aufgetragen gegen $\frac{W}{L}$ . . . . .	68
6.4. Auftragung des On-Stroms im Nullzustand als Histogramm, berechnet aus der Transferkennlinie bei $V_{DS} = -40V$ . Beispielhaft aufgetragen für drei verschiedene Geometrien. . . . .	69
6.5. Auftragung des mit $\frac{W}{L}$ normierten On-Stroms der Transferkennlinie bei $V_{DS} = -40V$ gegen die laufende Probennummer in der Reihenfolge der Herstellung. Aufgetragen sind die gleichen drei Geometrien aus Abbildung(6.4) . . . . .	70
6.6. Mobilität der untersuchten OFETs im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich aufgetragen gegen das $\frac{W}{L}$ -Verhältnis der entsprechenden OFET-Geometrien. Die horizontalen Hilfslinien markieren den Mobilitätsbereich, in dem sich die OFET-Geometrien mit $\frac{W}{L}$ größer 100 bewegen. . . . .	72
6.7. Korrelation zwischen dem mit $\frac{W}{L}$ normierten On-Strom und der Mobilität des jeweiligen OFETs. Aufgetragen sind die Werte für $\frac{I_{on}}{W/L}$ und $\mu$ im linearen-, sowie im Sättigungsbereich. . . . .	73
6.8. (a) Abbildung eines OFETs in Kamm-Geometrie. Für diese Geometrie ist $L = 100\mu m$ und $W = 2 * 1 mm = 2 mm$ . (b) Darstellung der Kanalströme in Grün und zusätzlicher Streuströme in Rot für die Geometrie mit $W = 0,5 mm$ und $L = 100\mu m$ , dem kleinsten $\frac{W}{L}$ -Verhältnis in dem benutzten Layout. . . . .	75
6.9. Vergleich der Mobilität im Sättigungsbereich über alle Geometrien. Orange: In dieser Arbeit gemessene Verteilung. Inset: In [1] publizierte Ergebnisse. Die roten Hilfslinien dienen zur Abschätzung der Halbwertsbreiten der Verteilungen. . . . .	77
6.10. Mobilität im (a) linearen und (b) Sättigungsbereich aufgetragen gegen die laufende Probennummer. . . . .	79
6.11. Probe zu Probe Variation der in [1] vorgestellten Ergebnisse. . . . .	79
6.12. Off-Ströme der verschiedenen Geometrien im (a) linearen und (b) Sättigungsbereich. . . . .	81
6.13. Off-Strom aufgetragen für zwei Extremfälle: (a) Runde OFET-Geometrie mit $W = 17,749 mm$ und $L = 100\mu m$ und (c) Kamm-Geometrie mit $W = 10 mm$ und $L = 5\mu m$ . (b) zeigt die Ausgangskennlinien beider OFETs bei $V_G = 0V$ , also gerade den parallelen Widerstand des bulk Halbleiters. Das Ersatzschaltbild für dieses Modell ist aus [2] entnommen und in (d) dargestellt. . . . .	83
6.14. Off-Strom von drei ausgewählten Geometrien aufgetragen gegen die laufende Probennummer. (a) linearer- und (b) Sättigungsbereich. . . . .	85

6.15. On/Off-Verhältnis für die Transferkennlinien im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich, aufgetragen gegen das $\frac{W}{L}$ -Verhältnis der verschiedenen OFET-Geometrien. . . . .	86
6.16. Schwellspannung der verschiedenen OFET-Geometrien im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich, aufgetragen gegen $\frac{W}{L}$ . . . . .	89
6.17. Extrembeispiel für den Drift von $V_{Th}$ in Richtung positiver Spannungen bei der Transferkennlinie im linearen Bereich (blau). . . . .	90
6.18. Korrelation zwischen Schwellspannung im linearen Bereich und $\frac{I_G}{I_{On}}$ . . . . .	91
6.19. Darstellung des Fits zur Berechnung der Schwellspannung im Sättigungsbereich. Ausgewählt ist ein OFET mit stark ins Negative verschobener Schwellspannung. Das Inset oben rechts zeigt den <i>Bulk</i> -Strom durch den Halbleiter, ohne angelegte Gate-Spannung. Interpretiert wird der Bulk Strom nach dem Ersatzschaltbild unten links, entnommen aus [2]. . . . .	93
6.20. Korrelation zwischen der Schwellspannung im Sättigungsbereich und dem Kehrwert des On/Off-Verhältnisses. Für einen steigenden Off-Strom im Verhältnis zum On-Strom ist ein Drift der Schwellspannung in den negativen Bereich zu erkennen. . . . .	94
6.21. Schematische Darstellung des OFET Layouts und der Leckströme über das Gate. . . . .	95
6.22. Gate-Leckströme $I_G$ aufgetragen gegen das $\frac{W}{L}$ -Verhältnis der verschiedenen OFET-Geometrien. (a) linearer Bereich bei $V_{DS} = -5V$ , (b) Sättigungsbereich bei $V_{DS} = -40V$ . . . . .	97
6.23. Histogramm der zur Basis 10 logarithmierten maximalen Gate-Leckströme für die Transferkennlinie im linearen Bereich. Das Inset zeigt im Detail die Verteilung der Leckströme oberhalb des Peaks bei $10^{-9}A$ . . . . .	98
7.1. Alterung des On-Stroms im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich für die verschiedenen Lagerungsbedingungen. . . . .	101
7.2. Alterung der Mobilität im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich für die verschiedenen Lagerungsbedingungen. . . . .	103
7.3. Korrelation zwischen On-Strom $I_{On}$ und Mobilität $\mu$ , über den gesamten Alterungsprozess, für den (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich. . . . .	104
7.4. Korrelation zwischen On-Strom $I_{On}$ und Mobilität $\mu$ für den (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich. Abgebildet ist die Lagerung bei $85^\circ C$ , farblich aufgeschlüsselt nach Lagerungsdauern. Die eingezeichneten Linien sind Hilfslinien zur Besseren Sichtbarkeit von Abweichungen vom linearen Zusammenhang. . . . .	105
7.5. Alterung des Off-Stroms im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich für die verschiedenen Lagerungsbedingungen. . . . .	107

7.6. Alterung des On/Off-Verhältnisses im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich für die verschiedenen Lagerungsbedingungen. . . . .	109
7.7. Alterung der Schwellspannung im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich für die verschiedenen Lagerungsbedingungen. . . . .	111
7.8. Korrelation zwischen $V_{Th}$ und $I_{Off}$ für den (a) linearen und (b) Sättigungsbereich der OFETs während der <i>Shelf-Life</i> Lagerung. Die verschiedenen Farben veranschaulichen die Messpunkte bei unterschiedlichen Lagerdauern. . . . .	112
7.9. Differenz der Schwellspannung zwischen Hin- und Rückmessung, aufgetragen gegen die Lagerdauer für die verschiedenen Lagerungsbedingungen. Teil (a) zeigt den linearen, Teil (b) den Sättigungsbereich. . . . .	113
7.10. Alterung des Gate-Leckstroms für den (a) linearen und (b) Sättigungsbereich, aufgeteilt nach den verschiedenen Lagerungsbedingungen. . . . .	116
7.11. Mobilitätskennlinien von (a) einem bezüglich der Schwellspannung besonders stark und (b) einem besonders wenig gealterten OFET. Die Pfeile zeigen die Drift der Schwellspannung in den negativen Bereich und die kleiner werdende Mobilität. . . . .	119
7.12. Direkter Vergleich der Transferkennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.11) mit dem besonders stark gealterten OFET in orange und rot und dem besonders schwach gealterten OFET in blau und magenta. Teil (a) zeigt den Vergleich im linearen-, Teil (b) im Sättigungsbereich. Der Einfluss des Off-Stroms zeigt sich in dieser Darstellung nur im Sättigungsbereich (b) mit einem Maximum bei 528 h, entsprechend des in Abbildung (7.5) dargestellten Verhaltens. . . . .	121
7.13. Ausgangskennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.11) für $V_G = -20V$ . Der besonders stark gealterte OFET ist in orange und rot, der besonders schwach gealterte in blau und magenta dargestellt. Die Hilfslinien dienen zur Bestimmung der Kanalabschnürung bei den jeweiligen Alterungsschritten. . . . .	122
7.14. Teststrukturen zur Herstellung eines Gold/Dielektrikum/Gold Systems auf dem verwendeten Probenlayout. . . . .	125
7.15. Übersicht über die Änderung des Off-Stroms nach der Lagerung von 2 Proben bei $85^\circ C$ unter Argon Atmosphäre. Die Messpunkte im Nullzustand sind als Hexagramme, die Messpunkte nach der Lagerung als Rauten dargestellt. Die gestrichelte Hilfslinie soll die Absenkung des Off-Stroms nach der Lagerung verdeutlichen. . . . .	127
7.16. Entwicklung der Transferkennlinie bei $V_G = -40V$ für die abwechselnde Lagerung in Argon- bzw. Raumluft bei $85^\circ C$ . Die Änderung des Off-Stroms über mehr als eine Größenordnung wird für positive Gate-Spannungen deutlich. . . . .	128
7.17. Zusammenhang zwischen Schwellspannung und Off-Strom für die Lagerung bei $85^\circ C$ , aufgetragen gegen die Lagerdauer. . . . .	130

7.18. Schematische Darstellung einer Raumladungszone (RLZ), gebildet durch eine feste Ladung  $G_{Fest}$  an der Grenzfläche zwischen Dielektrikum (DL) und Halbleiter (HL), welche durch ortsfeste Elektronen im Halbleitervolumen kompensiert wird. . . . . 131

7.19. Mobilitätskennlinien von (a) einem besonders stark bezüglich der Schwellspannung und (b) einem besonders wenig gealterten OFET für die Lagerung in der Klimakammer. . . . . 133

7.20. Direkter Vergleich der Transferkennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.19) mit dem besonders stark gealterten OFET in orange und rot und dem besonders schwach gealterten OFET in blau und magenta. Teil (a) zeigt den Vergleich im linearen-, Teil (b) im Sättigungsbereich. . . . . 135

7.21. Ausgangskennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.19) für  $V_G = -20V$ . Der besonders stark gealterte OFET ist in orange und rot, der besonders schwach gealterte in blau und magenta dargestellt. . . . . 136

7.22. Mobilitätskennlinien von (a) einem in Bezug auf den Off-Strom besonders stark und (b) einem besonders wenig gealterten OFET aus der *Shelf-Life* Lagerung. . . . . 138

7.23. Direkter Vergleich der Transferkennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.22). Der besonders stark gealterte OFET ist in orange und rot, der besonders schwach gealterte in blau und magenta dargestellt. . . . . 139

7.24. Geradenanpassung zur Ermittlung von Mobilität und Schwellspannung am Ende der *Shelf-Life* Lagerung bei 3984 h. Teil (a) zeigt den besonders stark, Teil (b) den besonders wenig gealterten OFET aus Abbildung (7.22). . . . . 141

7.25. Mobilitätskennlinien von (a) einem besonders stark und (b) einem besonders wenig gealterten OFET, für den Sättigungsbereich korrigiert mit dem Off-Strom der jeweiligen Transferkennlinie. . . . . 143

7.26. Ausgangskennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.22) Der besonders stark gealterte OFET ist in orange und rot, der besonders schwach gealterte in blau und magenta dargestellt. . . . . 144

7.27. Mobilitätskennlinien von (a) einem besonders stark bezüglich des Off-Stroms und (b) einem besonders wenig gealtertem OFET für die Lagerung im Exsikkator mit Trockenmittel. . . . . 145

7.28. Ausgangskennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.27). Der besonders stark gealterte OFET ist in orange und rot, der besonders schwach gealterte in blau und magenta dargestellt. . . . . 146

7.29. Mobilitätskennlinien von (a) einem besonders stark bezüglich des Off-Stroms und (b) einem besonders wenig gealtertem OFET für die Lagerung im Exsikkator mit Argon Atmosphäre. . . . . 148

---

7.30. Ausgangskennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.29). Der besonders stark gealterte OFET ist in orange und rot, der besonders schwach gealterte in blau und magenta dargestellt. . . . .	149
8.1. Schematische Darstellung der FT-IR Messung auf dem Probenlayout, was auch für die elektrischen OFET Messungen verwendet wird. . . . .	152
8.2. FT-IR Spektren von (a) einzelnen Schichten aus Halbleiter und Dielektrikum im Vergleich mit einer OFET Referenz und einer im Ofen gelagerten OFET Probe, (b) einer in der Klimakammer gelagerten OFET Probe und (c) einer im Ofen gelagerten OFET Probe. . . . .	154
8.3. FT-IR Spektren der Halbleiterschicht für 4 Wochen in der Klimakammer, bzw. im Ofen gelagerte Proben im Vergleich zur nicht gealterten Referenzprobe. . . .	155
8.4. FT-IR Messungen des reinen Dielektrikums im Nullzustand und nach 960 h bei 85°C. . . . .	155
8.5. FT-IR Spektren von je einer Probe aus der <i>Shelf-Life</i> , bzw. Exsikkator Lagerung, aufgenommen nach dem Ende der in Kapitel (7.1) gezeigten Lagerdauer. . . .	156
8.6. Auswirkung von polaren Dielektrika auf die energetische Zustandsdichte in einem PTAA-Halbleiter. Darstellung entnommen aus [3]. . . . .	158
8.7. Schematische Darstellung zur Wirkung von polaren Carbonylgruppen in Dielektrikumsschicht auf die Halbleiterschicht. . . . .	159



## Einleitung und Motivation

Die organische Elektronik insgesamt ist ein sehr weit gefasstes Forschungsgebiet mit Themenfeldern aus den verschiedensten Lebensbereichen. Diese reichen von der Raumbeleuchtung und Bildschirmtechnik mittels organischen Leuchtdioden (OLEDs) über die organische Photovoltaik (OPV) hin zu organischen Feldeffekttransistoren (OFETs). Die Anwendungsmöglichkeiten für OFETs sind vielfältig und im Allgemeinen da zu finden, wo es um die günstige Herstellung von einfachen Schaltungen und/oder um die großflächige Herstellung von Schaltungen geht. Dies ist begründet durch die Druckbarkeit der benötigten OFET Materialien mittels bekannter Massendruckverfahren [4]. Die Zukunftsvision ist hier die Verwendung von Rolle-zu-Rolle Verfahren wie Gravurdruck oder Offsetdruck, welche eine Produktion im Maßstab mehrerer Quadratmeter Schaltungsfläche pro Minute ermöglichen würde [5], [4], [6], [1].

Ein genereller Nachteil der organischen Elektronik ist ihre Empfindlichkeit gegen Sauerstoff und Luftfeuchte aus der umgebenden Atmosphäre, welche häufig eine aufwändige Verkapselung notwendig macht. Dies steht wiederum im Falle der OFETs der Idee einer günstigen Massenware entgegen [7], [8], [9], [10]. Hier ist es also von Bedeutung, schon bei der Auswahl der Materialien auf eine möglichst gute Stabilität an Umgebungsatmosphäre zu achten und im Zuge der Produktentwicklung auch zu wissen, wie die OFETs altern werden und über welche Zeiträume die daraus hergestellten Schaltungen funktionsfähig bleiben. Aus dieser Problematik heraus erwächst die Motivation zu dieser Arbeit, deren Ziel es ist, ein besseres Verständnis für die Lebensdauer und die Alterungsmechanismen von organischen Transistoren unter atmosphärischen Belastungen zu entwickeln. Um zu belastbaren Ergebnissen zu kommen, wird in dieser Arbeit großer Wert auf eine ausreichend große Anzahl von getesteten OFETs gelegt, um Schlussfolgerungen mit entsprechend vielen ausgewerteten Messdaten hinterlegen zu können. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt daher nicht auf der Interpretation

von einzelnen OFET-Kennlinien, sondern auf der Betrachtung der Parameter einer großen Anzahl von OFETs und der Veränderung dieser Parameter über die Lebensdauer. Eine solche Vorgehensweise findet sich im Ansatz in [1], in einzelnen Kapiteln in [11] und [12] und wird hier für die Betrachtung des Alterungsverhaltens der OFETs weiterentwickelt.

Aufgrund der hohen Zahl notwendiger Messungen erfordert diese Ansatz zum Einen eine Automatisierung der Messung und zum Anderen eine strukturierte Verwaltung und Auswertung der Messdaten, welche jeweils in einem eigenen Kapitel beschrieben werden. Das daraus entwickelte Konzept ist prinzipiell unabhängig von den konkreten, betrachteten OFETs und wird deshalb in den ersten beiden Kapiteln allgemein vorgestellt. Der zweite Teil der Arbeit behandelt dann eine konkrete Messreihe zur Alterung von OFETs unter Anwendung der vorgestellten Methodik.

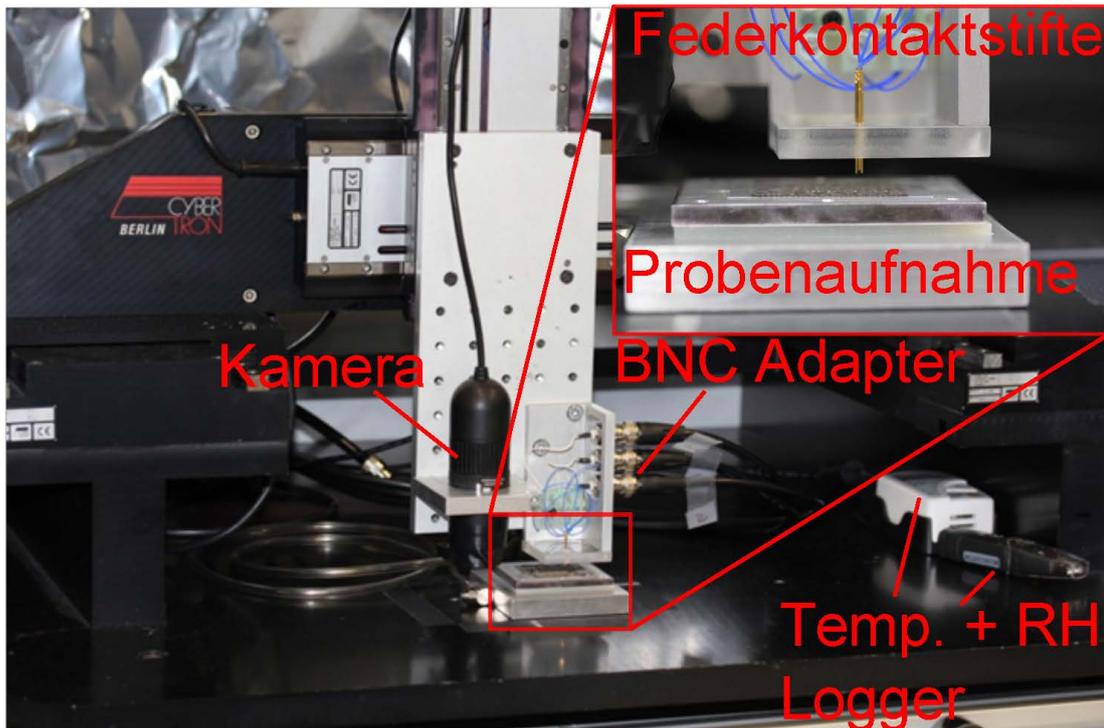
Diese Arbeit entstand im Rahmen des BMBF geförderten Projektes Polyto<sup>s</sup><sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Projektname: Polyto<sup>s</sup>, Fördernummer: 13N10204, Projektsteckbrief

# Messplatz zur automatisierten elektrischen Charakterisierung

Im Hinblick auf eine industrielle Prozessierung von organischer Elektronik und hier speziell von OFETs sind nicht nur die Parameter der einzelnen OFETs wichtig, sondern vor allem auch die Verteilung dieser Parameter über eine Vielzahl von prozessierten OFETs. Ausgehend von dieser Verteilung muss letztendlich die Auslegung von organischen Schaltungen erfolgen, so dass diese Schaltungen mit einer hinreichend großen Wahrscheinlichkeit funktionieren, auch wenn einzelne OFETs der Schaltung mit ihren Parametern am Rand der Verteilung liegen. Weiterhin muss man für eine Voraussage der Lebensdauer von organischen Schaltungen zunächst einmal wissen, wie sich die Parameter der beteiligten Bauelemente und deren Verteilung über die Alterung ändern. Aus dieser Anforderung heraus ergibt sich die Motivation, für diese Arbeit einen automatisierten Messplatz aufzubauen, der es ermöglicht, eine große Anzahl von OFETs in beherrschbaren Zeiträumen zu vermessen. Mit den Messkurven einer genügend großen Anzahl an gleichartigen OFETs lässt sich dann entsprechend eine umfassende Auswertung durchführen, um zu den geforderten Aussagen zu OFET-Parametern, deren Verteilung und des Verhaltens bei der Alterung zu kommen. Im Folgenden soll auf die Hardware des Messplatzes, die Software zur Ansteuerung und Messung und das Messprogramm zur Charakterisierung der einzelnen OFETs eingegangen werden: Abbildung (2.1) zeigt ein Foto des Messaufbaus und der zur Kontaktierung benutzten Federkontaktstifte.



*Abb. 2.1.: Foto des Messaufbaus zur automatisierten OFET Charakterisierung. Das Inset zeigt eine Detailaufnahme der Federkontaktstifte im verwendeten Messadapter.*

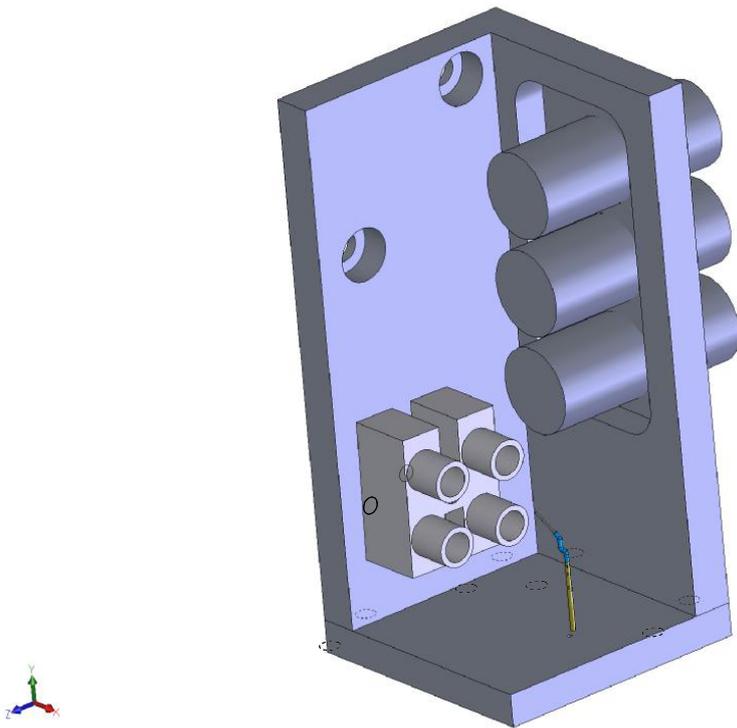
## 2.1. Hardware des Messplatzes

Das Prinzip des Messplatzes basiert darauf, mit Hilfe eines X-Y-Z-Portalsystems jeden OFET auf einer Probe nacheinander zu kontaktieren und zu vermessen. Dementsprechend ist die Kernkomponente des Messplatzes ein Portalsystem der Firma Cybertron<sup>1</sup>. Die Bewegung der Achsen erfolgt über Spindeln, auf denen die jeweils anderen Achsen beweglich aufgehängt sind. Die Kontrolle erfolgt über eine PCI Controllerkarte vom Steuerungs-PC aus.

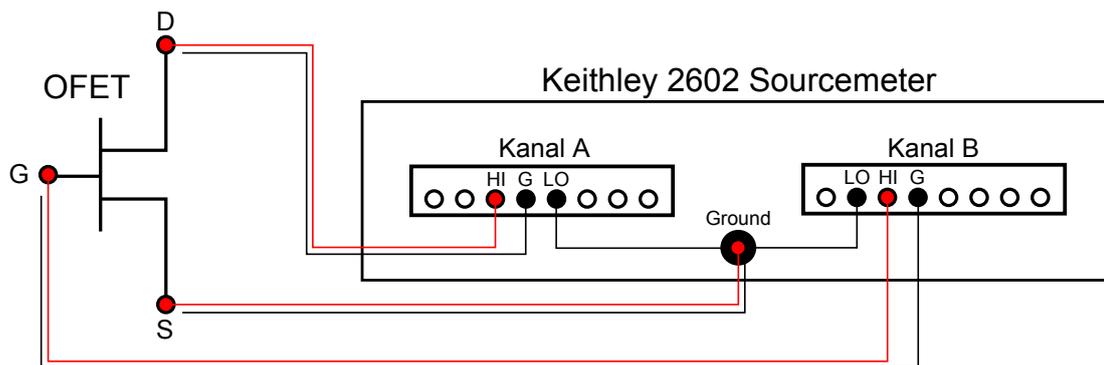
Das Portalsystem dient zur Positionierung des Messadapters über den verschiedenen OFETs einer Probe, bzw. über den Kontaktpads dieser OFETs. Dieser Messadapter wurde zusammen mit der Firma Feinmetall<sup>2</sup> konzipiert und verwendet Federkontaktstifte um die Kontaktpads eines OFETs zu kontaktieren und diese über BNC Kabel mit dem Messgerät zu verbinden. Abbildung (2.2) zeigt eine schematische Darstellung des Messadapters. Dabei muss die Anordnung der Federkontaktstifte in der unteren Platte der Anordnung der OFET-Kontaktpads auf dem Layout entsprechen, so dass durch das Anfahren von einer Position über dem OFET alle

<sup>1</sup>AJ Cybertron GmbH, Berlin, ein Tochterunternehmen von Analytik Jena

<sup>2</sup>Feinmetall GmbH, Herrenberg



**Abb. 2.2.:** Schematische Darstellung des für die OFET Kontaktierung benutzten Messadapters. Der CAD Entwurf stammt von Feinmetall.



**Abb. 2.3.:** Schematische Darstellung der Verkabelung des Messplatzes. Hierbei sind die Innenleiter der BNC Kabel in rot und die Außenleiter in schwarz dargestellt. HI Steht für den positiven, LO für den negativen Ausgang der Spannungsquelle, G für den Guard Anschluss, welcher auf das selbe Potential wie HI gelegt wird. Der Mantel der BNC Kabel wird an den Guard angeschlossen, damit die Messungen nicht durch Leckströme über das Dielektrikum des BNC Kabels beeinflusst werden.

3 Pads für Source, Drain und Gate gleichzeitig kontaktiert werden. Die untere Platte mit den Federkontaktstiften kann abgeschraubt und getauscht werden, so dass sich sehr einfach eine neue Anordnung von Federkontaktstiften für ein neues Probenlayout realisieren lässt. Neben den Federkontaktstiften ist eine Mikroskopkamera angebracht, welche die gerade eingebaute Probe zeigt und dazu dient, Strukturen auf der Probe zu finden. Die Federkontaktstifte sind über angelötete Kabel und eine Lüsterklemme mit den BNC Kabeln verbunden, die zum Messgerät führen. Bei diesem handelt es sich um ein Keithley 2602 Sourcemeter, welches auf 2 Kanälen jeweils Strom oder Spannung anlegen und beide Größen zurückmessen kann. Zur Messung der OFET-Kennlinien werden Spannungen an Drain und Gate angelegt und der Strom zwischen Source und Drain, sowie der Leckstrom zwischen Source und Gate gemessen. Die Anschlüsse des OFETs sind dabei so verschaltet, dass der Source Kontakt auf Erde liegt und die Spannungen an Drain und Gate in Bezug zur Erde angelegt werden. Abbildung (2.3) zeigt schematisch die verwendete Schaltung.

Das Zusammenspiel von Messgerät und Portalsystem wird von einem Steuerungsrechner mittels einer zu diesem Zweck in LabView 8.6 geschriebenen Software gesteuert. Auf die Funktionsweise der Software wird im folgenden Abschnitt genauer eingegangen. Um den Messplatz herum wurde außerdem eine abgedunkelte Plexiglas Box gebaut. Diese hat den Zweck, eine Messung im Dunkeln zu ermöglichen, so dass die OFET-Kennlinien nicht durch photoinduzierte Ladungsträger verfälscht werden. Als weitere Ergänzung misst ein Logger der

Firma Testo<sup>3</sup> vor dem Start der Kennlinienmessungen an jedem OFET die Luftfeuchte und Temperatur innerhalb des Messplatzes. Dadurch lässt sich im Nachhinein nachvollziehen, ob diese beiden Parameter einen Einfluss auf die Eigenschaften des OFETs haben.

## 2.2. Software zur Steuerung des Messplatzes

Bei der Entwicklung der Steuerungssoftware wurde ein modularer Ansatz verfolgt, der einerseits zu einer wartungsfreundlichen und erweiterbaren Software führen soll und der sich andererseits bereits aus den verschiedenen benutzten Geräten und den Möglichkeiten zu ihrer Ansteuerung ergibt. Diese lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- **Keithley 2602 Sourcemeter:** Keithley hat in der 2600er Serie seiner Sourcemeter einen eigenen, sogenannten Testscript Processor integriert. Dieser erlaubt es, Skripte auf dem Messgerät selbst auszuführen und dadurch die eigentliche Messung unabhängig von einem PC zur Steuerung zu machen. Keithley stellt dafür eine eigene Entwicklungsumgebung und Dokumentation bereit<sup>4</sup>, mit der sich diese Skripte programmieren und testen lassen. Mit dieser Methode lässt sich die eigentliche Messvorschrift mit allen ihren Details in einer Funktion im Messskript implementieren, die mit ihren entsprechenden Parametern aufgerufen wird und die Messung direkt vom Sourcemeter aus durchführt. Die Messdaten werden bei dieser Methode ebenfalls zunächst auf dem Sourcemeter zwischengespeichert und erst nach der Messung über den GPIB Bus übertragen. Dadurch lassen sich mögliche Timingprobleme durch den GPIB Bus von vorne herein ausschließen. Aus Sicht der Programmierung wird damit das Skript auf dem Messgerät zu einem eigenen Modul, welches über die Funktionen im Skript mit dem Rest des Programms kommuniziert. Dadurch ist die Implementation der eigentlichen Messung vom Rest des Programms gekapselt, was Änderung an den Details der Implementation erlaubt, ohne das gesamte Programm ändern zu müssen.
- **Galil Motion Controller:** Die Bewegung des Achssystems wird durch einen Motion Controller der Firma Galil<sup>5</sup> kontrolliert, welcher über eine eigene Assemblersprache programmiert wird. Galil stellt LabView VIs zur Verfügung, mit denen diese Assemblerbefehle zum Controller übertragen werden können. Für die weitere Abstrahierung der Assemblerbefehle ist jedoch der Benutzer zuständig, hier gibt es von Galil keine fertigen VIs oder Funktionen. Im Rahmen der Programmierung wurden daher in LabView Funktionen entwickelt, die die Steuerung des Achssystems auf einer höheren Abstraktionsebene ermöglichen. Dies bedeutet beispielsweise, dass die Funktion „X-Y-Position

---

<sup>3</sup>Testo AG, Lenzkirch

<sup>4</sup>Keithley Test Script Builder, Keithley.com

<sup>5</sup>Galil Motion Controllers, Rocklin, California

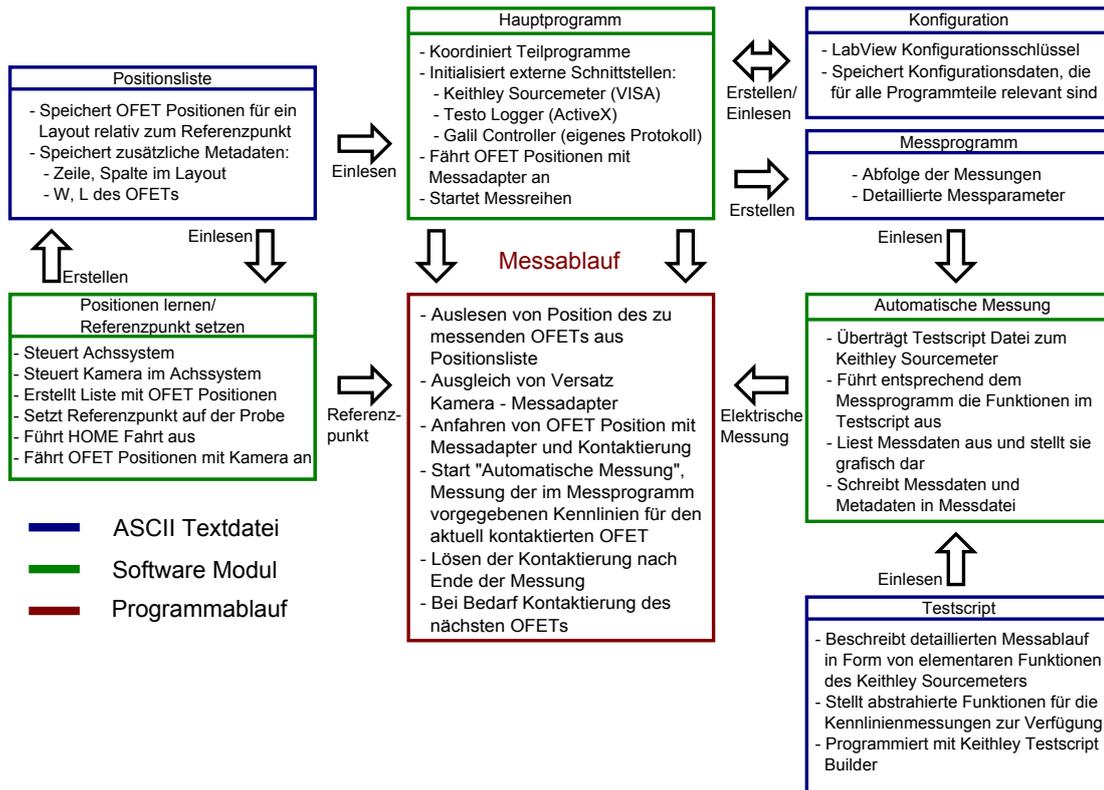


Abb. 2.4.: Darstellung des Konzeptes der zur Ansteuerung des Messplatzes erstellten Software.

Anfahren“ mit den Parametern X-Koordinate, Y-Koordinate, X-Geschwindigkeit und Y-Geschwindigkeit die entsprechende Position anfährt, indem sie die entsprechenden Assemblerbefehle ausführt. Durch diese Abstrahierung ist wiederum die Bewegungssteuerung für den Rest der Software von den Details der Assemblersprache gekapselt. Ein Wechsel des Motion Controllers erfordert also nur eine Änderung der Funktionen zur Abstraktion der Bewegung und nicht die Änderung des gesamten Programms.

- **Testo Luftfeuchte- und Temperatur-Logger:** Testo stellt für seine Logger LabView VIs zur Verfügung, mit denen LabView über ActiveX den Logger steuern und auslesen kann.

Zusammengefasst ergibt sich also das Problem, dass man von einem in LabView geschriebenen Steuerungsprogramm aus gleichzeitig das Keithley Sourcemeter in der Keithley Skriptsprache, den Galil Motion Controller in Galil Assemblersprache und den Testo Logger über ActiveX ansteuern muss. Dazu wird das Gesamte Programm in verschiedene Module aufgeteilt, welche von einem Hauptprogramm aus bedient und gesteuert werden. Das Konzept der für diese Arbeit entwickelten Software ist in Abbildung (2.4) dargestellt. Die Funktionen der verschiedenen Programmteile lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- **Positionen lernen/Referenzpunkt setzen** In diesem Programmteil ist die Ansteuerung des Achssystems und alle damit zusammenhängenden Funktionen zusammengefasst. Dies ist zunächst einmal die Steuerung des Achssystems von Hand mittels eines grafischen Steuerkreuzes. Dies dient dazu, von Hand Punkte auf der Probe anfahren zu können, welche von der Kamera im Messplatz aufgezeichnet und in der Software angezeigt werden. Zur besseren Orientierung ist dem Kamerabild ein Fadenkreuz überlagert, dessen Mittelpunkt als Referenz zur Positionsbestimmung dient. Damit lässt sich ein Referenzpunkt auf der Probe bestimmen, indem das Fadenkreuz auf diesen Referenzpunkt gefahren wird und diese Position als Referenz übernommen wird. Alle weiteren Positionen auf der Probe werden danach relativ zu diesem Referenzpunkt gespeichert, so dass diese Punkte auf jeder weiteren Probe angefahren werden können, sobald auch dort der Referenzpunkt gesetzt wurde. Die dritte Funktion dieses Programmteils ist das Einlernen von Positionen auf der Probe, die dann mit dem Messadapter angefahren und kontaktiert werden sollen. Dies funktioniert sequentiell, indem mit dem Fadenkreuz jeder zu kontaktierende Punkt angefahren und die Position in der Positionsliste gespeichert wird. Zusätzlich werden die Geometrischen Eigenschaften  $W$  und  $L$  des zu kontaktierenden OFETs, sowie seine Position im Layout in Form der Zeile und Spalte mit in der Positionsliste gespeichert. Dies hat den Sinn, dass bei der späteren Messung diese Eigenschaften automatisch mit in der Messdatei gespeichert werden können.
- **Messprogramm:** Ein Messprogramm bezeichnet in diesem Zusammenhang eine Abfolge von beliebig gewählten Messungen am aktuell kontaktierten OFET. Im Rahmen dieser Arbeit stehen 3 Möglichkeiten zur Auswahl:
  - **Transferkennlinie:** Die  $V_{DS}$  Spannung wird auf einem konstanten Wert gehalten und  $V_G$  durchgefahren.
  - **Ausgangskennlinie:** Die  $V_G$  Spannung wird auf einem konstanten Wert gehalten und  $V_{DS}$  durchgefahren.
  - **Relax:**  $V_{DS}$  und  $V_G$  werden beide auf 0 V gesetzt und die Ströme an Drain und Gate gemessen. Dies dient dazu, transiente Ströme zu beobachten, die auf einer Zeitskala von Sekunden aus dem OFET abfließen. Diese Ströme könnten zum Beispiel aus sich entleerenden Ladungsträgerfallen stammen.

Diese Messungen lassen sich in beliebiger Reihenfolge hintereinander mit verschiedenen Parametern durchführen. Das Messprogramm wird einmal erstellt, als Textdatei gespeichert und kann dann immer wieder geladen und mit Kooperationspartnern ausgetauscht werden. Die Parameter für die verschiedenen Messungen orientieren sich am IEEE Standard 1620 zur Messung von organischen Transistoren [13] und lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- $V_{Konst}$ : Die konstante Spannung, die bei der Messung einer Kennlinie anliegt. Dies ist bei der Transferkennlinie  $V_{DS}$  und bei der Ausgangskennlinie  $V_G$ .
- $V_{Start}$ : Startpunkt für die Spannung, die bei der Messung einer Kennlinie durchgefahen wird. Dies ist entsprechend bei der Transferkennlinie  $V_G$  und bei der Ausgangskennlinie  $V_{DS}$ .
- $V_{Ende}$ : Endpunkt für die Spannung, die bei der Messung einer Kennlinie durchgefahen wird. Dies ist entsprechend bei der Transferkennlinie  $V_G$  und bei der Ausgangskennlinie  $V_{DS}$ .
- **Anzahl Schritte**: Anzahl der Messpunkte zwischen  $V_{Start}$  und  $V_{Ende}$  für **eine** Richtung der Messung.
- **Anfangsdelay**: Wartezeit zwischen dem Anlegen von  $V_{Start}$  und dem Messen des Stroms bei  $V_{Start}$ .
- **Umkehrdelay**: Wartezeit zwischen Anlegen der Spannung  $V_{Ende}$  und dem Messen des Stroms am Umkehrpunkt der Hysterese-messung.
- **Messdelay**: Zusätzliche Wartezeit zwischen dem Anlegen der Spannung und dem Start der Messung. Standardmäßig hat das Keithley Sourceme-ter eine vom Messbereich abhängige Wartezeit bis zur Stabilisierung des Messwerts. Diese wird nicht verändert, das Messdelay wird zu dieser Zeit dazu addiert.
- **NPLC**: (N)umber of (P)owerline (C)ycles, Integrationszeit für die Messung von Strom und Spannung an jedem Punkt in Vielfachen der Netzfrequenz.
- **Strombegrenzung**: Maximaler Strom, der noch toleriert wird. Die angelegten Spannungen werden vom Sourceme-ter automatisch so reguliert, dass dieser Ma-ximalstrom nicht überschritten wird.
- **Relaxzeit**: Zeit in Sekunden, die der OFET relaxieren soll.

Da nach [13] die Eigenschaften der Kennlinien von der Messgeschwindigkeit abhängen können, sind die drei *Delays* als Parameter implementiert. Damit und durch die Integrationszeit in NPLC lässt sich die Messgeschwindigkeit variieren. Außerdem fordert der IEEE Standard grundsätzlich die Messung in beide Richtungen durchzuführen, um eventuelle Hysteresen erkennen zu können. Dies wird in der hier entwickelten Implementation daher immer so durchgeführt.

- **Automatische Messung**: Dieser Programmteil führt die eigentliche Messung durch, indem sämtliche im Messprogramm definierten Kennlinien beim gerade kontaktierten OFET gemessen werden. Weiterhin werden die aktuellen Messdaten zur online Überwachung grafisch dargestellt und in einer ASCII Textdatei zur weiteren Auswertung gespeichert.

- **Hauptprogramm:** Das Hauptprogramm koordiniert die einzelnen Teile und führt die Reihemessung einer Probe durch, indem es nacheinander die in der Positionsliste gespeicherten Positionen mit dem Messadapter anfährt und an jeder Position die Automatische Messung ausführt.



## Auswertung der Messdaten

Durch die Messung von Transfer- und Ausgangskennlinie ermittelt man das Verhalten des OFETs beim Anlegen von verschiedenen Spannungen an Gate und Drain. Aus diesem Verhalten soll im Folgenden mit Hilfe einer Modellvorstellung von der Funktionsweise eines OFETs auf dessen Eigenschaften zurück geschlossen werden. Zur Modellierung des OFET Verhaltens greift man dabei häufig auf die bekannten Modelle zur Beschreibung von Silizium-MOSFETs zurück [13], [14]. Eine ausführliche Beschreibung von Silizium-MOSFETs und entsprechenden Modellen zu ihrer Beschreibung ist in [15] zu finden.

Ein anderer Ansatz ist, ausgehend von der Ladungs- und Feldverteilung im OFET ein Modell neu herzuleiten. Dieser Ansatz wird in [2] verfolgt und führt im Prinzip zu den selben Formeln und den selben Parametern wie sie auch zur Beschreibung von Silizium-MOSFETs verwendet werden. Für die Modellierung der Kennlinien im linearen Bereich des OFETs wäre das:

$$I_{DS,lin} = \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} \quad (3.1)$$

Und für die Modellierung im Sättigungsbereich:

$$I_{DS,sat} = \frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th})^2 \quad (3.2)$$

Trotz der mathematisch gleichen Beschreibung gibt es jedoch einige gravierende Unterschiede zwischen beiden Transistorarten MOSFET und OFET, die in der Anwendung des Modells zur Auswertung der Kennlinien und auch für die Interpretation der OFET-Eigenschaften berücksichtigt werden müssen. Der wohl größte Unterschied ist der Betriebsmodus der Transistoren: Während ein MOSFET typischerweise in Inversion betrieben wird, arbeiten OFETs in Akkumulation. Dies hat Einfluss auf die Schwellspannung (*threshold voltage*,  $V_{Th}$ ) und den Bulk-Strom (*bulk current*,  $I_{Bulk}$ ) der Transistoren durch das Volumen der Halbleiterschicht parallel zum eigentlichen Kanal: Die Schwellspannung eines MOSFETs ist eindeutig definiert

durch den Punkt, an dem die am Gate angelegte Spannung ausreicht, um den MOSFET-Kanal in die Inversion zu treiben. An diesem Punkt werden die eigentlichen Majoritätsladungsträger des Halbleiters zu Minoritätsladungsträgern und umgekehrt. Ein p-Typ Halbleiter bildet also beispielsweise beim Betrieb in Inversion einen n-Typ Kanal aus. Weiterhin bildet sich beim Betrieb in Inversion eine Raumladungszone zwischen dem MOSFET-Kanal und dem Rest des Halbleitermaterials aus, die diese beiden Bereiche elektrisch voneinander trennt. Dadurch werden *Bulk*-Ströme von Source zu Drain parallel zum eigentlichen MOSFET-Kanal effektiv verhindert [15].

Beim OFET gibt es dagegen durch den Betrieb in Akkumulation keine wohldefinierte Schwellspannung und auch keine Raumladungszone. Eine Schwellspannung sollte es in einem idealen OFET eigentlich nicht geben, da der Kanal sich sofort beim Einschalten der Gate-Spannung ausbildet und keine Spannungsgrenze zum Entstehen einer Inversion erreicht werden muss. In der Realität werden jedoch typischerweise beim Anlegen der Gate-Spannung zuerst die Ladungsträgerfallen im Kanal besetzt, so dass die zu Beginn durch die Gate-Spannung im Kanal influenzierten Ladungsträger nicht zum Stromtransport zwischen Source und Drain beitragen können. Erst bei einer höheren Gate-Spannung werden auch mobile Ladungsträger im Kanal influenziert, so dass auch hier effektiv eine Schwellspannung beobachtet wird. Diese Schwellspannung ist jedoch völlig anders zu interpretieren als bei einem in Inversion arbeitenden MOSFET.

Der zweite Punkt, die *Bulk*-Ströme zwischen Source und Drain parallel zum Kanal, werden in den Gleichungen (3.1) und (3.2) nicht behandelt, da diese beiden Gleichungen nur den Kanalstrom beschreiben. Implizit geht man bei der Verwendung dieser Gleichungen also davon aus, dass sonst keine anderen Ströme im OFET fließen. Allerdings ist der Kanal in einem OFET nur wenige Nanometer dick [2], während die Halbleiterschicht selbst normalerweise wesentlich dicker ist und keinen unendlich hohen Widerstand hat. Da es, wie oben beschrieben, im OFET keine isolierende Raumladungszone gibt können also durchaus *Bulk*-Ströme von Source zu Drain fließen, deren Höhe von der Dicke und (Rest-)Leitfähigkeit der verwendeten Halbleiterschicht und natürlich von der Spannung zwischen Source und Drain abhängt. Falls diese *Bulk*-Ströme bei den konkret betrachteten OFETs nicht mehr zu vernachlässigen sind, kann man sie relativ einfach durch einen parallel zum Kanal geschalteten Ohmschen Widerstand modellieren [2]. Wenn man dann den resultierenden Strom  $I_{DS}$  zwischen Drain und Source als zwei parallele Ströme  $I_{Kanal}$  und  $I_{Bulk}$  modelliert folgt im linearen Bereich:

$$I_{DS,lin} = I_{Kanal} + I_{Bulk} = \mu C \frac{W}{L} \left( V_G - V_{Th} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} + I_{Bulk} \quad (3.3)$$

Und für die Modellierung im Sättigungsbereich:

$$I_{DS,sat} = I_{Kanal} + I_{Bulk} = \frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th})^2 + I_{Bulk} \quad (3.4)$$

---

Wobei sich  $I_{Bulk}$  wiederum durch einen Ohmschen Widerstand  $R_{Bulk}$  beschreiben lässt, der dann vom konkreten betrachteten Layout und Produktionsprozess abhängt:

$$I_{Bulk} = \frac{V_{DS}}{R_{Bulk}} \quad (3.5)$$

Ob sich  $I_{Bulk}$  tatsächlich nach dem Ohmschen Gesetz modellieren lässt, lässt sich nach Gleichung (3.5) durch eine Ausgangskennlinie im Aus-Zustand des OFETs feststellen, also an einem Punkt, an dem im OFET kein Ladungsträgerkanal existiert. Bei einem „normally-off“ OFET wäre das bei einer Gate-Spannung von 0V. Siehe dazu auch das Inset in Abbildung (3.4).

Nach diesen Vorüberlegungen zur Modellierung und Interpretation von OFET-Kennlinien soll im Folgenden auf die konkrete Extraktion von OFET-Parametern aus den Kennlinien eingegangen werden. Die Parameter von Interesse ergeben sich dabei zum Einen aus den Gleichungen (3.3) und (3.4), zum Anderen aus den für eine Schaltung relevanten elektrischen Eigenschaften des OFETs. Zu diesem Thema macht der bereits erwähnte IEEE Standard [13] ebenfalls Angaben, welche in diese Betrachtung mit eingeflossen sind.

Aus den Modellgleichungen (3.3) und (3.4) folgen zunächst einmal alle Parameter, die nicht von  $V_G$  und  $V_{DS}$  abhängig sind und damit in der Lage sind, den OFET an sich zu beschreiben. Dies wäre zunächst einmal der Vorfaktor  $\mu C \frac{W}{L}$ , der in beiden Gleichungen vorkommt. Weiterhin folgt die Schwellspannung als interessanter Parameter, die im ersten Ansatz als ein gleicher Parameter in den beiden Gleichungen vorkommt. Insgesamt lassen sich folgende Parameter zur Beschreibung eines OFETs gewinnen:

- **Mobilität ( $\mu$ ):** Die Mobilität der Ladungsträger im OFET-Kanal. Dieser Parameter charakterisiert in der hier betrachteten Form als eine aus den Transferkennlinien extrahierte Größe immer den gesamten OFET-Aufbau. Die stärkste Abhängigkeit besteht hier vom Halbleitermaterial selbst und von der Grenzfläche zwischen dem Halbleiter und dem Dielektrikum. Das durch die Gleichungen (3.3) und (3.4) beschriebene OFET-Modell geht von der selben, konstanten Mobilität im linearen- und im Sättigungsbereich aus. In einem OFET kann die Mobilität jedoch von der lokalen Ladungsträgerdichte im Kanal und damit von den an den OFET angelegten Spannungen abhängen [16]. Aus diesem Grund wird die Mobilität in zwei Werte für die zwei Bereiche des Modells aufgespalten. Als Parameter ergeben sich also  $\mu_{lin}$  und  $\mu_{sat}$ .
- **Gate-Kapazität C:** Die Gate-Kapazität ergibt sich aus dem Schichtaufbau Gate - Dielektrikum - Halbleiter, welcher als Kondensator wirkt. Die Gate-Kapazität wird im Rahmen dieser Arbeit nicht gemessen, sondern aus der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  und der Dicke  $d$  des Dielektrikums über  $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{1}{d}$  berechnet. Die Kapazität ist dabei auf die Fläche normiert.

- **Geometrie**  $\frac{W}{L}$ : Das Verhältnis von Kanalweite  $W$  zu Kanallänge  $L$  beschreibt die Geometrie des OFETs und ist damit kein Messwert, sondern im Vorfeld bekannt.
- **Schwellspannung**  $V_{Th}$ : Die Schwellspannung beschreibt den Punkt, an dem die Gate-Spannung den OFET gerade einschaltet. Analog zur Mobilität wird auch hier zwischen  $V_{Th,lin}$  und  $V_{Th,sat}$  unterschieden.
- **On-Strom**  $I_{On}$ : Der betragsmäßig maximale Strom, den der OFET in einer Transferkennlinie erreicht. Dieser Parameter hängt über die Gleichungen (3.1) und (3.2) von den an den OFET angelegten Spannungen ab und ist damit nicht ohne diese Angaben vergleichbar. Ein maximaler Wert für den Strom wird auch für die Ausgangskennlinien ermittelt. Dieser Wert lässt sich jedoch in diesem Fall nicht als On-Strom interpretieren, da der OFET in einer Ausgangskennlinie nicht ein- oder ausgeschaltet wird. Es handelt sich vielmehr um den Sättigungsstrom, der für die gewählte, konstante Gate-Spannung in der Ausgangskennlinie erreicht wird.
- **Off-Strom**  $I_{Off}$ : Der Strom, der im Off-Bereich der Transferkennlinie von Source zu Drain fließt. Innerhalb des verwendeten Modells entspricht dies dem von  $V_{DS}$  getriebenen *Bulk*-Strom  $I_{Bulk}(V_{DS})$  über den Halbleiter, allerdings in diesem Fall ohne einen parallelen Ladungsträgerkanal, da der OFET ja per Definition ausgeschaltet ist.
- **On/Off-Verhältnis**: Der Quotient  $\frac{I_{On}}{I_{Off}}$  wird als On/Off-Verhältnis bezeichnet und ist damit im eigentlichen Sinne kein zusätzlicher Parameter, sondern eine aus bereits ermittelten Parametern berechnete Größe. Trotzdem wird das On/Off-Verhältnis typischerweise explizit angegeben [13], da es ein wichtiger Parameter für das Schaltungsdesign ist. Zu beachten ist, dass das On/Off-Verhältnis über den On- und Off-Strom vom Messbereich für  $V_G$  und von der konstanten Drain-Source-Spannung der betrachteten Transferkennlinie abhängt und damit immer zusammen mit diesen Größen betrachtet werden sollte.
- **Maximaler Bulk-Strom**  $I_{Bulk,max}$ : Der *Bulk*-Strom lässt sich über die Messung einer Ausgangskennlinie bei einem ausgeschalteten OFET analysieren. Der Parameter  $I_{Bulk,max}$  bezeichnet dabei den maximalen, in dieser Kennlinie gemessenen *Bulk*-Strom und ist damit vom Messbereich der Ausgangskennlinie abhängig.
- **Maximaler Gate-Leckstrom**  $I_{G,max}$ : Während der Messung der Kennlinien wird immer auch der über das Gate abfließende Leckstrom des OFETs gemessen. Der Parameter  $I_{G,max}$  bezeichnet den Maximalen Wert des gemessenen Gate-Leckstroms für jede Kennlinie.

Ausgehend von der obigen Betrachtung stellt sich die Frage, wie man die genannten Parameter aus den Kennlinienmessungen so extrahieren kann, dass die Parameter für jeden

einzelnen OFET reproduzierbar ermittelt werden. Außerdem soll die Auswertung automatisch funktionieren, so dass bei einer großen Anzahl von OFETs nicht tausende von Kennlinien von Hand ausgewertet werden müssen. Weiterhin wird bei der Parameterextraktion davon ausgegangen, dass sich das Verhalten der gemessenen OFETs zumindest näherungsweise durch das in den Gleichungen (3.3) und (3.4) definierte Modell beschreiben lässt. Falls es hier zu großen Abweichungen kommt, ist die im Folgenden vorgestellte Methode zur Parameterextraktion nicht mehr gültig und die zur Abweichung führenden Effekte müssten in einem neuen Modellansatz berücksichtigt werden.

### 3.1. Extraktion der Mobilität

Ein erster Ansatz zur Extraktion der Mobilität ist die Ableitung der Gleichungen (3.3) und (3.4) nach  $V_G$  und Auflösen nach  $\mu$  [2]. Daraus ergibt sich für Gleichung (3.3) Folgendes:

$$\frac{dI_{DS,lin}}{dV_G} = \mu C \frac{W}{L} V_{DS} \quad (3.6)$$

$$\Leftrightarrow \mu = \frac{L}{CV_{DS}W} \frac{dI_{DS,lin}}{dV_G} \quad (3.7)$$

Wobei die Gate-Kapazität  $C$  durch  $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{1}{d}$  aus den vorher bestimmten Eigenschaften  $\epsilon_r$  und  $d$  des Dielektrikums berechnet wird. Durch die Ableitung der Transferkennlinie lässt sich also die Mobilität aus bekannten Größen berechnen. Da es sich bei den Messdaten um eine diskrete Anzahl von Messpunkten handelt, wird die Ableitung Punktweise durchgeführt über:

$$\frac{dI_{DS,lin}}{dV_G} = \frac{I_{DS,lin}^{i+1}(V_G) - I_{DS,lin}^i(V_G)}{V_G^{i+1} - V_G^i} \quad (3.8)$$

Dies hat zur Folge, dass mit dieser Methode für jeden Messpunkt der Transferkennlinie ein Mobilitätswert berechnet wird. Es entsteht also sozusagen eine weitere „Mobilitätskennlinie“. Die Ableitung lässt sich auch für die Transferkennlinie im Sättigungsbereich durchführen. Die Herleitung erfolgt unter Vernachlässigung des *Bulk*-Stroms  $I_{Bulk}$ . Falls  $I_{Bulk}$  im konkreten Fall nicht mehr vernachlässigt werden kann, gilt Gleichung (3.11) für ein  $I'$  mit  $I' = I_{DS,sat} - I_{Bulk}$ .

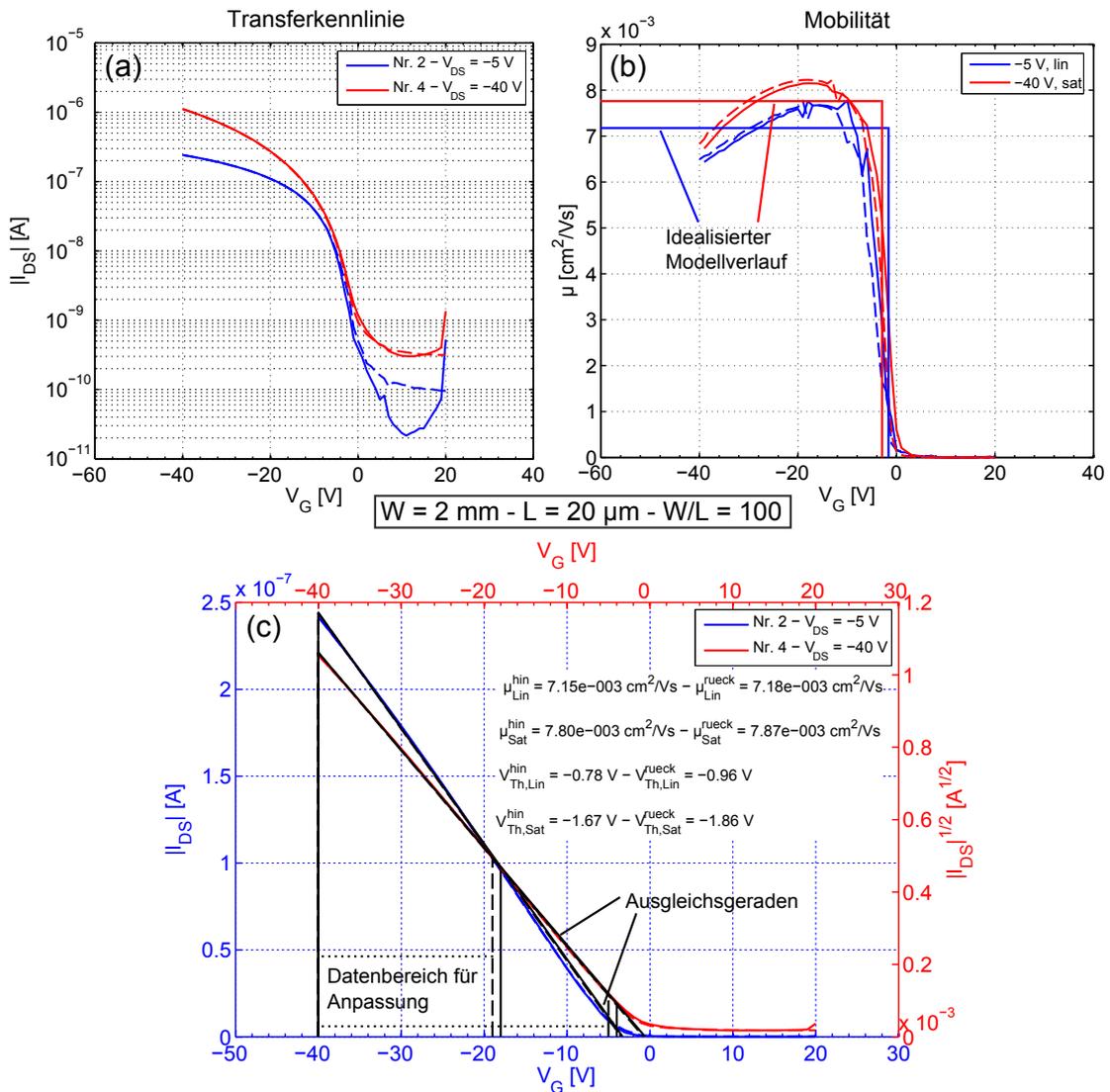
$$\sqrt{I_{DS,sat}} = \sqrt{\frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L}} (V_G - V_{Th}) \quad (3.9)$$

$$\Rightarrow \frac{d\sqrt{I_{DS,sat}}}{dV_G} = \sqrt{\frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L}} \quad (3.10)$$

$$\Leftrightarrow \mu = \frac{2L}{CW} \left( \frac{d\sqrt{I_{DS,sat}}}{dV_G} \right)^2 \quad (3.11)$$

Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist beispielhaft in Abbildung (3.1 b) dargestellt.

Mit dieser Methode bekommt man also einen guten Eindruck vom Verlauf der Mobilität



**Abb. 3.1.:** Zwei verschiedene Auswertungsmethoden zur Ermittlung der Mobilität aus den Transferkennlinien. Teil (a) zeigt die gemessenen Transferkennlinien im linearen- (blau) und Sättigungsbereich (rot) in logarithmischer Auftragung. Teil (b) zeigt die nach Gleichung (3.8) und (3.11) punktweise aus den Kennlinien ermittelte Mobilität  $\mu$  des OFETs. Als Plateaus sind die aus der Geradenanpassung in Teil (c) ermittelten mittleren Mobilitätswerte aufgetragen. Die Messung von „Aus“ nach „An“ wird als „hin“-Messung bezeichnet und mit einer durchgezogenen Linie dargestellt, die Messung von „An“ nach „Aus“ als „rück“-Messung bezeichnet und gestrichelt dargestellt.

mit  $V_G$  und eventuelle Abweichungen vom idealen, durch die Gleichungen (3.3) und (3.4) beschriebenen Modell werden sichtbar. Nach diesem idealisierten Modell sollte der Drain-Source Strom für die Transferkennlinie im linearen Bereich linear und für die Transferkennlinie im Sättigungsbereich quadratisch mit  $V_G$  ansteigen. In einer entsprechend gewählten Auftragung von  $I_{DS}$  bzw.  $\sqrt{I_{DS}}$  gegen  $V_G$  müsste man also eine Gerade erkennen können. Für das Beispiel aus Abbildung (3.1) ist dies tatsächlich der Fall, wie im Teil (c) der Abbildung gezeigt ist. Die Ableitung einer Geraden ist jedoch ein konstanter Wert, so dass der erwartete ideale Verlauf in Abbildung (3.1 b) einer Stufenfunktion entspricht, die bis zum Einschalten des OFETs bei der Schwellspannung  $V_{Th}$  den Wert 0 hat und danach sofort auf ein konstantes Plateau ansteigt, dessen Wert proportional ist zur Geradensteigung der Transferkennlinien in der Auftragung aus Abbildung (3.1 c). Die Abweichungen vom idealen, durch das Modell beschriebenen Verlauf der Transferkennlinien äußern sich also in der Auftragung in Abbildung (3.1 b) durch Abweichungen vom konstanten Wert des Plateaus. Durch das Bilden der Ableitung der Transferkennlinien sind solche Abweichungen wesentlich besser zu erkennen, als Abweichungen von der Geraden in Abbildung (3.1 c).

Die gesamte Betrachtung in Abbildung (3.1) zeigt, dass das durch die Gleichungen (3.3) und (3.4) bestimmte Modell das Verhalten des gezeigten OFETs prinzipiell beschreiben kann. Im Detail ergeben sich jedoch Abweichungen in der Mobilität, welche nicht genau konstant, sondern leicht von der angelegten Gate-Spannung abhängig ist. Dieses Verhalten ist bekannt [16] [17] [2] und ist eine Konsequenz aus der Art des Ladungsträgertransports in organischen Halbleitern und der Abhängigkeit dieses Transports von Ladungsträgerfallen im OFET-Kanal. So werden beim Einschalten der Gate-Spannung zunächst die Ladungsträgerfallen besetzt und erst mit einer steigenden Gate-Spannung immer mobilere energetische Zustände in der Zustandsdichte des Halbleiters. Der leichte Abfall der Mobilität zu hohen negativen Gate-Spannungen ist wahrscheinlich durch die Übergangswiderstände der Source-Drain Elektroden zum Halbleiter zu erklären.

Für die hier vorgestellte, weitergehende Auswertung einer Vielzahl von OFETs und den Vergleich der OFETs untereinander ist es jedoch notwendig, die Mobilität eines OFETs auf jeweils eine einzelne Zahl pro gemessener Kennlinie herunter zu brechen. Dieser Zahlenwert für die Mobilität sollte den OFET möglichst gut beschreiben können und er sollte unempfindlich sein gegenüber einzelnen Ausreißern in den gemessenen Kennlinien. Als erster Ansatz für einen solchen Zahlenwert würde sich das Maximum der Mobilität aus den Kurven in Abbildung (3.1 b) anbieten, was dem Anlegen einer Tangente an den Punkt der Größten Steigung der Transferkennlinien in Abbildung (3.1 c) entspricht [18]. Es stellt sich jedoch die Frage, warum gerade dieser Wert den OFET am besten beschreiben sollte und nicht etwa das Minimum der Kurve im On-Bereich des OFETs, oder ein beliebiger anderer Wert der Mobilitätskennlinie. Weiterhin ist eine automatische Bestimmung des Maximums der Kurve zwar sehr einfach möglich, aber auch sehr anfällig für Ausreißer nach oben.

Man sollte also dementsprechend keinen einzelnen Messpunkt aus den Mobilitätskennlinien verwenden, sondern einen Mittelwert, der in einer definierten Form berechnet wird und in den möglichst viele Messpunkte der Transferkennlinien bzw. Mobilitätskennlinien eingehen. Dazu ist es hilfreich, sich noch einmal das Modell aus den Gleichungen (3.3) und (3.4) zur Beschreibung der Transferkennlinien anzuschauen. Dieses Modell geht von einem einzigen, konstanten Wert für die Mobilität  $\mu$  aus und sagt unter dieser Voraussetzung vorher, dass die Transferkennlinien in der Auftragung in Abbildung (3.1 c) für den On-Bereich des OFETs in Form einer Gerade verlaufen. Der einzelne Zahlenwert, der die Mobilität eines OFETs im Rahmen des verwendeten Modells am besten beschreibt, ist also der Wert mit der zugehörigen Modellgeraden, welche die Messdaten der Transferkennlinien am besten beschreibt. Dies ist nichts anderes als eine Ausgleichsgerade, die entsprechend der Methode der kleinsten Quadrate an die Messdaten im On-Bereich des OFETs angepasst wird. Eine solche Ausgleichsgerade würde also die idealisierte Modellvorstellung darstellen, welche zur Auswertung der Messdaten dient. Der aus der Steigung dieser Geraden berechnete Wert für die Mobilität entspricht damit dem oben beschriebenen Plateau in der Mobilitätskennlinie in Abbildung (3.1 b).

Das Problem bei der Bestimmung einer solchen Ausgleichsgeraden ist jedoch die Festlegung des Bereichs der Transferkennlinie, in dem die Gerade berechnet werden soll [19]. Außerdem soll die Berechnung der Geraden automatisch und reproduzierbar für viele tausend gemessene Transferkennlinien in einer Messreihe erfolgen. Es ist also nicht möglich, den entsprechenden Anpassungsbereich für jede einzelne Kennlinie von Hand zu bestimmen. Der hier entwickelte Lösungsansatz dafür ist, nicht den Anpassungsbereich vorher festzulegen, sondern die geforderte Anpassungsqualität der Geraden an die Messdaten. Dies bedeutet, dass der Bereich der Messdaten, für den die Ausgleichsgerade berechnet wird, iterativ verkleinert wird, bis die Qualität der Geradenanpassung einem vorher festgelegten Wert entspricht. Falls dieser Bereich zu klein wird, das heißt eine vorher festgelegte Mindestanzahl von Messpunkten unterschreitet, wird der entsprechende OFET als defekt deklariert. Anschaulich bedeutet das, dass dieser OFET sich nicht mehr im Rahmen der durch die Parameter „Qualität der Geradenanpassung“ und „Mindestanzahl an Messpunkten für die Geradenanpassung“ bestimmten Toleranzbereichs durch das verwendete Modell beschreiben lässt.

Für eine weitere Diskussion des zur Geradenanpassung benutzten Algorithmus ist es zunächst einmal notwendig, ein Qualitätskriterium zu definieren, welches die Qualität der Anpassung der Geraden an die Messpunkte beschreibt. Hierfür wird häufig das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  verwendet, welches für die lineare Regression dem Korrelationskoeffizienten zwischen Ausgleichsgerade und Messdaten entspricht. Für eine gute Beschreibung der Messdaten durch die Ausgleichsgerade nähert sich  $R^2$  dem Wert 1 an. Ein Ansatz zur Definition des gesuchten Qualitätskriteriums ist also, einen bestimmten Mindestwert für  $R^2$  zu fordern, also beispielsweise  $R^2 \geq 0,95$ . Dieser Ansatz hat sich jedoch für die konkrete Aufgabenstellung als

ungeeignet herausgestellt, da bereits sehr kleine Änderungen des geforderten Mindestwerts für  $R^2$  einen sehr großen Einfluss auf die ermittelte Ausgleichsgerade haben. Aufgrund von leichten Variationen in den Transferkennlinien erzeugt die automatische Berechnung der Ausgleichsgeraden daher sehr unterschiedliche Ergebnisse, so dass die aus den Geraden berechneten Werte für die Mobilität nicht vergleichbar sind.

