

Charakterisierung integrierter Dioden mit linearen  
Polarisationsfiltern und eines Transimpedanzverstärkers in  
einer 65nm CMOS Technologie zur Verwendung in der  
optischen Winkelmessung

**Bachelor-Thesis**

im Studiengang Elektrotechnik

vorgelegt von

Ferhan Kobyaoglu

Matrikelnummer: 7086906

am 30.01.2023

an der Fachhochschule Dortmund

Erstprüfer: Prof. Dr. Michael Karagounis

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Rolf Paulus

## **Kurzzusammenfassung**

### **Charakterisierung integrierter Dioden mit linearen Polarisationsfiltern und eines Transimpedanzverstärkers in einer 65nm CMOS Technologie zur Verwendung in der optischen Winkelmessung**

Diese Bachelorthesis beschreibt die Charakterisierung integrierter Dioden mit linearen Polarisationsfiltern und eines Transimpedanzverstärkers in einer 65nm CMOS Technologie zur Verwendung in der optischen Winkelmessung. Dazu wurde zunächst für den Testchip, auf dem sich die verschiedenen Dioden mit unterschiedlichen Polarisationsfiltern und der Transimpedanzverstärker befinden, eine passende Leiterplatte mittels Altium Designer entworfen. Mithilfe dieser Leiterplatte konnten Messungen durchgeführt werden, um festzustellen, ob diese Technologie für die Verwendung als optischer Winkelsensor geeignet ist.

## **Abstract**

### **Characterization of integrated diodes with linear polarization filters and a transimpedance amplifier in a 65nm CMOS technology for use in optical angle measurement**

This bachelor thesis describes the characterization of integrated diodes with linear polarization filters and a transimpedance amplifier in a 65nm CMOS technology for use in optical angle measurement. A suitable PCB was first designed using Altium Designer for the test chip containing the various diodes with different polarization filters and the transimpedance amplifier. Using this PCB, measurements could be made to determine whether this technology is suitable for use as an optical angle sensor.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	POLDI.....	1
1.2	Polarisation von Licht.....	2
1.3	Winkelberechnung .....	4
1.4	Projektziele.....	5
2	POLDI-Testchip .....	6
2.1	Diodenstrukturen.....	7
2.1.1	N-Well Diode .....	8
2.1.2	Deep N-Well Diode .....	8
2.1.3	Triple-Well Diode .....	9
2.2	Metallisierung .....	10
2.3	Polarisationsfilter.....	11
2.4	Matrix.....	12
2.5	Transimpedanzverstärker.....	17
3	Platinen Entwurf .....	19
3.1	Bauteile .....	19
3.1.1	Stecker.....	20
3.1.2	Filter.....	21
3.2	Bondplan.....	22
3.3	Footprint.....	23
3.4	Schaltungsentwurf .....	25
3.4.1	Schaltplan .....	25
3.4.2	PCB Layout.....	27
4	Messsystem .....	30
4.1	PCB für den POLDI-Testchip.....	30
4.2	Messaufbau für die Charakterisierung des Transimpedanzverstärkers .....	32
4.3	Messaufbau für die Charakterisierung der Poldi-Zellen.....	33
4.4	Messgeräte .....	34
4.4.1	Labornetzgerät Rohde & Schwarz HMC 8043.....	34
4.4.2	Sourcemeister Keithley 2401.....	35
4.4.3	Multimeter Keithley DMM6500 und Agilent Technologies U3401A.....	35
4.4.4	Funktionsgenerator Rohde & Schwarz HMF2525 .....	36
4.4.5	Oszilloskop Rohde & Schwarz RTB2004 .....	36
4.4.6	Picoamperemeter Keithley 6482.....	37
5	Messergebnisse .....	37
5.1	Charakterisierung des Transimpedanzverstärkers .....	37

5.1.1	Statische Messungen.....	37
5.1.2	Dynamische Messungen.....	41
5.2	Charakterisierung der Poldi-Zellen.....	43
5.2.1	Messungen von Photodioden ohne Polarisationsfilter.....	43
5.2.1.1	Teststruktur M_K.....	44
5.2.1.2	Teststruktur N_K0.....	45
5.2.1.3	Teststruktur O_K0-O_Atw.....	46
5.2.2	Messungen von Photodioden mit Polarisationsfilter .....	49
5.2.2.1	Teststruktur B_K0-B_K3.....	50
5.2.2.2	Teststruktur A_K0-A_K3.....	56
5.2.2.3	Teststruktur C_K0-C_K3.....	63
5.2.2.4	Teststruktur K_K0-K_K3.....	69
5.2.2.5	Teststruktur J_K0-J_K3.....	75
5.2.2.6	Teststruktur L_K0-L_K3 .....	82
5.2.2.7	Teststruktur E_K0-E_K3 .....	88
5.2.2.8	Teststruktur D_K0-D_K3 .....	95
5.2.2.9	Teststruktur F_K0-F_K3 .....	101
5.2.2.10	Teststruktur G_K0-G_K3 .....	107
5.2.2.11	Teststruktur H_K0-H_K3 .....	114
5.2.2.12	Teststruktur I_K0-I_K3 .....	121
5.3	Auswertung der Messergebnisse .....	127
6	Zusammenfassung.....	129
7	Quellenverzeichnis.....	130
8	Anhang .....	132
8.1	Gnuplot Skripte für die Charakterisierung der Poldi-Zellen .....	132
9	Eidesstattliche Versicherung .....	133

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau und Prinzip des POLDI-Sensors.....	2
Abbildung 2: Polarisator und Analysator parallel zueinander .....	3
Abbildung 3: Polarisator und Analysator senkrecht zueinander.....	3
Abbildung 4: Gesetz von Malus.....	4
Abbildung 5: Orientierung der Polarisationsfilter .....	4
Abbildung 6: Übersicht des CMOS-Testchips .....	6
Abbildung 7: Pad-Ring des POLDI Testchips [1].....	7
Abbildung 8: Querschnitt einer N-Well Diode [1] .....	8
Abbildung 9: Querschnitt einer Deep N-Well Diode [1].....	8
Abbildung 10: Querschnitt einer Triple-Well Diode [1] .....	9
Abbildung 11: Metalllage 2 [1].....	10
Abbildung 12: Metalllage 3 [1].....	10
Abbildung 13: Metalllage 4 [1].....	10
Abbildung 14: Metalllagen 5 bis 9 [1] .....	10
Abbildung 15: Polarisationsfilter 0° [1] .....	11
Abbildung 16: Polarisationsfilter 45° [1] .....	11
Abbildung 17: Übersicht einer POLDI Zelle [1] .....	12
Abbildung 18: POLDI Teststruktur 4x4 Matrix [1] .....	13
Abbildung 19: 2x2 Matrix ohne Filter [1].....	13
Abbildung 20: Prinzipielle Verdrahtung eines POLDI [1] .....	14
Abbildung 21: Übersicht des POLDI Testchip [1] .....	15
Abbildung 22: Gesamtansicht des POLDI Testchip [1] .....	16
Abbildung 23: Schaltplan des Transimpedanzverstärkers [1] .....	17
Abbildung 24: Strom- zu Spannungswandler.....	18
Abbildung 25: Steckverbinder 4 Pins [3] .....	20
Abbildung 26: Steckverbinder 2 Pins [3] .....	20
Abbildung 27: Jumper 3 Pins [4] .....	20
Abbildung 28: Jumper 2 Pins [4] .....	20
Abbildung 29: Koaxialsteckverbinder [5].....	21
Abbildung 30: BNX002-11 Filter [6] .....	21
Abbildung 31: Eigenschaft der Dämpfung [6].....	21
Abbildung 32: Bondplan .....	22
Abbildung 33: Footprint.....	23
Abbildung 34: Ansicht des gebondeten Testchips .....	24
Abbildung 35: Symbol .....	25
Abbildung 36: Schematic Schaltplan .....	26
Abbildung 37: Ansicht der PCB.....	27
Abbildung 38: PCB Routing .....	28
Abbildung 39: PCB Polygon Pour & Via Stitching.....	29
Abbildung 40: 3D Ansicht der PCB.....	30
Abbildung 41: PCB Ansicht von oben.....	31

Abbildung 42: Messaufbau inklusive der Messgeräte .....	32
Abbildung 43: Schematic des Transimpedanzverstärkers .....	33
Abbildung 44: Lichtquelle .....	33
Abbildung 45: Labornetzgerät Rohde & Schwarz HMC 8043 [7] .....	35
Abbildung 46: Sourcemeter Keithley 2401 [8].....	35
Abbildung 47: Keithley DMM6500 [9].....	35
Abbildung 48: Agilent Technologies U3401A [10].....	35
Abbildung 49: Funktionsgenerator Rohde & Schwarz HMF2525 [11] .....	36
Abbildung 50: Oszilloskop Rohde & Schwarz RTB2004 [12].....	36
Abbildung 51: Picoamperemeter Keithley 6482 [13] .....	37
Abbildung 52: Schaltung des Transimpedanzverstärkers mit Eingangsspannung .....	38
Abbildung 53: Ausgangskennlinie des Transimpedanzverstärkers mit Eingangsspannung.....	39
Abbildung 54: Schaltung des Transimpedanzverstärkers mit positivem Eingangsstrom .....	40
Abbildung 55: Schaltung des Transimpedanzverstärkers mit negativem Eingangsstrom .....	40
Abbildung 56: Ausgangskennlinie des Transimpedanzverstärkers mit Eingangsstrom .....	41
Abbildung 57: Oszillogramm der transienten Messung.....	42
Abbildung 58: Oszillogramm der transienten Messung mit Signalwertmittelung.....	42
Abbildung 59: Empfindlichkeit der Diode M_K in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	44
Abbildung 60: Empfindlichkeit der Diode M_K in Abhängigkeit vom Winkel .....	45
Abbildung 61: Empfindlichkeit der Diode N_K in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	45
Abbildung 62: Empfindlichkeit der Diode N_K in Abhängigkeit vom Winkel .....	46
Abbildung 63: Empfindlichkeit der Diode O_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	46
Abbildung 64: Empfindlichkeit der Diode O_K0 in Abhängigkeit vom Winkel.....	47
Abbildung 65: Empfindlichkeit der Diode O_Ktw in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	47
Abbildung 66: Empfindlichkeit der Diode O_Ktw in Abhängigkeit vom Winkel.....	48
Abbildung 67: Empfindlichkeit der Diode O_Atw in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	48
Abbildung 68: Empfindlichkeit der Diode O_Atw in Abhängigkeit vom Winkel .....	49
Abbildung 69: Empfindlichkeit der Diode B_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	50
Abbildung 70: Empfindlichkeit der Diode B_K0 in Abhängigkeit vom Winkel.....	50
Abbildung 71: Kontrast der Diode B_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	51
Abbildung 72: Empfindlichkeit der Diode B_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	51
Abbildung 73: Empfindlichkeit der Diode B_K1 in Abhängigkeit vom Winkel.....	52
Abbildung 74: Kontrast der Diode B_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	52
Abbildung 75: Empfindlichkeit der Diode B_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	53
Abbildung 76: Empfindlichkeit der Diode B_K2 in Abhängigkeit vom Winkel.....	53
Abbildung 77: Kontrast der Diode B_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	54
Abbildung 78: Empfindlichkeit der Diode B_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	54
Abbildung 79: Empfindlichkeit der Diode B_K3 in Abhängigkeit vom Winkel.....	55
Abbildung 80: Kontrast der Diode B_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	55
Abbildung 81: Empfindlichkeit der Diode A_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	56
Abbildung 82: Empfindlichkeit der Diode A_K0 in Abhängigkeit vom Winkel .....	57
Abbildung 83: Kontrast der Diode A_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	57
Abbildung 84: Empfindlichkeit der Diode A_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	58
Abbildung 85: Empfindlichkeit der Diode A_K1 in Abhängigkeit vom Winkel .....	58

Abbildung 86: Kontrast der Diode A_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	59
Abbildung 87: Empfindlichkeit der Diode A_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	59
Abbildung 88: Empfindlichkeit der Diode A_K2 in Abhängigkeit vom Winkel .....	60
Abbildung 89: Kontrast der Diode A_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	60
Abbildung 90: Empfindlichkeit der Diode A_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	61
Abbildung 91: Empfindlichkeit der Diode A_K3 in Abhängigkeit vom Winkel .....	62
Abbildung 92: Kontrast der Diode A_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	62
Abbildung 93: Empfindlichkeit der Diode C_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	63
Abbildung 94: Empfindlichkeit der Diode C_K0 in Abhängigkeit vom Winkel .....	63
Abbildung 95: Kontrast der Diode C_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	64
Abbildung 96: Empfindlichkeit der Diode C_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	64
Abbildung 97: Empfindlichkeit der Diode C_K1 in Abhängigkeit vom Winkel .....	65
Abbildung 98: Kontrast der Diode C_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	65
Abbildung 99: Empfindlichkeit der Diode C_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	66
Abbildung 100: Empfindlichkeit der Diode C_K2 in Abhängigkeit vom Winkel .....	66
Abbildung 101: Kontrast der Diode C_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	67
Abbildung 102: Empfindlichkeit der Diode C_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	67
Abbildung 103: Empfindlichkeit der Diode C_K3 in Abhängigkeit vom Winkel .....	68
Abbildung 104: Kontrast der Diode C_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	68
Abbildung 105: Empfindlichkeit der Diode K_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	69
Abbildung 106: Empfindlichkeit der Diode K_K0 in Abhängigkeit vom Winkel .....	69
Abbildung 107: Kontrast der Diode K_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	70
Abbildung 108: Empfindlichkeit der Diode K_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	70
Abbildung 109: Empfindlichkeit der Diode K_K1 in Abhängigkeit vom Winkel .....	71
Abbildung 110: Kontrast der Diode K_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	71
Abbildung 111: Empfindlichkeit der Diode K_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	72
Abbildung 112: Empfindlichkeit der Diode K_K2 in Abhängigkeit vom Winkel .....	72
Abbildung 113: Kontrast der Diode K_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	73
Abbildung 114: Empfindlichkeit der Diode K_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	73
Abbildung 115: Empfindlichkeit der Diode K_K3 in Abhängigkeit vom Winkel .....	74
Abbildung 116: Kontrast der Diode K_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	74
Abbildung 117: Empfindlichkeit der Diode J_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	75
Abbildung 118: Empfindlichkeit der Diode J_K0 in Abhängigkeit vom Winkel .....	76
Abbildung 119: Kontrast der Diode J_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	76
Abbildung 120: Empfindlichkeit der Diode J_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	77
Abbildung 121: Empfindlichkeit der Diode J_K1 in Abhängigkeit vom Winkel .....	77
Abbildung 122: Kontrast der Diode J_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	78
Abbildung 123: Empfindlichkeit der Diode J_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	78
Abbildung 124: Empfindlichkeit der Diode J_K2 in Abhängigkeit vom Winkel .....	79
Abbildung 125: Kontrast der Diode J_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	79
Abbildung 126: Empfindlichkeit der Diode J_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	80
Abbildung 127: Empfindlichkeit der Diode J_K3 in Abhängigkeit vom Winkel .....	81
Abbildung 128: Kontrast der Diode J_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	81
Abbildung 129: Empfindlichkeit der Diode L_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	82

Abbildung 130: Empfindlichkeit der Diode L_K0 in Abhängigkeit vom Winkel.....	82
Abbildung 131: Kontrast der Diode L_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	83
Abbildung 132: Empfindlichkeit der Diode L_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	83
Abbildung 133: Empfindlichkeit der Diode L_K1 in Abhängigkeit vom Winkel.....	84
Abbildung 134: Kontrast der Diode L_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	84
Abbildung 135: Empfindlichkeit der Diode L_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	85
Abbildung 136: Empfindlichkeit der Diode L_K2 in Abhängigkeit vom Winkel.....	85
Abbildung 137: Kontrast der Diode L_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	86
Abbildung 138: Empfindlichkeit der Diode L_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	86
Abbildung 139: Empfindlichkeit der Diode L_K3 in Abhängigkeit vom Winkel.....	87
Abbildung 140: Kontrast der Diode L_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	87
Abbildung 141: Empfindlichkeit der Diode E_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	88
Abbildung 142: Empfindlichkeit der Diode E_K0 in Abhängigkeit vom Winkel.....	89
Abbildung 143: Kontrast der Diode E_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	89
Abbildung 144: Empfindlichkeit der Diode E_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	90
Abbildung 145: Empfindlichkeit der Diode E_K1 in Abhängigkeit vom Winkel.....	90
Abbildung 146: Kontrast der Diode E_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	91
Abbildung 147: Empfindlichkeit der Diode E_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	91
Abbildung 148: Empfindlichkeit der Diode E_K2 in Abhängigkeit vom Winkel.....	92
Abbildung 149: Kontrast der Diode E_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	92
Abbildung 150: Empfindlichkeit der Diode E_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	93
Abbildung 151: Empfindlichkeit der Diode E_K3 in Abhängigkeit vom Winkel.....	94
Abbildung 152: Kontrast der Diode E_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	94
Abbildung 153: Empfindlichkeit der Diode D_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	95
Abbildung 154: Empfindlichkeit der Diode D_K0 in Abhängigkeit vom Winkel.....	95
Abbildung 155: Kontrast der Diode D_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	96
Abbildung 156: Empfindlichkeit der Diode D_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	96
Abbildung 157: Empfindlichkeit der Diode D_K1 in Abhängigkeit vom Winkel.....	97
Abbildung 158: Kontrast der Diode D_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	97
Abbildung 159: Empfindlichkeit der Diode D_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	98
Abbildung 160: Empfindlichkeit der Diode D_K2 in Abhängigkeit vom Winkel.....	98
Abbildung 161: Kontrast der Diode D_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	99
Abbildung 162: Empfindlichkeit der Diode D_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	99
Abbildung 163: Empfindlichkeit der Diode D_K3 in Abhängigkeit vom Winkel.....	100
Abbildung 164: Kontrast der Diode D_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	101
Abbildung 165: Empfindlichkeit der Diode F_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	101
Abbildung 166: Empfindlichkeit der Diode F_K0 in Abhängigkeit vom Winkel.....	102
Abbildung 167: Kontrast der Diode F_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	102
Abbildung 168: Empfindlichkeit der Diode F_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	103
Abbildung 169: Empfindlichkeit der Diode F_K1 in Abhängigkeit vom Winkel.....	103
Abbildung 170: Kontrast der Diode F_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	104
Abbildung 171: Empfindlichkeit der Diode F_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	104
Abbildung 172: Empfindlichkeit der Diode F_K2 in Abhängigkeit vom Winkel.....	105
Abbildung 173: Kontrast der Diode F_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	105



Abbildung 174: Empfindlichkeit der Diode F_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	106
Abbildung 175: Empfindlichkeit der Diode F_K3 in Abhängigkeit vom Winkel.....	107
Abbildung 176: Kontrast der Diode F_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	107
Abbildung 177: Empfindlichkeit der Diode G_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	108
Abbildung 178: Empfindlichkeit der Diode G_K0 in Abhängigkeit vom Winkel.....	108
Abbildung 179: Kontrast der Diode G_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	109
Abbildung 180: Empfindlichkeit der Diode G_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	109
Abbildung 181: Empfindlichkeit der Diode G_K1 in Abhängigkeit vom Winkel.....	110
Abbildung 182: Kontrast der Diode G_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	110
Abbildung 183: Empfindlichkeit der Diode G_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	111
Abbildung 184: Empfindlichkeit der Diode G_K2 in Abhängigkeit vom Winkel.....	111
Abbildung 185: Kontrast der Diode G_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	112
Abbildung 186: Empfindlichkeit der Diode G_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	112
Abbildung 187: Empfindlichkeit der Diode G_K3 in Abhängigkeit vom Winkel.....	113
Abbildung 188: Kontrast der Diode G_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	114
Abbildung 189: Empfindlichkeit der Diode H_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	114
Abbildung 190: Empfindlichkeit der Diode H_K0 in Abhängigkeit vom Winkel.....	115
Abbildung 191: Kontrast der Diode H_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	115
Abbildung 192: Empfindlichkeit der Diode H_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	116
Abbildung 193: Empfindlichkeit der Diode H_K1 in Abhängigkeit vom Winkel.....	116
Abbildung 194: Kontrast der Diode H_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	117
Abbildung 195: Empfindlichkeit der Diode H_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	117
Abbildung 196: Empfindlichkeit der Diode H_K2 in Abhängigkeit vom Winkel.....	118
Abbildung 197: Kontrast der Diode H_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	118
Abbildung 198: Empfindlichkeit der Diode H_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	119
Abbildung 199: Empfindlichkeit der Diode H_K3 in Abhängigkeit vom Winkel.....	120
Abbildung 200: Kontrast der Diode H_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	120
Abbildung 201: Empfindlichkeit der Diode L_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	121
Abbildung 202: Empfindlichkeit der Diode L_K0 in Abhängigkeit vom Winkel.....	121
Abbildung 203: Kontrast der Diode L_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	122
Abbildung 204: Empfindlichkeit der Diode L_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	122
Abbildung 205: Empfindlichkeit der Diode L_K1 in Abhängigkeit vom Winkel .....	123
Abbildung 206: Kontrast der Diode L_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	123
Abbildung 207: Empfindlichkeit der Diode L_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	124
Abbildung 208: Empfindlichkeit der Diode L_K2 in Abhängigkeit vom Winkel .....	124
Abbildung 209: Kontrast der Diode L_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	125
Abbildung 210: Empfindlichkeit der Diode L_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	125
Abbildung 211: Empfindlichkeit der Diode L_K3 in Abhängigkeit vom Winkel .....	126
Abbildung 212: Kontrast der Diode L_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge .....	126

## Abkürzungsverzeichnis

POLDI	Polarization Sensitive Photo Diodes
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
TSMC	Taiwan Semiconductor Manufacturing Company
CAN	Controller Area Network
PCB	Printed Circuit Board
SMA	Sub-Miniature Version A
TIA	Transimpedance amplifier
OTA	Operational-Transconductance-Amplifier
NMOS	N-type metal-oxide-semiconductor
NW	N-Well
DNW	Deep N-Well
TW	Triple Well
M <sub>x</sub>	Metal Layer x (1-9)
GND	Ground
DRC	Design Rule Check
U <sub>ref</sub>	Referenzspannung
R <sub>f</sub>	Feedbackwiderstand
C <sub>D</sub>	Diodenkapazität
C <sub>f</sub>	Feedbackkapazität
μm	Mikrometer
mm	Millimeter
nm	Nanometer

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Polarisationsfilter [1] .....	11
Tabelle 2: Dioden Übersicht [1] .....	15
Tabelle 3: Auflistung der Anschlüsse.....	31
Tabelle 4: Auflistung der Messgeräte.....	34
Tabelle 5: Maximale Sensitivität .....	128
Tabelle 6: Maximaler Kontrast.....	129

# 1 Einleitung

In vielen Technologiebereichen, wie zum Beispiel in der Robotik, im Automobilbau und in der Medizin werden Sensoren und Aktoren benötigt. Sie dienen dazu, bestimmte Abläufe in der Umgebung zu erkennen und in diese aktiv einzuwirken. Ein Beispiel dafür ist die genaue Bemessung des Drehwinkels eines rotierenden Körpers. Hierfür werden häufig Winkelsensoren eingesetzt, die mit Hilfe von Schleifkontakten oder unter Ausnutzung magnetischer Effekte realisiert werden. Jedoch haben diese Sensorsysteme einige Nachteile und Einschränkungen. Beispielsweise kann es durch Vibration und Stößen zu einer mechanischen Belastung des Sensors kommen, welche die Funktion dieser Sensorsysteme beeinträchtigt. Des Weiteren entsteht eine Reibungsabnutzung durch die Schleifkontakte, was die Lebenszeit derartiger Systeme verkürzt und ihren Wartungsaufwand erhöht. Außerdem ist bei magnetischen Sensoren die Auslesegeschwindigkeit begrenzt und es müssen für die korrekte Funktion geringe Abstände zwischen den Magneten und Sensorelementen eingehalten werden. [1]

## 1.1 POLDI

Um diese genannten und weitere Nachteile zu vermeiden hat das Unternehmen advCo microelectronics GmbH das innovative Polarization Sensitive Photo Diodes (POLDI) Konzept entwickelt. POLDI ist ein optischer Winkelsensor, der zur Erfassung von Winkeln und Rotationsbewegungen dient. Es wurde so entworfen, dass die Sensoren, die Polfilter und die Schaltung zur Auswertung der Messungen auf einem einzigen CMOS-Chip integriert sind. Aus diesem Grund ist der POLDI-Sensor energieeffizient, miniaturisiert und kostengünstig. Da es sich hierbei um einen optischen Sensor handelt, der lediglich die Polarisation des Lichts misst, kann der POLDI-Sensor auch problemlos Messungen bei größeren Entfernungen und ebenso in schwierigen Umgebungen durchführen. Das kontaktlose Messprinzip ermöglicht zudem eine längere Lebenszeit, weil keine Reibungsabnutzung stattfindet. Außerdem haben Vibration, Stöße und magnetische Felder keinen Einfluss auf den Betrieb des POLDI-Sensors.

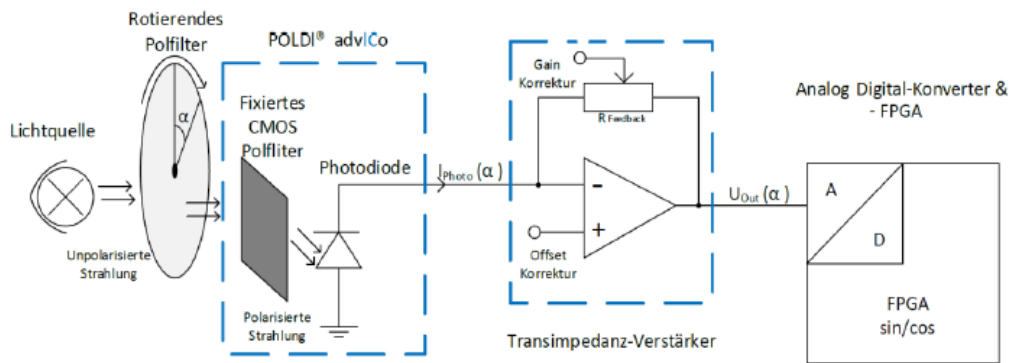


Abbildung 1: Aufbau und Prinzip des POLDI-Sensors

In Abbildung 1 ist das Konzept zur Winkelmessung des POLDI-Sensors zu sehen. Der Sensor besteht aus vier Photodioden. Jeder dieser Dioden hat einen eigenen Polarisationsfilter, der sich auf der Oberfläche der Photodiode befindet und gegenüber den benachbarten Dioden und Filtern um jeweils  $45^\circ$  gedreht ist. Diese Polarisationsfilter werden in einer der Metallisierungsebenen des CMOS-Prozesses durch parallele Leiterbahnen realisiert. Sobald eine Lichtquelle den POLDI-Sensor mit linear polarisiertem Licht bestrahlt, wird durch jede Diode ein Photostrom erzeugt. Jedoch sind diese Ströme verschieden, weil die Polarisationsfilter unterschiedliche Winkel ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ) zueinander haben. Die Intensität des Lichts, welche auf die jeweilige Diode fällt, hängt vom Winkel zwischen der Polarisationssebene des linear polarisierten Lichts und der Ausrichtung der Polarisationssebene ab. Dementsprechend hängt die Stromstärke des Photostroms der Dioden ebenso von diesem Winkel ab. Anschließend werden die Photoströme zur weiteren Signalverarbeitung durch einen Transimpedanzverstärker in Spannungen gewandelt. [1]

## 1.2 Polarisation von Licht

Licht ist eine elektromagnetische Welle und kann unterschiedliche Wellenlängen besitzen. Hierbei ist für das menschliche Auge jedoch nur ein sehr beschränktes Wellenlängenintervall von knapp  $400\text{nm}$  (violett) bis etwa  $700\text{nm}$  (rot) zu sehen. Diese unterschiedlichen Wellenlängen werden als Farben wahrgenommen. Dagegen findet in optischen Systemen auch nicht sichtbares Licht Anwendung, wie beispielsweise infrarotes Licht, welches größere Wellenlängen besitzt, und ultraviolettes Licht, das kürzere Wellenlängen besitzt. Elektromagnetische Wellen sind nach der Maxwell'schen Theorie Transversalwellen, die sich in Nichtleitern ausbreiten. Dementsprechend ist Licht ebenfalls eine Transversalwelle, die im Wellenteilchenmodell als schwingende Welle beschrieben werden kann und sich senkrecht zu ihrer Schwingungsrichtung ausbreitet. Licht aus den meisten Quellen, wie z.B. Sonnenlicht ist unpolarisiert. Dies bedeutet, dass die Wellen keine konkrete Schwingungsrichtung bevorzugen und zufällig in alle Richtungen schwingen. Mit

einem geeigneten Polarisator ist es möglich aus unpolarisiertem Licht nur Lichtwellen mit einer bestimmten Feldrichtung passieren zu lassen. Die Lichtwellen, die nicht parallel zur Polarisationsachse, welche auch Transmissionsachse genannt wird, verlaufen, werden absorbiert. Dieses Licht wird dann als linear polarisiertes Licht bezeichnet. Lässt man linear polarisiertes Licht nun einen weiteren Polarisator, welcher auch Analysator genannt wird, passieren, kann man folgendes beobachten. Wenn, wie in Abbildung 2 dargestellt, beide Transmissionsachsen parallel zueinander verlaufen, wird das gesamte auf den Analysator fallende Licht durchgelassen. Sind allerdings, wie in Abbildung 3 dargestellt, die Transmissionsachsen senkrecht zueinander orientiert, so wird kein Licht durchgelassen. Falls die Transmissionsachse des Analysators einen versetzten Winkel von z.B.  $45^\circ$  zum Polarisator besitzt, so wird das Licht durchgelassen, jedoch entspricht die Polarisation des Lichtes nun der Feldrichtung des Analysators. Für die Intensität  $I$  des Lichts gilt dann das Gesetz von Malus:

$$I = I_0 \cos^2(\alpha) \quad (1.1)$$

Wobei  $I_0$  der Intensität des auf den Analysator fallenden Lichts und  $\alpha$  dem Winkel zwischen der Transmissionsachse des Analysators und des Polarisators entspricht. [2]

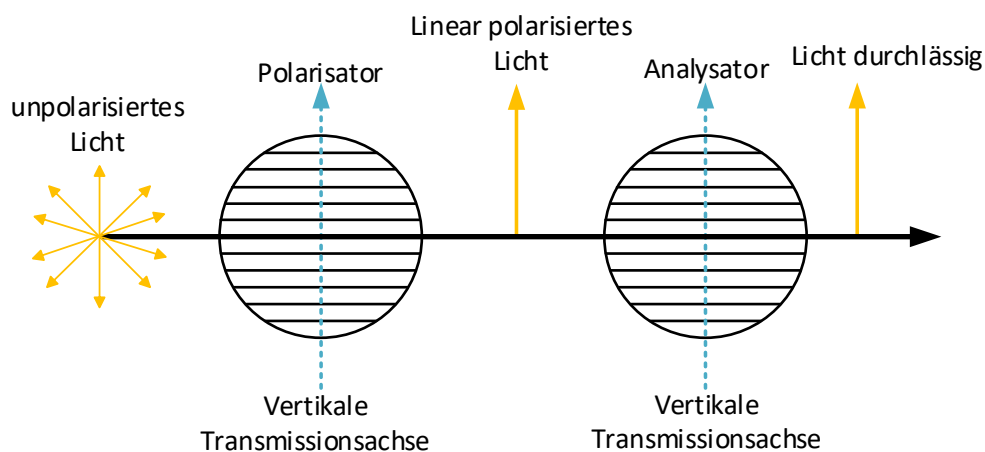


Abbildung 2: Polarisator und Analysator parallel zueinander

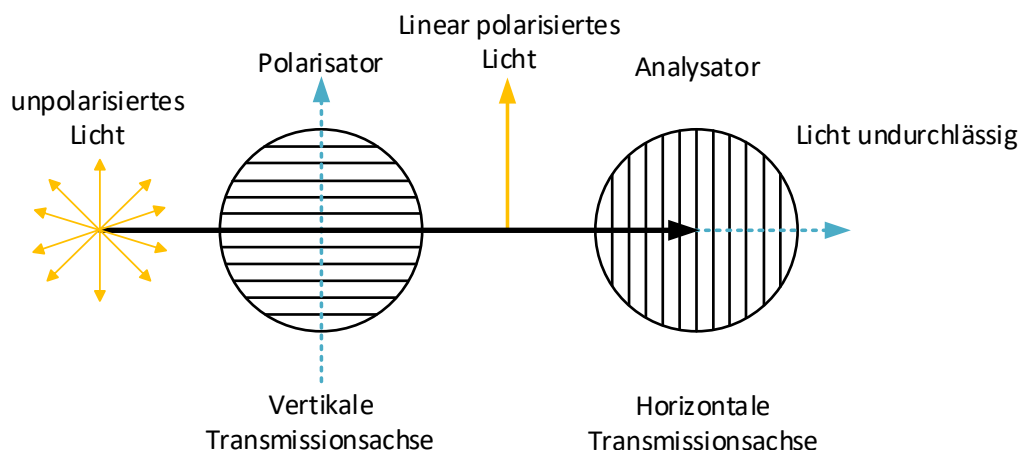


Abbildung 3: Polarisator und Analysator senkrecht zueinander

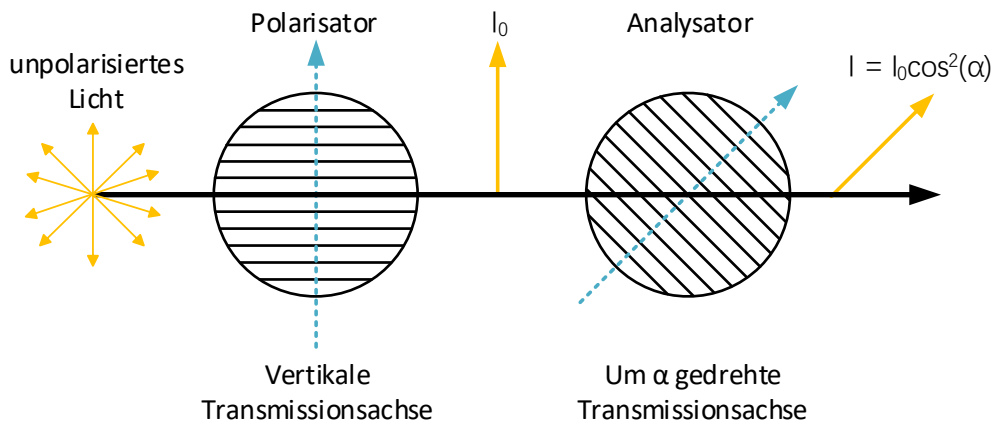


Abbildung 4: Gesetz von Malus

### 1.3 Winkelberechnung

Mit den zuvor genannten Erkenntnissen lässt sich das Funktionsprinzip des Poldi Sensors im Detail erläutern. Beim POLDI-Sensor werden über den Photodioden vier verschiedene Polarisationsfilter mit unterschiedlicher Orientierung von  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $135^\circ$  verwendet. Durch einen Polarisator im Strahlengang zwischen Lichtquelle und Sensor wird linear polarisiertes Licht erzeugt. Die Photodioden mit integriertem Polarisationsfilter erzeugen bei Bestrahlung mit diesem linear polarisierten Licht entsprechend dem Gesetz von Malus die Ströme:  $I_{0^\circ}$ ,  $I_{45^\circ}$ ,  $I_{90^\circ}$ ,  $I_{135^\circ}$ . Diese Ströme sind proportional zur Intensität des Lichts.

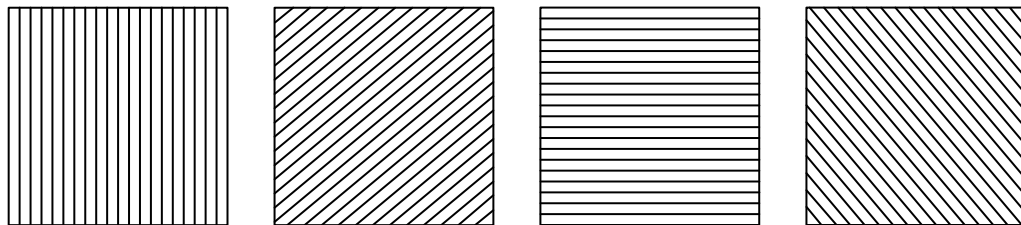


Abbildung 5: Orientierung der Polarisationsfilter

Es gilt:

$$\Delta_0 = I_{90^\circ} - I_{0^\circ} \quad (1.2)$$

$$\Delta_{45} = I_{135^\circ} - I_{45^\circ} \quad (1.3)$$

$$\Delta_0 = I_0 \left( \cos^2 \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) - \cos^2(\alpha) \right) \quad (1.4)$$

$$\Delta_{45} = I_0 \left( \cos^2 \left( \alpha - \frac{3\pi}{4} \right) - \cos^2 \left( \alpha - \frac{\pi}{4} \right) \right) \quad (1.5)$$

wobei  $\Delta_0$  und  $\Delta_{45}$  der Differenzbildung der Photoströme der Dioden entsprechen, deren Polarisationsfilter eine Ausrichtung von  $0^\circ$  und  $90^\circ$  bzw.  $45^\circ$  und  $135^\circ$  besitzen.  $I_0$  stellt die Intensität des polarisierten Lichts dar, welches auf die POLDI Sensoren fällt. Mit den folgenden Berechnungen erhält man den Rotationswinkel, der sich zwischen der Polarisationssebene des einfallenden polarisierten Lichts und der Ausrichtung des Filters des POLDI-Sensors befindetet. [1]

Bereich (1)  $0^\circ$  bis  $45^\circ$ : Beide Differenzen sind negativ.

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \left[ -\arccos\left(\frac{\Delta_0}{I_0}\right) + \frac{\pi}{2} \right] \quad (1.6)$$

$$\alpha_{45} = \frac{1}{2} \left[ \arccos\left(\frac{\Delta_{45}}{I_0}\right) - \frac{\pi}{4} \right] \quad (1.7)$$

Bereich (2)  $45^\circ$  bis  $90^\circ$ :  $\Delta_0$  ist positiv und  $\Delta_{45}$  ist negativ.

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \left[ -\arccos\left(\frac{\Delta_0}{I_0}\right) + \frac{\pi}{2} \right] \quad (1.8)$$

$$\alpha_{45} = \frac{1}{2} \left[ \arccos\left(\frac{\Delta_{45}}{I_0}\right) + \frac{3\pi}{4} \right] \quad (1.9)$$

Bereich (3)  $90^\circ$  bis  $135^\circ$ : Beide Differenzen sind positiv.

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \left[ \arccos\left(\frac{\Delta_0}{I_0}\right) + \frac{\pi}{2} \right] \quad (1.10)$$

$$\alpha_{45} = \frac{1}{2} \left[ -\arccos\left(\frac{\Delta_{45}}{I_0}\right) + \frac{3\pi}{4} \right] \quad (1.11)$$

Bereich (4)  $135^\circ$  bis  $180^\circ$ :  $\Delta_0$  ist negativ und  $\Delta_{45}$  ist positiv

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \left[ \arccos\left(\frac{\Delta_0}{I_0}\right) + \frac{\pi}{2} \right] \quad (1.12)$$

$$\alpha_{45} = \frac{1}{2} \left[ \arccos\left(\frac{\Delta_{45}}{I_0}\right) + \frac{3\pi}{4} \right] \quad (1.13)$$

## 1.4 Projektziele

Das Poldiprinzip wurde erfolgreich in der 65nm CMOS Technologie von TSMC übertragen und zu einem Testchip entwickelt, der im folgenden Kapitel kurz vorgestellt wird. Dieser Testchip soll zur Charakterisierung der Teststrukturen durch entsprechende Messungen verwendet werden. Hierzu wird ein Testsystem benötigt. Ziel dieses Projektes ist es, dafür eine Platine zu entwickeln. Um diese PCB zu erstellen, wurde das Programm Altium Designer verwendet.



## 2 POLDI-Testchip

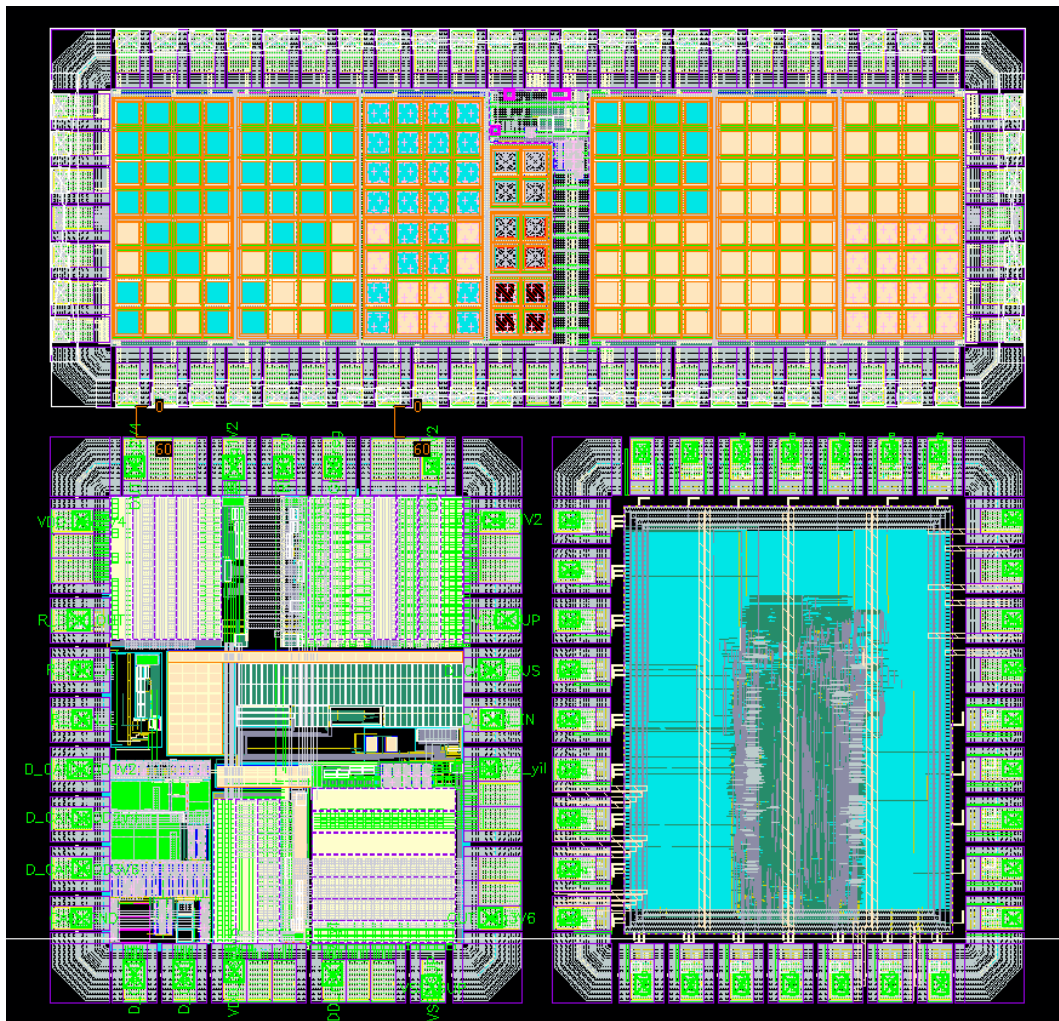
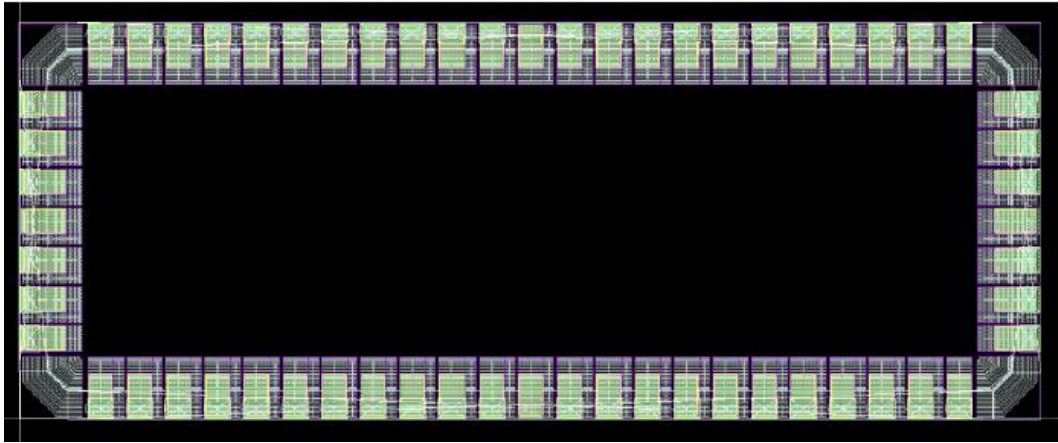


Abbildung 6: Übersicht des CMOS-Testchips

Abbildung 6 zeigt den CMOS-Chip, der von TSMC produziert wurde und eine Gesamtfläche von  $2000\mu\text{m} \times 2000\mu\text{m}$  besitzt. Auf diesem befinden sich drei Testchips, der CAN Physical Testchip, der CAN Protokoll Testchip und der POLDI Testchip, der im oberen Bereich liegt und eine Fläche von  $1960\mu\text{m} \times 760\mu\text{m}$  einnimmt. Diese Fläche wurde genutzt, um insgesamt 51 verschiedenartige Photodioden zu implementieren. Es wurden verschiedene Diodentypen, wie die N-Well, Deep N-Well und Triple-Well Diode implementiert. Außerdem unterscheiden sich die Polarisationsfilter in ihrer Metallisierung. Es wurden beispielsweise die Abstände, die Breiten sowie die Metallagen variiert. Der Transimpedanzverstärker, der für die Umwandlung der Photoströme in Spannungen benötigt wird, wurde ebenfalls auf dem POLDI Testchip integriert.



*Abbildung 7: Pad-Ring des POLDI Testchips [1]*

Um die integrierten Schaltungen mit Strukturen außerhalb des Testchips zu verbinden, werden Kontakte, sogenannte Pads, benötigt. Diese sind nebeneinander platziert, haben eine rechteckige Form und umfassen die integrierte Schaltung komplett. Dabei handelt es sich insgesamt um 60 Pads, die einen Pad Ring bilden. Da für den POLDI Testchip nur eine bestimmte Fläche zur Verfügung steht, sind die Anzahl der Pads begrenzt. Aufgrund dessen wurden alle Anoden der Photodioden auf Masse gelegt und nur die Kathoden getrennt herausgeführt. Ebenso wurden die Abstände zwischen den Pads geringgehalten, damit genügend Pads für die einzelne Kontaktierung aller Teststrukturen vorhanden sind. Zusätzlich verfügt jedes einzelne Pad eine Metallstruktur. Diese Metallstruktur besteht aus mehreren übereinanderliegenden Metallebenen auf höheren Lagen und einer Öffnung der Passivierung an der Chipoberfläche. Dadurch sind Verbindungen zwischen den Pads und den Kontakten, die sich außerhalb des Chips befinden, möglich. Solche Verbindungen werden durch eine Ultraschallschweißverbindungstechnik einzelner Drähte, auch Wire-Bonds genannt, realisiert. Für die Einkopplung der Versorgungsspannung und des Massepotentials werden vier Pads benutzt. Um Beschädigungen durch die Electro Static Discharge (ESD) Ladung und damit einhergehenden hohen Spannungen zu verhindern, wurden in den Pads Schutzschaltungen aus Dioden und Thyristoren verwendet. [1]

## 2.1 Diodenstrukturen

Die POLDI-Sensoren bestehen aus verschiedenen Dioden Strukturen und sollen auf ihre Eignung zur Verwendung als Photodiode untersucht werden. Dazu gehören die N-Well, Deep N-Well und Triple-Well Dioden, die im Folgenden beschrieben werden.

## 2.1.1 N-Well Diode

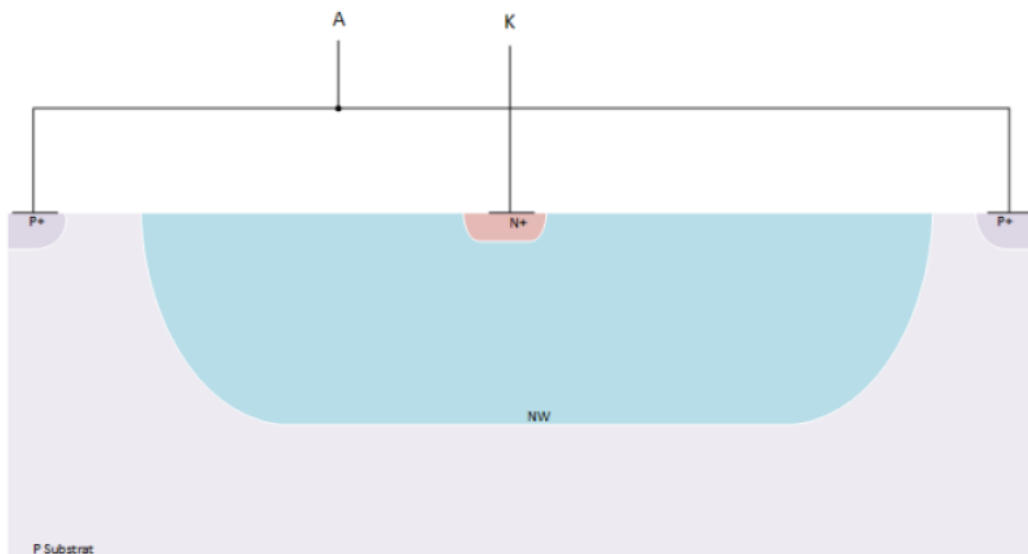


Abbildung 8: Querschnitt einer N-Well Diode [1]

In Abbildung 8 ist der Aufbau einer N-Well Diode im Querschnitt zu sehen. Hierbei bildet der Anoden Kontakt ein ringförmig P-dotiertes Diffusionsgebiet im P-Substrat und der Kathoden Kontakt ein ringförmig N-dotiertes Diffusionsgebiet im N-Well. Um eine N-Well Diode zu produzieren, wird in das globale Chip P-Substrat ein N-Well, das für die Implementierung von PMOS Transistoren verwendet wird, eingebracht. Dabei ist der PN-Übergang zwischen N-Well und P-Substrat für die Nutzung als Photodiode von besonderem Interesse. [1]

## 2.1.2 Deep N-Well Diode

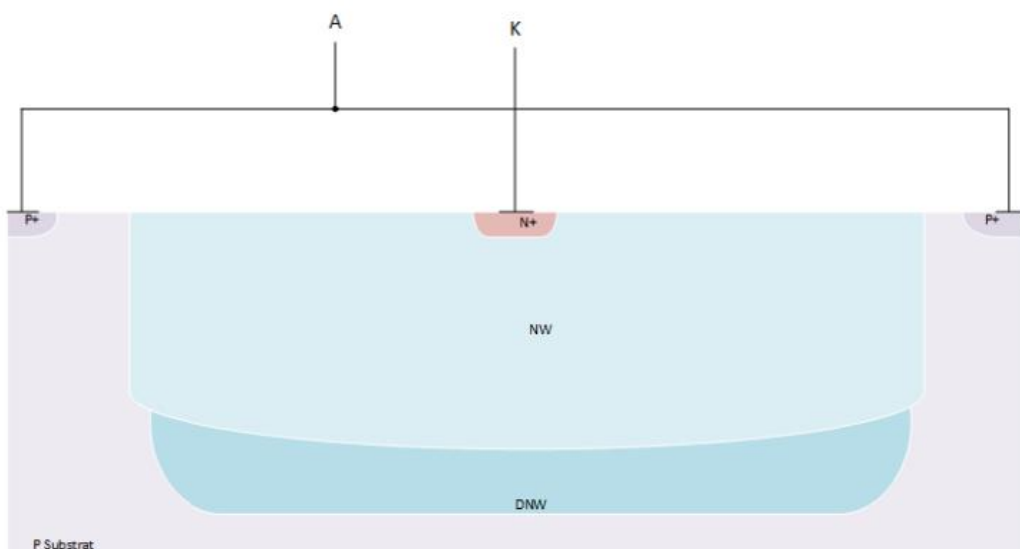


Abbildung 9: Querschnitt einer Deep N-Well Diode [1]

Abbildung 9 zeigt den Aufbau einer Deep N-Well Diode im Querschnitt. Der Anoden und Kathoden Kontakt haben dieselbe Anordnung wie bei der N-Well Diode. Jedoch gibt es hier ein Deep N-Well, welches tiefer als das reguläre N-Well liegt und dabei vollständig vom N-Well überdeckt wird. Dadurch wird der PN-Übergang zum Substrat weiter von der Oberfläche entfernt in die Tiefe des Chips verschoben. [1]

### 2.1.3 Triple-Well Diode

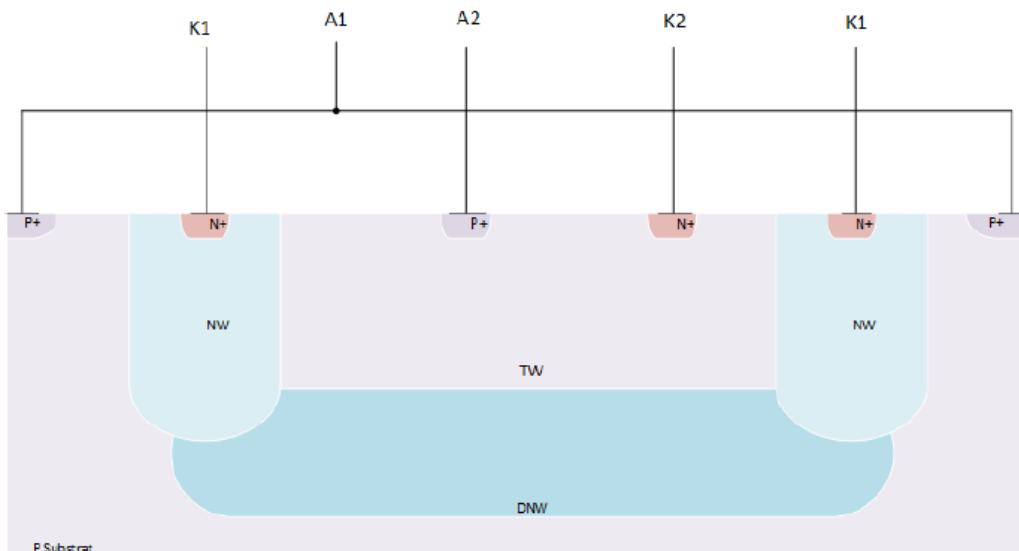


Abbildung 10: Querschnitt einer Triple-Well Diode [1]

In Abbildung 10 ist der Aufbau einer Triple-Well Diode zu sehen. Die Triple-Well Strukturen werden verwendet, um ein vom globalen Substrat isoliertes P-Well zu generieren. Hier befindet sich ebenfalls ein Deep N-Well, das sich jedoch nur teilweise mit den N-Well-Ringen überlappt. Außerdem wird im isolierten P-Well ein weiterer Anoden Kontakt im P-dotierten Diffusionsgebiet und ein weiterer Kathoden Kontakt im N-dotierten Diffusionsgebiet gebildet. Dadurch entstehen drei Dioden, die sich zwischen Deep N-Well und P-Substrat, zwischen P-Well und Deep N-Well und zwischen P-Well und N-Diffusion befinden. Diese PN-Übergänge sind parallelgeschaltet und liegen alle in unterschiedlichen Tiefen von der Chipoberfläche. [1]

## 2.2 Metallisierung

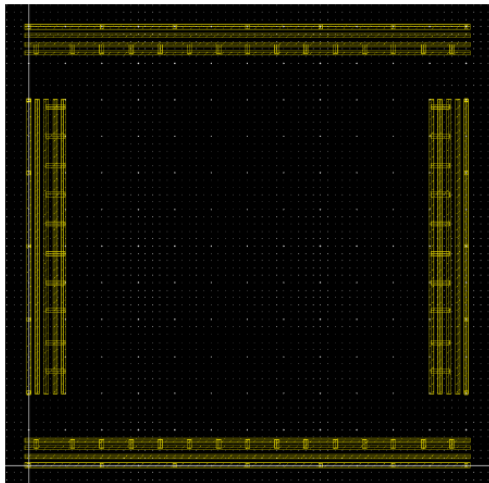


Abbildung 11: Metalllage 2 [1]

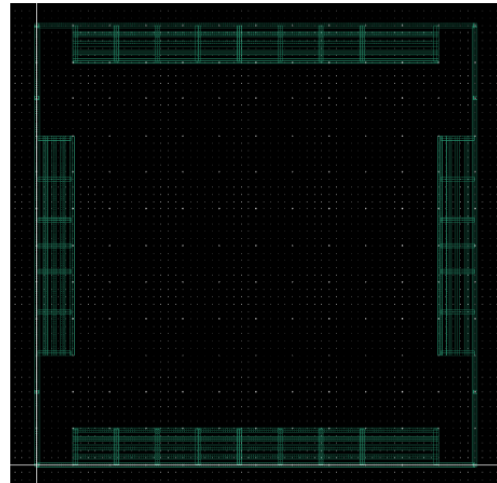


Abbildung 12: Metalllage 3 [1]

Die Abbildungen 11 und 12 zeigen die Metalllage 2 und die Metalllage 3. Auf der Metalllage 2 sind die beiden äußeren Leiterbahnen für die Signale zuständig. Die inneren Bahnen liegen auf Masse Potenzial und werden dazu benötigt, um die Density Regeln einzuhalten. Dagegen ist die äußere Leiterbahn auf der Metalllage 3 für das Anodensignal verantwortlich und liegt dabei auf Masse Potenzial. Die inneren Bahnen werden, wie auch bei der Metalllage 2, für die Einhaltung der Density Regeln benötigt und sind zudem mit dem Anodensignal kurzgeschlossen und liegen somit ebenso auf Masse Potenzial. [1]

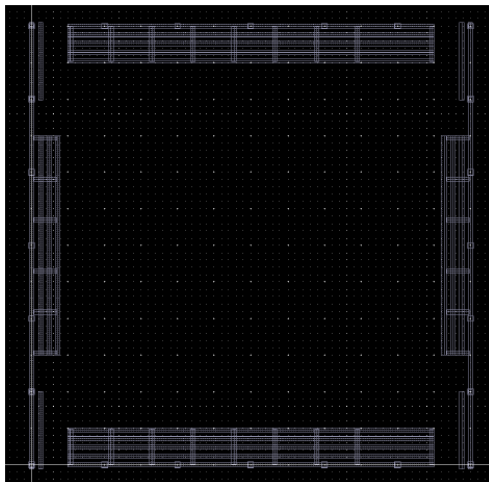


Abbildung 13: Metalllage 4 [1]

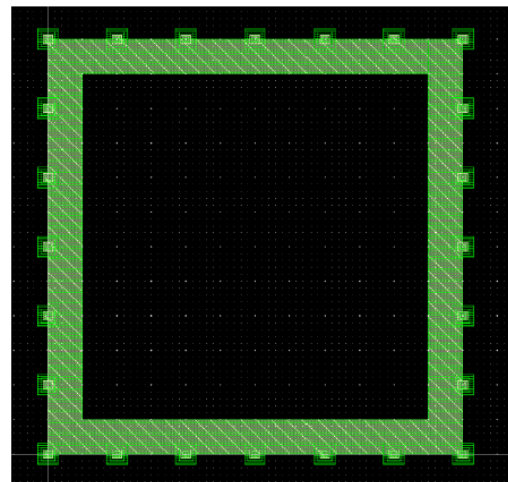


Abbildung 14: Metalllagen 5 bis 9 [1]

In den Abbildungen 13 und 14 sind die Metalllage 4 und die Metalllagen 5-9 zu sehen. Auf der Metalllage 4 sind die äußeren Leiterbahnen dafür zuständig, um die Signale auf der Metalllage 2 bei Kreuzungen zu überbrücken. Die inneren Bahnen liegen, wie auch zuvor, auf Masse Potenzial und werden benötigt, um die Density Regeln einzuhalten. Die Metalllagen 5 bis 9 haben Metallringe, die auf dem Anoden

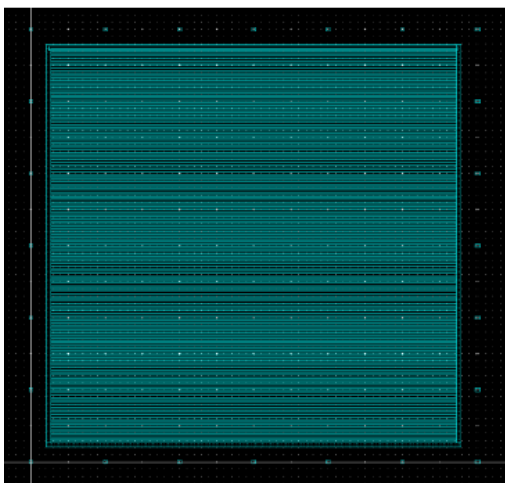
Potenzial liegen. Ausgenommen davon ist die Metalllage 6, die bei den Polfiltern verwendet wird. Diese Metalllage besitzt keine Ringe, um die Verletzung von Abstandsregeln zu vermeiden. [1]

## 2.3 Polarisationsfilter

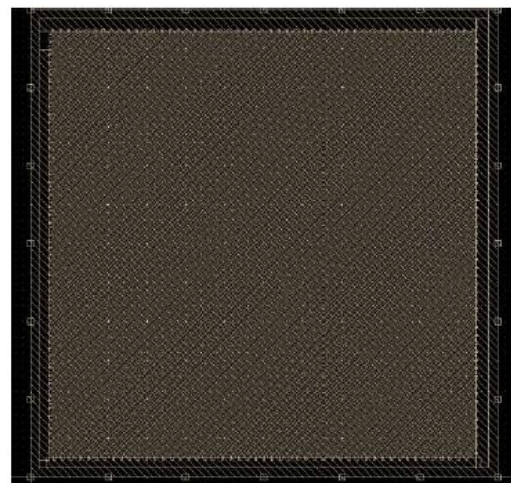
Der POLDI-Sensor besteht zwar eigentlich aus vier Photodioden, mit Polarisationsfiltern, die eine Ausrichtung von  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $135^\circ$  besitzen. Für die Charakterisierung der Teststrukturen im gewählten Prozess sind jedoch die Filter mit dem Winkel von  $0^\circ$  und  $45^\circ$  ausreichend, weil die übrigen Filter mit dem Winkel von  $90^\circ$  und  $135^\circ$  aus denselben Strukturen durch Rotation gebildet werden können. Bei den gefertigten Teststrukturen werden die Filter auf der Metalllage 1 und der Metalllage 6 realisiert, welche sich auf Masse Potenzial befinden. Zusätzlich unterscheiden sich die Filter in Bezug auf ihre Breite und ihren Abstand. Dadurch ist es möglich, die Wirkung dieser Parameter auf die Polarisationsfilterung zu testen. Die Tabelle 1 zeigt die Winkel der implementierten Filter und die gewählten Breiten, Abstände und Metalllagen. [1]

*Tabelle 1: Polarisationsfilter [1]*

Breite	Abstand	Winkel	Metall
100nm	100nm	$0^\circ$ ; $90^\circ$	M1
100nm	100nm	$0^\circ$ ; $90^\circ$	M6
190nm	190nm	$0^\circ$ ; $45^\circ$ ; $90^\circ$ ; $135^\circ$	M1
190nm	190nm	$0^\circ$ ; $45^\circ$ ; $90^\circ$ ; $135^\circ$	M6
290nm	290nm	$0^\circ$ ; $45^\circ$ ; $90^\circ$ ; $135^\circ$	M1
290nm	290nm	$0^\circ$ ; $45^\circ$ ; $90^\circ$ ; $135^\circ$	M6



*Abbildung 15: Polarisationsfilter  $0^\circ$  [1]*



*Abbildung 16: Polarisationsfilter  $45^\circ$  [1]*

In den Abbildungen 15 und 16 sind die Polarisationsfilter bei einer Ausrichtung von  $0^\circ$  und  $45^\circ$  zu sehen. Die Abbildung 17 zeigt die Anordnung von vier Photodioden mit Polarisationsfiltern entsprechender Winkelausrichtung. Dabei bilden diese vier Photodioden eine POLDI-Zelle (siehe Abbildung 17).