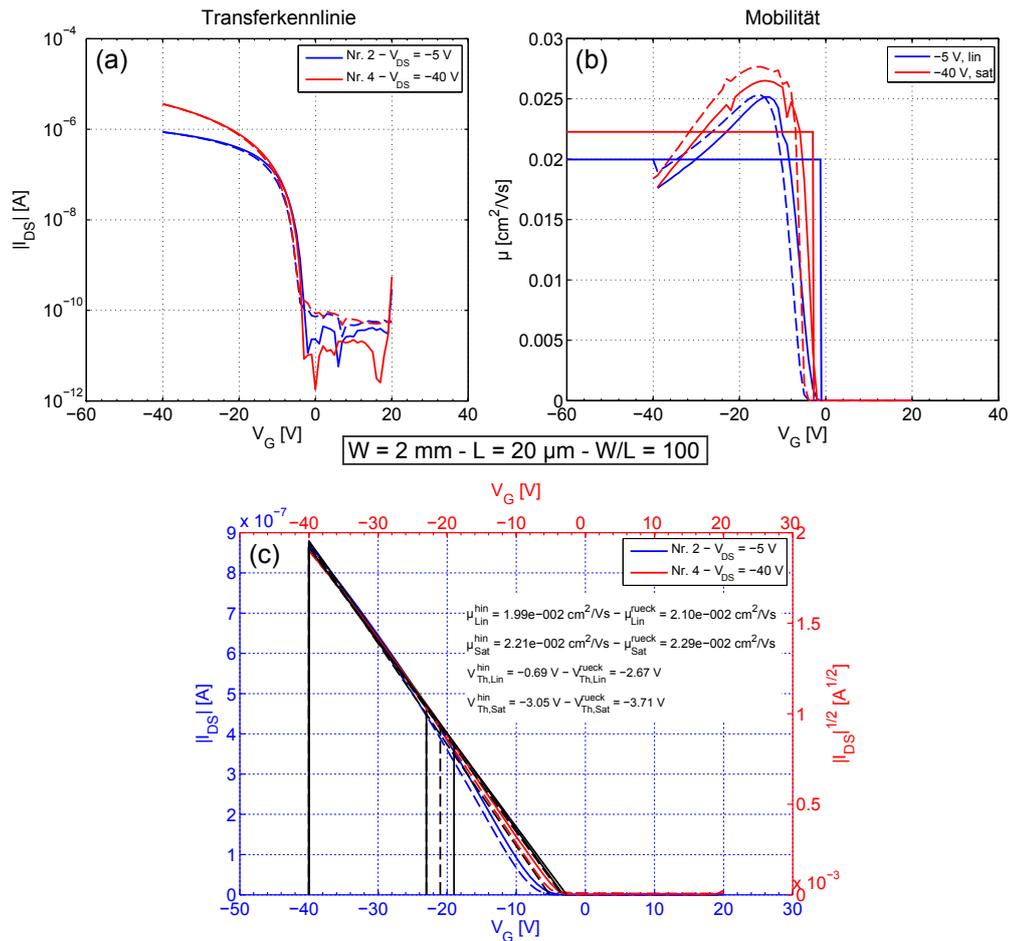
Als numerisch stabil hat sich dagegen ein Ansatz bewährt, der die betragsmäßige Summe der Residuen zwischen Ausgleichsgerade und Messwerten als Qualitätskriterium heranzieht. Diese Summe der Residuen wird für alle Messpunkte im Anpassungsbereich der Gerade berechnet und mit dem maximalen Drain-Source-Strom  $I_{On}$  der Transferkennlinie normiert. Diese Normierung ist notwendig, um ein allgemeines Kriterium zu erhalten, da der Betrag der Residuen von der Größenordnung des gemessenen Drain-Source Stroms abhängt. Diese Größenordnung von  $I_{DS}$  ist nun wiederum vom  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis und der Mobilität des betrachteten OFETs abhängig, so dass hier bei den betrachteten Transferkennlinien durchaus Schwankungen über 3 bis 4 Größenordnungen auftreten können. Dies wird durch die Normierung mit  $I_{On}$  ausgeglichen.

Für eine Ausgleichsgerade  $f(V_G) = mV_G + b$  und die Messpunkte der Transferkennlinie  $I_{DS}^k$ , wobei der Index  $k$  vom Start bis zum Ende des für die Geradenanpassung ausgewählten Bereichs der Messpunkte läuft, lässt sich das Qualitätskriterium  $Q$  für die Anpassung der Ausgleichsgerade beschreiben durch:

$$\sum_{k=Start}^{Ende} \frac{|f(V_G^k) - I_{DS}^k|}{I_{On}} \leq Q \quad (3.12)$$

Dabei muss der tatsächliche Zahlenwert für  $Q$  letztendlich durch das Ausprobieren von verschiedenen Werten und die anschließende Bewertung der Ausgleichsgeraden anhand der Darstellung wie in Abbildung (3.1 c) erfolgen. Diese Methode liefert also kein regelrecht neues Kriterium zur Bestimmung der Mobilität eines OFETs. Man erreicht mit dieser Art der Datenauswertung jedoch eine konsistente und reproduzierbare Ermittlung der Mobilität innerhalb einer Messreihe. Die Konsistenz folgt daraus, dass für jede Transferkennlinie immer das selbe Kriterium für die Auswahl der Messpunkte zur Geradenanpassung angewandt wird. Diese Auswahl hängt also nicht mehr vom subjektiven Eindruck der auswertenden Person ab. Reproduzierbar ist die Auswertung in dem Sinne, dass zwei Personen mit den selben Messdaten und dem gleichen Qualitätskriterium  $Q$  zu den selben Ergebnissen kommen.

Mit der Angabe von  $Q$  und der minimalen Anzahl von Messpunkten, die noch für eine Geradenanpassung zulässig sind, sind daher die Auswertungen von 2 verschiedenen Messreihen auch untereinander vergleichbar. Dazu zeigt Abbildung (3.2), zum Vergleich mit Abbildung (3.1), die Transferkennlinien, Mobilitätskennlinien und die Geradenanpassung zur Bestimmung von  $\mu$  und  $V_{Th}$  eines OFETs mit einer anderen Materialkombination aus organischem Halbleiter und Dielektrikum. Die konkreten Zahlenwerte der Anpassungskriterien sind in



**Abb. 3.2.:** Auswertung der Transferkennlinie eines OFETs mit einer anderen Materialkombination aus Dielektrikum und Halbleiter. Die Geometrie ist gleich zum OFET in Abbildung (3.1).

beiden Abbildungen  $Q = 0,1$  und die minimale Anzahl an Messpunkten beträgt 10 % des gesamten Messbereichs, was hier 6 Messpunkten entspricht. Die Anpassung konvergiert jedoch deutlich früher und läuft deshalb über wesentlich mehr Messpunkte. Anfang und Ende des Anpassungsbereichs sind durch senkrechte schwarze Linien markiert.

Der organische Halbleiter und das dazu passende Dielektrikum für den OFET in Abbildung (3.2) wurden ebenfalls vom Polytos Projektpartner Merck zur Verfügung gestellt. Trotz einer deutlich höheren Mobilität des OFETs in Abbildung (3.2) kommt der verwendete Algorithmus auch hier mit den selben Anpassungskriterien zu einem sinnvollen Ergebnis. Die Voraussetzung dafür ist, dass auch dieser OFET näherungsweise dem verwendeten Modell aus den Gleichungen (3.3) und (3.4) zur Beschreibung der OFET-Kennlinien folgt. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, wenn also die Transferkennlinie des betrachteten OFETs sich in der

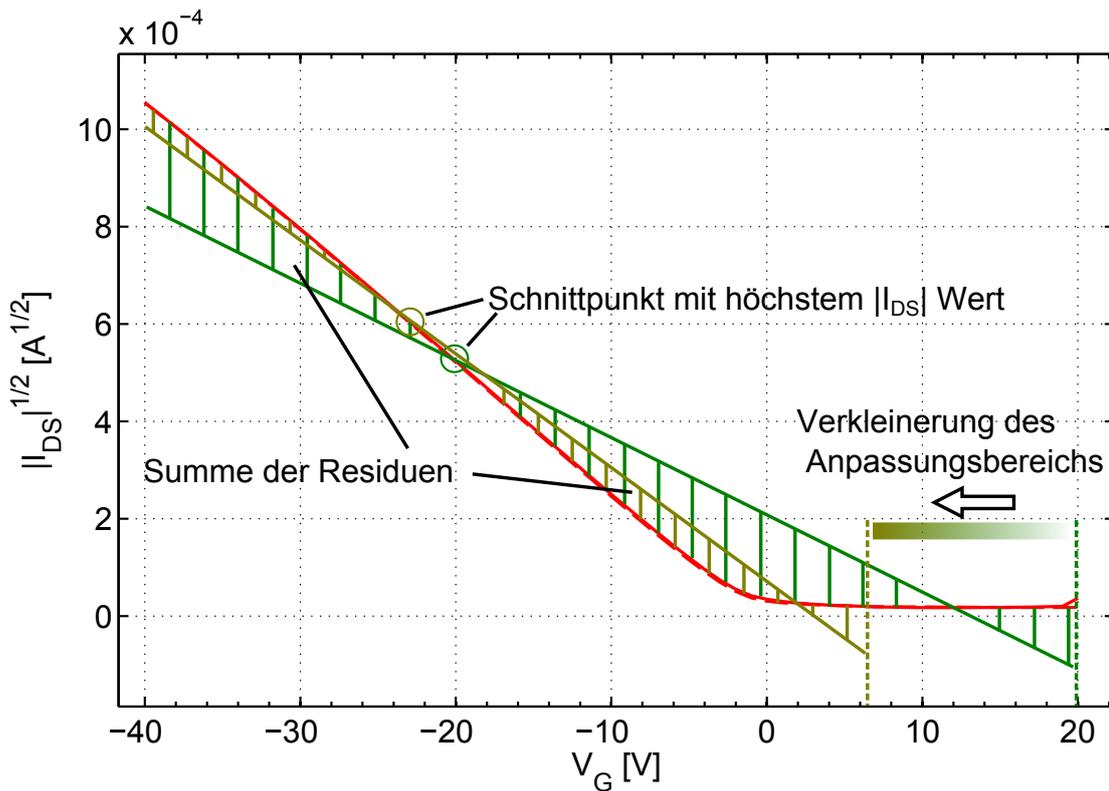
entsprechenden Auftragung einer Geraden annähert, ist der hier vorgestellte Algorithmus unabhängig vom konkreten Messbereich und kann auch zur Auswertung von n-Typ OFETs verwendet werden. Eine zusätzliche Bedingung ist dann nur noch die Asymmetrie der Transferkennlinie, also ein klar erkennbarer Aus-Zustand des OFETs im Vergleich zum linearen Anstieg. Ambipolare OFETs können deshalb in dieser Form nicht ausgewertet werden.

Der zweite Teil dieser Arbeit zur Alterung der OFETs beschäftigt sich mit der Materialkombination des OFETs aus Abbildung (3.1), dessen Verhalten sich in ausreichend guter Näherung durch das verwendete Modell beschreiben lässt, so dass im Rahmen der hier vorgestellten Auswertemethodik aussagekräftige Parameter aus den Kennlinien extrahiert werden können. Weiterhin beziehen sich alle weiteren gezeigten Kennlinien und Auswertungen auf OFETs mit dieser Materialkombination, sofern nicht explizit anders erwähnt. Die Herstellung dieser Proben wird im Detail in Kapitel (4) vorgestellt.

## 3.2. Algorithmus zur Geradenanpassung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde motiviert, dass es sinnvoll ist, eine Ausgleichsgerade an einen Teil der Messdaten für  $I_{DS}$  in der Transferkennlinie anzulegen, um aus der Steigung der Geraden die Mobilität des OFETs zu bestimmen. Anstatt eines Bereichs in  $V_G$  zur Anpassung der Geraden, soll die Qualität der Anpassung  $Q$  vorgegeben werden, welche sich über die Summe der Residuen zwischen Gerade und Messwert bestimmen lässt. Für den Algorithmus, der diese passende Ausgleichsgerade für eine beliebige Transferkennlinie finden soll, ist daher zunächst einmal das Qualitätskriterium  $Q$  die einzige Vorgabe. Für die konkrete Entwicklung eines Algorithmus benötigt man noch die Asymmetrie der Transferkennlinien als zusätzliche Bedingung. Die Asymmetrie folgt aus den Gleichungen (3.3) und (3.4) und bedeutet, dass  $I_{DS} = 0$  oder  $I_{DS} = I_{Bulk}$  gilt im Off-Bereich der Kennlinie und dass  $I_{DS}$  im On-Bereich in der entsprechenden Auftragung linear ansteigt.

Der Algorithmus selbst beruht auf einem iterativen Verfahren zur Anpassung der Geraden, die durch den Qualitätsparameter  $Q$  gefordert wird. Dazu wird zunächst einmal der gesamte Messbereich der Transferkennlinie zur Anpassung der Ausgleichsgerade verwendet. Die daraus resultierende Gerade ist in Abbildung (3.3) grün dargestellt. Im nächsten Schritt werden die Schnittpunkte dieser Geraden mit der Transferkennlinie gesucht und der Schnittpunkt mit dem höchsten  $I_{DS}$  Wert ausgewählt. Nun werden die Summen der Residuen zwischen Gerade und Messdaten rechts und links des Schnittpunkts bestimmt und der für die Geradenanpassung verwendete Bereich an der Seite mit der größeren Residuensumme um einen Messschritt verkleinert. Die Residuensummen sind in Abbildung (3.3) als Flächen zwischen Gerade und Messkurve dargestellt. Nach der Verkleinerung des Anpassungsbereichs werden die Schritte so lange wiederholt, bis die Summe aller Residuen, normiert mit dem höchsten  $I_{DS}$  Wert entsprechend Gleichung (3.12) kleiner ist als  $Q$ . Anschaulich bedeutet dies, dass die



**Abb. 3.3.:** Anschauliche Darstellung der Funktionsweise des zur Geradenanpassung benutzten Algorithmus.

Gerade immer weiter zum tatsächlichen linearen Anstieg der Messkurve hin verschoben wird. Dies ist in Abbildung (3.3) anhand von zwei verschiedenfarbigen Geraden angedeutet. Falls der vom Algorithmus gefundene Anpassungsbereich kleiner ist, als die vom Benutzer vorgegebene Mindestgröße, wird der OFET als defekt deklariert und in der weiteren Auswertung ausgelassen. Mit dieser Bedingung wird sichergestellt, dass die Anpassung der Geraden über hinreichend viele Datenpunkte erfolgt, so dass die errechneten Werte tatsächlich physikalisch sinnvoll sind. Ansonsten kann es im Prinzip passieren, dass der Anpassungsbereich auf 2 Datenpunkte eingeschränkt wird, durch die sich natürlich immer eine Gerade legen lässt, unabhängig davon, ob sich die konkrete Transferkennlinie tatsächlich entsprechend den Gleichungen (3.3) und (3.4) verhält.

Da außer der Asymmetrie der Transferkennlinie keine weiteren Vorbedingungen notwendig sind, um den hier vorgestellten Algorithmus anzuwenden, lassen sich damit sowohl p- als auch n-Typ OFETs auswerten. Nur bei ambipolaren OFETs wird diese Art der Auswertung nicht ohne Weiteres funktionieren, da hier nicht klar ist, welcher lineare Anstieg anzupassen ist.

### 3.3. Extraktion der Schwellspannung

Mit Hilfe der Bestimmung der Geraden, die das Verhalten der Transferkennlinie im, in der jeweiligen Auftragung, linearen Bereich beschreibt, lässt sich nicht nur die Mobilität, sondern auch die Schwellspannung des OFETs ermitteln. Zum Verständnis hilft hier die erneute Betrachtung der idealisierten FET-Gleichungen (3.1) und (3.2). Diese Gleichungen gehen davon aus, dass  $I_{DS}$  im Off-Bereich genau 0 ist bis zur Schwellspannung  $V_{Th}$  und ab diesem Punkt, in der entsprechenden Auftragung, linear ansteigt. Da ja die zur Bestimmung der Mobilität ermittelte Ausgleichsgerade eine Approximation der realen Transferkennlinie im Rahmen des Modells ist, lässt sich hieraus auch die Schwellspannung ermitteln. Dazu wird der Verlauf der ermittelten Ausgleichsgerade bis zu  $I_{DS} = 0$  extrapoliert, es wird also effektiv der Schnittpunkt der Geraden mit der  $V_G$ -Achse des Koordinatensystems bestimmt [17]. Dies ist eine von mehreren Möglichkeiten, die ursprünglich ebenfalls zur Charakterisierung von Silizium MOSFETs entwickelt wurden. Eine gute Übersicht über die verschiedenen Methoden zur Ermittlung von  $V_{Th}$  gibt Referenz [18]. Auch für die Bestimmung von  $V_{Th}$  hat die hier verwendete Methode über die Geradenanpassung den Vorteil, dass sie einerseits auf der Mittelung von vielen Datenpunkten beruht und entsprechend resistent ist gegen einzelne Ausreißer in den Transferkennlinien. Andererseits liegt eine konkrete Modellvorstellung dahinter, in deren Rahmen sich der ermittelte Wert interpretieren lässt. Unter Verwendung der Gleichungen (3.1) und (3.2) und unter Vernachlässigung des *Bulk*-Stroms  $I_{Bulk}$  ergeben sich damit folgende Gleichungen zur Bestimmung der Schwellspannung:

$$0 = \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} \quad (3.13)$$

$$\Leftrightarrow 0 = V_G - V_{Th} - \frac{V_{DS}}{2} \quad (3.14)$$

$$\Leftrightarrow V_{Th} = V_G - \frac{V_{DS}}{2} \quad (3.15)$$

Für die Schwellspannung im linearen Bereich und

$$0 = \frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th})^2 \quad (3.16)$$

$$\Leftrightarrow V_{Th} = V_G \quad (3.17)$$

für den Sättigungsbereich. Dabei ist hier  $V_G$  der aus dem Schnittpunkt der Geraden mit der  $V_G$ -Achse ermittelte Wert. Sofern die *Bulk*-Ströme eines OFETs so klein sind, dass sie gegenüber den On-Strömen vernachlässigt werden können, lassen sich auch die OFET-Kennlinien mittels dieser Gleichungen auswerten.

Sobald die *Bulk*-Ströme jedoch nicht mehr vernachlässigt werden können, ist eine detailliertere Betrachtung notwendig. In diesem Fall ist der *Bulk*-Strom durch den OFET von der

konstanten Drain-Source Spannung abhängig, die während der Messung der Transferkennlinie anliegt. Damit sinkt  $I_{DS}$  in den Transferkennlinien nie auf 0 ab, wie es die Gleichungen (3.1) und (3.2) voraussetzen, sondern der minimale Wert für  $I_{DS}$  ist gerade  $I_{Bulk}$ . Ein Einschalten des Stroms durch den OFET-Kanal ist daher an dem Punkt zu erkennen, an dem  $I_{DS}$  größer wird als  $I_{Bulk}$ . Dies hat für den Ansatz aus Gleichung (3.13) bzw. (3.16) folgende Änderung zur Folge:

$$I_{Bulk} = \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} \quad (3.18)$$

$$\Leftrightarrow 0 = \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} - I_{Bulk} \quad (3.19)$$

für den linearen Bereich und

$$I_{Bulk} = \frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th})^2 \quad (3.20)$$

$$\Leftrightarrow 0 = \frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th})^2 - I_{Bulk} \quad (3.21)$$

für den Sättigungsbereich. Ein Vergleich mit den Gleichungen (3.13) und (3.16) zeigt, dass  $I_{Bulk}$  als zusätzlicher Korrekturterm erscheint. Unter Berücksichtigung dieses Korrekturterms ist es jedoch weiterhin möglich, die Schwellspannung aus dem Schnittpunkt der Ausgleichsgerade mit der  $V_G$ -Achse zu bestimmen. Die Schwellspannung berechnet sich dann unter Berücksichtigung des Korrekturterms  $I_{Bulk}$  folgendermaßen:

$$0 = \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} - I_{Bulk} \quad (3.22)$$

$$\Leftrightarrow 0 = (V_G - V_{Th} - \frac{V_{DS}}{2}) - \frac{I_{Bulk} L}{\mu C W V_{DS}} \quad (3.23)$$

$$\Leftrightarrow V_{Th} = V_G - \frac{V_{DS}}{2} - \frac{I_{Bulk} L}{\mu C W V_{DS}} \quad (3.24)$$

für den linearen Bereich und

$$0 = \frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th})^2 - I_{Bulk} \quad (3.25)$$

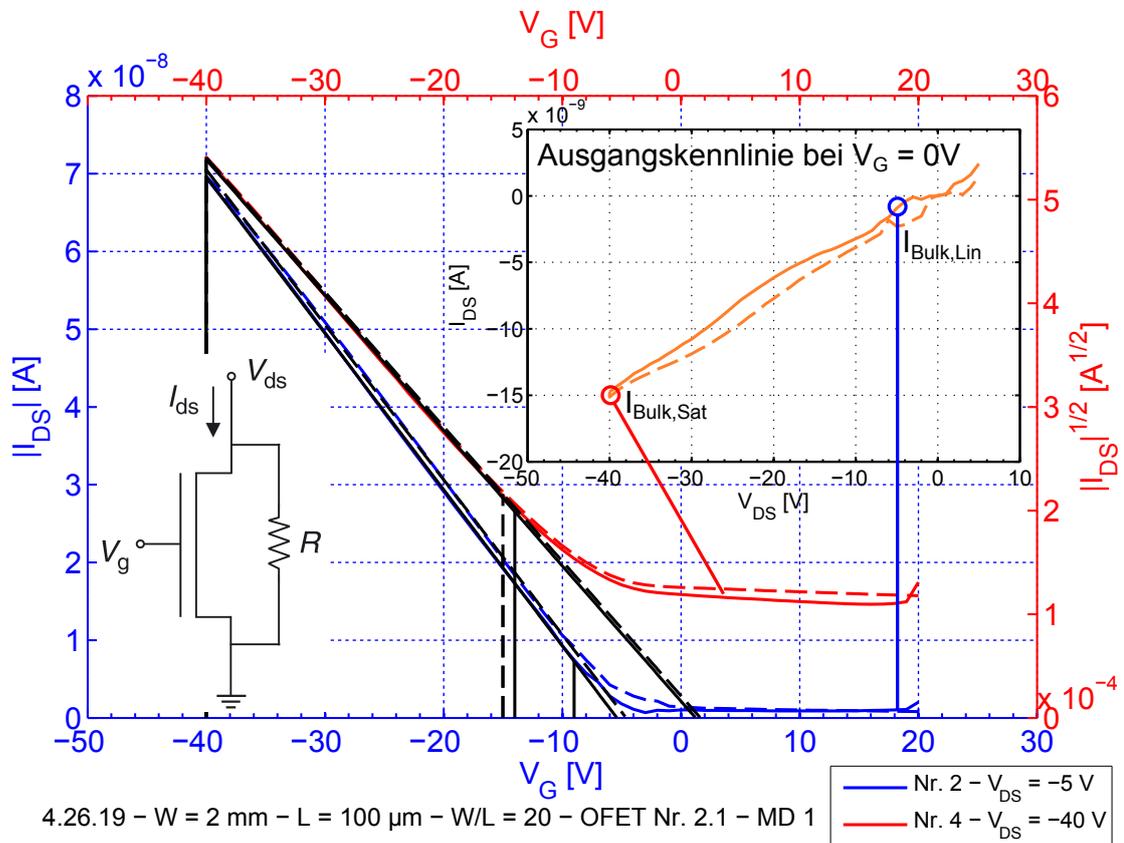
$$\Leftrightarrow 0 = (V_G - V_{Th})^2 - \frac{2 I_{Bulk} L}{\mu C W} \quad (3.26)$$

$$\Leftrightarrow \sqrt{\frac{2 I_{Bulk} L}{\mu C W}} = (V_G - V_{Th}) \quad (3.27)$$

$$\Leftrightarrow V_{Th} = V_G - \sqrt{\frac{2 I_{Bulk} L}{\mu C W}} \quad (3.28)$$

für den Sättigungsbereich. Der durch  $I_{Bulk}$  eingeführte Korrekturterm zieht sich also durch die gesamte Herleitung durch und mündet in einer Korrektur zur oben diskutierten, durch die Gleichungen (3.13) und (3.16) berechneten Schwellspannung.

Warum die Betrachtung einer solchen Korrektur notwendig ist, zeigt beispielhaft Abbildung (3.4), in der ein OFET mit einem sehr hohen *Bulk*-Strom dargestellt ist. Speziell die rote Kurve für die Messung im Sättigungsbereich zeigt einen sehr hohen *Bulk*-Strom, so dass der Schnittpunkt der entsprechenden Ausgleichsgerade mit der  $V_G$ -Achse ungefähr bei +1,5V liegt. Dies ist offensichtlich kein sinnvoller Wert für die Schwellspannung des OFETs, da in diesem Bereich der Kennlinie noch kein Einschalten des OFETs zu erkennen ist. Durch die oben beschriebene Korrektur mit  $I_{Bulk}$  wird die Schwellspannung in Sättigung für diesen OFET zu  $V_{Th,Sat} = -8V$  ermittelt. Dieser Wert liegt tatsächlich in einem Bereich, in dem der Stromfluss über den OFET-Kanal allmählich in der Kennlinie sichtbar wird, wo also der OFET einschaltet. Es ist also festzuhalten, dass die Korrektur der Schwellspannung durch  $I_{Bulk}$  sehr groß werden kann und dann auch absolut notwendig ist, um realistische Werte für  $V_{Th}$  zu ermitteln. Dies ist vor allem für die Transferkennlinie im Sättigungsbereich der Fall, während  $I_{Bulk}$  für die Transferkennlinie im linearen Bereich klein genug bleibt, um für die Bestimmung von  $V_{Th}$  vernachlässigt werden zu können.

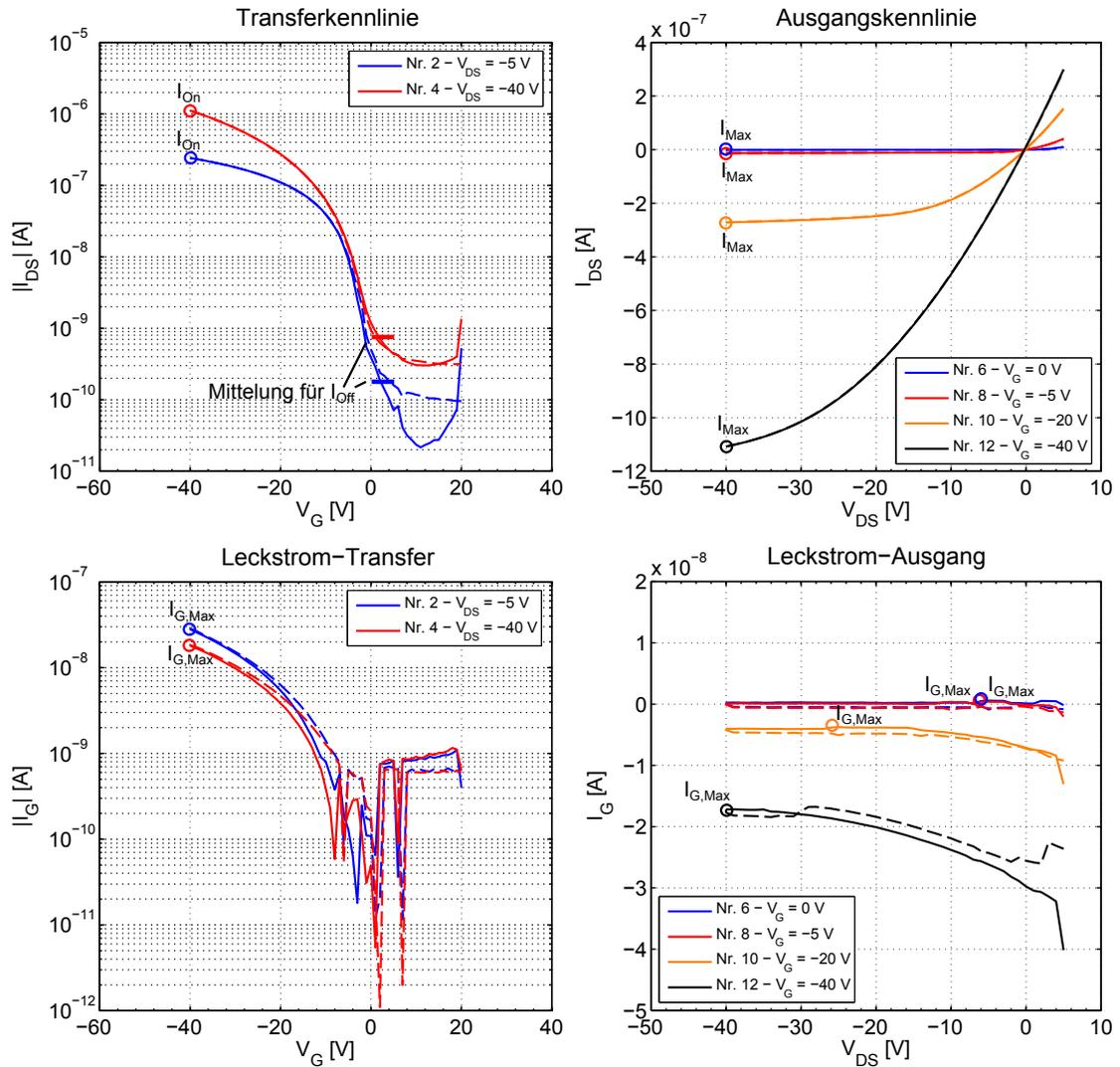


**Abb. 3.4.:** Darstellungen der Transferkennlinien eines OFETs mit sehr hohem Bulk-Strom.  $I_{Bulk}$  ist vor allem für die Kennlinie in Sättigung sehr hoch, da hier  $V_{DS}$  wesentlich höher ist als im linearen Bereich.

### 3.4. Ermittlung der verbleibenden OFET-Parameter

Im Gegensatz zu Mobilität und Schwellspannung lassen sich die verbleibenden OFET-Parameter direkt aus den Kennlinien ablesen. Dazu zeigt Abbildung (3.5) ein Transfer- und ein Ausgangskennlinienfeld, zusammen mit den jeweils gleichzeitig ermittelten Gate-Leckströmen. Die OFET-Parameter werden aus diesen Kennlinien jeweils für eine einzelne Kennlinie extrahiert, jeweils einmal für den „Off“ nach „On“ sweep, die Hin-Richtung der Kennlinie und für den „On“ nach „Off“ sweep, die Rück-Richtung der Kennlinie. Dies lässt sich im Falle der maximalen Ströme einer Kennlinie, also für die Parameter  $I_{On}$ ,  $I_{Max}$  und  $I_{G,Max}$  relativ einfach über das finden des Maximums aus den jeweils gemessenen Stromwerten bewerkstelligen. Einzig die Bestimmung des Off-Stroms einer Transferkennlinie bedarf einer detaillierteren Erklärung, da nicht genau definiert ist, wo dieser abzulesen ist.

Die Schwierigkeit für eine genaue Bestimmung des Off-Stroms ist, dass a priori nicht klar ist, in welchem Teil der Transferkennlinie der OFET aus- und in welchem Teil er eingeschaltet sein wird. Dies lässt sich rein optisch durch die Betrachtung der Transferkennlinie in einer logarithmischen Auftragung wie in Abbildung (3.5) normalerweise einfach feststellen. Wenn der Off-Strom jedoch automatisiert ausgewertet werden soll, ohne dass ein Mensch jede Kennlinie ansehen muss, muss eine eindeutige Definition angewendet werden. Die hier verwendete Definition ist, dass die fünf Messwert für  $I_{DS}$  ausgehend von  $V_G = 0V$  in Richtung positiver Gate-Spannungen gemittelt werden und der Mittelwert den Off-Strom ergibt. Hierbei wird vorausgesetzt, dass es sich um einen normally off OFET handelt, der bei  $V_G = 0V$  ausgeschaltet ist. Die Mittelung wird durchgeführt, um den Effekt von etwaigen Ausreißern in  $I_{DS}$  bei  $V_G = 0V$  abzumildern.



**Abb. 3.5.:** Anschauliche Darstellung der Ermittlung der OFET-Parameter  $I_{On}$  bzw.  $I_{Max}$ ,  $I_{Off}$  und  $I_{G,Max}$ . Diese Parameter lassen direkt aus den gemessenen Kennlinien ablesen.

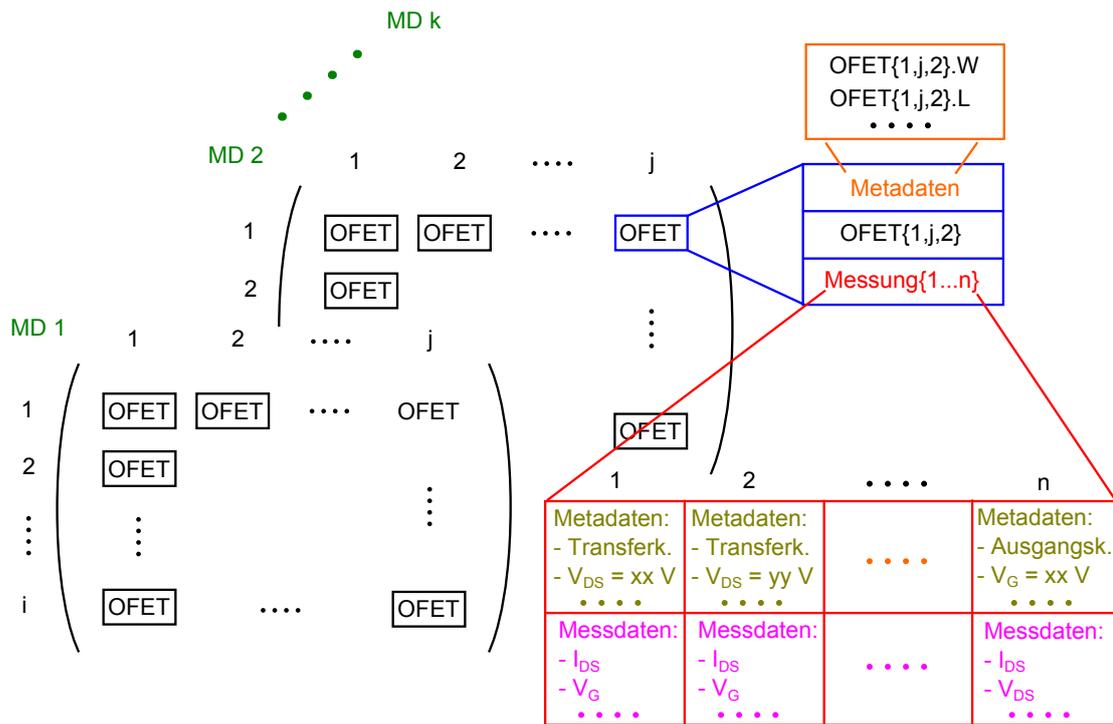
## 3.5. Datenverwaltung in Matlab

Bei einem Umfang von mehreren tausend Messungen, wie er für die in den Kapiteln (6) und (7) vorgestellten Messreihe notwendig ist, ist die Verwaltung der Messdaten und die Auswertung der OFET-Parameter nicht mehr trivial und muss im Vorfeld geplant werden. Für die Datenverwaltung wird in dieser Arbeit Matlab verwendet, was über das Konzept von Cell Arrays und Datenstrukturen eine effiziente Möglichkeit zur strukturierten Verwaltung von großen Datenmengen bietet. Weiterhin lässt sich auch die automatisierte Auswertung der OFET-Parameter und die Darstellung selbiger in Matlab implementieren, so dass alle weiteren Schritte zur Auswertung der Daten in Matlab stattfinden können. Im Folgenden wird zunächst die strukturierte Speicherung der Messdaten innerhalb einer dazu entwickelten Matlab Datenstruktur beschrieben. Nachfolgend wird dann die Auswertung der OFET-Kennlinie und die Extraktion von Parametern zur Beschreibung des OFETs näher erläutert. Dieses Vorgehen ist unabhängig von der speziellen Messreihe und wird deshalb im Folgenden allgemein dargestellt.

Um eine effiziente Möglichkeit zur Strukturierung der Messdaten zu finden, ist es hilfreich sich den Aufbau der verwendeten Proben anzuschauen. Bei den hier verwendeten Proben sind die verschiedenen OFETs auf einer Probe in Matrixform angeordnet. Das bedeutet, dass man jedem OFET eine eindeutige Kombination aus Zeilennummer und Spaltennummer zuordnen kann. Es bietet sich also an, auch die zur jeweiligen Probe gehörenden Messdaten der einzelnen OFETs in Form einer Matrix zu organisieren. Weiterhin wird hier zur Datenverwaltung das Konzept verfolgt, die Metadaten eines OFETs immer zusammen mit den Messdaten aus den Kennlinienmessungen zu speichern. Metadaten sind in diesem Zusammenhang die Eigenschaften eines OFETs, welche nicht von der Messung einer einzelnen Kennlinie abhängen. Dies wäre zum Beispiel die Geometrie des OFETs, also die Kanalweite  $W$  und die Kanallänge  $L$ , oder auch die Bezeichnung der Probe, auf der sich der OFET befindet.

Aus dieser Überlegung ergibt sich folglich eine zweidimensionale Matrix aus OFETs, die in jedem Feld der Matrix die Metadaten und die Messdaten des OFETs speichert. Die OFETs in dieser Matrix sind durch ihre Indizes eindeutig definiert.

Zur weiteren Beschreibung der OFETs über die Alterung hinweg muss jedoch jeder OFET mehrmals nach dem jeweiligen Alterungsschritt gemessen werden. Dazu wird jede Messung des selben OFETs im Folgenden als Messdurchlauf (MD) bezeichnet und entsprechend mit „MD 1“ bis „MD k“ durchnummeriert. Diese Einteilung in Messdurchläufe hat zur Folge, dass die ursprünglich zweidimensionale Matrix, die die Verteilung der OFETs auf der Probe abbildet, um eine dritte Dimension erweitert werden muss, die die Zeitachse der aufeinanderfolgenden Messungen abbildet. Anstatt 2 sind nun also 3 Indizes für eine eindeutige Identifizierung einer einzelnen Messreihe an einem einzelnen OFET notwendig. Eine schematische Darstellung dieses Konzepts ist in Abbildung (3.6) dargestellt.

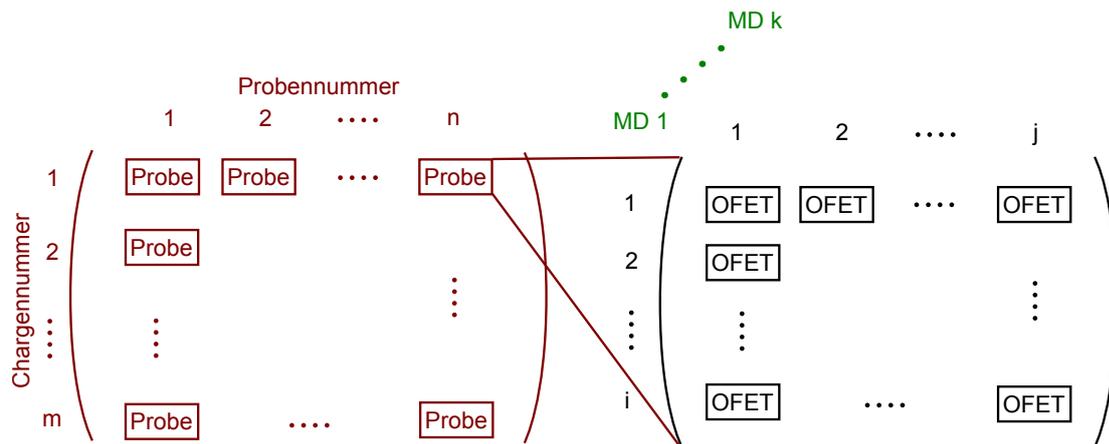


**Abb. 3.6.:** Strukturierung der Verwaltung der Messdaten und Metadaten für die OFETs auf einer Probe.

Die Messdaten einer bestimmten Messreihe an einem bestimmten OFET bestehen nun wiederum aus den in dieser Messreihe gemessenen Kennlinien. Diese Kennlinien sind in ihrer zeitlichen Abfolge bei der Messung in einem 1-Dimensionalen Array angeordnet. Hierbei wird wiederum das Prinzip verfolgt, dass die Metadaten zu einer bestimmten Kennlinie mit den eigentlichen Messwerten zusammen abgespeichert werden. Metadaten sind in diesem Zusammenhang unter anderem die oben beschriebenen Parameter für die Messung der Kennlinie, wie Wartezeiten (*Delays*), Integrationszeit, welcher Typ Kennlinie gemessen wurde, etc.

Dies bedeutet, dass man mit insgesamt 4 Indizes von einer kompletten, mehrfach gemessenen Probe zu einer einzelnen Kennlinie einer bestimmten Messung eines bestimmten OFETs herunter indizieren kann. Weiterhin sind auch die zur Interpretation der Messung benötigten Metadaten bereits in dieser Datenstruktur mit den Messdaten zusammen abgespeichert und damit sofort verfügbar.

Für eine umfangreichere Messreihe mit mehreren Proben kann man mit der vorgestellten Datenstruktur jede Probe einzeln behandeln und einzeln auswerten. Ab einer gewissen Anzahl von Proben lohnt es sich jedoch, noch eine weitere Abstraktionsebene einzuführen, die eine Behandlung von gleichartig hergestellten Proben in Form von Chargen erlaubt. Eine Charge



**Abb. 3.7.:** Zusammenhang zwischen Chargen und Proben mit ihren jeweiligen Indizes. Die weitere Indizierung der einzelnen Proben erfolgt dann wie in Abbildung (3.6) dargestellt.

bezeichnet dabei eine Gruppe von Proben, die als gleichartig angenommen werden, z.B. eine Produktionscharge von einem Tag. Diese Gruppe bildet daher wiederum ein 1-Dimensionales Array, mit einem eindeutigen Index für jede Probe. Zusätzlich werden für verschiedene Chargen, die nicht gleichartig sind, Chargennummern als weiterer Index vergeben. Damit erhält man wiederum eine Matrix aus Proben, wobei jede Probe wiederum die oben beschriebene Struktur hat, wie sie in Abbildung (3.6) dargestellt ist. Der Zusammenhang zwischen Chargen und Proben ist noch einmal anschaulich in Abbildung (3.7) dargestellt.

Für die hier vorgestellte Messreihe zur Alterung von OFETs unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen bedeutet die Einteilung der Proben in Chargen, dass immer 4 Proben gleichartig an einem Tag hergestellt werden und damit eine Charge ausmachen. Die Proben werden also innerhalb der Charge von 1 bis 4 indiziert. Für die verschiedenen Lagerungsbedingungen wurden insgesamt 7 Chargen hergestellt, so dass die Chargennummer folglich von 1 bis 7 indiziert wird. Der Unterschied zwischen den Chargen ist hier also nicht die Herstellung, sondern die Lagerungsbedingungen. Diese hier gemachte Einteilung soll nur als Beispiel für eine mögliche Einteilung von Proben und Messreihen in die hier vorgestellte Datenstruktur dienen.

Mit Hilfe dieser Strukturierten Organisation der Messdaten lässt sich die gesamte Messreihe zur OFET Alterung als ein einzelnes Objekt in Matlab handhaben und durch entsprechend dafür programmierte Funktionen auswerten.



# Materialien und Probenpräparation

Bei der verwendeten OFET Struktur handelt es sich um eine so genannte Top-Gate Struktur, die ihre Bezeichnung der Tatsache verdankt, dass das Gate des OFETs als letzte Schicht und damit eben „on top“ aufgebracht wird. Abbildung (4.1) zeigt die OFET Struktur im Querschnitt, Abbildung (4.2) eine Draufsicht auf eine fertig prozessierte Probe. Diese Art der Prozessierung hat zwei entscheidenden Vorteile für die Funktionsfähigkeit des OFETs. Zum Einen wird die aktive Halbleiterschicht im OFET-Aufbau bereits durch das darüber liegende Dielektrikum verkapselt und ist damit nicht mehr direkt den Einflüssen der umgebenden Atmosphäre ausgesetzt. Zum Anderen befindet sich bei dieser Art der Herstellung die eigentliche aktive Grenzfläche in der Mitte des Schichtstapels, zwischen Halbleiter und Dielektrikum. Diese beiden Schichten werden jedoch erst bei der Prozessierung aus der Lösung heraus aufgebracht, so dass die Grenzfläche immer frisch hergestellt wird. Dadurch hängt die Qualität dieser Grenzfläche und damit die Performance des OFETs nicht direkt von der Vorgeschichte und der Reinigung der Substratoberfläche ab. Weiterhin lassen sich durch die Benutzung eines Foliensubstrats die nachteiligen Effekte der  $\text{SiO}_2$  Oberfläche vermeiden, welche bei den häufig genutzten Siliziumsubstraten die Grenzfläche zum Halbleiter bildet [20]. Eine mittelbare Abhängigkeit vom Substrat durch z.B. mobile Ionen auf der Oberfläche besteht jedoch weiterhin, so dass auf eine gründliche Reinigung und eventuell Vorbehandlung des Substrates nicht verzichtet werden kann. Im Folgenden wird nun anhand des Schichtstapels aus Abbildung (4.1) im Detail auf die einzelnen Schichten eingegangen.

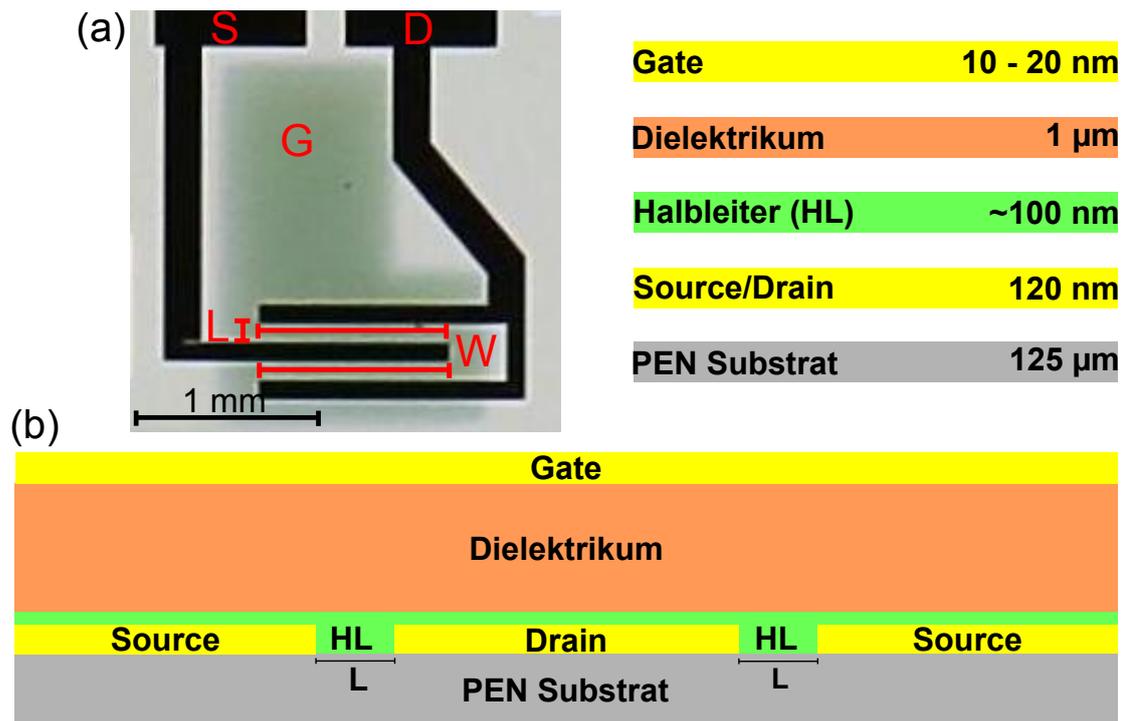
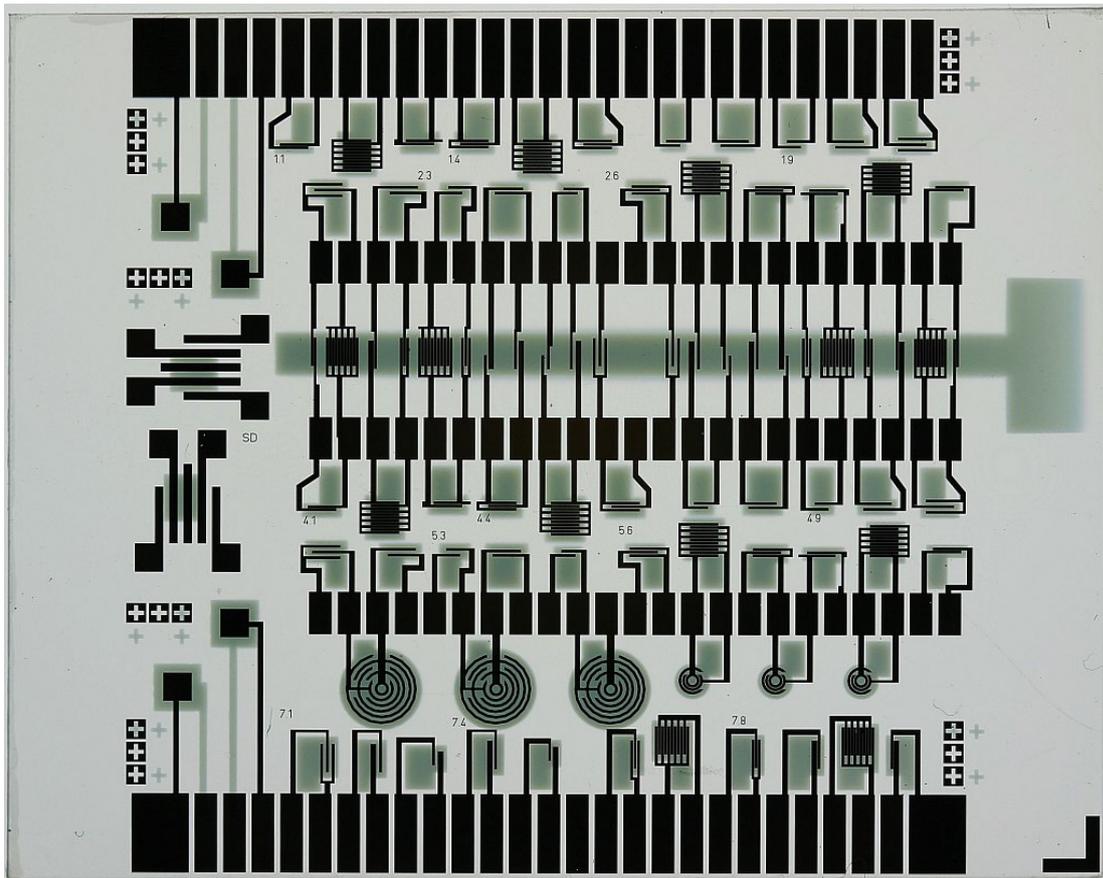


Abb. 4.1.: Schematischer Schnitt durch einen OFET im verwendeten Layout.



**Abb. 4.2.:** Draufsicht auf eine vollständig prozessierte Probe. Die Kantenlänge beträgt  $30 \times 38 \text{ mm}^2$  (H x B) auf einer  $125 \mu\text{m}$  dicken PEN Folie.

## 4.1. Substrat

Bei dem verwendeten Substrat handelt es sich um eine Polyethylenphthalat (PEN) Folie der Firma Dupont mit dem Markennamen Q65FA. Die Auswahl des Substrats geschah bereits im Hinblick auf die Verwendung von Rollendruckverfahren zur OFET Produktion, welche zwingend ein flexibles Substrat voraussetzen [5]. PEN Folien sind einerseits flexibel und bieten andererseits eine gute Hitzebeständigkeit bis ca. 150 °C bei gleichzeitig relativ geringen Kosten im Vergleich zu anderen Kunststofffolien. Auch die Maßhaltigkeit bei Temperaturschritten während der OFET Prozessierung ist bis 150 °C sehr gut. Eine gute Übersicht zu verschiedenen Foliensubstraten und ihren Eigenschaften gegenüber Hitze und Luftfeuchte bieten mehrere Veröffentlichung von bei Dupont arbeitenden Autoren [21], [22], [23]. Die verwendete Substratfolie hat außerdem eine speziell beschichtete Oberfläche, welche besonders niedrige Rauigkeiten aufweist und eine definierte Oberflächenenergie einstellt. Dies ist vor allem bei Druckprozessen eine wichtige Voraussetzung, da die Benetzung der Substratoberfläche dabei vor allem von der Oberflächenenergie des Substrats und der Oberflächenspannung der Tinte abhängt.

## 4.2. Source- und Drain-Elektroden

Die Source- und Drain-Elektroden bestehen bei den verwendeten Proben aus Gold, welches flächig aufgesputtert und danach lithographisch strukturiert wird. Gold ist hierbei ein viel genutztes Material aufgrund seiner hohen Ionisierungsenergie, bzw. seinem tief liegenden Fermilevel. Dadurch ist eine Injektion von Löchern in das HOMO eines organischen p-Halbleiters im Vergleich zu anderen Materialien relativ einfach möglich. Die Proben stellen damit einen Zwischenschritt dar auf dem Weg zu einem komplett mittels Druckverfahren hergestellten OFET, bei dem natürlich auch Source und Drain gedruckt werden müssten. Da dies jedoch aufgrund der niedrigen gewünschten Kanallänge  $L$  der OFETs, welche einen möglichst geringen Abstand zwischen Source- und Drain-Elektrode impliziert, die Schicht mit den weitaus höchsten Ansprüchen an das Auflösungsvermögen der Drucktechnik ist, wurde hier zunächst auf klassische Lithographie zurückgegriffen. Auf diese Weise schafft man einen bekannten und auch mit anderer Literatur [24], [1], [25] vergleichbaren Ausgangspunkt, der dann als Referenz dienen kann für einen zukünftigen, komplett gedruckten OFET [26], [4]. Hier zeigt sich auch ein weiterer Vorteil der Top-Gate Architektur: Source und Drain befinden sich direkt auf dem Foliensubstrat und damit auf einer definierten Oberfläche, deren Eigenschaften durch entsprechende Oberflächenmodifikationen unabhängig vom weiteren Aufbau des OFETs eingestellt werden können.

### 4.3. Self-Assembled Monolayer

Um eine möglichst gute Ladungsträgerinjektion von den Source-Drain Elektroden in den Halbleiter zu gewährleisten, werden die Elektroden mit einem *Self-Assembled Monolayer* (SAM) vorbehandelt. Dieser SAM senkt das Fermi-Niveau der Goldoberfläche nochmals herab, so dass eine möglichst gute Ladungsträgerinjektion in das tief liegende HOMO Level des Halbleiters gewährleistet wird. Dieser Effekt wird im Detail in [27] diskutiert. Die SAM-Schicht wird aus einer Lösung heraus aufgebracht. Es handelt sich dabei um ein proprietäres Material, welches vom Polytos<sup>1</sup> Projektpartner Merck<sup>2</sup> zur Verfügung gestellt wurde.

### 4.4. Halbleiter

Bei dem verwendeten Halbleiter handelt es sich um ein proprietäres Material auf Polytriamin (PTAA) -Basis, welches im Rahmen vom Polytos Projekt vom Projektpartner Merck zur Verfügung gestellt wurde. Details zur chemischen Struktur von strukturverwandten PTAA-Derivaten finden sich in [28], eine umfangreiche Arbeit zur Performance bei der Verwendung von unterschiedlichen Prozessen zum Verdrucken von PTAA-basierten Materialien in [1].

PTAA hat zwei große Vorteile, die es für die Nutzung in dem in Polytos angedachten Szenario, also dem Massendruck von elektronischen Schaltungen, interessant machen: Da wäre zum Einen die amorphe Struktur des Materials, welche die Verarbeitung im Vergleich zu polykristallinen Materialien stark vereinfacht. Speziell die Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften hängt bei polykristallinen Materialien stark von der Größe der kristallinen Bereiche und der Anzahl und Breite der Korngrenzen ab [24], [29]. Diese wiederum reagieren empfindlich auf die Eigenschaften der Substratoberfläche und auf die Temperaturen während der Herstellung des gesamten OFETs, was eine sehr genaue Prozesskontrolle erfordert. Dies steht dann aber wiederum dem Gedanken entgegen, eine möglichst kostengünstige Massenproduktion der OFETs zu realisieren. Diese ganze Problematik tritt bei amorphen Materialien, wie eben PTAA, gar nicht erst auf, was die reproduzierbare Herstellung von Proben auch im Labor und auch in dieser Arbeit stark erleichtert. Der zweite Vorteil liegt in der sehr guten Stabilität von PTAA gegenüber atmosphärischem Sauerstoff und Luftfeuchte, welche in [28] auf das sehr tief liegende HOMO Level von PTAA zurückgeführt werden, was eine Oxidation des Moleküls sehr unwahrscheinlich macht. Ein großer Nachteil von PTAA und amorphen Halbleitermaterialien im Allgemeinen ist jedoch die vergleichsweise niedrige erreichbare Ladungsträgermobilität, welche bei dem benutzten Material bei ca.  $6 - 9 * 10^{-3} \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$  liegt.

Ein umfangreiches Review zu den verschiedenen Klassen von organischen Halbleitern und ihren spezifischen Eigenschaften ist in Referenz [30] zu finden.

<sup>1</sup> Projektname: Polytos, Fördernummer: 13N10204, Projektsteckbrief

<sup>2</sup>Merck KgaA, Darmstadt

## 4.5. Dielektrikum

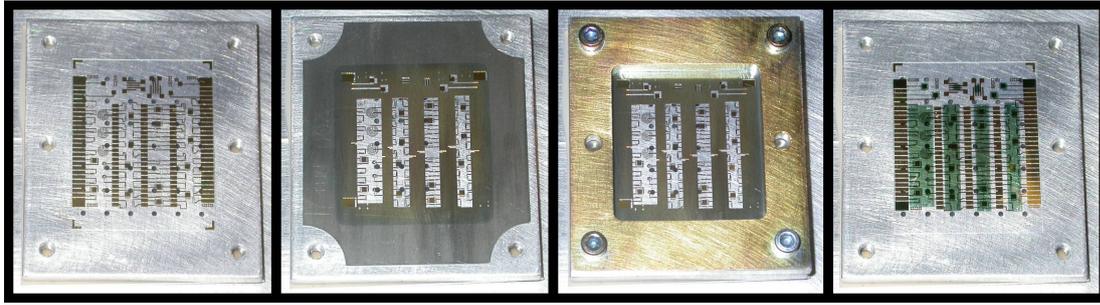
Bei dem Dielektrikum handelt es sich ebenfalls um ein proprietäres Polymer der Firma Merck, welches in Kombination mit dem Halbleiter und dem *Self-Assembled Monolayer* im Rahmen von Polytos zur Verfügung gestellt wurde. Da sich im fertigen OFET der eigentliche, aktive Kanal an der Grenzfläche von Halbleiter und Dielektrikum ausbildet, ist die Auswahl des Dielektrikums nicht trivial und ganz im Gegenteil von entscheidender Bedeutung für die Funktion des OFETs. Aus diesem Grund wurde auf eine von Merck bereits entwickelte und getestete Kombination von Halbleiter und Dielektrikum zurückgegriffen. Bei der Auswahl des Dielektrikums gibt es eine ganze Reihe von möglichen Effekten zu beachten, die im Folgenden näher erläutert werden.

Zunächst einmal ist auch das Dielektrikum in einem Lösungsmittel gelöst und wird aus dieser Lösung heraus auf die Halbleiterschicht aufgebracht. Daher ist das wichtigste Kriterium die Orthogonalität der Lösungsmittel von Dielektrikum und Halbleiter, so dass durch das Aufbringen des Dielektrikums nicht die darunterliegende Halbleiterschicht angegriffen wird. Weiterhin hängt die Funktion des OFETs stark von eventuellen Ladungsträgerfallen an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum ab. Diese Ladungsträgerfallen machen sich unter anderem durch eine Hysterese in der Transferkennlinie des fertigen OFETs, bemerkbar [31] und sollten daher unbedingt vermieden werden.

Merck hat sich bei der verwendeten Materialkombination für ein low-k Dielektrikum entschieden, also ein Dielektrikum mit einer niedrigen Dielektrizitätskonstante von  $\epsilon_r = 2,1$ . Dies widerspricht eigentlich dem intuitiven Ansatz, durch eine hohe Dielektrizitätskonstante eine möglichst hohe Gate-Kapazität bei niedrigen Spannungen am Gate zu erreichen. Allerdings können solche high-k Dielektrika durch das lokale Feld von, an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum, im Dielektrikum vorhandenen Dipolen zu einer Verbreiterung der Zustandsdichte im Kanal und damit zur stärkeren Besetzung von Ladungsträgerfallen im Halbleiter führen. Dies macht sich dann in einer geringeren Mobilität und in einer generellen Verschlechterung der OFET Eigenschaften bemerkbar. Eine ausführliche Erklärung zu diesem Effekt findet sich in [3] und [32].

## 4.6. Gate

Das Gate besteht ebenfalls aus Gold und wird unter Verwendung einer Schattenmaske mittels Sputterdeposition aufgebracht. Der entsprechende Ablauf ist in Abbildung (4.3) dargestellt. Bei diesem Schritt wird wiederum im Rahmen dieser Arbeit auf einen Druckprozess verzichtet, um die Anzahl der Prozessparameter und anderweitige Einflüsse auf die OFET Eigenschaften möglichst gering zu halten.



**Abb. 4.3.:** Prozessierung der Gate-Schicht (von links nach rechts): Die Probe wird über ein Haltevakuum fixiert, die Gate-Maske aufgesetzt und unter dem Mikroskop an entsprechenden Passermarken ausgerichtet. Danach wird die Position der Maske über einen Halterahmen fixiert und der gesamte Block aus Probenhalter, Probe, Maske und Halterahmen in die Sputterkammer gelegt. Nach dem Sputtern wird die Maske entfernt und die gewünschte Gate Struktur bleibt auf der Probe zurück.

## 4.7. Probenherstellung

Die Herstellung der in dieser Arbeit verwendeten Proben erfolgt durch *Spincoating* der polymeren Materialien und Sputterdeposition der Gate-Schicht. Der Prozess läuft dabei folgendermaßen ab:

1. Die zugelieferten Substrate mit bereits lithographisch strukturierten Source- und Drain-Strukturen werden vor der Prozessierung für 2 min in Propanol im Ultraschallbad gereinigt. Danach werden die Substrate mit sehr reinem Ethanol „zur Analyse“ abgespült und das restliche Ethanol mit Stickstoff abgeblasen.
2. Nach der Reinigung mit Lösungsmitteln erfolgt eine Plasmabehandlung der Substrate für 1,5 min in einem Argonplasma. Dadurch wird die Probe noch einmal von eventuell noch vorhandenen organischen Verunreinigungen gereinigt, die Benetzung der Oberfläche für das nachfolgenden *Spincoating* wird verbessert und die Goldoberfläche von Source und Drain wird aktiviert, um eine bessere Haftung des nachfolgend aufzubringenden Self Assembled Monolayers (SAM) zu erzielen.
3. Nach der Plasmabehandlung wird die Probe im Spincoater über ein Haltevakuum fixiert und mit der SAM Lösung benetzt. Nach einer Einwirkzeit von 1 min wird die überschüssige Lösung durch das Starten des Spincoaters von der Probe entfernt. Der Self Assembled Monolayer hat hauptsächlich die Aufgabe, das Fermi-Niveau von Gold an der Oberfläche noch weiter abzusenken, um im fertigen OFET eine gute Injektion von Löchern in die PTAA Schicht zu gewährleisten [24], [27].

4. Nach der SAM-Behandlung wird die Halbleiterschicht aufgebracht. Dazu wird das Halbleitermaterial in Toluol gelöst und die Lösung über der gesamten Probe verteilt. Danach wird der Spincoater gestartet und eine homogene Halbleiterschicht erzeugt. Nach dem *Spincoating* wird die Probe auf der Heizplatte getrocknet, um ein Verdampfen des restlichen Lösungsmittels zu erreichen.
5. Über der Halbleiterschicht wird das Dielektrikum nach dem selben Schema aufgebracht und ebenfalls auf der Heizplatte getrocknet. Hierbei ist zu beachten, dass die Oberfläche des Halbleiters im fertigen OFET dann die aktive Grenzfläche ist, an der sich der Kanal ausbildet. Das heißt, eine Kontamination der Halbleiteroberfläche ist unbedingt zu vermeiden, da diese sich ansonsten in den Kennlinien des OFETs bemerkbar machen könnte. Aus diesem Grund muss das Dielektrikum unmittelbar nach dem Halbleiter aufgebracht werden.
6. Das Gate wird wie in Abbildung (4.3) gezeigt per Sputterdeposition aufgebracht und über eine Schattenmaske strukturiert.

Um eine größtmögliche Reproduzierbarkeit bei der Probenherstellung zu gewährleisten, werden alle Lösungen beim *Spincoating* mittels Eppendorf-Pipetten auf der Probe verteilt. Auf diese Weise lässt sich das Volumen der benutzten Lösung einstellen, so dass einerseits nie zu wenig Lösung verteilt wird, so dass die Probe nicht komplett benetzt würde und andererseits auch kein Material verschwendet wird. Außerdem ist das Volumen der verwendeten Lösungen für jede Probe gleich.

## Versuchsplanung und elektrische Charakterisierung

Nach den in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Vorarbeiten kann nun mit den eigentlichen Alterungsversuchen begonnen werden. Dazu wird zunächst der Versuchsplan beschrieben, nach dem die Proben unter verschiedenen Bedingungen gealtert wurden. Danach folgt eine detaillierte Betrachtung des Nullzustandes der hergestellten OFETs direkt nach der Herstellung der jeweiligen Proben. Dies dient dazu, ein gutes Verständnis der hier betrachteten OFETs zu entwickeln, um dann hinterher die Effekte der Alterungsversuche beurteilen zu können. Danach wird die Alterung der OFETs unter den verschiedenen Versuchsbedingungen anhand der OFET-Parameter beschrieben und bewertet. Eine ähnliche Versuchsreihe an einzelnen OFETs und einem ebenfalls an Umgebungsatmosphäre sehr stabilen Polytriphenylamin Halbleiter ist in Referenz [33] beschrieben.

### 5.1. Lagerung der Proben

Ziel der Versuchsplanung war es, das Verhalten der betrachteten OFETs unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen zu testen. Konkret geht es dabei um die Frage, wie sich die OFET-Parameter unter den verschiedenen Lagerungsbedingungen verändern und welche physikalischen Effekte zu dieser Änderung führen. Für die Haltbarkeit von organischer Elektronik allgemein<sup>1</sup> und damit auch für OFETs sind vor allem folgende Eigenschaften der Atmosphäre von Bedeutung [34], [35], [33]:

- Sauerstoff in der Umgebungsluft als chemisch aktivstes Element.
- Wassergehalt in der Atmosphäre, ausgedrückt als relative Luftfeuchte.

<sup>1</sup>Organische Leuchtdioden (OLEDs), organische Photovoltaik (OPV) und organische Transistoren(OFETs)

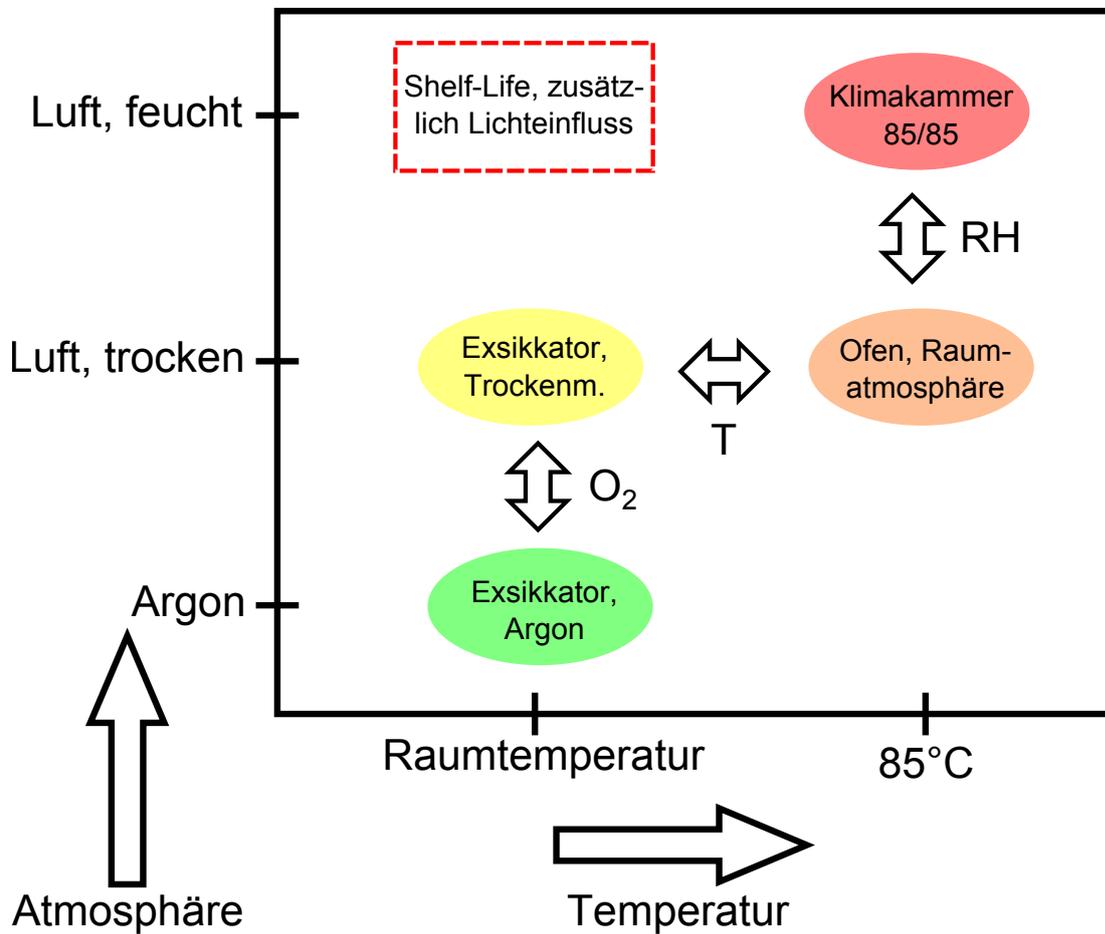
- Umgebungstemperatur, da die erwarteten Degradationsprozesse vermutlich temperaturaktiviert sein werden.