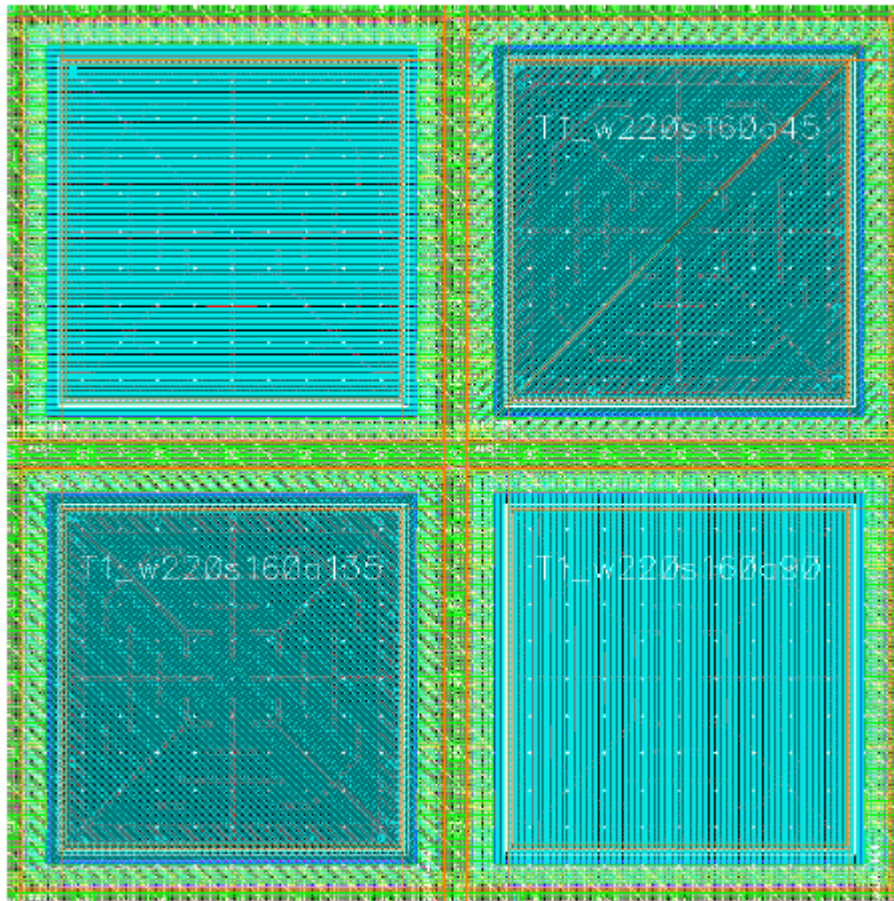


Abbildung 17: Übersicht einer POLDI Zelle [1]

## 2.4 Matrix

Da eine POLDI-Zelle mit der gewählten Größe von  $120\mu\text{m} \times 120\mu\text{m}$  nur einen geringen Photostrom liefert, werden mehrere Photodioden zusammengefasst und parallelgeschaltet. Dadurch kann ein höherer Photostrom erreicht werden. Eine POLDI-Teststruktur besteht aus vier POLDI-Zellen und wird dementsprechend aus einer  $4 \times 4$  Matrix gebildet. Dabei haben die Photodioden mit den entsprechenden Polfiltern folgende räumliche Anordnung.

$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ$
$135^\circ$	$90^\circ$	$45^\circ$	$0^\circ$
$90^\circ$	$135^\circ$	$0^\circ$	$45^\circ$
$45^\circ$	$0^\circ$	$135^\circ$	$90^\circ$

So eine  $4 \times 4$  Matrix POLDI-Teststruktur wird in Abbildung 18 gezeigt. Außerdem sind ebenso  $2 \times 2$  Matrix POLDI-Teststrukturen vorhanden, um die Photodioden ohne Einfluss der Polarisationsfilter charakterisieren zu können. Dabei liegt die Oberfläche der gesamten Struktur mit Ausnahme der aktiven Bereiche auf Masse Potenzial und ist mit der Toplevel Metalllage aus Aluminium bedeckt. Außerdem befinden sich die

Kontakte zu den Kathodensignalen an der linken Kante der Matrix und werden auf der Metalllage 8 an die Bond-Pads geführt. [1]

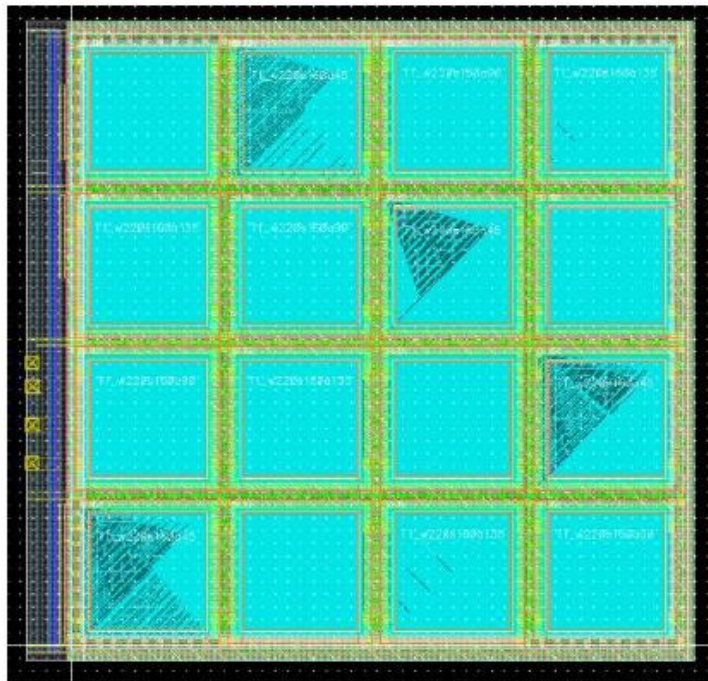


Abbildung 18: POLDI Teststruktur 4x4 Matrix [1]

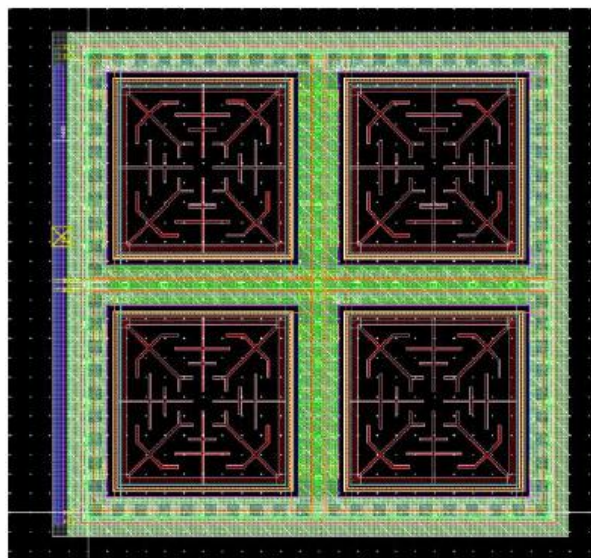


Abbildung 19: 2x2 Matrix ohne Filter [1]



In Abbildung 20 wird die Realisierung der Parallelschaltung der Photodioden gezeigt. Hierbei werden die Verbindungen über die Metalllage 2 und 3 gelegt. Die Anodenkontakte der Dioden sind alle kurzgeschlossen und liegen auf Masse Potenzial. Dagegen liegen alle Kathodenkontakte auf einem eigenen Kontakt und wechseln sich bei jeder waagerechten und senkrechten Linie paarweise ab. Hierbei haben sie folgende Bezeichnungen K0c für 0°, K1c für 45°, K2c für 90° und K3c für 135°. [1]

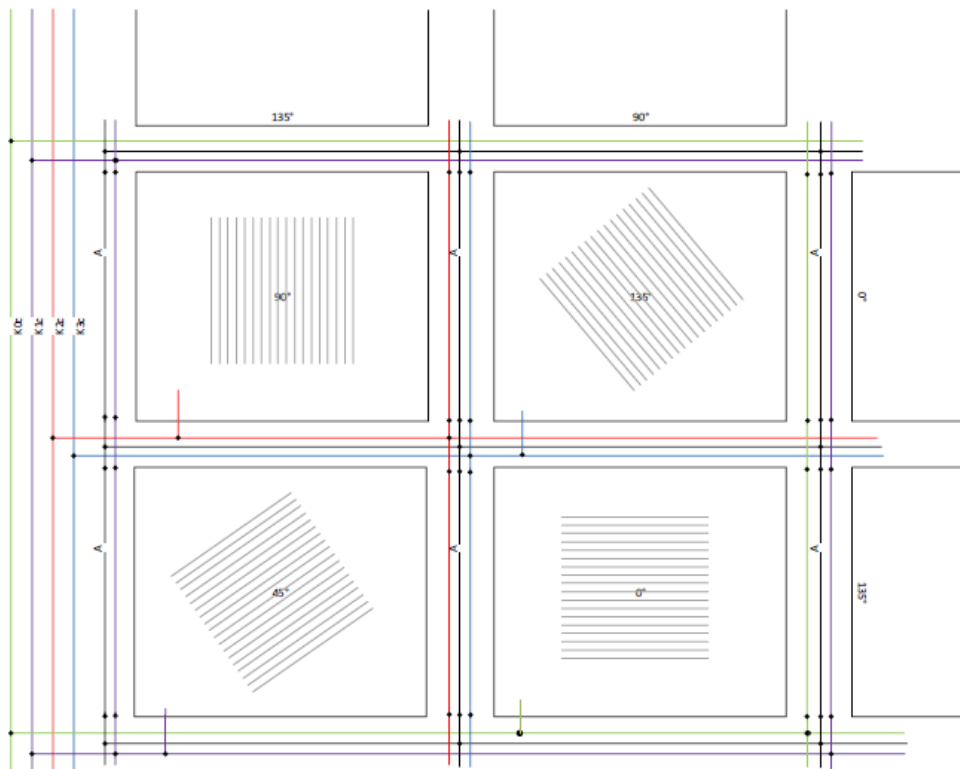


Abbildung 20: Prinzipielle Verdrahtung eines POLDI [1]

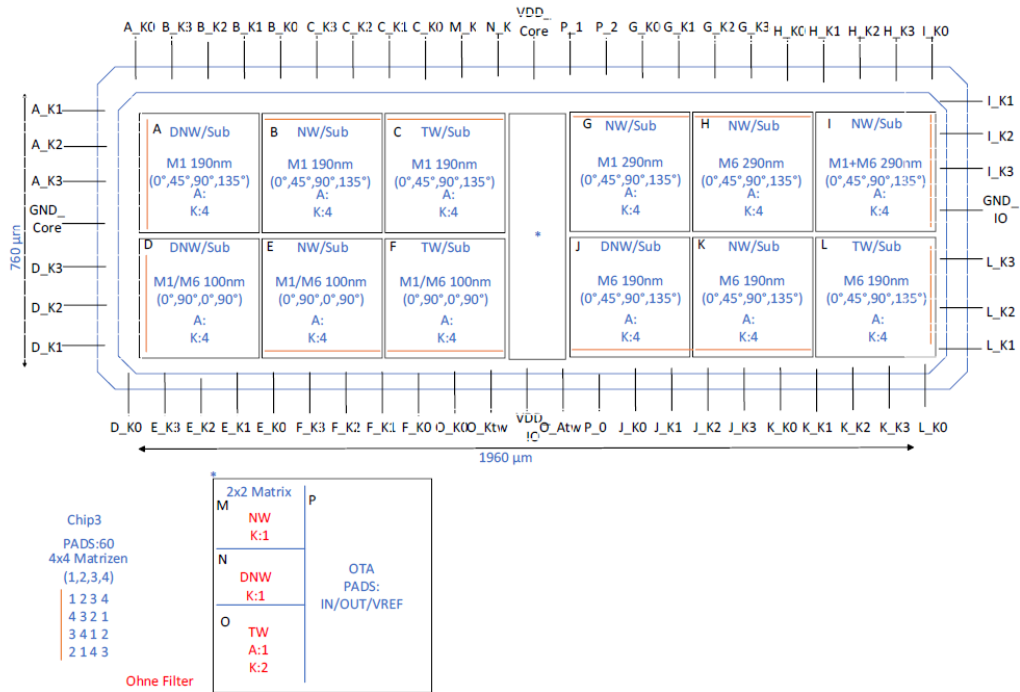


Abbildung 21: Übersicht des POLDI Testchip [1]

In Abbildung 21 ist eine Ansicht des gesamten POLDI Testchips nochmals dargestellt. Des Weiteren beschreibt die Tabelle 2 die Bezeichnungen der einzelnen Kontakte und ebenso die verwendeten Photodioden und Polarisationsfilter.

Tabelle 2: Dioden Übersicht [1]

#	Diodentyp	Polarisationsfilter			Kontakte
		Metalllage	Abstand/Breite	Winkel	
A	DNW	M1	190nm	0°,45°,90°,135°	A_K0;A_K1;A_K2;A_K3
B	NW	M1	190nm	0°,45°,90°,135°	B_K0;B_K1;B_K2;B_K3
C	TW	M1	190nm	0°,45°,90°,135°	C_K0;C_K1;C_K2;C_K3
D	DNW	M1vM6	100nm	0°,90°,0°,90°	D_K0;D_K1;D_K2;D_K3
E	NW	M1vM6	100nm	0°,90°,0°,90°	E_K0;E_K1;E_K2;E_K3
F	TW	M1vM6	100nm	0°,90°,0°,90°	F_K0;F_K1;F_K2;F_K3
G	NW	M1	290nm	0°,45°,90°,135°	G_K0;G_K1;G_K2;G_K3
H	NW	M6	290nm	0°,45°,90°,135°	H_K0;H_K1;H_K2;H_K3
I	NW	M1&M6	290nm	0°,45°,90°,135°	I_K0;I_K1;I_K2;I_K3
J	DNW	M6	190nm	0°,45°,90°,135°	J_K0;J_K1;J_K2;J_K3
K	NW	M6	190nm	0°,45°,90°,135°	K_K0;K_K1;K_K2;K_K3
L	TW	M6	190nm	0°,45°,90°,135°	L_K0;L_K1;L_K2;L_K3
M	NW	2x2 Matrix ohne Filter			M_K
N	DNW	2x2 Matrix ohne Filter			N_K
O	TW	2x2 Matrix ohne Filter			O_K0;O_Ktw;O_At看
P	Transimpedanzverstärker				P_0;P_1;P_2

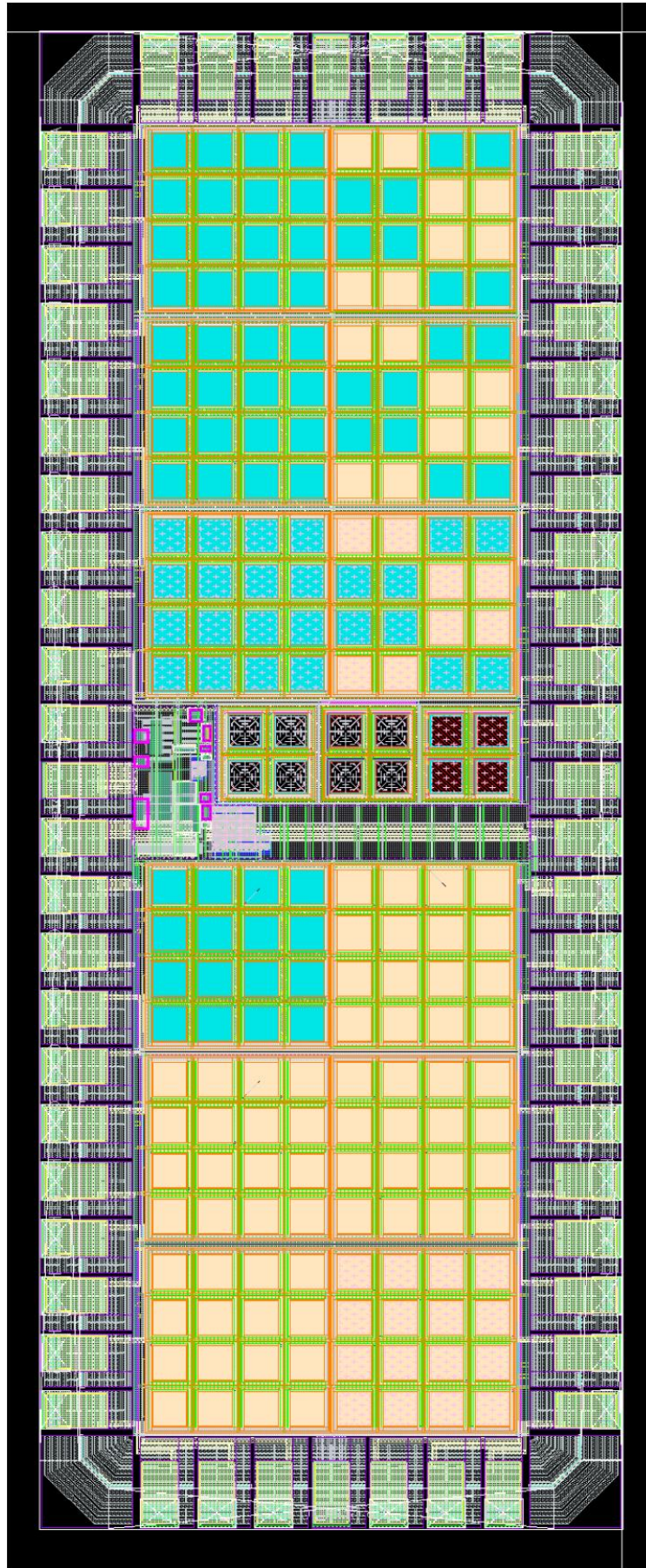


Abbildung 22: Gesamtansicht des POLDI Testchip [1]

## 2.5 Transimpedanzverstärker

Wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt, beinhaltet die Ausleseketten des POLDIs einen Transimpedanzverstärker. Dieser hat die Aufgabe den erzeugten Photostrom der Photodiode zur weiteren Signalverarbeitung in eine definierte Spannung zu wandeln. Hierbei hat die Bandbreite des Verstärkers, welche die maximale Reaktionsgeschwindigkeit des Systems auf Winkeländerung definiert, und das Rauschverhalten, welches die Auflösung zu kleinen Winkelwerten begrenzt, eine besondere Bedeutung für das gesamte System. [1]

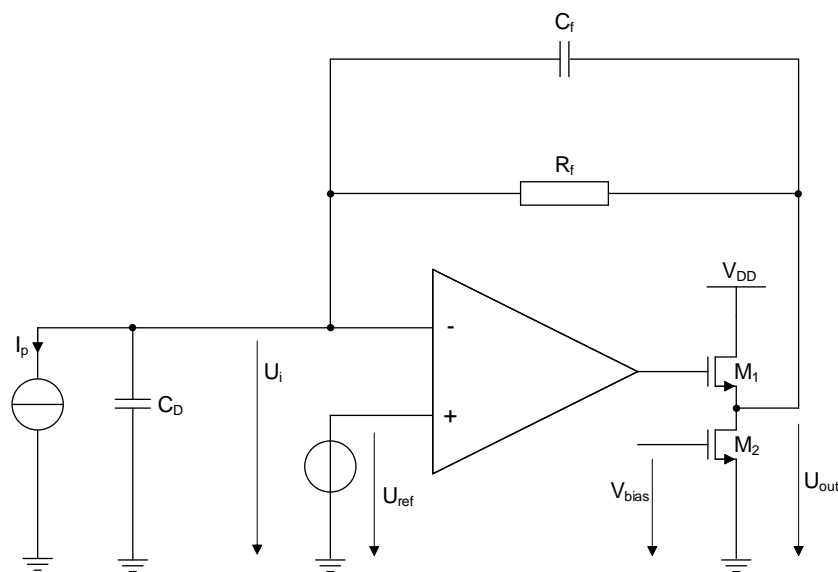


Abbildung 23: Schaltplan des Transimpedanzverstärkers [1]

In Abbildung 23 ist der Schaltplan des Transimpedanzverstärkers, welcher im Testchip implementiert ist, dargestellt. Hierbei werden die Photodioden in Sperrrichtung an den Transimpedanzverstärker angeschlossen. Das bedeutet, dass ihre Anoden mit Masse verbunden, während die Kathoden an den Eingang des Transimpedanzverstärkers geführt werden. Somit fließt der Photostrom  $I_p$  aus dem Eingang des Transimpedanzverstärkers in die Photodiode hinein. Die Stromquelle in Abbildung 23 soll dem Photostrom der Photodiode entsprechen, während die Diodenkapazität  $C_D$  die Kapazität des Sensors nachstellt. Sie befindet sich zwischen dem invertierenden Eingang des Verstärkers und Masse und beeinflusst die Stabilität und das Rauschverhalten der Schaltung. Der Transimpedanzverstärker wird durch den Feedbackwiderstand  $R_f$  zurückgekoppelt. Dabei bilden  $R_f$  und  $C_D$  einen RC-Filter, welcher die Bandbreite limitiert. Um die Schaltung zusätzlich zu stabilisieren, wird dem Feedbackwiderstand  $R_f$  noch eine Feedbackkapazität  $C_f$  parallelgeschaltet. Der Transimpedanzverstärker selbst ist als Transkonduktanzverstärker (OTA) mit hoher Verstärkung aufgebaut. Dadurch besteht zwischen den beiden Eingängen ein virtueller Kurzschluss, was bedeutet, dass die Spannung am invertierenden Eingang

des Verstärkers identisch mit der Spannung am nichtinvertierenden Eingang ist. Dementsprechend definiert die Referenzspannung auch die Sperrspannung der angeschlossenen Diode. Außerdem wird die Ausgangsspannung  $U_{out}$  durch die am nichtinvertierenden Eingang angelegte Referenzspannung und dem Spannungsabfall am Widerstand  $R_f$  bestimmt. Fließt kein Strom durch den Feedbackwiderstand  $R_f$ , fällt auch keine Spannung an ihm ab und somit liegt die Referenzspannung  $U_{ref}$  am Ausgang an. Am Ausgang des Verstärkers befindet sich ein Source-Folger. Dieser wird durch die NMOS Transistoren  $M_1$  und  $M_2$  realisiert, welche für einen niedrigen Ausgangswiderstand der Verstärkerschaltung sorgen. [1]

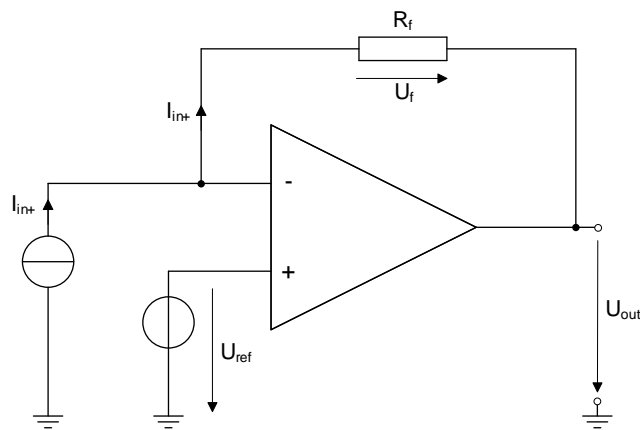


Abbildung 24: Strom- zu Spannungswandler

Für die Analyse des Transimpedanzverstärkers und der Herleitung der Kennlinie, wird die Feedbackkapazität und der Source-Folger, wie in Abbildung 24 dargestellt, vernachlässigt.

Auf Grund des hohen Eingangswiderstandes des Verstärkers fließt der komplette Eingangsstrom  $I_{in}$  durch den Feedbackwiderstand  $R_f$  und erzeugt den Spannungsabfall  $U_f$ , für den gilt:

$$U_f = R_f I_{in} \quad (2.1)$$

Gleichzeitig folgt aus dem Konzept des virtuellen Kurzschlusses, dass die Spannungsdifferenz zwischen dem invertierenden und nichtinvertierenden Eingang verschwindend gering ist und damit sowohl am nichtinvertierenden als auch am invertierenden Eingang die Referenzspannung  $U_{ref}$  anliegt.

Die Anwendung der Maschenregel auf den Ausgangskreis ergibt dann:

$$U_{out} - U_{ref} + U_f = 0 \quad (2.2)$$

Nach der Ausgangsspannung aufgelöst, ergibt sich:

$$U_{out} = U_{ref} - U_f \quad (2.3)$$

Setzt man den Ausdruck für  $U_f$  aus Gleichung (2.1) ein ergibt sich:

$$U_{out} = U_{ref} - R_f I_{in} \quad (2.4)$$

Für verschwindend geringe Eingangsströme liegt die Ausgangsspannung also bei der Referenzspannung  $U_{ref}$ . Mit steigendem Eingangsstrom  $I_{in}$  fällt die Ausgangsspannung ab entsprechend der invertierenden Beschaltung des Transimpedanzverstärkers. Fließt der Strom  $I_{in}$  aus dem Transimpedanzverstärker raus in die Quelle hinein, dreht sich das Vorzeichen von dem zweiten Term auf der rechten Seite der Gleichung (2.4) um und die Ausgangsspannung steigt an, statt zu fallen.

### 3 Platinen Entwurf

Da der POLDI-Testchip erfolgreich entworfen und produziert wurde, ist es nun notwendig den Chip in einen mechanisch stabilen Aufbau aufzunehmen. Hierzu muss eine PCB angefertigt werden, auf das der Testchip platziert wird. Zusätzlich werden alle Pads mit Kontakten, sogenannten Pins, durch eine Mikroschweißdraht-Verbindung, auch Wire-Bonding genannt, verbunden. Außerdem wird eine Schaltung entworfen, die verschiedene elektronische Bauteile enthält, um die Teststrukturen bestmöglich und fehlerfrei charakterisieren zu können. Der Entwurf der Platine wird durch die Software Altium Designer realisiert. Nachdem die PCB fertig gestellt und bestückt wurde, ist es möglich, die integrierten Dioden und den Transimpedanzverstärker durch entsprechende Messungen zu charakterisieren. Dabei ist es wichtig den Chip als Bare-Die ohne Gehäuse zu verwenden, damit der Chip optimal bestrahlt werden kann.

#### 3.1 Bauteile

Die entworfene Schaltung beinhaltet unterschiedliche Bauteile, die für verschiedene Zwecke benötigt werden. Um den Testchip mit Spannung zu versorgen, werden Stecker, auch Header genannt, benötigt. Dazu werden die Teststrukturen, die sich auf dem Testchip befinden, ebenso mit Steckleisten, sogenannte Jumper, verbunden, damit jede einzelne Diode gemessen werden kann. Außerdem sind Anschlüsse für die Messgeräte notwendig, um Messungen aufnehmen zu können.

### 3.1.1 Stecker



Abbildung 25: Steckverbinder 4 Pins [3]



Abbildung 26: Steckverbinder 2 Pins [3]

Für die Versorgungsspannungen VDD\_Core und VDD\_IO des POLDI-Testchips wird ein rechteckiger Steckverbinder mit vier Pins verwendet. Um den integrierten Transimpedanzverstärker ebenfalls mit Spannung zu versorgen, werden Steckverbinder mit zwei Pins verwendet. Diese Steckverbinder stammen vom Hersteller Molex (siehe Abbildungen 25 und 26).

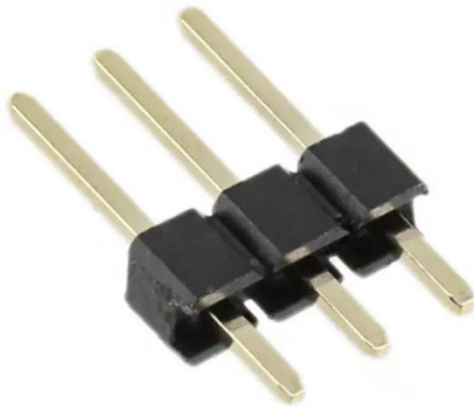


Abbildung 27: Jumper 3 Pins [4]

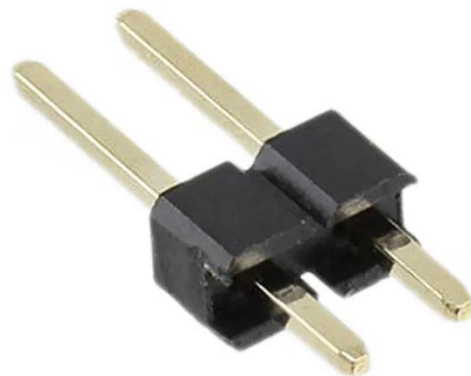


Abbildung 28: Jumper 2 Pins [4]

Da jede einzelne Teststruktur gemessen und charakterisiert werden soll, werden Kontakte benötigt, die mit den Pads des Chips verbunden sind. Dazu werden Steckleisten, auch Jumper genannt, verwendet. Diese Jumper haben zwei und drei Kontakte und werden z.B. vom Hersteller Würth Elektronik angeboten.



Abbildung 29: Koaxialsteckverbinder [5]

Um die Messungen der Dioden mit entsprechenden Messgeräten wie einem Oszilloskop auszuwerten, werden ebenfalls Stecker benötigt. Dazu wird ein Koaxialsteckverbinder, wie in Abbildung 29 dargestellt, vom Hersteller Molex verwendet.

### 3.1.2 Filter

Weil es sich bei den Messungen der Teststrukturen um kleine Ströme im pA Bereich handelt, sind diese empfindlich gegen äußere Faktoren wie zum Beispiel elektromagnetischen Feldern. Aus diesem Grund werden Filter zum Schutz benötigt, die direkt mit den Spannungsversorgungen verbunden werden. Dazu eignet sich der BNX002-11 Filter des Herstellers Murata Electronics, der in Abbildung 30 zu sehen ist. Wie in Abbildung 31 zu sehen ist, werden durch diesen Filter spektrale Störanteile in einem Frequenzband zwischen 2 und 200 MHz besonders stark gedämpft.



Abbildung 30: BNX002-11 Filter [6]

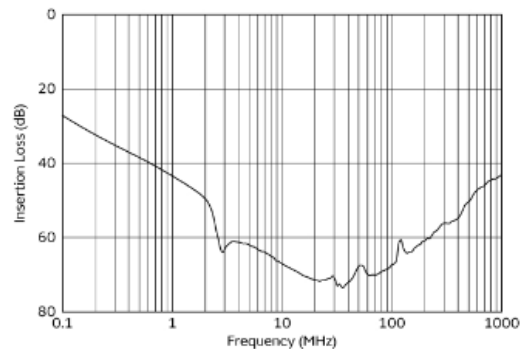


Abbildung 31: Eigenschaft der Dämpfung [6]



## 3.2 Bondplan

Nach Entwurf und Produktion der Leiterplatte beginnt die Montage der Bauteile. Dazu gehören auch die Schritte der Aufbau- und Verbindungstechnik, mit denen der Testchip auf die Platine integriert wird. Zu Beginn wird hierfür ein Bondplan erstellt. Dieser dient dazu, den Bonding-Ingenieuren wichtige und nützliche Informationen zu vermitteln. Hierzu gehören die Positionen der Pins auf der Platine und die dazugehörigen Pads auf dem Chip, mit denen eine Verbindung hergestellt werden soll. Dadurch wird sichergestellt, dass der Bonding-Ingenieur den Testchip korrekt auf die Platine platziert und die richtigen PADS auf dem Testchip mit den Pins auf der Platine durch dünne Bonddrähte verbindet bzw. bondet. Diese Vorgehensweise entspricht einer Mikroschweißdrahtverbindung und wird auch Wire-Bonding genannt.

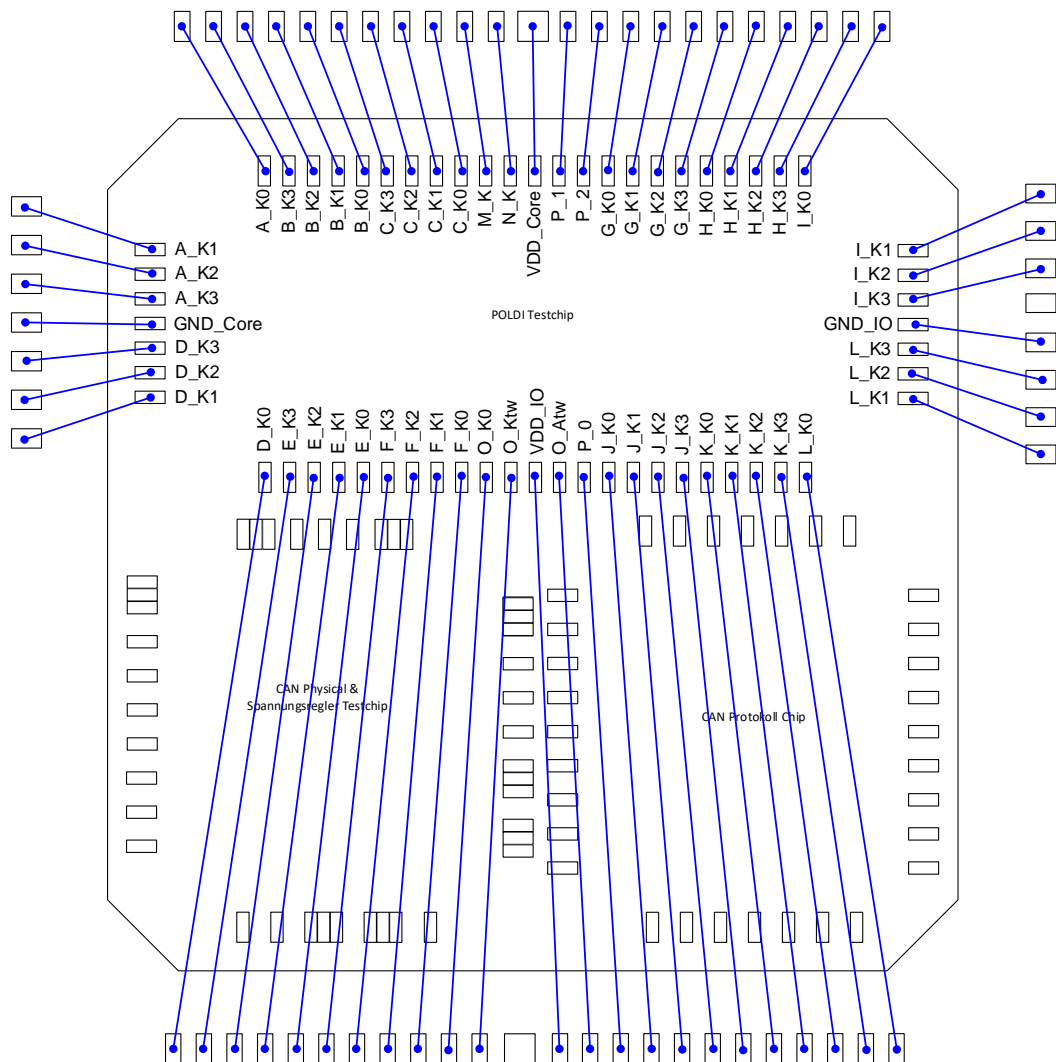


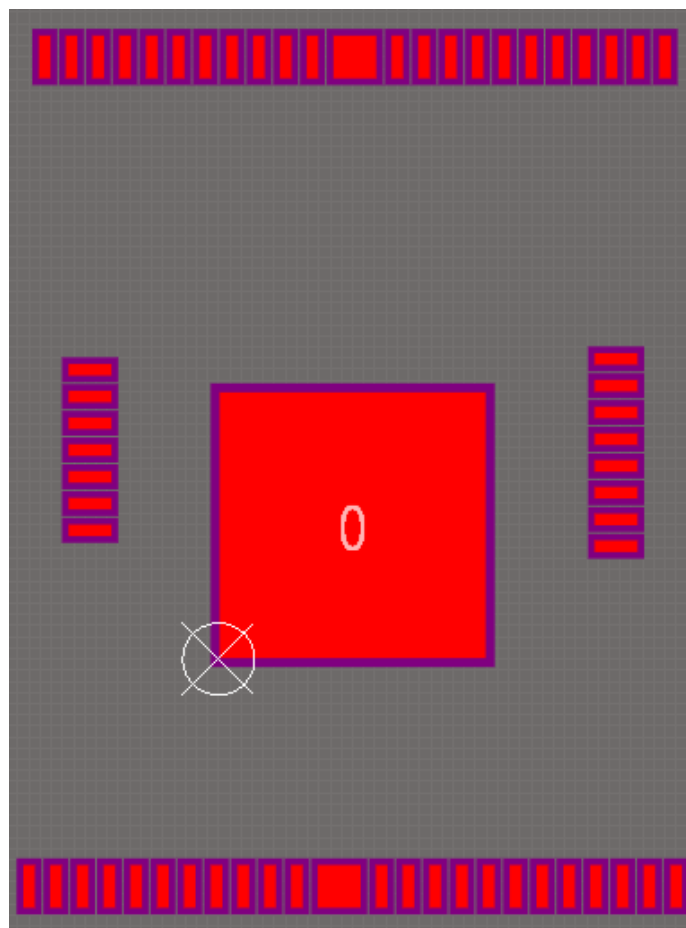
Abbildung 32: Bondplan

Abbildung 32 zeigt den Bond Plan, der mit dem Programm Microsoft Visio erstellt wurde. Hierbei ist es wichtig, den Testchip übersichtlich darzustellen und die verschiedenen Chips und deren Pads in deren vorhergesehenen Position

herauszustellen. Außerdem ist es wichtig, dass alle Bezeichnungen gut lesbar sind, um Fehler zu vermeiden. Andere Faktoren wie z.B. die maßstabsgetreue Größe und Abstände der Anschlüsse, sind bei dieser Darstellung nicht von besonderer Wichtigkeit.

### 3.3 Footprint

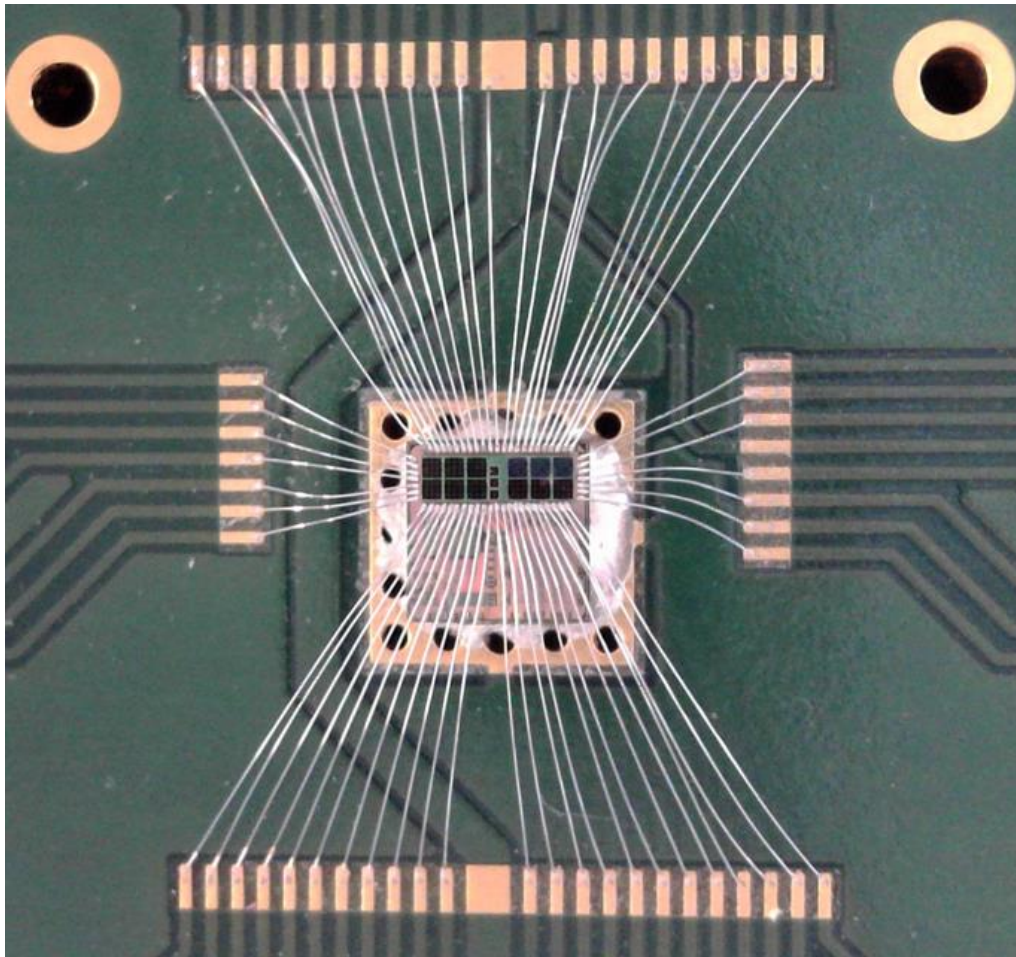
Um eine gute thermische Leitfähigkeit und eine wohldefinierte Masse zu gewährleisten, wird der Testchip auf eine Metallfläche an der Oberseite des PCBs geklebt. Des Weiteren sind ebenso Metallflächen für die Pins notwendig, damit alle Pads des Testchips mit diesen durch Wire-Bonding verbunden werden können. Aus diesem Grund wird ein Footprint des POLDI-Testchips erstellt. Dazu wird die Software Altium Designer benutzt.



*Abbildung 33: Footprint*

In Abbildung 33 ist der Footprint abgebildet. Dieser wird in einer dedizierten PCB Library erstellt. Die Metallflächen werden durch die roten Flächen dargestellt. Dabei werden sie von Lötstoppsmasken, die durch die violetten Flächen dargestellt werden, schützend und isolierend umhüllt. Bei der Erstellung des Footprints sind bestimmte Regeln und Forderungen einzuhalten. Die Metallfläche für den Testchip wird im Footprint etwas größer dargestellt (3mm x 3mm), damit der Chip bei der Platzierung

gut ausgerichtet werden und sich beim Prozess des Klebens die Lötpaste unter dem Testchip ausbreiten kann. Ebenfalls müssen die Pins, die auf der Platine platziert werden, eine bestimmte Länge und Breite haben, um eine fehlerfreie Verbindung zu gewährleisten und mehrmalige Bonding-Versuche zu ermöglichen. Hierbei besitzen alle Pins eine Fläche von  $500\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ . Jedoch wird für die Versorgungsspannung VDD\_Core eine breitere Fläche von  $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$  verwendet, um mehrere Bonddrähte platzieren zu können und eine breitere Leiterbahn anschließen zu können. Diese Pins werden nebeneinander mit einem Abstand von  $150\mu\text{m}$  zueinander platziert und bilden einen Pin-Array. Aufgrund der hohen Anzahl der Pins, sind die Pin-Arrays auf der oberen und unteren Kante des Footprints viel breiter als der Testchip selbst. Deshalb dürfen die Pin-Arrays auf der Platine weder zu nah noch zu weit zum Testchip platziert werden. Wenn man sie zu nah platzieren würde, hätte dies zur Folge, dass die Bonddrähte der äußeren Pins einen sehr großen Winkel besitzen bzw. so schräg wären, dass die Gefahr bestände, dass die Bondfüße mit benachbarten Pins in Kontakt kämen.



*Abbildung 34: Ansicht des gebondeten Testchips*

### 3.4 Schaltungsentwurf

Im nächsten Schritt wird zum Footprint des Testchips ein entsprechendes Symbol in einer dedizierten Schematic Library gezeichnet (siehe Abbildung 35). Hier ist es wichtig, dass die Nummerierungen und Bezeichnungen der Pins mit denen des Footprints übereinstimmen. Anschließend wird der Footprint mit dem Symbol zusammengeführt.

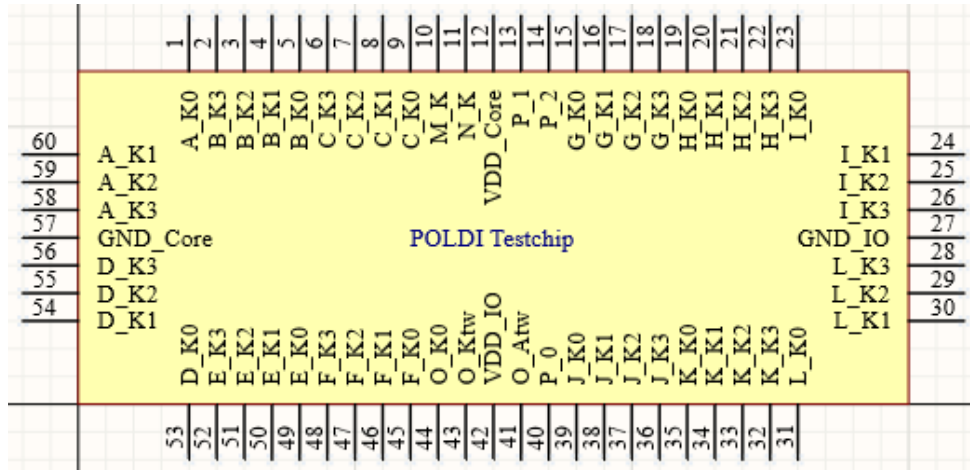


Abbildung 35: Symbol

#### 3.4.1 Schaltplan

Nun kann der Schaltplan als Schematic Zelle erstellt werden. Dazu werden die benötigten Bauteile aus der Onlinebibliothek (Manufacturer Part Search) gewählt und im Schematic platziert. Jedoch ist hierbei notwendig vorher auf die Verfügbarkeit und die korrekten Maße und Bauformen der Bauteile zu achten, da es ansonsten in späteren Projektphasen zu Komplikationen kommen kann. Die Verfügbarkeit der Bauteile wurde auf der Internetseite von Digi-Key Electronics geprüft und anschließend bestellt. Sobald alle Bauteile im Schematic platziert wurden, können die entsprechenden Pins der Bauteile miteinander verbunden werden. In Abbildung 36 ist der Schaltplan dargestellt. Jeder einzelne Kontakt der Dioden Strukturen des POLDI Testchips besitzt einen eigenen Jumper auf der Platine und wird mit dessen mittleren Kontakt verbunden. Zur besseren Übersichtlichkeit werden den Pins des Testchip Netznamen in Form von sogenannten Net Labels zugewiesen. Dadurch entfallen viele Verbindungslinien, weil eine implizite Verbindung zwischen Netzen mit derselben Bezeichnung gebildet wird. Zusätzlich wird einer der beiden äußeren Kontakte des jeweiligen Jumpers mit dem Koaxialstecker verbunden, während der andere Kontakt auf Masse gelegt ist. Dadurch ist es flexibel möglich, eine der integrierten Diode zu selektieren und über eine Koaxialleitung an ein Messgerät anzuschließen. Alle nicht verwendeten Dioden werden dann mit Masse verbunden.

Außerdem benötigen die Steckverbinder der Versorgungsspannungen jeweils einen LC-Filter zur Entstörung und werden mit diesen verbunden.

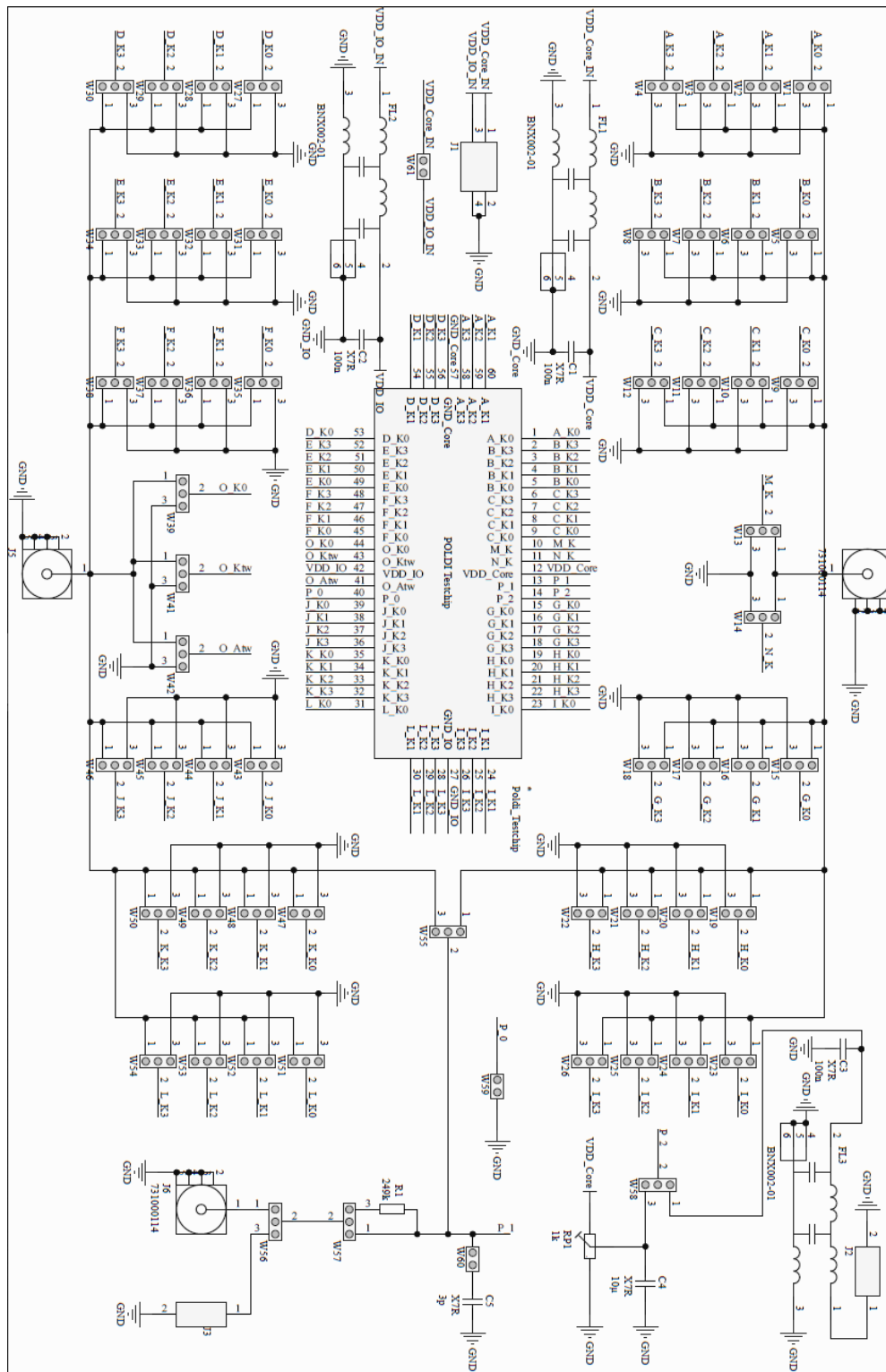


Abbildung 36: Schematic Schaltplan

### 3.4.2 PCB Layout

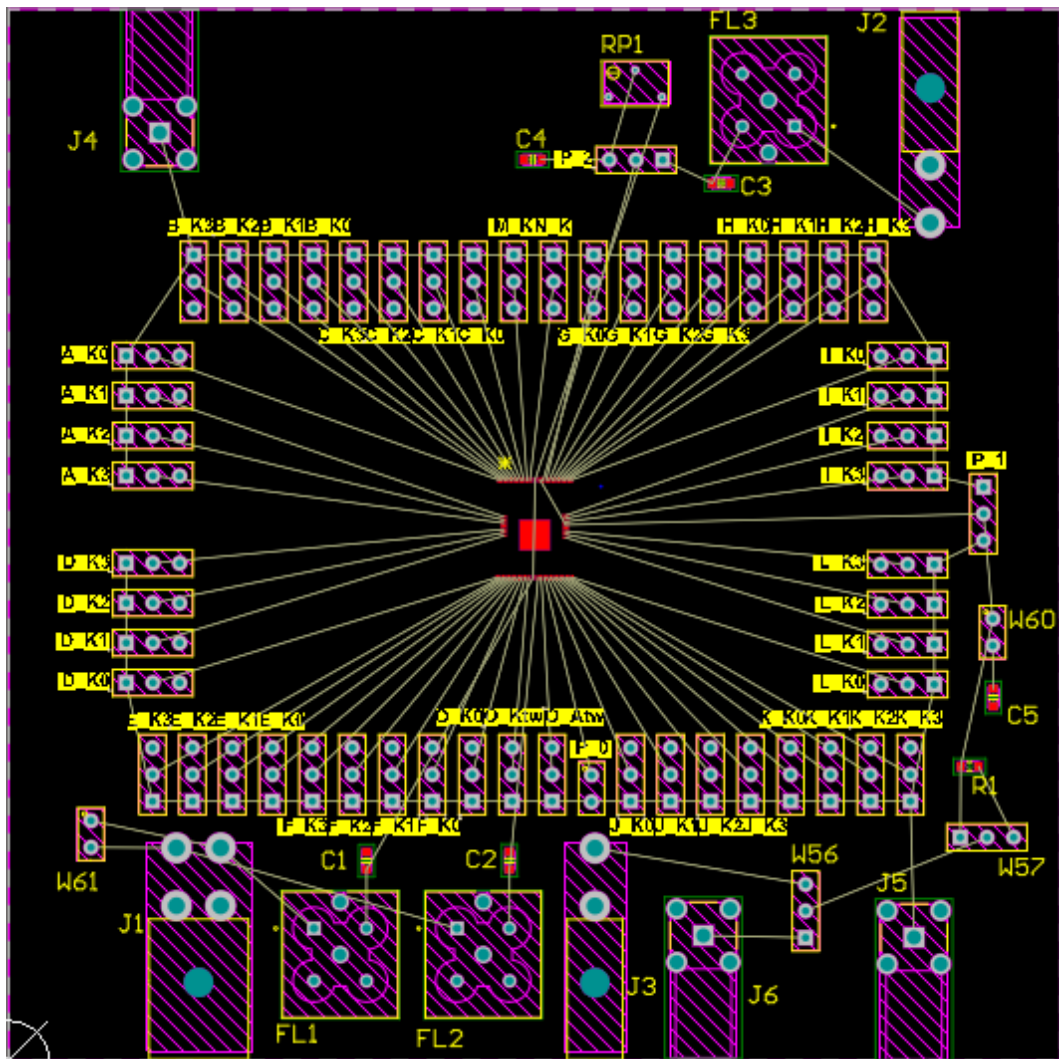


Abbildung 37: Ansicht der PCB

Der fertige Schaltplan kann für das Layout des PCB verwendet werden. Dazu wird erst ein PCB Dokument erstellt und die Fläche der Platine auf 100mm x 100mm festgelegt. Das PCB-Layout soll zwei Metallagen, eine an der Oberseite (Top Layer) und eine an der Unterseite (Bottom Layer) besitzen. Die Umriss und Bezeichnungen der Komponenten befinden sich auf dem Top Overlay und werden in gelber Farbe dargestellt. Nachdem der Schaltplan in das PCB-Dokument importiert wurde, erscheinen alle Komponenten in einem Bereich rechts neben der Platine. Im nächsten Schritt werden diese auf die eigentliche PCB-Fläche gezogen und so angeordnet, dass die Kontakte bestmöglich miteinander verbunden werden können, wie in Abbildung 37 zu sehen ist. Als Hilfestellung werden dabei die zu etablierenden Verbindungen durch Luftlinien angedeutet. Außerdem ist bei der Anordnung der Jumper darauf zu achten, dass die Abstände zueinander groß genug sind, um das Umstecken zu erleichtern. Ebenso werden die Stecker für die Spannungs-

versorgungen und die Koaxialsteckverbinder oben und unten an den Rändern platziert.

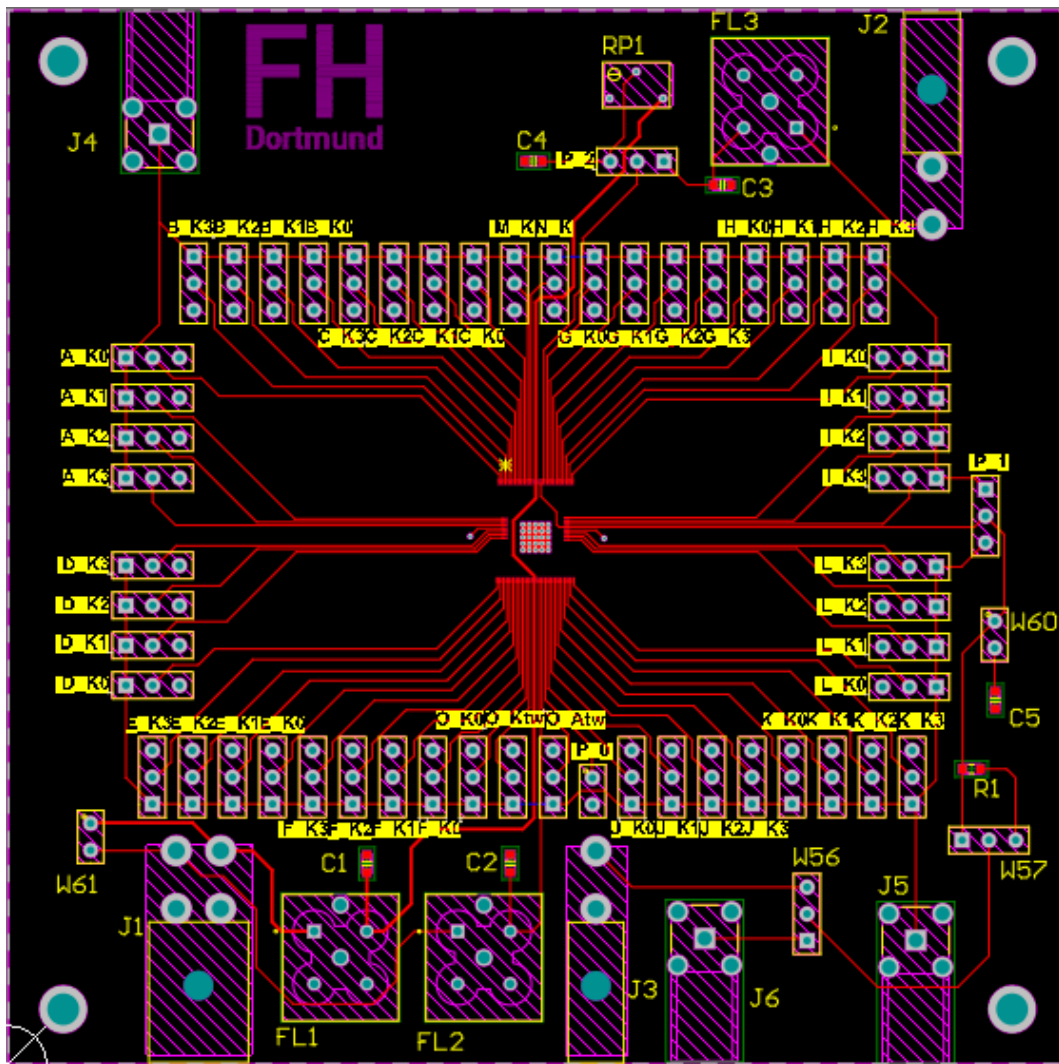


Abbildung 38: PCB Routing

Wie in Abbildung 38 zu sehen ist, werden anschließend die Verbindungen durch Leiterbahnen etabliert. Dieser Vorgang wird auch Routing genannt. Allerdings werden die GND Kontakte noch nicht miteinander verbunden. Hierbei wird darauf geachtet, dass Entwurfsregeln nicht verletzt werden. Diese Regeln werden unter dem Menüpunkt Design Rules definiert und können prinzipiell nach Belieben angepasst werden. Jedoch hat jeder Platinenhersteller auch gewisse Anforderungen, die beachtet und erfüllt werden müssen. In diesem Projekt gelten gewöhnliche Regeln, die bei vielen Herstellern üblich sind. Beispielsweise dürfen die Verbindungen sich weder kreuzen noch dürfen sie rechtwinklig verlaufen. Sie können jedoch auf dem Top und Bottom Layer gesetzt werden. Trotzdem wurden sie hier, soweit es möglich war, nur auf dem Top Layer gesetzt und so kurz wie möglich gehalten. Zwei kurze Leiterbahnen mussten auf den Bottom Layer gelegt werden, da sich ansonsten Verbindungen gekreuzt hätten. Die Verbindungen, die sich auf dem Top Layer

befinden, sind in rot dargestellt und die auf dem Bottom Layer sind in blau dargestellt. Außerdem benötigt das PCB-Layout Bohrlöcher an den Ecken, damit die Leiterplatte in einem Versuchsaufbau durch Schrauben festmontiert werden kann.