Weiterhin kommt als Randbedingung hinzu, dass nur ein begrenzter Zeitraum für die Versuchsdurchführung zur Verfügung steht und dass im Vorfeld praktisch nur bekannt war, dass auf dem Halbleitermaterial PTAA basierende OFETs prinzipiell über längere Zeit an Luft stabil ist [28], [1]. Es ist also nicht klar, nach welchen Degradationsmechanismen überhaupt zu suchen ist und ob tatsächlich die Halbleiterschicht im Mehrschichtsystem der OFETs der entscheidende Faktor für die Degradation ist. In dieser Ausgangssituation erscheint es sinnvoll, erst einmal mit einem Standardtest zu starten, um überhaupt einen Eindruck für die Haltbarkeit der hier betrachteten OFETs zu bekommen.

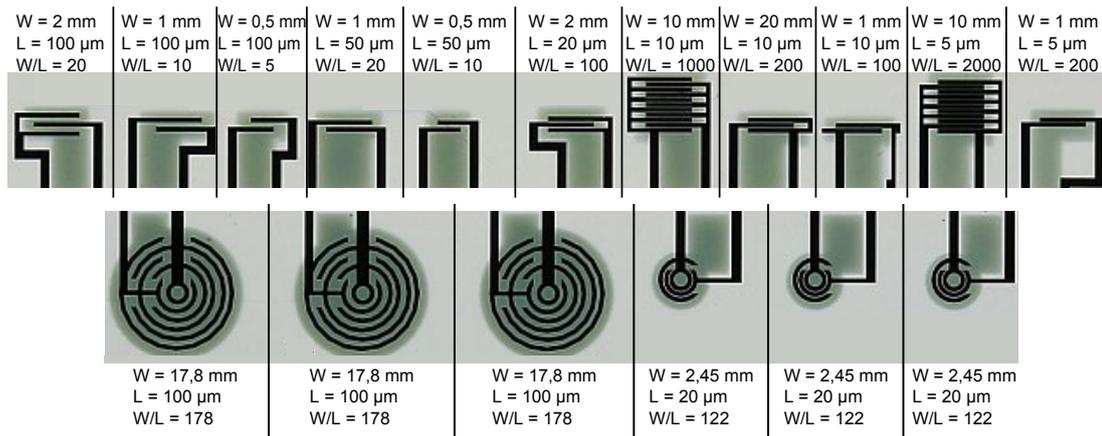
Eine häufig verwendete beschleunigte Klimaerprobung im Bereich der Automobilelektronik ist die Lagerung in einer Klimakammer bei einer Temperatur von 85 °C und einer relativen Luftfeuchte von 85 %. Dies wird im Folgenden als 85 °C/85%RH Lagerung bezeichnet. Dies sind vergleichsweise extreme Bedingungen, die die dort gelagerten OFETs mit allen drei oben genannten Punkten belasten, also Sauerstoff, Feuchte und erhöhte Temperatur. Weiterhin würde man vermuten, dass in dieser Form belastete OFETs relativ schnell ausfallen, so dass diese Lagerung als eine stark beschleunigte Alterung angesehen werden kann.

Zum Vergleich werden weitere Proben in einem Ofen bei einer Temperatur von 85 °C bei trockener Atmosphäre gelagert. Hier treffen von den drei oben genannten Faktoren also nur noch Sauerstoff und Temperatur zu. Die gewählten 85 °C dienen hier zum direkten Vergleich mit der Lagerung in der Klimakammer, so dass hieraus der Einfluss der Luftfeuchte bei erhöhter Temperatur ersichtlich wird. Als Referenz hierzu dient die Lagerung von weiteren Proben in einem mit Trockenmittel befüllten Exsikkator bei Raumtemperatur, so dass aus einem weiteren Vergleich mit der Ofenlagerung auf den Einfluss der erhöhten Temperatur geschlossen werden kann. Als weitere Referenz dient die Lagerung von weiteren Proben in einem mit Argon gefluteten Exsikkator bei Raumtemperatur, so dass hier auch noch der Sauerstoffeinfluss ausgeschlossen werden kann. Alle diese Lagerungen finden im Dunkeln statt, so dass hier Licht als Einflussfaktor weitgehend ausgeschlossen werden kann. Als Kontrast dazu dient eine letzte Lagerung, die hier als Umgebungs Lagerung oder *Shelf-Life*-Lagerung bezeichnet wird. Dabei werden die Proben sämtlichen Umgebungsbedingungen gleichzeitig ausgesetzt, also Raumtemperatur, Luftfeuchte und dem Umgebungslicht. Dies ist keine definierte Lagerung, soll aber ergänzend dazu dienen, einen qualitativen Eindruck von der Alterung der OFETs an realen Umgebungsbedingungen zu gewinnen. Die Bezeichnung *Shelf-Life* bezieht sich hier auf die erwartbare Lebensdauer eines OFET-basierten Produktes zwischen Herstellung und Verkauf, in der die verwendeten OFETs der Umgebungsatmosphäre ausgesetzt sind.

Zusammengefasst zeigt Abbildung (5.1) noch einmal die Versuchsplanung mit den jeweiligen Einflüssen auf die verschieden gelagerten OFETs. Um die bis zu diesem Punkt entwickelte



**Abb. 5.1.:** Schematische Darstellung der Alterungsversuche, geordnet nach den beiden Alterungsfaktoren Atmosphäre und Temperatur. Die Farbgebung der verschiedenen Lagerungen beschreibt die im Vorfeld vermutete Schwere der auf den OFET einwirkenden Belastungen.



**Abb. 5.2.:** Darstellung der verschiedenen OFET-Geometrien auf einer Probe wie in Abbildung (4.2) dargestellt. Oben: Kammstrukturen, unten: runde Geometrien.

Infrastruktur zum Messen der OFETs und zur Organisation der Messdaten auch gewinnbringend einsetzen zu können, bietet es sich an, eine möglichst große Stichprobe und damit eine große Anzahl von Proben zu testen. Dadurch lassen sich bei der späteren Auswertung der Versuche dann nicht nur qualitative Aussagen anhand von einzelnen Kennlinien treffen, sondern man kann ganz konkret die Verteilung eines OFET-Parameters und die Änderung dieser Verteilung über die Alterung bewerten.

Dies motiviert also eine möglichst hohe Anzahl an OFETs und damit einen entsprechend hohen Messaufwand. Was die Zahl der OFETs pro Probe angeht, befinden sich auf dem für die Messungen verwendeten Teil einer Probe 11 verschiedene OFET-Geometrien in Kammstruktur, wobei jede Geometrie jeweils 5 mal vorhanden ist, wenn man die Orientierung vernachlässigt. Dazu kommen 2 runde OFET-Geometrien, die jeweils 3 mal pro Probe vorhanden sind. Die verschiedenen Geometrien sind mit ihren geometrischen Eigenschaften noch einmal im Detail in Abbildung (5.2) dargestellt. Die Geometrien unterscheiden sich in ihrem  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis über mehr als 2 Größenordnungen und im Vorhinein kann man nicht davon ausgehen, dass sämtliche Alterungseffekte unabhängig von der OFET-Geometrie sein werden. Es ist also notwendig, genügend Proben herzustellen, so dass von jeder Geometrie genügend OFETs vermessen werden können. Mit dem Fokus auf die beschleunigten Alterungen unter 85°C/85%RH und 85°C ergibt sich folgende Verteilung der Proben auf die Lagerungen:

- **Argon-Atmosphäre:** - 4 Proben und damit 20 OFETs pro Kamm-Geometrie. Unter Argon Atmosphäre werden keine großen Veränderungen der OFET-Kennlinien erwartet. Diese Lagerung dient als Referenz und als best case für die Alterungsbedingungen.
- **Exsikkator mit Trockenmittel** - 4 Proben und damit 20 OFETs pro Kamm-Geometrie.

Auch die Lagerung im Exsikkator an trockener Umgebungsatmosphäre dient als Referenz. Aus [28] ist bekannt, dass hier durchaus eine Lebensdauer von mehreren 1000 Stunden erwartet werden kann, so dass eine Prüfung bis zum Ausfall eines Großteils der OFETs im vorhandenen Zeitrahmen wahrscheinlich nicht durchführbar ist.

- **Shelf-Life:** 4 Proben und damit 20 OFETs pro Kamm-Geometrie. Die hier als *Shelf-Life* bezeichnete Lagerung an Umgebungsatmosphäre und Umgebungslicht ist aufgrund dieser Bedingungen nicht eindeutig definiert. Diese Testreihe dient daher einer qualitativen Abschätzung zur Alterung der OFETs unter realen Umgebungsbedingungen.
- **Ofen:** 8 Proben und damit 40 OFETs pro Kamm-Geometrie. Bei der Lagerung im Ofen bei 85 °C wird eine beschleunigte Alterung im Vergleich zu den drei oben beschriebenen Lagerungen erwartet.
- **Klimakammer:** 8 Proben und damit 40 OFETs pro Kamm-Geometrie. Analog zur Ofenlagerung wird für die 85 °C/85%RH Lagerung in der Klimakammer die gleiche Probenzahl gewählt um hier einen direkten Vergleich zwischen diesen beiden Lagerungen ziehen zu können. Aufgrund der hohen Temperatur und der zusätzlichen hohen Luftfeuchte wird erwartet, dass unter diesen Lagerungsbedingungen die Alterung am stärksten beschleunigt sein wird.

Insgesamt wurden für die präsentierte Messreihe also 28 Proben hergestellt und der Nullzustand der elektrischen Eigenschaften nach der Herstellung vermessen. Dieser Nullzustand dient als Ausgangspunkt für die Betrachtung der elektrischen Eigenschaften während der Alterung der Proben. Weiterhin lässt sich eine Betrachtung über die Gesamtheit der 28 Proben im Nullzustand anstellen, woraus sich bereits eine ganze Reihe von Erkenntnissen zu Schwankungen in der Prozessierung der Proben und zum Layout und den OFET-Geometrien gewinnen lassen. Eine detaillierte Betrachtung des Nullzustands erfolgt in Kapitel (6).

Bei der eigentlichen Durchführung der Alterungsversuche werden die Proben unter den entsprechenden Umgebungsbedingungen gelagert und nach einem Zeitraum von, je nach Lagerung, einer Woche bis zu mehreren Monaten im Messplatz gemessen. Die elektrische Charakterisierung erfolgt also unter Umgebungsbedingungen, allerdings im Dunkeln. Da die Charakterisierung einer einzelnen Probe mit dem benutzen Messprogramm etwas über 2 Stunden dauert, lassen sich nicht in jedem Fall alle 4 und auf keinen Fall alle 8 Proben eines Lagerungsversuchs am selben Tag messen. Aus logistischen Gründen ist es daher also notwendig, die Proben nach der Entnahme aus der entsprechenden Lagerung vor den eigentlichen Messungen zwischen zu lagern. Hierfür wurde die Lagerung in einem Exsikkator mit Trockenmittel gewählt, da hier einerseits über einen Zeitraum von wenigen Tagen nur ein zu vernachlässigender Einfluss zu erwarten ist [28] und andererseits die Probenentnahme

sehr einfach ist. Durch die Analyse der 4 Proben, die über Monate im Exsikkator mit Trockenmittel gelagert werden, lässt sich im Nachhinein feststellen, ob die Alterung tatsächlich zu vernachlässigen ist. Dieser Punkt wird im Detail in Kapitel (7) betrachtet, es sei jedoch bereits jetzt erwähnt, dass sich diese Annahme als zutreffend erwiesen hat.

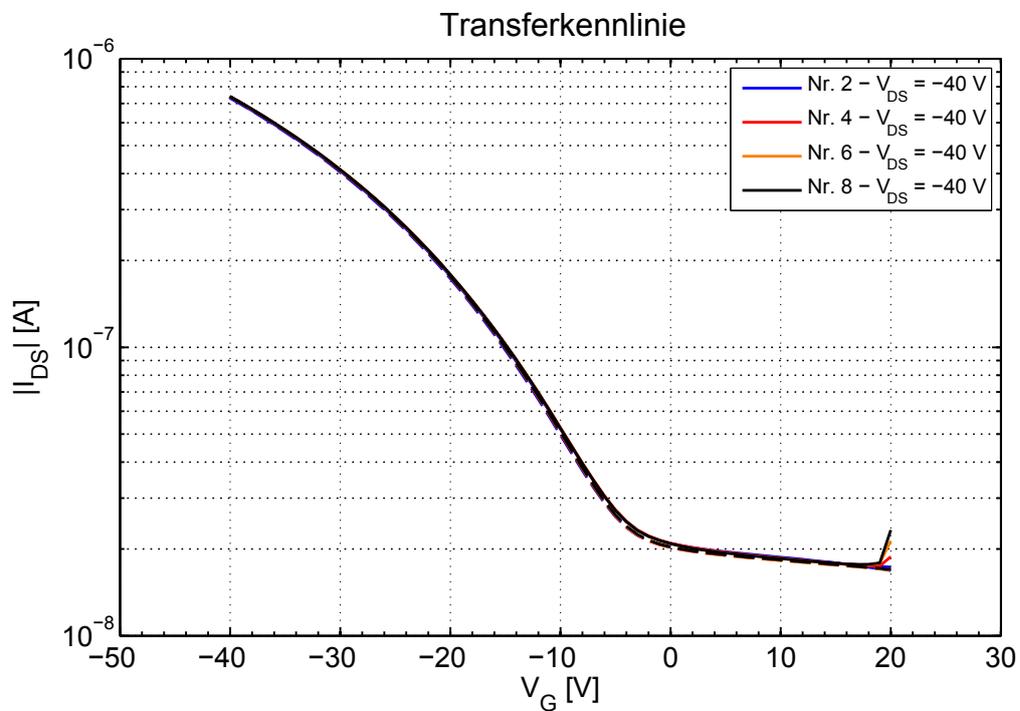
## 5.2. Elektrische Charakterisierung

Die elektrische Charakterisierung beschränkt sich in der vorliegenden Arbeit auf das Messen von Ausgangs- und Transferkennlinien der untersuchten OFETs. Aus diesen Kennlinien lassen sich, wie in Kapitel (3.5) vorgestellt, eine ganze Reihe an OFET-Parametern extrahieren. Um jedoch möglichst viele Erkenntnisse aus möglichst wenigen Kennlinien ziehen zu können, ist es notwendig, die Messparameter im Vorfeld möglichst geschickt zu wählen. Die Limitierung für die Anzahl der Kennlinien ist wiederum die Zeit, da pro Probe 61 OFETs vermessen werden und, wie oben beschrieben, insgesamt 28 Proben regelmäßig zwischen den Lagerungen vermessen werden müssen. Wenn das Messprogramm also pro OFET nur eine Minute länger dauert als notwendig, ergibt sich daraus für die gesamte Probe ein Zeitverzug von über einer Stunde, was wiederum zu Zeitverzögerungen von mehreren Tagen bei den Messungen der Proben aus den verschiedenen Lagerungen führen kann.

Stellschrauben für die Dauer der Charakterisierung eines OFETs sind zum Einen die Parameter für die Messung der Kennlinien und zum Anderen die Anzahl der Kennlinien. Die in der Messsoftware einstellbaren Parameter für die Messung einer Kennlinie sind in Kapitel (2) beschrieben. Relevant für den zeitlichen Ablauf sind zunächst einmal die Wartezeit und die Integrationszeit an jedem Messpunkt. Die verschiedenen *Delays* sind vor allem dazu gedacht, eine Hysterese in den Kennlinien zu charakterisieren. Eine Hysterese wird ganz allgemein dann beobachtet, wenn die Ladungsverteilung im OFET den während der Messung angelegten Potenzialen nicht mehr schnell genug folgen kann. In diesem Fall befindet sich der OFET bei der Hin- und Rückmessung nicht mehr im gleichen Zustand und es ergibt sich jeweils eine andere Kennlinie. Dies wird als Hysterese bezeichnet. Einen guten Überblick über die verschiedenen Effekte, die zu einer Hysterese führen können, findet man in [31].

Um nun also die Werte für die drei *Delay*-Parameter einstellen zu können, ist eine Betrachtung der Hysterese in Abhängigkeit von den eingestellten *Delays* notwendig. Dazu zeigt Abbildung (5.3) die Transferkennlinie eines OFETs, welche drei mal hintereinander mit verschiedenen *Delays* gemessen wurde. Hier ist keine Hysterese zu erkennen, unabhängig von den eingestellten Messdelays. Dies ist für die benutzte Materialkombination tatsächlich der Normalfall, wie auch eine weitergehende Betrachtung in Kapitel (6) zeigt. Um also die Messgeschwindigkeit zu maximieren, werden die Parameter Messdelay, Anfangsdelay und Umkehrdelay für die hier gezeigten Versuche zu 0 gesetzt.

Neben den *Delays* ist die Integrationszeit pro Messpunkt ein weiterer kritischer Parameter



4.26.16 - W = 1 mm - L = 10  $\mu$ m - W/L = 100 - OFET Nr. 2.9 - MD 1

	Nr.	Datum	Uhrzeit	Vkonst...	Vstart [V]	Vende [V]	Anzahl Schritte	Anfangs Delay [s]	Mess Delay [s]	Umkehr Delay [s]	NPLC	Strom Begr. [A]	Relax Zeit [s]
1	2	01.09.2011	10:51	-40	20	-40	60	1	1	1	6	0.0100	0
2	4	01.09.2011	10:53	-40	20	-40	60	0.1000	0.1000	0.1000	6	0.0100	0
3	6	01.09.2011	10:54	-40	20	-40	60	0.0100	0.0100	0.0100	6	0.0100	0
4	8	01.09.2011	10:54	-40	20	-40	60	0	0	0	6	0.0100	0

**Abb. 5.3.:** Einfluss von verschiedenen Delays auf die Messung einer Transferkennlinie. Die jeweils verwendeten Delays sind im Detail in der unteren Tabelle dargestellt.

für die Dauer einer Messung. Dieser Parameter gibt an, wie lange das Messgerät an einem Messpunkt verweilt und die Messwerte für Strom und Spannung mittelt. Durch eine längere Integrationszeit lässt sich das Rauschen in den gemessenen Kennlinien vor allem bei niedrigen Strömen stark verringern, da Störeffekte durch die in den Messkabeln induzierten Ströme heraus gemittelt werden. In Absprache mit den Polytos Projektpartnern hat man sich hier auf eine Integrationszeit von 6 NPLC geeinigt, was im europäischen Stromnetz einer Integrationszeit von  $6 \cdot \frac{1}{50} \text{s} = 120 \text{ms}$  entspricht. Aus dem Messdelay, der Integrationszeit pro Messwert und der vom Messgerät vorgegebenen Einschwingzeit beim Anlegen der jeweiligen Spannungen ergibt sich die gesamte Messzeit für einen Messpunkt.

Nachdem sämtliche *Delays* und die Integrationszeit, wie oben beschrieben, festgelegt sind, hängt die Messdauer pro Kennlinie nun also vor allem an der Anzahl der Messpunkte, welche die Kennlinie ausmachen. Dies ist letzten Endes ein willkürlich zu wählender Wert, es existiert jedoch eine Empfehlung von mindestens 25 Messpunkten im IEEE 1620 Standard [13]. Da jedoch nur ein Teil der Kennlinie für die Extraktion der Parameter verwendet wird, erscheinen insgesamt 25 Messpunkte als zu wenig, um eine gute Parameterberechnung durchführen zu können. Für die hier vorgestellten Messungen wird daher, ebenfalls in Absprache mit den Polytos Projektpartnern, eine Schrittweite von 1V für die in der jeweiligen Kennlinie durchgefahrene Spannung vorgegeben. Dies entspricht für den gewählten Messbereich 61 Messpunkten in der Transferkennlinie und 46 Messpunkten in der Ausgangskennlinie. Da die Kennlinien jeweils einmal von „Off“ nach „On“ und zurück von „On“ nach „Off“ gemessen werden, verdoppelt sich dieser Wert noch einmal.

Mit der obigen Betrachtung ist nun festgelegt, wie die Messung einer Kennlinie im Detail aussehen soll. Es bleibt also zu klären, welche Kennlinien und in welchen Messbereichen gemessen werden soll, um möglichst viele Informationen über den OFET zu erhalten. Dazu lohnt es sich, noch einmal die beiden Formeln aus Kapitel (3.5) zu betrachten, die die Kennlinien des OFETs für den linearen- und den Sättigungsbereich modellieren:

$$I_{DS,lin} = \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} \quad (5.1)$$

$$I_{DS,sat} = \frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th})^2 \quad (5.2)$$

Da  $I_{DS}$  in zwei Bereichen modelliert wird, sollte man auch beide Bereiche elektrisch vermessen, um ein vollständiges Bild des OFETs zu erhalten. Dies bedeutet für die Transferkennlinien, dass man mindestens zwei Kennlinien bei zwei verschiedenen Drain-Source Spannungen braucht. Dabei sollte eine Kennlinie bei einem niedrigen, konstanten  $V_{DS}$  Wert gemessen werden, bei dem der Kanal möglichst wenig durch das Feld zwischen Drain und Source beeinflusst wird. Bei dieser Transferkennlinie erwartet man dann nach Gleichung (5.1) einen linearen Zusammenhang zwischen  $I_{DS}$  und  $V_G$ , was als Kriterium dienen kann, um die Wahl eines geeigneten  $V_{DS}$  Werts zu überprüfen. Für die hier vorgestellten OFETs wurde dazu

$V_{DS} = -5\text{V}$  gewählt. Die zweite Transferkennlinie wird dann bei einem möglichst hohen  $V_{DS}$  Wert gemessen, so dass der OFET definitiv in Sättigung ist. Hierbei erwartet man dann nach Gleichung (5.2) eine quadratische Abhängigkeit des Drain-Stroms von  $V_G$ , was wiederum zur Überprüfung der Wahl von  $V_{DS}$  dienen kann. Die hier zu diesem Zweck verwendete Spannung ist  $V_{DS} = -40\text{V}$ .

Eine Konsequenz aus dieser Zweiteilung ist, dass die aus den Transferkennlinien extrahierten Parameter jeweils doppelt vorkommen, einmal für den linearen und einmal für den Sättigungsbereich. Dies ist vor allem für die Parameter Mobilität ( $\mu$ ) und Schwellspannung ( $V_{Th}$ ) interessant, welche für beide Bereiche verglichen werden können. Dies wird in Kapitel (6) ausführlich diskutiert.

Nachdem die Anzahl der Transferkennlinien nach den obigen Überlegungen auf 2 festgelegt ist, bleibt der Messbereich als letzte offene Variable. Dazu ist zunächst einmal zu sagen, es sich bei den hier untersuchten OFETs im Nullzustand um „normally off“ OFETs handelt. Dies bedeutet, bei einer Gate-Spannung von  $0\text{V}$  ist der OFET ausgeschaltet und es existiert kein Ladungsträgerkanal. Wenn man also den kompletten Einschaltvorgang des OFETs beobachten will, sollte  $V_G = 0\text{V}$  unbedingt im Messbereich sein, damit man den OFET auch im ausgeschalteten Zustand beobachtet. Weiterhin ist es ratsam, mit der Messung noch weiter bei positiven Gate-Spannungen zu beginnen, damit man sicher sein kann, den OFET auch wirklich aus zu schalten, selbst wenn er sich während der Alterung zu einem „normally on“ OFET verändern sollte. Außerdem werden für kleine Kanallängen im Nullzustand Kurzkanaleffekte beobachtet, so dass auch in diesem Fall der OFET erst für positive Gate-Spannungen komplett ausgeschaltet wird. Dieser Fall wird wiederum in Kapitel (6) noch einmal im Detail beleuchtet. Aufgrund dieser Überlegungen wurde für den Start des Messbereichs der Transferkennlinien eine Gate-Spannung von  $V_G = +20\text{V}$  gewählt. Das Ende des Messbereichs ergibt sich aus der Überlegung, dass man den OFET auch komplett eingeschaltet beobachten möchte, also bei einer möglichst weit negativen Gate-Spannung. Diese ist begrenzt durch den Messbereich des Messgeräts und liegt bei  $V_G = -40\text{V}$ .

Die Ausgangskennlinien dienen vor allem zur Überprüfung der Transistoreigenschaften des OFETs und zum Test auf Nichtidealitäten in diesen Eigenschaften. Dabei geht es vor allem um folgende Punkte:

- Ab wann geht der On-Strom des OFETs in Sättigungsbereich? Dies sollte in einem idealen OFET bei  $V_{DS} = V_G$  der Fall sein [2].
- Wie gut sättigt der OFET ab für  $V_{DS} \geq V_G$ ? Verbleibt  $I_{DS}$  tatsächlich auf einem Plateau oder steigt es weiter an? Ein schlechtes Sättigungsverhalten kann ein Hinweis sein auf hohe Off-Ströme und/oder Kurzkanaleffekte.
- Schneidet die Kennlinie den Nullpunkt des Koordinatensystems? Bei  $V_{DS} = 0\text{V}$  existiert

keine treibende Kraft für einen Stromfluss von Source zu Drain. Wenn hier also ein Strom an Drain gemessen wird, kann es sich nur um einen Leckstrom über das Gate handeln, welches während der Messung der Ausgangskennlinie auf einem konstanten Potential gehalten wird. Wenn dies im Ausgangskennlinienfeld direkt sichtbar wird, ist das ein starker Hinweis darauf, dass der Gate-Leckstrom bei diesem OFET nicht mehr vernachlässigt werden kann.

- Handelt es sich bei dem gemessenen OFET tatsächlich um einen „normally off“ OFET? Dies lässt sich verifizieren durch die Messung einer Ausgangskennlinie bei  $V_G = 0\text{V}$ .
- Wie verhält sich der OFET kurz nach Erreichen der erwarteten Schwellspannung? Eine Verifizierung erfolgt hier durch eine Ausgangskennlinie bei einer entsprechend gewählten Gate-Spannung, die nur leicht oberhalb der Schwellspannung liegt. Für die vorgestellten OFETs ist das  $V_G = -5\text{V}$ .
- Erreicht der OFET für die maximalen Werte von  $V_{DS}$  und  $V_G$  den gleichen maximalen Strom in der Ausgangskennlinie wie in der Transferkennlinie? Falls dies nicht der Fall ist, kann man eine Alterung des OFETs schon während den Messungen vermuten. Zur Überprüfung wird aufgrund des Messbereichs der Transferkennlinien eine Ausgangskennlinie bei  $V_G = -40\text{V}$  benötigt, deren Messbereich bis  $V_{DS} = -40\text{V}$  reicht. Dadurch wird praktisch auch der Messbereich für alle anderen Ausgangskennlinien bis auf  $V_{DS} = -40\text{V}$  vergrößert, da es kaum Sinn macht, im Ausgangskennlinienfeld verschiedene Messbereiche für  $V_{DS}$  zu verwenden.

Durch die oben beschriebenen Überlegungen sind also schon drei Ausgangskennlinien, sowie eine Grenze des Messbereichs bei  $V_{DS} = -40\text{V}$  festgelegt. Für den Messbereich ergibt sich die andere Grenze aus der Überlegung, dass man in einem gewissen Bereich um den Nullpunkt des Koordinatensystems herum messen sollte, um den Nulldurchgang der Ausgangskennlinie wirklich gut bewerten zu können. Daher beginnt die Messung der Ausgangskennlinie bei  $V_{DS} = +5\text{V}$ . Auch die Anzahl der Ausgangskennlinien ergibt sich aus diesen Überlegungen: Bereits explizit beschrieben sind Ausgangskennlinien bei  $V_G = 0\text{V}$ ,  $V_G = -5\text{V}$  und  $V_G = -40\text{V}$ . Für die Beobachtung, wann der OFET tatsächlich in Sättigung geht, sollte eine weitere Kennlinie gewählt werden, bei der der OFET sich einerseits weit im an-Zustand befindet, aber andererseits der Punkt, an dem sie Sättigung eintreten sollte, also  $V_{DS} = V_G$ , noch gut im Messbereich der Ausgangskennlinie zu sehen ist. Dies ist bei dem gewählten Messbereich der Fall für eine Ausgangskennlinie bei  $V_G = -20\text{V}$ .

Damit sind nun zwei Transferkennlinien und vier Ausgangskennlinien mit ihren entsprechenden Messbereichen und den jeweils konstanten Spannungen definiert. Die gemessenen Kennlinien sind beispielhaft für drei verschiedene OFET-Geometrien in Abbildung (6.1) in Kapitel (6) dargestellt. Zusätzlich wird zwischen den Kennlinien-Messungen eine sogenannte

Relax-Messung eingeführt, bei der sämtliche Terminals des OFETs auf 0V gehalten werden und eventuelle, aus dem OFET abfließende Ströme gemessen werden. Dies soll dazu dienen, den OFET vor jeder Kennlinien-Messung in den gleichen Ausgangszustand zu bringen. Für die hier vorgestellten OFETs hat sich eine Relax-Zeit von 5s bewährt, nach der sämtliche transienten Ströme abgeklungen sind.

### 5.3. Elektrische Defektkriterien

Nachdem nun in Kapitel (3) die Extraktion der OFET-Parameter im Allgemeinen und in Kapitel (5.2) die konkret gemessenen Kennlinien in der hier Betrachteten Messreihe definiert wurden, muss für die folgende Betrachtung der OFET-Parameter noch definiert werden, ab wann ein OFET von der Betrachtung ausgenommen und als defekt deklariert wird. Diese Entscheidung ist wichtig, da nach Kapitel (3) die Betrachtung der ermittelten Parameter eines OFETs nur dann Sinn macht, wenn er sich zumindest näherungsweise entsprechend dem Modell verhält, was die Grundannahme für die Extraktion der Parameter war. Dabei stellt sich entsprechend Kapitel (3) vor allem die Frage, wie ausgeprägt die  $V_G$  Abhängigkeit der Mobilität ist. Ein Kriterium wird dabei über den Mindestbereich an benötigten Messpunkten für die Geradenanpassung zur Bestimmung von  $\mu$  und  $V_{Th}$  realisiert. Weiterhin können auch exzessive Leckströme über das Gate die OFET-Kennlinien beeinflussen, so dass auch dieser Fall über ein entsprechendes Kriterium betrachtet werden muss.

Zusätzlich zu den Kriterien, die sich aus dem Modell zur Beschreibung der OFET-Kennlinien ableiten, ergeben sich Kriterien aus den Anforderungen einer möglichen Schaltung, in der diese OFETs perspektivisch verwendet werden sollen. Eine entsprechende Betrachtung der Variation von elektrischen Parametern einzelner OFETs in ihrer Auswirkung auf eine Inverterschaltung wird in Referenz [36] diskutiert.

Im ersten Ansatz werden für die in dieser Arbeit durchgeführte Messreihe folgende Kriterien angesetzt:

- Der Messbereich zur Anpassung der Gerade bei der Bestimmung von  $\mu$  und  $V_{Th}$  muss mindestens 10% des gesamten Messbereichs betragen. Bei 61 Messpunkten für eine Transferkennlinie in einer Richtung müssen also mindestens 6 Messpunkte für die Geradenanpassung benutzt werden.
- Der maximale Gate-Leckstrom  $I_{G,Max}$  darf in jeder gemessenen Transferkennlinie nicht mehr als das doppelte des maximalen Drain-Source Stroms  $I_{DS,Max}$  betragen.
- Das minimale On/Off-Verhältnis muss in allen gemessenen Transferkennlinien mindestens 10, also mindestens eine Größenordnung betragen.

- Der maximale gemessene Drain-Source Strom muss für jede Transferkennlinie mindestens 3 nA betragen.

Diese Defektkriterien sind zunächst einmal relativ willkürlich und sehr tolerant gewählt. So ist zum Beispiel ein Gate-Leckstrom von mehr als dem Doppelten des Drain-Source Stroms sicher nicht erwünscht in einer realen Schaltung. Diese Defektkriterien stellen jedoch einen groben Filter dar, um völlig ausgefallene OFETs von der Auswertung auszuschließen. Eine detailliertere Betrachtung der Defektkriterien folgt dann in Kapitel (6) anhand der dort gemachten Beobachtungen.

## Nullzustand der elektrischen Eigenschaften

### 6.1. Kennlinien im Nullzustand

Um eine Aussage zur Änderung von elektrischen Parametern der OFETs durch die verschiedenen Alterungen machen zu können, ist zunächst einmal eine Messung und Auswertung im Nullzustand notwendig. Dazu zeigt Abbildung (6.1) beispielhaft die Transfer- und Ausgangskennlinie von drei OFETs unterschiedlicher Geometrie im Nullzustand nach der Prozessierung. An dieser Darstellung lassen sich bereits einige wichtige Eigenschaften der verschiedenen OFET-Geometrien ablesen:

- **Kurzkanaleffekte** Im Vergleich der Transferkennlinien von sehr kleinen  $L$  in Abbildung (6.1 a) bis zu sehr großen  $L$  in Abbildung (6.1 c) erkennt man sehr deutlich, dass sich das Einschaltverhalten stark unterscheidet. Die OFET-Geometrie mit  $L = 100 \mu\text{m}$  zeigt einen vergleichsweise abrupten Einschaltvorgang bei einer Schwellspannung nahe bei 0 V, wie man es für einen in Akkumulation arbeitenden OFET erwarten würde [2]. Dagegen zeigen sich bei einem  $L$  von nur  $5 \mu\text{m}$  große Ströme im Sub-Threshold Bereich, also für positive Gate-Spannungen. Man benötigt eine hohe, positive Gate Spannung, um diese Ströme zu unterdrücken. Dies bedeutet, dass bereits messbar hohe Ströme ohne das elektrische Feld am Gate von Source zu Drain fließen, was als sogenannter Kurzkanaleffekt bezeichnet wird. Ein weiterer Kurzkanaleffekt zeigt sich im Sättigungsverhalten der Ausgangskennlinien, hier am besten zu sehen für die Ausgangskennlinie bei  $V_G = -20\text{V}$ . Diese Kennlinie sollte für  $V_{DS} = V_G$ , also für  $V_{DS} = -20\text{V}$  in Sättigung gehen, also in dieser Auftragung ein Plateau bilden, was sie für Große  $L$  in Abbildung (6.1 c) auch in guter Näherung tut. Für kleine  $L$  in Abbildung

(6.1 a) steigt der Strom hingegen kontinuierlich weiter an, auch für  $V_{DS} \geq V_G$ . Diese Kurzkanaleffekte sind auch aus der klassischen Silizium Technologie bekannt [15] und entstehen, sobald das elektrische Feld am Gate nicht mehr den gesamten Strom zwischen Source und Drain kontrollieren kann. Dies passiert typischerweise, wenn der Abstand  $L$  zwischen Source und Drain zu klein wird im Verhältnis zur Gate-Kapazität.

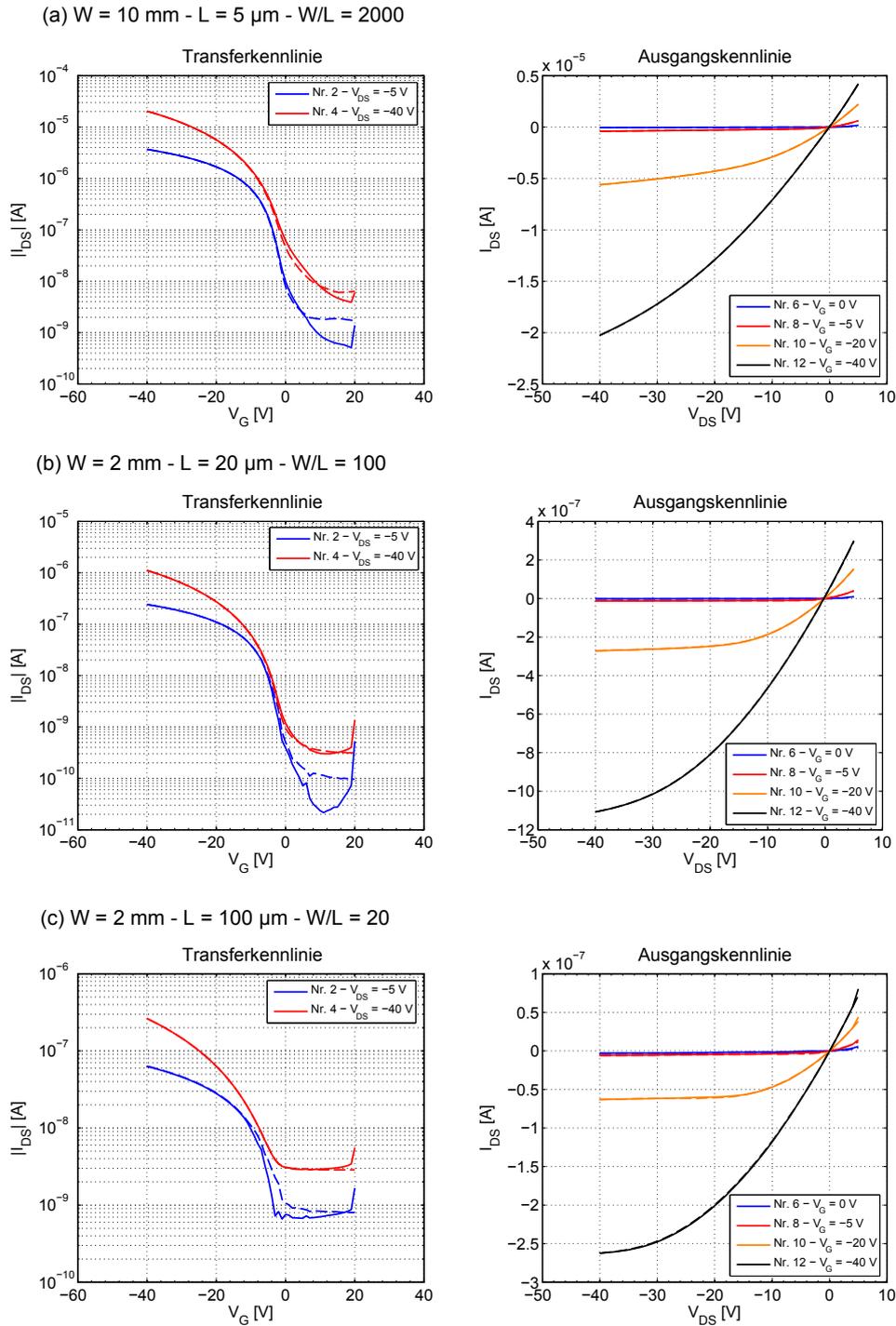
- **Hysteresen** Sämtliche Kennlinien in Abbildung (6.1) wurden sowohl von „Off“ nach „On“, als auch wieder zurück von „On“ nach „Off“ gemessen, um eventuelle Hysteresen in den Kennlinien erkennbar zu machen [13], [31]. Man erkennt jedoch nur sehr geringe Hysteresen in den Transferkennlinien, welche sich vorwiegend im „Off“-Bereich der Kennlinie, also bei sehr niedrigen Strömen, bemerkbar machen. Dies lässt den Schluss zu, dass die in [31] beschriebenen Mechanismen bei den betrachteten OFETs gar nicht, oder nur in einem sehr geringen Umfang eine Rolle spielen. Konkret bedeutet das, dass die Grenzfläche zwischen Dielektrikum und Halbleiter sehr gut ist, so dass im Nullzustand keine für die Hysterese relevanten Ladungsträgerfallen an dieser Grenzfläche vorhanden sind.
- **Ladungsträgerinjektion** Die Ausgangskennlinien verlaufen in allen gezeigten Beispielen linear durch (0,0), also den Ursprung des Koordinatensystems. Dies deutet auf einen guten ohmschen Kontakt zwischen den Source- und Drain-Elektroden und dem Halbleiter hin. Ansonsten wären in diesen Kennlinien Abweichungen vom linearen Verlauf zu erkennen. Dieser gute ohmsche Kontakt ist typisch für das verwendete Materialsystem. Für die hergestellten Proben konnten keine Injektionsprobleme bei der Nullzustandsmessung festgestellt werden. Einen Überblick über mögliche Probleme bei der Ladungsträgerinjektion von den Elektroden in den Halbleiter findet man zum Beispiel in [2].

Da auf den benutzten Substraten insgesamt 13 verschiedene Geometrien<sup>1</sup> von Source und Drain zur Verfügung stehen, bietet es sich an, die verschiedenen elektrischen Parameter in Abhängigkeit der Geometrie zu betrachten. Zu diesem Zweck wird zunächst einmal für eine Übersicht über alle Geometrien der betrachtete Parameter gegen das  $W$  zu  $L$  Verhältnis der verschiedenen OFET-Geometrien aufgetragen. Zusätzlich werden die 5 verschiedenen Kanallängen  $L$  der auf dem Substrat vorhandenen Geometrien farblich voneinander abgegrenzt, so dass auch Geometrien mit gleichem  $\frac{W}{L}$ , aber unterschiedlichem  $L$  voneinander unterschieden werden können.

In den folgenden Abbildungen stellt jeder Punkt den aus den Kennlinien extrahierten Parameter eines einzelnen OFETs dar, so dass alle 1708 vermessenen OFETs in Bezug auf den jeweiligen Parameter gemeinsam betrachtet werden können. Die Verteilung und der Mittel-

---

<sup>1</sup>Ausrichtung nicht gesondert gezählt



**Abb. 6.1.:** Vergleich der Transfer- und Ausgangskennlinien von drei unterschiedlichen Geometrien im Nullzustand nach der Prozessierung. Messung von „Off“ nach „On“ als durchgezogene und Messung von „On“ nach „Off“ als gestrichelte Linie.

wert eines Parameter für eine bestimmte OFET-Geometrie ergibt sich dementsprechend aus der Streuung der Punkte in Y-Richtung, eine eventuelle  $\frac{W}{L}$  Abhängigkeit aus der Auftragung des  $\frac{W}{L}$ -Verhältnisses auf der X-Achse und eine  $L$ -Abhängigkeit aus den unterschiedlichen Farben für verschiedene Kanallängen. Eine eventuelle  $W$ -Abhängigkeit lässt indirekt aus der Kombination von  $L$  und  $\frac{W}{L}$  erkennen. Die gewählte Auftragung ermöglicht also einen kompletten Überblick über Verteilung, Mittelwerte und Abhängigkeiten von einem OFET-Parameter über die betrachteten OFET-Geometrien.

## 6.2. On-Strom

Als erster Parameter bietet sich hier der On-Strom  $I_{On}$  an, da hierfür nach Gleichung (3.3) und (3.4) aus Kapitel (3.5) ganz konkret eine lineare Skalierung mit  $\frac{W}{L}$  erwartet wird, welche sich in der beschriebenen Auftragung gegen  $\frac{W}{L}$  auch leicht überprüfen lässt. Bedingt durch die große Spannweite von  $\frac{W}{L}$  von über 2 Größenordnungen über alle Geometrien ergibt sich jedoch das Problem, dass eine lineare Auftragung der Messwerte einen Graphen produziert, der nicht mehr sinnvoll abgelesen werden kann. Für die Abbildung von Messdaten mit einer Großen Spannweite ist die logarithmische Auftragung der Messdaten eine typische Vorgehensweise, welche jedoch auch den funktionalen Zusammenhang zwischen den Messdaten anders erscheinen lassen kann und welche ebenfalls die Verteilung der Messwerte logarithmisch verzerrt. Trotzdem zeigt Abbildung (6.2) eine solche Darstellung für den Parameter  $I_{On}$ , berechnet aus den beiden Transferkennlinien im linearen- ( $V_{DS} = -5V$ ) und Sättigungsbereich ( $V_{DS} = -40V$ ) aufgetragen gegen  $\frac{W}{L}$ .

Ergänzend hierzu ist in Abbildung (6.3) der gleiche Parameter  $I_{On}$  normiert mit dem  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis des jeweiligen OFETs aufgetragen, also konkret  $\frac{I_{On}}{W/L}$ . Durch die Normierung lässt sich nun  $\frac{I_{On}}{W/L}$  auf einer linearen Y-Achse auftragen. In dieser Auftragung zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen  $I_{On}$  und  $\frac{W}{L}$  nun dadurch, dass die Werte von  $\frac{I_{On}}{W/L}$  auf einem Plateau liegen, was sie für  $\frac{W}{L}$  größer als 100 auch tatsächlich in guter Näherung tun.

In der Darstellung von Abbildung (6.3) erkennt man jetzt allerdings auch, dass die OFETs mit einem  $\frac{W}{L}$  von 20 oder kleiner von diesem Plateau abweichen. Diese Abweichung wird größer mit kleiner werdendem  $\frac{W}{L}$  und ist größer für  $V_{DS} = -40V$  als für  $V_{DS} = -5V$ . Weiterhin ist diese Abweichung tatsächlich von  $\frac{W}{L}$  abhängig und **nicht** alleine von  $L$ . Dies ist zum Einen an der runden Geometrie mit  $L = 100\mu m$  und einem  $\frac{W}{L}$  größer 100 erkennbar, welche zusammen mit den anderen Geometrien mit einem  $\frac{W}{L}$  größer 100 auf dem beschriebenen Plateau sitzt. Zum Anderen zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den Geometrien mit  $L = 50\mu m$  und  $L = 100\mu m$ . Dieser Punkt soll hier nur aufgezeigt werden und wird in der weiteren Betrachtung der Mobilität noch im Detail behandelt.

Weiterhin auffällig und am besten in Abbildung (6.2) zu erkennen, sind mehrere Ausreißer nach unten bei der Geometrie mit  $W = 10mm$  und  $L = 5\mu m$ , die nach einer detaillierten

Betrachtung alle auf eine einzige OFET Struktur, nämlich die Geometrie in Zeile 7 und Spalte 10, zurückgeführt werden können. Dieser zeigt auf einigen der hergestellten Proben den Beobachteten Ausreißer im On-Strom, allerdings wiederum nicht auf allen Proben. Auffällig ist, dass der betroffene OFET das kleinste  $L$  und das größte  $W$  hat, genau um 90 Grad zu den funktionierenden OFETs der gleichen Geometrie gedreht ist und am Rand des Substrats liegt. Dies lässt vermuten, dass eventuell ein Benetzungsproblem beim *Spincoating* des Halbleiters vorliegen könnte, so dass nicht alle Kanäle der Source-Drain Kammstruktur vollständig mit dem Halbleitermaterial gefüllt werden und daher dann auch später weniger Strom tragen können. Zumindest ist festzuhalten, dass solche Auffälligkeiten in dieser Art der Auftragung sichtbar werden und Ansatzpunkte zur weiteren Verbesserung des Source-Drain Layouts liefern.

Was die Verteilung des On-Stroms für die verschiedenen Geometrien angeht, lässt sich schon in Abbildung (6.3) anhand der Spreizung der aufgetragenen Messpunkte ablesen, dass die relativen Verteilungsbreiten für die meisten Geometrien bei gleichem  $V_{DS}$  ähnlich groß sind, bis auf den oben beschriebenen Effekt bei kleinen  $\frac{W}{L}$ . Es fällt jedoch auf, dass die Verteilung der Messwerte für  $V_{DS} = -5V$  wesentlich kleiner ist, als für  $V_{DS} = -40V$ . Weitere Ausreißer in den Messwerten kommen, bis auf die oben beschriebenen Probleme bei Geometrie 7.10, kaum vor. Dies hängt natürlich damit zusammen, dass sehr krasse Ausreißer durch die in Kapitel (5.3) beschriebenen Kriterien zur Erkennung defekter OFETs im Vorfeld aussortiert werden. Die Schlussfolgerung daraus ist also, dass ein OFET in dieser Messreihe entweder defekt ist nach den in Kapitel (5.3) definierten Kriterien, oder aber mit dem Parameter On-Strom in einer Verteilung von ca. 20 % um den Mittelwert liegt. Eine genauere Betrachtung der Verteilung der Messwerte ist durch die Darstellung der Messdaten als Histogramm möglich. Für drei ausgewählte Geometrien ist dies in Abbildung (6.4) dargestellt. Bei einer zufälligen Verteilung der Messwerte würde man in einer solchen Auftragung als Histogramm aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes und der hohen Anzahl der Messungen eine Gauß-Verteilung erwarten. Die Situation scheint in diesem Fall allerdings komplexer zu sein, da in den Histogrammen in Abbildung (6.4) keine einzelne Gauß-Glockenkurve zu erkennen ist, sondern jeweils mehrere Maxima in der Verteilung. Dies lässt vermuten, dass es über die Dauer der Herstellung der gemessenen Proben eine systematische Änderung im Herstellungsprozess gegeben haben muss, die eine solche Abweichung im On-Strom erklären könnte. Hierzu sei angemerkt, dass die Proben über einen Zeitraum von 1,5 Monaten in 4er Gruppen hergestellt wurden, also jeweils 4 Proben an einem Tag in einem Durchgang. Um nun eine Korrelation zwischen Herstellungstag und On-Strom finden zu können, zeigt Abbildung (6.5) den mit dem  $\frac{W}{L}$  des jeweiligen OFETs normierten On-Strom, also  $\frac{I_{On}}{W/L}$ , aufgetragen gegen eine laufende Probennummer in der Reihenfolge der Herstellung. Man erkennt hier eine deutliche Variation des On-Stroms mit der Probennummer und damit mit dem Herstellungstag der jeweiligen Probe. Interessanterweise gibt es jedoch auch starke Schwankungen bei den Proben, die am

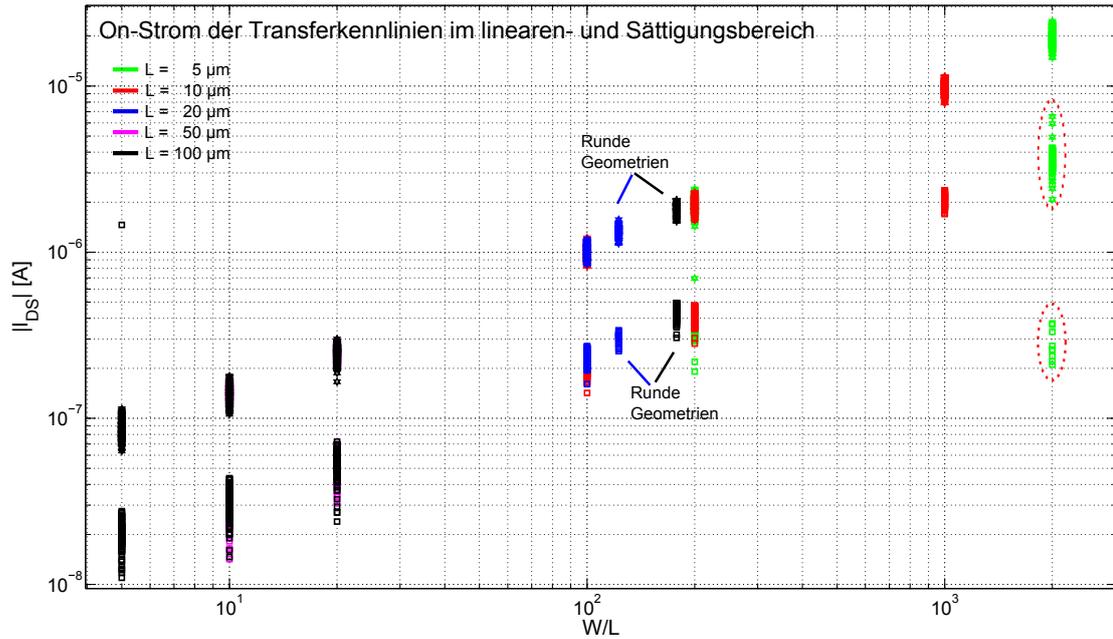


Abb. 6.2.: Auftragung des On-Stroms der Transferkennlinien im linearen- ( $V_{DS} = -5\text{V}$ ) und Sättigungsbereich ( $V_{DS} = -40\text{V}$ ) gegen das  $\frac{W}{L}$  Verhältnis der verschiedenen OFET-Geometrien.

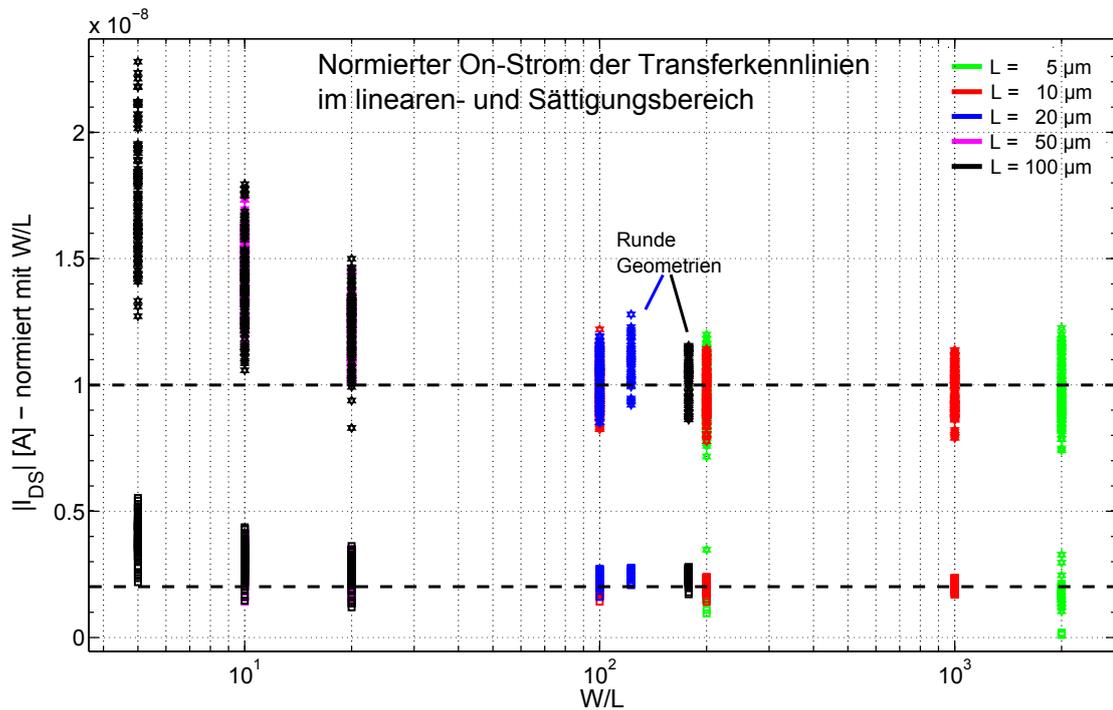
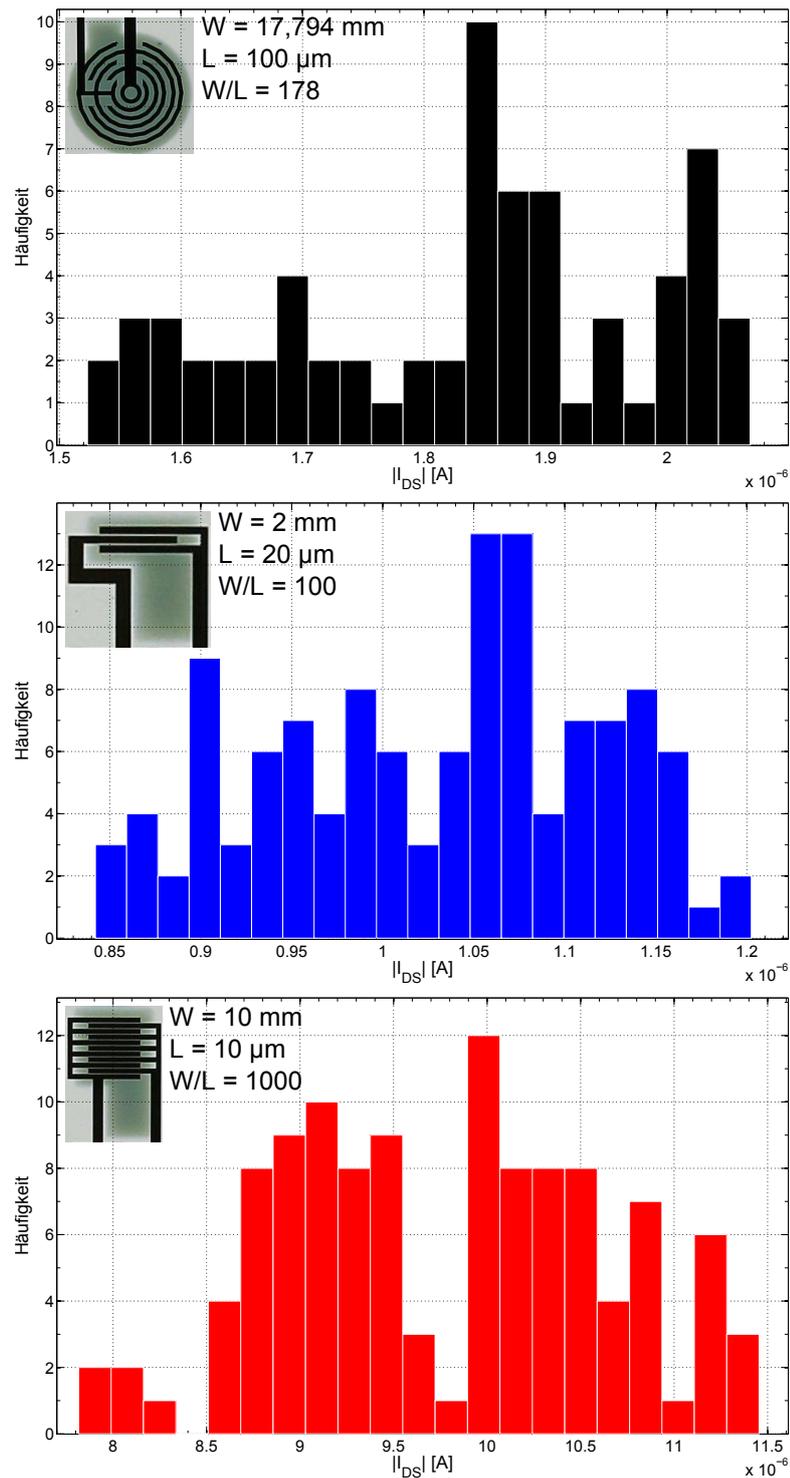
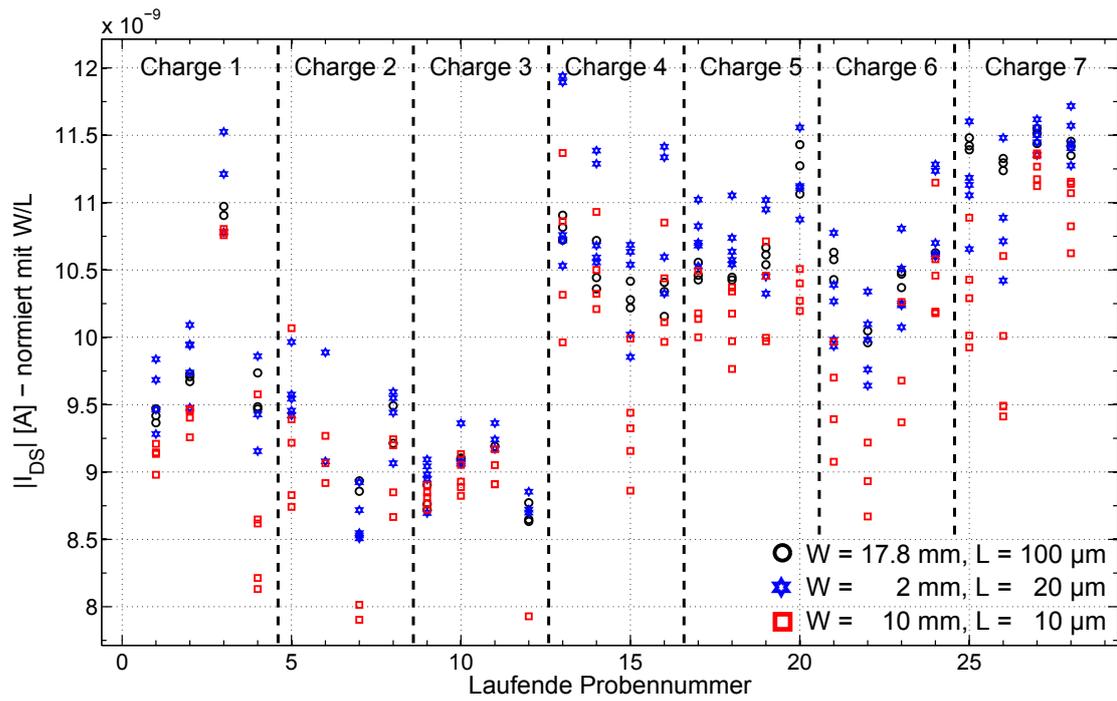


Abb. 6.3.: Darstellung des mit  $\frac{W}{L}$  normierten On-Stroms, aufgetragen gegen  $\frac{W}{L}$ .



**Abb. 6.4.:** Auftragung des On-Stroms im Nullzustand als Histogramm, berechnet aus der Transferkennlinie bei  $V_{DS} = -40\text{V}$ . Beispielhaft aufgetragen für drei verschiedene Geometrien.



**Abb. 6.5.:** Auftragung des mit  $\frac{W}{L}$  normierten On-Stroms der Transferkennlinie bei  $V_{DS} = -40\text{V}$  gegen die laufende Probennummer in der Reihenfolge der Herstellung. Aufgetragen sind die gleichen drei Geometrien aus Abbildung(6.4)

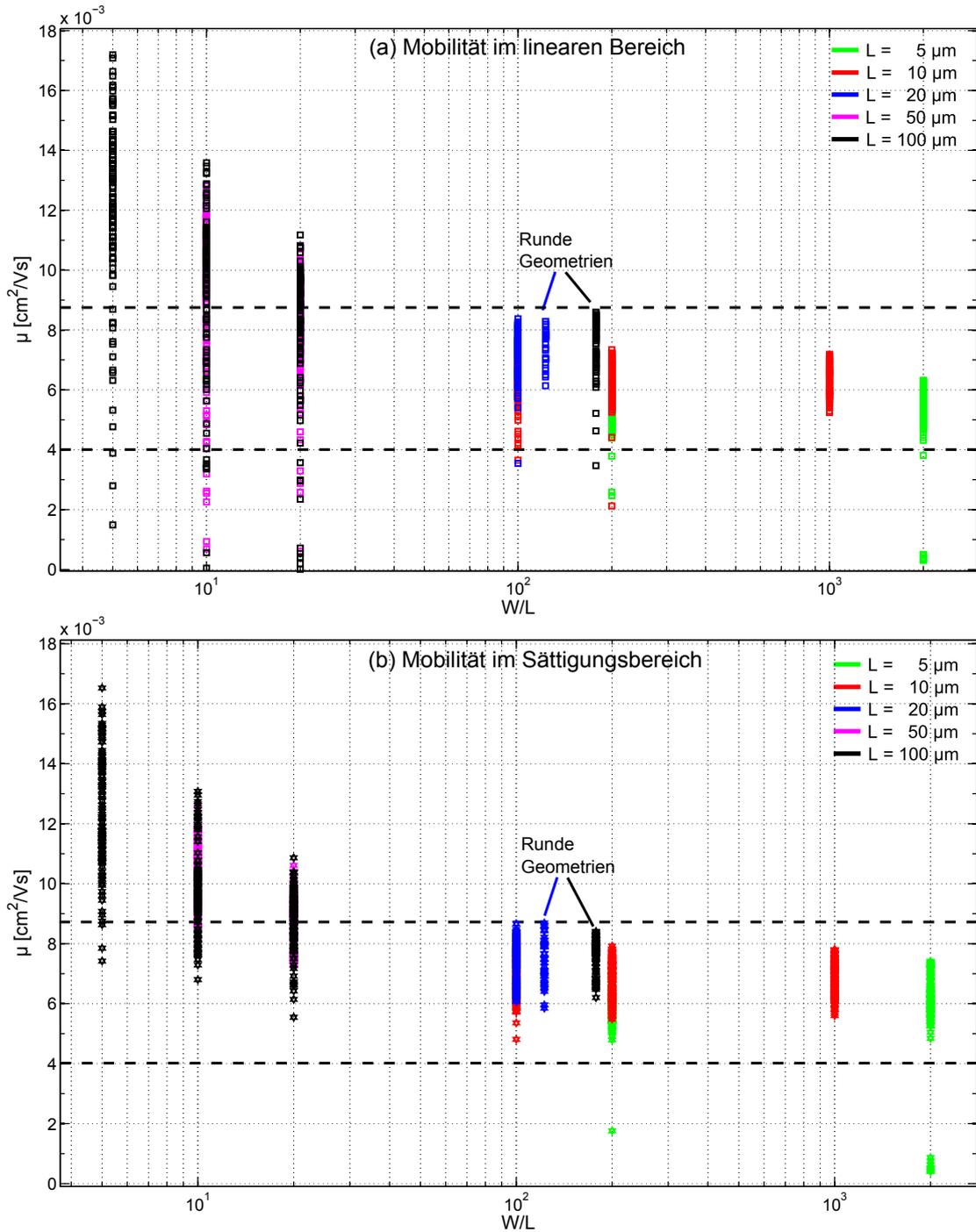
selben Tag in dem selben Durchgang hergestellt wurden. Dies ist am besten zu sehen an der Probe Nummer 3 in Abbildung (6.5).

Die beobachteten Schwankungen im Zuge der Probenherstellung sind also durchaus eine Erklärung für die in den Histogrammen in Abbildung (6.4) beobachteten Verteilungen. Hier spielen wahrscheinlich noch weitere Effekte wie unterschiedliche Raumtemperatur, Luftfeuchte, Sonneneinstrahlung, genaues Probenhandling, etc. eine Rolle, die sich bei einer Herstellung der Proben von Hand im Labor nie ganz kontrollieren lassen. Für den Parameter Mobilität wurde eine solche Variation auch in [1] beobachtet, wie im folgenden Abschnitt erläutert wird. Schwankungen von Probe zu Probe kommen also trotz der amorphen Struktur auch bei PTAA-basierten Halbleitermaterialien vor und können auch durchaus größer sein, als die Variation der selben Eigenschaft innerhalb einer Probe, wie zum Beispiel der Sprung zwischen den Proben 12 und 13 in Abbildung (6.5) zeigt.

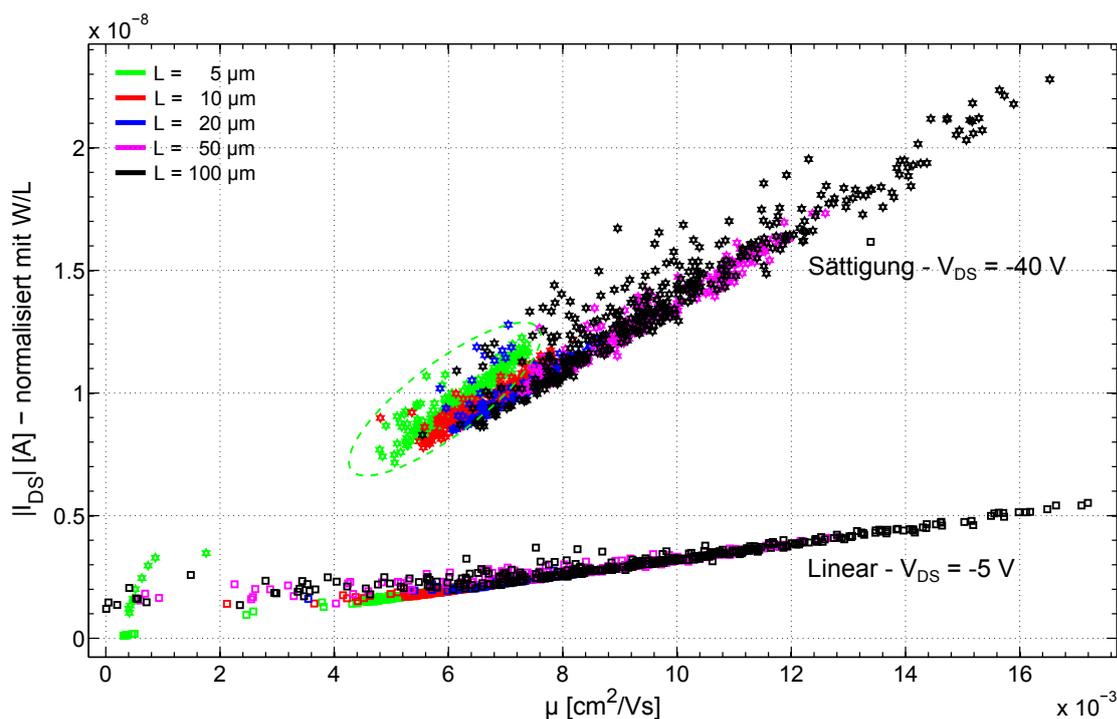
### 6.3. Mobilität

Der zweite OFET-Parameter in dieser Betrachtung des Nullzustands ist die Mobilität der Ladungsträger im OFET-Kanal. Die Mobilität lässt sich nach dem in Kapitel (3.5) vorgestellten Modell berechnen, wobei sich 2 Werte für die Mobilität ergeben, nämlich ein Wert in Sättigung und ein weiterer Wert im linearen Bereich des OFETs. Dies ergibt sich aus der Berechnung durch die 2 Formeln aus Kapitel (3.5), welche jeweils für einen Bereich gelten. Vom physikalischen Standpunkt aus gesehen ist die Mobilität in einem Feldeffekttransistor vor allem eine Eigenschaft der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum und sollte für eine ideale Grenzfläche konstant sein. Die Erwartung ist also, dass die für die beiden Bereiche berechneten Mobilitäten gleich, oder zumindest sehr ähnlich sind. Die hier verwendete Methode zur Berechnung der Mobilität führt durch die Anpassung einer Ausgleichsgerade an den, in der jeweiligen Auftragung, linearen Teil der Transferkennlinie effektiv eine Mittelung durch. Dies ist notwendig, um den Parameter Mobilität für einen OFET auf jeweils eine einzelne Zahl für den linearen- bzw. Sättigungsbereich herunter zu brechen. Dabei gehen zwar die Details, die nicht in dem verwendeten Modell berücksichtigt werden, verloren, doch diese Methode ermöglicht wiederum die Betrachtung einer großen Anzahl von OFETs und den Vergleich untereinander und während der Alterung. Eine Betrachtung von ausgewählten Mobilitätskennlinien in voller Detaillierung erfolgt in Kapitel (7.2) für den Nullzustand und den Verlauf während der Alterung.