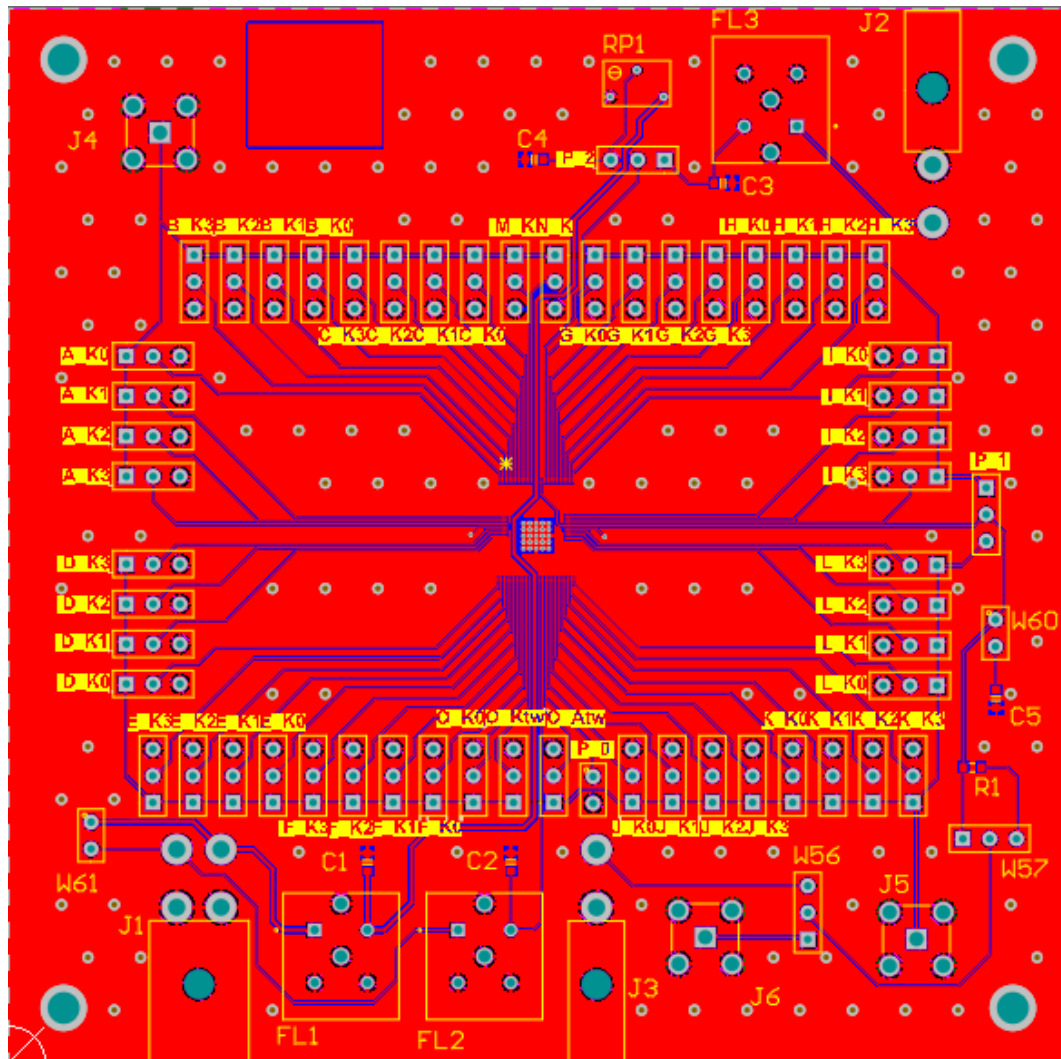


Abbildung 39: PCB Polygon Pour & Via Stitching

Als nächstes wurden die Masse Kontakte miteinander verbunden (siehe Abbildung 39). Dazu wurde auf der Ober- und Unterseite eine Fläche, auch Polygon Pour genannt, erstellt und zugleich auf GND gelegt. Somit befinden sich beide Seiten der Platine auf Masse Potenzial und sind mit den Masse Kontakten der Komponenten verbunden. Außerdem wurden auf den freien Flächen des PCB-Layout weitere Verbindungen zwischen den Lagen gelegt, was auch als Via Stitching bezeichnet wird, um elektromagnetische Störungen zu reduzieren. Nachdem die PCB fertig ist, wird ein DRC (Design Rule Check) durchgeführt. Hierbei wird geprüft, ob zuvor definierte Regeln verletzt werden. Sobald der DRC erfolgreich durchlaufen wurde und keine Fehler mehr angezeigt werden, ist das PCB-Layout fertig erstellt und kann hergestellt werden. Zum Abschluss werden Gerber Dateien exportiert. Diese dienen dazu, den Hersteller mit allen nötigen Informationen für die Produktion des PCB-Layouts zu



versorgen. Mit der Produktion der Leiterplatte wurde der Hersteller Eurocitruiits beauftragt.

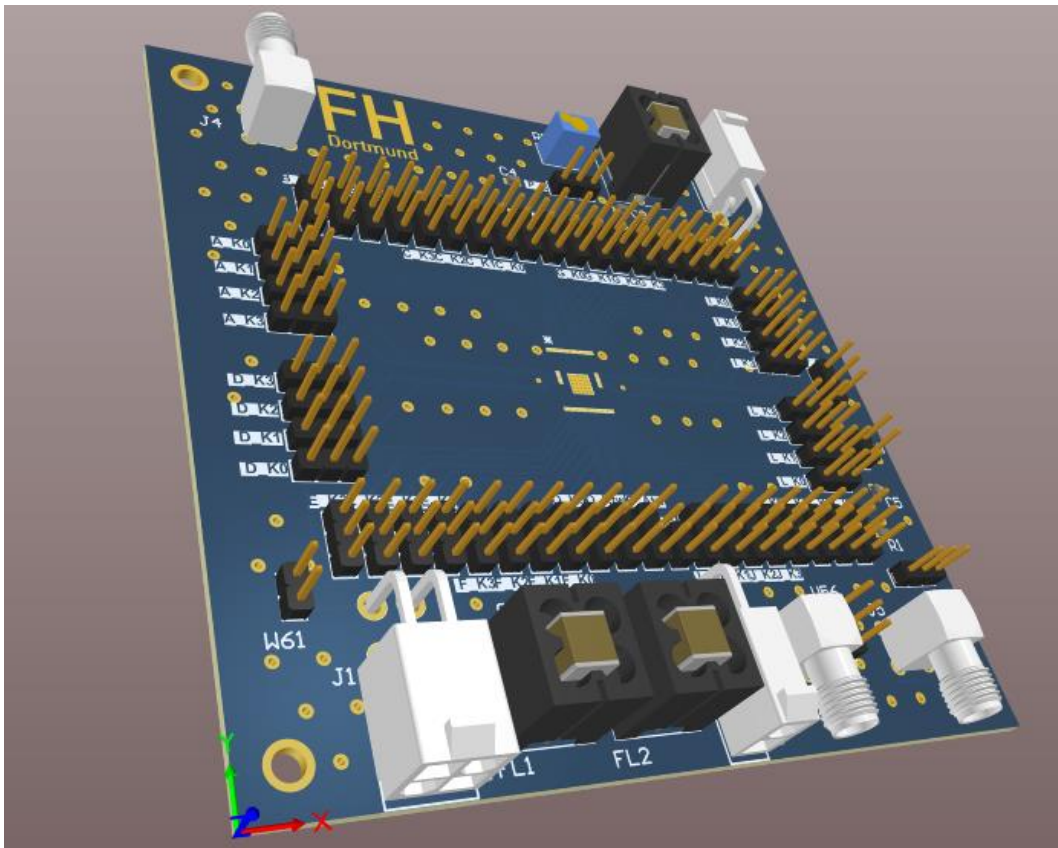


Abbildung 40: 3D Ansicht der PCB

## 4 Messsystem

Nachdem die Leiterplatte erfolgreich fertiggestellt wurde, können die Poldi-Zellen und der Transimpedanzverstärker durch Messungen charakterisiert werden. Dafür wird in diesem Kapitel das gesamte Messsystem vorgestellt, um dem Leser ein besseres Verständnis für die darauffolgenden Messungen zu geben und die Einarbeitung zu vereinfachen. Zunächst werden die Anschlüsse der Leiterplatte beschrieben. Anschließend folgt eine Darstellung des Messaufbaus und der verwendeten Messgeräte.

### 4.1 PCB für den POLDI-Testchip

In Abbildung 41 ist der Aufbau der Leiterplatte dargestellt. Sie besitzt mehrere Molex- und SMA-Anschlüsse. Die Versorgungsspannung wird an J1 angeschlossen, an J2 und J3 die Referenzspannung und die Eingangsspannung bzw. der Eingangsstrom des TIA. Ebenso kann an den Kontakt J6 ein Wechselsignal mit einem Funktionsgenerator eingespeist werden. Durch die Kontakte J3 und J4 ist es möglich, die Charakterisierung der Dioden auf einem Oszilloskop auszuwerten. Darüber hinaus

besitzt die Leiterplatte noch 2- bzw. 3-polige Steckverbinder. Durch diese können Spannungen bzw. Ströme gemessen werden oder Schaltungen auf der Platine mit Hilfe von Jumpern aktiviert bzw. deaktiviert werden. Eine Zusammenfassung aller Anschlüsse ist in Tabelle 3 dargestellt.

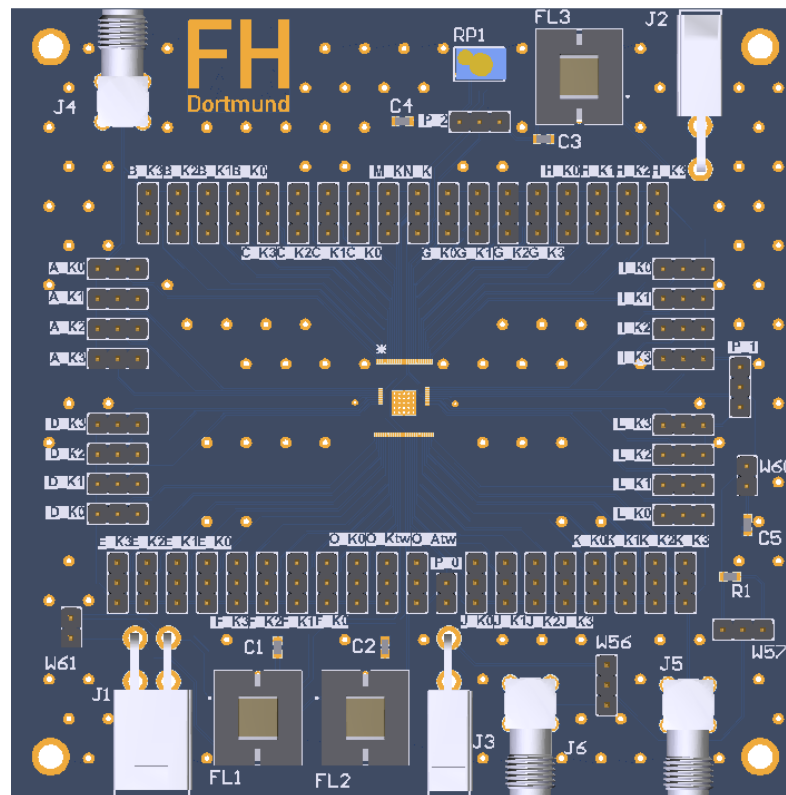


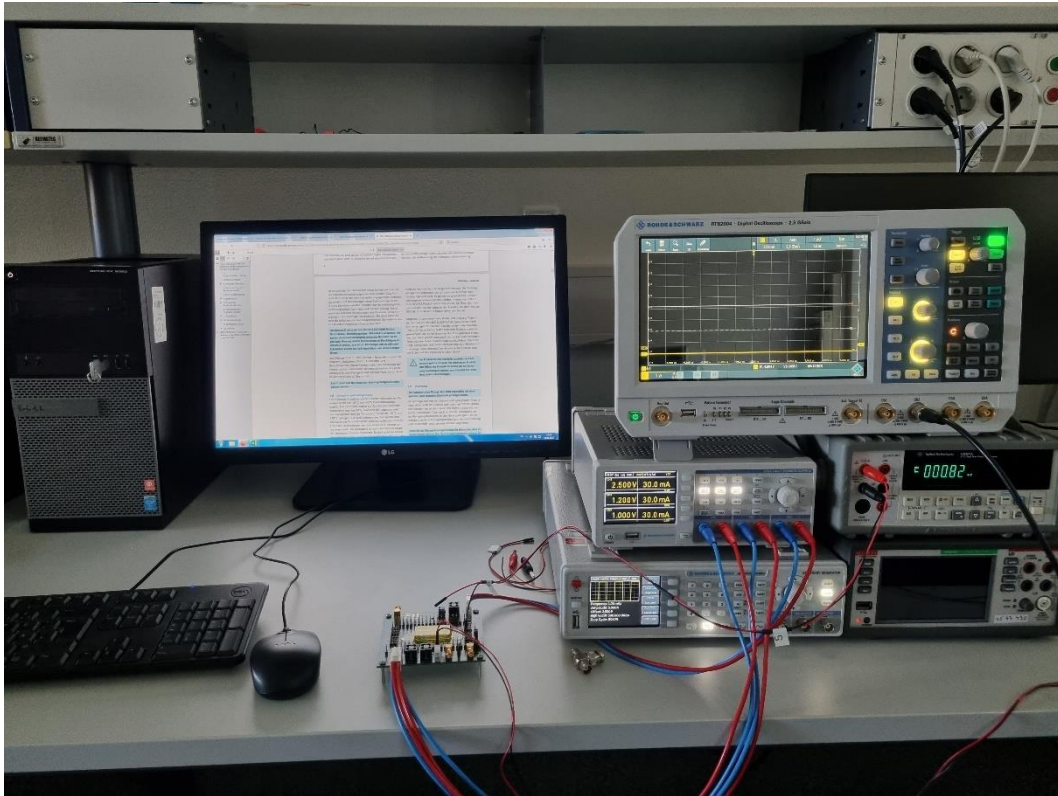
Abbildung 41: PCB Ansicht von oben

Tabelle 3: Auflistung der Anschlüsse

Anschlüsse	Bedeutung der Anschlüsse
J1	Anschluss der Versorgungsspannungen VDD_Core & VDD_IO
J2	Anschluss der Referenzspannung $U_{ref}$
J3	Anschluss einer Strom- und Spannungsversorgung für den TIA
J4	SMA Anschluss für die Dioden im oberen Bereich
J5	SMA Anschluss für die Dioden im unteren Bereich
J6	SMA Anschluss für einen Funktionsgenerator
P_0	Messung der Ausgangsspannung $U_{out}$ des TIA
P_1	Auswahl zwischen der Verbindung der Dioden mit dem TIA
P_2	Auswahl zwischen J2 und dem Potentiometer RP1
W56	Auswahl zwischen J3 & J6
W57	Zuschaltung des Widerstandes R1
W60	Zuschaltung des Kondensators C5
A_K0 – LK3	Messung der Photodioden mit unterschiedlichem Filter
M_K – O_AtW	Messung der Photodioden ohne Filter

## 4.2 Messaufbau für die Charakterisierung des Transimpedanzverstärkers

In Abbildung 42 ist das gesamte Messsystem für die Charakterisierung des Transimpedanzverstärkers zu sehen. Dieser besteht aus zwei Labornetzteilen mit jeweils drei Kanälen, einem Sourcemeter, zwei Multimetern, einem Funktionsgenerator, einem Oszilloskop und einem PC, der für die Dokumentierung der Ergebnisse benutzt wird. Dabei werden die Messergebnisse manuell dokumentiert. Eine Übersicht der verwendeten Messgeräte ist in Tabelle 4 gegeben.



*Abbildung 42: Messaufbau inklusive der Messgeräte*

Der Transimpedanzverstärker wird unter verschiedenen Betriebsbedingungen charakterisiert. Demnach ist es notwendig die richtigen Anschlüsse und Bauteile mit Hilfe von Jumpers zu aktivieren. Eine übersichtliche Darstellung der Schematic des Transimpedanzverstärkers wird in Abbildung 43 gezeigt, durch die es möglich ist, die unterschiedlichen Beschaltungen besser zu verstehen.

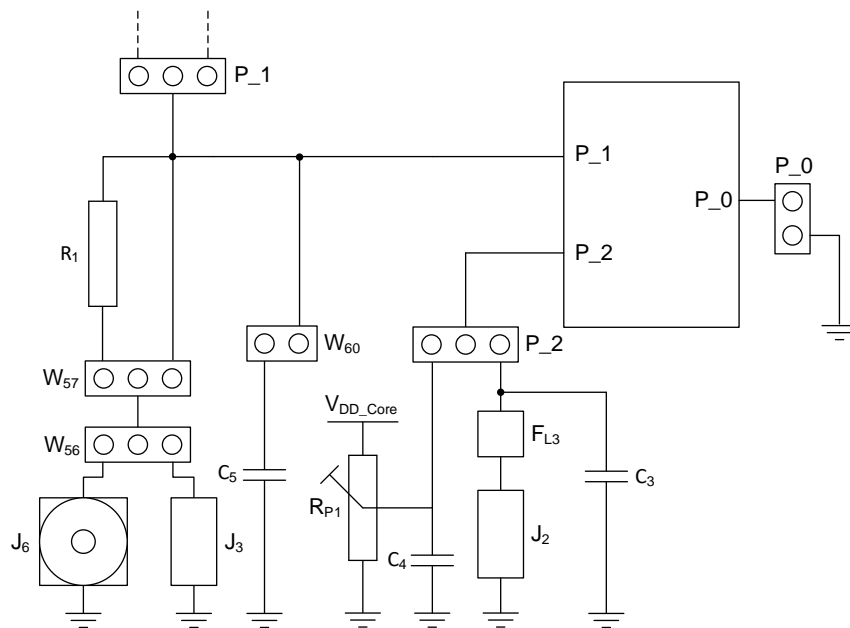


Abbildung 43: Schematic des Transimpedanzverstärkers

### 4.3 Messaufbau für die Charakterisierung der Poldi-Zellen

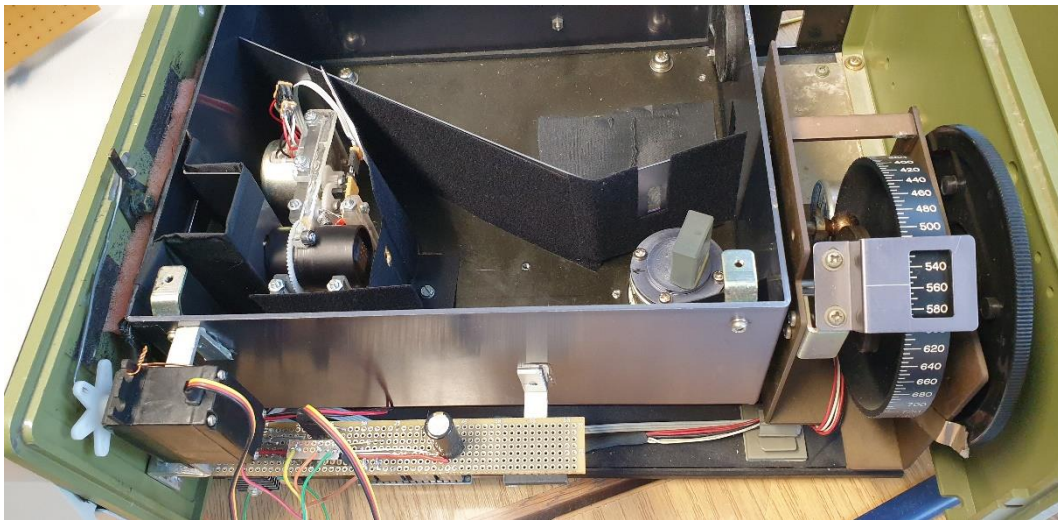


Abbildung 44: Lichtquelle

In Abbildung 44 ist die Lichtquelle dargestellt. Diese Lichtquelle ist in der Lage, das Licht in ihre verschiedenen Spektren zu zerlegen. Ebenso kann es durch einen Filter polarisiertes Licht erzeugen. Dadurch können die Poldi-Zellen durch Bestrahlung mit linearpolarisiertem Licht in unterschiedlichen Wellenlängen und Winkeln charakterisiert werden. Wie in Abbildung 43 zu sehen ist, besitzt die Lichtquelle einen Bereich, indem das zu bestrahlende Objekt platziert werden kann. Hier wurde die Platine so platziert, dass das Licht optimal auf den Poldi Chip trifft. Anschließend wurden die Kontakte einer Teststruktur mit dem Picoamperemeter verbunden, was es ermöglicht den erzeugten Photostrom zu messen. Die anderen drei Kontakte der

Teststrukturen wurden auf Masse gelegt. Die Lichtquelle und das Picoamperemeter sind mit dem PC verbunden und können über einem Tool gesteuert werden. Durch einen Programmcode wurden die Messungen automatisiert durchgeführt und die Ergebnisse konnten ausgelesen und gespeichert werden. Während der Messungen war es wichtig, dass kein Licht von außen in die Lichtquelle eindringt. Dazu wurde das Labor abgedunkelt und die Lichtquelle wurde abgedeckt. Gleichmaßen musste die Person, die sich im Labor aufgehalten und die Messungen durchgeführt hat, sich an einem Platz aufhalten und sich nicht viel bewegen, da niedrige Ströme gemessen wurden. Diese Ströme können durch äußere Faktoren, wie elektromagnetischen Feldern, beeinflusst werden. Auf diese Art und Weise wurden alle 53 Teststrukturen einzeln ausgemessen.

## 4.4 Messgeräte

*Tabelle 4: Auflistung der Messgeräte*

Anzahl	Bezeichnung	Hersteller	Typ
2x	Labornetzgerät	Rohde & Schwarz	HMC 8043
1x	Sourcemeeter	Keithley	2401
1x	Multimeter	Keithley	DMM6500
1x	Multimeter	Agilent Technologies	U3401A
1x	Funktionsgenerator	Rohde & Schwarz	HMF2525
1x	Oszilloskop	Rohde & Schwarz	RTB2004
1x	Picoamperemeter	Keithley	6482

### 4.4.1 Labornetzgerät Rohde & Schwarz HMC 8043

Das Labornetzgerät wird dazu verwendet, um die Leiterplatte mit Spannung zu versorgen. Da insgesamt vier Spannungen benötigt werden, eignet sich dieses Gerät mit drei unterschiedlichen Kanälen sehr gut für die Messungen. Hierbei werden die Kanäle CH1 und CH2 für die Versorgungsspannungen VDD\_Core und VDD\_IO an den Anschluss J1 angeschlossen. Der Kanal CH3 wird für die Referenzspannung  $U_{ref}$  an den Anschluss J2 angeschlossen. Zusätzlich wird für den Eingang des TIA eine weitere Spannung benötigt. Dazu wird ein weiteres Labornetzgerät verwendet und an den Anschluss J3 angeschlossen. Außerdem ist es möglich bei diesem Netzgerät Begrenzen für den maximalen Strom und die maximale Spannung einzustellen und jeden Kanal separat zu aktivieren und deaktivieren. Dadurch wird das Risiko einer Beschädigung des Testchips verringert.



Abbildung 45: Labornetzgerät Rohde & Schwarz HMC 8043 [7]

#### 4.4.2 Sourcemeter Keithley 2401

Für eine weitere Messung wird am Eingang des TIA statt einer Spannung ein Strom benötigt. Hierzu wird dieses Sourcemeter verwendet und an den Anschluss J3 angeschlossen. Mit dem Sourcemeter ist es möglich, kleine Ströme im nA Bereich einzustellen, um somit genauere Messergebnisse zu erhalten.



Abbildung 46: Sourcemeter Keithley 2401 [8]

#### 4.4.3 Multimeter Keithley DMM6500 und Agilent Technologies U3401A

Die Multimeter werden zur Aufnahme von statischen Messwerten verwendet und an den Anschluss P\_0 für die Ausgangsspannung  $U_{out}$  und an den Anschluss P\_1 für die Eingangsspannung  $U_{in}$  angeschlossen. Die Messergebnisse werden manuell dokumentiert.



Abbildung 47: Keithley DMM6500 [9]



Abbildung 48: Agilent Technologies U3401A [10]

#### 4.4.4 Funktionsgenerator Rohde & Schwarz HMF2525

Dieser Funktionsgenerator eignet sich für dynamische Messungen. Hierbei ist es möglich verschiedene Signalformen wie Sinus, Rechteck etc. und Parameter wie Frequenz, Periode, Amplitude etc. einzustellen. Der Generator wird an den SMA-Anschluss J6 angeschlossen. Dazu wird ebenso der Widerstand  $R_1$  durch eine Jumperkonfiguration an den Eingang des Transimpedanzverstärkers zugeschaltet. Dadurch verhält sich der Transimpedanzverstärker wie ein inventierender Spannungsverstärker.



Abbildung 49: Funktionsgenerator Rohde & Schwarz HMF2525 [11]

#### 4.4.5 Oszilloskop Rohde & Schwarz RTB2004

Für die Aufnahme der dynamischen Messungen wird ein Oszilloskop eingesetzt. Dadurch können die Messergebnisse sehr gut visuell dargestellt werden. Das Oszilloskop besitzt vier Kanäle wovon zwei benutzt werden. Der erste Kanal wird mit dem Funktionsgenerator verbunden und der zweite Kanal wird an den Anschluss P\_0 angeschlossen, an dem das Spannungsausgangssignal  $U_{out}$  des Transimpedanzverstärkers anliegt. Dadurch kann man den Eingangs- und Ausgangssignal in einem Bild darstellen. Außerdem ist es möglich, bestimmte Bereiche der Signale zu markieren und dementsprechend auszuwerten.

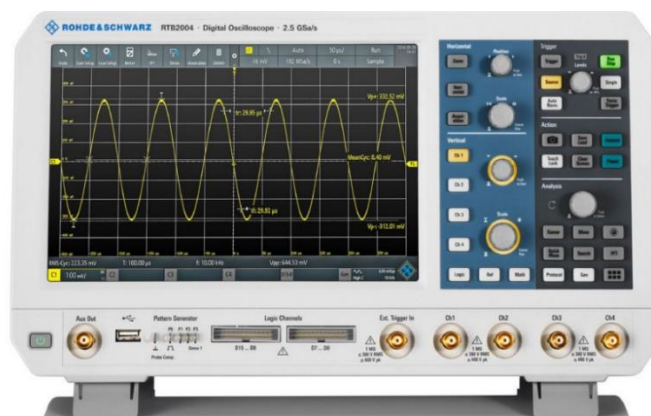


Abbildung 50: Oszilloskop Rohde & Schwarz RTB2004 [12]

#### 4.4.6 Picoamperemeter Keithley 6482

Um die erzeugten Photoströme der Photodiodenzellen zu messen, wurde ein Picoamperemeter verwendet. Mit diesem Picoamperemeter können sehr niedrige Ströme in hoher Genauigkeit gemessen werden. Außerdem kann das Picoamperemeter durch eine Schnittstelle mit einem PC verbunden werden, um automatisierte Messungen durchzuführen.



Abbildung 51: Picoamperemeter Keithley 6482 [13]

## 5 Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der unterschiedlichen Messungen vorgestellt. Hierbei werden die Messungen zunächst erläutert, sowie deren Schaltungen und Berechnungen aufgezeigt.

### 5.1 Charakterisierung des Transimpedanzverstärkers

Der Transimpedanzverstärker wird sowohl mit Hilfe eines Spannungssignals als auch mit Hilfe eines Stromsignals charakterisiert. Bei Verwendung des Spannungseingangssignals wird ein zusätzlicher Widerstand verwendet, der zwischen der Spannungsquelle und dem Eingang des Transimpedanzverstärkers geschaltet wird.

#### 5.1.1 Statische Messungen

Abbildung 52 zeigt die Beschaltung des Transimpedanzverstärkers bei Verwendung eines Eingangsspannungssignals. Im Folgenden soll eine Formel für das Übertragungsverhalten der Schaltung hergeleitet werden, welche helfen soll, die Messwerte auf Ihre Richtigkeit zu prüfen.



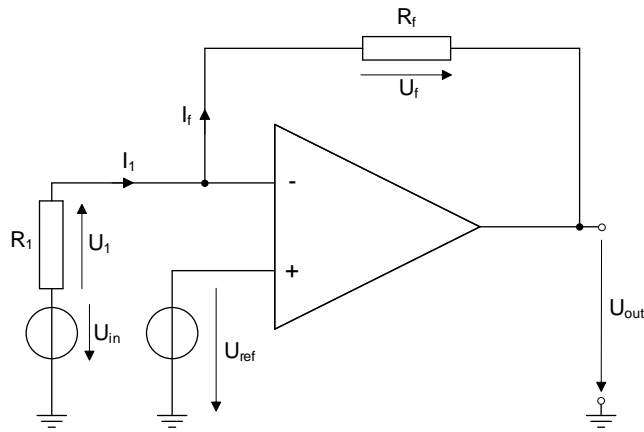


Abbildung 52: Schaltung des Transimpedanzverstärkers mit Eingangsspannung

Die Anwendung der Maschenregel auf die Eingangsmasche der Schaltung ergibt:

$$0 = -U_{in} + U_1 + U_{ref} \quad (5.1)$$

Nach dem Spannungsabfall  $U_1$  über den Eingangswiderstand  $R_1$  aufgelöst, ergibt sich:

$$U_1 = U_{in} - U_{ref} \quad (5.2)$$

Dadurch kann der Strom  $I_1$  durch den Widerstand  $R_1$  berechnet werden. Auf Grund des hohen Eingangswiderstands des OTA fließt der Strom  $I_1$  komplett durch den Widerstand  $R_f$  und entspricht damit auch dem Strom  $I_f$ .

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_{in} - U_{ref}}{R_1} = I_f \quad (5.3)$$

Die Anwendung der Maschenregel auf die Ausgangsmasche der Schaltung ergibt:

$$0 = -U_{ref} + U_f + U_{out} \quad (5.4)$$

Nach der Ausgangsspannung  $U_{out}$  ergibt sich:

$$U_{out} = U_{ref} - U_f \quad (5.5)$$

Die Spannung  $U_f$  ergibt sich aus dem Stromfluss  $I_f$  und dem Widerstand  $R_f$ .

$$U_{out} = U_{ref} - R_f I_f \quad (5.6)$$

Den Strom  $I_f$  aus Gleichung 5.3 eingesetzt ergibt:

$$U_{out} = U_{ref} - R_f \frac{U_{in} - U_{ref}}{R_1} \quad (5.7)$$

$$U_{out} = U_{ref} - \frac{R_f}{R_1} (U_{in} - U_{ref}) \quad (5.8)$$

Die maximale Ausgangsspannung  $U_{out,max}$  ergibt sich aus der minimalen Eingangsspannung  $U_{in,min}$  zu:

$$U_{out,max} = U_{ref} - \frac{R_f}{R_1}(U_{in,min} - U_{ref}) \quad (5.9)$$

Durch Umformung und Einsetzung der maximal möglichen Ausgangsspannung  $U_{out,max} = 2,5V$  und der verwendeten Werte für  $U_{ref} = 1V$ ,  $R_f = 1M\Omega$ ,  $R_1 = 249k\Omega$  ergibt sich die minimale Eingangsspannung  $U_{in,min}$ :

$$U_{in,min} = U_{ref} - \frac{U_{out,max} - U_{ref}}{\frac{R_f}{R_1}} = 1V - \frac{2,5V - 1V}{\frac{1M\Omega}{249k\Omega}} \quad (5.10)$$

$$U_{in,min} \approx 0,625V \quad (5.11)$$

Durch Einsetzung der minimal möglichen Ausgangsspannung  $U_{out,min} = 0V$  ergibt sich die maximal Eingangsspannung  $U_{in,max}$ :

$$U_{in,max} = U_{ref} - \frac{U_{out,min} - U_{ref}}{\frac{R_f}{R_1}} = 1V - \frac{0V - 1V}{\frac{1M\Omega}{249k\Omega}} \quad (5.12)$$

$$U_{in,max} \approx 1,25V \quad (5.13)$$

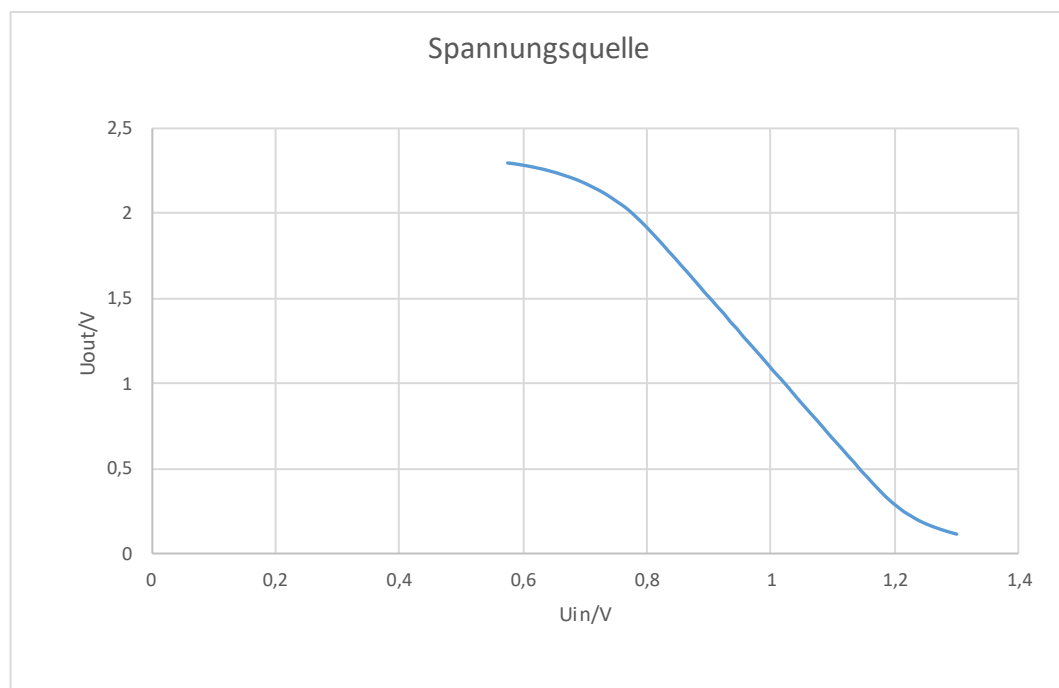


Abbildung 53: Ausgangskennlinie des Transimpedanzverstärkers mit Eingangsspannung

In Abbildung 53 ist die Kennlinie des Transimpedanzverstärkers dargestellt, die sich bei der in Abbildung 52 gezeigten Beschaltung in einem Eingangsspannungsbereich von ca. 0,6-1,3 V ergibt. Der Abbildung 53 ist zu entnehmen, dass die Kennlinie im

Eingangsspannungsbereich von ca. 0,8-1,1 V linear verläuft. Für sehr kleine und sehr große Spannungen weicht die Kennlinie vom linearen Verlauf, was darin begründet ist, dass die Transistoren im Ausgangspfad des Transimpedanzverstärkers aus der Sättigung getrieben werden.

Im nächsten Schritt wird ein Sourcemeter verwendet, um den Transimpedanzverstärker mit einem Eingangstromsignal zu versorgen. Zunächst wird ein positiver Strom eingespeist, wie in Abbildung 54 dargestellt.

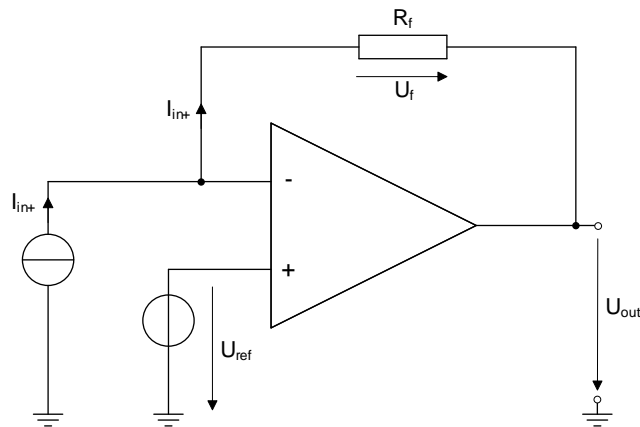


Abbildung 54: Schaltung des Transimpedanzverstärkers mit positivem Eingangsstrom

Mit Hilfe der Formel (2.4) aus dem Kapitel 2.5 lässt sich der maximale positive Eingangstrom  $I_{in+}$  wie folgt berechnen:

$$I_{in+} = -\frac{U_{out,min} - U_{ref}}{R_f} = -\frac{0V - 1V}{1M\Omega} \quad (5.14)$$

$$I_{in+} = 1\mu A \quad (5.15)$$

Anschließend wird der Transimpedanzverstärker mit einem negativen Eingangstromsignal gespeist, wie in Abbildung 55 zu sehen ist.

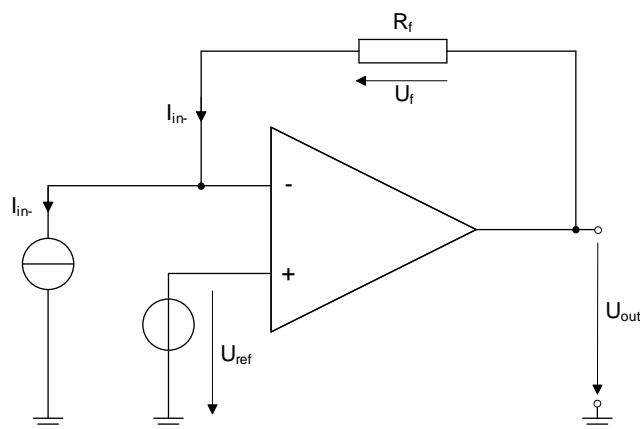


Abbildung 55: Schaltung des Transimpedanzverstärkers mit negativem Eingangsstrom

Da der Strom nun aus dem Transimpedanzverstärker herausfließt, stellt sich ein Spannungsabfall  $U_f$  am Widerstand  $R_f$  in entgegengesetzter Richtung ein. Daher ergibt sich für den maximalen negativen Eingangsstrom  $I_{in-}$ :

$$I_{in-} = \frac{U_{out,max} - U_{ref}}{R_f} = \frac{2,5V - 1V}{1M\Omega} \quad (5.16)$$

$$I_{in-} = 1,5\mu A \quad (5.17)$$

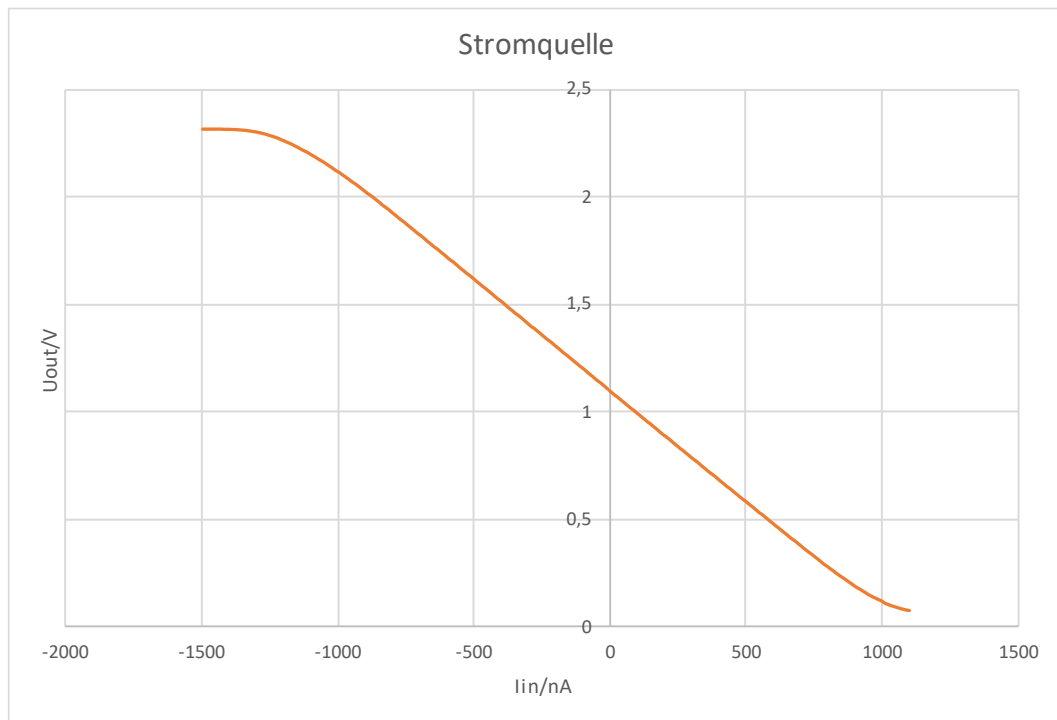


Abbildung 56: Ausgangskennlinie des Transimpedanzverstärkers mit Eingangsstrom

In Abbildung 56 ist die Kennlinie des Transimpedanzverstärkers dargestellt, die sich bei der in Abbildung 55 gezeigten Beschaltung in einem Eingangsbereich von ca.  $-1,5$ - $1,0 \mu A$  ergibt. Der Abbildung 56 ist zu entnehmen, dass die Kennlinie im Eingangsbereich von ca.  $-1,25$ - $0,9 \mu A$  linear verläuft. Für sehr kleine und sehr große Ströme weicht die Kennlinie vom linearen Verlauf, ebenfalls was darin begründet ist, dass die Transistoren im Ausgangspfad des Transimpedanzverstärkers aus der Sättigung getrieben werden.

### 5.1.2 Dynamische Messungen

Für die dynamische Messung wurde der Transimpedanzverstärker, wie in Abbildung 52 dargestellt, mit einem Eingangswiderstand beschaltet und an einen Funktionsgenerator angeschlossen, der ein Rechtecksignal erzeugt.



Abbildung 57: Oszillogramm der transienten Messung

Abbildung 57 ist ein Oszillogramm der transienten Messung. Das Spannungssignal des Funktionsgenerators ist in gelb dargestellt und wechselt zwischen den Spannungen 0,8V und 1V. Das Ausgangssignal des Transimpedanzverstärkers ist in orange dargestellt. Es ist zum Signal des Frequenzgenerators invertiert und um den Faktor 2 gestärkt. Wie dem Oszillogramm zu entnehmen ist, ist das Ausgangssignal des Transimpedanzverstärkers stark verrauscht. Diese Rauschbeiträge können vom Signalgenerator, vom Eingangswiderstand oder von Komponenten des Transimpedanzverstärkers selbst stammen. Um die Rauschbeiträge zu filtern, wurde eine Signalmittelung im Oszilloskop eingestellt und das Oszillogramm in Abbildung 57 aufgenommen.



Abbildung 58: Oszillogramm der transienten Messung mit Signalwertmittelung

Wie dem Oszillogramm in Abbildung 58 zu entnehmen ist, werden durch die Aktivierung der Signalwertmittelung die Rauschanteile des Ausgangssignals des Transimpedanzverstärkers entfernt. Es ist jedoch ein starkes Überschwingen bei der steigenden und insbesondere bei der fallenden Flanke des Signals zu beobachten, was eventuell auf eine nicht ausreichende Dämpfung zurückschließen lässt. Diese könnte durch zusätzliche parasitäre Kapazitäten am Eingang des Transimpedanzverstärkers begründet sein, die nicht beim Entwurf des Verstärkers berücksichtigt worden sind. Eventuell spielen auch Induktivitäten des Wirebonddrahts und der Leiterbahnen auf der Platine eine Rolle.

## 5.2 Charakterisierung der Poldi-Zellen

In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 2 vorgestellten Poldi Sensor Teststrukturen mit dem Messaufbau, der in Kapitel 4.3 vorgestellt wurde, ausgemessen. Ziel ist es, die spektrale Empfindlichkeit der Sensoren festzustellen und zu erkennen, bei welchen Wellenlängen Licht am besten detektiert wird. Außerdem soll die Wirkung der Polarisationsfilter untersucht werden. Bei vielen Messungen waren im Wellenlängenbereich um 600nm Spikes zu beobachten. Diese wurden erst eliminiert und anschließend die Kennlinien mit dem Programm Gnuplot erstellt. Das vollständige Skript befindet sich im Anhang in Kapitel 8.1.

### 5.2.1 Messungen von Photodioden ohne Polarisationsfilter

Zunächst werden Messungen an Photodiodenzellen ohne Polarisationsfilter durchgeführt, um die Sensitivität der Photodioden und ihr spektrales Verhalten zu charakterisieren. Darüber hinaus werden Messungen mit linear polarisiertem Licht in Abhängigkeit vom Polarisationswinkel und der Wellenlänge durchgeführt, um zu prüfen, ob z.B. die Isolationsschichten des Chips eine polarisierende Wirkung besitzen.

### 5.2.1.1 Teststruktur M\_K

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) ohne Polarisationsfilter ausgemessen.

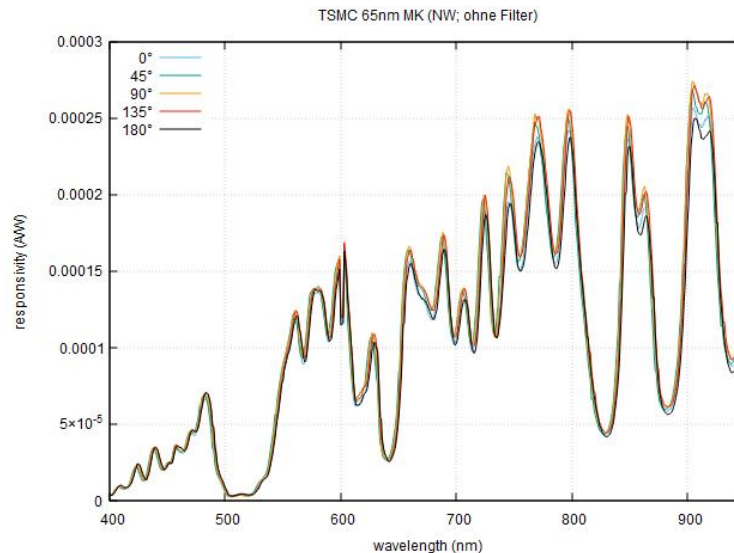


Abbildung 59: Empfindlichkeit der Diode M\_K in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Abbildung 59 zeigt die Sensitivität des Sensors in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Damit ist der auf die ausgestrahlte Lichtleistung normierte Photostrom der bestrahlten Zelle gemeint. Es ist zu erkennen, dass eine starke Abhängigkeit von der Wellenlänge vorhanden ist. Dies kann dadurch begründet sein, dass die in den Isolationsschichten des Chips verwendeten Materialien Licht in Abhängigkeit von der Wellenlänge unterschiedlich stark reflektieren oder absorbieren. Im Prinzip ist jedoch zu erkennen, dass mit steigender Wellenlänge die Sensitivität des Sensors steigt. Dies kann damit zu tun haben, dass die Eindringtiefe der Photonen mit steigender Wellenlänge zunimmt und die N-Well Diode eine photosensitive Sperrschicht besitzt, die nicht direkt an der Oberfläche, sondern sich in wenigen  $\mu\text{m}$  Tiefe befindet. Für Wellenlängen weit über 1000nm sind Siliziumdioden jedoch nicht mehr sensitiv, da sich die Energie der Photonen umgekehrt proportional zur Wellenlänge verhält und kein Photostrom mehr erzeugt wird, wenn die Photonenenergie unterhalb der Bandlückenenergie von Silizium liegt. Die Messungen wurden für unterschiedliche Polarisationswinkeln von  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  und  $180^\circ$  durchgeführt, die aber im Vergleich zur Wellenlänge einen wesentlich geringeren Einfluss besitzen.

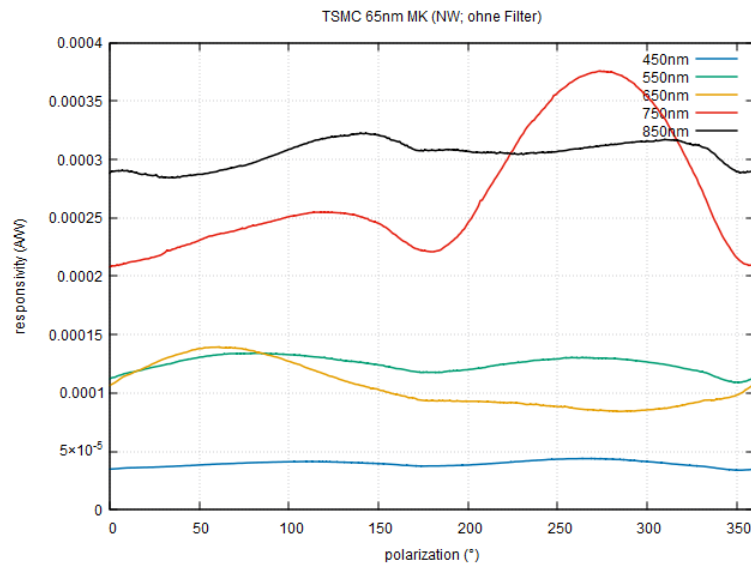


Abbildung 60: Empfindlichkeit der Diode  $M_K$  in Abhängigkeit vom Winkel

Für Wellenlängen von 450nm, 550nm, 650nm, 750nm und 850nm wurden Messungen in Abhängigkeit vom Polarisationswinkel durchgeführt. Da keine Polarisationsfilter vorhanden sind, würde eigentlich keine Abhängigkeit vom Polarisationswinkel erwartet. Die Messung in Abbildung 60 zeigen jedoch eine kleine Variation der Sensitivität mit dem Polarisationswinkel, was darauf schließen lässt, dass die Passivierungs- und Isolationsschichten des Chips eine leichte Polarisationswirkung besitzen. Besonders auffällig ist der Ausschlag bei c.a. 275° für Licht mit einer Wellenlänge von 750nm für den es aktuell noch keine Erklärung gibt.

### 5.2.1.2 Teststruktur N\_K0

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) ohne Polarisationsfilter ausgemessen.

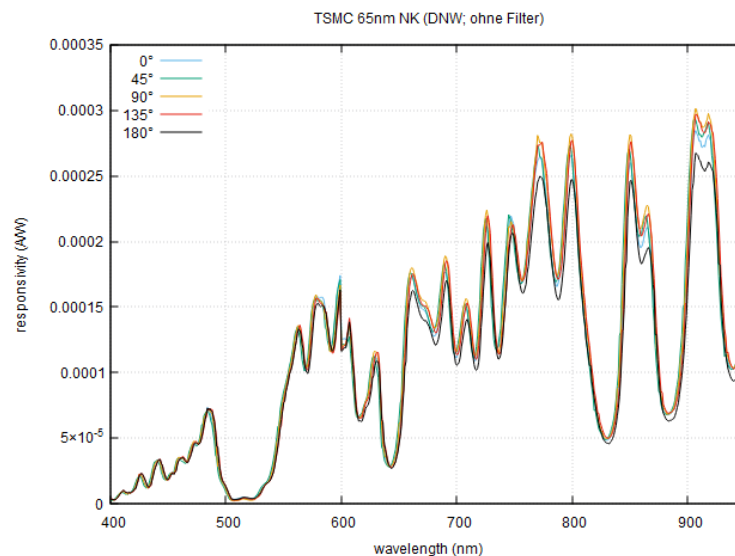


Abbildung 61: Empfindlichkeit der Diode  $N_K$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge



Die Sensitivität der Photodiode mit Deep N-Well aus Abbildung 61 ist sehr ähnlich zu der vorherigen Messung in Abbildung 59. Es werden bei Wellenlängen im Bereich oberhalb von 900nm leicht höhere Werte erreicht, was an der tieferen Lage der Sperrschicht bei einer Deep N-Well Diode im Vergleich zu einer konventionellen N-Well Diode liegen könnte.

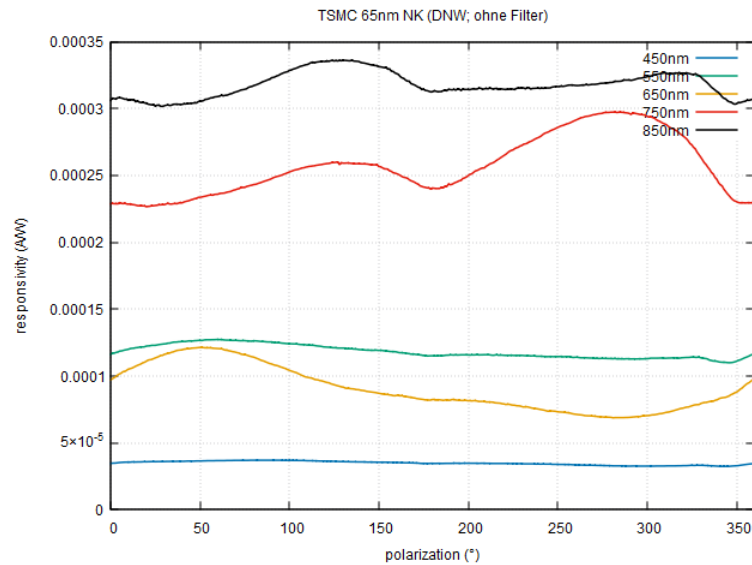


Abbildung 62: Empfindlichkeit der Diode N\_K in Abhängigkeit vom Winkel

Auch bei der Deep N-Well Diode ist eine leichte Abhängigkeit der Sensitivität vom Polarisationswinkel in Abbildung 62 zu erkennen, wobei der Ausschlag bei 275° und einer Wellenlänge von 750nm weniger stark ausfällt als bei der N-Well Diode in Abbildung 59.

### 5.2.1.3 Teststruktur O\_K0-O\_Atw

In den Abbildungen 63 und 64 wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) ohne Polarisationsfilter bei Auslesung der Kathode im globalen P-Substrat ausgemessen.

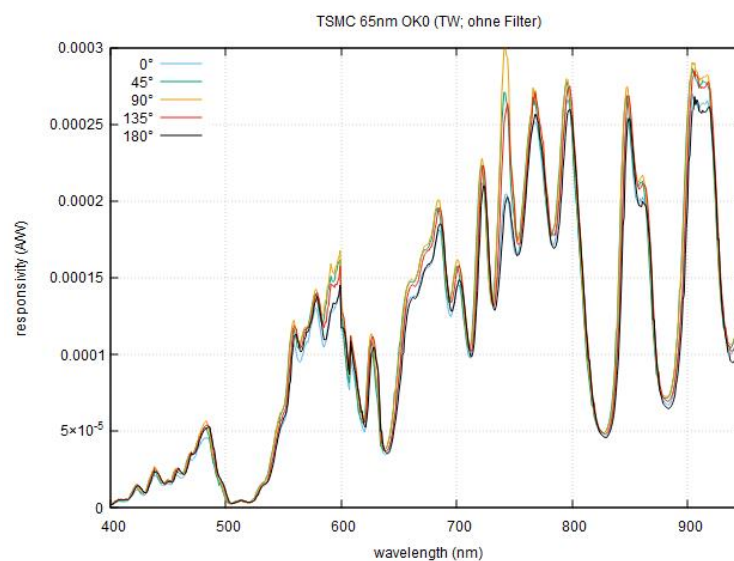


Abbildung 63: Empfindlichkeit der Diode O\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Das Messergebnis aus Abbildung 63 ähnelt den vorherigen Verläufen in Abbildung 61 und 59. Was bedeutet, dass der zusätzliche isolierte P-dotierte Bereich in der Triple-Well Struktur keinen zusätzlichen Signalbeitrag bei Auslesung an der Deep N-Well Kathode liefert.

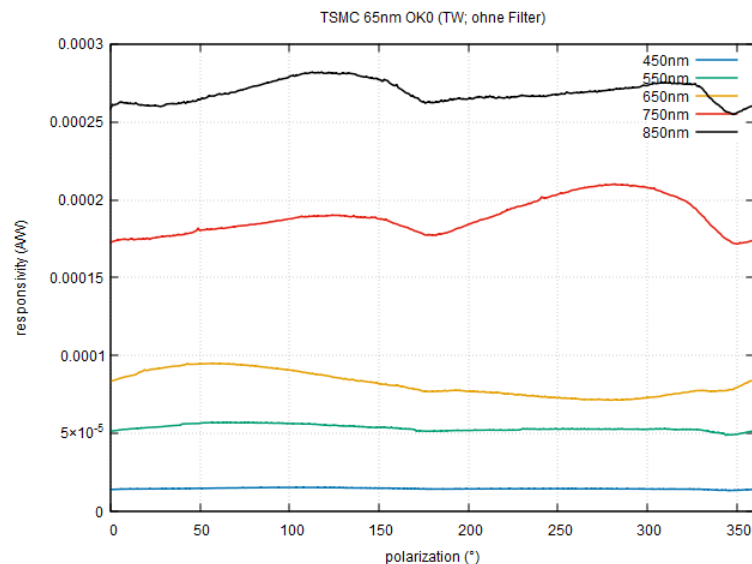


Abbildung 64: Empfindlichkeit der Diode O\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel

In den Abbildungen 65 und 66 wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) ohne Polarisationsfilter bei Auslesung der Kathode im isolierten P-Substrat ausgemessen.

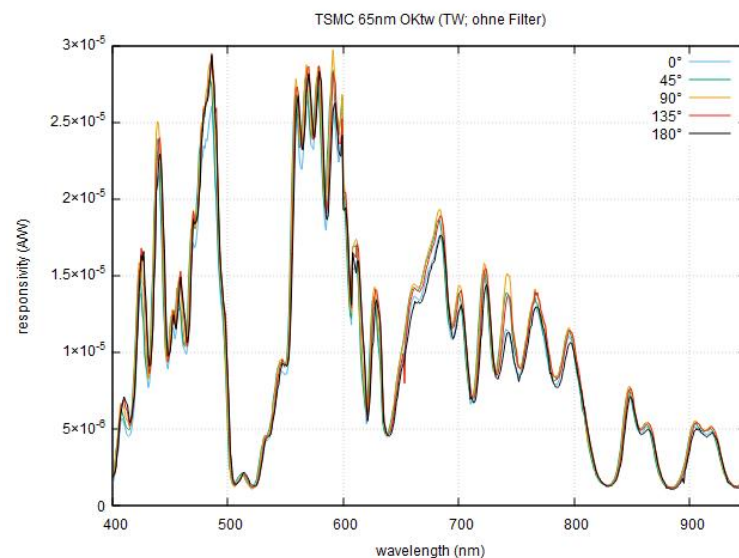


Abbildung 65: Empfindlichkeit der Diode O\_Ktw in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Der Verlauf in Abbildung 65 unterscheidet sich erheblich von den bisherigen Messergebnissen in Abbildung 63, 61 und 59. Die Sensitivitätswerte sind insgesamt um mindestens eine Größenordnung geringer, was daran liegen kann, dass sich die Sperrschicht, die sich um die Kathode im isolierten P-Substrat ausbildet, in der Nähe der Oberfläche in wenigen 100nm Tiefe ausbildet. Außerdem ist die Auslekathode

stark N-dotiert, wodurch sich die Raumladungszone weniger stark ausbreiten kann im Vergleich zur N-Well Kathode. Des Weiteren ist zu erkennen, dass mit zunehmender Wellenlänge die Sensitivität abnimmt statt steigt, was durch die höhere Eindringtiefe der Photonen begründet sein kann. Insgesamt kann man aus der Messung schließen, dass eine zusätzliche Auslesung der Kathode im isolierten P-Substrat nur bei kürzeren Wellenlängen unterhalb von 620nm sinnvoll ist.

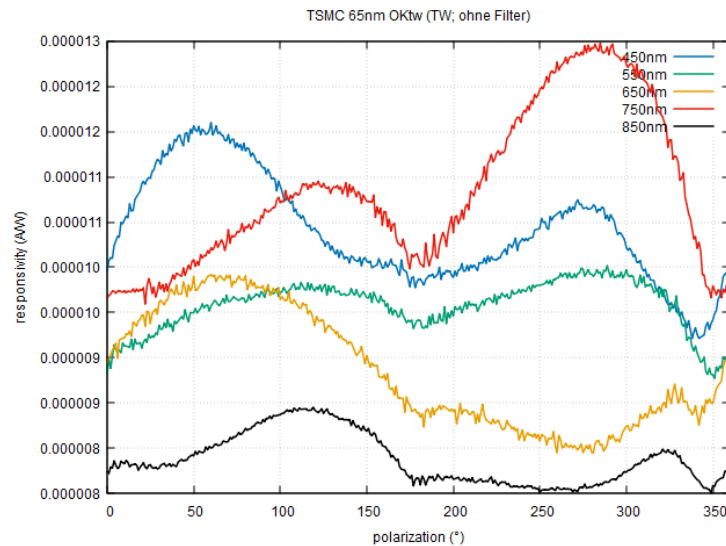


Abbildung 66: Empfindlichkeit der Diode O\_Ktw in Abhängigkeit vom Winkel

Abbildung 66 ist zu entnehmen, dass die Sensitivität der Triple-Well Diode bei Auslesung an der Kathode im isolierten P-Substrat wesentlich stärker vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes abhängig ist als bei den vorherigen Messergebnissen in Abbildung 60, 62, und 64. Grund hierfür könnten Polarisationsseffekte sein, die sich durch Reflektion an der Oberfläche ergeben.

In den Abbildungen 67 und 68 wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) ohne Polarisationsfilter bei Auslesung der Anode im isolierten P-Substrat ausgemessen.

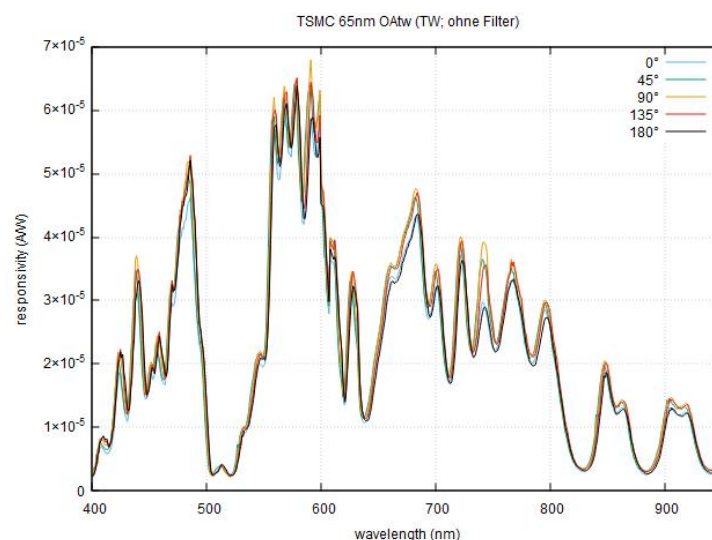


Abbildung 67: Empfindlichkeit der Diode O\_Atw in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Sensitivität der Triple-Well Diode bei Auslesung an der Anode, d.h. am isolierten P-Substrat, sieht dem Ergebnis aus Abbildung 65 an der Kathode im isolierten P-Substrat sehr ähnlich, da die Anode ebenfalls oberflächennah verortet ist. Daraus lässt sich schließen, dass die verwendete Anodenelektrode an der Oberfläche des isolierten Substrats für Ladungen in der Sperrschicht in der Nähe des Deep N-Wells unerreichbar ist.