Analog zur Betrachtung des On-Stroms in Abbildung (6.2) zeigt Abbildung (6.6) die Mobilität der verschiedenen OFET-Geometrien, wiederum für den linearen- und den Sättigungsbereich. Zunächst einmal fällt auf, dass die Mobilität anscheinend von  $\frac{W}{L}$  abhängt und für kleine  $\frac{W}{L}$ -Verhältnisse ansteigt. Dies widerspricht der oben geäußerten Sichtweise der Mobilität als Eigenschaft der Grenzfläche zwischen Dielektrikum und Halbleiter, welche eine konstante



**Abb. 6.6.:** Mobilität der untersuchten OFETs im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich aufgetragen gegen das  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis der entsprechenden OFET-Geometrien. Die horizontalen Hilfslinien markieren den Mobilitätsbereich, in dem sich die OFET-Geometrien mit  $\frac{W}{L}$  größer 100 bewegen.



**Abb. 6.7.:** Korrelation zwischen dem mit  $\frac{W}{L}$  normierten On-Strom und der Mobilität des jeweiligen OFETs. Aufgetragen sind die Werte für  $\frac{I_{On}}{W/L}$  und  $\mu$  im linearen-, sowie im Sättigungsbereich.

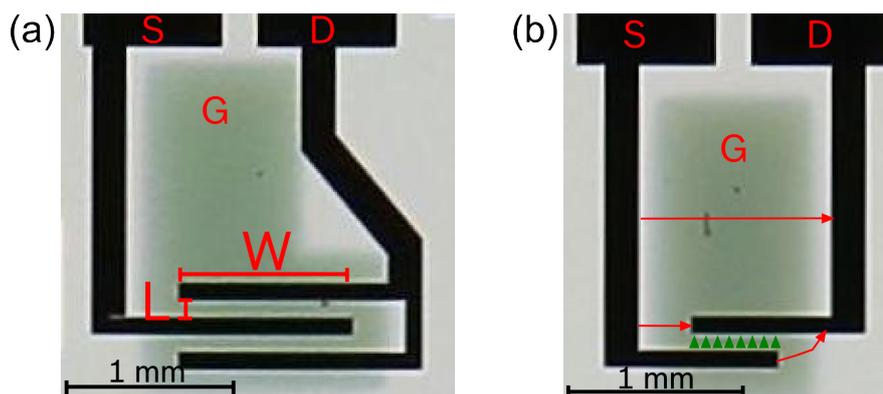
Mobilität über alle Geometrien hinweg erwarten lassen würde. Dieses Verhalten erkennt man aber wiederum erst für Geometrien mit einem  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis größer 100. Diese liegen mit ihren Verteilungen in einem Bereich von ca.  $4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$  bis  $9 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , sowohl für die Mobilität im linearen- als auch im Sättigungsbereich. Weiterhin fällt beim Vergleich mit Abbildung (6.3) auf, dass sich das Verhalten der Geometrien für  $\frac{W}{L}$  kleiner 100 und  $\frac{W}{L}$  größer 100 sehr ähnelt. Zur Überprüfung der Beziehung zwischen  $I_{On}$  und  $\mu$  zeigt daher Abbildung (6.7) eine Darstellung der Korrelation dieser beiden Parameter. In dieser Auftragung ist eine deutliche Korrelation zwischen  $\frac{I_{On}}{W/L}$  und  $\mu$  zu erkennen und es lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen feststellen. Hier sei noch einmal angemerkt, dass durch die Art der Auswertung für jeden einzelnen Datenpunkt ein Zusammenhang zwischen  $I_{On}$  und  $\mu$  gegeben ist. Dies liegt anschaulich daran, dass  $I_{On}$  den maximalen Wert der berechneten Ausgleichsgeraden darstellt und die Mobilität aus der Steigung der selben Geraden ermittelt wird. Für die Gesamtheit der Messdaten wird durch die Auswertung jedoch kein spezieller Zusammenhang erzeugt, da die Extraktion von  $\mu$  und  $I_{On}$  immer nur jeweils für eine einzelne Transferkennlinie durchgeführt wird. Über den Vorfaktor der Gleichungen (3.1) und (3.2), also  $I_{DS} \propto (\mu CW)/L$  macht das Modell jedoch die Vorhersage, dass  $I_{DS}$  und

damit  $I_{On}$  linear zur Mobilität  $\mu$  sein sollte, also  $I_{On} \propto \mu$ . Die in Abbildung (6.7) dargestellte Korrelation zwischen diesen beiden Größen bestätigt dementsprechend diese Vorhersage und zeigt damit, dass das verwendete Modell tatsächlich für die Gesamtheit aller Messdaten und für alle OFET-Geometrien gültig ist. Anders ausgedrückt bedeutet das, dass ein höherer On-Strom über alle Messdaten hinweg fast ausschließlich durch eine höhere Mobilität zu erklären ist und das insbesondere keine anderen, unerwarteten Effekte auftreten.

Eine leichte Abweichung erkennt man nur für die in grün aufgetragenen OFETs mit  $L = 5 \mu\text{m}$ , die im Sättigungsbereich etwas oberhalb der restlichen Werte liegen. Dies ist für diesen Fall durch den hohen *Bulk*-Strom zu erklären, bedingt durch den sehr kleinen Abstand zwischen Source und Drain. Dies resultiert für ein konstantes  $V_{DS}$  während der Messung der Transferkennlinie in einem konstanten Offset der Kennlinie um  $I_{Bulk}$ . Der On-Strom wird dadurch ebenfalls um diesen Offset größer, ohne dass sich dazu die Steigung der Transferkennlinie in der Wurzelaufrichtung ändern würde. Dies erklärt die etwas größeren  $I_{On}$  Werte für die gleiche berechnete Mobilität.

Eine solche starke Korrelation zwischen  $I_{On}$  und  $\mu$  erklärt nun auch das ähnliche Verhalten beider Parameter in den Abbildungen (6.3) und (6.6). Aus der Sichtweise der Parameterextraktion ist  $I_{DS}$  und damit  $\frac{I_{On}}{W/L}$  der eigentliche Messwert und  $\mu$  die daraus berechnete Größe. Aus diesem Blickwinkel betrachtet lässt sich nun der Anstieg der Mobilität für kleine  $\frac{W}{L}$ -Verhältnisse erklären durch den Anstieg des gemessenen On-Stroms bezogen auf das  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis des OFETs. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass bei den OFETs mit  $\frac{W}{L}$  kleiner 100 ein größerer Drain-Source Strom gemessen wird, als man ihn aufgrund des  $\frac{W}{L}$ -Verhältnisses erwarten würde.

Für eine OFET-Geometrie in Form von zwei ineinander verzahnten Kämmen, wie sie in Abbildung (6.8 a) dargestellt ist, folgt der Wert für das  $W$  des OFETs aus der Strecke, auf der die beiden Kämmen parallel zueinander verlaufen, multipliziert mit der Anzahl der Kanäle zwischen zwei Kämmen. Dies führt für die Geometrie in Abbildung (6.8 a) zu einem  $W$  von  $2 * 1 \text{ mm} = 2 \text{ mm}$ . Der Wert für  $L$  ergibt sich aus dem Abstand der beiden Kämmen zueinander. Bei näherer Betrachtung wird deutlich, dass diese Form der Berechnung eine Näherung ist, welche den Stromfluss an der Stirnseiten und den Ecken der Kammstrukturen vernachlässigt. Weiterhin können auch andere Streuströme beispielsweise zwischen den Zuleitungen zu Source und Drain fließen. Eine Reihe von möglichen zusätzlichen Strompfaden sind in Abbildung (6.8 b) dargestellt. Diese beschriebenen Ströme fließen zusätzlich zum eigentlichen Kanalstrom des OFETs und führen bei der elektrischen Charakterisierung zu dem oben beschriebenen Effekt, dass größere Drain-Source Ströme gemessen werden, als man sie eigentlich für ein gegebenes  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis erwarten würde. Diese Streuströme sind jedoch im Gegensatz zu den ebenfalls diskutierten *Bulk*-Strömen durch das Halbleitervolumen abhängig von der Gate-Spannung und tragen zur Steigung der Transferkennlinie bei. Andernfalls würden die OFETs mit  $\frac{W}{L}$  kleiner 100 in Abbildung (6.7) von der linearen Korrelation abwei-



**Abb. 6.8.:** (a) Abbildung eines OFETs in Kamm-Geometrie. Für diese Geometrie ist  $L = 100 \mu\text{m}$  und  $W = 2 * 1 \text{ mm} = 2 \text{ mm}$ . (b) Darstellung der Kanalströme in Grün und zusätzlicher Streuströme in Rot für die Geometrie mit  $W = 0,5 \text{ mm}$  und  $L = 100 \mu\text{m}$ , dem kleinsten  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis in dem benutzten Layout.

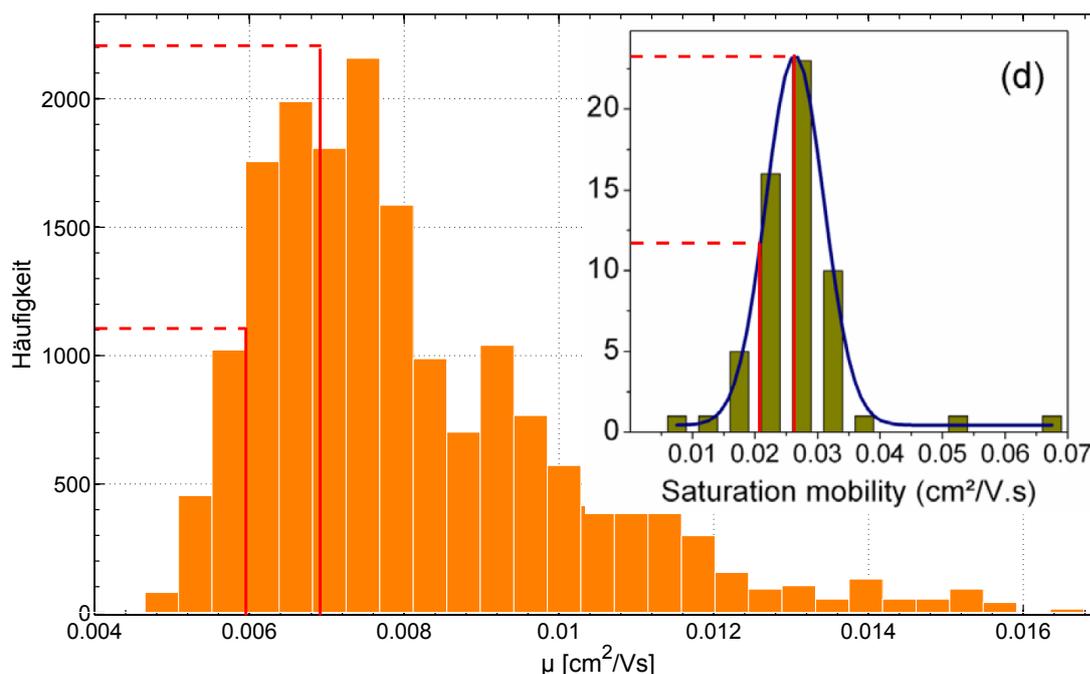
chen. Es zeigt sich jedoch ganz im Gegenteil, dass auch die sehr hohen Mobilitäten für diese OFETs die selbe Korrelation zum gemessenen On-Strom haben wie die OFETs mit  $\frac{W}{L}$  größer 100. Weiterhin fällt dieser Effekt deshalb nur bei den kleinen  $\frac{W}{L}$ -Verhältnissen unter 100 auf, weil hier die Kanalströme klein genug werden, so dass die beschriebenen Streuströme relativ zum Kanalstrom einen messbaren Effekt haben. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass die bei der Berechnung von  $\frac{W}{L}$  implizit gemachte Näherung ab einem  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis von 100 hinreichend genau ist und darunter zu einer Verfälschung der gemessenen Source-Drain Ströme und in Folge dessen der berechneten Mobilität führt. Ein solcher Effekt wird auch in [37] beschrieben. Dort kommt man allerdings zu dem Ergebnis, dass das  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis mindestens 10 sein sollte. Im Vergleich ist das benutzte Layout also relativ anfällig bezüglich solcher Streuströme. Das liegt vor allen Dingen an der flächigen Auftragung des organischen Halbleiters im *Spincoating* und der eher groben Strukturierung des Gates. Dies hängt damit zusammen, dass der Strom letztlich immer durch die Halbleiterschicht fließen muss und dies da tut, wo im Betrieb des OFETs durch das darüberliegende Gate ein Kanal entsteht. Abbildung (6.8) zeigt, dass das Gate großflächig über der gesamten Kammstruktur des OFETs liegt und damit auch über der gesamten Kammstruktur einen Kanal erzeugt, was die beschriebenen Ströme außerhalb des eigentlich vorgesehenen OFET-Kanals überhaupt erst ermöglicht. Die relativ grobe Strukturierung des Gates hängt damit zusammen, dass die Schattenmaske zur Deposition der Gate-Schicht, wie in Kapitel (4.6) beschrieben, von Hand aufgelegt wird. Dies bedingt größere Toleranzen in der Strukturierung, um jeden OFET-Kanal sicher mit einem Gate bedecken zu können. Die händische Positionierung der Gate Maske könnte auch eine Erklärung für die in Abbildung (6.3) und (6.6) beobachtete große Streuung

bei den Geometrien mit einem  $\frac{W}{L}$  von 5, 10 und 20 sein, da schon eine kleine Änderung der Gate-Position von einigen  $10\ \mu\text{m}$  einen großen Unterschied machen kann, wenn dadurch zwischen zwei ansonsten getrennten Source- und Drain Strukturen ein Kanal entsteht. Der eleganteste Weg, um diese aufgezeigte Problematik zu umgehen, wäre eine Strukturierung des Halbleiters, so dass dieser sich ausschließlich im vorgesehenen OFET-Kanal befindet. In einem solchen OFET könnten dann auch nirgendwo anders Streuströme fließen. Alternativ könnte man auch das Gate so strukturieren, dass es nur die vorgesehenen OFET Kanäle bedeckt, was in Bezug auf die Streuströme den selben Effekt hätte.

Aus den bis jetzt vorgestellten Messdaten lässt sich folgendes Zwischenfazit ziehen:

- Die in Abbildung (6.6) gezeigte scheinbare Abhängigkeit der Mobilität vom  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis des OFETs hat keinen physikalischen Grund, sondern ist ein Problem des verwendeten Layouts und der Art der Probenpräparation.
- Die tatsächliche Mobilität der verwendeten Kombination aus dem verwendeten, PTAA-basiertem Halbleiter und low-k Dielektrikum ist für ein  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis von 100 oder größer im Rahmen der beobachteten Streuung unabhängig von der Geometrie des speziellen OFETs und schwankt in einem Bereich von ca.  $4 * 10^{-3}\ \text{cm}^2/\text{Vs}$  bis  $9 * 10^{-3}\ \text{cm}^2/\text{Vs}$ . Damit ist die Mobilität etwas größer, als in [3] und [28] für PTAA-Materialien beschrieben und zumindest das Maximum der Verteilung ist nicht mehr weit von dem in [3] angegebenen Time of Flight Wert von  $1,26 * 10^{-2}\ \text{cm}^2/\text{Vs}$  für bulk PTAA entfernt.
- Die Mobilitäten im linearen- und Sättigungsbereich sind vergleichbar groß und ähnlich verteilt. Dies rechtfertigt den Ansatz des verwendeten Modells, die Mobilität als Konstante zu behandeln.
- Um die beschriebenen Probleme mit Streuströmen parallel zum vorgesehenen OFET-Kanal zu vermeiden, braucht man ein hinreichend großes  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis der OFETs um solche Streuströme vernachlässigen zu können. Wie groß ein hinreichend großes  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis ist, hängt stark vom speziellen verwendeten Layout und den verwendeten Materialien ab. Daher ist es ratsam, für jedes neuartige Layout OFETs mit verschiedenen großen  $\frac{W}{L}$ -Verhältnissen vorzusehen, damit solche Effekte erkannt und Fehlinterpretationen vermieden werden können. Alternativ kann eine sehr genaue Strukturierung von Halbleiter und/oder Gate diesen Effekt ganz vermeiden.

Nach der Betrachtung des generellen Verhaltens der Mobilität und dem Einfluss von Streuströmen parallel zum Kanal auf deren Berechnung soll nun noch einmal detaillierter auf die Verteilung eingegangen werden. Als Referenz kann hier eine Veröffentlichung aus dem Jahre 2010 dienen, die ebenfalls eine statistische Auswertung einer großen Anzahl von Messungen beinhaltet [1]. Der in dieser Veröffentlichung benutzte Halbleiter ist ebenfalls PTAA-basiert,



**Abb. 6.9.:** Vergleich der Mobilität im Sättigungsbereich über alle Geometrien. Orange: In dieser Arbeit gemessene Verteilung. Inset: In [1] publizierte Ergebnisse. Die roten Hilfslinien dienen zur Abschätzung der Halbwertsbreiten der Verteilungen.

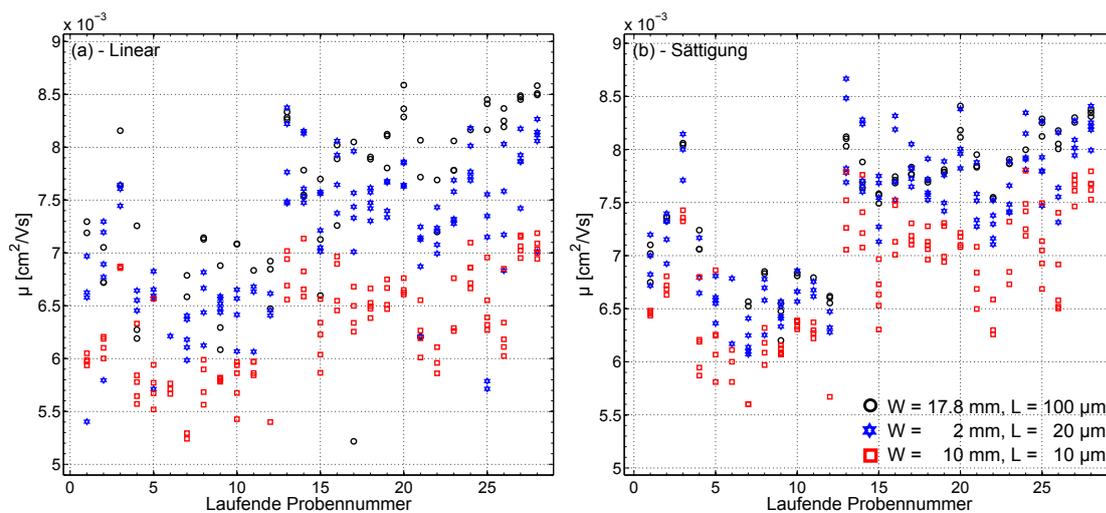
so dass hier ein direkter Vergleich erfolgen kann. Dazu zeigt Abbildung (6.9) einen Vergleich der Verteilungen der Mobilitäten im Sättigungsbereich über jeweils alle Geometrien auf den jeweils verwendeten Substraten. Es fällt auf, dass der Mittelwert der Mobilität aus [1], verglichen mit den Ergebnissen dieser Arbeit, wesentlich höher liegt. Das Verhältnis liegt für einen Mittelwert von ca.  $0,026 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  aus [1] und ca.  $0,007 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  aus dieser Arbeit fast bei einem Faktor 4. Dies dürfte zum größten Teil daran liegen, dass in [1] aller Wahrscheinlichkeit nach ein, hinsichtlich der Mobilität, verbessertes PTAA-Derivat verwendet wurde, wie es in Ref. [28] beschrieben wird. Allerdings sind  $0,007 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  deutlich mehr als die  $0,004 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  und  $0,0033 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , die in [28] bzw. [3] für unverändertes PTAA angegeben werden. Die Mobilität des benutzten PTAA-Materials in dem verwendeten OFET Layout befindet sich also durchaus in einem erwarteten Bereich. Leider ist nicht klar, ob und in wie weit das benutzte Material im Vergleich zu „Standard-PTAA“ verändert wurde, so dass keine genauere Einordnung der erzielten Mobilitäten erfolgen kann. Weiterhin findet man den oben beschriebenen Effekt der Überschätzung der Mobilität für kleine  $\frac{W}{L}$ -Verhältnisse in Abbildung (6.9) wieder als Verbreiterung der Verteilung hin zu größeren Mobilitäten. Beim Ablesen des Mittelwerts von  $0,007 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , markiert durch die rote Linie im Maximum einer gedachten Gaußverteilung,

geht diese Verbreiterung nicht ein. Dieser Punkt zeigt jedoch, dass ein simples berechnen eines Mittelwerts aus einer Gesamtheit an Messwerten schnell zu einem falschen Ergebnis führen kann.

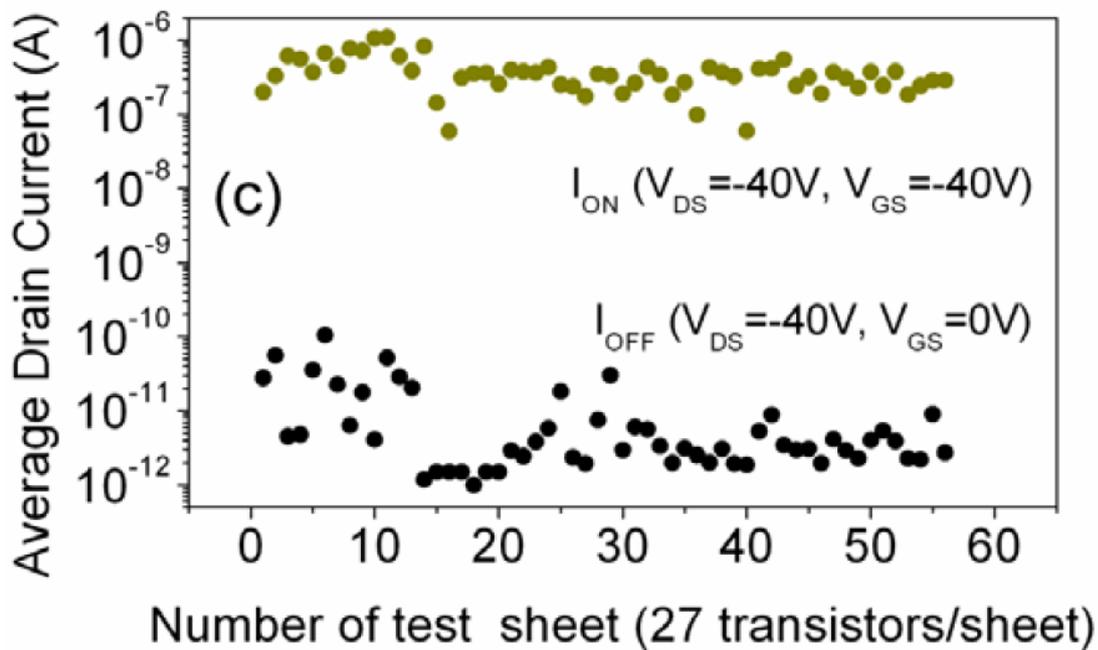
Als zweite Kenngröße der beiden Verteilungen soll die Breite der Verteilung in Form der Halbwertsbreite betrachtet werden. Die abgelesenen Werte sind ebenfalls mit Hilfe von roten Hilfslinien in Abbildung (6.9) markiert. Daraus ergibt sich eine Halbwertsbreite von  $0,001 \text{ cm}^2/V_s$  oder 14 % bezogen auf den Mittelwert für die Mobilität in dieser Arbeit und  $0,005 \text{ cm}^2/V_s$  oder 19% für die Ergebnisse aus [1]. Die Streuung ist damit für die Mobilität in dieser Arbeit etwas niedriger, als in [1], wobei dort allerdings auch verschiedene Druckverfahren getestet wurden, welche auch nochmal einen Einfluss auf die Streuung haben könnten. Um die Ursache der Streuung der Mobilität noch etwas besser zu verstehen, lohnt sich ein Blick zurück zu Abbildung (6.5), welche die Verteilung des On-Stroms für jede prozessierte Probe für 3 ausgewählte Geometrien zeigt. Aufgrund der in Abbildung (6.7) gezeigten Korrelation zwischen Mobilität und On-Strom, würde man für die Mobilität ein ähnliches Verhalten erwarten. Dies ist in Abbildung (6.10) gezeigt und bestätigt sich tatsächlich. Man sieht vor allem an den Proben 3 und 22 im Vergleich zu ihren Nachbarn, dass die Variation von Probe zu Probe stärker sein kann, als die Variation zwischen den OFETs auf einer Probe. Dies deutet darauf hin, dass man die Verteilung von Mobilität und On-Strom durch eine weitere Optimierung der Probenherstellung noch schmaler machen könnte.

An dieser Stelle ist es nun für die weitere Betrachtung hilfreich, die Perspektive zu drehen. Bis jetzt wurde die Mobilität als eine aus dem Verlauf des On-Stroms extrahierte Größe betrachtet, wodurch der Einfluss der Streuströme parallel zum OFET-Kanal auf die berechnete Mobilität deutlich wird. Vom physikalischen Standpunkt aus gesehen hängt jedoch der gemessene Drain-Source Strom von der Mobilität der Ladungsträger im Kanal ab, so dass sich gerade die umgekehrte Sichtweise ergibt. Dies bedeutet, dass aus dieser Perspektive die Streuung der Mobilität die Ursache ist für die gemessene Streuung des On-Stroms, innerhalb einer Probe und auch von Probe zu Probe. In der Vorstellung der Mobilität als Eigenschaft der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum heißt das, dass eben diese Grenzfläche in ihrer Qualität von Probe zu Probe und auch innerhalb einer Probe schwankt. Dies bedeutet dann allerdings auch, dass nicht zwangsläufig der Halbleiter, sondern genauso auch das Dielektrikum für die beobachteten Schwankungen in der Herstellung verantwortlich sein können.

Zum Vergleich zeigt Abbildung (6.11) die wiederum aus [1] entnommene Probe zu Probe Variation des On- und Off-Stroms. Auch hier erkennt man eine deutliche Variation, teilweise sogar über mehr als eine Größenordnung. Ein solches Verhalten scheint also nicht ungewöhnlich zu sein.



**Abb. 6.10.:** Mobilität im (a) linearen und (b) Sättigungsbereich aufgetragen gegen die laufende Probennummer.

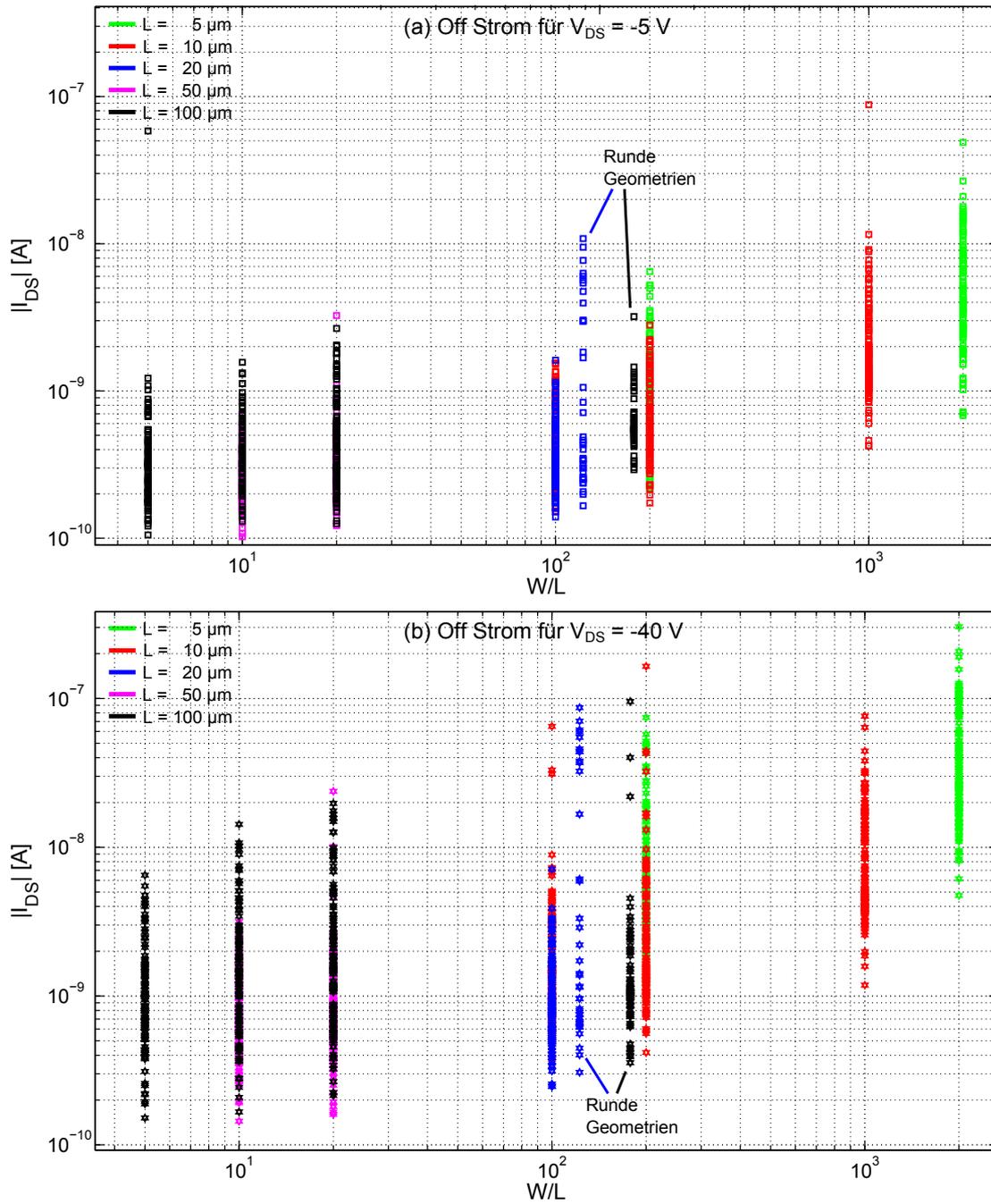


**Abb. 6.11.:** Probe zu Probe Variation der in [1] vorgestellten Ergebnisse.

## 6.4. Off-Strom

Nach der Betrachtung von On-Strom, Mobilität und der Abhängigkeit zwischen diesen beiden Größen, soll im Folgenden der Off-Strom der hergestellten OFETs im Null-Zustand analysiert werden. Im Gegensatz zu Mobilität und On-Strom wird der Off-Strom nicht durch das in Kapitel (3.5) vorgestellte OFET-Modell beschrieben. Dieses Modell geht im Gegenteil implizit davon aus, dass erst ab der Schwellspannung  $V_{Th}$  ein Strom durch den OFET fließt und davor nicht. Die Off-Ströme werden also effektiv vernachlässigt, was so lange funktioniert, wie die Off-Ströme klein genug sind gegenüber den Kanalströmen. Der Off-Strom kann jedoch relativ einfach durch einen parallel geschalteten Widerstand mit modelliert werden, wie zum Beispiel in [2] beschrieben und in Abbildung (6.13 d) gezeigt, was in dieser Arbeit für die Transferkennlinie im Sättigungsbereich auch in dieser Form gemacht wird. Der Grund für die gemessenen Off-Ströme ist die nicht verschwindende Leitfähigkeit der Halbleiterschicht parallel zum eigentlichen OFET-Kanal. Diese Leitfähigkeit hängt von der Dicke der Halbleiterschicht und der Anzahl der freien Ladungsträger in der Schicht ab und kann durchaus Werte annehmen, die nicht mehr vernachlässigt werden können. Im Nullzustand zeigt Abbildung (6.12) die Verteilung der Off-Ströme für die verschiedenen Geometrien. Im Gegensatz zu allen anderen OFET-Parametern, die in diesem Kapitel betrachtet werden, wird der Off-Strom aus der Rück-Messung der Transferkennlinien extrahiert, da bei der Hin-Messung häufig starke Schwankungen von  $I_{DS}$  im  $V_G$  Bereich von 0 V bis -5 V beobachtet werden, über die  $I_{DS}$  zur Ermittlung des Off-Stroms gemittelt wird.

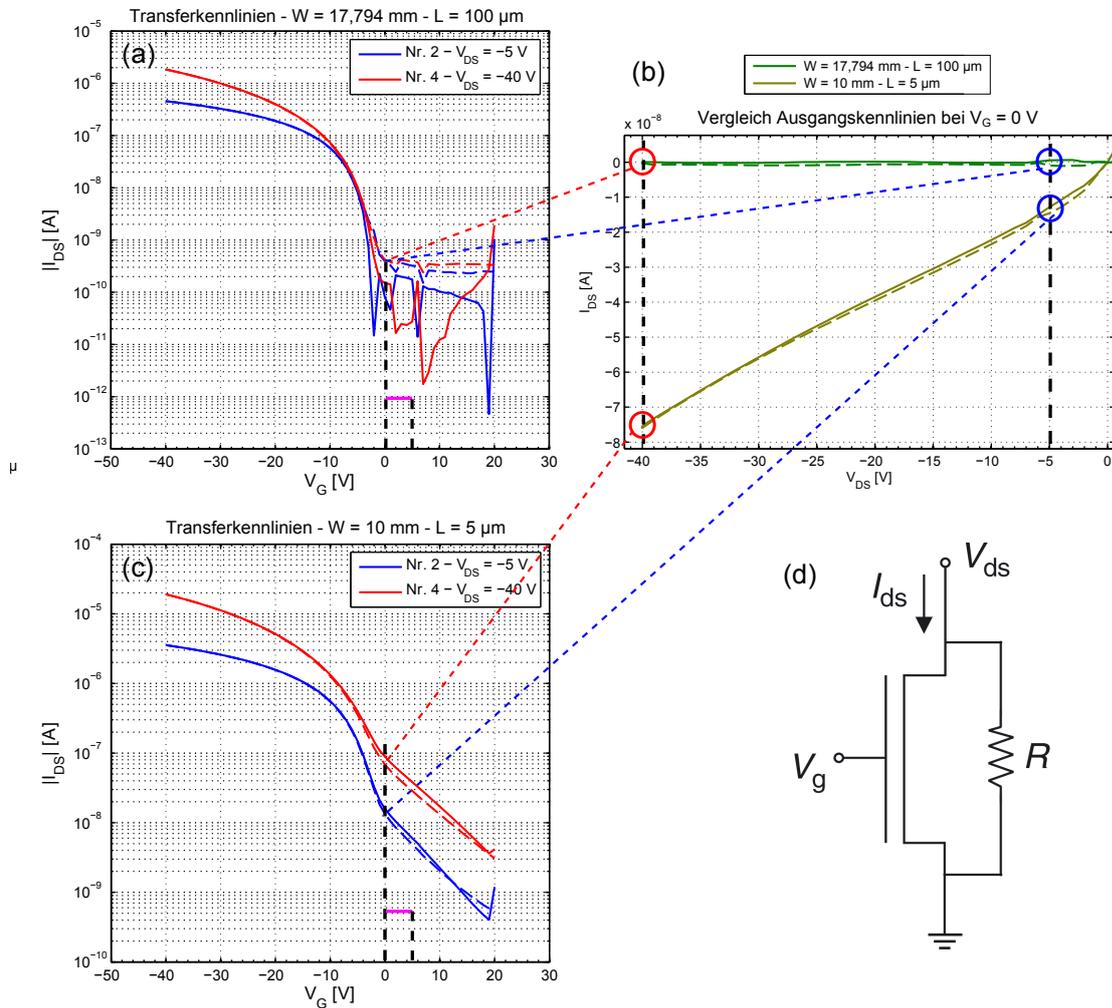
Abbildung (6.12) zeigt nun zunächst einmal, dass der Off-Strom im linearen Bereich niedriger ist, als im Sättigungsbereich. Dies ist nicht überraschend, da bei beiden Bereichen unterschiedliche Drain-Source Spannungen von -5 V bzw. -40 V anliegen. Entsprechend dem Modell eines parallelen Widerstandes ergeben sich daher über  $I = \frac{U}{R}$  auch deutlich unterschiedliche Ströme. Weiterhin erkennt man sowohl eine  $L$ -, als auch eine  $W$ -Abhängigkeit des Off-Stroms. Die  $W$ -Abhängigkeit erkennt man daran, dass OFETs mit gleicher Farbe, also gleichem  $L$  für verschiedene  $\frac{W}{L}$ -Verhältnisse nicht auf dem selben Niveau für den Off-Strom liegen, sondern ein Anstieg des Off-Stroms für ein größeres  $\frac{W}{L}$ , also bei gleichem  $L$  ein größeres  $W$ , beobachtet wird. Die  $L$ -Abhängigkeit wird dadurch deutlich, dass für ein  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis die verschiedenen Farben, also OFETs mit verschieden großem  $L$ , nicht übereinander liegen. Hier unterscheidet sich zwar auch das  $W$  der verglichenen OFETs, um überhaupt für verschiedene  $L$  auf ein gemeinsames  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis kommen zu können, doch alleine mit der  $W$ -Abhängigkeit lässt sich dieser Effekt nicht erklären. Die  $W$ -Abhängigkeit lässt sich relativ einfach dadurch erklären, dass der OFET für ein größeres  $W$  insgesamt größer wird und dadurch ein größeres Halbleitervolumen beeinflusst, durch das bei einer angelegten Drain-Source Spannung eben auch ein größerer Off-Strom fließt. Die  $L$ -Abhängigkeit ist konsistent mit einem Hopping-Transport von Ladungsträgern, wie man ihn für ein amorphes Material



**Abb. 6.12.:** Off-Ströme der verschiedenen Geometrien im (a) linearen und (b) Sättigungsbereich.

erwarten würde. Da die Stärke des elektrischen Feldes zwischen Source und Drain mit kleiner werdendem  $L$  zunimmt, steigt die treibende Kraft für den Transport der Ladungsträger und es steigt die Wahrscheinlichkeit für den Sprung eines Ladungsträgers von einem lokalisierten Energieniveau zu einem anderen [12].

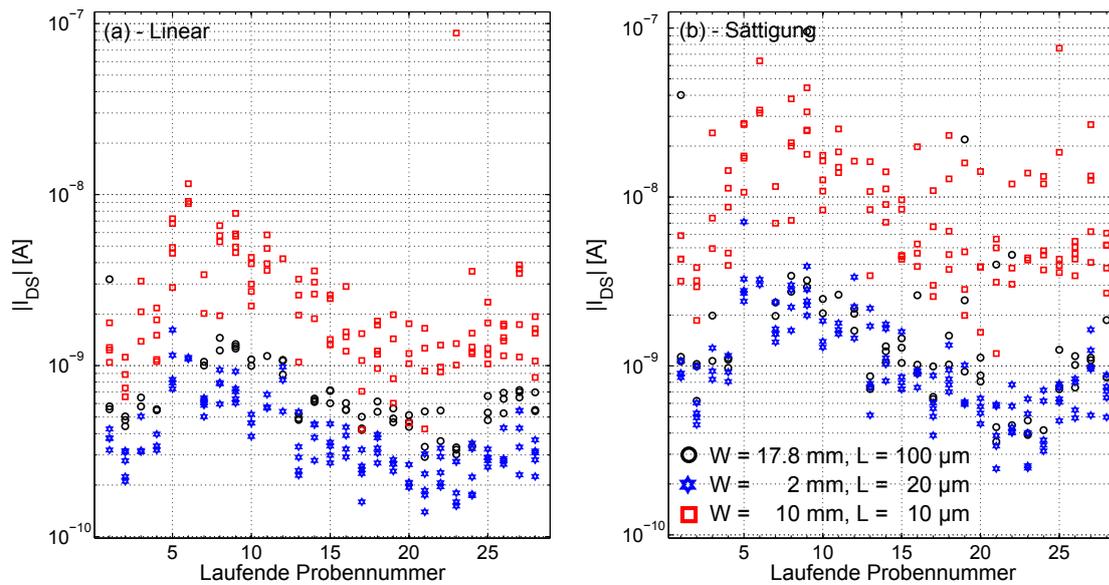
Zur weiteren Verdeutlichung der Effekte, die ein nicht verschwindender Off-Strom mit sich bringt, zeigt Abbildung (6.13) zwei Extrembeispiele. Man erkennt in Abbildung (6.13 a) für ein sehr großes  $L$  von  $100\ \mu\text{m}$  einen sehr niedrigen Off-Strom, sowohl in der Transferkennlinie, als auch in der Ausgangskennlinie bei  $V_G = 0\text{V}$ . Hier wird auch noch einmal deutlich, warum in dieser Betrachtung der aus der Rück-Messung, also der gestrichelten Linie, ermittelte Off-Strom herangezogen wird. Bei der Hin-Messung, also der durchgezogenen Linie, sind starke Schwankungen im Bereich von  $V_G = 0\text{V}$  bis  $V_G = +5\text{V}$  zu erkennen, in dem  $I_{DS}$  zur Ermittlung des Off-Stroms gemittelt wird. Diese verschwinden in der Rück-Messung, so dass hier ein zuverlässigerer Wert ermittelt werden kann. Dieser Effekt liegt mutmaßlich an Ladungsträgerfallen im Volumen der Halbleiterschicht, welche in der Hin-Messung gefüllt werden und dementsprechend den Stromfluss verringern, in der Rück-Messung dann jedoch weitgehend gefüllt sind, was letztendlich zu einem etwas größeren Off-Strom führt. Durch den niedrigen Off-Strom, bzw. den hohen Widerstand des durch den OFET beeinflussten Volumens der Halbleiterschicht in Abbildung (6.13 a) ist weiterhin kein Unterschied im Off-Bereich zwischen den Transferkennlinien bei  $V_{DS} = -5\text{V}$  und  $V_{DS} = -40\text{V}$  zu erkennen. Ein ganz anderes Bild ergibt sich jedoch für den OFET in Abbildung (6.13 c), welcher das andere Extrem mit dem größten  $W$  und dem kleinsten  $L$  auf dem verwendeten Layout darstellt. Hierfür zeigt die Ausgangskennlinie bei  $V_G = 0\text{V}$  ein lineares Verhalten des Drain-Source Stroms, was noch einmal die Modellierung des Off-Stroms durch einen ohmschen Widerstand rechtfertigt. Dieses Verhalten bezüglich  $V_{DS}$  macht sich in den Transferkennlinien als *Offset* bemerkbar zwischen der Kennlinie bei  $V_{DS} = -5\text{V}$  und der Kennlinie bei  $V_{DS} = -40\text{V}$ . Weiterhin erkennt man an den Transferkennlinien, dass eine positive Gatespannung den Drain-Source Strom kleiner werden lässt und den OFET dadurch praktisch weiter ausschaltet. Dieser Effekt kommt dadurch zustande, dass eine positive Gatespannung die freien, positiven Ladungsträger aus dem Halbleitervolumen nahe am Gate verdrängt und damit effektiv der Querschnitt für die Leitung des Off-Stromes durch den Halbleiter kleiner wird. Der vergleichsweise große Off-Strom in der OFET-Geometrie aus Abbildung (6.13 c) hat also deutliche Einflüsse auf die Kennlinien des OFETs und erklärt damit die in Kapitel (6.1) beschriebenen Kurzkanaleffekte. Die Auswirkungen eines solch hohen Off-Stroms sind auch in Abbildung (6.7) zu erkennen. Bei genauem hinsehen sieht man dort für die Werte bei  $V_{DS} = -40\text{V}$  eine Abweichung von der Gerade für eine grüne Punktwolke, also genau für die OFETs mit  $L = 5\ \mu\text{m}$ . Dies ist dadurch zu erklären, dass der Off-Strom dieser OFETs einen merkbar hohen Beitrag zu  $I_{On}$  liefert, welcher nicht durch die Mobilität der Ladungsträger im Kanal erklärt werden kann, einfach weil dieser Strom nicht über den Kanal fließt, sondern durch das komplette Halbleitervolumen. Dies



**Abb. 6.13.:** Off-Strom aufgetragen für zwei Extremfälle: (a) Runde OFET-Geometrie mit  $W = 17,749$  mm und  $L = 100$   $\mu\text{m}$  und (c) Kamm-Geometrie mit  $W = 10$  mm und  $L = 5$   $\mu\text{m}$ . (b) zeigt die Ausgangskennlinien beider OFETs bei  $V_G = 0$  V, also gerade den parallelen Widerstand des bulk Halbleiters. Das Ersatzschaltbild für dieses Modell ist aus [2] entnommen und in (d) dargestellt.

äußert sich in der beobachteten Abweichung von der Geraden, da bei der gleichen Mobilität ein größerer Strom gemessen wird. Es entsteht also ein konstanter Abstand zur Geraden, welcher dem Off-Strom entspricht.

Bei einer weiteren Betrachtung von Abbildung (6.12) fällt auf, dass der Off-Strom für  $\frac{W}{L} \leq 200$  und  $L \leq 10$  relativ konstant bleibt und insbesondere nicht für kleine  $\frac{W}{L}$ -Verhältnisse weiter abnimmt. Es scheint also ein Grundniveau für den Off-Strom zu geben, welches durch das Probenlayout an sich erklärt werden könnte. So sind zum Beispiel die Kontaktpads von Source und Drain auch nur  $200 \mu\text{m}$  voneinander entfernt und der Spalt dazwischen ist aufgrund des *Spincoatings* ebenfalls mit dem Halbleitermaterial gefüllt. Dadurch können auch zwischen den Kontaktpads geringe Ströme fließen, die sich dann bei der Messung der Transferkennlinie des OFETs als Off-Strom bemerkbar machen. Für eine weitere Analyse der Streuung des Off-Stroms zeigt Abbildung (6.14), analog zur Behandlung der Mobilität in Abbildung (6.10), den Off-Strom von drei ausgewählten Geometrien aufgetragen gegen die laufende Probennummer. Hier erkennt man eine deutliche Schwankung des Off-Stroms über die Herstellung der Proben, welche deutlich größer ist, als die Schwankung innerhalb der OFETs einer Probe. Die in Abbildung (6.12) ersichtliche große Streuung des Off-Stroms über etwa eine Größenordnung ist also zu großen Teilen auf die Probe zu Probe Schwankungen bei der Herstellung zurückzuführen. Hierbei sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Proben in 4er Gruppen hergestellt wurden, also jeweils 4 Proben direkt nacheinander, innerhalb von ca. 1 Stunde. Allerdings sind auch innerhalb dieser 4er Gruppen schon merkliche Schwankungen zu beobachten, wie zum Beispiel bei den Proben 1 - 4 oder 17 - 20. Der Off-Strom des verwendeten PTAA-Halbleiters reagiert also sehr empfindlich auf die genauen Details der Probenherstellung, was, verglichen mit dem in Abbildung (6.2) gezeigten On-Strom, zu einer starken Streuung über das gesamte Probenensemble führt. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Einflussfaktoren bei der Herstellung lassen sich leider keine genaueren Rückschlüsse auf die tatsächlichen Ursachen mehr ziehen. Um hier wirklich ins Detail gehen zu können wäre eine neue Messreihe nötig, bei der die Proben unter genau einstellbaren Bedingungen, wie zum Beispiel in einer Flowbox, hergestellt werden müssten. Durch eine Variation der möglichen Einflussfaktoren (Temperatur, Luftfeuchte, Beleuchtung, Trocknung, etc.) ließen sich dann Korrelationen zwischen Herstellung und elektrischen Parametern suchen und dann auch Rückschlüsse auf die Einflussfaktoren ziehen.



**Abb. 6.14.:** Off-Strom von drei ausgewählten Geometrien aufgetragen gegen die laufende Probennummer. (a) linearer- und (b) Sättigungsbereich.

## 6.5. On/Off-Verhältnis

Eine weitere wichtige Kenngröße eines OFETs, bzw. eines jeden Transistors ist das Verhältnis von On-Strom zu Off-Strom. Dieses ergibt sich sofort aus  $\frac{I_{On}}{I_{Off}}$  und ist daher an sich kein zusätzlicher Parameter eines OFETs, sondern eine aus zwei anderen Parametern berechnete Größe. Für die Funktion des OFETs als Schalter, welcher einen Strom an- und ausschalten soll, ist ein möglichst hohes On/Off-Verhältnis von mehreren Größenordnungen erwünscht. Sehr gute OFETs kommen hier auf Werte von  $10^6$  [28] bis zu  $10^8$  [38], andere erreichen auch nur Werte um  $10^3$  [3]. Für die in dieser Arbeit hergestellten OFETs zeigt Abbildung (6.15) das On/Off-Verhältnis, wiederum aufgetragen gegen das  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis der verschiedenen OFET-Geometrien. Man erkennt dort ein Maximum für das On/Off-Verhältnis von ca.  $3,3 \cdot 10^3$ , also im Vergleich mit den vorher zitierten Werten eher im unteren Bereich. Weiterhin fällt auf, dass  $\frac{I_{On}}{I_{Off}}$  mit  $\frac{W}{L}$  ansteigt bis zu einem  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis von 200. Danach zeigen die beiden Geometrien mit größerem  $\frac{W}{L}$  für  $V_{DS} = -5V$  kaum noch eine Steigerung und gehen für  $V_{DS} = -40V$  sogar mit dem On/Off-Verhältnis wieder herunter. Zur Interpretation dieses Effekts sind aufgrund der Berechnung von  $\frac{I_{On}}{I_{Off}}$  auch die Abbildungen (6.12) und (6.2) hilfreich. Daraus wird ersichtlich, dass zwar der On-Strom linear mit  $\frac{W}{L}$  ansteigt, aber eben auch der Off-Strom für ein kleines  $L$  und ein großes  $W$  stark zunimmt. Für die beiden Geometrien mit dem größten  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis überwiegt für  $V_{DS} = -40V$  der letztere Effekt, so dass das On/Off-Verhältnis wieder abnimmt. Gleichzeitig zeigen die Geometrien mit sehr kleinem  $\frac{W}{L}$  ein deutlich niedrigeres On/Off-Verhältnis als die anderen Geometrien, was auf

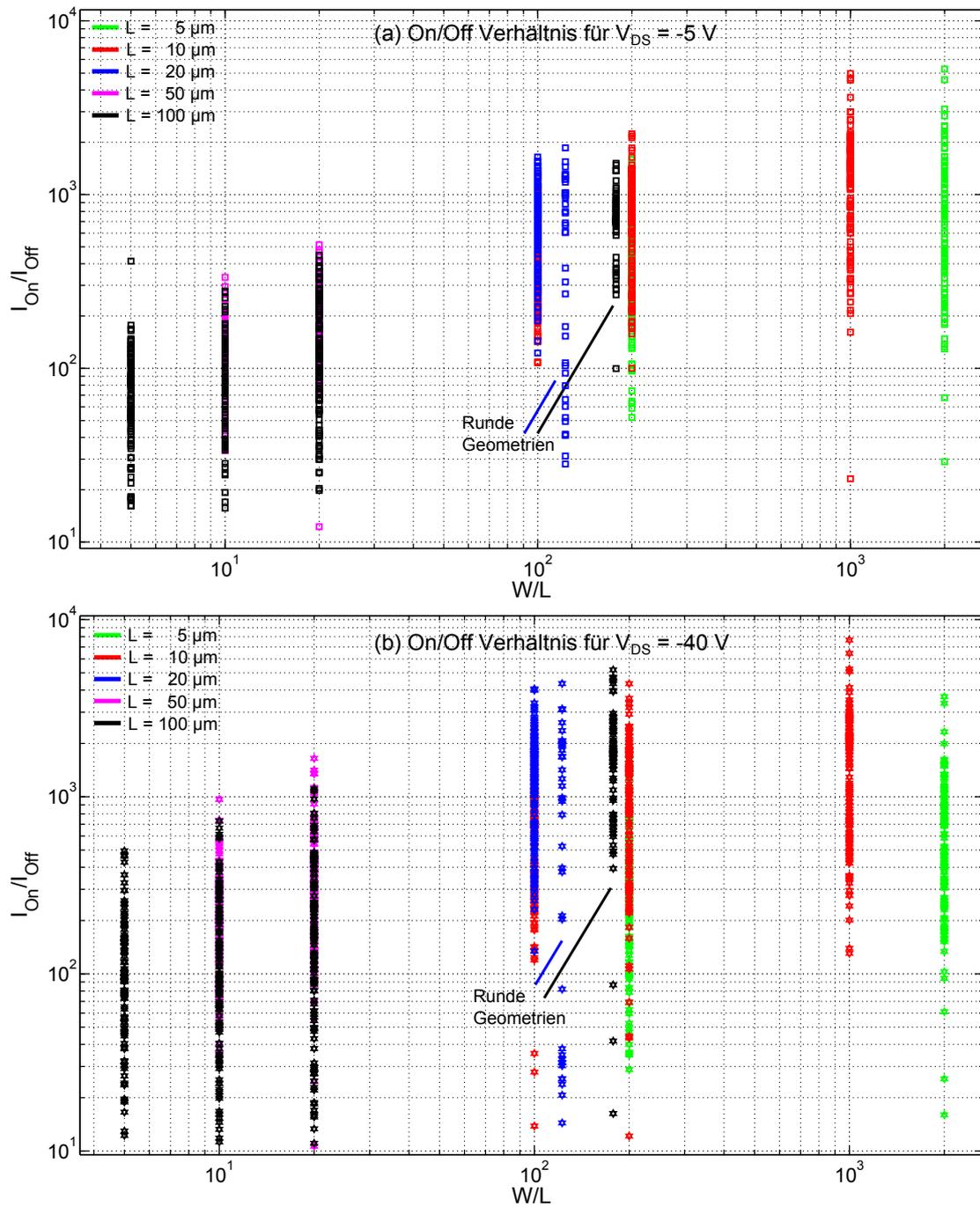


Abb. 6.15.: On/Off-Verhältnis für die Transferkennlinien im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich, aufgetragen gegen das  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis der verschiedenen OFET-Geometrien.

das oben erwähnte Grundniveau des Off-Stroms zurückzuführen ist: Der On-Strom sinkt mit abnehmendem  $\frac{W}{L}$ , während der Off-Strom gleichzeitig stabil bleibt, so dass sich die beobachteten kleinen On/Off-Verhältnisse ergeben. Die große Streuung von  $\frac{I_{On}}{I_{Off}}$  ist nach einen Vergleich der Abbildungen (6.12) und (6.2) auf die große Streuung des Off-Stroms zurückzuführen. Dieser schwankt teilweise über eine Größenordnung und damit wesentlich stärker als der On-Strom. Der entscheidende Faktor für ein reproduzierbares und möglichst hohes On/Off-Verhältnis, bei dem benutzten PTAA-Material, ist also der Off-Strom. Hier hat das Material einen Schwachpunkt, da es eine vergleichsweise hohe intrinsische Leitfähigkeit hat, welche auch noch von den genauen Umständen der Probenherstellung abhängt. Dies führt dazu, dass ein OFET einen Mindestwert für das  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis braucht, um einen brauchbaren Kontrast zwischen On-Strom des OFETs und der intrinsischen Leitfähigkeit zu erzeugen. Wenn man diesen brauchbaren Kontrast bei mindestens  $10^2$  ansetzt, benötigt man laut Abbildung (6.15) ein  $\frac{W}{L}$  von mindestens 100, wenn man vermeiden will, dass ein signifikanter Anteil der OFETs unter diesem Kontrast liegt. Gleichzeitig kann man das  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis nicht beliebig erhöhen, indem man  $L$  immer weiter verkleinert, da schon bei  $L = 10 \mu\text{m}$  ein Punkt erreicht ist, wo ein mit kleiner werdendem  $L$  steigender Off-Strom den mit  $\frac{W}{L}$  steigenden On-Strom kompensiert. Die Konsequenz ist,  $W$  zu vergrößern, was einen wesentlich geringeren Einfluss auf den Off-Strom hat, was aber dazu führt, dass die OFETs flächenmäßig sehr groß werden.

Nach der Betrachtung von  $I_{On}$ ,  $I_{Off}$  und  $\frac{I_{On}}{I_{Off}}$  lassen sich nun folgende Konsequenzen ziehen:

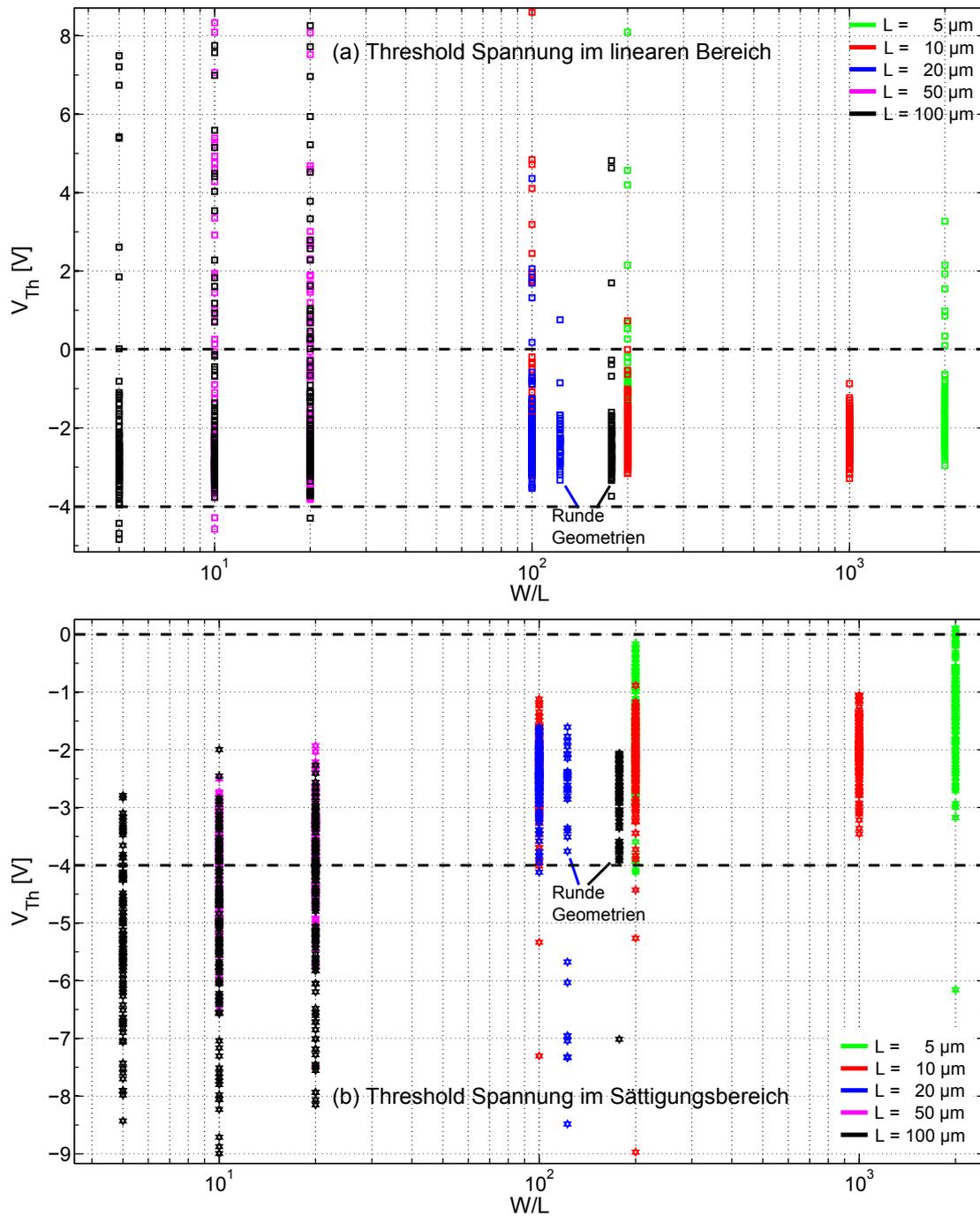
- $I_{On}$  verhält sich größtenteils wie erwartet und hängt linear vom  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis der OFET-Geometrie ab. Abweichungen von diesem linearen Zusammenhang für kleine  $\frac{W}{L}$ -Verhältnisse sind durch Streuströme begründet, welche im **eingeschalteten** OFET parallel zum Kanal fließen.
- Off-Ströme im **ausgeschalteten** OFET lassen sich durch einen parallel zum OFET geschalteten Widerstand modellieren und sind abhängig vom  $W$  und vom  $L$  der OFET-Geometrie. Insbesondere zeigen sehr kleine  $L$  von  $5 \mu\text{m}$  deutliche Kurzkanaleffekte, welche sich auch in Form von hohen Off-Strömen äußern. Dies hängt direkt mit dem verwendeten Layout, der flächigen Auftragung des Halbleiters mittels *Spincoating* und natürlich mit der vergleichsweise hohen intrinsischen Leitfähigkeit des Halbleitermaterials selbst zusammen.

## 6.6. Schwellspannung

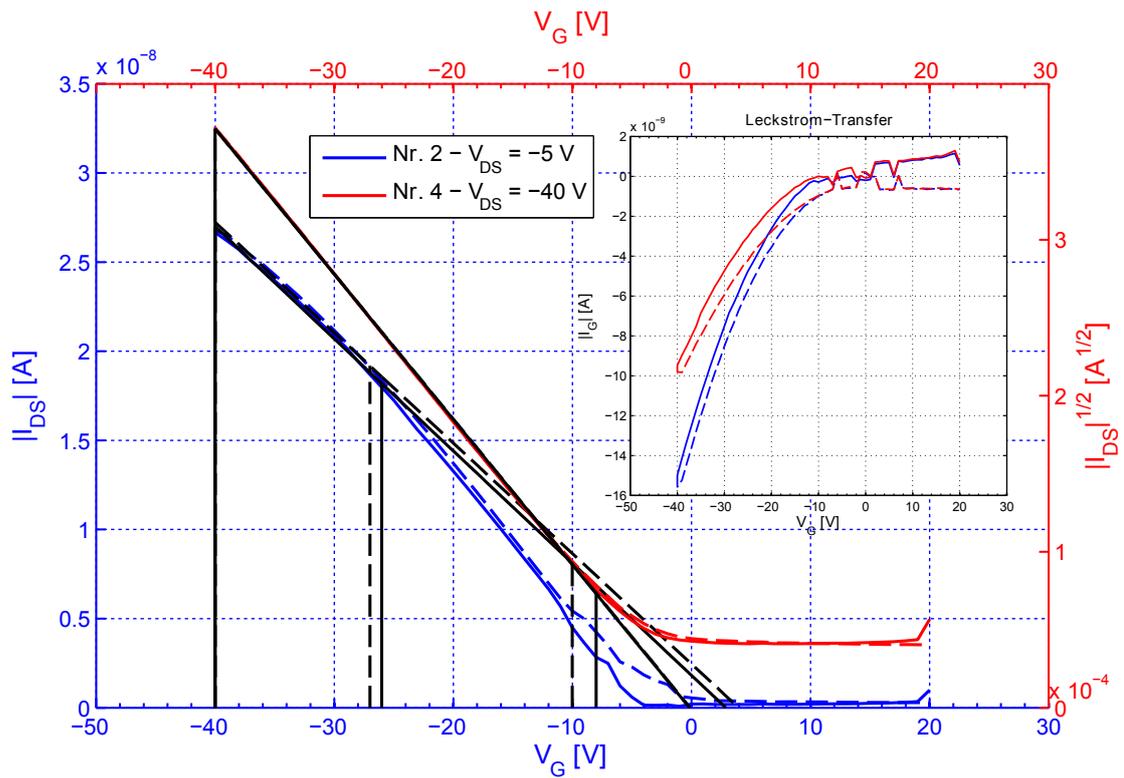
Als nächster Parameter soll die Schwellspannung  $V_{Th}$  diskutiert werden, welche den Punkt beschreibt, an dem der Strom über den Kanal des OFETs eingeschaltet wird. Ein wichtiger Unterschied zur Schwellspannung bei Silizium MOSFETs ist der Operationsmodus eines

OFETs. Ein Silizium FET operiert typischerweise in Inversion, was eine präzise Definition der Schwellspannung erlaubt. Die Schwellspannung ist in diesem Zusammenhang genau die Spannung, die am Gate anliegen muss, um den Halbleiter in die Inversion zu treiben [15]. Im Gegensatz dazu arbeitet ein OFET in Akkumulation und sollte damit im idealen Fall gar keine Schwellspannung haben [2]. Die an realen OFETs beobachtete Schwellspannung wird typischerweise auf in Fallenstellen immobilisierte Ladungsträger an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum zurückgeführt [2] [39]. Diese immobilen Ladungsträger können nicht zum Stromtransport zwischen Source und Drain beitragen, wirken aber als Ladungsträger in der Gate-Kapazität. Die Konsequenz ist, dass erst eine gewisse Mindestspannung, eben die Schwellspannung  $V_{Th}$ , am Gate anliegen muss, um Ladungsträger an der Halbleiter-Dielektrikum Grenzfläche zu akkumulieren, die nicht immobilisiert sind und somit einen Strom zwischen Source und Drain tragen können. Die Schwellspannung ist also auch ein Maß für die Qualität der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum. Ausgewertet wird die Schwellspannung nach dem in Kapitel (3.5) vorgestellten Modell.

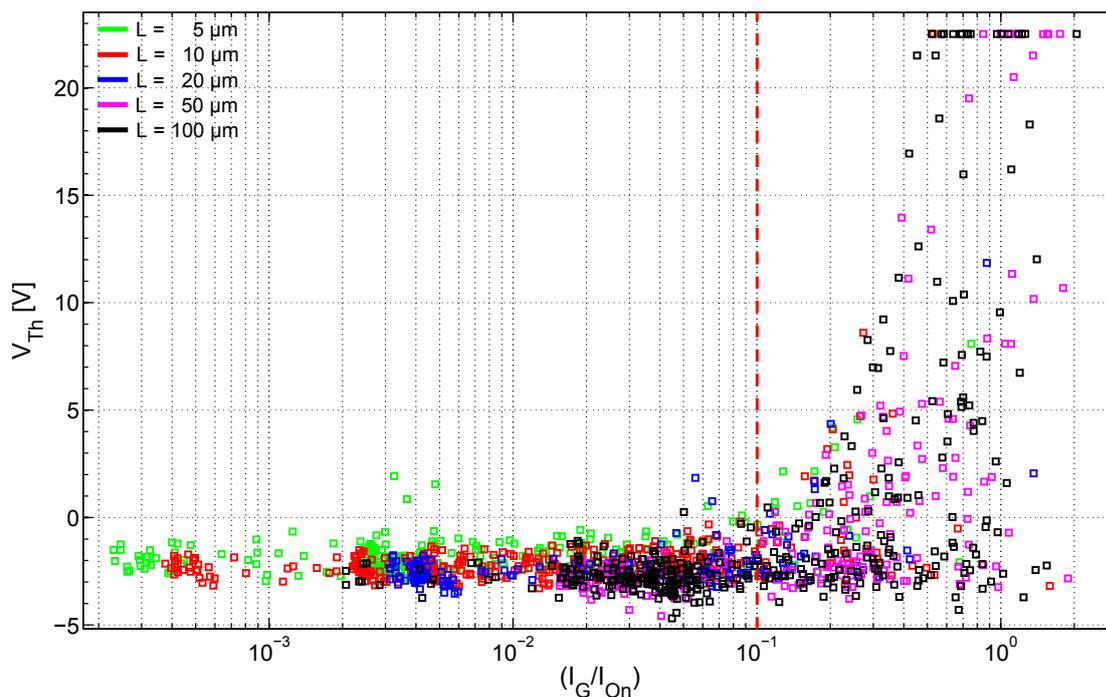
Abbildung (6.16) zeigt die Schwellspannung der verschiedenen OFET-Geometrien im linearen und Sättigungsbereich, aufgetragen gegen das  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis der OFET-Geometrie. Hier erkennt man, dass die Schwellspannung für einen Großteil der OFETs in einem Bereich von 0V bis  $-4V$  liegt, was nach der obigen Diskussion auf eine gute Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum schließen lässt. Dies ist vergleichbar mit den Ergebnissen aus [3] für ein low-k Polymer als Dielektrikum für einen PTAA-Halbleiter und wesentlich weniger als in [39] für PTAA und ein  $\text{SiO}_2$  Dielektrikum. Auffällig sind jedoch die Ausreißer in der Schwellspannung, die für den linearen Bereich in Richtung positiver Spannungen und für den Sättigungsbereich in Richtung negativer Spannungen gehen. Dabei ist es vor allem überraschend, dass die gleichen OFET-Geometrien in zwei verschiedene Richtungen driften. Um diesen Effekt besser verstehen zu können, soll im Folgenden anhand von Extrembeispielen der Effekt und die Ursachen gezeigt werden. Dazu zeigt Abbildung (6.17) zunächst ein Beispiel für den Drift zu positiven  $V_{Th}$  im linearen Bereich. Man erkennt hier für die blaue Transferkennlinie im linearen Bereich, dass die automatische Geradenanpassung fehlgeschlagen ist. Die Ausgleichsgerade wurde an den hinteren Bereich der Kennlinie angepasst, der jedoch gekrümmt ist im Vergleich zum Rest der Kennlinie. Der Grund für diese Krümmung wird im Inset von Abbildung (6.17) ersichtlich: Der Gate-Leckstrom für die blaue Kennlinie ist vergleichsweise hoch, nämlich bei knapp 16 nA, während der Kanalstrom bei ungefähr 27 nA liegt, also weniger als doppelt so hoch ist wie der Leckstrom. Der Grund für die Krümmung der Kennlinie ist also mutmaßlich ein leitfähiger Pfad zwischen Drain und Gate im Dielektrikum, über den ein Strom von Drain zu Gate fließt. Wenn das Gate beim Durchfahren der Transferkennlinie auf einem niedrigeren Potential liegt als Drain, also für  $V_G < V_{DS} = -5V$ , hat der Strom zwischen Drain und Gate gerade das umgekehrte Vorzeichen wie der Strom zwischen Drain und Source. Daher wird der in Summe an Drain gemessene Strom  $I_{DS}$  niedriger



**Abb. 6.16.:** Schwellspannung der verschiedenen OFET-Geometrien im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich, aufgetragen gegen  $\frac{W}{L}$ .



**Abb. 6.17.:** Extrembeispiel für den Drift von  $V_{Th}$  in Richtung positiver Spannungen bei der Transferkennlinie im linearen Bereich (blau).



**Abb. 6.18.:** Korrelation zwischen Schwellspannung im linearen Bereich und  $\frac{I_G}{I_{On}}$ .

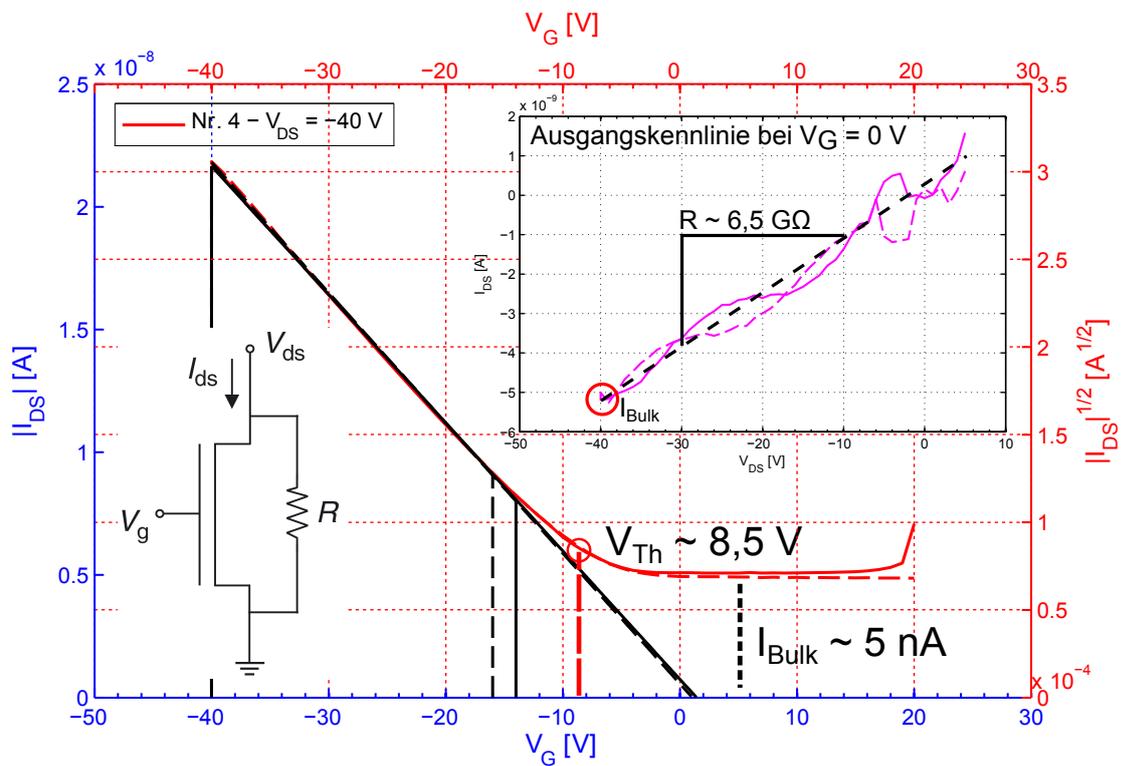
und die Transferkennlinie krümmt sich, wie in Abbildung (6.17) dargestellt. Die in Abbildung (6.16 a) gezeigte Verschiebung der Schwellspannung ist also ein Symptom eines ganz anderen Effektes, nämlich einer Beeinflussung der Transferkennlinie durch Leckströme über das Gate. Um dies noch einmal für die Gesamtheit aller Messungen nachzuprüfen zeigt Abbildung (6.18) die Korrelation zwischen der Schwellspannung im linearen Bereich und  $\frac{I_G}{I_{On}}$ , also dem Gate-Leckstrom bezogen auf den Kanalstrom. In dieser Auftragung wird deutlich, dass es tatsächlich eine Grenze gibt, ab der die berechnete Schwellspannung anfängt, in den positiven Bereich zu driften. Diese Grenze liegt bei ca. 10 % für das Verhältnis von Gate-Leckstrom zum On-Strom des OFETs. Mit Hilfe dieser Betrachtung ist es also möglich, eine objektive Grenze für einen Gate-Leckstrom zu setzen, der für die Charakterisierung einzelner OFETs noch tolerierbar ist, weil er die Kennlinienmessung nicht beeinflusst. Diese Beobachtung hängt natürlich direkt mit Algorithmus zur Geradenanpassung zusammen, der anscheinend sehr empfindlich auf ein Abknicken der Transferkennlinie am Ende des Messbereichs reagiert. Der tatsächliche Effekt, also das Abknicken der Transferkennlinie, ist jedoch ein realer Einfluss des Gate-Leckstroms auf die Transferkennlinie, so dass die aus Abbildung (6.18) ermittelte Grenze von 10 % für das Verhältnis von Gate-Leckstrom zum On-Strom eine reale Bewandnis hat und kein Artefakt des Anpassungsalgorithmus darstellt.

Bei der Betrachtung des farblich codierten  $L$  der OFETs in Abbildung (6.18) fällt auf, dass vor allem die OFET-Geometrien mit den beiden größten  $L$ -Werten anfällig sind für den beschrie-

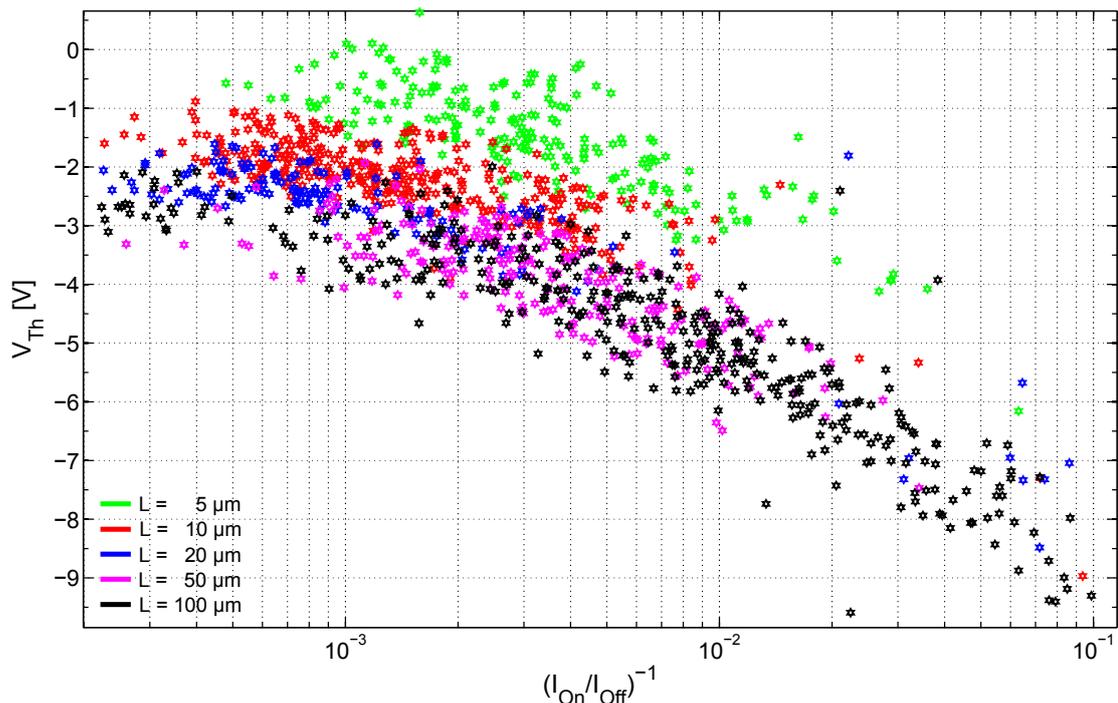
benen Drift von  $V_{Th}$  in den positiven Bereich. Hierzu zeigt der Vergleich mit Abbildung (6.16), dass eben diese Geometrien größtenteils ein kleines  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis haben, also folglich auch einen kleinen On-Strom  $I_{On}$ . Daher reichen hier schon kleinere absolute Ströme  $I_G$  durch das Dielektrikum, um das Verhältnis  $\frac{I_G}{I_{On}}$  auf über 10 % steigen zu lassen. Weiterhin fällt auf, dass es auch bei sehr großen  $\frac{I_G}{I_{On}}$  Verhältnissen OFETs gibt, deren Schwellspannung im Bereich von 0V bis -4V liegt. Entsprechend der obigen Folgerung würde das bedeuten, dass  $I_G$  in diesem Fall keinen Einfluss auf das Verhalten der Transferkennlinie hat. Dies ist dadurch zu erklären, dass nur dann ein Einfluss auf die Transferkennlinie beobachtet wird, wenn ein Strom zwischen Drain und Gate fließt. Ein Strom zwischen Source und Gate wird zwar auf der Gate-Seite als Leckstrom gemessen, hat aber auf den an Drain gemessenen Kanalstrom keine Auswirkungen. Siehe dazu auch die Skizze in Abbildung (6.21) zur Diskussion des Gate-Leckstroms. Das bedeutet für das oben eingeführte Kriterium, dass bei einem OFET mit  $\frac{I_G}{I_{On}} < 10\%$  kein Einfluss der Gate-Leckströme auf die Kennlinien mehr festzustellen ist, die Umkehrung davon jedoch nicht immer gilt.

Nach der Betrachtung der Schwellspannung im linearen Bereich soll nun der Sättigungsbereich näher untersucht werden. Hier stellt man anhand von Abbildung (6.16) fest, dass auch im Sättigungsbereich der Großteil der OFETs mit  $V_{Th}$  in einem Bereich von 0V bis -4V liegt. Allerdings erkennt man auch hier einen Drift von  $V_{Th}$ , nur dieses Mal in den negativen Bereich. Auch hier soll wieder ein Extrembeispiel in Abbildung (6.19) die Ursache für diesen Drift verdeutlichen. Dargestellt ist hier die Ermittlung der Schwellspannung über die Anpassung einer Geraden an den in der Wurzelauflösung linearen Teil der Transferkennlinie. Hier wird der Einfluss der in Kapitel (3.5) beschriebenen Korrektur der Schwellspannung mit dem *Bulk*-Strom durch die komplette Halbleiterschicht deutlich. Ohne diese Korrektur würde die Schwellspannung am Schnittpunkt von Ausgleichsgerade und X-Achse abgelesen, was ca. +1,5V ergeben würde. Offensichtlich ist dieser Wert jedoch nicht korrekt, da in der Kennlinie an diesem Punkt noch kein Einschalten des OFETs erkennbar ist. Durch die Korrektur wird der Wert von  $V_{Th}$  zu -8,5V ermittelt, was nach der Betrachtung der Kennlinie durchaus als sinnvoller Wert gelten kann. Ein objektiv richtiger oder falscher Wert ist hier wegen dem oben beschriebenen Betrieb des OFETs in Akkumulation nicht klar definierbar. Es kann also nur die etwas schwammige Definition verwendet werden, dass der OFET bei der Schwellspannung gerade einschalten soll. Es ergibt sich also die Situation, dass die Schwellspannung des OFETs abhängig ist vom *Bulk*-Strom durch den Halbleiter, bzw. vom Off-Strom des OFETs. Dies wird auch anschaulich deutlich bei der Betrachtung des Ersatzschaltbildes in Abbildung (6.19): In diesem Bild ist der durch die Gatespannung modulierbare Widerstand des OFETs parallel geschaltet mit einem festen Widerstand  $R$ . Für den Strom gilt daher in dieser Schaltung:

$$I_{ges} = I_{OFET} + I_R = \frac{V_{DS}}{R_{OFET}(V_G)} + \frac{V_{DS}}{R} \quad (6.1)$$



**Abb. 6.19.:** Darstellung des Fits zur Berechnung der Schwellspannung im Sättigungsbereich. Ausgewählt ist ein OFET mit stark ins Negative verschobener Schwellspannung. Das Inset oben rechts zeigt den Bulk-Strom durch den Halbleiter, ohne angelegte Gate-Spannung. Interpretiert wird der Bulk Strom nach dem Ersatzschaltbild unten links, entnommen aus [2].



**Abb. 6.20.:** Korrelation zwischen der Schwellspannung im Sättigungsbereich und dem Kehrwert des On/Off-Verhältnisses. Für einen steigenden Off-Strom im Verhältnis zum On-Strom ist ein Drift der Schwellspannung in den negativen Bereich zu erkennen.

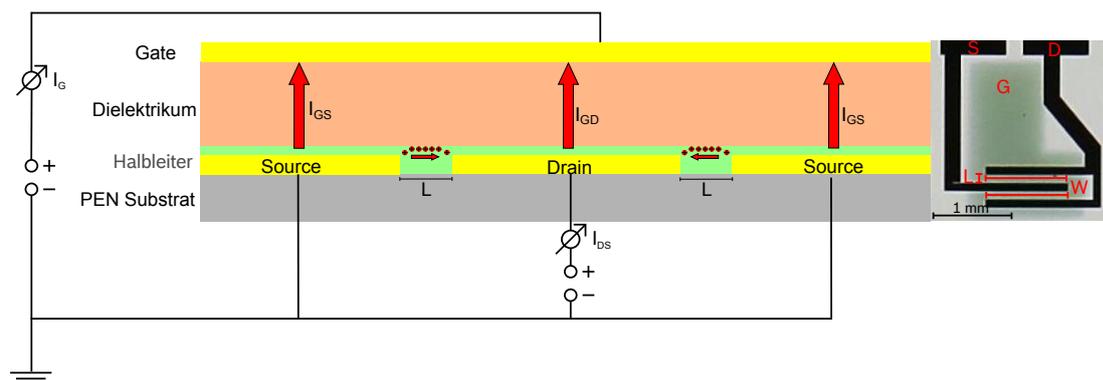
Dies hat zur Folge, dass der Strom über den OFET erst dann merkbar zum Gesamtstrom beiträgt, wenn der Widerstand des OFET-Kanals durch das Anlegen einer negativen Gatespannung in den Bereich von  $R$  kommt. Erst dann zeigt die Kennlinie ein OFET-Verhalten und folglich kann auch erst dann eine Schwellspannung abgelesen werden. Um diesen Zusammenhang für die Gesamtheit der Messdaten bestätigen zu können, bietet es sich wiederum an, nach einer entsprechenden Korrelation zu suchen. Nach Gleichung (6.1) wird der Einfluss des *Bulk*-Stroms oder Off-Stroms auf die Kennlinie durch das Verhältnis von Off-Strom zu OFET-Strom bestimmt. Zu diesem Verhältnis gibt es bereits einen Parameter, nämlich das On/Off-Verhältnis des OFETs. Nach der obigen Argumentation müsste die Schwellspannung weiter ins negative driften, wenn der Off-Strom in Relation zum On-Strom steigt. Das bedeutet, die Schwellspannung müsste korreliert sein mit dem Kehrwert des On/Off-Verhältnisses. Diese Korrelation zeigt Abbildung (6.20). Man erkennt hier in der Tat einen Zusammenhang und man kann wiederum anhand dieser Darstellung eine Grenze ziehen und einen Mindestwert für das On/Off-Verhältnis fordern, damit der Einfluss des Off-Stroms nicht zu stark auf die Schwellspannung wirkt. Eine mögliche Grenze wäre hier ein On/Off-Verhältnis von mindestens  $10^2$ , welches mit einer Schwellspannung von maximal  $-6,5\text{V}$  einhergehen würde.

Damit ließen sich die größten Verschiebungen herausfiltern, während man gleichzeitig einen Großteil der OFETs als funktionsfähig deklarieren könnte. Diese Grenze ist jedoch nicht so eindeutig, wie in Abbildung (6.18) und hängt letztendlich von den konkreten Anforderungen an die Schwellspannung der OFETs ab. Weiterhin fällt bei der Betrachtung von Abbildung (6.20) auf, dass wiederum die OFETs mit großem  $L$  und kleinem  $\frac{W}{L}$  den stärksten Drift aufweisen. Dies liegt an dem in Abschnitt (6.4) festgestellten Grundniveau für den Off-Strom, kombiniert mit den niedrigen Kanalströmen dieser OFET-Geometrien.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Off-Strom der untersuchten OFETs nicht nur den offensichtlichen negativen Einfluss auf das On/Off-Verhältnis hat, sondern auch die Schwellspannung beeinflussen kann.

## 6.7. Gate-Leckströme

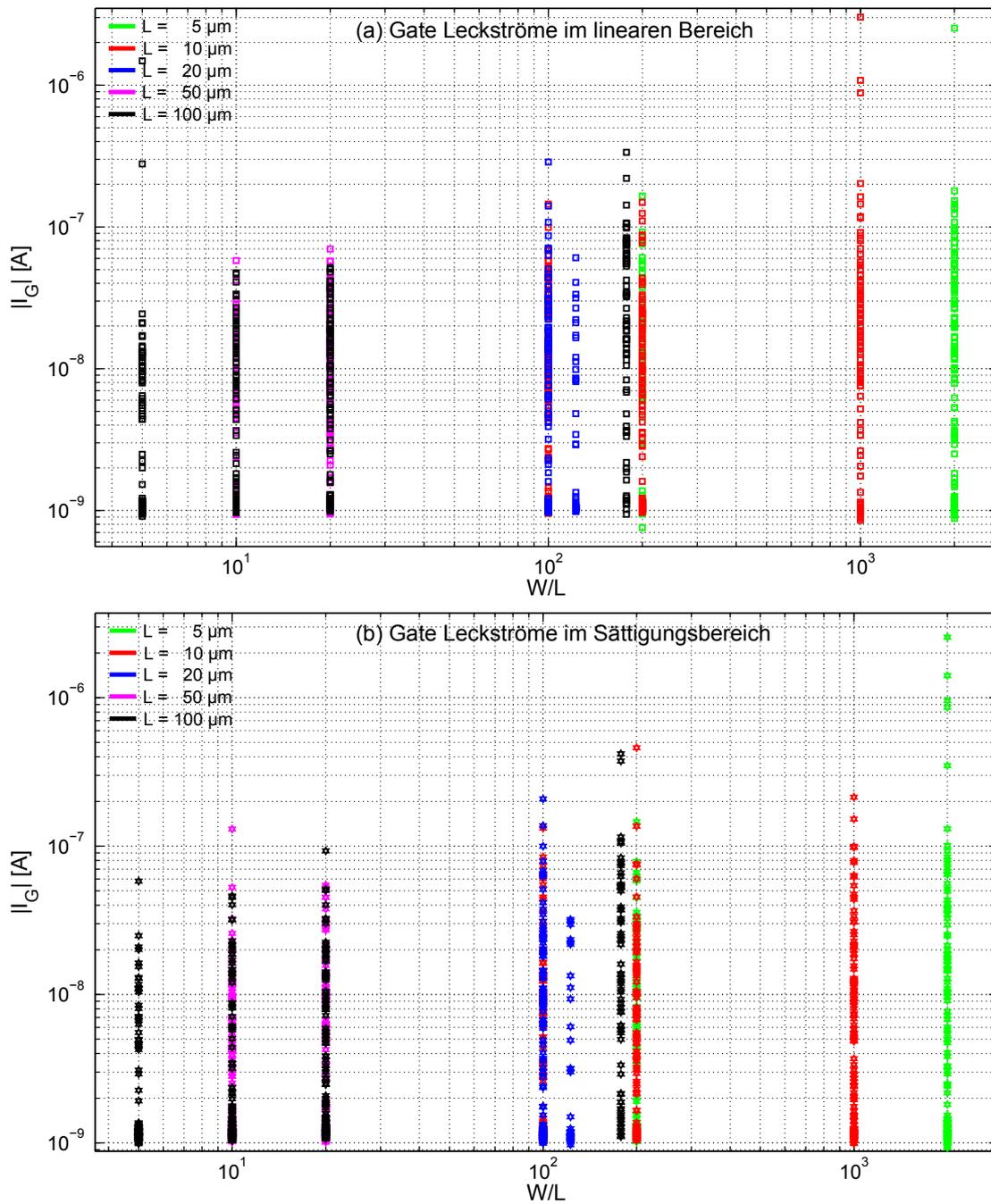
Als letzter Parameter für die Eigenschaften der untersuchten OFETs im Nullzustand soll im Folgenden der Gate-Leckstrom diskutiert werden. Dazu ist in Abbildung (6.21) noch einmal der Aufbau eines OFETs in dem verwendeten Layout gezeigt, inklusive der Verschaltung der einzelnen Elektroden des OFETs und den Punkten, an denen die Ströme tatsächlich gemessen werden. Der Fokus liegt hier auf dem Gate-Leckstrom, der unterteilt wird in  $I_{GS}$  und  $I_{GD}$ , je nachdem an welcher Stelle der Strom durch das Dielektrikum fließt. Dabei hängt  $I_{GS}$  nur von der Spannung am Gate ab, da Source in dem verwendeten Messaufbau immer auf Erde liegt. Dagegen ist  $I_{GD}$  abhängig von der Potentialdifferenz zwischen Gate und Drain, also von der Differenz  $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$ . Aus diesem Grund misst man häufig einen etwas höheren Gesamt-Leckstrom  $I_G$  bei der Transferkennlinie im linearen Bereich, also bei  $V_{DS} = -5V$ , da die Potentialdifferenz zwischen Drain und Gate hier größer ist, als im Sättigungsbereich. In der Gesamtbetrachtung der Gate-Leckströme in Abbildung (6.22)



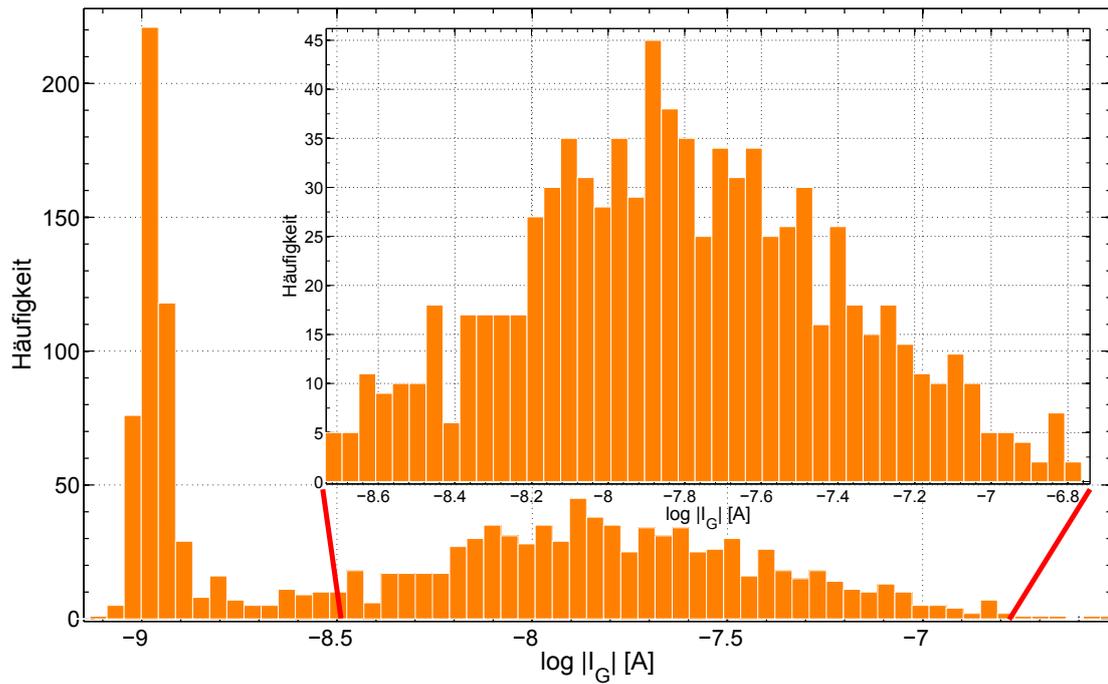
**Abb. 6.21.:** Schematische Darstellung des OFET Layouts und der Leckströme über das Gate.

ist dieser Effekt aufgrund der hohen Streuung kaum zu erkennen. Ein Beispiel für dieses Verhalten findet sich jedoch im Inset in Abbildung (6.17). Was jedoch in Abbildung (6.22) auffällt, ist eine Konzentration von OFETs bei sehr niedrigen Gate-Leckströmen von ca. 1 nA, für jede Geometrie und für beide Transferkennlinien. Das verwendete polymere Dielektrikum kann also anscheinend prinzipiell sehr gute Ergebnisse, also niedrige Leckströme, liefern. Die hohe Streuung der Leckströme über 2 Größenordnungen ist wahrscheinlich auf lokale Defekte im Dielektrikum bei einzelnen OFETs zurück zu führen. So kann ein einzelnes Staubkorn während dem *Spincoating* des Dielektrikums oder ein Kratzer im Dielektrikum beim Auflegen der Sputtermaske für die Deposition der Gate Schicht leicht zu einem solchen lokalen Defekt führen.

Wenn während der Herstellung der Proben solche zufälligen Effekte an einzelnen OFETs auftreten, sollte sich das in der Verteilung des Gate-Leckstroms bemerkbar machen. Dazu zeigt Abbildung (6.23) ein Histogramm der zur Basis 10 logarithmierten maximalen Gate-Leckströme aller hergestellten OFETs im Nullzustand, gemessen bei der Transferkennlinie im linearen Bereich. In der Tat erkennt man hier einen Peak bei  $-9$ , also bei  $10^{-9}$  A und eine flache Normalverteilung der Leckströme in einem Bereich bis ca.  $10^{-7}$  A. Dies bedeutet, dass die maximalen Gate-Leckströme oberhalb  $10^{-9}$  A annähernd Log-Normalverteilt sind und somit nach dem zentralen Grenzwertsatz auf viele zufällige Ereignisse einer jeweils beliebigen Verteilung zurückzuführen sind, welche sich in diesem Fall multiplikativ überlagern. Da in Abbildung (6.23) der Ausgangszustand der OFETs nach der Herstellung betrachtet wird, können unterschiedliche Lagerungsbedingungen als Grund ausgeschlossen werden. Die Zufallsereignisse, die zu der beobachteten breiten Verteilung der Leckströme führen, müssen also während der Herstellung der Proben passiert sein. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass ein optimierter Herstellungsprozess, also zum Beispiel die Herstellung in einem Reinraum, die Zahl der OFETs mit Leckströmen über  $10^{-9}$  A reduzieren könnte. Welche Einflüsse hier genau am Werk sind und wie groß der jeweilige Effekt ist kann eine statistische Analyse jedoch nicht zeigen. Hier hilft nur der direkte Vergleich von unter verschiedenen Bedingungen produzierten OFETs.



**Abb. 6.22.:** Gate-Leckströme  $I_G$  aufgetragen gegen das  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis der verschiedenen OFET-Geometrien. (a) linearer Bereich bei  $V_{DS} = -5\text{V}$ , (b) Sättigungsbereich bei  $V_{DS} = -40\text{V}$ .



**Abb. 6.23.:** Histogramm der zur Basis 10 logarithmierten maximalen Gate-Leckströme für die Transferkennlinie im linearen Bereich. Das Inset zeigt im Detail die Verteilung der Leckströme oberhalb des Peaks bei  $10^{-9}$  A.

## Elektrische Eigenschaften während der Alterung

Nachdem im vorherigen Kapitel die elektrischen Eigenschaften der Betrachteten OFETs direkt nach der Herstellung im Detail betrachtet wurden, behandelt der erste Teil dieses Kapitel die Alterung dieser elektrischen Eigenschaften in Form der Änderung der verschiedenen OFET-Parameter. Dabei konzentriert sich die Betrachtung auf eine einzelne Geometrie mit  $W = 2\text{ mm}$  und  $L = 20\text{ }\mu\text{m}$ , da diese Geometrie einerseits ein  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis hat, welches groß genug ist um Streuströme, wie in Kapitel (6.3) beschrieben, vernachlässigen zu können. Andererseits ist die Kanallänge  $L$  groß genug, dass keine Kurzkanaleffekte beobachtet werden. Für diese Geometrie werden daher die geringsten unerwünschten Störeinflüsse erwartet, so dass sie sich von den betrachteten Geometrien am besten zur Bewertung der reinen Alterungseffekte eignet. Weiterhin ist diese Geometrie repräsentativ für den untersuchten OFET-Aufbau, da die zugrundeliegenden Alterungseffekte nicht von der speziellen OFET-Geometrie abhängig sind.

Der erste Teil dieses Kapitels behandelt die quantitative Entwicklung der verschiedenen OFET-Parameter im Verlauf der Alterung und unter den verschiedenen Lagerungsbedingungen. Im zweiten Teil des Kapitels folgt dann eine qualitative Betrachtung der zugrundeliegenden Alterungseffekte anhand des Verhaltens ausgewählter Kennlinien von besonders stark und besonders schwach gealterten OFETs.

### 7.1. Alterung der elektrischen Parameter

In diesem Abschnitt erfolgt der quantitative Vergleich der elektrischen OFET-Parameter im Verlauf der Alterung. Die Reihenfolge der Behandlung ist dabei die selbe wie in Kapitel (6).

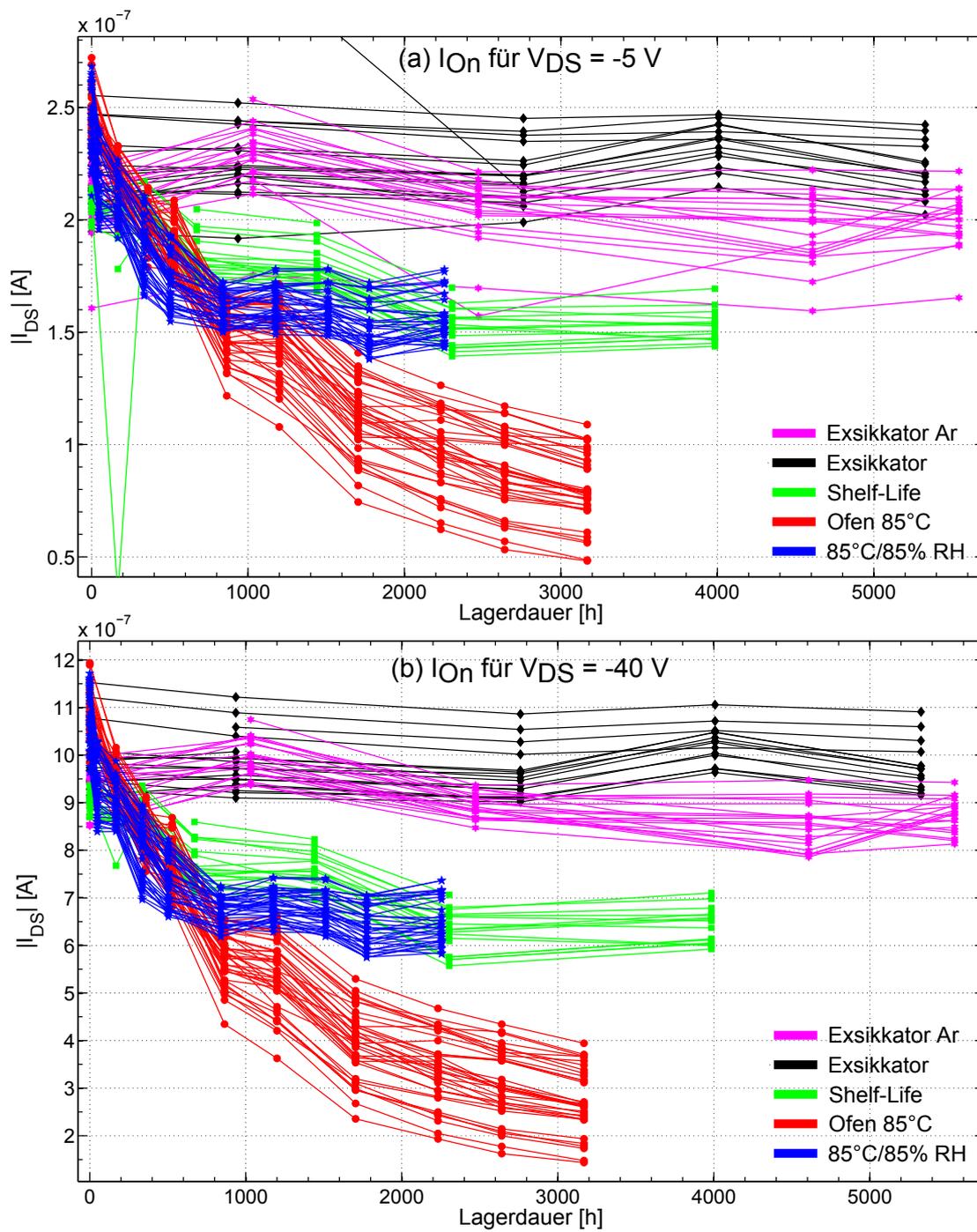
Auch die Defektkriterien sind die selben, wie in Abschnitt (5.3) beschrieben und damit analog zur Betrachtung des Nullzustands. Ein nach diesen Kriterien als defekt klassifizierter OFET erscheint nicht mehr in den folgenden Abbildungen zur zeitlichen Entwicklung der einzelnen Parameter. Dies führt zu der Situation, dass die zu einem OFET gehörende Datenreihe vor dem Ende der Alterung abbrechen kann, falls der OFET im Laufe der Alterung als defekt klassifiziert wird. Es kann auch zu der Situation kommen, dass die Datenreihe eines OFETs nicht bei 0 h beginnt, falls die Messung dieses OFETs im Nullzustand aus irgendeinem Grund gescheitert ist, aber bei den folgenden Messungen erfolgreich war.

Die Kriterien sind dabei weiterhin und ganz bewusst sehr tolerant gewählt, trotz der in Abschnitt (6.6) diskutierten schärferen Grenzen für die Verhältnisse  $I_{On}/I_{Off}$  und  $I_G/I_{On}$ , um mögliche Alterungseffekte nicht im Vorfeld heraus zu filtern. Dies hat zur Konsequenz, dass einzelne Ausreißer in den Abbildungen dieses Abschnitts auftauchen, welche nicht durch die verwendeten Defektkriterien heraus gefiltert wurden. Diese Ausreißer wurden ebenfalls bewusst in den Abbildungen belassen.

### 7.1.1. Alterung des On-Stroms

Die Alterung des On-Stroms wird hier für die beiden Transferkennlinien bei  $V_{DS} = -5V$  und  $V_{DS} = -40V$  betrachtet. Eine Übersicht dazu ist in Abbildung (7.1) dargestellt. In dieser Art der Darstellung entspricht jeder Punkt dem Parameter eines OFETs an dem jeweiligen Messpunkt während der Lagerzeit. Weiterhin sind alle Punkte des selben OFETs mit Linien verbunden, um die Entwicklung des On-Stroms eines einzelnen OFETs über den Verlauf der Lagerung nachvollziehen zu können. Wenn sich diese Verbindungslinien kreuzen, deutet dies darauf hin, dass entweder ein OFET schneller oder langsamer altert als die Anderen, oder dass die Schwankungen des On-Stroms bei den jeweiligen Messungen größer sind als der eigentliche Alterungseffekt. Das letztere Verhalten sieht man in Abbildung (7.1) bei den Referenzlagerungen in den mit Argon, bzw. Trockenmittel gefüllten Exsikkatoren. Hier findet praktisch keine Alterung des On-Stroms statt, jedoch schwanken einige OFETs über die verschiedenen Messpunkte, was sich eben in den kreuzenden Verbindungslinien äußert. Diese Schwankungen liegen jedoch im Bereich der initialen Verteilung des On-Stroms im Nullzustand der OFETs, so dass dies hier nicht als Alterungseffekt interpretiert werden kann. Vermutlich sind äußere Einflüsse wie Umgebungstemperatur und Luftfeuchte während den verschiedenen Messungen für die beobachteten Schwankungen verantwortlich.

Ein anderes Bild ergibt sich bei den beiden Lagerungen unter  $85^\circ C$  und  $85^\circ C/85\%RH$ . Hier erkennt man einen deutlichen Alterungseffekt im Vergleich zur initialen Verteilung des On-Stroms. Was die Verbindungslinien angeht sind kleinere Schwankungen in den Verteilungen zwischen den verschiedenen Messungen zu erkennen. Diese äußern sich durch das Kreuzen der Verbindungslinien zwischen benachbarten OFETs in der Verteilung. Daraus lässt sich



**Abb. 7.1.:** Alterung des On-Stroms im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich für die verschiedenen Lagerungsbedingungen.

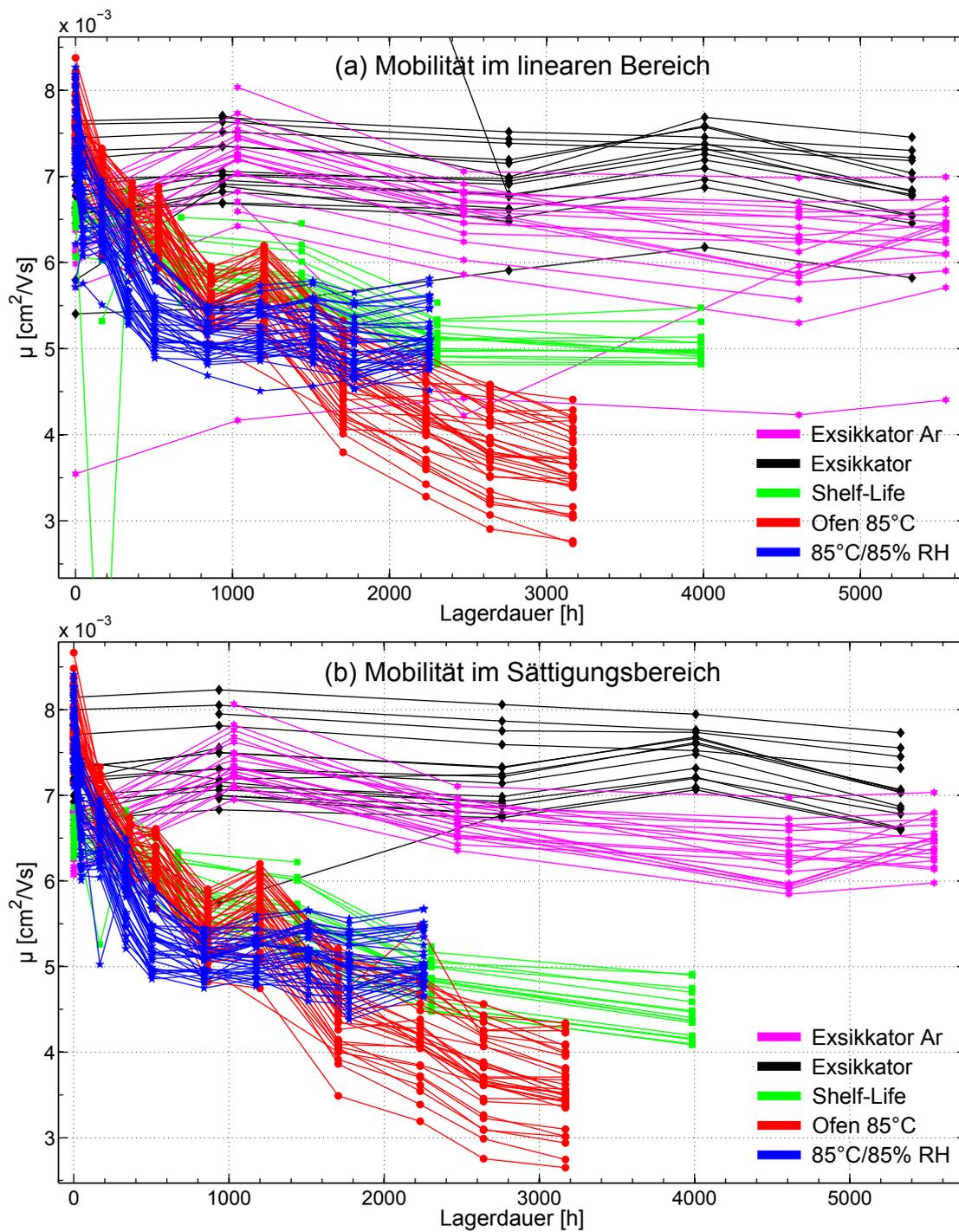
schließen, dass der On-Strom der untersuchten OFETs über alle Proben zwar relativ gleichmäßig altert, es jedoch über die Alterung hinweg zu leichten Verschiebungen der OFETs in der Verteilung kommen kann.

Was das Alterungsverhalten an sich angeht, so erkennt man bei beiden Lagerungsbedingungen einen rapiden Abfall des On-Stroms am Anfang und ein Abnehmen der Degradationsrate gegen Ende der Lagerungsdauer. Bei der 85°C/85%RH bildet sich ab ca. 900 h sogar ein Plateau aus. Dieses Plateau macht den Unterschied aus zur Lagerung im Ofen bei 85°C, denn während die Degradation am Anfang gleich schnell abläuft, entsteht durch die frühere Bildung des Plateaus die Situation, dass der On-Strom am Ende der Lagerdauer für die Lagerung bei 85°C auf ca. 30% des initialen Wertes abgefallen ist, während er für die Lagerung bei 85°C/85%RH nur auf ca. 60% abfällt. Dies widerspricht der ursprünglichen Erwartung, da ja in der Klimakammer die hohe Luftfeuchte von 85%RH noch als weitere Belastungsart dazu kommt, zusätzlich zu der Temperaturbelastung bei 85°C, die ja identisch ist zur Ofenlagerung. Dies bedeutet also, dass es eine Art gekoppelten Effekt geben muss zwischen Luftfeuchte und Temperatur, welcher dazu führt, dass die anfängliche rapide Degradation in feuchter Atmosphäre schneller gestoppt wird, als in trockener. Dieser Effekt wird im Folgenden noch an weiteren OFET-Parametern diskutiert.

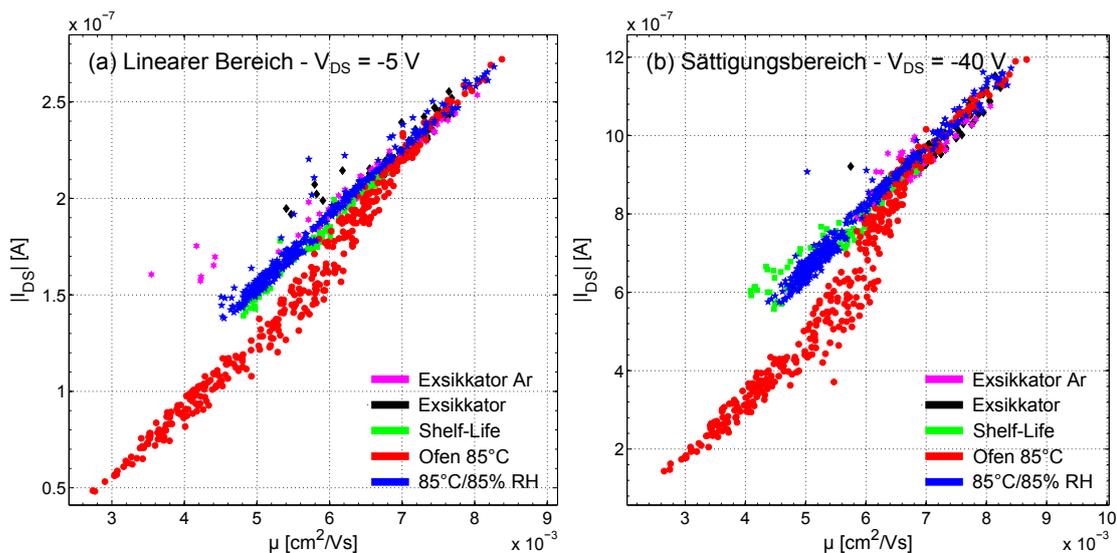
Was die Verteilung der Messwerte bei den einzelnen Messpunkten im Verlauf der Lagerdauer angeht, fällt auf, dass die Verteilung praktisch gleich bleibt über die Alterung und nicht auseinander driftet. Dies erhärtet noch einmal den Punkt der gleichmäßigen Abnahme des On-Stroms für die untersuchten OFETs. Diese Konstanz der Verteilung über die Lagerdauer gilt auch für die *Shelf-Life* Lagerung. Hier wird am Ende der selbe Wert wie bei der Alterung in der Klimakammer von ca. 60% des initialen On-Stroms erreicht, allerdings verläuft der Weg dort hin etwas anders: Die Degradation verläuft am Anfang nicht ganz so schnell, nimmt dafür dann aber zwischen 1400 und 2200 Stunden nochmal zu und erreicht bis 4000 h ein Plateau. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass hier andere Alterungseffekte vorherrschend sind. Dieser Punkt wird ebenfalls bei der Alterung der anderen OFET-Parameter noch weiter diskutiert.

### 7.1.2. Alterung der Mobilität

Abbildung (7.2) zeigt die Alterung der Mobilität analog zu der des On-Stroms in Abbildung (7.1). Man erkennt hier das gleiche Alterungsverhalten bei beiden Parametern. Nach der Diskussion des Zusammenhangs von Mobilität und On-Strom in Kapitel (6.3) und speziell in Abbildung (6.7) stellt sich die Frage, ob auch über die Alterung hinweg diese Korrelation von Mobilität und On-Strom erhalten bleibt. Dazu zeigt Abbildung (7.3) erneut die Korrelation zwischen  $I_{On}$  und  $\mu$ , dieses mal für die gesamte Dauer der Alterung, allerdings beschränkt auf die Geometrie mit  $W = 2\text{ mm}$  und  $L = 20\text{ }\mu\text{m}$ .



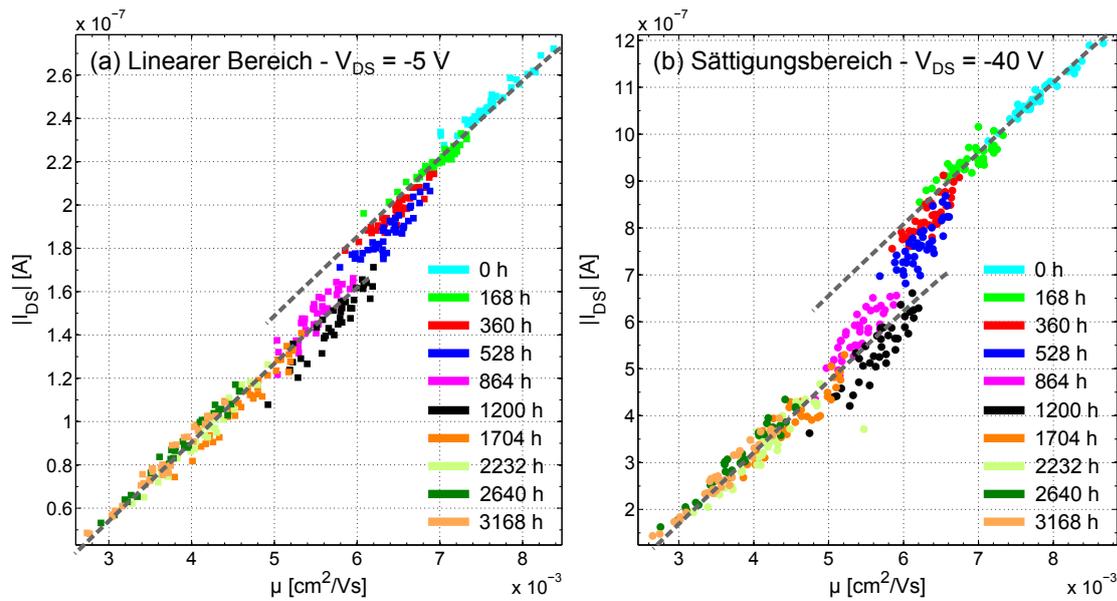
**Abb. 7.2.:** Alterung der Mobilität im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich für die verschiedenen Lagerungsbedingungen.



**Abb. 7.3.:** Korrelation zwischen On-Strom  $I_{On}$  und Mobilität  $\mu$ , über den gesamten Alterungsprozess, für den (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich.

Man erkennt, dass für alle Lagerungsbedingungen, außer der Ofenlagerung bei 85°C, ein direkter linearer Zusammenhang zwischen  $I_{On}$  und  $\mu$  besteht. Insbesondere ist dies der selbe lineare Zusammenhang wie für die Schwankungen der Mobilität im Nullzustand und für die kaum gealterten OFETs aus den Referenzlagerungen in den Exsikkatoren. Dies lässt sich daraus schließen, dass in Abbildung (7.3) bis auf die Ofenlagerung alle Punkte, inklusive der Streuung im Nullzustand, auf der selben Geraden liegen. Aus dieser Korrelation lässt sich also schließen, dass die Degradation des On-Stroms direkt auf die Degradation der Mobilität zurück zu führen ist und dass diese Abhängigkeit die selbe ist, die auch für die Schwankungen des On-Stroms infolge von Schwankungen der Mobilität im Nullzustand verantwortlich ist. Anders ausgedrückt bedeutet das, dass während der Alterung, bezogen auf den Zusammenhang zwischen Mobilität und On-Strom, kein neuer Effekt hinzu kommt, der nicht auch schon für die Variation im Nullzustand verantwortlich war. Weiterhin bestätigt diese Korrelation mit der selben Argumentation wie in Kapitel (6.3), dass das verwendete Modell zur Ermittlung der Mobilität auch über die Alterung hinweg seine Gültigkeit behält.

Ein anderes Bild ergibt sich für die Ofenlagerung bei 85°C : Hier erkennt man zunächst für höhere Werte von  $I_{On}$  und  $\mu$  ebenfalls den gleichen linearen Verlauf wie bei den anderen Lagerungsbedingungen. Im weiteren Alterungsverlauf hin zu niedrigeren Werten von  $I_{On}$  und  $\mu$  macht sich jedoch ein Knick in der Geraden bemerkbar, wie besonders in Abbildung (7.3 (b)) gut zu sehen ist. Dieser Knick deutet auf einen zusätzlichen Alterungseffekt hin, der zu einer steileren Geraden, also zu einer schnelleren Degradation des On-Stroms im Vergleich zur Mobilität führt. Gegen Ende der Alterung, also bei sehr niedrigen Werten von  $I_{On}$  und



**Abb. 7.4.:** Korrelation zwischen On-Strom  $I_{On}$  und Mobilität  $\mu$  für den (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich. Abgebildet ist die Lagerung bei  $85^\circ\text{C}$ , farblich aufgeschlüsselt nach Lagerungsdauern. Die eingezeichneten Linien sind Hilfslinien zur Besseren Sichtbarkeit von Abweichungen vom linearen Zusammenhang.

$\mu$ , erkennt man dann wieder eine Gerade mit der gleichen Steigung wie bei den anderen Lagerungsbedingungen, jedoch mit einem konstanten Versatz dazu. Dies bedeutet also, dass der zusätzliche Alterungseffekt nur temporär vorhanden ist und danach wieder der ursprüngliche Effekt dominiert, wie er bei den anderen Lagerungsbedingungen ebenfalls vorhanden ist. Es stellt sich die Frage, wann genau dieser Effekt eintritt und wie dieses zeitliche Verhalten mit anderen Parametern korreliert ist. Um den zeitlichen Verlauf weiter aufzuschlüsseln, zeigt Abbildung (7.4) noch einmal die Korrelation zwischen  $\mu$  und  $I_{On}$ , allerdings jetzt nur für die Lagerung bei  $85^\circ\text{C}$ . Dafür sind die Lagerungszeiten bei den einzelnen Messpunkten nun farblich unterschieden, so dass sich das Zeitfenster für den oben beschriebenen zusätzlichen Alterungseffekt abschätzen lässt. Dieses Zeitfenster liegt ungefähr zwischen einer Lagerdauer von 360 bis 864 Stunden. Weiterhin ist zu erkennen, dass der zusätzliche Alterungseffekt, also der Versatz zwischen den beiden Geraden, im Sättigungsbereich wesentlich ausgeprägter ist, als im linearen Bereich.

Dieser zusätzliche Alterungseffekt ist vermutlich aus das Bilden einer festen Ladung an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum zurück zu führen, was ausschließlich für die Ofenlagerung beobachtet wird. Diese feste Ladung senkt die Anzahl an verfügbaren mobilen Ladungsträgern, ohne jedoch die Mobilität dieser Ladungsträger wesentlich zu

verringern. Daraus folgt die beobachtete stärkere Degradation des On-Stroms im Vergleich zur Mobilität, da der On-Strom auch von der Anzahl der verfügbaren freien Ladungsträger abhängt. Die Entwicklung der festen Ladung wird im Detail in Abschnitt (7.2.1) behandelt. Aufgrund der Korrelation zwischen  $\mu$  und  $I_{On}$  ist auch verständlich, warum sich die Abbildungen (7.1) und (7.2) so ähnlich sind. Daher ist die Diskussion des Alterungsverhaltens des On-Stroms anhand von Abbildung (7.1) genauso auch für die Mobilität in Abbildung 7.2) gültig.

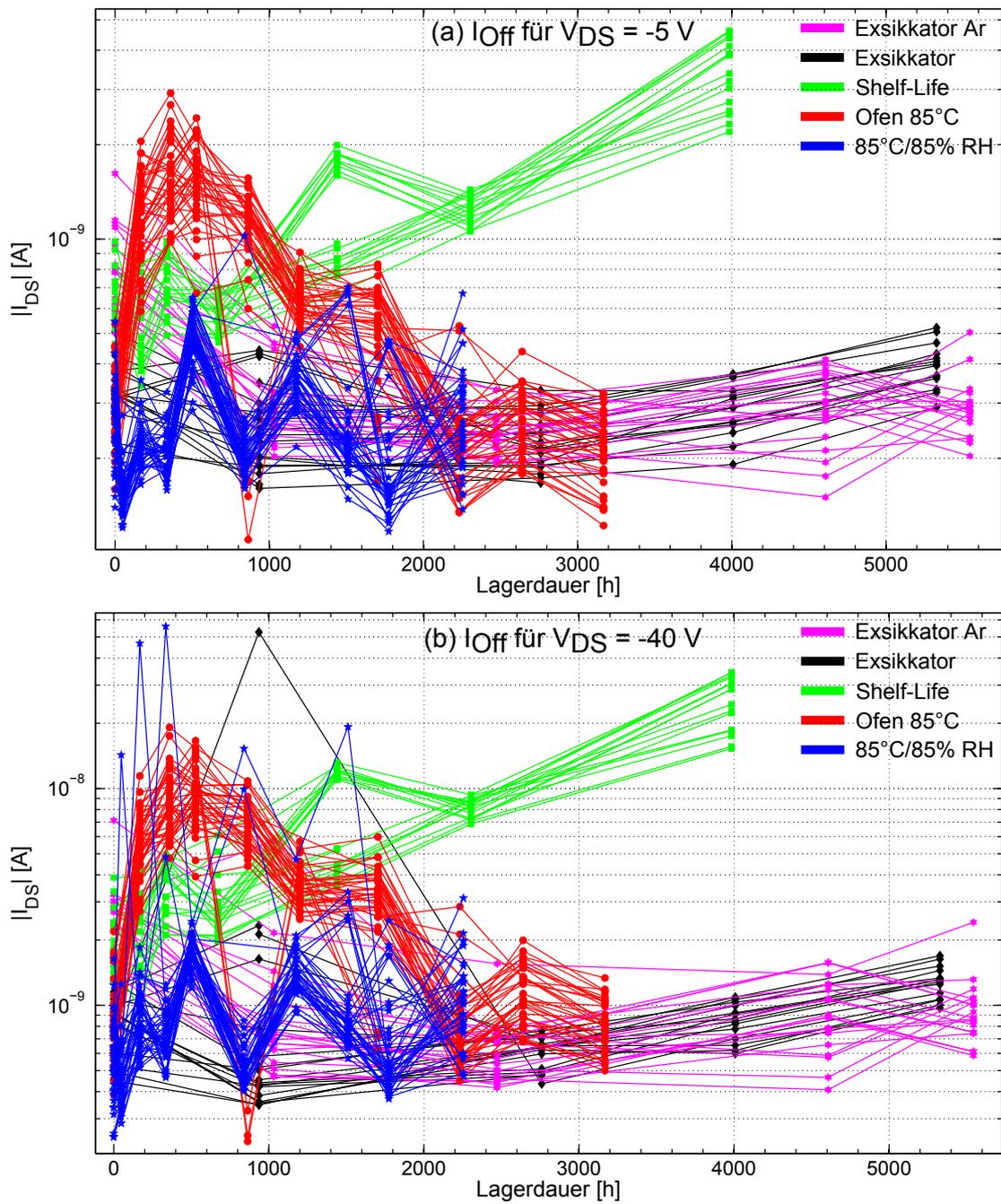
### 7.1.3. Alterung des Off-Stroms

Zur Betrachtung der Alterung des Off-Stroms wird analog zu Kapitel (6.4) der Wert aus der Rück-Messung der Hysterese gezeigt, da hier weniger Schwankungen über die fünf zur Berechnung des Off-Stroms gemittelten Werte beobachtet werden. Der Wert aus der Rück-Messung ist daher weniger anfällig für zufällige Schwankungen in den sehr kleinen Off-Strömen im Sub-Threshold Bereich der OFETs.

Die Alterung des Off-Stroms ist analog zu den bereits vorgestellten Parametern in Abbildung (7.5) dargestellt. Am auffälligsten ist hier zunächst einmal das Verhalten bei der *Shelf-Life* Lagerung, im Vergleich zu allen anderen Lagerungsbedingungen. Hier steigt der Off-Strom nach ca. 800 h kontinuierlich an, was über die betrachtete Lagerungsdauer zu einem Anstieg von ca. einer Größenordnung führt. Auch für die Lagerung im Ofen bei 85 °C ist zunächst ein Anstieg des Off-Stroms erkennbar, der sich jedoch nach ca. 600 h umkehrt, so dass der Off-Strom am Ende der Lagerungsdauer wieder das Niveau des Nullzustands erreicht.

Die Dotierung von konjugierten Polymeren oder kleinen Molekülen mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft ist ein bekannter Effekt [40], [41], [42], welcher auch hier für den Anstieg des Off-Stroms verantwortlich ist. Durch die Dotierung steigt die Anzahl der freien Ladungsträger im Halbleitervolumen und damit die Restleitfähigkeit der Halbleiterschicht im OFET. Der Off-Strom ist über das ohmsche Gesetz direkt proportional zur Restleitfähigkeit und zur angelegten Spannung zwischen Source und Drain. Diese lineare ohmsche Abhängigkeit erklärt auch den konstanten Unterschied von ca. einer Größenordnung zwischen den Messungen bei  $V_{DS} = -5V$  und  $V_{DS} = -40V$ , während der generelle Verlauf vergleichbar ist.

Im Falle der *Shelf-Life* Lagerung verstärkt der zusätzliche Lichteinfluss die Dotierung, indem durch den Lichteinfall angeregte Zustände erzeugt werden, also Elektronen in höhere Energieniveaus gehoben werden. Dies verstärkt dann im Anschluss die Interaktionsrate mit dem Luftsauerstoff [43], [41] [44]. Dieser Effekt wirkt über die gesamte betrachtete Lagerungsdauer und es ist keine Tendenz zu einem Abflachen erkennbar. Für eine potentielle Schaltung aus dieser Art von OFETs könnte sich dieser Effekt daher zu einem Problem entwickeln, da durch den Lichteinfall über die Lebensdauer der Schaltung die Off-Ströme und damit die ohmschen Verluste um Größenordnungen ansteigen können. Weiterhin sinkt auch der On-Strom



**Abb. 7.5.:** Alterung des Off-Stroms im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich für die verschiedenen Lagerungsbedingungen.

über die Lebensdauer, wie in Abbildung (7.1) gezeigt, so dass das On/Off-Verhältnis stark abnehmen wird. Diese beiden Effekte müssen also bei der Auslegung einer solchen Schaltung beachtet werden.

Bei der Ofenlagerung ist hingegen die erhöhte Temperatur für die schnelle Sauerstoffdotierung verantwortlich. Die hohe Temperatur beschleunigt die Diffusion des Sauerstoffs durch das OFET-Schichtsystem [41] und stellt ganz allgemein mehr Energie für den Dotierungsprozess zur Verfügung. Dies wird noch einmal deutlich im Vergleich zur Referenzlagerung im Exsikkator bei Raumtemperatur, die gegen Ende der Lagerung ebenfalls einen leichten Anstieg des Off-Stroms zeigt, während die Referenzlagerung unter Argon Atmosphäre sogar einen Abfall des Off-Stroms am Anfang der Lagerung und danach ein konstantes Plateau zeigt. Das verwendete PTAA-Material wird also prinzipiell auch bei Raumtemperatur im Dunkeln durch den Sauerstoff der umgebenden Luft dotiert, nur eben wesentlich langsamer als bei 85 °C. Weiterhin lässt sich der Effekt durch den Vergleich zur Referenz in Argon tatsächlich auf den Sauerstoff aus der Umgebungsluft zurück führen. Das Verhalten unter Argon Atmosphäre bei 85 °C wurde ebenfalls in einem Stichversuch getestet, welcher in Abschnitt (7.2.1.4) ausführlich vorgestellt wird.

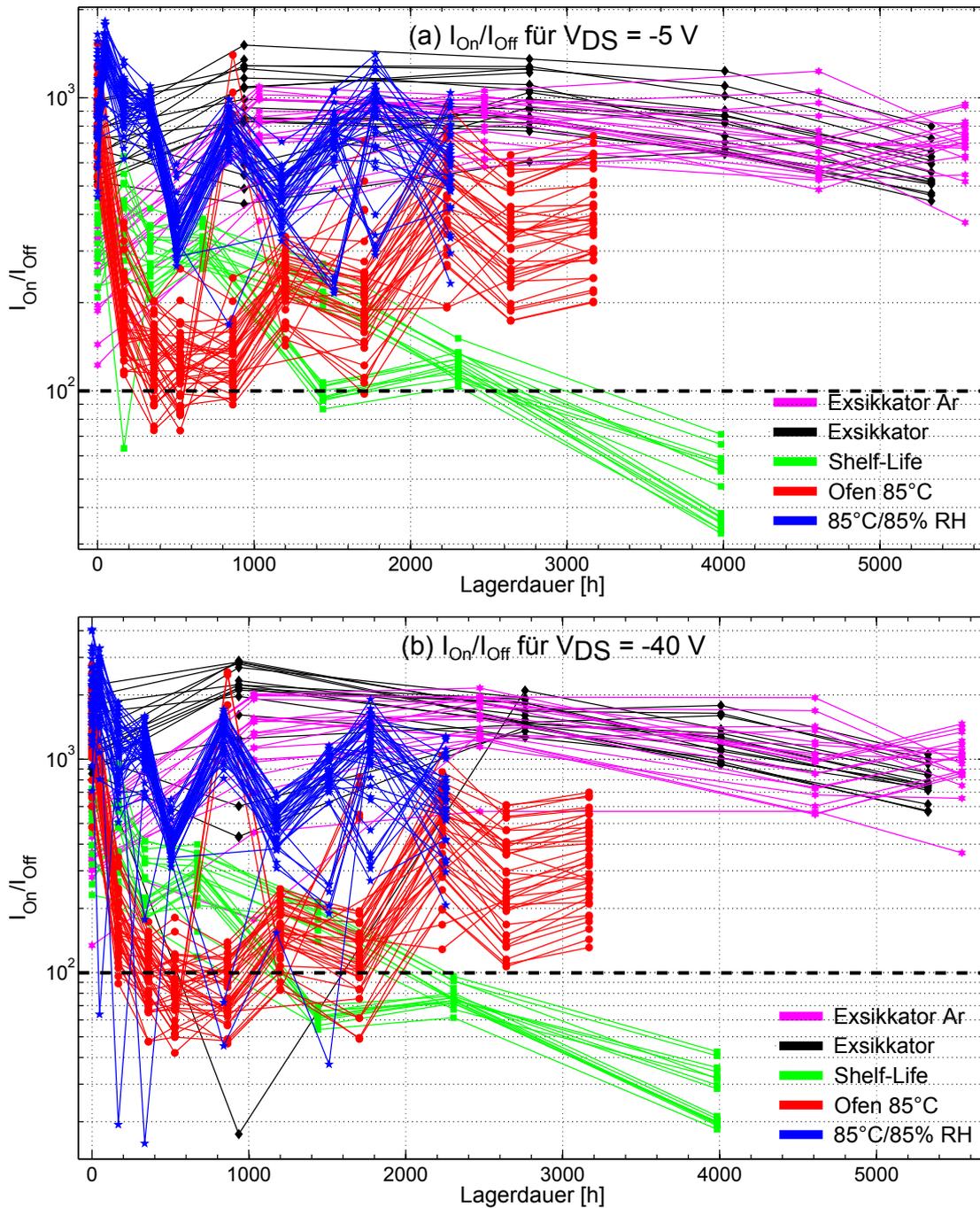
Ganz im Gegensatz zur Ofenlagerung zeigt die Lagerung in der Klimakammer bei 85 °C/85%RH einen wesentlich geringeren Anstieg des Off-Stroms zu Beginn der Lagerung. Dieser Anstieg ist bis ca. 500 h zu beobachten, gefolgt von einem Abfall bei etwa 800 h. Danach erfolgt jedoch nochmal ein weiterer leichter Anstieg und gegen Ende der Lagerdauer entwickelt sich der Off-Strom zu einem relativ breit verteilten Plateau. Entsprechend der vorherigen Argumentation ist hier die Dotierung also wesentlich weniger effizient, als bei gleicher Temperatur in trockener Atmosphäre. Die Sauerstoffdotierung des PTAA-Halbleiters hängt also nicht nur von der Umgebungstemperatur und dem Lichteinfall, sondern auch von der umgebenden Luftfeuchte ab, was in dieser Form nicht erwartet wurde.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Off-Strom bei der Alterung des verwendeten PTAA-Halbleiters ein kritischer Parameter ist, da er sich im Gegensatz zu Mobilität und On-Strom, je nach Temperatur und Lichteinfluss, um mehr als eine Größenordnung ändern kann.

#### **7.1.4. Alterung des On/Off-Verhältnisses**

Das On/Off-Verhältnis ist in Abbildung (7.6) dargestellt. Durch den Vergleich mit den Abbildungen (7.1) und (7.5) fällt auf, dass der Off-Strom den weitaus größeren Einfluss hat, da die relative Änderung hier wesentlich größer ist als beim On-Strom.