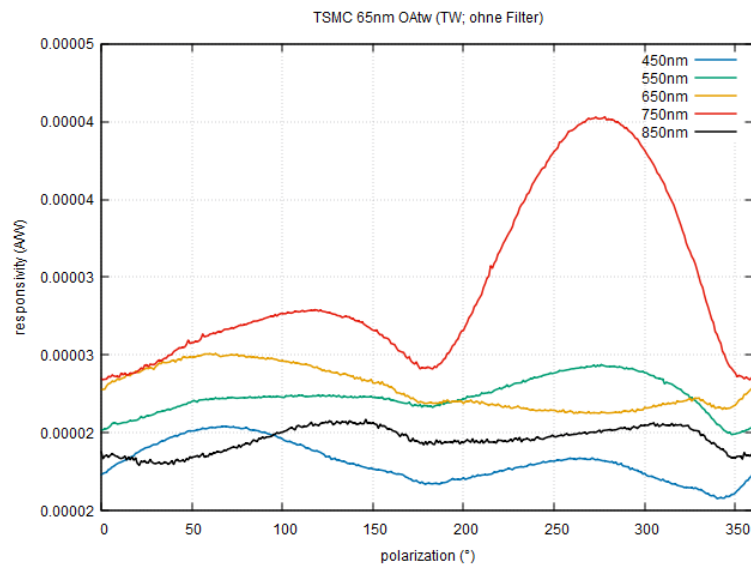


Abbildung 68: Empfindlichkeit der Diode O\_At看 in Abhängigkeit vom Winkel

Wie schon bei der Kathodenmessung in Abbildung 66 ist auch bei der Anodenmessung in Abbildung 68 eine höhere Abhängigkeit der Triple-Well Diode vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes zu sehen, was damit zu tun haben könnte, dass diese Anodenelektrode sich auch an der Oberfläche der Diode befindet.

### 5.2.2 Messungen von Photodioden mit Polarisationsfilter

Die Charakterisierung der Teststrukturen mit Polarisationsfilter wird jeweils in drei unterschiedlichen Kennlinien dargestellt. Dabei wird einmal die Empfindlichkeit der Photodiode in Abhängigkeit von der Wellenlänge und in Abhängigkeit vom Winkel des einfallenden Lichtes aufgezeigt. Ebenso wird der Kontrast in Abhängigkeit der Wellenlänge dargestellt. Hierbei wird das Verhältnis zwischen Sensitivitätsmaximum und -minimum gebildet. Das Maximum wird dabei bei gleicher Ausrichtung der Polarisationssebene des einfallenden Lichtes und des integrierten Polarisationsfilters erwartet. Das Minimum wird dementsprechend bei einem Rotationswinkel von 90° zwischen der Polarisationssebene des einfallenden Lichtes und der Ausrichtung des integrierten Polarisationsfilters erwartet.

### 5.2.2.1 Teststruktur B\_K0-B\_K3

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

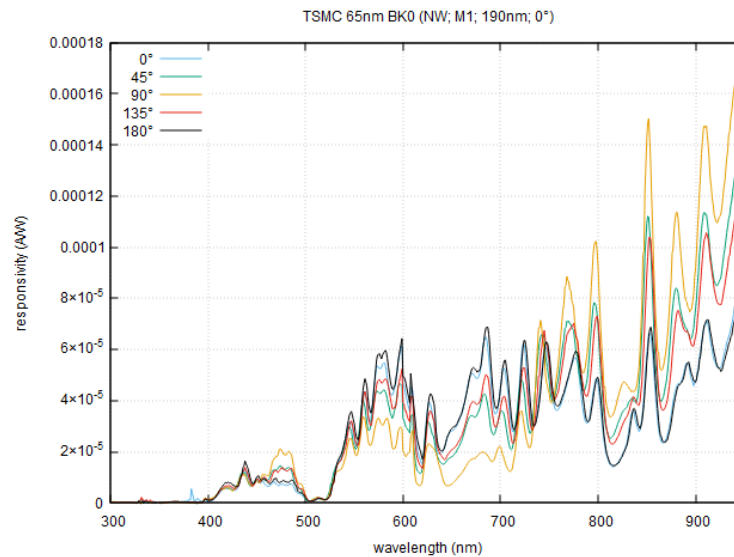


Abbildung 69: Empfindlichkeit der Diode B\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zur Messung der Sensitivität der N-Well Diode ohne Polarisationsfilter in Abbildung 59 erreicht die Sensitivität der N-Well Diode mit Polarisationsfilter etwa halb so große Werte. Dies mag dadurch begründet sein, dass der Polarisationsfilter etwa die Hälfte der Diodenfläche abdeckt und somit im Mittel nur die Hälfte der Lichtleistung die Diodenfläche erreicht. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Sensitivität der Diode wesentlich stärker vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes abhängt als bei der Messung ohne Polarisationsfilter.

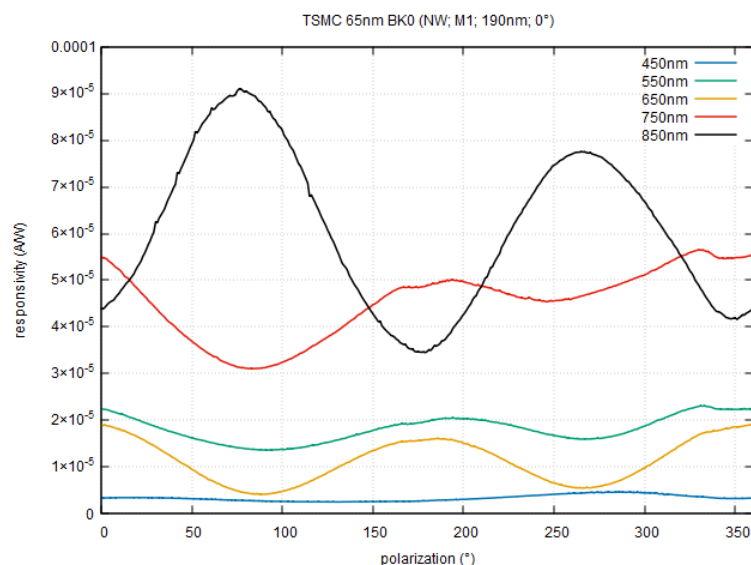


Abbildung 70: Empfindlichkeit der Diode B\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 70 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Maximum und bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von  $850\text{nm}$  verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

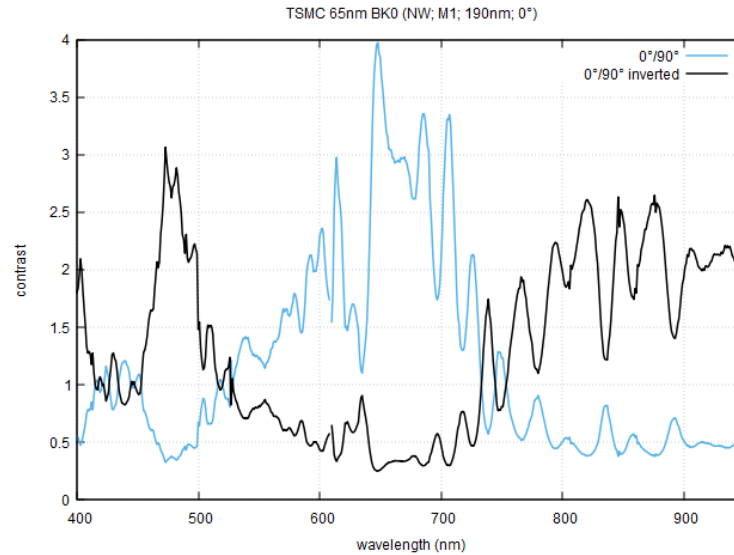


Abbildung 71: Kontrast der Diode  $B\_K0$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Wie in Abbildung 71 zu sehen ist, erreicht der Kontrast, d.h. das Verhältnis aus dem Sensitivitätswert bei einem Polarisationswinkel von  $0^\circ$  und dem Sensitivitätswert bei einem Polarisationswinkel von  $90^\circ$  ein Maximum im Wellenlängenbereich von  $650\text{nm}$ . Entsprechend dem Verhalten aus Abbildung 70 erreicht der Kehrwert des Kontrastes Werte größer als 1 bei Wellenlängen größer als  $750\text{nm}$ .

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von  $190\text{nm}$  und einer Orientierung von  $45^\circ$  ausgemessen.

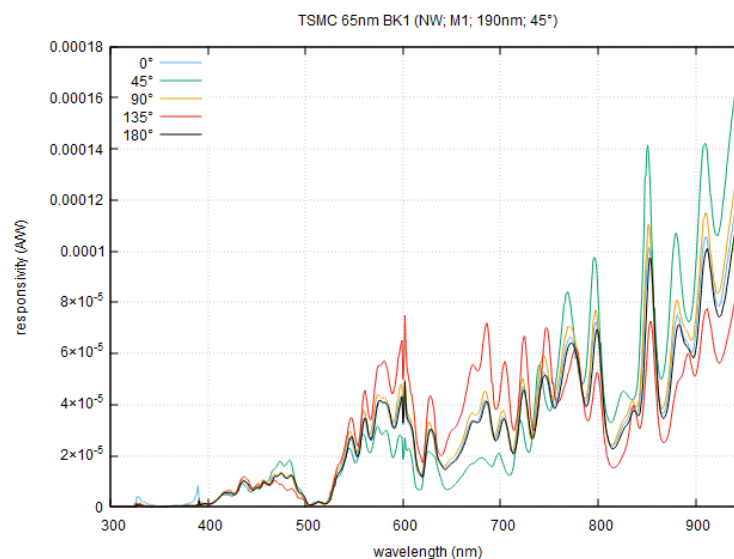


Abbildung 72: Empfindlichkeit der Diode  $B\_K1$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $45^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 69 der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ . Wie zu erwarten, werden die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $45^\circ$  besitzt.

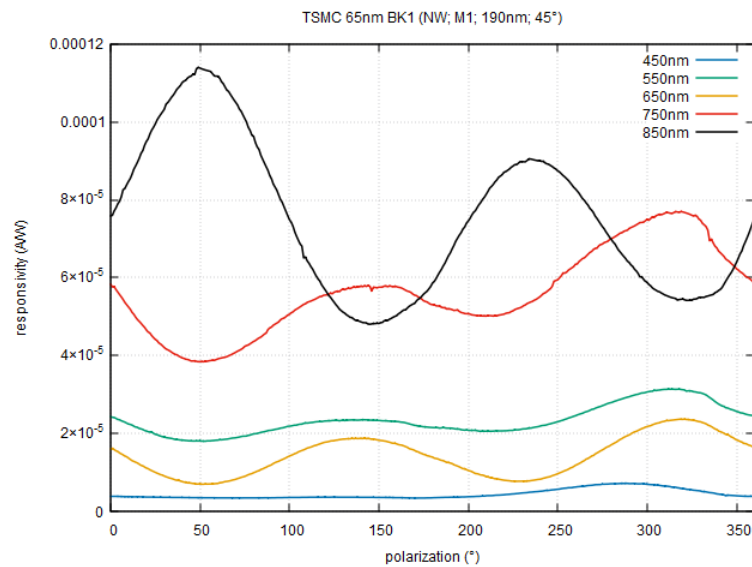


Abbildung 73: Empfindlichkeit der Diode B\_K1 in Abhängigkeit vom Winkel

In der in Abbildung 73 dargestellten Messung folgt die Sensitivität bei einer Wellenlänge von 850nm der Vorhersage des Satzes von Malus. Bei den anderen Wellenlängen ist das Verhalten invers zu den Erwartungen. Interessant ist auch zu sehen, dass das Maximum bei ca.  $45^\circ$  höher ausfällt als das bei  $225^\circ$ , obwohl die Kurve eigentlich eine Periode von  $180^\circ$  aufweisen müsste, weil eine Drehung um  $180^\circ$  das Polarisationsfilter wieder in seine ursprüngliche Ausrichtung führt.

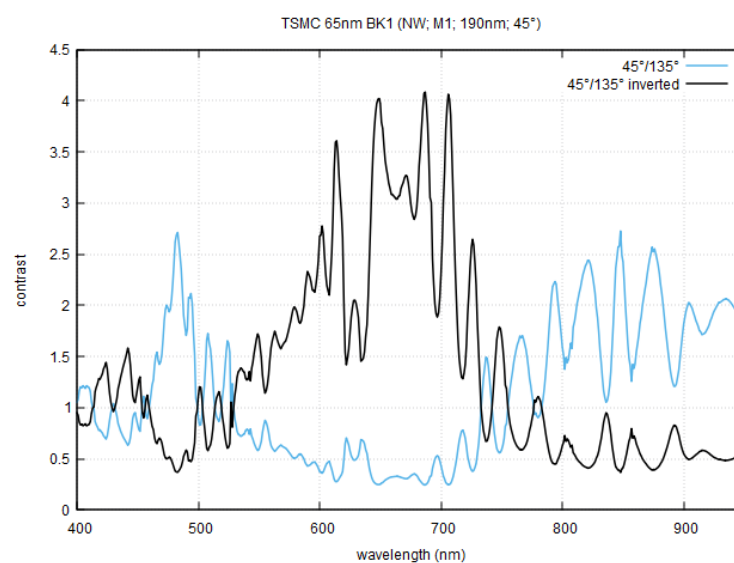


Abbildung 74: Kontrast der Diode B\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurve aus Abbildung 74 entspricht den Ergebnissen in Abbildung 73. In einem Wellenlängenbereich oberhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen unterhalb von 750nm erreicht jedoch die inverse Kontrastkurve Werte oberhalb von 1.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

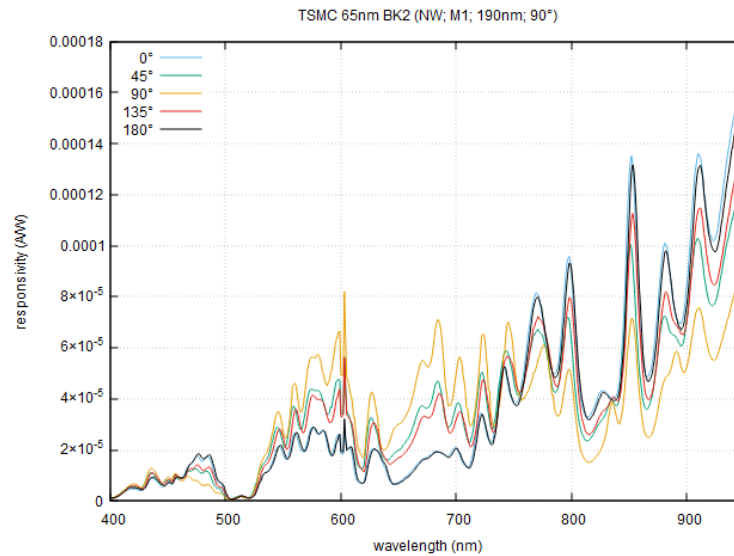


Abbildung 75: Empfindlichkeit der Diode B\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 90° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 69 und 72 der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0° und 45°. Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 0° statt 90° besitzt.

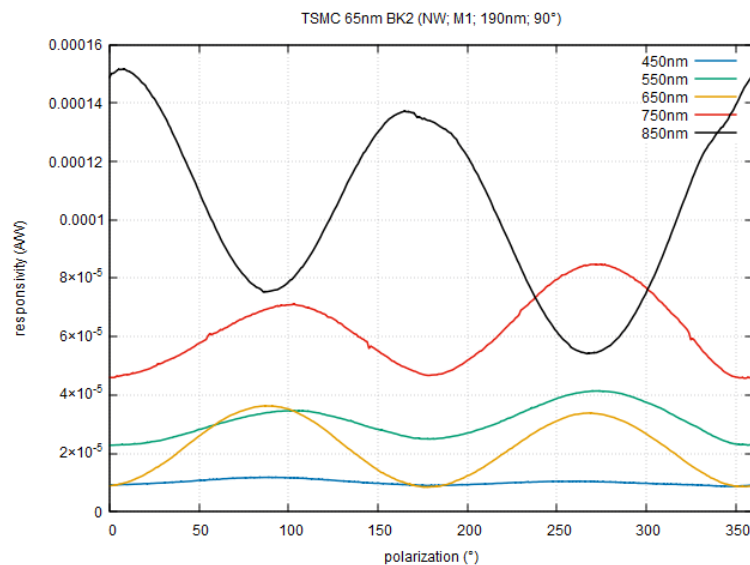


Abbildung 76: Empfindlichkeit der Diode B\_K2 in Abhängigkeit vom Winkel



In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 76 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Minimum und bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Maximum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von  $850\text{nm}$  verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

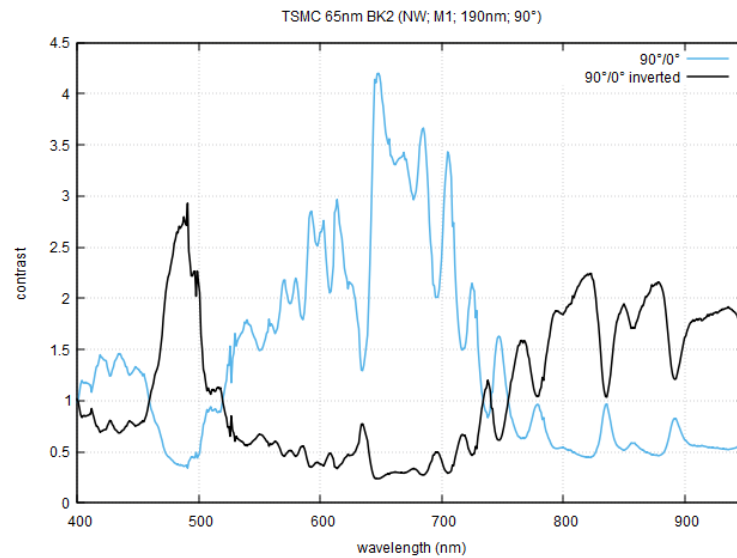


Abbildung 77: Kontrast der Diode B\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 77 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 76. In einem Wellenlängenbereich unterhalb von  $750\text{nm}$  wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen oberhalb von  $750\text{nm}$  erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von  $190\text{nm}$  und einer Orientierung von  $135^\circ$  ausgemessen.

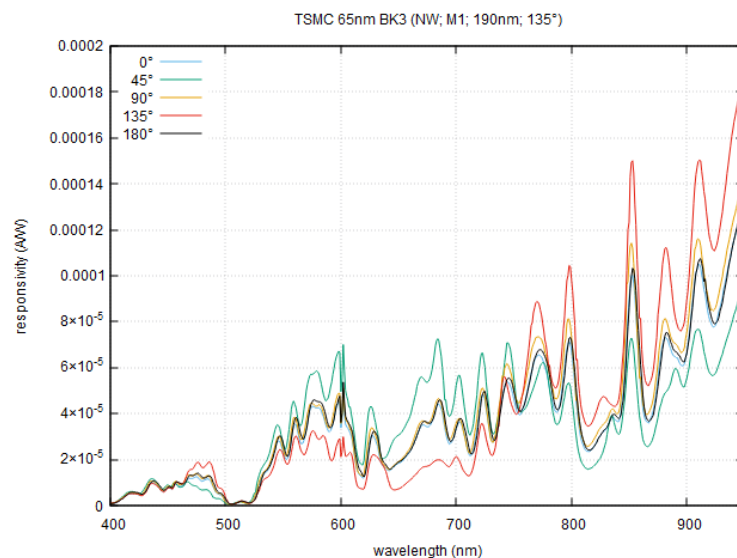


Abbildung 78: Empfindlichkeit der Diode B\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $135^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 69, 72 und 75 der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$ . Die höchsten Werte werden wie erwartet bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $135^\circ$  besitzt.

Ein Vergleich der Messungen aus Abbildung 69, 72, 75 und 78 zeigt, dass die Sensitivität der Zellen bei  $45^\circ$  und  $135^\circ$  die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht kompatibler Polarisationsausrichtung erreicht, während die Messungen mit Filter bei  $0^\circ$  und  $90^\circ$  die höchsten Werte bei jeweils um  $90^\circ$  verschobene Polarisationsausrichtung erhalten. Grund hierfür könnte eine falsche Zuordnung der Teststrukturen sein.

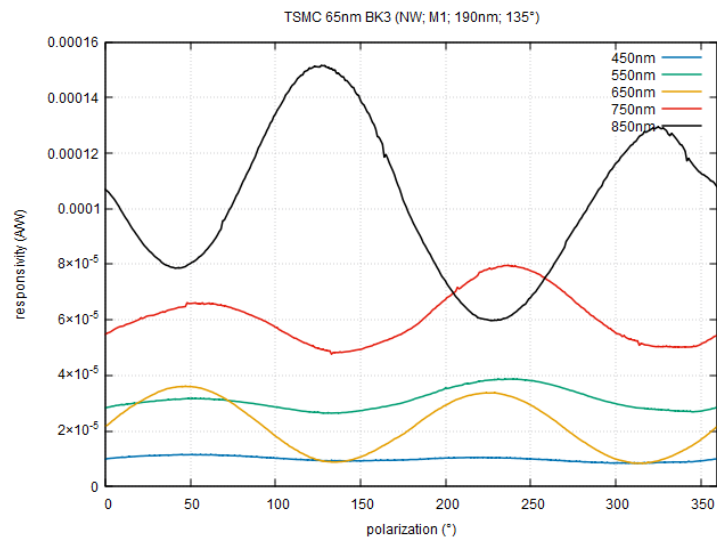


Abbildung 79: Empfindlichkeit der Diode B\_K3 in Abhängigkeit vom Winkel

In der in Abbildung 79 dargestellten Messung folgt die Sensitivität bei einer Wellenlänge von 850 nm der Vorhersage des Satzes von Malus. Bei den anderen Wellenlängen ist das Verhalten invers zu den Erwartungen.

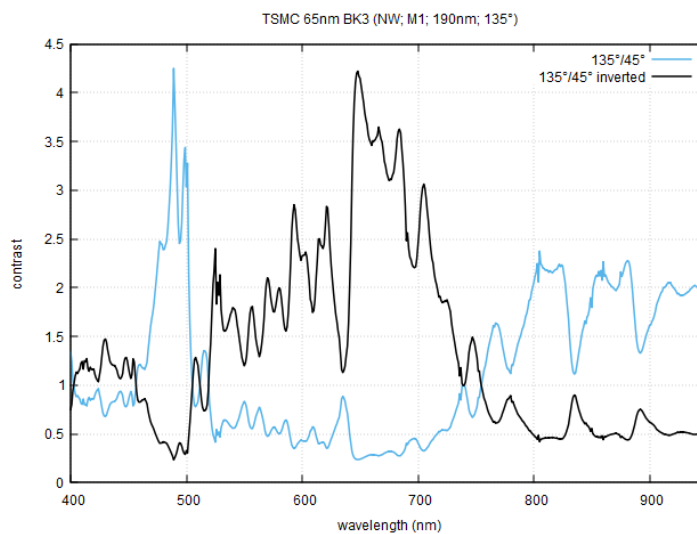


Abbildung 80: Kontrast der Diode B\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 80 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 79. In einem Wellenlängenbereich oberhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen unterhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

#### 5.2.2.2 Teststruktur A\_K0-A\_K3

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

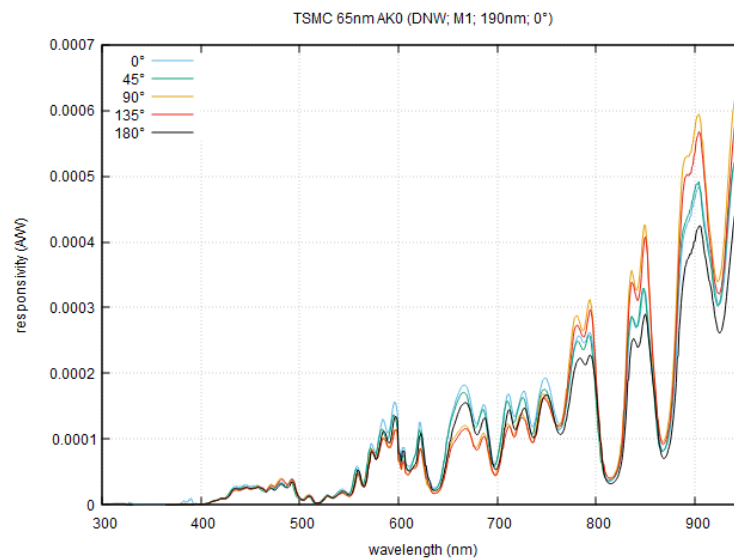


Abbildung 81: Empfindlichkeit der Diode A\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Deep N-Well Dioden mit Polarisationswinkel von 0° aus Abbildung 81 ist um Faktor 2 höher als die Empfindlichkeit der Deep N-Well Diode ohne Polarisationsfilter in Abbildung 61. Außerdem ist die Empfindlichkeit auch um Faktor 4 höher als die in den Abbildungen 69, 72, 75 und 78 dargestellte Empfindlichkeit der N-Well Dioden mit Polarisationsfilter mit Ausrichtungen von 0°, 45°, 90° und 135°. Ein Messfehler erscheint wahrscheinlich.

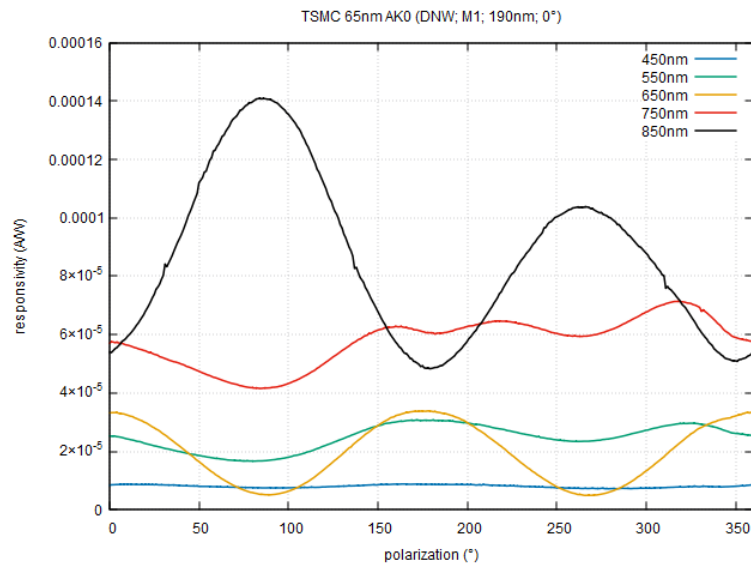


Abbildung 82: Empfindlichkeit der Diode A\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 82 sind die Sensitivitätswerte um Faktor 4 geringer als in der Messung aus Abbildung 62. Zu erkennen ist, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei 0° und 180° ein Maximum und bei 90° und 270° ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von 850nm verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

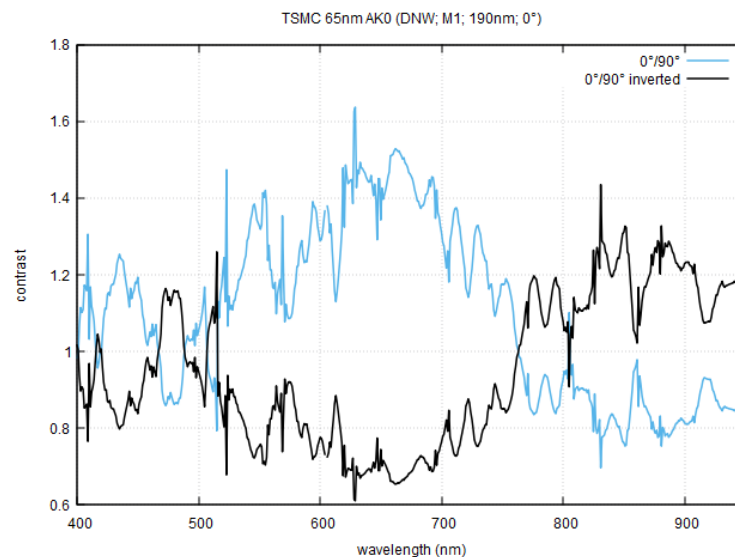


Abbildung 83: Kontrast der Diode A\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 83 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 82. In einem Wellenlängenbereich unterhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen oberhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 45° ausgemessen.

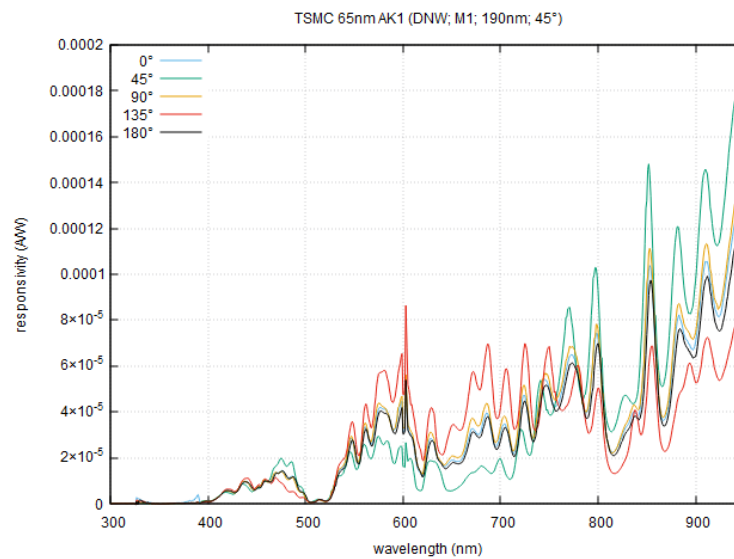


Abbildung 84: Empfindlichkeit der Diode A\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zur Messung der Sensitivität der Deep N-Well Diode ohne Polarisationsfilter in Abbildung 61 erreicht die Sensitivität der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter mit einer Ausrichtung von 45° in Abbildung 84 etwa 67% der Werte. Dies erscheint plausibel, da der Polarisationsfilter ein Teil der Diodenfläche abdeckt und somit weniger der Lichtleistung die Diodenfläche erreicht. Wie zu erwarten, werden die höchsten Werte bei einem Polarisationswinkel von 45° erzielt.