Was für die Betrachtung der Alterung des On/Off-Verhältnisses weiterhin relevant ist, ist der in Kapitel (6.6) anhand von Abbildung (6.20) hergeleitete Mindestwert von  $I_{On}/I_{Off} = 10^2$ , um einen Einfluss auf die Schwellspannung zu minimieren. Diese Grenze ist für beide ge-



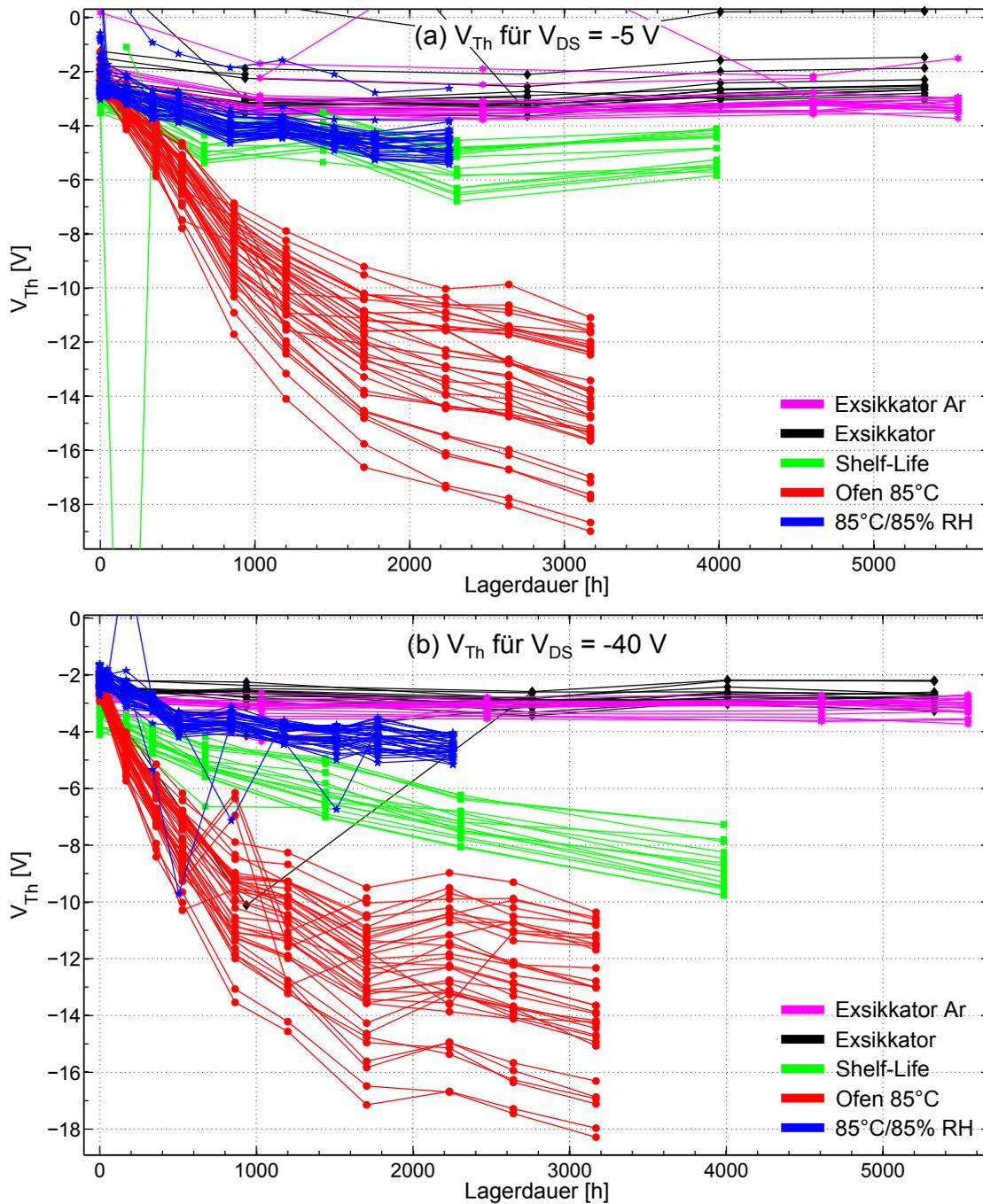
**Abb. 7.6.:** Alterung des On/Off-Verhältnisses im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich für die verschiedenen Lagerungsbedingungen.

messenen Transferkennlinien in Abbildung (7.6) als gestrichelte Linie eingezeichnet und führt für den Fall der Ofenlagerung bei 85 °C zu der Situation, dass ein Großteil der OFETs in einem Zeitraum von 200 h bis 1000 h dieses Kriterium verletzen, gegen Ende der Lagerung jedoch mit ihrem On/Off-Verhältnis wieder oberhalb von 2 Größenordnungen sind. Wenn man also dieses Kriterium für die Entscheidung heranzieht, ob ein OFET ausgefallen ist, oder nicht, ergibt sich der Effekt, dass vormals als Ausgefallen deklarierte OFETs nach einer längeren Lagerdauer wieder innerhalb der gewünschten Parameter funktionieren. Dieses Verhalten macht es für die Ofenlagerung schwierig, das On/Off-Verhältnis als Ausfallkriterium heranzuziehen.

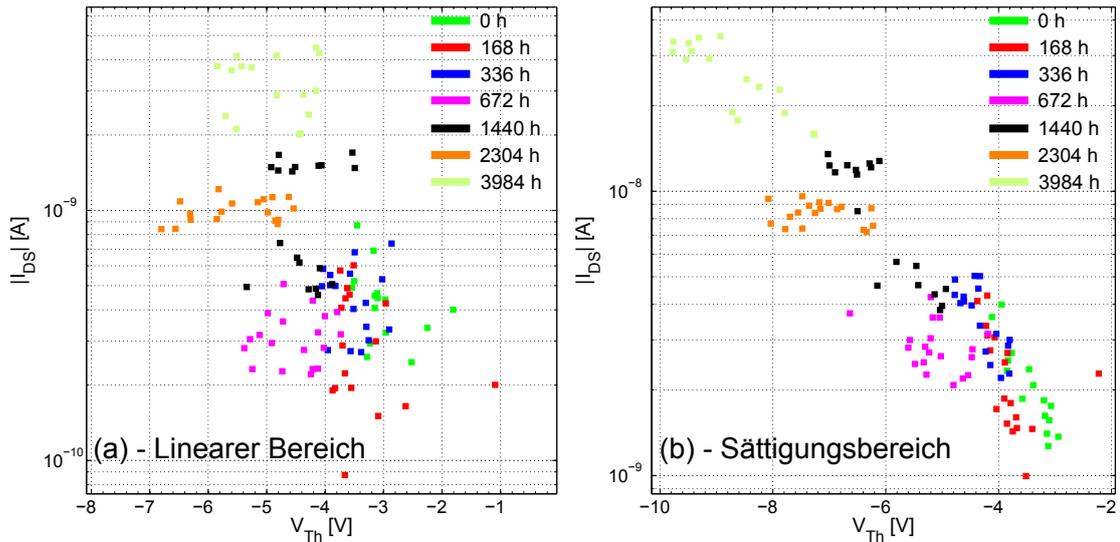
Für die *Shelf-Life* Lagerung zeigt Abbildung (7.6) eine kontinuierliche Degradation des On/Off-Verhältnisses, welche zum größten Teil aus dem kontinuierlichen Anstieg des Off-Stroms resultiert, wie Abbildung (7.5) zeigt. Für die *Shelf-Life* Lagerung ist dies tatsächlich auch der zuerst eintretende Fehlermechanismus, der nach dem Kriterium  $I_{On}/I_{Off} \geq 10^2$  nach etwa 2000 h zum Ausfall aller OFETs führt. Dies wäre also in etwa der erwartbare Zeitraum, den eine auf den hier betrachteten OFETs basierte Schaltung in einem Erzeugnis funktionieren könnte, wenn sie ohne weitere Schutzmaßnahmen dem Umgebungslicht und der Umgebungsatmosphäre ausgesetzt ist.

### 7.1.5. Alterung der Schwellspannung

Als vorletzten Parameter zeigt Abbildung (7.7) die Alterung der Schwellspannung bei den verschiedenen Lagerungsbedingungen. Hier fällt auf, dass, bis auf einzelne Ausreißer, ausschließlich ein Drift der Schwellspannung in den negativen Spannungsbereich vorliegt, wenn diese sich über die Alterung ändert. Die Charakteristik eines „Normally Off“ OFETs, also eines OFETs, der bei  $V_G = 0V$  ausgeschaltet ist, bleibt dementsprechend über die Alterung erhalten. Der Drift der Schwellspannung zu negativen Werten ist jedoch sehr unterschiedlich für die verschiedenen Lagerungsbedingungen: Während die beiden Referenzlagerungen im Exsikkator praktisch keinen Effekt zeigen, driftet die Schwellspannung für die Lagerung bei 85 °C/85%RH und die *Shelf-Life* Lagerung vergleichbar um ca. 2V bis 4V im linearen Bereich. Für den Sättigungsbereich sind diese beiden Lagerungsbedingungen nicht mehr vergleichbar: Die *Shelf-Life* gelagerten OFETs driften wesentlich stärker, nämlich um 3V bis 7V, während die Schwellspannung für die bei 85 °C/85%RH gelagerten OFETs analog zum linearen Bereich um ca. 2V bis 4V weiter ins negative wandert. Dieser große Unterschied zwischen beiden Fällen ist durch den starken Anstieg des Off-Stroms im Sättigungsbereich zu erklären, der, wie in Kapitel (3.3) diskutiert, einen direkten Einfluss auf die ermittelte Schwellspannung hat. Dieser Einfluss ist im Sättigungsbereich besonders groß, da der Off-Strom durch die Halbleiterschicht hier um ca. eine Größenordnung höher ist, als im linearen Bereich (siehe Abbildung (7.5)). Außerdem führt die Darstellung auf einer  $\sqrt{I_{DS}}$ -Skala zu einer Verzerrung

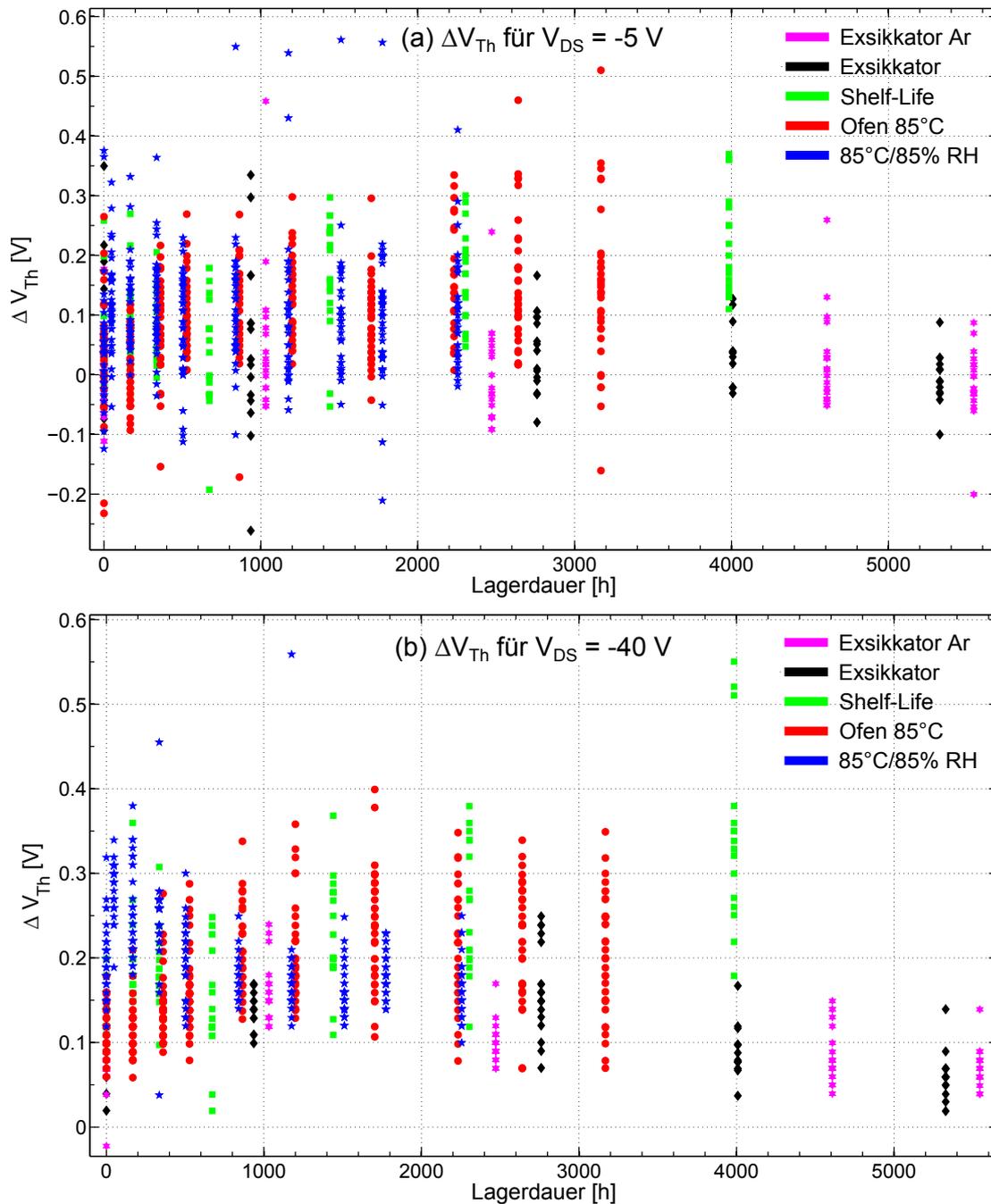


**Abb. 7.7.:** Alterung der Schwellspannung im (a) linearen- und (b) Sättigungsbereich für die verschiedenen Lagerungsbedingungen.



**Abb. 7.8.:** Korrelation zwischen  $V_{Th}$  und  $I_{Off}$  für den (a) linearen und (b) Sättigungsbereich der OFETs während der Shelf-Life Lagerung. Die verschiedenen Farben veranschaulichen die Messpunkte bei unterschiedlichen Lagerdauern.

der Kennlinie, so dass kleinere  $I_{DS}$  Werte in Relation zu größeren  $I_{DS}$  Werten größer erscheinen. Beide Effekte führen dazu, dass der Einfluss des Off-Stroms auf das Einschaltverhalten des OFETs im Sättigungsbereich tatsächlich sichtbar wird und wie in Kapitel (3.3) beschrieben, bei der Berechnung von  $V_{Th}$  durch einen Korrekturterm berücksichtigt werden muss. Entsprechend ergibt sich eine Korrelation zwischen  $V_{Th}$  und  $I_{Off}$ , welche für die Shelf-Life Lagerung in Abbildung (7.8) dargestellt ist. Hier erkennt man nur für den Sättigungsbereich eine lineare Korrelation der beiden Parameter, welche die stärkere Drift von  $V_{Th}$  im Vergleich zum linearen Bereich erklären kann. Die Abweichung für die Shelf-Life Lagerung zwischen dem linearen und dem Sättigungsbereich in Abbildung (7.7) kann also tatsächlich durch den starken Anstieg des Off-Stroms erklärt werden. Die Validität der verwendeten Korrektur wird in Kapitel (7.2) noch einmal anhand von einzelnen OFET-Kennlinien im Detail diskutiert. Im Vergleich mit der Lagerung im Ofen bei  $85^{\circ}\text{C}$  ist jedoch die Änderung der Schwellspannung bei allen anderen Lagerungsbedingungen wesentlich kleiner. Hier zeigt sich der weitaus größte Alterungseffekt und im Unterschied zu allen anderen Lagerungsbedingungen wird hier auch die Verteilung der Schwellspannung über die gemessenen OFETs mit der Alterung breiter: Während die Verteilung im Nullzustand ca. 1 V beträgt, verbreitert sie sich bis zum Ende der Lagerdauer auf etwa 8 V. Weiterhin verlaufen die Verbindungslinien zwischen den Messpunkten eines einzelnen OFETs größtenteils parallel, oder wenn sie sich kreuzen, dann meist nur über kleine Schwankungen während den Messungen.



**Abb. 7.9.:** Differenz der Schwellspannung zwischen Hin- und Rückmessung, aufgetragen gegen die Lagerdauer für die verschiedenen Lagerungsbedingungen. Teil (a) zeigt den linearen, Teil (b) den Sättigungsbereich.

Ein weiterer Punkt bei der Diskussion der Alterung ist das Entstehen von Hysteresen. Dies lässt sich unter den hier betrachteten Parametern am besten an der Schwellspannung festmachen, da sich beim Entstehen von Hysteresen zwangsläufig verschiedene Werte für  $V_{Th}$  in der Hin- und Rückmessung ergeben müssen. Hysteresen entstehen grundsätzlich dann, wenn sich die Ladungsverteilung im OFET zwischen der Hin- und Rückmessung ändert, was prinzipiell durch Alterungseffekte hervorgerufen oder verstärkt werden könnte. Eine Zusammenfassung zum Thema Hysteresen findet man in [31]. Um die Hysterese im Verlauf der Alterung zu visualisieren, zeigt Abbildung (7.9) die Differenz der Schwellspannungen aus Hin- und Rückmessung, aufgetragen gegen die Lagerdauer. Man erkennt hier, dass diese Differenz für den weitaus größten Teil der OFETs unter  $\pm 0,3V$  liegt. Angesichts einer Schrittweite von  $1V$  für die Gate-Spannung während der Messung der Transferkennlinie ist dieser Wert überhaupt nur dadurch ermittelbar, dass die Gate-Spannung bei der Bestimmung der Schwellspannung zwischen 2 Messpunkten linear interpoliert wird. Dies ist bis zu einem gewissen Grad dadurch zu rechtfertigen, dass für die Bestimmung der entsprechenden Ausgleichsgerade mehrere Messpunkte verwendet werden, so dass der Schnittpunkt mit der  $V_G$ -Achse entsprechend mehr Information enthält als ein einzelner Messwert. In Relation zum Messbereich von insgesamt  $60V$  für  $V_G$  während der Messung einer Transferkennlinie kann ein  $\Delta V_{Th}$  von  $\pm 0,3V$  jedoch als vernachlässigbar gering angesehen werden. Auf der hier betrachteten Zeitskala von insgesamt ca.  $15s$  für die Hin- und Rückmessung einer Transferkennlinie ist der untersuchte OFET-Aufbau also über die gesamte Lagerdauer hinweg elektrisch stabil. Dies rechtfertigt auch den Verzicht auf die Darstellung der Parameter aus beiden Messrichtungen in den Abbildungen in diesem und im vorherigen Kapitel.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die enorme Verschiebung der Schwellspannung für die Lagerung bei  $85^\circ C$  der größte beobachtete Alterungseffekt bei den untersuchten OFETs und Lagerungsbedingungen ist. Dies ist vor allem deshalb interessant, weil die Lagerung in der Klimakammer bei  $85^\circ C/85\%RH$  bei der gleichen Temperatur stattfindet, aber die hohe Luftfeuchte als weitere Belastung dazu kommt. Entgegen der Erwartung aus anderen Veröffentlichungen [45], [8], [9] scheint diese hohe Luftfeuchtigkeit die Alterung also nicht zu beschleunigen, sondern tatsächlich zu verlangsamen.

### 7.1.6. Alterung des Gate-Leckstroms

Der letzte betrachtete Parameter in diesem Kapitel sind die Gate-Leckströme durch das Dielektrikum des OFETs. Da der Gate-Leckstrom durch das isolierende Dielektrikum von Source, bzw. Drain zum Gate fließen muss, ist der gemessene maximale Leckstrom vornehmlich zur Bewertung des Dielektrikums geeignet. Dabei handelt es sich ebenfalls um ein organisches Polymer, welches ebenso einer Alterung unterliegt. Für die Diskussion der Einflussfaktoren auf den Gate-Leckstrom sei hier noch einmal auf Kapitel (6.7) und hier insbesondere auf

Abbildung (6.21) verwiesen.

Zur Bewertung der Alterung zeigt Abbildung (7.10) den Verlauf des maximalen Gate-Leckstroms über die Lagerdauer für die beiden gemessenen Transferkennlinien im linearen, bzw. Sättigungsbereich. Zunächst einmal fällt wieder die große Spannweite der Leckströme auf: Sie reicht von ca.  $10^{-9}$  A für eine Großteil der OFETs bis zu  $10^{-7}$  A für einzelne OFETs. Die Lagerungen bei  $85^{\circ}\text{C}$  und  $85^{\circ}\text{C}/85\%RH$  werden deshalb getrennt dargestellt, da die Übersichtlichkeit aufgrund der großen Spannweite der Daten ansonsten zu sehr leiden würde. Wie in Kapitel (6.7) beschrieben, handelt es sich bei den Leckströmen oberhalb von  $10^{-9}$  A um eine durch die Herstellung bedingte Streuung. Die maximale Isolationsfähigkeit des Dielektrikums zeigen die OFETs mit einem Leckstrom um  $10^{-9}$  A, so dass der Schwerpunkt der Betrachtung auf der Entwicklung dieses minimalen Leckstroms liegt. Hier zeigt sich, dass der minimale Leckstrom nach einer gewissen Lagerzeit weiter abnimmt und die OFETs in diesem Parameter dadurch sogar besser werden über die Alterung hinweg. Die Zeitpunkte, nach denen jeweils ein starker Abfall des Leckstroms beobachtet wird, sind in Abbildung (6.21) mit senkrechten Linien markiert. Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass sich die Kurven der *Shelf-Life* und der Ofenlagerung ähneln: Beide zeigen zunächst einen leichten Anstieg des Leckstroms mit einem Maximum bei 1400 h, bzw. 1200 h, gefolgt von einer Abnahme des Leckstroms bis unter das jeweilige Anfangsniveau. Im Vergleich dazu zeigt die Lagerung in der Klimakammer bei  $85^{\circ}\text{C}/85\%RH$  nur einen sehr leichten Anstieg und eine wesentlich frühere Abnahme des Leckstroms bei 850 h. Da der Unterschied zur Lagerung bei  $85^{\circ}\text{C}$  im Ofen die hohe Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer ist, liegt es nahe, einen direkten Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf das Dielektrikum zu vermuten. Auch bei den Referenzlagerungen an trockener Luft bei Raumtemperatur und unter Argon Atmosphäre sieht man einen Abfall des Gate-Leckstroms ab 2800 h, bzw. 2400 h. Der für dieses Verhalten verantwortliche Effekt tritt also auch bei der Lagerung in chemisch inerte Argon Atmosphäre auf und ist dementsprechend nicht auf äußere Einflüsse, wie zum Beispiel Sauerstoff, angewiesen.

Da die Details zur chemischen Zusammensetzung des dielektrischen Polymers leider nicht bekannt sind, lassen sich die Ursachen des beobachteten Effekts nicht im Detail ermitteln. Es ist jedoch festzuhalten, dass der Parameter Gate-Leckstrom bei der Alterung der OFETs kein Problem darstellt, sondern eher besser wird, im Sinne von niedrigeren Leckströmen.

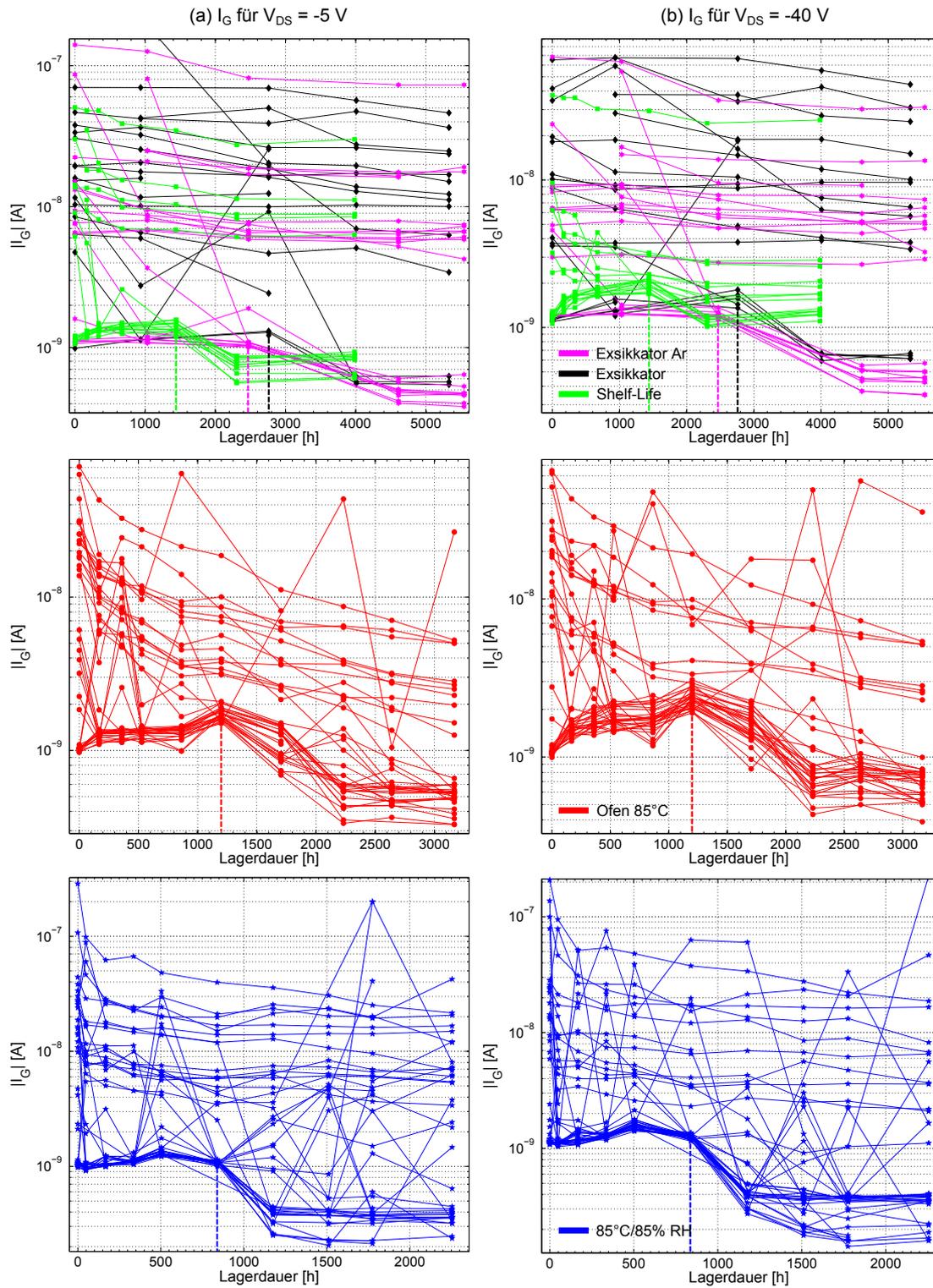


Abb. 7.10.: Alterung des Gate-Leckstroms für den (a) linearen und (b) Sättigungsbe-  
reich, aufgeteilt nach den verschiedenen Lagerungsbedingungen.

## 7.2. Detaillierte Diskussion der Alterungsmechanismen

Nachdem im vorherigen Abschnitt ein Überblick über die Alterung der verschiedenen Parameter der hier betrachteten OFETs gegeben wurde, soll in diesem Kapitel die Alterung noch einmal detailliert anhand von ausgewählten OFET-Kennlinien diskutiert werden. Dabei stehen vor allem die Extremfälle im Vordergrund, also OFETs die besonders stark oder besonders wenig gealtert sind. Die Diskussion erfolgt weiterhin hauptsächlich anhand der in Kapitel (7.1) vorgestellten Geometrie mit  $W = 2\text{ mm}$  und  $L = 20\text{ }\mu\text{m}$ . Bei Bedarf werden jedoch auch weitere Geometrien herangezogen, die einen speziellen Parameter besonders gut zeigen.

Die Reihenfolge der Diskussion ist nun nicht mehr nach elektrischen Parametern geordnet, sondern nach Lagerungsbedingungen, da sich anhand von konkreten Kennlinien für einen OFET jeweils mehrere Parameter gleichzeitig ablesen lassen.

### 7.2.1. Lagerung im Ofen

Die Lagerung im Ofen bei  $85\text{ }^\circ\text{C}$  hat in der Diskussion der Alterung in Kapitel (7.1) den größten Effekt gezeigt, insbesondere was die Verschiebung der Schwellspannung in den negativen Bereich angeht. Die Diskussion erfolgt zunächst anhand der Transferkennlinien und den daraus abgeleiteten Mobilitätskennlinien. Danach erfolgt die Betrachtung der Ausgangskennlinien und einer Kapazitätsmessung des Dielektrikums als Ergänzung. Schließlich wird die in Abbildung (7.5) dargestellte Entwicklung des Off-Stroms unter Beachtung der vorher diskutierten Ergebnisse analysiert und einer Testlagerung unter  $85\text{ }^\circ\text{C}$  in Argon Atmosphäre gegenübergestellt, um den Einfluss des atmosphärischen Sauerstoffs zu evaluieren.

#### 7.2.1.1. Mobilitäts- und Transferkennlinien

Um das Einschaltverhalten im Verlauf der Alterung im Detail zu analysieren, eignet sich die Darstellung der Mobilitätskennlinie, also im Wesentlichen die punktweise Ableitung der beiden gemessenen Transferkennlinien wie in Kapitel (3.1) beschrieben. Aus diesen Mobilitätskennlinien lässt sich die Abhängigkeit der Mobilität von der Gate-Spannung direkt ablesen. In einem idealen OFET wäre diese Abhängigkeit eine Stufenfunktion: Die Mobilität ist 0 bis zur Schwellspannung und würde dort direkt auf den Endwert  $\mu_0$  springen. In einem realen OFET können jedoch Ladungsträgerfallen an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum freie Ladungen einfangen, die sich durch die angelegte Gate-Spannung an dieser Grenze sammeln. Dies bedeutet, dass für eine gegebene Gate-Spannung weniger Ladungsträger im Kanal tatsächlich mobil sind und zum Stromfluss zwischen Source und Drain beitragen können [2]. Dieser geringere Strom zwischen Source und Drain führt zu einer geringeren berechneten Mobilität für die jeweilige Gate-Spannung. Umgekehrt lässt sich also

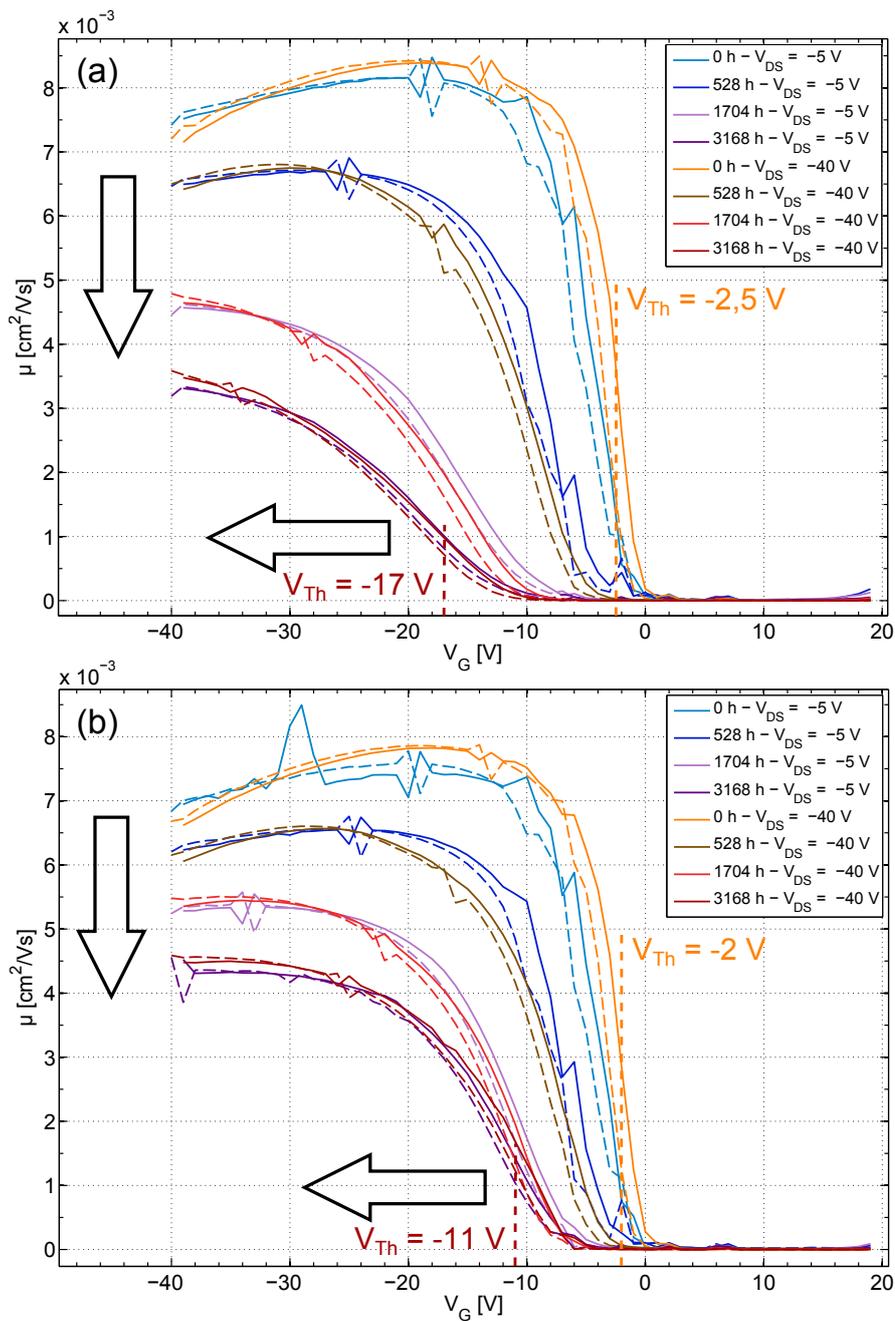
aus dem Verlauf der Mobilitätskennlinie auf die Qualität der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum schließen.

Zur Diskussion der Alterungseffekte zeigt nun Abbildung (7.11) die Mobilitätskennlinien von einem besonders stark und einem besonders wenig gealterten OFET an 4 Messpunkten während der Alterung. Bei den Messpunkten handelt es sich einmal um den Nullzustand am Anfang und einmal um den Messpunkt am Ende der Alterung. Die beiden Messpunkte dazwischen zeigen einmal den Zustand mit dem höchsten Off-Strom nach 528 h, entsprechend Abbildung (7.5) und einen weiteren Messpunkt bei 1704 h, also etwa in der Mitte zwischen den 528 h und dem Ende der Alterung bei 3168 h.

Man erkennt hier, dass beide OFETs im Nullzustand ein sehr ähnliches Verhalten zeigen: Sehr nah bei  $V_G = 0\text{V}$  steigt die Mobilität steil an und erreicht ca. bei  $V_G = -10\text{V}$  ein Plateau. Dieses Verhalten ist nah an der idealisierten Stufenfunktion und damit lässt sich schlussfolgern, dass beide OFETs im Nullzustand eine vergleichbar gute Grenzfläche zwischen Dielektrikum und Halbleiter mit wenigen Ladungsträgerfallen haben. Im Verlauf der Alterung zeigt sich bei beiden OFETs eine starke Abflachung der Mobilitätskennlinie und zusätzlich eine Verschiebung des Punktes, an dem überhaupt ein Anstieg der Mobilität gegenüber der Nulllinie erkennbar wird, in den negativen  $V_G$  Bereich. Die Abflachung der Mobilitätskennlinie bedeutet nichts anderes als eine ausgeprägtere  $V_G$ -Abhängigkeit der Mobilität und damit im Rahmen der vorherigen Diskussion eine höhere Anzahl von Ladungsträgerfallen im Kanal, die beim Durchfahren der Gate-Spannung besetzt und wieder geleert werden. Gleichzeitig sieht man in Abbildung (7.11) bei beiden OFETs nur eine sehr geringe Hysterese, die über die Alterung konstant bleibt. Es muss sich also hier um Fallenzustände handeln, die sehr schnell besetzt und wieder geleert werden können. Zur Quantifizierung von „sehr schnell“ sei hier noch einmal auf die Definition der Messung in Kapitel (5.2) verwiesen: Die Integrationszeit für einen Messpunkt beträgt 120 ms und es gibt keine zusätzliche Wartezeit am Umkehrpunkt der Hysterese-messung bei  $V_G = -40\text{V}$ . Das bedeutet, die Reaktionszeit der hier beobachteten Ladungsträgerfallen muss unter 120 ms betragen, da man ansonsten direkt am Umkehrpunkt eine größere Hysterese feststellen müsste.

Die Verschiebung des Punktes, an dem die Mobilität überhaupt anfängt zu steigen, kann jedoch mit diesem Ansatz nicht beschrieben werden. Ein solcher Effekt ist nur durch vollständig immobile Ladungsträger zu erklären, die zwar entsprechend der angelegten Gate-Spannung zur Gate-Kapazität beitragen, jedoch nicht zwischen Source und Drain mobil sind. Im Rahmen von Messungen zur Alterung eines PTAA-basierten Materials unter *Bias-Stress* am Gate werden solche, in Ladungsträgerfallen immobilisierte Ladungsträger ebenfalls für den Drift der Schwellspannung in den negativen Bereich verantwortlich gemacht [39].

Aus Abbildung (7.11) lässt sich weiterhin ablesen, dass auch diese immobile Ladung über die Alterung hinweg keine merkliche Hysterese erzeugt. Das heißt also, dass bei der Hin- und Rückmessung die selbe Anzahl an immobilen Ladungsträgern vorhanden sein muss, so dass

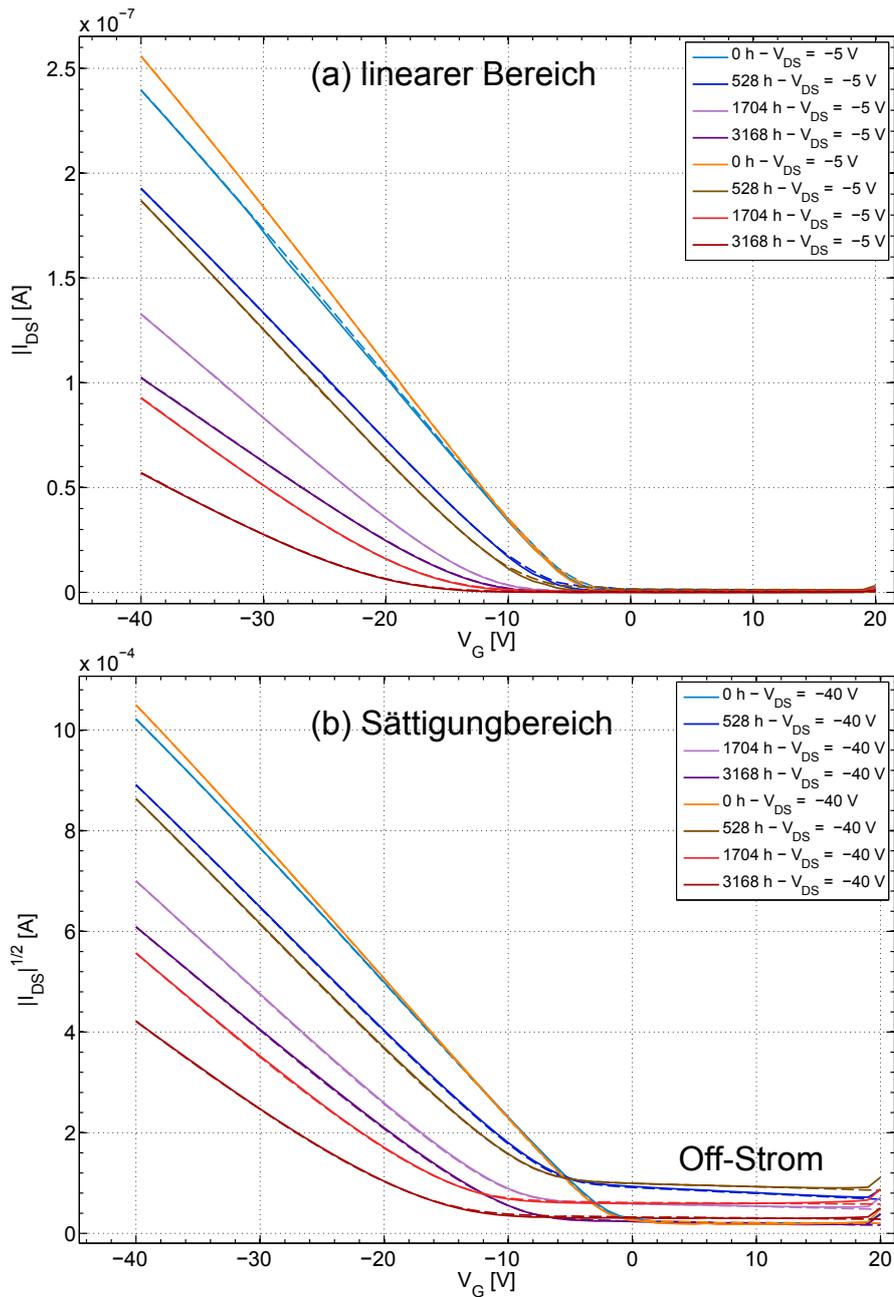


**Abb. 7.11.:** Mobilitätskennlinien von (a) einem bezüglich der Schwellspannung besonders stark und (b) einem besonders wenig gealterten OFET. Die Pfeile zeigen die Drift der Schwellspannung in den negativen Bereich und die kleiner werdende Mobilität.

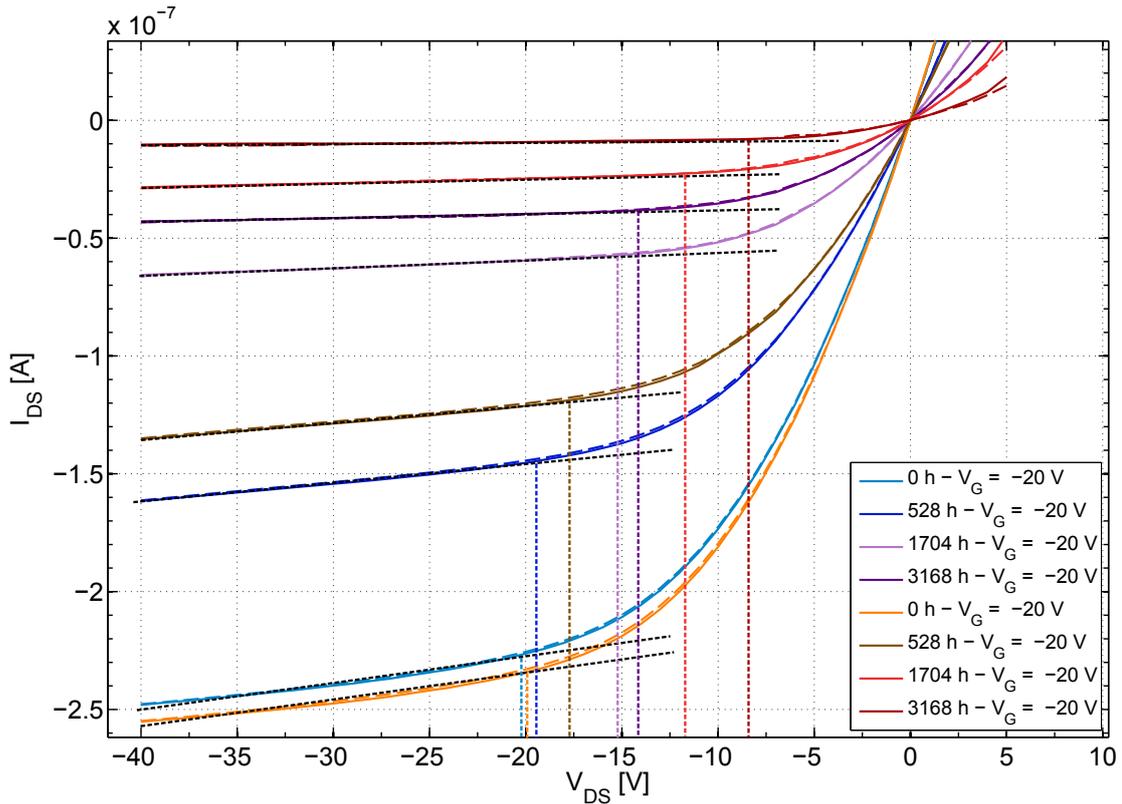
vergleichbare Transferkennlinien gemessen werden. Aus der Driftrichtung des entsprechenden Anstiegspunktes der Mobilität lässt sich weiterhin auf die Polarität der entsprechenden immobilen Ladungsträger schließen: Es muss im Verlauf der Alterung eine immer größere negative Gate-Spannung aufgebracht werden, um zusätzlich zu den immobilien Ladungsträgern weitere mobile Löcher im Kanal zu akkumulieren. Die immobilien Ladungsträger müssen also eine positive Polarität haben um der angelegten negativen Gate-Spannung entgegenwirken zu können.

Zusätzlich zu den Mobilitätskennlinien sind in Abbildung (7.11) in rot die berechneten Schwellspannungen der beiden OFETs im Sättigungsbereich am Ende der Alterung eingezeichnet. Diese entsprechen nicht den Punkten auf diesen Kennlinien, an denen die Mobilität beginnt anzusteigen, sondern sind weiter im negativen Bereich. Demgegenüber liegen die in orange eingezeichneten Schwellspannungen im Nullzustand, ebenfalls im Sättigungsbereich, sehr dicht am ersten Anstiegspunkt der Mobilität. Dies liegt am Einschaltverhalten der beiden OFETs, welches im Verlauf der Alterung einen wesentlich weiteren  $V_G$ -Bereich überspannt bis sich die Kennlinien dem idealisierten Modellverlauf aus den Gleichungen (3.1) und (3.2) annähern. Dies bedeutet für die Mobilitätskennlinie die Annäherung an ein Plateau und für die Transferkennlinien selbst, in der entsprechenden Auftragung, die Annäherung an eine Gerade. Dies ist für die Transferkennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.11) im direkten Vergleich noch einmal in Abbildung (7.12) dargestellt. Der in Abbildung (7.7) beobachtete enorme Drift der Schwellspannung in den negativen Bereich für die Alterung unter  $85^\circ\text{C}$  ist also einerseits durch die vollständig immobilien Ladungsträger zu erklären, die zwar zur Gate-Kapazität beitragen, aber nicht zum Stromfluss zwischen Source und Drain. Zusätzlich kommt als zweiter Effekt die Verbreiterung des Einschaltbereiches des OFETs hinzu, welcher sich durch die vermehrte Anzahl von Ladungsträgerfallen erklären lässt, die innerhalb einer Kennlinienmessung besetzt werden und dadurch die  $V_G$ -Abhängigkeit der Mobilität verstärken. Die nach Kapitel (3.3) extrahierte Schwellspannung ergibt sich schließlich aus der Addition dieser beiden Effekte. Weiterhin deutet Abbildung (7.11) darauf hin, dass beide Effekte nicht unabhängig voneinander, sondern jeweils gleichzeitig besonders stark (a) oder besonders schwach (b) ausgeprägt sind.

Zusätzlich zu den beiden beschriebenen Effekten sinkt auch die effektive gemessene Mobilität, also die Höhe des Plateaus der Mobilitätskennlinien in Abbildung (7.11), im Verlauf der Alterung. Das ist eine direkte Konsequenz aus diesen beiden Effekten, da einer am Gate angelegten Spannung immer eine definierte, der Kapazität des Dielektrikums entsprechende, Menge von Ladungsträgern im Kanal gegenübersteht. Wenn nun im Laufe der Alterung ein Teil davon auf vollständig immobile Ladungsträger entfällt und ein weiterer Teil beim Einschalten des OFETs in Ladungsträgerfallen gefangen wird und eine entsprechend stark verringerte Mobilität hat, bleibt dementsprechend nur ein kleinerer Teil von Ladungsträgern übrig, die einen Stromfluss zwischen Source und Drain tragen können. Daraus folgt sofort ein



**Abb. 7.12.:** Direkter Vergleich der Transferkennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.11) mit dem besonders stark gealterten OFET in orange und rot und dem besonders schwach gealterten OFET in blau und magenta. Teil (a) zeigt den Vergleich im linearen-, Teil (b) im Sättigungsbereich. Der Einfluss des Off-Stroms zeigt sich in dieser Darstellung nur im Sättigungsbereich (b) mit einem Maximum bei 528 h, entsprechend des in Abbildung (7.5) dargestellten Verhaltens.



**Abb. 7.13.:** Ausgangskennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.11) für  $V_G = -20$  V. Der besonders stark gealterte OFET ist in orange und rot, der besonders schwach gealterte in blau und magenta dargestellt. Die Hilfslinien dienen zur Bestimmung der Kanalabschnürung bei den jeweiligen Alterungsschritten.

geringerer On-Strom und damit, aufgrund der hier verwendeten Auswertung, eine verringerte gemessene, effektive Mobilität.

### 7.2.1.2. Ausgangskennlinien

Ein anderer Blickwinkel auf die zugrunde liegenden Alterungseffekte ergibt sich aus der Betrachtung der Ausgangskennlinien. Dazu zeigt Abbildung (7.13) die Ausgangskennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.11) für eine Gate-Spannung von  $V_G = -20$  V. Man erkennt hier wiederum die unterschiedlich starke Alterung der beiden OFETs anhand des maximalen Drain-Source Stroms, der im Verlauf der Alterung erreicht wird. Interessant ist weiterhin die Betrachtung der Abschnürung des OFET-Kanals im Verlauf der Alterung. Dabei handelt es sich um den Punkt in der Ausgangskennlinie, an dem die Potentialdifferenz zwischen Gate und Drain zu 0 wird und der Kanal am Drain-Kontakt abgeschnürt wird. In einem idealen

OFET ist das bei  $V_{DS} = V_G$  der Fall, bei Abbildung (7.13) also für  $V_{DS} = -20\text{V}$ . Ab diesem Punkt geht der OFET in Sättigung, so dass  $I_{DS}$  unabhängig von  $V_{DS}$  wird und auf einem konstanten Plateau verharret. Bei den beiden OFETs in Abbildung (7.13) ist diese Sättigung nicht perfekt, sondern es ist auch nach der Abschnürung des Kanals noch ein leichter Anstieg von  $I_{DS}$  zu erkennen. Es fließen hier also noch weitere Ströme außerhalb des eigentlichen OFET-Kanals. Zur grafischen Ermittlung des Abschnürungspunktes werden diese Ströme über eine Gerade, also als Ströme über einen ohmschen Widerstand angenähert. Der Abschnürungspunkt ergibt sich dann an dem Punkt, an dem die Kennlinie von der angenäherten Geraden abweicht. Dies ist in Abbildung (7.13) durch senkrechte Linien markiert.

Was nun auffällt ist, dass der Abschnürungspunkt der beiden OFETs während der Alterung nach rechts, also zu betragsmäßig kleineren Drain-Source Spannungen wandert. Dies ist für den besonders schwach gealterten OFET weit weniger stark ausgeprägt als für den besonders stark gealterten OFET. Dieser Effekt ist ebenfalls durch eine positive, immobile Ladung im OFET erklärbar, die in die Gate-Kapazität eingeht, aber nicht zu  $I_{DS}$  beiträgt. Eine solche Ladung schirmt das am Gate angelegte Potential zum Teil ab, so dass sich die Potentialdifferenz zwischen Gate und Drain von  $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$  zu  $V_{GD} = V_{GS} - V_{Fest} - V_{DS}$  ändert, mit einer durch die Feste Ladung erzeugten Spannung  $V_{Fest} = Q_{Fest}/C_{Gate}$ . Da die immobile Ladung nicht in den Ausgangskennlinien sichtbar ist, da sie eben nicht zu  $I_{DS}$  beiträgt, folgt aus der Bedingung für die Kanalabschnürung  $V_{GD} = 0$  die Abschnürung bei  $V_{DS} = V_{GS} - V_{Fest}$ . Das Ergebnis ist also die beobachtete Verschiebung des Abschnürungspunktes um  $V_{Fest}$  zur erwarteten Position bei  $V_{GS} = V_{DS}$ .

Weiterhin müsste  $V_{Fest}$  an den verschiedenen Punkten der Alterung genau der Gate-Spannung entsprechen, bei der in Abbildung (7.11) die Mobilität beginnt anzusteigen. Dies liegt daran, dass das Gate-Potential für betragsmäßig kleinere Werte als  $V_{Fest}$  an Drain und auch an Source vollständig abgeschirmt wird, so dass, wie oben beschrieben, keine mobilen Ladungsträger im Kanal akkumuliert werden können und eine Mobilität von 0 resultiert. Tabelle (7.1) zeigt zum Vergleich die aus den Abbildungen (7.11) und (7.13) abgelesenen Werte für  $V_{Fest}$ . Dabei wird  $V_{Fest}$  in Abbildung (7.13) ermittelt aus der Verschiebung des beobachteten zum idealen Abschnürungspunkt bei  $V_{GS} = V_{DS} = -20\text{V}$ . Im Rahmen der hier vorhandenen Ungenauigkeiten, einerseits beim grafischen Ablesen der Werte für  $V_{Fest}$  und andererseits bedingt durch die Schrittweite von 1 V bei der Messung der Kennlinie, zeigt sich in Tabelle (7.1) eine gute Übereinstimmung zwischen den je 2 Werten für  $V_{Fest}$ . Die Idee einer immobilen Ladung innerhalb der Gate-Kapazität, welche sich über die Alterung hinweg vergrößert, kann also beide beobachteten Effekte erklären. Was man nun zusätzlich aus der Beobachtung dieser immobilen Ladung in den Ausgangskennlinien erhält, ist eine Aussage zur zeitlichen Stabilität der Ladung. Während sich die Gate-Spannung bei der Messung der Transferkennlinie in Zeitschritten von 120 ms ändert, bleibt sie bei der Ermittlung der Ausgangskennlinie über die gesamte Messung hinweg konstant. Dies entspricht einer Messdauer von 11 s, über die die

OFET	Lagerdauer [h]	$V_{Fest}$ [V] aus Abb. (7.11)	$V_{Fest}$ [V] aus Abb. (7.13)
Stark gealtert	0	0	0
Stark gealtert	528	4	2,5
Stark gealtert	1704	9	8
Stark gealtert	3168	11	12
Schwach gealtert	0	0	0
Schwach gealtert	528	3	1
Schwach gealtert	1704	6	5
Schwach gealtert	3168	6	6

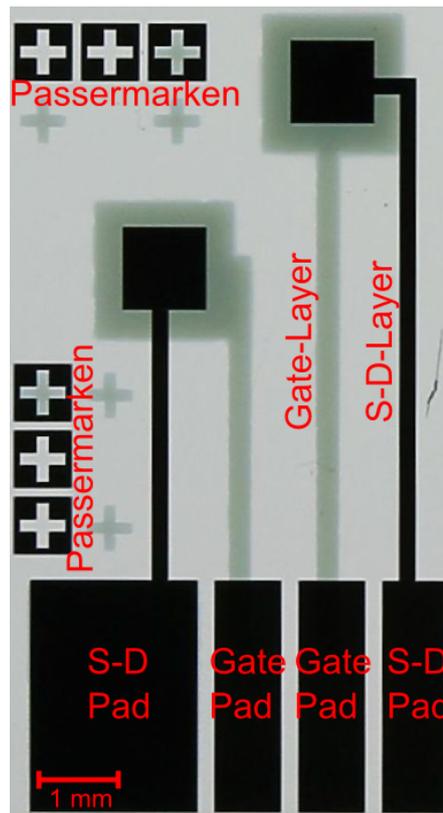
**Tabelle 7.1.:** Aus Abbildung (7.11) und (7.13) abgelesene Werte für  $V_{Fest}$ .

Ladungsverteilung innerhalb der Gate-Kapazität stabil bleibt, was sich wiederum an der nicht vorhandenen Hysterese in Abbildung (7.13) festmachen lässt. Im Gegensatz zur Transferkennlinie würde eine Hysterese in der Ausgangskennlinie auf Prozesse hindeuten, die in dem hier betrachteten Fall in der Größenordnung 1 s zu einer Veränderung der Ladungsverteilung im OFET durch die feste, anliegende Gate-Spannung führen. Dies wird typischerweise unter dem Begriff *Bias-Stress* zusammengefasst [46], [25], [39], wobei die Zeiträume, in denen die Gate-Spannung angelegt wird, bis in den Stundenbereich oder sogar Wochenbereich gehen können.

Die hier beobachtete immobile Ladung in der Gate-Kapazität ist also einerseits konstant bei schnellen Veränderungen der Gate-Spannung im Bereich 120 ms in der Transferkennlinie und andererseits ebenfalls konstant bei einer über 11 s anliegenden, konstanten Gate-Spannung. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass es sich bei der beobachteten immobilen Ladung tatsächlich um eine feste Ladung handelt, die fest innerhalb der Gate-Kapazität eingebaut ist und zumindest für die in dieser Arbeit betrachteten Spannungen bis  $-40\text{V}$  und Zeiten bis 11 s nicht durch die Gate-Spannung verändert wird. Dies würde dann allerdings bedeuten, dass diese Ladung auch im ausgeschalteten OFET existiert und sich im Laufe der Alterung ganz ohne den Einfluss von extern angelegten elektrischen Feldern entwickelt.

### 7.2.1.3. Kapazitätsmessungen des Dielektrikums

Um den Ort innerhalb der Gate-Kapazität, an dem die oben diskutierte immobile Ladung entsteht, besser lokalisieren zu können, wird die Kapazität des Dielektrikums bei einer Lagerung unter  $85^\circ\text{C}$  über mehrere Wochen untersucht. Dazu wird eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 20 Hz und einer Amplitude von 1 V verwendet. Diese wird von einem LCR-Meter erzeugt, welches die durch die Probe erzeugte Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung und den Betrag der Impedanz zurückmisst. Aus diesen Werten lässt



**Abb. 7.14.:** Teststrukturen zur Herstellung eines Gold/Dielektrikum/Gold Systems auf dem verwendeten Probenlayout.

sich die Kapazität des vermessenen Schichtsystems berechnen.

Vermessen wird dazu eine Teststruktur aus Gold/Dielektrikum/Gold, welche effektiv einen Plattenkondensator mit dem für die OFETs verwendeten polymeren Dielektrikum darstellt. Auf dem verwendeten Probenlayout existieren insgesamt 4 solcher Teststrukturen, im Ganzen zu sehen am linken Rand in Abbildung (4.2). In Abbildung (7.14) sind zwei solche Teststrukturen noch einmal im Detail dargestellt. Dabei ist die lithographisch strukturierte Source-Drain Schicht die untere Goldschicht. Darüber wird das Dielektrikum auf der gesamten Probe per *Spincoating* mit den selben Parametern wie für die OFET Prozessierung aufgebracht, also mit einer Schichtdicke von  $1\ \mu\text{m}$ . Die oberste Schicht ist schließlich das Gate, welches mittels Sputterdeposition aufgebracht und über eine Schattenmaske strukturiert wird. Für das Foto in Abbildung (7.14) liegt die Probe auf einem Leuchttisch und wird intensiv von unten durchleuchtet und gegen dieses Licht fotografiert. Daher erscheint die dünne Gateschicht halbdurchlässig, während die dickere Source-Drain-Schicht komplett lichtundurchlässig ist und daher schwarz erscheint.

Das Versuchsergebnis ist in Tabelle (7.2) dargestellt. Aus den Messergebnissen wird ersicht-

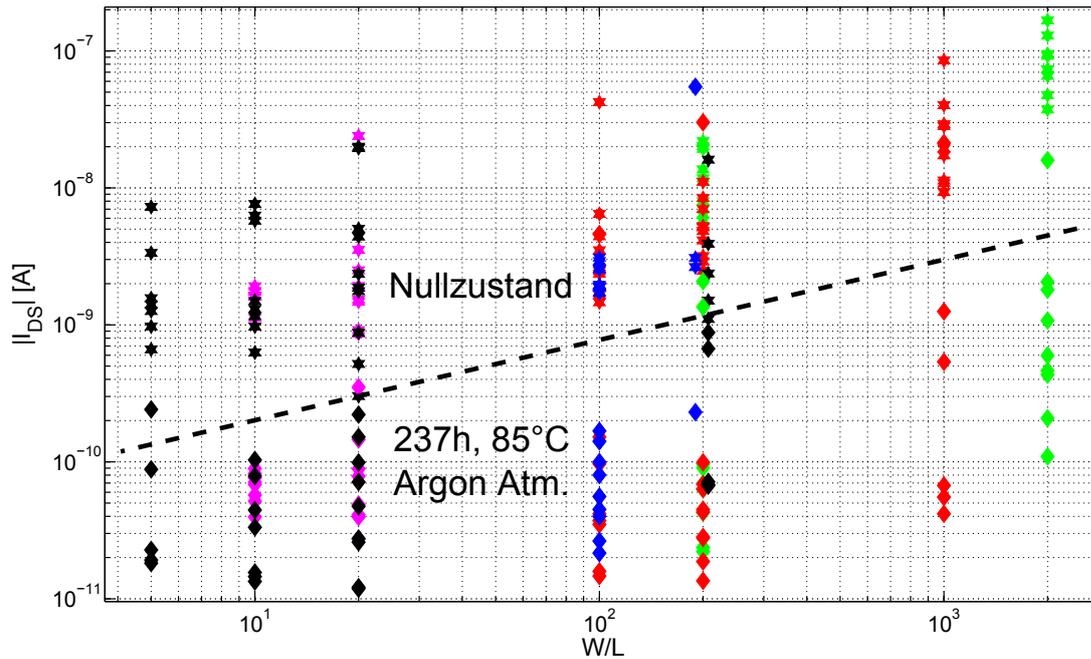
Teststruktur	C nach 0 h [pF]	C nach 168 h [pF]	C nach 336 h [pF]	C nach 840 h [pF]
oben links	21	23,1	23,3	23,3
oben rechts	21,6	23,1	23,3	23,3
unten links	23,7	23,8	23,9	23,9
unten rechts	23,5	23,5	23,5	23,5

**Table 7.2.:** Kapazität der 4 Kondensator-Teststrukturen während der Lagerung bei 85 °C. Die Bezeichnungen der Teststrukturen beziehen sich auch die Anordnung in Abbildung (4.2).

lich, dass sich die Kapazität des Dielektrikums während der Alterung im Ofen fast gar nicht ändert. Speziell für den Schritt von 336 h zu 840 h ist gar keine Änderung feststellbar, während in diesem Zeitraum entsprechend den Abbildungen (7.7), (7.11) und (7.13) schon deutliche Alterungseffekte an vollständig aufgebauten OFETs erkennbar sind. Dies bedeutet, dass die beobachtete feste, positive Ladung nicht im Dielektrikum selbst entsteht. Zumindest nicht als nach außen spürbare, effektive Ladung. Dieser Versuch kann allerdings keine Aussage auf der mikroskopischen Skala machen, zum Beispiel über zufällig verteilte Dipole im Material, deren Ladung sich über das Volumen zu 0 mittelt. Weiterhin lässt sich feststellen, dass sich auch die Dielektrizitätskonstante des Dielektrikums in dem beobachteten Zeitraum von 840 h nicht ändert.

#### 7.2.1.4. Alterungsverhalten des Off-Stroms

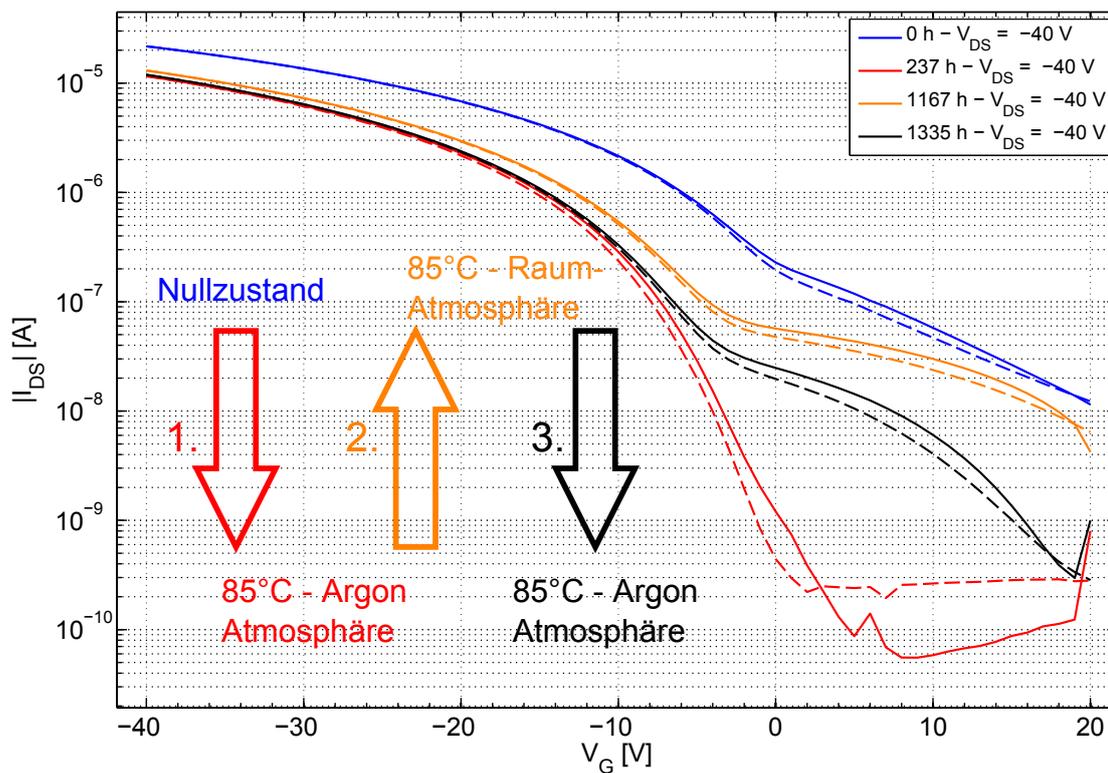
Mit der in den vorherigen Abschnitten diskutierten Hypothese einer sich über die Alterung entwickelnden festen Ladung innerhalb der Gate-Kapazität können die meisten der in Kapitel (7.1) beobachteten Effekte erklärt werden. So ist die Verschiebung der Schwellspannung eine direkte Folge dieser festen Ladung in Kombination mit der Verbreiterung des Einschaltverhaltens der OFETs. Auch der geringere On-Strom und die geringere effektive Mobilität lassen sich als direkte Folge der geringeren Anzahl an verfügbaren mobilen Ladungsträgern verstehen. Das komplexe Verhalten des Off-Stroms bei der 85 °C-Lagerung in Abbildung (7.5) lässt sich jedoch nicht ausschließlich mit den bereits diskutierten Effekten erklären und soll hier deshalb noch einmal im Detail betrachtet werden. In Kapitel (7.1.3) wird der starke Anstieg des Off-Stroms auf die Dotierung durch atmosphärischen Sauerstoff zurück geführt. Diese Hypothese lässt sich testen, indem man die gleiche Lagerung in einer Atmosphäre ohne Sauerstoff durchführt. Dazu werden in einem Stichversuch 2 Proben in einem mit Argon gefüllten Exsikkator bei 85 °C im Ofen gelagert und nach 237 h erneut elektrisch vermessen. Die Auswirkung auf den Off-Strom zeigt Abbildung (7.15) für eine Übersicht über alle Geometrien auf diesen beiden Proben. Dabei sind die Messpunkte vom Nullzustand als Hexagramme und



**Abb. 7.15.:** Übersicht über die Änderung des Off-Stroms nach der Lagerung von 2 Proben bei  $85^\circ\text{C}$  unter Argon Atmosphäre. Die Messpunkte im Nullzustand sind als Hexagramme, die Messpunkte nach der Lagerung als Rauten dargestellt. Die gestrichelte Hilfslinie soll die Absenkung des Off-Stroms nach der Lagerung verdeutlichen.

die Messpunkte nach der Argon-Lagerung als Rauten eingezeichnet. Man erkennt hier für fast alle vermessenen OFETs eine deutliche Absenkung des Off-Stroms nach der Argon-Lagerung bei  $85^\circ\text{C}$ .

Für eine besonders stark betroffene Geometrie mit  $W/L = 2000$  zeigt Abbildung (7.16) noch einmal explizit die Transferkennlinien bei  $V_G = -40\text{V}$  für die in Abbildung (7.15) abgebildete Lagerung und zusätzlich für eine nachfolgende Lagerung bei  $85^\circ\text{C}$  an Raumatmosphäre und eine erneute Lagerung bei  $85^\circ\text{C}$  unter Argon Atmosphäre. Die Entwicklung des Off-Stroms lässt sich in dieser Art der Darstellung im Bereich positiver Gate-Spannungen ablesen und man erkennt in Abbildung (7.16) einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Lagerungsatmosphäre und dem Off-Strom: Die erste Lagerung in Argon-Atmosphäre hat eine drastische Reduzierung des Off-Stroms um ca. 2 Größenordnungen zur Folge, was deutlich auf eine Abhängigkeit von der Umgebungsatmosphäre hinweist. Die darauffolgende Lagerung an Raumatmosphäre zeigt dann den erwarteten Anstieg des Off-Stroms, welcher durch eine erneute Lagerung unter Argon-Atmosphäre wieder zum Teil zurück geht. Der Einfluss der Lagerungsatmosphäre auf den Off-Strom ist also reversibel und die Höhe des Off-Stroms lässt



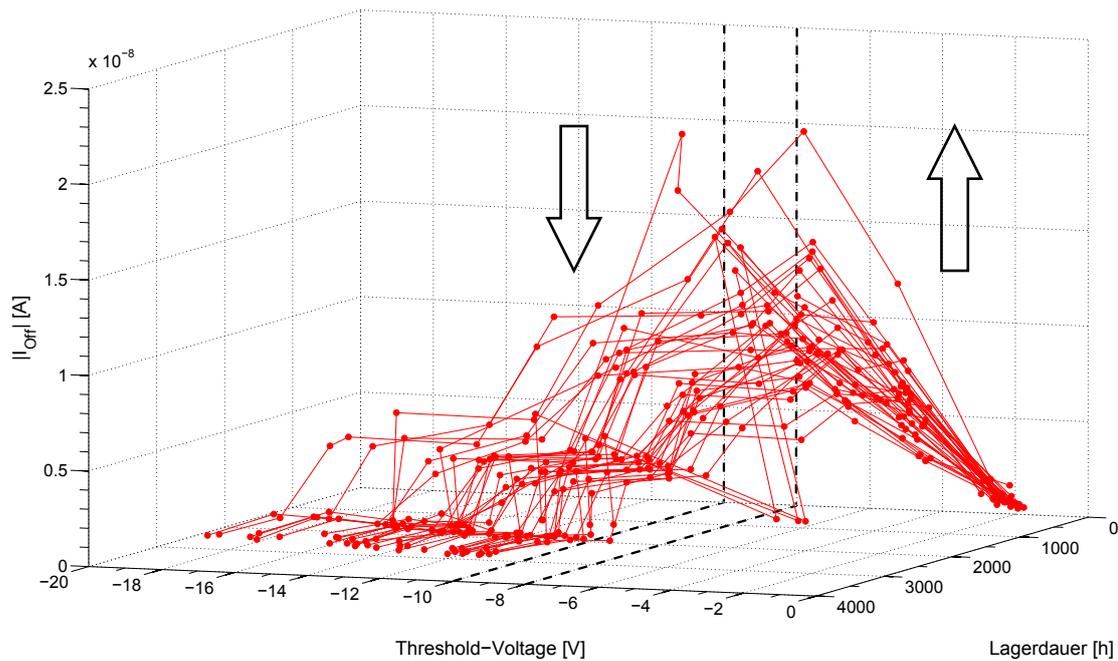
**Abb. 7.16.:** Entwicklung der Transferkennlinie bei  $V_G = -40\text{V}$  für die abwechselnde Lagerung in Argon- bzw. Raum-Atmosphäre bei  $85^\circ\text{C}$ . Die Änderung des Off-Stroms über mehr als eine Größenordnung wird für positive Gate-Spannungen deutlich.

sich in gewissen Grenzen durch die Lagerung der OFET-Proben in Umgebungsatmosphären mit und ohne Sauerstoffanteil einstellen.

Aufgrund vorhandener Literaturdaten zur p-Dotierung von halbleitenden Polymeren durch atmosphärischen Sauerstoff [40], [41], [42] wird das beobachtete Verhalten des Off-Stroms auf diesen Effekt zurück geführt. Die Reversibilität im Verhalten des Off-Stroms bedeutet dementsprechend, dass im Halbleiter vorhandener Sauerstoff bei 85 °C auch wieder hinaus diffundieren kann über eine Lagerdauer in der Größenordnung 100h. Im Fall der Argon-Atmosphäre diffundiert gleichzeitig kein Sauerstoff in den Halbleiter hinein, so dass sich effektiv eine abnehmende Dotierung des Halbleiters ergibt, wie in Abbildung (7.15) und Abbildung (7.16) zu sehen. Wenn in der Umgebungsatmosphäre jedoch Sauerstoff vorhanden ist, zeigen Abbildung (7.16) und der erste Anstieg bis ca. 500h in Abbildung (7.5) eine Zunahme der Dotierung im Halbleiter. Es muss in diesem Fall also effektiv mehr Sauerstoff in den Halbleiter hinein als hinaus diffundieren. Weiterhin zeigen Abbildung (7.15) und (7.16), dass bereits im Nullzustand nach der Herstellung der OFETs eine signifikante p-Dotierung des Halbleiters durch atmosphärischen Sauerstoff vorliegt, welche starke Auswirkungen auf das On/Off-Verhältnis der OFETs hat. Siehe dazu noch einmal die Betrachtung des On/Off-Verhältnisses im Nullzustand in Abbildung (6.15) mit einem Maximum von ca. 3 Größenordnungen.

Abschließend sei noch angemerkt, dass auch der maximale On-Strom abhängig von der Dotierung des Halbleiters ist. So zeigt Abbildung (7.16) ungefähr eine Halbierung des On-Stroms vom Nullzustand zur ersten Lagerung unter Argon-Atmosphäre. Für das On/Off-Verhältnis überwiegt jedoch die starke Reduzierung des Off-Stroms, so dass sich in Abbildung (7.16) ein maximales On/Off-Verhältnis von knapp 5 Größenordnungen ergibt, was deutlich mehr ist als im Nullzustand dieses OFETs und auch generell aller hergestellten OFETs aller Geometrien, wie in Abbildung (6.15) dargestellt.

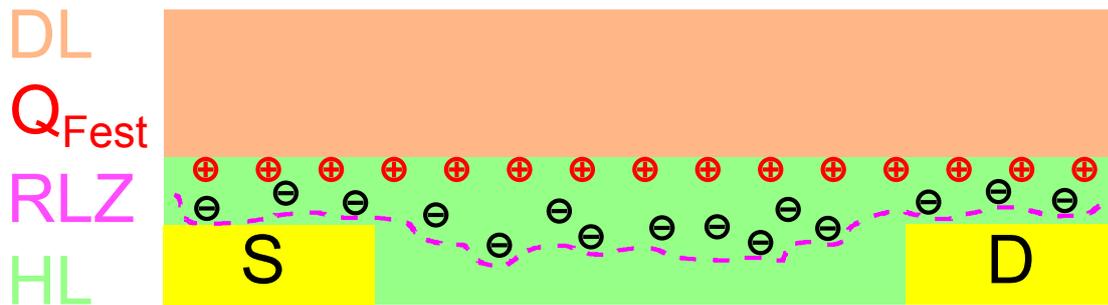
Für die weitere Diskussion des Off-Stroms im Verlauf der Alterung stellt sich die Frage, warum der Off-Strom erst ansteigt und danach wieder abfällt, wie in Abbildung (7.5) dargestellt. Im Falle einer kontinuierlichen Dotierung durch den atmosphärischen Sauerstoff würde man einen monoton steigenden Off-Strom erwarten, der eventuell irgendwann zu einem Plateau abflacht, wenn eine maximale Konzentration von Sauerstoff im Halbleiter erreicht ist. Ein Absinken des Off-Stroms, wie in Abbildung (7.5) ab ca. 600h Lagerzeit zu sehen, ist in dem vorgestellten Modell jedoch nicht zu erklären. Hier muss also ein zusätzlicher Effekt wirken, welcher nach einer gewissen Zeit das beobachtete Absinken des Off-Stroms verursacht. Der größte zusätzliche Effekt ist die Verschiebung der Schwellspannung in den negativen Bereich, bedingt durch die bereits diskutierte Feste Ladung in der Gate-Kapazität und die Verbreiterung des Einschaltverhaltens der OFETs. Um das Zusammenwirken beider Effekte über die Alterung hinweg darzustellen, zeigt Abbildung (7.17) eine 3D Darstellung des Alterungsverlaufs mit den Parametern Off-Strom und Schwellspannung, aufgetragen gegen die Lagerdauer.



**Abb. 7.17.:** Zusammenhang zwischen Schwellspannung und Off-Strom für die Lagerung bei 85 °C, aufgetragen gegen die Lagerdauer.

In dieser Auftragung erkennt man, dass am Anfang der Lagerung der Off-Strom stark ansteigt, entsprechend der oben diskutierten Dotierung durch den atmosphärischen Sauerstoff. Bei einer Schwellspannung von etwa  $-8\text{V}$  ist dann das Maximum des Off-Stroms erreicht und  $V_{Th} = -10\text{V}$  stellt so etwas wie eine Grenze dar, ab der der Off-Strom stark abfällt und gegen Ende der Lagerdauer wieder in etwa den Wert vom Anfang der Lagerung erreicht. Es gibt also tatsächlich einen Zusammenhang zwischen der Schwellspannung und dem Off-Strom, welcher jedoch nicht linear ist und zusätzlich von der Lagerdauer der OFETs abhängt.

In Abschnitt (7.2.1.1) und (7.2.1.2) wurde ausführlich die Verschiebung der Schwellspannung in den negativen Bereich diskutiert als Konsequenz einer sich in der Gate-Kapazität bildenden festen Ladung und der Verbreiterung des Einschaltbereich der OFETs. Eine solche feste Ladung innerhalb der Gate-Kapazität hat jedoch Auswirkungen auf die Ladungs- und Potentialverteilung im OFET. Bei dem betrachteten Halbleiter handelt es sich um ein p-Typ Material, was bedeutet, dass nur Löcher in dem Material mobil sind, Elektronen jedoch nicht [2]. Eine akkumulierte, feste Ladung an der Grenzfläche von Halbleiter und Dielektrikum muss also durch ortsfeste Elektronen im Halbleitervolumen kompensiert werden, ähnlich einem Silizium-MOSFET in Inversion, in dem ortsfeste Ionenrümpfe die Ladung der Minoritätsladungsträger im Kanal kompensieren [15]. In beiden Fällen bildet sich in der Folge eine Raumladungszone aus, welche sich in das Halbleitervolumen hinein erstreckt. Für die hier betrachteten OFETs ist dies schematisch in Abbildung (7.18) dargestellt. Eine



**Abb. 7.18.:** Schematische Darstellung einer Raumladungszone (RLZ), gebildet durch eine feste Ladung  $Q_{Fest}$  an der Grenzfläche zwischen Dielektrikum (DL) und Halbleiter (HL), welche durch ortsfeste Elektronen im Halbleitervolumen kompensiert wird.

solche Raumladungszone beschränkt den verfügbaren Querschnitt des Halbleitervolumens für den Ladungstransport zwischen Source und Drain und führt daher zu einem geringeren gemessenen Off-Strom. Eine Raumladungszone kann also den in Abbildung (7.17) gezeigten Verlauf des Off-Stroms in Korrelation mit der Schwellspannung zumindest qualitativ erklären. Dass die Feldverteilung im Halbleitervolumen einen Einfluss auf den Off-Strom hat, lässt sich auch noch einmal an Abbildung (7.16) für den Bereich positiver Gate-Spannungen nachvollziehen. Hier übernimmt die positive Gate-Spannung die Rolle der festen, positiven Ladung, die sich im Verlauf der Alterung bei 85 °C entwickelt. Mit dem selben Argument wie oben, nämlich der Immobilität der Elektronen im verwendeten Halbleiter, bildet sich auch hier eine Raumladungszone aus. Den Einfluss dieser Raumladungszone auf den Ladungstransport durch das Halbleitervolumen erkennt man hier am sinkenden Stromfluss zwischen Source und Drain für steigende, positive Gate-Spannungen. Weiterhin macht sich hier auch die Stärke der Sauerstoffdotierung des Halbleiters in der Steilheit der Kurven bei positiven Gate-Spannungen bemerkbar.

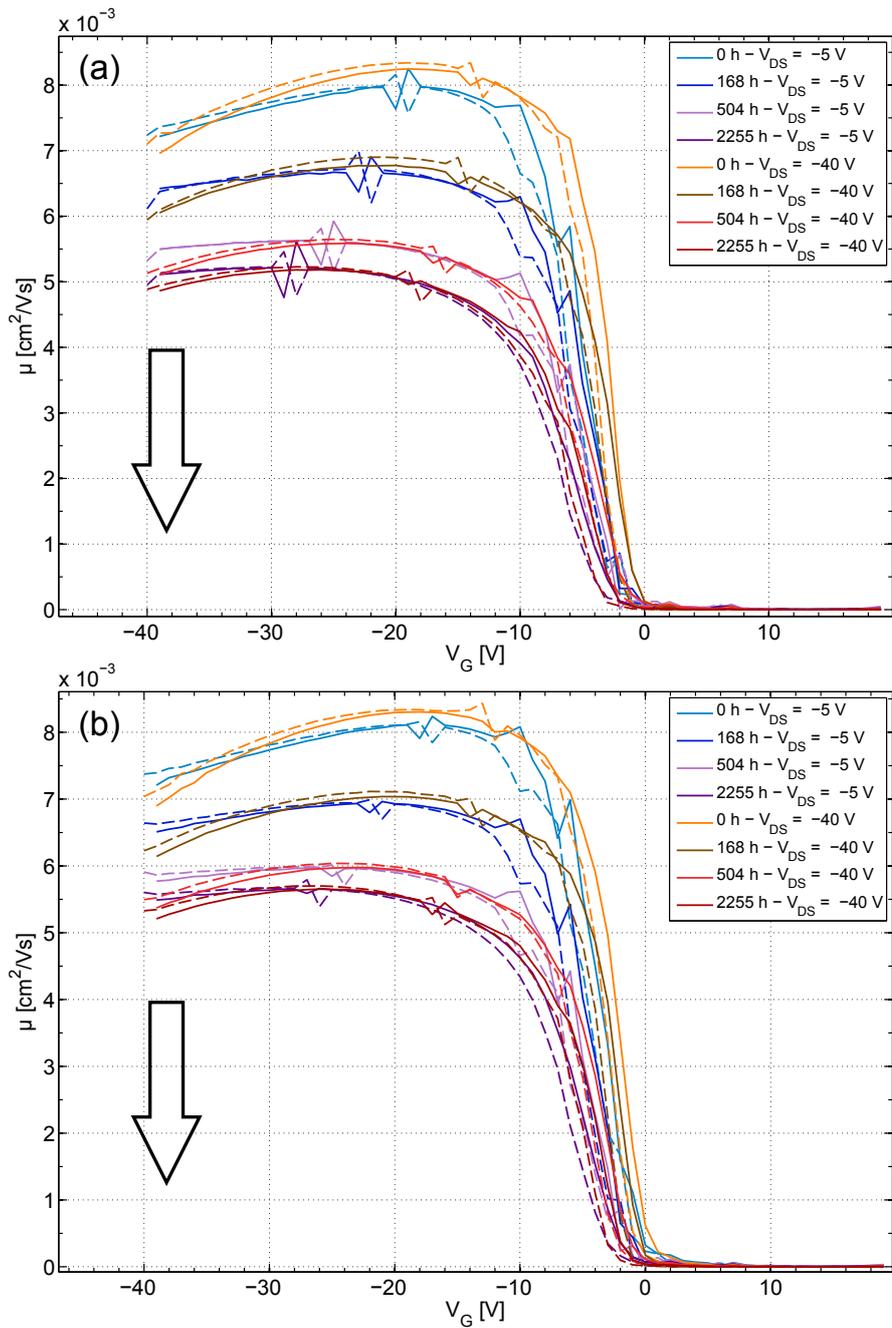
Letztlich kann die hier dargelegte Hypothese einer sich entwickelnden Raumladungszone im Halbleitervolumen nur eine qualitative Erklärung liefern für den in Abbildung (7.17) gezeigten Zusammenhang zwischen Schwellspannung, Off-Strom und Lagerungsdauer. Zur weiteren Analyse wären Kapazitäts-Spannungs Messungen (C-V Messungen) an MIS ((M)etal-(I)nsulator-(S)emiconductor) Strukturen aus den für die OFETs benutzten Materialien in einem ähnlichen Umfang wie die hier vorgestellten Messungen eine erfolgversprechende Methode. Diese C-V Messungen müssten dann entsprechend parallel zu den Kennlinienmessungen der OFETs bei den verschiedenen Alterungsschritten erfolgen und könnten Änderungen in der Kapazität durch entstehende Raumladungszonen direkt anzeigen. Ein Beispiel für die Anwendung einer solchen C-V Messung zur elektrischen Charakterisierung der Grenzschichten in OFETs und MIS-Strukturen ist in Referenz [47] zu finden.

### 7.2.2. Lagerung in der Klimakammer

Die Lagerung in der Klimakammer erfolgt ebenfalls bei 85°C, jedoch zusätzlich bei einer relativen Luftfeuchte von 85%. Diese Lagerung soll dazu dienen, den Einfluss der Luftfeuchte bei einer erhöhten Temperatur zu evaluieren und dient als direkter Vergleich zur oben diskutierten Ofenlagerung bei 85°C und trockener Raumluftatmosphäre. Aus diesem Grund erfolgt auch die Diskussion der Alterungsmechanismen im Vergleich dazu und auch das Vorgehen erfolgt analog zum vorangegangenen Abschnitt. Entsprechend zeigt Abbildung (7.19) die Mobilitätskennlinien eines, in Bezug auf die Schwellspannung, besonders stark und eines besonders schwach gealterten OFETs für die Lagerung in der Klimakammer. Die Zeitpunkte der Messungen sind nicht genau identisch zur Ofenlagerung, da einerseits für die Klimakammer andere Messintervalle verwendet wurden. Andererseits geht die Mobilität für die Lagerung in der Klimakammer entsprechend Abbildung (7.2) nach ca. 1000 h in ein Plateau über, so dass es sinnvoller erscheint, die hier im Detail betrachteten Messpunkte eher an den Anfang der Lagerung zu setzen. In Abbildung (7.19) sieht man im Vergleich zur Ofenlagerung in Abbildung (7.11), dass sich für die Lagerung in der Klimakammer anscheinend keine feste Ladung in der Gate-Kapazität ausbildet. Der Startpunkt für den Anstieg der Mobilität von der Nulllinie driftet hier über die Alterung nicht, bzw. so wenig in den weiter negativen Bereich, dass sich ein solches Verhalten mit den durchgeführten Messungen nicht mehr nachweisen lässt. Einzig der Einschaltbereich der OFETs verbreitert sich, was ganz analog zur entsprechenden Diskussion bei der Ofenlagerung in Abschnitt (7.2.1.1) zur Verringerung der effektiven Mobilität und zu der in Abbildung (7.7) beobachteten, vergleichsweise leichten Verschiebung der Schwellspannung in den weiter negativen Bereich führt. Diese Verbreiterung des Einschaltbereichs wird auch in den Transferkennlinien deutlich, welche für die beiden OFETs aus Abbildung (7.19) in Abbildung (7.20) dargestellt sind.

Die Ursache für diesen Effekt ist vermutlich die Eindiffusion von Wassermolekülen in den OFET-Schichtstapel. Eine mögliche Erklärung wäre, dass sich durch das hohe Dipolmoment der Wassermoleküle lokal die energetische Zustandsdichte des Halbleiters verbreitert, so dass bei der Messung der Transferkennlinie mehr Ladungsträgerfallen besetzt werden können [3]. Der Einfluss der Luftfeuchte auf die OFET-Parameter wird auch noch einmal deutlich im Vergleich zur praktisch gar nicht gealterten Referenzlagerung im Exsikkator mit Trockenmittel und an Raumtemperatur, wie im Folgenden in Abschnitt (7.2.4) beschrieben. Das Ausbilden eines Plateaus für die Mobilität nach ca. 800 h Alterung in der Klimakammer, wie in Abbildung (7.2) dargestellt, ließe sich in diesem Zusammenhang durch die Sättigung der polymeren OFET-Schichten mit Wasser nach diesem Zeitraum erklären.

Ein weiterer möglicher Effekt ist eine Änderung der Sauerstoffpermeabilität der polymeren Schichten im OFET, ebenfalls bedingt durch die Einlagerung von Wasser und anschließendes Quellen der Schichten. Dies würde auch den wesentlich geringeren Anstieg des Off-Stroms

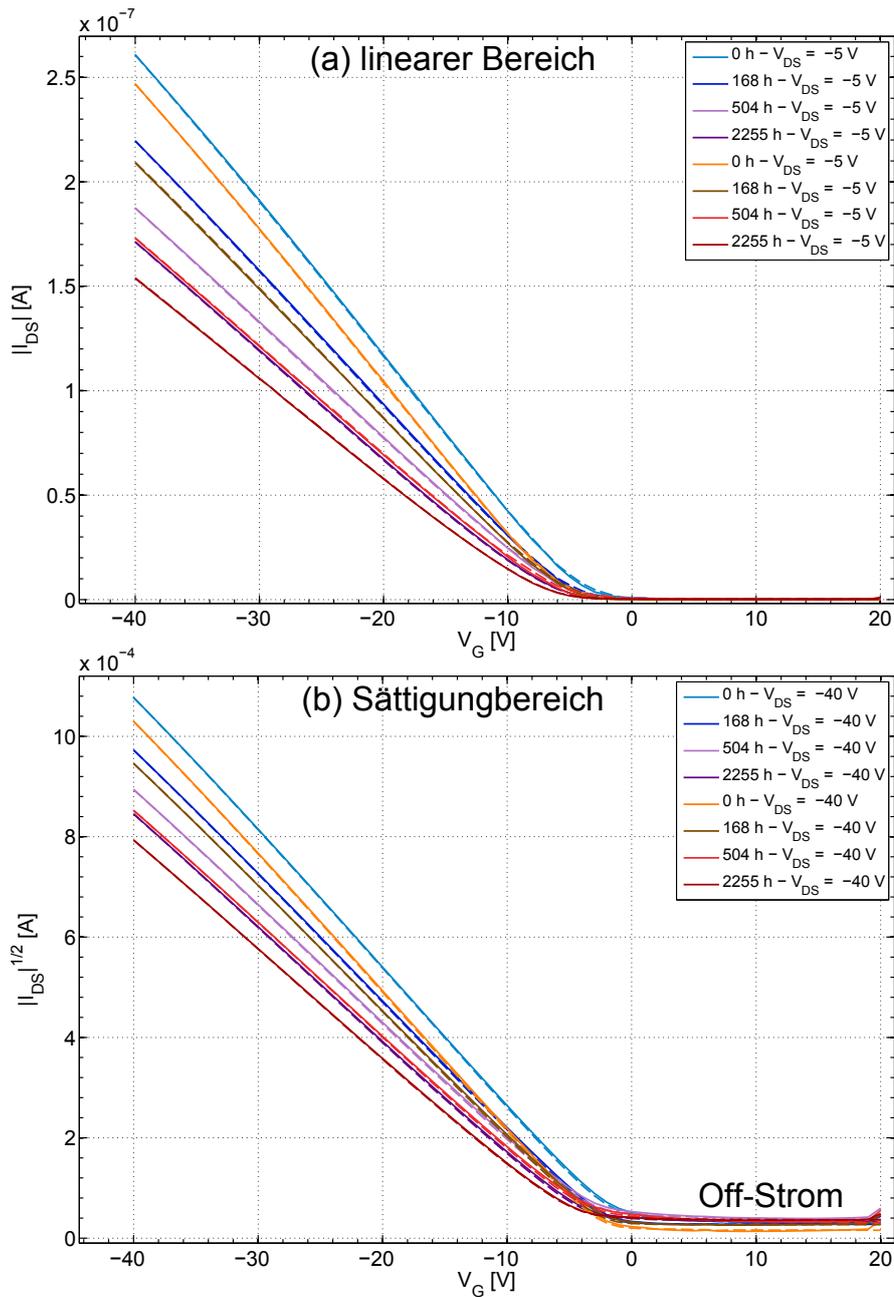


**Abb. 7.19.:** Mobilitätskennlinien von (a) einem besonders stark bezüglich der Schwellenspannung und (b) einem besonders wenig gealterten OFET für die Lagerung in der Klimakammer.

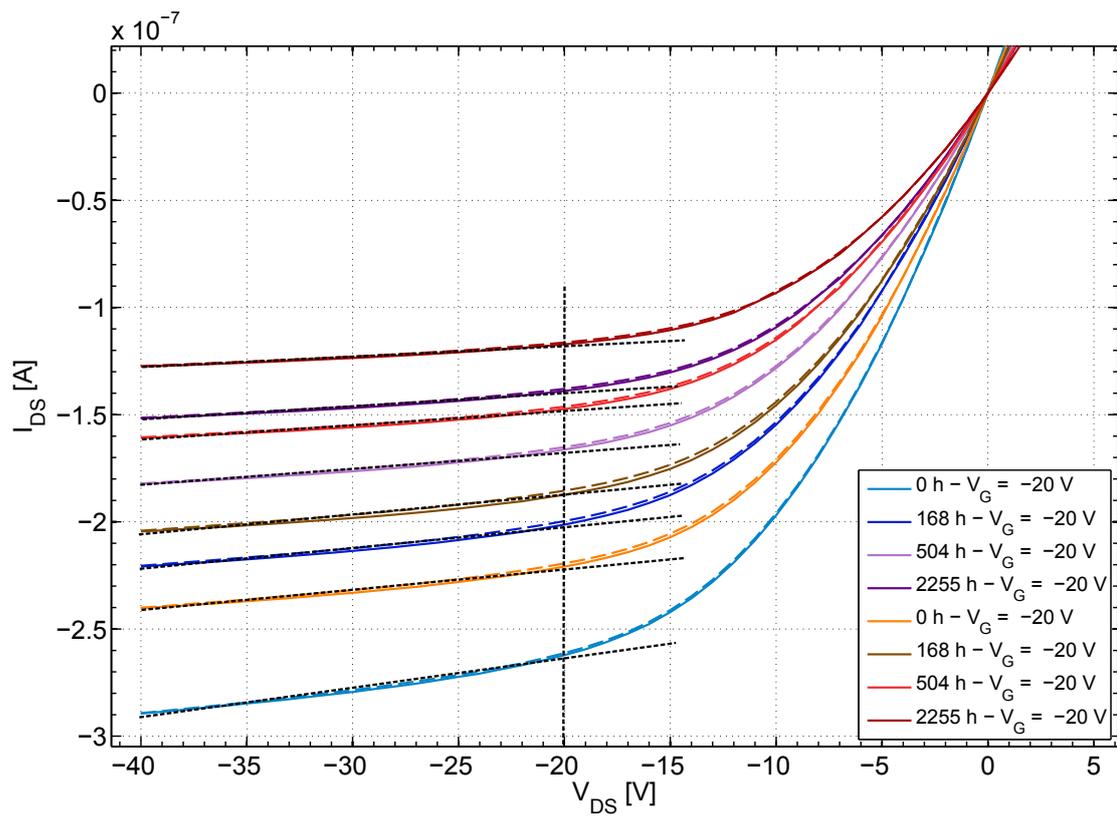
im Vergleich zur Ofenlagerung bei 85 °C erklären. Weiterhin macht sich auch der Off-Strom im Vergleich zu Abbildung (7.12) wesentlich weniger stark in den Transferkennlinien bemerkbar. Dies ist konsistent mit dem Verhalten des Off-Stroms im Vergleich zur Ofenlagerung in Abbildung (7.5).

Zum Schluss zeigt Abbildung (7.21) noch die Ausgangskennlinien der beiden hier beispielhaft diskutierten OFETs für  $V_G = -20\text{V}$ . Auch hier ist keine Verschiebung des Abschnürungspunktes zu erkennen, was noch einmal bestätigt, dass sich bei der Lagerung in der Klimakammer keine, in den Kennlinien messbare, feste Ladung in der Gate-Kapazität bildet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Alterung in der Klimakammer einen weitaus weniger starken Einfluss auf die Kennlinien der gealterten OFETs hat, als die Lagerung im Ofen bei der gleichen Temperatur von 85 °C und trockener Umgebungsluft. Im Vorfeld der Versuche war, ausgehend von der vorhandenen Literatur zu P3HT [7], [8] und Pentacen [45], [9] eigentlich das Gegenteil erwartet worden. Die hohe Feuchte in der Klimakammer bei 85 °C/85%RH war als zusätzlicher Stressfaktor für die OFETs gedacht und es wurde unter diesen Bedingungen eine sehr schnelle Degradation erwartet. Deshalb wurden vergleichsweise viele Messpunkte an den Anfang der Lagerung gesetzt, wie in den entsprechenden Abbildungen in Kapitel (7.1) zu erkennen.



**Abb. 7.20.:** Direkter Vergleich der Transferkennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.19) mit dem besonders stark gealterten OFET in orange und rot und dem besonders schwach gealterten OFET in blau und magenta. Teil (a) zeigt den Vergleich im linearen-, Teil (b) im Sättigungsbereich.



**Abb. 7.21.:** Ausgangskennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.19) für  $V_G = -20$  V. Der besonders stark gealterte OFET ist in orange und rot, der besonders schwach gealterte in blau und magenta dargestellt.

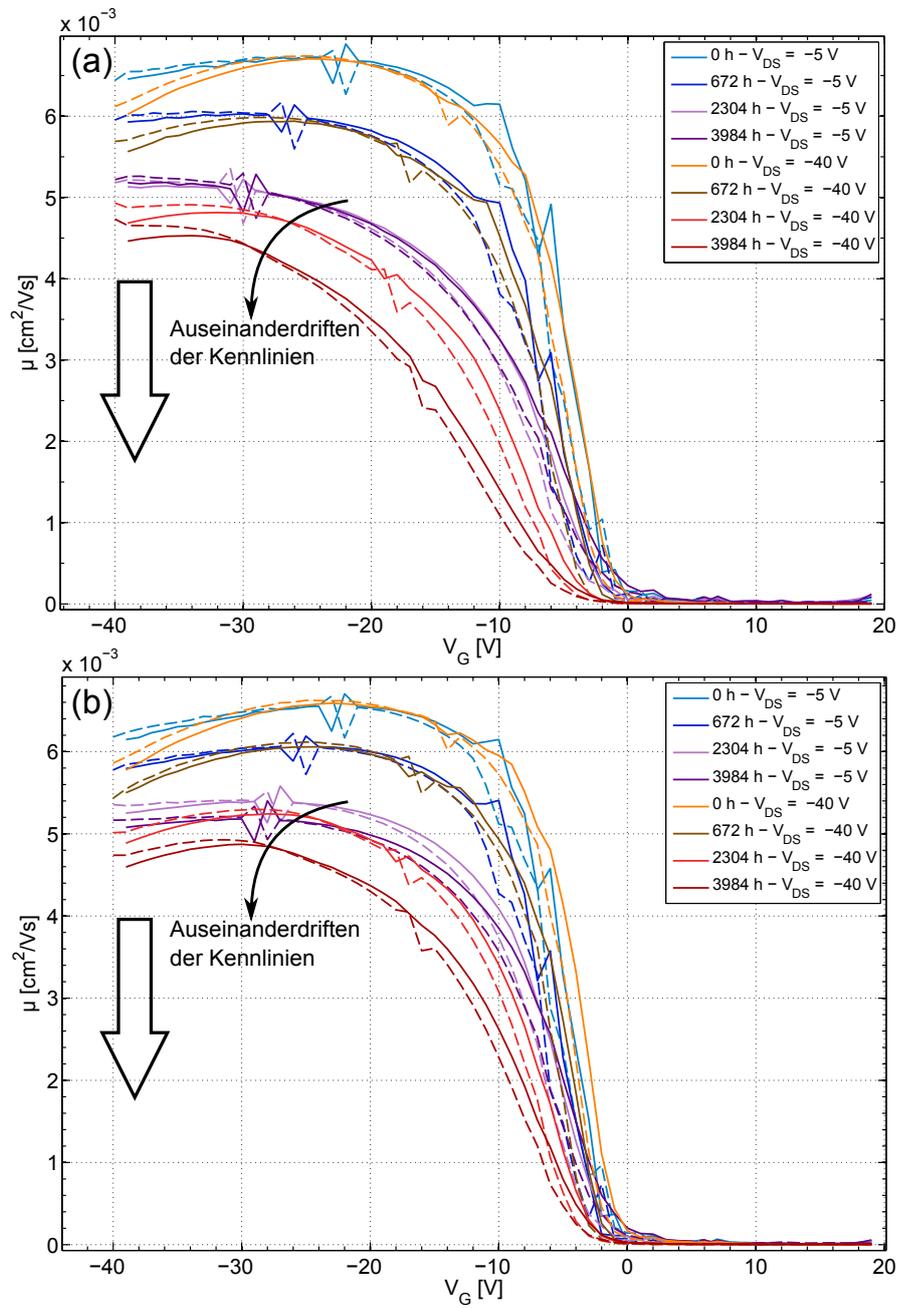
### 7.2.3. Umgebungslagerung (*Shelf-Life*)

Die Idee hinter der *Shelf-Life* Lagerung ist, einen Anhaltspunkt für die Degradation der hier betrachteten OFETs unter realen Umgebungsbedingungen zu bekommen. Dies bedeutet eine Lagerung bei Raumtemperatur und dem natürlichen Lichteinfall im Labor. Die Ergebnisse können dann entsprechend mit den Lagerungen unter erhöhter Temperatur und Luftfeuchte im Ofen und in der Klimakammer verglichen werden. Dadurch lässt sich abschätzen, in wieweit diese Lagerungen die selben Degradationsmechanismen anregen, wie unter realen Umgebungsbedingungen und in wieweit sie sich dementsprechend als Tests zur beschleunigten Alterung der OFETs eignen.

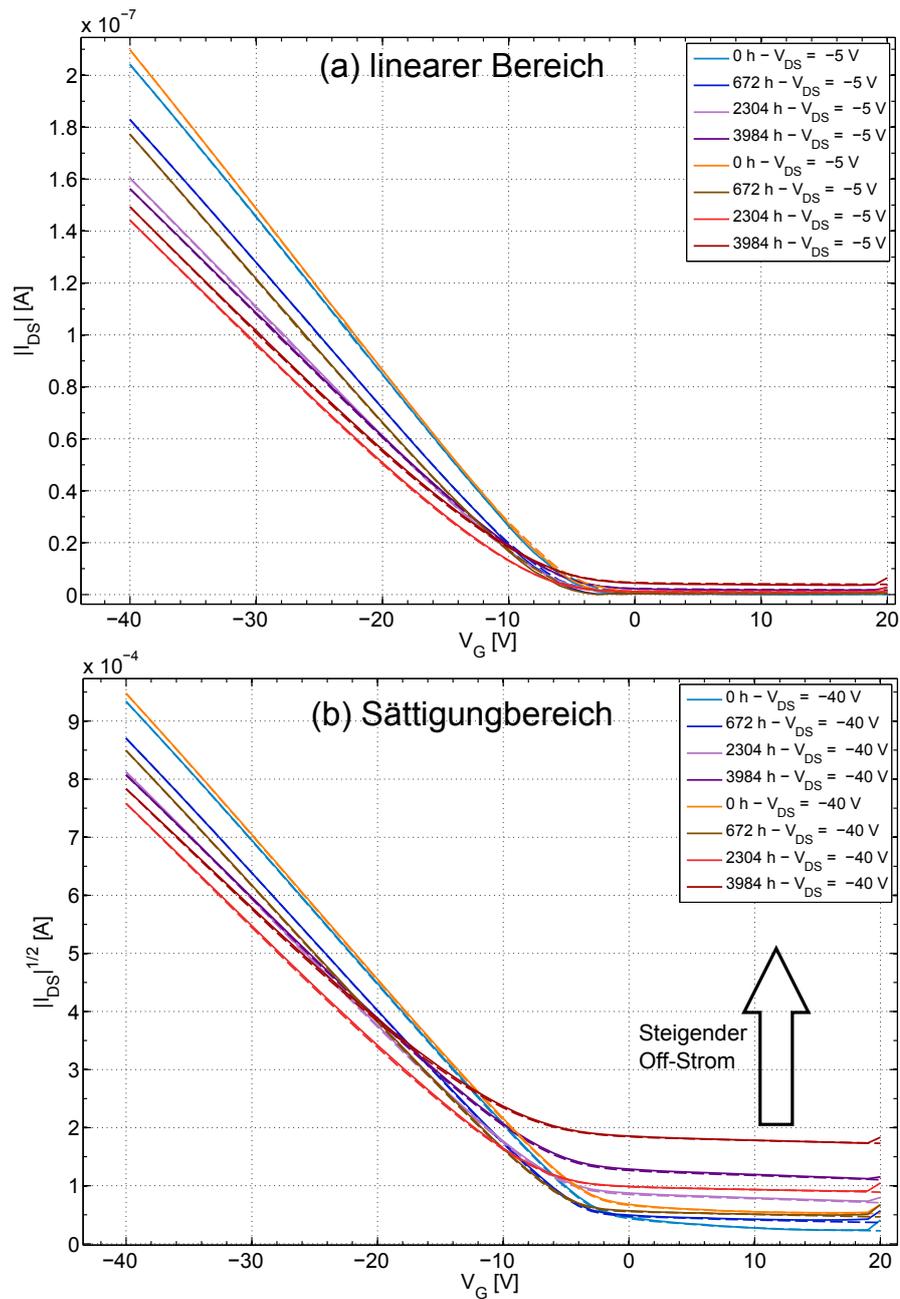
Die am stärksten betroffenen Parameter bei dieser Lagerung sind gemäß Kapitel (7.1) die Schwellspannung und der Off-Strom. Weiterhin zeigt die Alterung der Schwellspannung in Abbildung (7.1.5) für die *Shelf-Life* Lagerung ein Auseinanderdriften zwischen dem linearen- und dem Sättigungsbereich. Ein solcher Effekt wird für alle anderen Lagerungen nicht beobachtet und soll hier nochmal im Detail betrachtet werden. Wiederum werden dazu zwei OFETs herausgegriffen, die einmal besonders stark und einmal besonders schwach bezüglich der Schwellspannung gealtert sind. Die Mobilitätskennlinien dieser beiden OFETs sind in Abbildung (7.22) dargestellt.

Auch hier erkennt man am Ende der Lagerung ein Auseinanderdriften der beiden Mobilitätskennlinien für die zwei verschiedenen Drain-Source Spannungen zu einem Zeitpunkt. Dies führt zu einer geringeren, effektiven Mobilität im Sättigungsbereich der OFETs, wie auch in Abbildung (7.2) für die *Shelf-Life* Lagerung zu erkennen ist. Auch dieses Verhalten lässt sich durch den hohen Off-Strom erklären, der sich über die *Shelf-Life* Lagerung hinweg entwickelt. Insbesondere das On/Off-Verhältnis spielt hier die entscheidende Rolle bezüglich der Frage, ob man den Off-Strom des OFETs bei der Ermittlung der weiteren OFET-Parameter vernachlässigen kann. Anschaulich zeigt dazu Abbildung (7.23) die Transferkennlinien der beiden OFETs im direkten Vergleich. Für den Sättigungsbereich wird hier der Anstieg des Off-Stroms besonders deutlich, was einerseits an der höheren Spannung an Drain liegt, welche einen absolut gesehen höheren Off-Strom im Vergleich zum linearen Bereich erzeugt. Andererseits trägt auch die Auftragung auf einer  $\sqrt{I_{DS}}$ -Skala dazu bei, dass die vergleichsweise kleinen Off-Ströme auf dieser Skala größer erscheinen in Relation zu den On-Strömen. Da die Extraktion der Schwellspannung und der Mobilität durch eine Geradenanpassung auf dieser Skala erfolgen, pflanzt sich dieser Effekt fort und macht für die Schwellspannung eine Korrektur erforderlich, welche bereits im Detail in Kapitel (3.3) diskutiert wurde.

Der Effekt dieser Korrektur der Schwellspannung wird für den letzten Messpunkt der *Shelf-Life* Lagerung bei 3984 h aufgrund des sehr hohen Off-Stroms besonders deutlich. Dazu zeigt Abbildung (7.24) die Geradenanpassung zur Ermittlung von  $V_{Th}$  und  $\mu$  für die beiden OFETs aus Abbildung (7.22) an diesem Messpunkt. Hier wird deutlich, dass die Korrektur



**Abb. 7.22.:** Mobilitätskennlinien von (a) einem in Bezug auf den Off-Strom besonders stark und (b) einem besonders wenig gealterten OFET aus der Shelf-Life Lagerung.



**Abb. 7.23.:** Direkter Vergleich der Transferkennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.22). Der besonders stark gealterte OFET ist in orange und rot, der besonders schwach gealterte in blau und magenta dargestellt.

der Schwellspannung im Sättigungsbereich notwendig ist, um einen realistischen Wert zu ermitteln. Ansonsten würde durch den Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der X-Achse ein  $V_{Th}$  von ca. 0V bis -2V ermittelt, was nicht dem Verlauf der Transferkennlinie in Abbildung (7.24) entspricht. Tendenziell führt die Korrektur zu einem relativ stark ins negative verschobenen Wert für  $V_{Th}$ , der jedoch aufgrund des breiten Einschaltbereichs des OFETs trotzdem als eine valide Schwellspannung interpretiert werden kann. Hier sei noch einmal angemerkt, dass es, wie in Kapitel (3) beschrieben, bei einem OFET keine eindeutige Definition der Schwellspannung gibt.

Die Konsequenz aus dieser Diskussion ist, dass der stark steigende Off-Strom für das in Kapitel (7.1.5) beobachtete Auseinanderdriften der Threshold- Spannung im linearen- und Sättigungsbereich verantwortlich ist. Dementsprechend ist die relativ kleine Drift der Schwellspannung im linearen Bereich auf die in Abbildung (7.22) beobachtete Verbreiterung des Einschaltbereichs der OFETs durch die steigende  $V_G$ -Abhängigkeit der Mobilität zurückzuführen. Die weitaus stärkere, zusätzliche Drift im Sättigungsbereich ist hingegen eine Folge des steigenden Off-Stroms und nicht auf ein fundamental unterschiedliches Verhalten der OFETs in beiden Bereichen zurück zu führen.

Auch die Mobilität bleibt nicht unbeeinträchtigt vom Off-Strom, da sich anschaulich gesehen der Startpunkt der Ausgleichsgeraden bei  $V_G = V_{Th}$  nach oben verschiebt, während der Endpunkt bei  $V_G = -40V$  fast gleich bleibt. Die Steigung und damit die ermittelte Mobilität wird damit geringer. Besonders gut sieht man diesen Effekt für die dunkelrote Kurve am Ende der Lagerung in Abbildung (7.23 (b)). Rechnerisch zeigt sich dieser Effekt auch in den Mobilitätskennlinien entsprechend folgender Herleitung:

$$I_{DS,sat} = I_{Kanal} + I_{Bulk} = \frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th})^2 + I_{Bulk} \quad (7.1)$$

$$\Leftrightarrow I_{DS,sat} - I_{Bulk} = \frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th})^2 \quad (7.2)$$

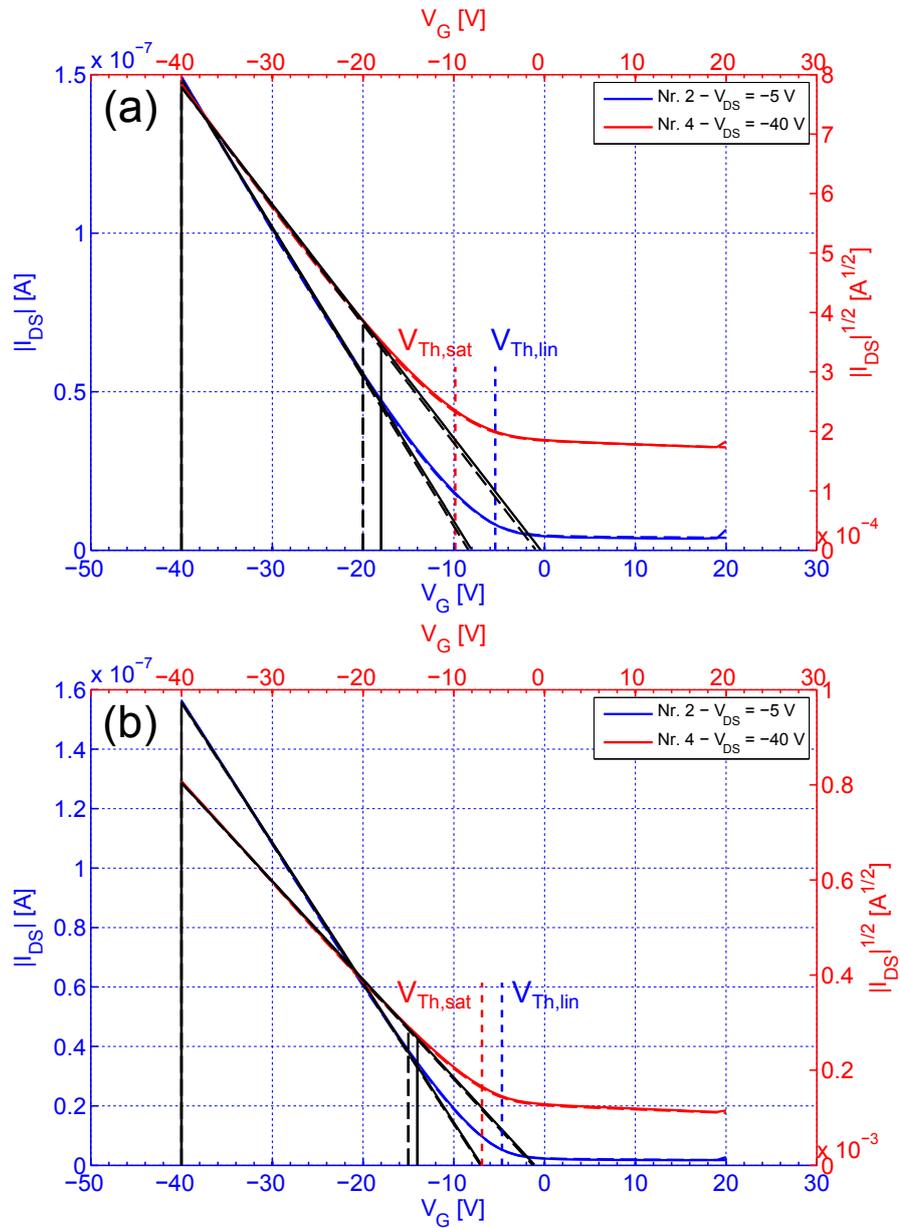
$$\Leftrightarrow \sqrt{I_{DS,sat} - I_{Bulk}} = \sqrt{\frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L}} (V_G - V_{Th}) \quad (7.3)$$

$$\Rightarrow \frac{d\sqrt{I_{DS,sat} - I_{Bulk}}}{dV_G} = \sqrt{\frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L}} \quad (7.4)$$

$$\Leftrightarrow \mu = \frac{2L}{CW} \left( \frac{d\sqrt{I_{DS,sat} - I_{Bulk}}}{dV_G} \right)^2 \quad (7.5)$$

$$(7.6)$$

Der *Bulk*-Strom, bzw. Off-Strom durch das Halbleitervolumen kann also bei der Berechnung der Mobilitätskennlinien im Sättigungsbereich als Korrektur zum gesamten, gemessenen Drain-Source Strom behandelt werden, falls er in dem jeweiligen Fall nicht mehr vernachlässigbar ist. Im linearen Bereich fällt  $I_{Bulk}$  dagegen bei der Ableitung nach  $V_G$  heraus, so dass diese Mobilitätskennlinie generell unbeeinflusst ist vom Bulk- bzw. Off-Strom.

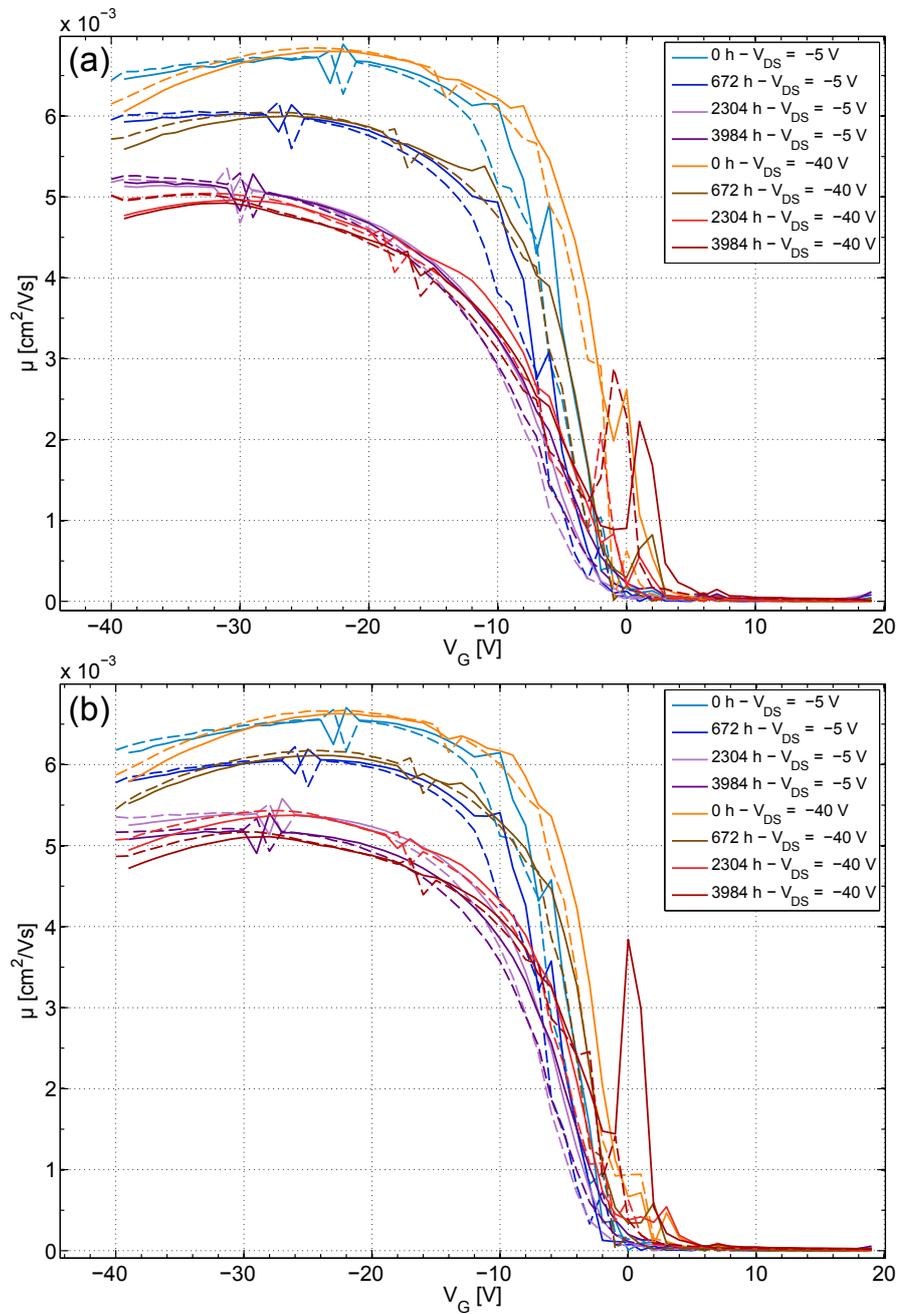


**Abb. 7.24.:** Geradenanpassung zur Ermittlung von Mobilität und Schwellspannung am Ende der Shelf-Life Lagerung bei 3984 h. Teil (a) zeigt den besonders stark, Teil (b) den besonders wenig gealterten OFET aus Abbildung (7.22).

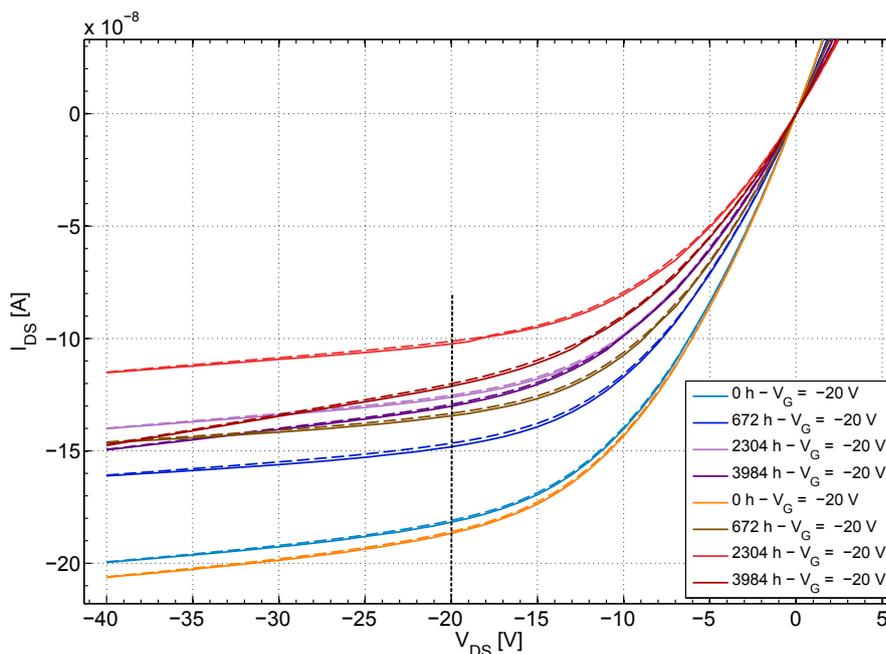
Wenn man diese Korrektur für die beiden OFETs in Abbildung (7.22) berücksichtigt, ergeben sich die in Abbildung (7.25) dargestellten, korrigierten Mobilitätskennlinien. Hier ist das in Abbildung (7.22) beobachtete Auseinanderlaufen der Kennlinien nicht mehr zu erkennen. Entsprechend ist die Abweichung der Mobilität zwischen linearem und Sättigungsbereich tatsächlich vollständig auf den sehr hohen Off-Strom am Ende der *Shelf-Life* Lagerung zurück zu führen. Durch die Korrektur mit  $I_{Bulk}$  unter der Wurzel in Gleichung (7.5) ergibt sich jedoch ein numerisches Problem: In dem Bereich von 0V bis +5V, in dem der Off-Strom für die Kennlinien durch Mittelung der  $I_{DS}$ -Werte ermittelt wird, zeigt sich in Abbildung (7.25) ein lokales Maximum in der Kennlinie. Das liegt daran, dass die  $I_{DS}$  Werte hier sehr nah am Mittelwert liegen, der ja genau aus diesen Werten berechnet wird. Dadurch wird der Term  $\sqrt{I_{DS,sat} - I_{Bulk}}$  in diesem Bereich sehr groß und schwankt stark von einem  $I_{DS}$  Wert zum anderen, je nach Abstand des jeweiligen  $I_{DS}$  Wertes zum gemeinsamen Mittelwert. Dementsprechend ist das lokale Maximum der Mobilitätskennlinien in diesem Bereich ein numerisches Artefakt der Korrektur und sollte hier ignoriert werden. Den realen Verlauf in diesem Bereich zeigt Abbildung (7.22).

Abschließend zeigt Abbildung (7.26) die Ausgangskennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.22) bei  $V_G = -20V$  im direkten Vergleich. Auch hier macht sich der steigende Off-Strom für den Messpunkt bei 3984 h in einem weniger guten Sättigungsverhalten der OFETs bemerkbar. Die Steigung der Ausgangskennlinien für  $V_{DS} \geq V_G$  wird für diesen Messpunkt steiler als bei den vorherigen Kennlinien. Dies liegt daran, dass hier der *Bulk*-Strom durch das Halbleitervolumen so groß wird, dass er das Sättigungsverhalten der OFETs beeinflusst. Während der Strom durch den OFET-Kanal sättigt für  $V_{DS} \geq V_G$ , steigt der *Bulk*-Strom immer weiter an mit steigendem  $V_{DS}$  und führt so zum gemessenen Verlauf von  $I_{DS}$  als Summe aus Kanalstrom und *Bulk*-Strom.

Was man in Abbildung (7.26), wie auch in Abbildung (7.22) nicht sieht, sind die Auswirkungen einer festen Ladung innerhalb der Gate-Kapazität, wie für die Ofenlagerung in Abschnitt (7.2.1) beschrieben. Ein solcher Effekt stellt sich bei der *Shelf-Life* Lagerung nicht ein. Die bei der *Shelf-Life* Lagerung beobachteten Alterungseffekte sind also vorrangig auf den stark steigenden Off-Strom und damit auf die p-Dotierung des PTAA-Halbleiters durch Photooxidation unter dem Einfluss des Umgebungslichts und des umgebenden Sauerstoffs zurückzuführen. Ein zusätzlicher Effekt ist die Verbreiterung des Einschaltbereichs der OFETs und als Folge davon eine leichte Drift der Schwellspannung in den negativen Bereich und ein vergleichsweise geringes Absinken von On-Strom und Mobilität. Da die absoluten Niveaus dieser Werte, entsprechend der Diskussion in Kapitel (7.1), gegen Ende der Alterung sehr ähnlich sind zu den entsprechenden Niveaus bei der Lagerung in der Klimakammer, liegt die Vermutung nahe, dass die Verbreiterung des Einschaltbereichs durch die Einlagerung von Wasser aus der Umgebungsluft hervorgerufen wird.



**Abb. 7.25.:** Mobilitätskennlinien von (a) einem besonders stark und (b) einem besonders wenig gealterten OFET, für den Sättigungsbereich korrigiert mit dem Off-Strom der jeweiligen Transferkennlinie.

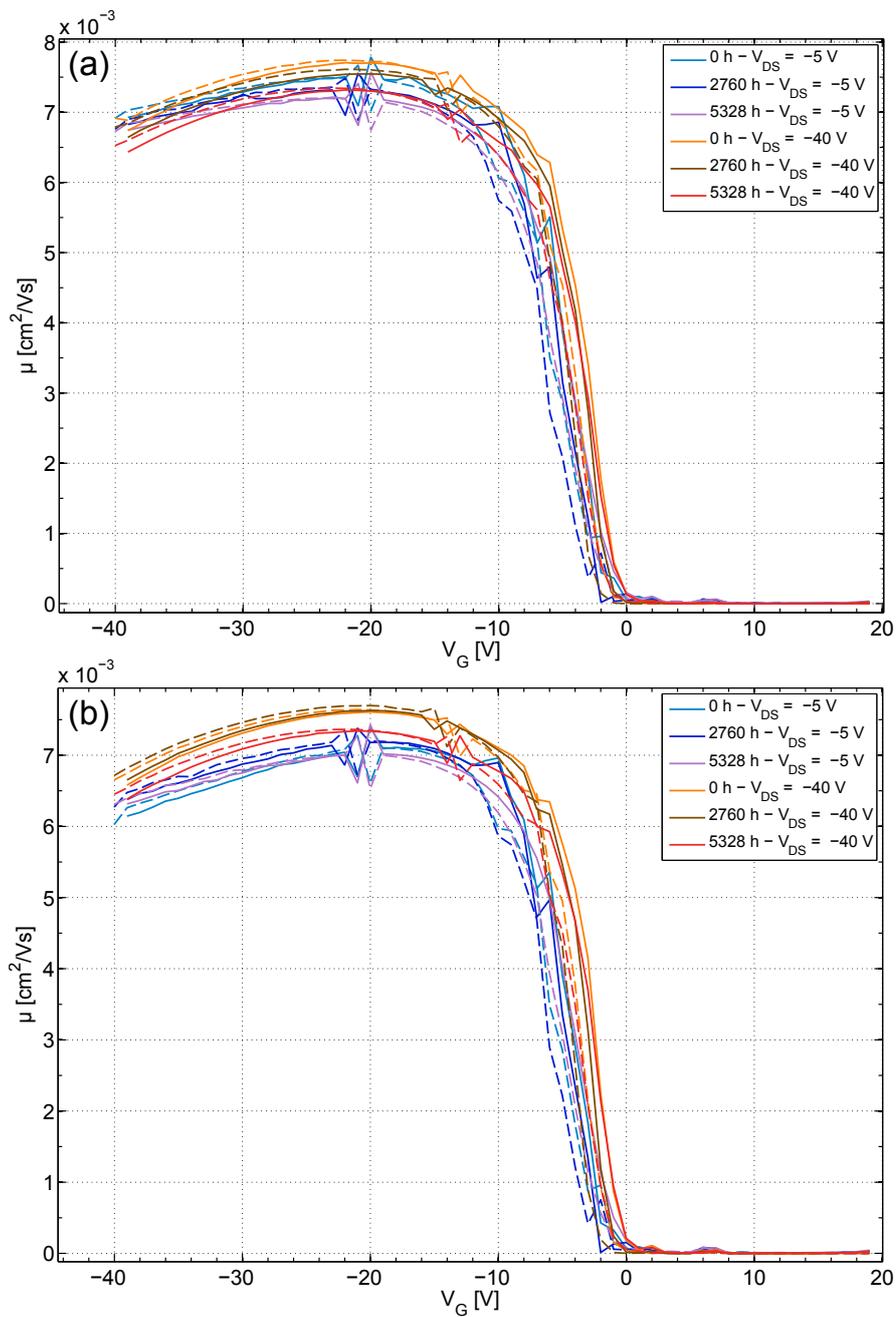


**Abb. 7.26.:** Ausgangskennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.22) Der besonders stark gealterte OFET ist in orange und rot, der besonders schwach gealterte in blau und magenta dargestellt.

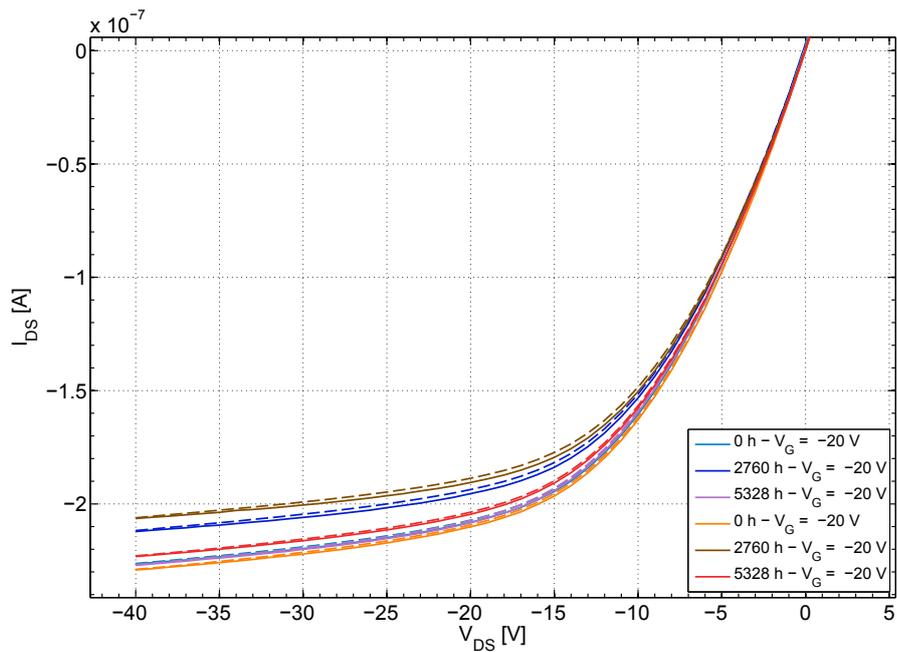
#### 7.2.4. Referenz: Exsikkator mit Trockenmittel

Die Referenzlagerung im Exsikkator mit Trockenmittel dient der Überprüfung des Sauerstoffeinflusses auf die Alterung der OFETs bei Raumtemperatur, ohne dass weitere Umgebungseffekte zur Alterung beitragen. Dazu werden die Proben im Dunkeln gelagert, um den Lichteinfluss auszuschließen und der Exsikkator wird mit Trockenmittel befüllt und luftdicht verschlossen, was zu einer relativen Luftfeuchte von 0% im Inneren führt. Schon die Diskussion der Alterung in Kapitel (7.1) zeigt hier über mehrere tausend Stunden nur sehr geringe Alterungseffekte, so dass die Betrachtung hier nur zur nochmaligen Überprüfung dieser Beobachtung anhand von konkreten Einzelkennlinien dient. Der einzige Parameter, der in der Diskussion der Alterung in Kapitel (7.1) für die Exsikkator Lagerung einen kleinen Effekt zeigt, ist der Off-Strom in Abbildung (7.5). Dementsprechend erfolgt die Auswahl eines stark, bzw. wenig gealterten OFETs hier anhand des Off-Stroms. Analog zu den vorangegangenen Lagerungen zeigt Abbildung (7.27) die Mobilitätskennlinien von zwei dementsprechen ausgewählten OFETs.

Auch bei detaillierte Betrachtung der Mobilitätskennlinien erkennt man hier keinen Effekt durch die Lagerung an Luft mit dem entsprechenden Sauerstoffanteil. Der Messpunkt bei 5328 h entspricht hier einer Lagerung von über einem halben Jahr, was die sehr gute Stabilität



**Abb. 7.27.:** Mobilitätskennlinien von (a) einem besonders stark bezüglich des Off-Stroms und (b) einem besonders wenig gealtertem OFET für die Lagerung im Exsikkator mit Trockenmittel.



**Abb. 7.28.:** Ausgangskennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.27). Der besonders stark gealterte OFET ist in orange und rot, der besonders schwach gealterte in blau und magenta dargestellt.

der hier betrachteten OFETs zeigt. Im Gegensatz zur *Shelf-Life* Lagerung und der Lagerung in der Klimakammer ist hier auch keine Verbreiterung des Einschaltbereichs der OFETs zu erkennen. Der reine Sauerstoffeinfluss in der Exsikkator Lagerung bei Raumtemperatur führt also nicht zu einer Verschlechterung des Einschaltverhaltens.

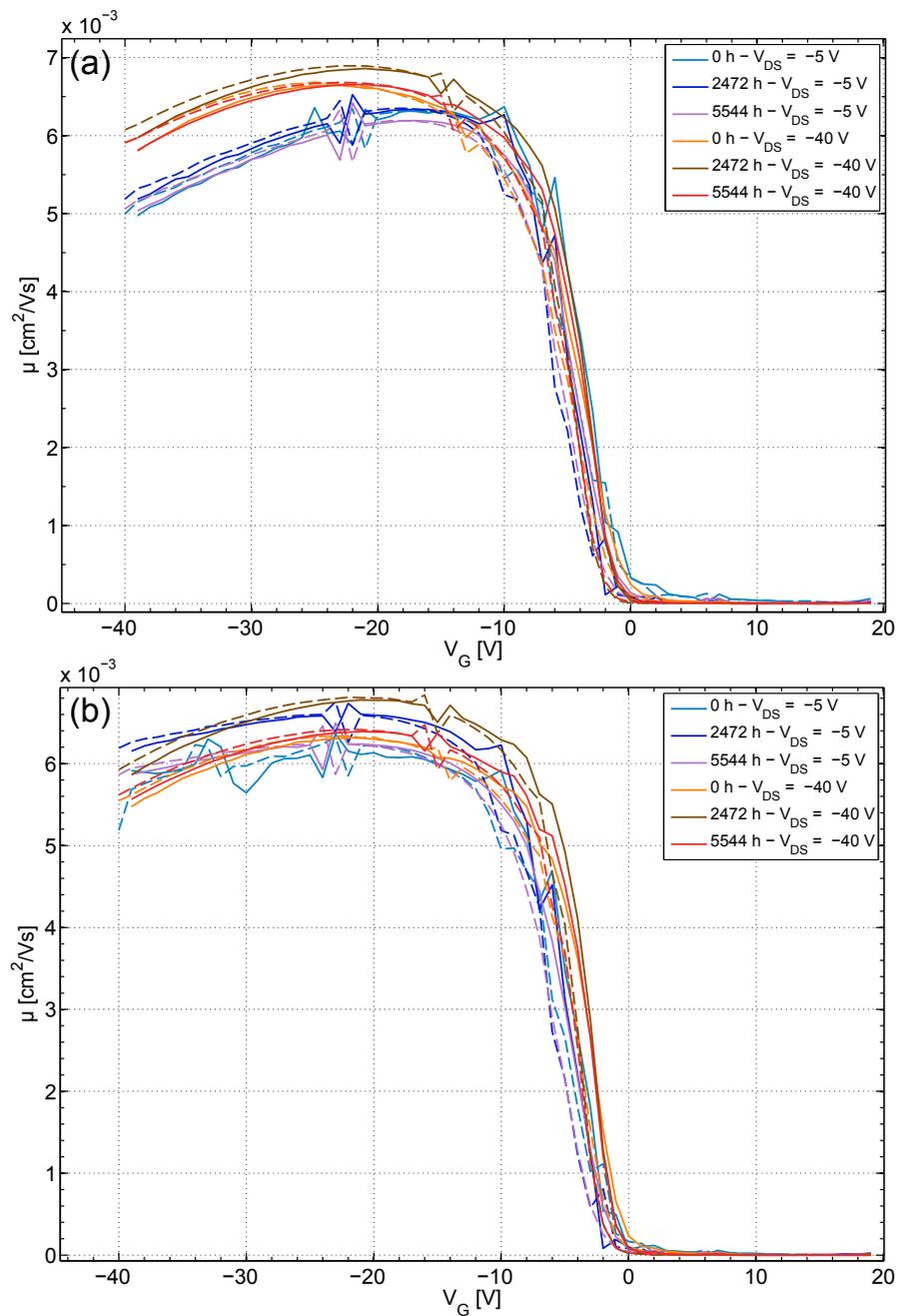
Auch die in Abbildung (7.28) dargestellten Ausgangskennlinien zeigen keinen klaren Trend im Alterungsverlauf. Die beobachteten leichten Schwankungen dürften auf die Streuung zwischen den verschiedenen Messungen zurückzuführen sein.

### 7.2.5. Referenz: Exsikkator mit Argon Atmosphäre

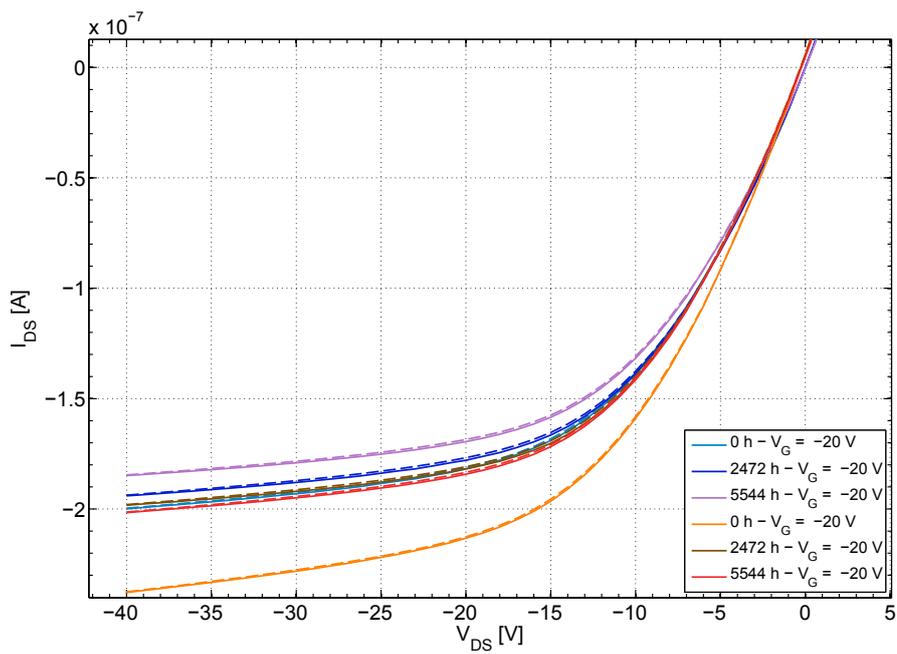
Zum Abschluss zeigen Abbildung (7.29) und (7.30) die Mobilitäts- und Ausgangskennlinie von zwei OFETs aus der Lagerung im Exsikkator mit Argon Atmosphäre. Auch für diesen Fall erfolgt die Auswahl eines stark, bzw. schwach gealterten OFETs über den Off-Strom. Analog zur Exsikkator Lagerung an Luft zeigt sich auch hier keine signifikante Degradation der Kennlinien im Verlauf der Alterung. Was man allerdings in Abbildung (7.29 a) erkennt, ist ein, im Vergleich mit den anderen gezeigten Mobilitätskennlinien, großer Abstand zwischen dem linearen- und Sättigungsbereich des OFETs. Auch dieser Abstand ist über die Alterung stabil und ist wahrscheinlich auf eine Variation in der Fertigung des OFETs zurückzuführen. Eine solche Variation kann zum Beispiel eine lokale Änderung der Dicke oder ein lokaler Defekt in den aufgeschleuderten Schichten <sup>1</sup> sein, welche die im OFET anliegenden elektrischen Felder beeinflusst.

---

<sup>1</sup>Halbleiter und Dielektrikum



**Abb. 7.29.:** Mobilitätskennlinien von (a) einem besonders stark bezüglich des Off-Stroms und (b) einem besonders wenig gealtertem OFET für die Lagerung im Exsikkator mit Argon Atmosphäre.



**Abb. 7.30.:** Ausgangskennlinien der beiden OFETs aus Abbildung (7.29). Der besonders stark gealterte OFET ist in orange und rot, der besonders schwach gealterte in blau und magenta dargestellt.

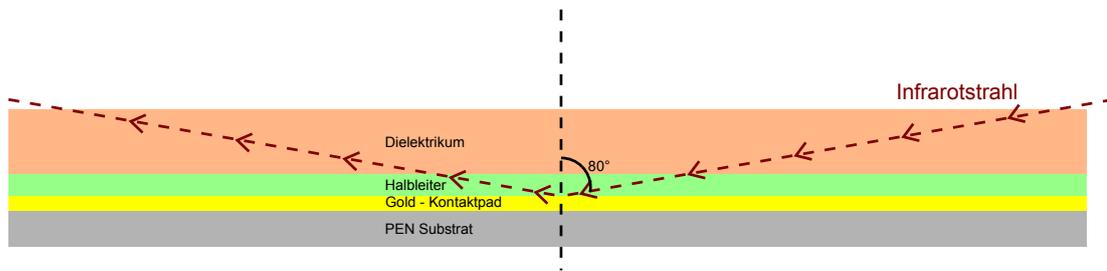


# FT-IR Analyse und Korrelation mit den elektrischen Eigenschaften

Um die Ursachen für das elektrische Verhalten der OFETs im Verlauf der Alterung besser zu verstehen eignet sich eine Analyse der Proben mittels (F)ourier-(T)ransformierter (I)nfrarot-(S)pektroskopie (FT-IR). Dazu werden am Ende der in Kapitel (7) beschriebenen Lagerungen je eine Probe entnommen und mittels eines FT-IR Mikroskops analysiert. Zusätzlich werden auch frisch hergestellte Proben und auch einzelne Schichten des verwendeten Dielektrikums und des Halbleiters analysiert und als Vergleich herangezogen. Für die FT-IR Analyse an den, auch elektrisch vermessenen, OFET Proben auf PEN Folie lässt sich ausnutzen, dass die Source-Drain-Schicht des OFET Schichtstapels aus Gold besteht, welches eine sehr gute Reflektivität im infraroten Bereich des Spektrums besitzt. Mittels eines Infrarotmikroskops<sup>1</sup> lassen sich daher die Kontaktpads in der Source-Drain-Schicht als Infrarotspiegel nutzen, indem der Messfleck des Mikroskops auf einem solchen Pad platziert wird. Weiterhin wird ein Objektiv mit einem streifenden Einfall unter einem Winkel von  $10^\circ$  zur Oberfläche, bzw.  $80^\circ$  zur Senkrechten verwendet, so dass das durchstrahlte Probenvolumen maximiert wird. Das Messprinzip ist schematisch in Abbildung (8.1) dargestellt. Die gemessenen Spektren werden mit dem Spektrum eines Goldpads auf einem leeren, gereinigten PEN Substrat referenziert, um die exakten Reflektionseigenschaften der hier verwendeten Source-Drain-Schicht herausrechnen zu können. Sämtliche Messungen erfolgen dabei an Raumluft, so dass sich auch das Kohlendioxid in der Luft, bzw. die Änderung des Kohlendioxidgehalts bezogen auf die Referenzmessung in den Spektren bemerkbar macht. Aufgrund der veränderlichen Bedingungen im Messraum sind die Absolutwerte der verschiedenen FT-IR Spektren nicht miteinander

---

<sup>1</sup>Bruker Equinox-55-1



**Abb. 8.1.:** Schematische Darstellung der FT-IR Messung auf dem Probenlayout, was auch für die elektrischen OFET Messungen verwendet wird.

vergleichbar. Zur Auswertung werden hier nur die relativen Lagen der Minima in den Transmissionsspektren zueinander, bzw. das Entstehen von neuen Minima herangezogen.

Durch das Aufbringen von Halbleiter und Dielektrikum mittels *Spincoating* wird die Probenoberfläche gleichmäßig mit diesen Materialien beschichtet. Dementsprechend befinden sie sich auch über den Kontaktpads und machen den gesamten Alterungsprozess der jeweiligen Probe mit. Eine Analyse dieser Materialien am Ort eines Kontaktpads zeigt also die selben umgebungsbedingten Alterungsprozesse, die sich auch in den elektrischen Messungen der OFETs auf dieser Probe zeigen. Eine FT-IR Messung einer vollständig aufgebauten OFET-Probe zeigt hier jedoch immer das kombinierte Spektrum von Dielektrikum und Halbleiter, da beide Materialien gleichzeitig durchstrahlt werden. Dabei ist das Dickenverhältnis jedoch ca.  $1\ \mu\text{m}$  für das Dielektrikum und ca.  $100\ \text{nm}$  für den Halbleiter. Um Spektren der einzelnen Schichten messen zu können, wurden daher auch Proben mit nur einer einzelnen aufgeschleuderten Schicht hergestellt. Auf diesen Proben befinden sich dann jedoch keine funktionsfähigen OFETs.

Alle FT-IR Messungen wurden als Auftragsmessungen von der zentralen Analytik der Robert Bosch GmbH durchgeführt.

## 8.1. Diskussion der FT-IR Spektren

Die Diskussion der FT-IR Spektren beginnt mit dem Vergleich der beiden Lagerungen bei  $85^\circ\text{C}$  im Ofen und bei  $85^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$  in der Klimakammer. Hier hat die Auswertung der OFET-Kennlinien in Kapitel (7) den weitaus stärksten Alterungseffekt für die Ofenlagerung gezeigt. Um die Gründe für diesen Unterschied zwischen den beiden Lagerungsbedingungen weiter zu analysieren zeigt Abbildung (8.2) die FT-IR Spektren von zwei Proben am Ende der in Kapitel (7) gezeigten Lagerungsdauer. Zusätzlich zeigt Abbildung (8.2 a) die Spektren einer reinen Halbleiterschicht und einer reinen Dielektrikumsschicht im Nullzustand nach der Herstellung der Schichten. Auch eine vollständig aufgebaute und ungealterte OFET Probe ist in Abbildung (8.2 a) als Referenz für den Nullzustand dargestellt. Abbildung (8.2 b) und (8.2 c)

zeigen jeweils 3 Spektren von der selben Probe.

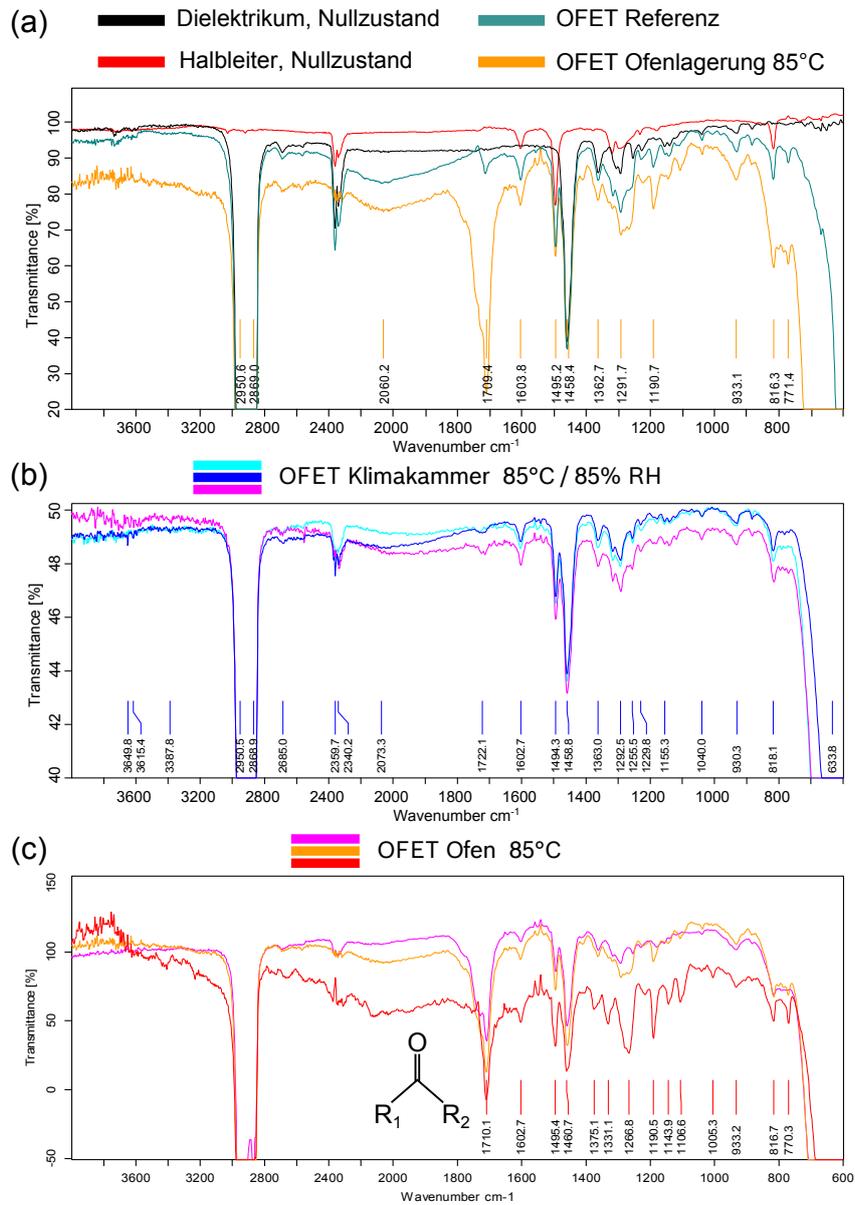
Den deutlichsten Unterschied zwischen den beiden Alterungen erkennt man für den Bereich um  $1710\text{ cm}^{-1}$ . Hier entwickelt sich in der Ofenlagerung eine starke Absorption, welche auf das Entstehen von Carbonylgruppen zurückgeführt wird und bei der Lagerung in der Klimakammer wesentlich weniger stark ausgeprägt ist. Eine solche Carbonylgruppe ist in Abbildung (8.2 c) dargestellt. Ausgehend von der sehr breiten Absorption handelt es sich hier wahrscheinlich um eine ganze Reihe unterschiedlicher Reaktionsprodukte mit entsprechend unterschiedlichen Substituenten R1 und R2. Eine generelle Eigenschaft der Carbonylgruppe ist jedoch ihre Polarität aufgrund eines effektiven Elektronenmangels am Kohlenstoff- und eines Elektronenüberschusses am Sauerstoffatom [48]. Aus elektrischer Sicht stellen diese Carbonylgruppen also einen Dipol dar.

Um die Frage zu beantworten, in welcher Schicht des OFET Schichtstapels diese Carbonylgruppen entstehen, zeigt Abbildung (8.3) die Spektren von entsprechend hergestellten Proben mit jeweils nur der Halbleiterschicht. Diese Proben wurden vor der Analyse jeweils 4 Wochen (672 h) im Ofen bei  $85^\circ\text{C}$ , bzw. in der Klimakammer bei  $85^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$  gelagert, so dass sich, ausgehend von den in Kapitel (7) beschriebenen elektrischen Eigenschaften während der Alterung, schon erste Alterungseffekte bemerkbar machen müssten. Die FT-IR Spektren in Abbildung (8.3) zeigen jedoch im Bereich von  $1600\text{ cm}^{-1}$  bis  $1800\text{ cm}^{-1}$  kaum einen Unterschied zwischen dem Nullzustand und den unterschiedlich gelagerten Proben. Eine Vergrößerung dieses Bereichs des Spektrums zeigt einen kleinen Effekt für die bei  $85^\circ\text{C}$  gelagerte Probe bei etwa  $1720\text{ cm}^{-1}$ . Das Signal liegt hier jedoch nur knapp oberhalb des Grundrauschens im Spektrum, so dass hier nicht ausgeschlossen werden kann, dass es sich um ein Artefakt in der Messung handelt. Es lässt sich jedoch generell feststellen, dass die reine Halbleiterschicht bei der Lagerung im Ofen oder in der Klimakammer sehr wenig altert.

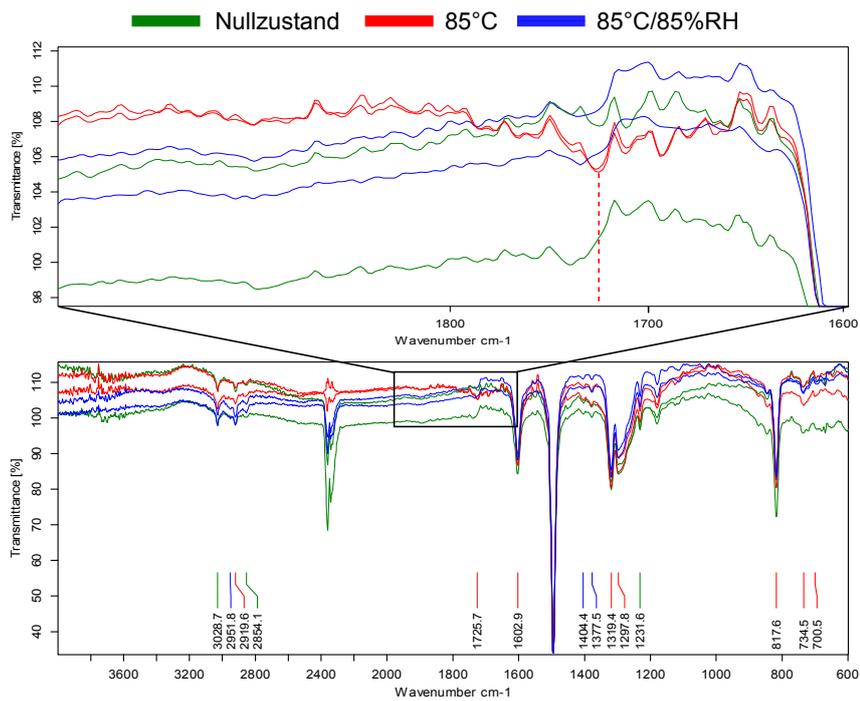
Zum Vergleich zeigt Abbildung (8.4) die FT-IR Spektren des reinen Dielektrikums für eine frische hergestellte Probe und für eine für 960h bei  $85^\circ\text{C}$  im Ofen gelagerte Probe. Bei der gealterten Probe handelt es sich um die selbe Probe, die auch im Rahmen der Kapazitätsmessung in Abschnitt (7.2.1.3) analysiert wurde. Hier erkennt man deutlich das Entstehen einer zusätzlichen Absorption durch die Ofenlagerung bei ca.  $1700\text{ cm}^{-1}$ . Dies ist der selbe Bereich wie in Abbildung (8.2) für den gesamten Lagenaufbau des OFETs. Die Schlussfolgerung ist, dass die anhand von Abbildung (8.2) diskutierten Carbonylgruppen während der Ofenlagerung im Dielektrikum und nicht im Halbleiter entstehen.

Abschließend zeigt Abbildung (8.5) die FT-IR Spektren von je einer Probe der *Shelf-Life*, bzw. Exsikkator Lagerung nach dem Ende der in Kapitel (7.1) gezeigten Lagerdauer. In diesen Spektren ist keine Absorptionsbande im Bereich von  $1600\text{ cm}^{-1}$  bis  $1800\text{ cm}^{-1}$  zu erkennen. Unter diesen Lagerungsbedingungen entstehen also folglich keine Carbonylgruppen, wie sie die Ofenlagerung zeigt.

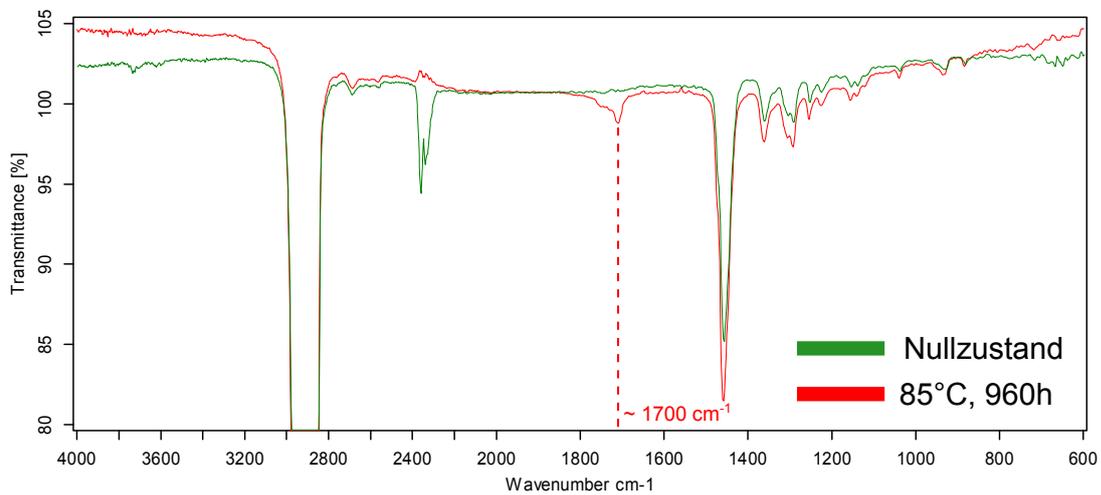
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die FT-IR Analyse für die Ofenlagerung sehr deutlich



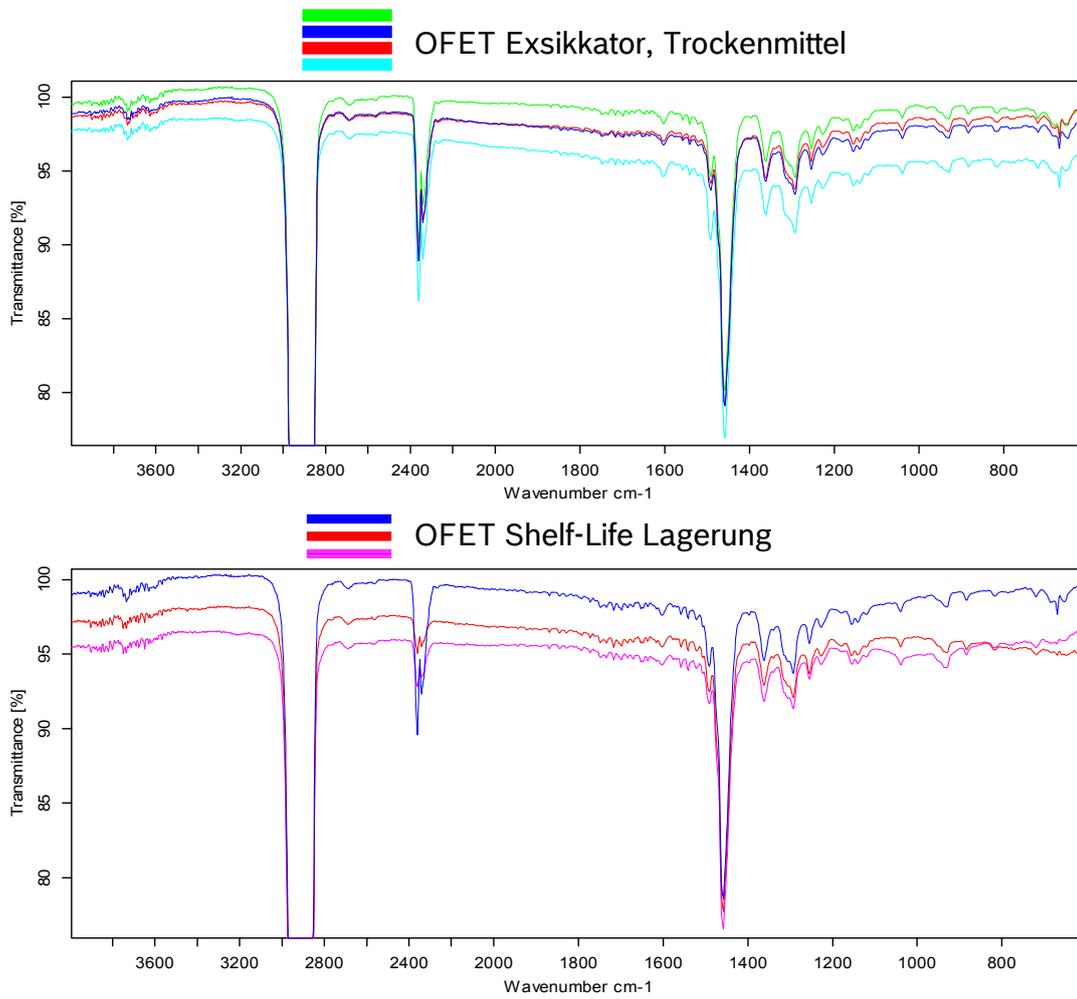
**Abb. 8.2.:** FT-IR Spektren von (a) einzelnen Schichten aus Halbleiter und Dielektrikum im Vergleich mit einer OFET Referenz und einer im Ofen gelagerten OFET Probe, (b) einer in der Klimakammer gelagerten OFET Probe und (c) einer im Ofen gelagerten OFET Probe.



**Abb. 8.3.:** FT-IR Spektren der Halbleiterschicht für 4 Wochen in der Klimakammer, bzw. im Ofen gelagerte Proben im Vergleich zur nicht gealterten Referenzprobe.



**Abb. 8.4.:** FT-IR Messungen des reinen Dielektrikums im Nullzustand und nach 960h bei 85°C.



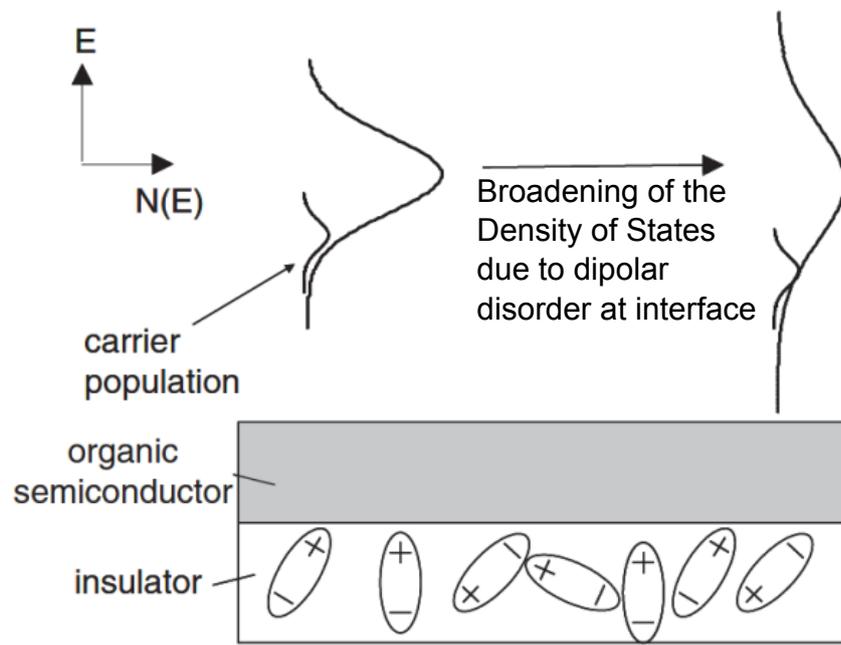
**Abb. 8.5.:** FT-IR Spektren von je einer Probe aus der Shelf-Life, bzw. Exsikkator Lagerung, aufgenommen nach dem Ende der in Kapitel (7.1) gezeigten Lagerdauer.

die Entwicklung von verschiedenen Carbonylgruppen zeigt. Diese entstehen in der Dielektrikumsschicht des OFET Schichtstapels. Für die anderen untersuchten Lagerungsbedingungen zeigen sich im FT-IR Spektrum keine Alterungseffekte. Diese Beobachtung korreliert mit der sehr starken Alterung der OFETs bei der Ofenlagerung in den elektrischen Messungen, wie sie in Kapitel (7) diskutiert wird. Dieser Zusammenhang wird im Folgenden im Detail diskutiert und ein Wirkzusammenhang zwischen den Beobachtungen erläutert.

## 8.2. Korrelation zwischen FT-IR Spektren und elektrischen Messungen

Die elektrischen Messungen in Kapitel (7) zeigen für die Ofenlagerung bei 85 °C die stärksten Alterungseffekte. Dies ist bedingt durch die größte Verbreiterung des Einschaltbereichs der OFETs im Vergleich mit den anderen Lagerungsbedingungen und zusätzlich durch das Entstehen einer festen Ladung innerhalb der Gate-Kapazität, welche vor allem für die starke Drift der Schwellspannung in den negativen Bereich verantwortlich ist. Diese feste Ladung wird ausschließlich für die Lagerung im Ofen bei 85 °C beobachtet. Die FT-IR Messungen zeigen andererseits für diese Ofenlagerungen sehr deutlich das Entstehen von Carbonylgruppen im Dielektrikum, während dieser Effekt für alle anderen Lagerungsbedingungen wesentlich kleiner oder gar nicht vorhanden ist. Ausgehend von diesen Beobachtungen liegt die Vermutung nahe, dass das Entstehen der Carbonylgruppen einen direkten Einfluss auf das elektrische Verhalten der OFETs hat und für die starken Alterungseffekte bei der Ofenlagerung verantwortlich ist. Einen Erklärungsansatz bietet hier die Polarität der Carbonylgruppen. Da auch das verwendete polymere Dielektrikum eine amorphe Struktur hat, ist anzunehmen, dass die sich bildenden Carbonylgruppen zufällig im Volumen der Dielektrikumsschicht orientiert sind. Aus elektrischer Sicht handelt es sich also um zufällig verteilte Dipole, deren Ladungsverteilung sich bei einer Integration über das Dielektrikumsvolumen gerade herausmittelt, so dass sich kein resultierendes elektrisches Feld ergibt. Der Vergleich mit der Kapazitätsmessung des reinen Dielektrikums in Abschnitt (7.2.1.3) zeigt, dass diese Dipole auch durch von außen angelegte Felder nicht in eine Vorzugsrichtung gebracht werden können. Ansonsten müsste sich die Dielektrizitätskonstante und damit die gemessene Kapazität während der Ofenlagerung verändern [49].

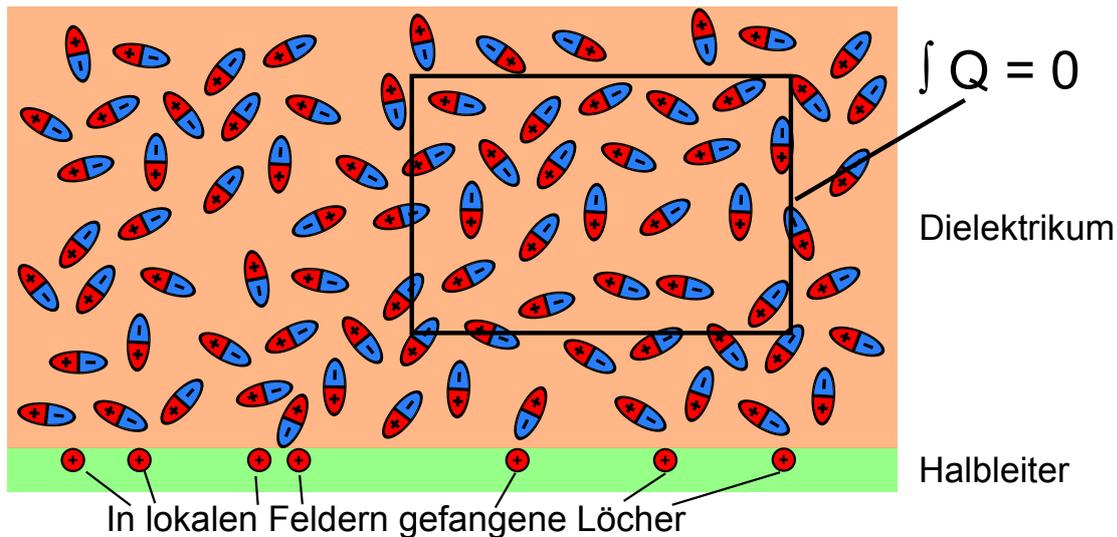
Bei der Betrachtung der Grenzfläche von Halbleiter und Dielektrikum hat das Entstehen von Carbonylgruppen in der Dielektrikumsschicht jedoch deutliche Auswirkungen auf die lokale Ladungsverteilung in der angrenzenden Halbleiterschicht. An dieser Grenzfläche existieren im Dielektrikum polare Carbonylgruppen, die im Halbleiter keinen Partner haben um ihre Ladung zu kompensieren. Gleichzeitig sind die Ladungsträger in einem amorphen organischen Halbleiter wie PTAA stark lokalisiert im Vergleich zu einem Bandtransport wie



**Abb. 8.6.:** Auswirkung von polaren Dielektrika auf die energetische Zustandsdichte in einem PTAA-Halbleiter. Darstellung entnommen aus [3].

zum Beispiel in anorganischen Halbleitern. Der Ladungsträgertransport erfolgt daher mittels hopping zwischen diesen lokalisierten Zuständen in einem äußeren elektrischen Feld [39]. Zu den verschiedenen Transportmodellen in organischen Halbleitern siehe auch Kapitel 3 in Referenz [12].

Den Effekt einer solchen Situation haben Veres et al. für polare Dielektrika in Kombination mit einem PTAA-basierten Halbleiter untersucht [3]. Sie finden eine verringerte Mobilität im OFET-Kanal beim Einsatz von polaren Dielektrika durch eine Verbreiterung der Zustandsdichte für die Ladungsträger im Kanal. Die Erklärung dafür ist, dass durch die verbreiterte Zustandsdichte auch Ladungsträgerfallen im PTAA besetzt werden können, die ohne polares Dielektrikum nicht erreichbar wären. Dieser Zusammenhang ist anschaulich in Abbildung (8.6) dargestellt. Eine Erklärung für die bei der Ofenlagerung beobachtete feste Ladung in der Gate-Kapazität ist in diesem Rahmen die Besetzung von sehr tiefen Ladungsträgerfallen im OFET-Kanal in der direkten Nähe eines Dipols. Wenn eine solche Ladungsträgerfalle tief genug ist, kann sie während der elektrischen Messungen des OFETs nicht mehr entleert werden und wirkt damit effektiv als eine feste Ladung. Anschaulich betrachtet bedeutet dies, dass das lokale Dipolfeld, welches ein Loch an der Grenze zum Dielektrikum spürt, stärker ist als das Feld zwischen Source und Drain, so dass es sich nicht im Kanal von Source zu Drain bewegt, sondern an der Grenzfläche lokalisiert ist. Da in einem p-Typ Halbleiter wie PTAA



**Abb. 8.7.:** Schematische Darstellung zur Wirkung von polaren Carbonylgruppen in Dielektrikumsschicht auf die Halbleiterschicht.

nur die Löcher beweglich sind, kann sich an der Grenzfläche nur eine positive, feste Ladung ausbilden. Diese positive Ladung sollte dementsprechend für die in Kapitel (7) beobachteten Alterungseffekte während der Ofenlagerung verantwortlich sein.

Folgt man dieser Argumentation entsteht die in den elektrischen Messungen in Kapitel (7.2.1) beobachtete, immobile Ladung also an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum. An dieser Grenzfläche haben die polaren Carbonylgruppen in der Dielektrikumsschicht keine weiteren Dipole in der Halbleiterschicht als Partner, so dass dort die lokalen elektrischen Felder der Dipole auf den Halbleiter wirken können. Dieser Punkt ist auch noch einmal in Abbildung (8.7) dargestellt. Die Entstehung dieser festen Ladung wäre dementsprechend die Konsequenz eines kombinierten Effekts zwischen der Entstehung von polaren Carbonylgruppen in der Dielektrikumsschicht des OFETs, der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum und dem Hopping-Typ-Ladungstransport in PTAA, welcher eine Lokalisierung der Ladung zulässt. In einem Metall in Kontakt mit dem gealterten Dielektrikum würde der hier beobachtete Effekt nicht auftreten, da die frei beweglichen Elektronen im Metall jegliche lokale Ladungsverteilung im Dielektrikum an der Grenzfläche zum Metall sofort ausgleichen würden. An der Grenzfläche zwischen Gate und Dielektrikum ist deshalb kein Effekt der Carbonylgruppen zu erwarten.



## Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit konnte durch die automatisierte Messung und Auswertung einer Vielzahl von Proben ein Überblick über das Alterungsverhalten von PTAA-basierten OFETs mit einem polymeren Dielektrikum auf einem flexiblen PEN Substrat gegeben werden. Diese Art von OFET-Aufbau ist potentiell kompatibel mit einem Rolle zu Rolle Druckprozess wie in [1] oder [26] beschrieben, was eine kostengünstige Produktion ermöglichen würde. Die untersuchten OFETs haben sich als äußerst robust erwiesen und überstehen sogar über 1000h in einer Klimakammer bei 85°C/85%RH mit nur einer geringen Degradation der elektrischen Parameter. Dies ist im Vergleich mit anderen organischen Halbleitern wie Pentacen [45], [9] oder P3HT [8], [7], für die noch an der Stabilität gegenüber Sauerstoff, bzw. Wasser in Form von Luftfeuchte an sich gearbeitet wird, ein sehr guter Wert. Im Folgenden sollen noch einmal die Erkenntnisse zum elektrischen Verhalten im Nullzustand und zu den Alterungsprozessen der OFETs zusammengefasst werden. Weiterhin werden mögliche weitere Untersuchungsmethoden und Möglichkeiten zur Weiterentwicklung von Dielektrikum und Halbleiter diskutiert.

### 9.1. Nullzustand

Die Reproduzierbarkeit der elektrischen Parameter nach der Herstellung wurde an insgesamt 28 Proben mit jeweils 61 vermessenen OFETs untersucht und quantitativ ausgewertet. Im Vergleich mit den in [1] vorgestellten Ergebnissen kann hier noch eine etwas bessere Reproduzierbarkeit der elektrischen Parameter erzielt werden. Dabei ist vor allem das Verhalten der OFETs im eingeschalteten Zustand, also explizit On-Strom und Mobilität besonders gut reproduzierbar. Der Off-Strom dagegen kann durchaus über eine Größenordnung hinweg streuen, so dass auch das On/Off-Verhältnis vor allem bedingt durch den Off-Strom streut.

Die Untersuchungen in Kapitel (6) haben außerdem ergeben, dass sich die hier diskutierten OFETs sehr gut durch das vereinfachte Transistormodell aus Kapitel (3) beschreiben lässt, wie es auch zur Modellierung von Silizium MOSFETs verwendet wird. Einzig der *Bulk*-Strom außerhalb des OFET-Kanals, entsprechend dem Off-Strom in den Transferkennlinien, muss explizit berücksichtigt werden, um die Schwellspannung im Sättigungsbereich korrekt berechnen zu können. Damit lässt sich das Verhalten der OFETs durch folgende Formeln für den linearen-, bzw. Sättigungsbereich beschreiben:

$$I_{DS,lin} = I_{Kanal} + I_{Bulk} = \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} + I_{Bulk} \quad (9.1)$$

$$I_{DS,sat} = I_{Kanal} + I_{Bulk} = \frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L} (V_G - V_{Th})^2 + I_{Bulk} \quad (9.2)$$

Entsprechend dieser Betrachtung hat sich die Restleitfähigkeit des verwendeten Halbleitermaterials als Schwachpunkt herausgestellt. Der daraus resultierende Bulk- bzw. Off-Strom ist so hoch, dass er im Vergleich zum Kanalstrom nicht mehr vernachlässigt werden kann und außerdem zu einem relativ schlechten On/Off-Verhältnis von maximal 3 Größenordnungen führt. Diese Restleitfähigkeit lässt sich durch das Ausheizen der OFETs bei 85 °C in Argon Atmosphäre, wie in Kapitel (7.2.1.4) vorgestellt, massiv senken. Die im Nullzustand beobachtete Restleitfähigkeit ist also vermutlich auf eine Dotierung des Halbleitermaterials mit atmosphärischem Sauerstoff schon bei der Herstellung entweder des Materials selbst, oder der OFETs zurückzuführen. Eine geringere Anfälligkeit gegenüber einer solchen Dotierung könnte also zu wesentlich besseren elektrischen Eigenschaften hinsichtlich des On/Off-Verhältnisses schon im Nullzustand führen. Alternativ ist eine solche geringere Anfälligkeit auch durch eine geringere Schichtdicke des Halbleiters im OFET-Aufbau zu erreichen, so dass der Querschnitt für parallel zum Kanal fließende Ströme verringert wird.

Eine weitere Abweichung vom idealisierten OFET-Verhalten der Gleichungen (9.1) und (9.2) ist der Einfluss von Streuströmen außerhalb des gewünschten Kanals. Diese Streuströme führen für OFETs mit einem  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis kleiner 100 zu einer Überschätzung der aus den Transferkennlinien berechneten Mobilität. Dies liegt vor allem an der sehr großen Fläche des Gates, welches auch schon zwischen den Zuleitungen zwischen den eigentlichen OFET Strukturen einen Kanal erzeugt und so zu zusätzlichen Strömen zwischen Source und Drain führt. Diese Ströme sind höher, als für das berechnete  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis erwartet und führen deshalb bei der Berechnung der Mobilität zu einem höheren Wert. Verhindern ließe sich dieser Effekt durch ein kleineres, besser strukturiertes Gate, welches nur den gewünschten OFET-Kanal bedeckt, oder durch einen genauer strukturierten Halbleiter, welcher nur den gewünschten OFET-Kanal ausfüllt. Beides ist jedoch mit den Mitteln des Massendrucks, wie Flexodruck oder Gravurdruck nur schwer zu erreichen, siehe dazu auch die Fotos von gedruckten Ringoszillatoren in [1] und [26], welche das Gate als durchgehenden Balken oder als Fläche zeigen, die wie in dieser Arbeit die Komplette OFET Struktur bedeckt. Der einfachste Weg dürfte

daher sein, grundsätzlich ein  $\frac{W}{L}$ -Verhältnis von 100 oder größer für die verwendeten OFETs vorzusehen, so dass etwaige Streuströme vernachlässigt werden können.

Die sehr gute Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum zeigt sich im Nullzustand durch die geringen Schwellspannungen und den sehr steilen Anstieg der Mobilitätskennlinien. Es existieren dementsprechend nur sehr wenige Ladungsträgerfallen an der Grenzfläche des OFET-Kanals und fast die gesamte, durch die Gate-Spannung im Kanal akkumulierte Ladung ist mobil zwischen Source und Drain. Halbleiter und Dielektrikum sind also gut aufeinander abgestimmt und auch das *Spincoating* der Schichten übereinander mittels orthogonaler Lösemittel funktioniert sehr gut und reproduzierbar.

Was die Gate-Leckströme angeht, ist das Dielektrikum prinzipiell in der Lage die Leckströme auf unter 1 nA zu begrenzen. Allerdings zeigen viele OFETs einen höheren Leckstrom und die Verteilung dieser höheren Leckströme über alle gemessenen OFETs ist eine sehr breite Log-Normalverteilung. Aufgrund dieser Verteilung ist hier nicht von einem systematischen Problem, sondern von vielen zufälligen, überlagerten Prozessen auszugehen. Dabei handelt es sich vermutlich um Staubteilchen oder nicht vollständig gelöste Reste des Dielektrikums, welche lokal zu Inhomogenitäten in der Schicht führen und somit Pfade für einen höheren Leckstrom eröffnen.

## 9.2. Alterung

Bei der Alterung haben sich zwei Effekte als hauptsächliche Einflussfaktoren herausgestellt: Einerseits zeigt sich die Anfälligkeit des Halbleiters auf Dotierung durch atmosphärischen Sauerstoff auch während der Alterung. So steigt bei allen Lagerungen in einer Sauerstoffatmosphäre irgendwann der Off-Strom an. Ein starker Einflussfaktor ist hier die Temperatur, so dass bei 85°C ein sehr schneller Anstieg des Off-Stroms zu beobachten ist. Ein weitere Einflussfaktor ist die Lichteinstrahlung in der *Shelf-Life* Lagerung, welche hier zu den höchsten gemessenen Off-Strömen führt, allerdings mit einem wesentlich länger dauernden Anstieg als bei 85°C im abgedunkelten Ofen. Als Konsequenz aus den hohen Off-Strömen ergibt sich das erwartete Absinken des On/Off-Verhältnisses, aber auch eine Verschiebung der Schwellspannung in den negativen Bereich und ein Absinken der aus den Kennlinien extrahierten Mobilität im Sättigungsbereich. Diese beiden Effekte würde man zunächst nicht erwarten, sie ergeben sich jedoch auch rechnerisch als Folge der Addition des *Bulk*-Stroms in den Gleichungen (9.1) und (9.2). Die Lagerung unter Argon Atmosphäre bei 85°C zeigt, dass dieser Effekt reversibel ist, der Sauerstoff also auch wieder aus der Halbleiterschicht entweichen kann.

Die Lagerung in der Klimakammer bei 85°C/85%RH zeigt im Vergleich mit der Lagerung bei 85°C und trockener Atmosphäre einen weitaus geringeren Anstieg des Off-Stroms, was nicht eindeutig erklärt werden kann. Eine Vermutung wäre, dass sich die Sauerstoffpermeabilität

der polymeren Schichten im OFET-Schichtstapel durch die Einlagerung von Wasser und die sehr hohe Luftfeuchtigkeit von 85% in der Klimakammer verringert und dadurch weniger Sauerstoff in der Halbleiterschicht zur Verfügung steht.

Der zweite große Alterungseffekt zeigt sich ausschließlich in der Ofenlagerung bei 85 °C und ist auf eine Degradation des Dielektrikums zurückzuführen. Diese Degradation konnte mittels FT-IR Messungen festgestellt und auf die Bildung von polaren Carbonylgruppen eingeschränkt werden. In einem kombinierten Effekt mit dem Halbleiter führen diese polaren Gruppen zu einer Lokalisation von freien Löchern an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum und damit zu einer festen Ladung innerhalb der Gate-Kapazität. Dies führt in der Folge zu einer starken Verschiebung der Schwellspannung in den negativen Bereich und zur Ausbildung einer Raumladungszone im Halbleiter, welche den initialen Anstieg des Off-Stroms im weiteren Verlauf der Alterung abbremst und schließlich umkehrt. Eine solche Degradation des Dielektrikums wird in den FT-IR Spektren für die Lagerung in der Klimakammer bei 85 °C/85%RH Atmosphäre nur in viel geringerem Ausmaß beobachtet. Auch die elektrischen Parameter zeigen keine so starke Verschiebung der Schwellspannung in den negativen Bereich wie für die Ofenlagerung. Die zusätzliche Luftfeuchte verhindert hier also die Degradation, wobei die genaue Wirkungsweise hier nicht geklärt werden kann. Was weiterhin auffällt ist die Ähnlichkeit des Alterungsverhaltens von Mobilität, On-Strom und Schwellspannung im linearen Bereich zwischen der *Shelf-Life* Lagerung und der Lagerung bei 85 °C/85%RH in den Abbildungen (7.2), (7.1) und (7.7). Bei beiden Lagerungsbedingungen zeigt sich eine geringe Degradation von Mobilität und On-Strom und ein leichter Drift der Schwellspannung in den negativen Bereich. Dies ist ganz im Gegensatz zur Lagerung im Exsikkator mit Trockenmittel, welche praktisch gar keine Alterung zeigt. Dies deutet auf einen Einfluss der Luftfeuchte auf das Alterungsverhalten hin, welcher bereits für Pentacen in [45] und P3HT in [7] und [8] diskutiert wurde und auf das hohe Dipolmoment von Wassermolekülen zurückgeführt wird. Der Einfluss von polaren Gruppen auf die lokale Zustandsdichte im PTAA-Halbleiter wurde in dieser Arbeit bereits für den Einfluss der Carbonylgruppen im Dielektrikum diskutiert und gilt so im Prinzip auch für alle anderen Dipole im Halbleitervolumen. Die Alterung von  $I_{On}$ ,  $\mu$  und  $V_{Th}$  ist in diesem Zusammenhang also durch eingelagertes Wasser in den OFET Schichten zu erklären, welches die Zustandsdichte des Halbleiters im Kanal verbreitert und damit eine größere Zahl von Fallenzuständen energetisch erreichbar macht. Dies verringert die Mobilität der Ladungsträger im Kanal, senkt damit den On-Strom und es verschiebt die Schwellspannung in den negativen Bereich, da eine größere Anzahl von tiefen Ladungsträgerfallen besetzt werden muss, bevor die ersten Ladungsträger im Kanal mobil sind zwischen Source und Drain.

Der sehr ähnliche Verlauf dieser Parameter für die *Shelf-Life* und 85 °C/85%RH Lagerung zeigt, dass dieser Effekt für die hier betrachteten Bedingungen nicht mehr von der relativen Luftfeuchte bestimmt wird. Weiterhin gehen  $I_{On}$ ,  $\mu$  und  $V_{Th, Lin}$  gegen Ende der beiden Lage-

rungen in eine Sättigung. Dies deutet darauf hin, dass hier die maximale Wasseraufnahme im OFET erreicht ist.

### 9.3. Ausblick

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf den elektrischen Messungen und der Auswertung der daraus ermittelten OFET-Parameter. Die Analytischen Untersuchungen der OFET Schichten mittels FT-IR Spektroskopie nehmen hier nur einen kleinen Teil ein, tragen jedoch maßgeblich zum Verständnis der in den elektrischen Messungen beobachteten Effekte bei. An diesem Punkt kann man dementsprechend ansetzen, um mittels einer umfassenden Analyse die beobachteten Alterungsprozesse auch quantitativ besser zu verstehen. Geeignete Methoden sind hier einerseits die FT-IR Spektroskopie, die durch den gezielten Aufbau von Proben für diese Analyse und die Messung ohne störende Raumatmosphäre die chemische Struktur der einzelnen Schichten und entsprechend die Degradationsprozesse über die Alterung hinweg noch besser auflösen könnte. Konkret sollten spezielle FT-IR Proben eine möglichst perfekte Goldschicht als Infrarotspiegel auf einem festen Substrat als Untergrund haben, um darauf dickere organische Schichten aufzutragen, die ein entsprechend größeres Signal in den infraroten Reflektionsspektren erzeugen. Durch einen entsprechenden Probenaufbau ließen sich sogar OFETs im elektrischen Betrieb mittels FT-IR untersuchen [50].

Komplementär dazu eignen sich Ellipsometrie, UV-Vis Absorptionsspektren und XPS/UPS Messungen um die tatsächliche elektronische Zustandsdichte im HOMO und LUMO der Halbleiterschicht zu vermessen. Damit ließe sich die in Kapitel (7) und (8) diskutierte Verbreiterung der Zustandsdichte als Ursache für die beobachtete Degradation der Mobilität direkt nachweisen, quantifizieren und mit den hier vorgestellten elektrischen Messungen korrelieren.

Ein dritter Weg kann die Simulation des OFET-Kanalstroms mittels eines entsprechenden Modells, wie zum Beispiel dem Variable Range Hopping (VRH) Modell sein. Damit ließe sich die Wirkungsweise der analytisch quantifizierten Alterungseffekte am Modell verstehen und mit den tatsächlichen elektrischen Messungen vergleichen. Alle drei Methoden zusammen würden entsprechend ein komplettes Bild des Alterungsverhaltens ergeben und könnten so zu einem grundlegenden Verständnis dieses Verhaltens führen.



---

# Literaturverzeichnis

- [1] JEAN-MARIE VERILHAC, MOHAMED BENWADIH, ANNE-LAURE SEILER, STEPHANIE JACOB, CECILE BORY, JACQUELINE BABLET, MARIE HEITZMAN, JAMAL TALLAL, LUCIAN BARBUT and PHILIPPE FRÈRE. Step toward robust and reliable amorphous polymer field-effect transistors and logic functions made by the use of roll to roll compatible printing processes. *Organic Electronics*, **11**, 3, 456–462 (2010). ISSN 15661199. DOI:10.1016/j.orgel.2009.11.027. 3, 9, 10, 46, 47, 52, 71, 76, 77, 78, 79, 161, 162
- [2] PETER STALLINGA. *Electrical characterization of organic electronic materials and devices*. Wiley, Chichester, reprinted edition (2010). ISBN 9780470750094. 3, 4, 21, 22, 25, 27, 59, 63, 64, 80, 83, 88, 93, 117, 130
- [3] J. VERES, S.D OGIER, S.W LEEING, D.C CUPERTINO and S. MOHIALDIN KHAFFAF. Low-k insulators as the choice of dielectrics in organic field-effect transistors. *Advanced Functional Materials*, **13**, 3, 199–204 (2003). ISSN 1616301X. DOI:10.1002/adfm.200390030. 7, 48, 76, 77, 85, 88, 132, 158
- [4] K. REUTER, H. KEMPA, K.D DESHMUKH, H.E KATZ and A.C HÜBLER. Full-swing organic inverters using a charged perfluorinated electret fabricated by means of mass-printing technologies. *Organic Electronics*, **11**, 1, 95–99 (2010). ISSN 15661199. DOI:10.1016/j.orgel.2009.10.004. 9, 46
- [5] D. SPIEHL, S. PANKALLA, M. GLESNER and E. DOERSAM. Analysis of the mobility of printed organic p-channel transistors depending on the transistor geometry and orientation. *Journal of Physics: Conference Series*, **345**, 012013 (2012). ISSN 1742-6588. DOI:10.1088/1742-6596/345/1/012013. 9, 46
- [6] A. KNOBLOCH, A. MANUELLI, A. BERNDT and W. CLEMENS. Fully printed integrated circuits from solution processable polymers. *Journal of Applied Physics*, **96**, 4, 2286 (2004). ISSN 00218979. DOI:10.1063/1.1767291. 9

- [7] SATOSHI HOSHINO. Influence of moisture on device characteristics of polythiophene-based field-effect transistors. *Journal of Applied Physics*, **95**, 9, 5088 (2004). ISSN 00218979. DOI:10.1063/1.1691190. 9, 134, 161, 164
- [8] YURONG LIU, LIMING WU, P. T. LAI and QINGYUN ZUO. Air-stability analysis and improvement of poly(3-hexylthiophene) field-effect transistors. *Semiconductor Science and Technology*, **24**, 9, 095013 (2009). ISSN 0268-1242. DOI:10.1088/0268-1242/24/9/095013. 9, 114, 134, 161, 164
- [9] SUNG KYU PARK, DEVIN A. MOUREY, JEONG-IN HAN, JOHN E. ANTHONY and THOMAS N. JACKSON. Environmental and operational stability of solution-processed 6,13-bis(triisopropyl-silylethynyl) pentacene thin film transistors. *Organic Electronics*, **10**, 3, 486–490 (2009). ISSN 15661199. DOI:10.1016/j.orgel.2009.02.007. 9, 114, 134, 161
- [10] HENNING SIRRINGHAUS. Reliability of organic field-effect transistors. *Advanced Materials*, **21**, 38-39, 3859–3873 (2009). ISSN 09359648. DOI:10.1002/adma.200901136. 9
- [11] HAGEN KLAUK. *Organic electronics: Materials, manufacturing and applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 2 edition (2008). ISBN 9783527312641. 10
- [12] HAGEN KLAUK. *Organic electronics II: More materials and applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 1 edition (2012). ISBN 9783527326471. 10, 82, 158
- [13] IEEE. Ieee std 1620 - 2008, ieee standard for test methods for the characterization of organic transistors and materials. 17, 18, 21, 23, 24, 58, 64
- [14] DIPTI GUPTA and YONGTAEK HONG. Understanding the effect of semiconductor thickness on device characteristics in organic thin film transistors by way of two-dimensional simulations. *Organic Electronics*, **11**, 1, 127–136 (2010). ISSN 15661199. DOI:10.1016/j.orgel.2009.10.009. 21
- [15] SIMON M. SZE and KWOK K. NG. *Physics of semiconductor devices*. Wiley-Interscience, Hoboken and N.J, 3 edition (2007). ISBN 9780471143239. 21, 22, 64, 88, 130
- [16] GREGOR MELLER and M. A. BALDO. *Organic Electronics*, volume 223 of *Advances in polymer science*. Springer, Berlin (2010). ISBN 9783642045370. DOI:10.1007/978-3-642-04538-7. 23, 27
- [17] GILLES HOROWITZ, RIADH HAJLAOUI, HABIB BOUCHRIHA, RAMZI BOURGUIGA and MOHCEN HAJLAOUI. The concept of threshold voltage in organic field-effect transistors. *Advanced Materials*, **10**, 12, 923–927 (1998). ISSN 09359648. DOI:10.1002/(SICI)1521-4095(199808)10:12<923::AID-ADMA923>3.0.CO;2-W. 27, 33

- [18] DAMIEN BOUDINET, GILLES LE BLEVENNEC, CHRISTOPHE SERBUTOVIEZ, JEAN-MARIE VERILHAC, HE YAN and GILLES HOROWITZ. Contact resistance and threshold voltage extraction in n-channel organic thin film transistors on plastic substrates. *Journal of Applied Physics*, **105**, 8, 084510 (2009). ISSN 00218979. DOI:10.1063/1.3110021. 27, 33
- [19] K. RYU, I. KYMISSIS, V. BULOVIĆ and C.G. SODINI. Direct extraction of mobility in pentacene OFETs using c-v and i-v measurements. *IEEE Electron Device Letters*, **26**, 10, 716–718 (2005). ISSN 0741-3106. DOI:10.1109/LED.2005.854394. 28
- [20] LAY-LAY CHUA, JANA ZAUMSEIL, JUI-FEN CHANG, ERIC C.-W. OU, PETER K.-H. HO, HENNING SIRRINGHAUS and RICHARD H. FRIEND. General observation of n-type field-effect behaviour in organic semiconductors. *Nature*, **434**, 7030, 194–199 (2005). ISSN 0028-0836. DOI:10.1038/nature03376. 43
- [21] WILLIAM A. MACDONALD. Engineered films for display technologies. *Journal of Materials Chemistry*, **14**, 1, 4 (2004). ISSN 0959-9428. DOI:10.1039/B310846P. 46
- [22] J. KUUSIPALO, A. M. SAVIJÄRVI, S. NORVAL, M. J. ADLEN and D. H. MACKERRON. The dependence of tear behaviour on the microstructure of biaxially drawn polyester film. *Journal of Materials Science*, **39**, 23, 6909–6919 (2004). ISSN 0022-2461. DOI:10.1023/B:JMSE.0000047532.34562.bc. 46
- [23] W. A. MACDONALD, M. K. LOONEY, D. MACKERRON, R. EVESON, R. ADAM, K. HASHIMOTO and K. RAKOS. Latest advances in substrates for flexible electronics. *Journal of the Society for Information Display*, **15**, 12, 1075 (2007). ISSN 10710922. DOI:10.1889/1.2825093. 46
- [24] IOANNIS KYMISSIS. *Organic Field Effect Transistors: Theory, Fabrication and Characterization*. Integrated Circuits and Systems. Springer, New York and Heidelberg (2009). ISBN 9780387921334. DOI:10.1007/978-0-387-92134-1. 46, 47, 49
- [25] HE YAN, ZHIHUA CHEN, YAN ZHENG, CHRISTOPHER NEWMAN, JORDAN R. QUINN, FLORIAN DÖTZ, MARCEL KASTLER and ANTONIO FACCHETTI. A high-mobility electron-transporting polymer for printed transistors. *Nature*, **457**, 7230, 679–686 (2009). ISSN 0028-0836. DOI:10.1038/nature07727. 46, 124
- [26] A.C. HUEBLER, F. DOETZ, H. KEMPA, H.E. KATZ, M. BARTZSCH, N. BRANDT, I. HENNIG, U. FUEGMANN, S. VAIDYANATHAN, J. GRANTSTROM, S. LIU, A. SYDORENKO, T. ZILLGER, G. SCHMIDT, K. PREISSLER, E. REICHMANIS, P. ECKERLE, F. RICHTER, T. FISCHER and U. HAHN. Ring oscillator fabricated completely by means of mass-printing technologies. *Organic Electronics*, **8**, 5, 480–486 (2007). ISSN 15661199. DOI:10.1016/j.orgel.2007.02.009. 46, 161, 162

- [27] I. H. CAMPBELL, J. D. KRESS, R. L. MARTIN, D. L. SMITH, N. N. BARASHKOV and J. P. FERRARIS. Controlling charge injection in organic electronic devices using self-assembled monolayers. *Applied Physics Letters*, **71**, 24, 3528 (1997). ISSN 00036951. DOI:10.1063/1.120381. 47, 49
- [28] WEIMIN ZHANG, JEREMY SMITH, RICK HAMILTON, MARTIN HEENEY, JAMES KIRKPATRICK, KIGOOK SONG, SCOTT E. WATKINS, THOMAS ANTHOPOULOS and IAIN McCULLOCH. Systematic improvement in charge carrier mobility of air stable triarylamine copolymers. *Journal of the American Chemical Society*, **131**, 31, 10814–10815 (2009). ISSN 0002-7863. DOI:10.1021/ja9034818. 47, 52, 55, 76, 77, 85
- [29] A. BOLOGNESI, M. BERLIOCCHI, M. MANENTI, A. DICARLO, P. LUGLI, K. LMIMOUNI and C. DUFOUR. Effects of grain boundaries, field-dependent mobility, and interface trap states on the electrical characteristics of pentacene tft. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **51**, 12, 1997–2003 (2004). ISSN 0018-9383. DOI:10.1109/TED.2004.838333. 47
- [30] SYBILLE ALLARD, MICHAEL FORSTER, BENJAMIN SOUHARCE, HEIKO THIEM and ULLRICH SCHERF. Organic semiconductors for solution-processable field-effect transistors (ofets). *Angewandte Chemie International Edition*, **47**, 22, 4070–4098 (2008). ISSN 14337851. DOI:10.1002/anie.200701920. 47
- [31] MARTIN EGGINGER, SIEGFRIED BAUER, REINHARD SCHWÖDIAUER, HELMUT NEUGEBAUER and NIYAZI SERDAR SARICIFTCI. Current versus gate voltage hysteresis in organic field effect transistors. *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly*, **140**, 7, 735–750 (2009). ISSN 0026-9247. DOI:10.1007/s00706-009-0149-z. 48, 56, 64, 114
- [32] TIM RICHARDS, MATTHEW BIRD and HENNING SIRRINGHAUS. A quantitative analytical model for static dipolar disorder broadening of the density of states at organic heterointerfaces. *The Journal of Chemical Physics*, **128**, 23, 234905 (2008). ISSN 00219606. DOI:10.1063/1.2937729. 48
- [33] H. KEMPA, K. REUTER, M. BARTZSCH, U. HAHN, A.C HUEBLER, D. ZIELKE, M. FORSTER and U. SCHERF. Stability study of all-polymer field-effect transistors. *IEEE Polytronic 2005 Conference*, (pages 67–71) (2005). DOI:10.1109/POLYTR.2005.1596489. 51
- [34] MATTHIEU MANCEAU, AGNÈS RIVATON, JEAN-LUC GARDETTE, STÉPHANE GUILLEREZ and NOËLLA LEMAÎTRE. The mechanism of photo- and thermooxidation of poly(3-hexylthiophene) (p3ht) reconsidered. *Polymer Degradation and Stability*, **94**, 6, 898–907 (2009). ISSN 01413910. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2009.03.005. 51

- [35] SUREN A. GEVORGYAN, MIKKEL JØRGENSEN and FREDERIK C. KREBS. A setup for studying stability and degradation of polymer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **92**, 7, 736–745 (2008). ISSN 09270248. DOI:10.1016/j.solmat.2008.02.008. 51
- [36] S. PANKALLA, R. GANESAN, D. SPIEHL, H.M SAUER, E. DÖRSAM and M. GLESNER. Mass characterisation of organic transistors and monte-carlo circuit simulation. *Organic Electronics*, **14**, 2, 676–681 (2013). ISSN 15661199. DOI:10.1016/j.orgel.2012.11.033. 61
- [37] C. D. DIMITRAKOPOULOS. Low-voltage organic transistors on plastic comprising high-dielectric constant gate insulators. *Science*, **283**, 5403, 822–824 (1999). ISSN 00368075. DOI:10.1126/science.283.5403.822. 75
- [38] P.C CHANG, S.E MOLESA, A.R MURPHY, J.M.J FRECHET and V. SUBRAMANIAN. Inkjetted crystalline single monolayer oligothiophene offts. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **53**, 4, 594–600 (2006). ISSN 0018-9383. DOI:10.1109/TED.2006.870885. 85
- [39] S. G. J. MATHIJSEN, M. CÖLLE, H. GOMES, E. C. P. SMITS, B. DE BOER, I. MCCULLOCH, P. A. BOBBERT and D. M. DE LEEUW. Dynamics of threshold voltage shifts in organic and amorphous silicon field-effect transistors. *Advanced Materials*, **19**, 19, 2785–2789 (2007). ISSN 09359648. DOI:10.1002/adma.200602798. 88, 118, 124, 158
- [40] MOHAMED S. A. ABDU, FRANCESCO P. ORFINO, YONGKEUN SON and STEVEN HOLD-CROFT. Interaction of oxygen with conjugated polymers: charge transfer complex formation with poly(3-alkylthiophenes). *Journal of the American Chemical Society*, **119**, 19, 4518–4524 (1997). ISSN 0002-7863. DOI:10.1021/ja964229j. 106, 129
- [41] HUA-HSIEN LIAO, CHIA-MING YANG, CHIEN-CHENG LIU, SHENG-FU HORNG, HSIN-FEI MENG and JOW-TSONG SHY. Dynamics and reversibility of oxygen doping and de-doping for conjugated polymer. *Journal of Applied Physics*, **103**, 10, 104506 (2008). ISSN 00218979. DOI:10.1063/1.2917419. 106, 108, 129
- [42] CHI-KEN LU and HSIN-FEI MENG. Hole doping by molecular oxygen in organic semiconductors: Band-structure calculations. *Physical Review B*, **75**, 23 (2007). ISSN 0163-1829. DOI:10.1103/PhysRevB.75.235206. 106, 129
- [43] ASHOK MALIAKAL, KRISHNAN RAGHAVACHARI, HOWARD KATZ, EDWIN CHANDROSS and THEO SIEGRIST. Photochemical stability of pentacene and a substituted pentacene in solution and in thin films. *Chemistry of Materials*, **16**, 24, 4980–4986 (2004). ISSN 0897-4756. DOI:10.1021/cm049060k. 106
- [44] SATOSHI OGAWA, TATSUO NAIJO, YASUO KIMURA, HISAO ISHII and MICHIO NIWANO. Photoinduced doping effect of pentacene field effect transistor in oxygen atmosphere

- studied by displacement current measurement. *Applied Physics Letters*, **86**, 25, 252104 (2005). ISSN 00036951. DOI:10.1063/1.1949281. 106
- [45] C. GOLDMANN, D. J. GUNDLACH and B. BATLOGG. Evidence of water-related discrete trap state formation in pentacene single-crystal field-effect transistors. *Applied Physics Letters*, **88**, 6, 063501 (2006). ISSN 00036951. DOI:10.1063/1.2171479. 114, 134, 161, 164
- [46] UTE ZSCHIESCHANG, R. THOMAS WEITZ, KLAUS KERN and HAGEN KLAUK. Bias stress effect in low-voltage organic thin-film transistors. *Applied Physics A*, **95**, 1, 139–145 (2009). ISSN 0947-8396. DOI:10.1007/s00339-008-5019-8. 124
- [47] E. ITOH and K. MIYAIRI. Interfacial charge phenomena at the semiconductor/gate insulator interface in organic field effect transistors. *Thin Solid Films*, **499**, 1-2, 95–103 (2006). ISSN 00406090. DOI:10.1016/j.tsf.2005.07.028. 131
- [48] HANS PETER LATSCHA, ULI KAZMAIER and HELMUT ALFONS KLEIN. *Chemie für Pharmazeuten: Unter Berücksichtigung des GK Pharmazie : mit 57 Tabellen*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, 5 edition (2002). ISBN 3540427554. 153
- [49] CHRISTIAN GERTHSEN and DIETER MESCHÉDE. *Physik: Mit 10 Farbtafeln, 93 Tabellen, 105 durchgerechneten Beispielen und 1074 Aufgaben mit vollständigen Lösungen auf CD-ROM ; [die ganze Physik zum 21. Jahrhundert]*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, 22 edition (2004). ISBN 3540026223. 157
- [50] TOMOHIRO KOYANAGI, SHINOBU FURUKAWA, KEN TSUTSUI, YASUO WADA and YUKIO FURUKAWA. Voltage-induced infrared absorption from polymer field-effect transistors. *Vibrational Spectroscopy*, **42**, 1, 156–160 (2006). ISSN 09242031. DOI:10.1016/j.vibspec.2006.04.012. 165

## Publikationsliste

Im Zusammenhang mit dieser Arbeit wurden folgende Publikationen veröffentlicht:

- *Influence of Environmental Stress on the Electrical Behaviour of OFETs on a Flexible substrate*  
Tobias Lau, Metin Koyuncu, Klaus-Volker Schuett, Claudia Arnold, Ralf Heiderhoff  
Poster, ECME Konferenz 2011, Barcelona
- *Lifetime of PTAA - based OFETs under Different Environmental Conditions*  
Tobias Lau, Enno Lorenz, Metin Koyuncu  
Poster, ICFPE Konferenz 2012, Tokio
- *Lifetime of Poly(triaryl amine) Based Organic Field Effect Transistors under Different Environmental Conditions*  
Tobias Lau, Enno Lorenz, Metin Koyuncu  
*Japanese Journal of Applied Physics* **52** (2013) 041601



## Danksagung

Am Ende dieser Arbeit möchte ich die Gelegenheit nutzen und mich bei allen meinen Kollegen und Betreuern für ihre Unterstützung während der Anfertigung dieser Arbeit bedanken. Insbesondere bedanke ich mich bei Prof. Ullrich Scherf für die Übernahme der universitären Betreuung dieser Arbeit und für die Diskussionen und Anregungen zum Gelingen dieser Arbeit.

Prof. Thomas Riedl danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens der Arbeit und für die Möglichkeit als Gast an seinem Institut für Elektronische Bauelemente die dortigen Einrichtungen benutzen zu dürfen. In diesem Zusammenhang gilt mein Dank auch Dr. Ralf Heiderhoff und Morteza Fakhri für ihre Gastfreundlichkeit und die wissenschaftliche Diskussion und Betreuung während meines Gastaufenthalts.

Dr. Metin Koyuncu danke ich für die intensive Betreuung innerhalb von Bosch und die vielen Anregungen und Diskussionen im Verlauf der Erstellung dieser Arbeit. An dieser Stelle möchte ich auch Enno Lorenz und Philip Seibt danken für ihre Anregungen zu den wissenschaftlichen Fragestellungen der Arbeit und ihre Unterstützung bei der Lösung von vielen praktischen Problemen und der Umsetzung der experimentellen Methoden für diese Arbeit.

Meinen anderen Bosch Kollegen aus Waiblingen danke ich für die freundliche Arbeitsatmosphäre und ihre Hilfe bei allen praktischen und organisatorischen Fragen. Außerdem danke ich dem Team von der zentralen Analytik am Standort Schillerhöhe für die Diskussionen zu den Möglichkeiten der verschiedenen Analysemethoden und die Durchführung der entsprechenden Messungen.

Zum Schluss möchte ich auch allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe von Prof. Scherf danken für die freundliche Aufnahme bei meinen Besuchen in Wuppertal.