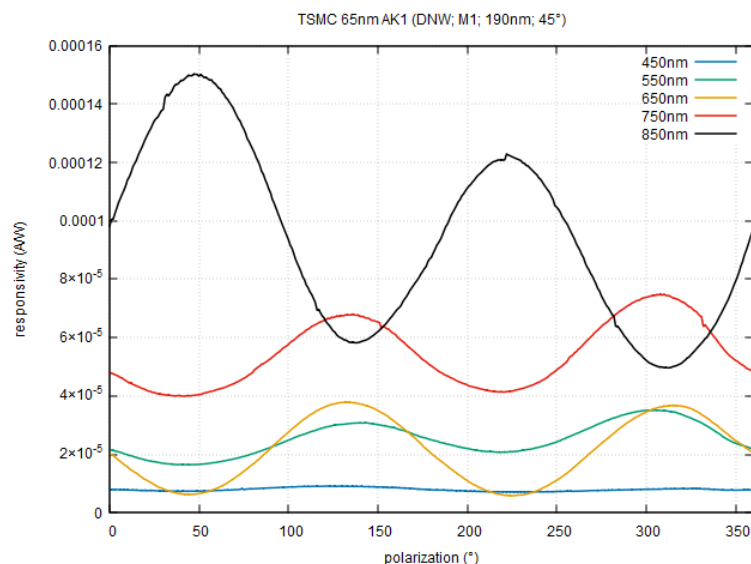


Abbildung 85: Empfindlichkeit der Diode A\_K1 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter mit Ausrichtung von 45° in Abbildung 85 sind die Sensitivitätswerte ebenso um Faktor 4 geringer als in

der Messung aus Abbildung 62. Zu erkennen ist, dass bei einer Wellenlänge von 850nm die Sensitivität bei 45° und 225° ein Maximum und bei 135° und 315° ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Bei den Wellenlängen von 550nm, 650nm und 750nm verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

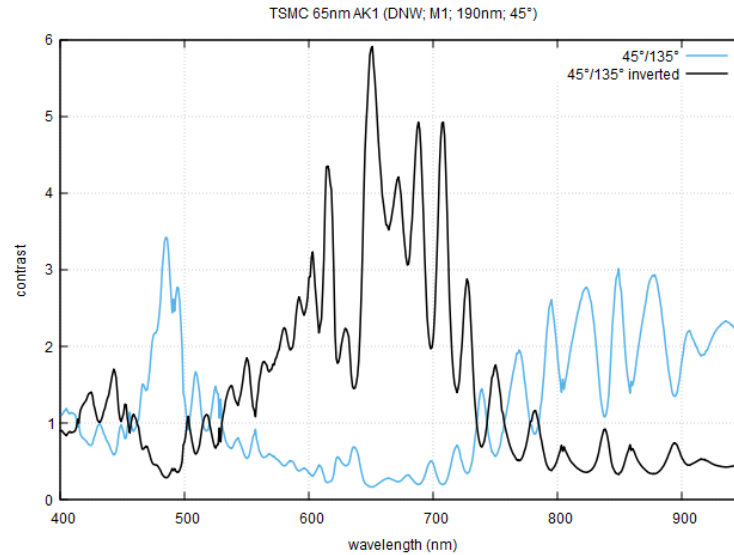


Abbildung 86: Kontrast der Diode A\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 86 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 85. In einem Wellenlängenbereich oberhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen unterhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) mit einem Polarisationsfilter in der Metallage 1, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

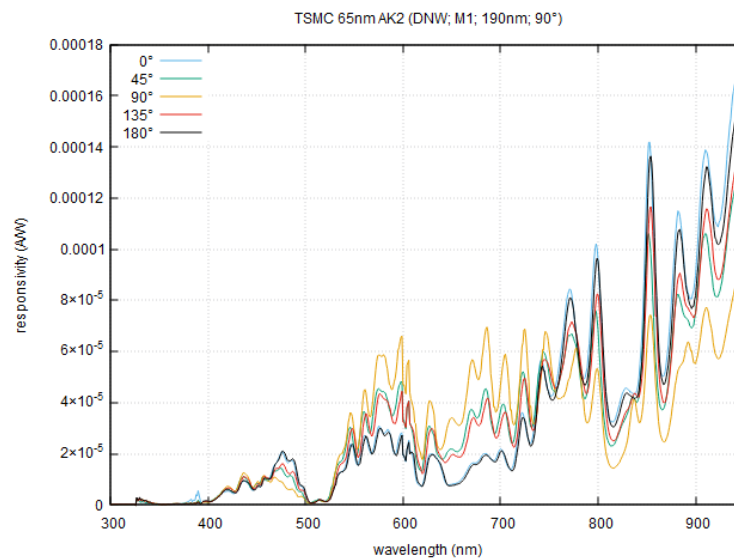


Abbildung 87: Empfindlichkeit der Diode A\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Sensitivität der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter bei einer Ausrichtung von  $90^\circ$  aus Abbildung 87 erreicht ähnliche Werte wie die Deep N-Well Diode mit einer Polarisationsfilterausrichtung von  $45^\circ$  aus Abbildung 84. Die höchsten Werte werden bei Bestrahlung mit Licht mit einem Polarisationswinkel von  $0^\circ$  erzielt.

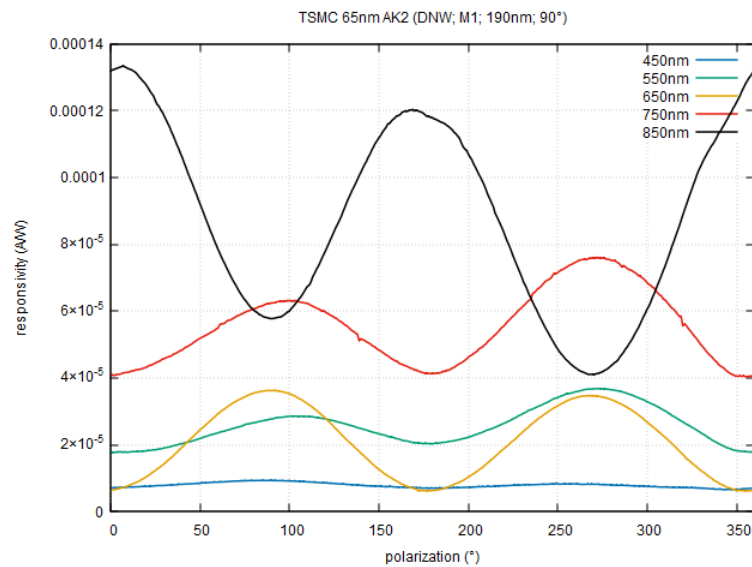


Abbildung 88: Empfindlichkeit der Diode A\_K2 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter bei einer Ausrichtung von  $90^\circ$  in Abbildung 88 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Maximum und bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von 850nm verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

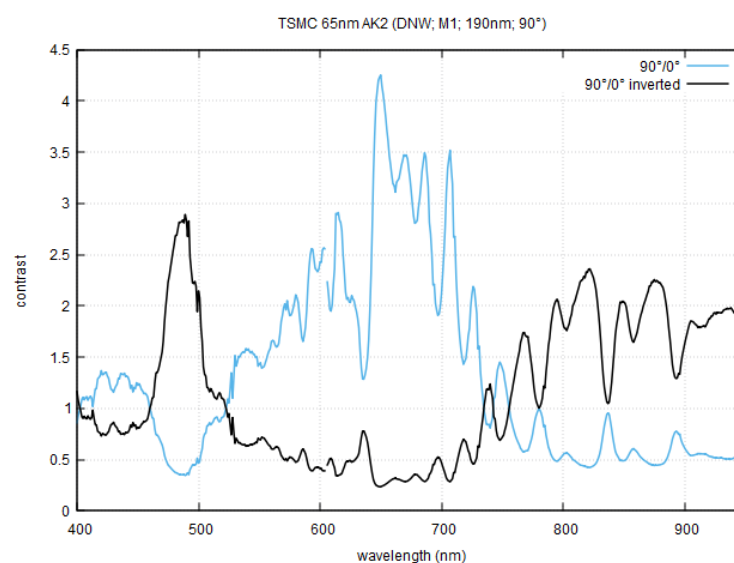


Abbildung 89: Kontrast der Diode A\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 89 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 88. In einem Wellenlängenbereich unterhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen oberhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 135° ausgemessen.

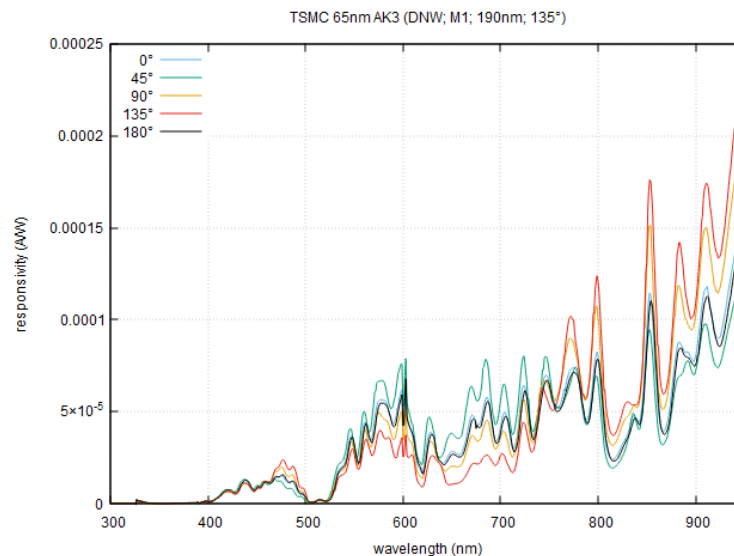


Abbildung 90: Empfindlichkeit der Diode A\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Deep N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 135° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 84 und 87 der Deep N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 45° und 90°. Die höchsten Werte werden wie erwartet bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 135° besitzt.

Ein Vergleich der Messungen aus Abbildung 81, 84, 87 und 90 zeigt, dass die Sensitivität der Zellen bei 45° und 135° die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht kompatibler Polarisationsausrichtung erreicht, während die Messungen mit Filtern bei 0° und 90° die höchsten Werte bei jeweils um 90° verschobene Polarisationsausrichtung erhalten. Grund hierfür könnte eine falsche Zuordnung der Teststrukturen sein.



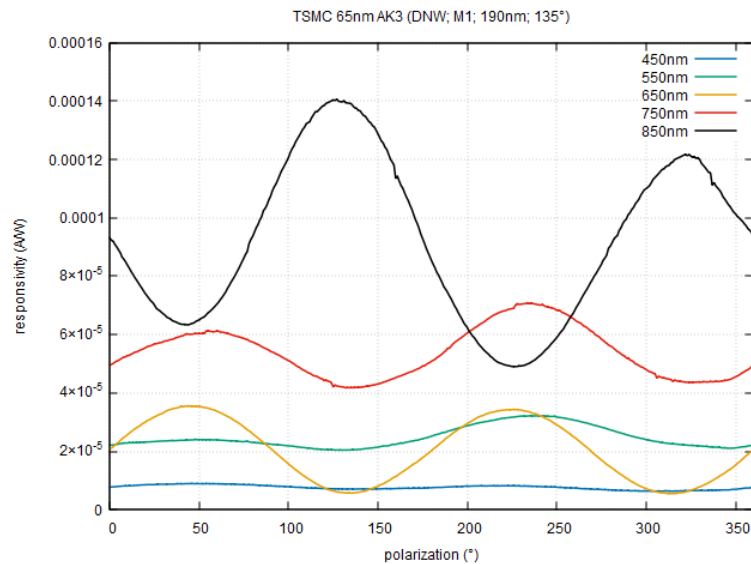


Abbildung 91: Empfindlichkeit der Diode A\_K3 in Abhängigkeit vom Winkel

In der in Abbildung 91 dargestellten Messung folgt die Sensitivität bei einer Wellenlänge von 850 nm der Vorhersage des Satzes von Malus. Bei den anderen Wellenlängen ist das Verhalten invers zu den Erwartungen.

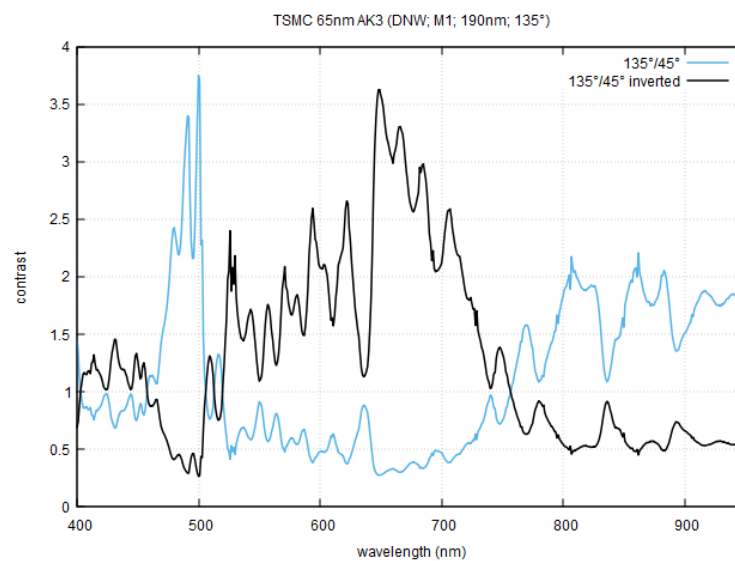


Abbildung 92: Kontrast der Diode A\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 92 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 91. In einem Wellenlängenbereich oberhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen unterhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

### 5.2.2.3 Teststruktur C\_K0-C\_K3

Es wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

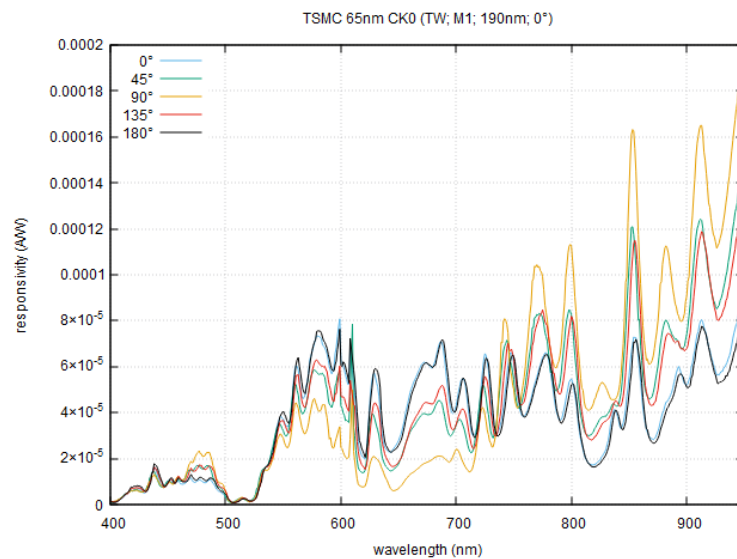


Abbildung 93: Empfindlichkeit der Diode C\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Messung der Sensitivität der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter aus Abbildung 93 erreicht etwa halb so große Werte wie die Sensitivität der Triple-Well Diode ohne Polarisationsfilter in Abbildung 63. Dies ist nachvollziehbar, da der Polarisationsfilter etwa die Hälfte der Diodenfläche abdeckt und somit im Mittel nur die Hälfte der Lichtleistung die Diodenfläche erreicht. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Sensitivität der Diode wesentlich stärker vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes abhängt als bei der Messung ohne Polarisationsfilter. Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 90° statt 0° besitzt.

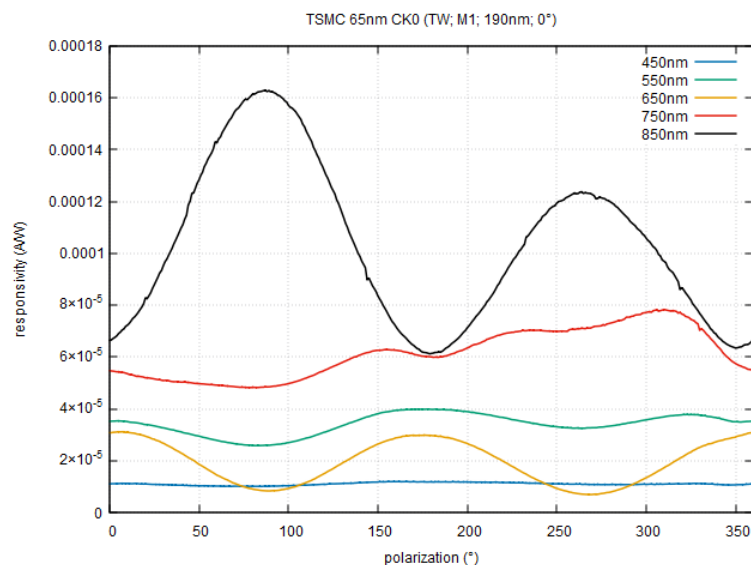


Abbildung 94: Empfindlichkeit der Diode C\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 94 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Maximum und bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von  $850\text{nm}$  verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

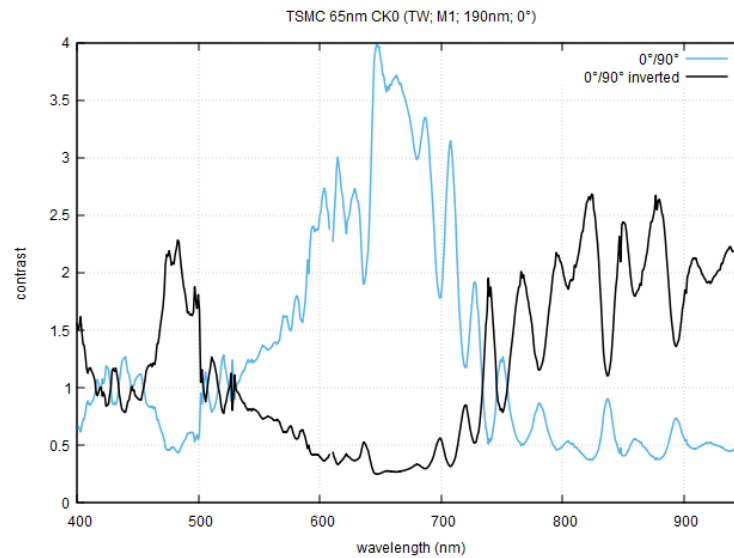


Abbildung 95: Kontrast der Diode  $C_{K0}$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 95 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 94. In einem Wellenlängenbereich unterhalb von  $750\text{nm}$  wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen oberhalb von  $750\text{nm}$  erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von  $190\text{nm}$  und einer Orientierung von  $45^\circ$  ausgemessen.

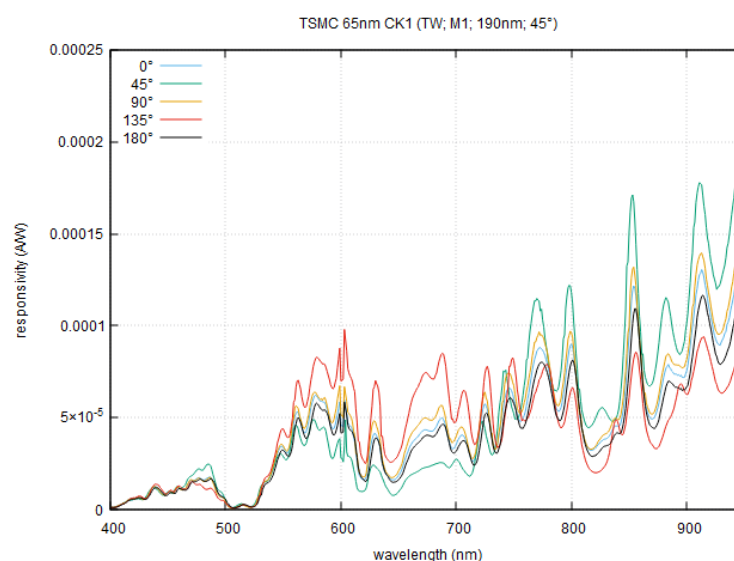


Abbildung 96: Empfindlichkeit der Diode  $C_{K1}$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Triple-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $45^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 93 der Triple-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ . Wie zu erwarten, werden die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $45^\circ$  besitzt.

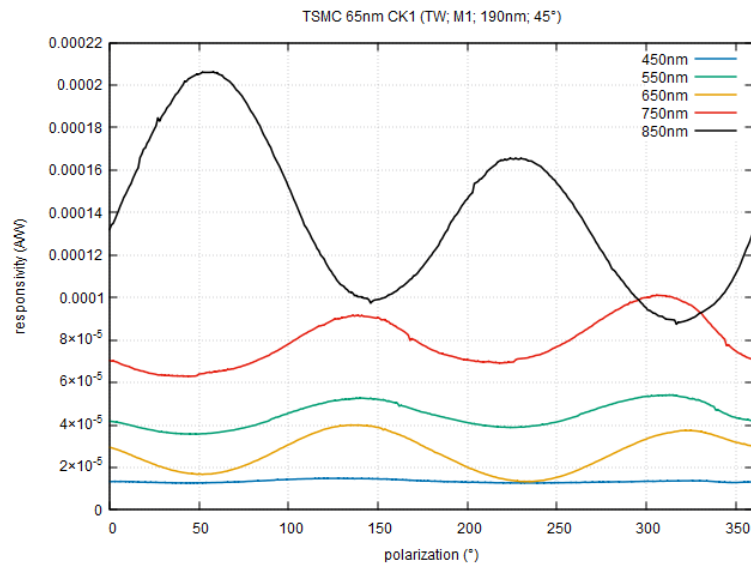


Abbildung 97: Empfindlichkeit der Diode C\_K1 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter bei einer Ausrichtung von  $45^\circ$  in Abbildung 97 ist zu erkennen ist, dass bei einer Wellenlänge von 850nm die Sensitivität bei  $45^\circ$  und  $225^\circ$  ein Maximum und bei  $135^\circ$  und  $315^\circ$  ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Bei den Wellenlängen von 550nm, 650nm und 750nm verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

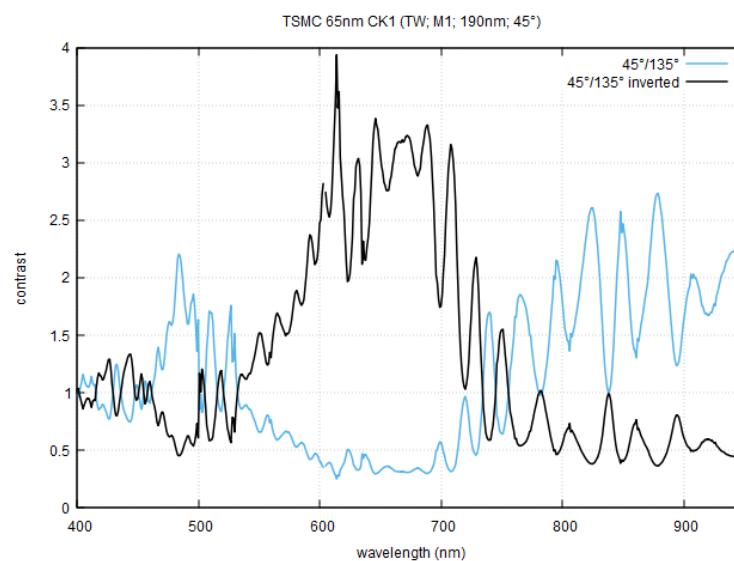


Abbildung 98: Kontrast der Diode C\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 98 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 97. In einem Wellenlängenbereich oberhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen unterhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

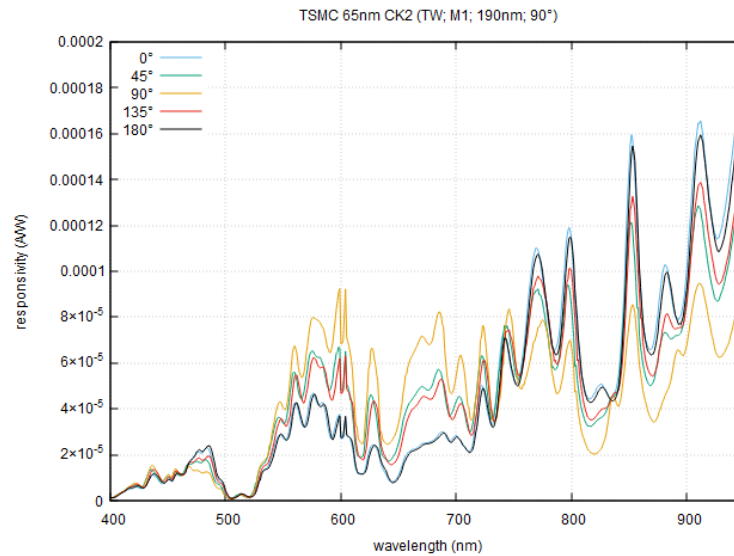


Abbildung 99: Empfindlichkeit der Diode C\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Triple-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 90° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 93 und 96 der Triple-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0° und 45°. Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 0° statt 90° besitzt.

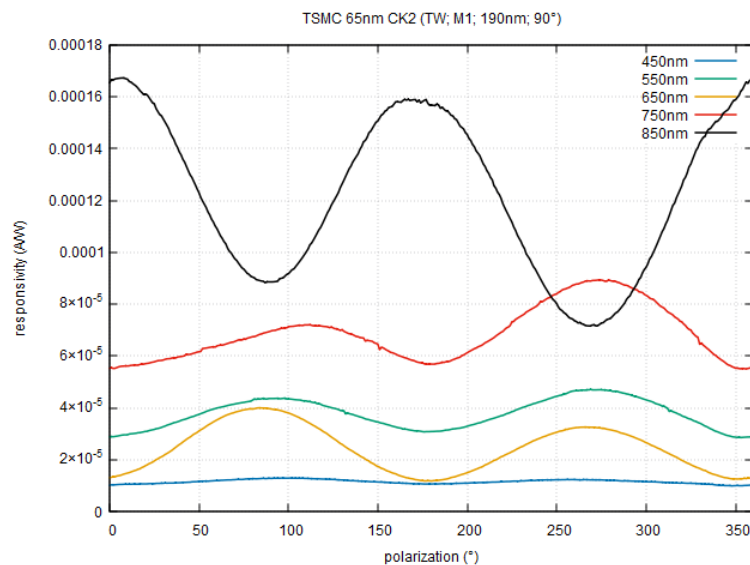


Abbildung 100: Empfindlichkeit der Diode C\_K2 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 100 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Maximum und bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von  $850\text{nm}$  verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

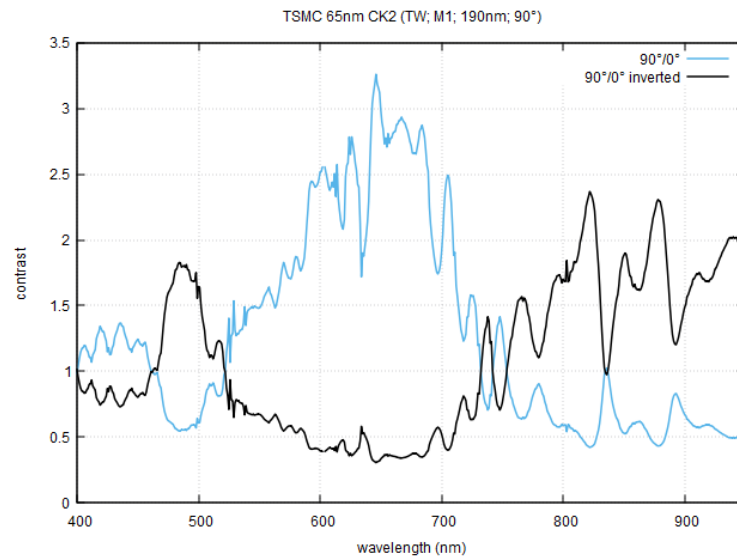


Abbildung 101: Kontrast der Diode C\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 101 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 100. In einem Wellenlängenbereich unterhalb von  $750\text{nm}$  wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen oberhalb von  $750\text{nm}$  erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) mit einem Polarisationsfilter in der Metallage 1, einem Pitch von  $190\text{nm}$  und einer Orientierung von  $135^\circ$  ausgemessen.

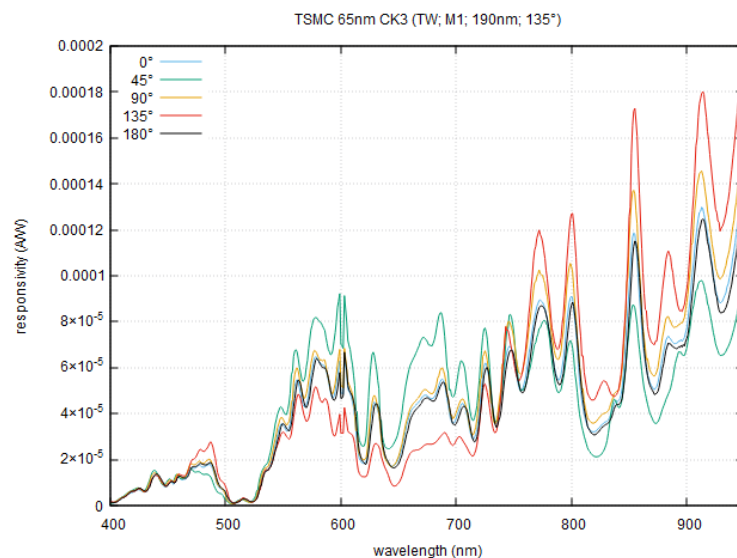


Abbildung 102: Empfindlichkeit der Diode C\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Triple-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $135^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 93, 96 und 99 der Triple-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$ . Die höchsten Werte werden wie erwartet bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $135^\circ$  besitzt.

Ein Vergleich der Messungen aus Abbildung 93, 96, 99 und 102 zeigt, dass die Sensitivität der Zellen bei  $45^\circ$  und  $135^\circ$  die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht kompatibler Polarisationsausrichtung erreicht, während die Messungen mit Filter bei  $0^\circ$  und  $90^\circ$  die höchsten Werte bei jeweils um  $90^\circ$  verschobene Polarisationsausrichtung erhalten. Grund hierfür könnte eine falsche Zuordnung der Teststrukturen sein.

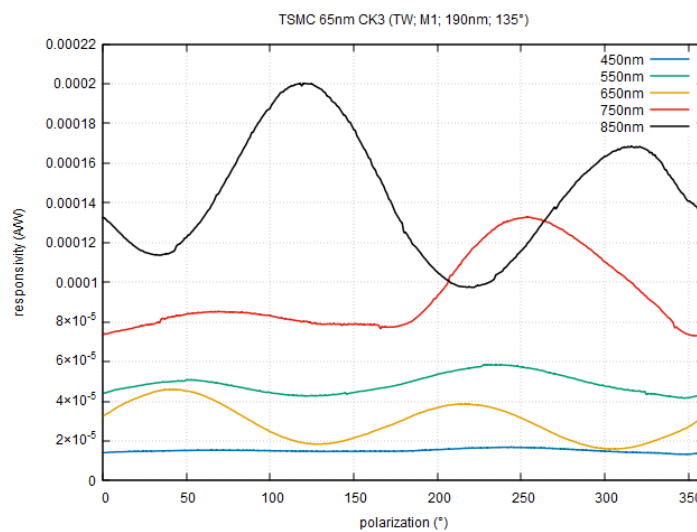


Abbildung 103: Empfindlichkeit der Diode C\_K3 in Abhängigkeit vom Winkel

In der in Abbildung 103 dargestellten Messung folgt die Sensitivität bei einer Wellenlänge von 850 nm der Vorhersage des Satzes von Malus. Bei den anderen Wellenlängen ist das Verhalten invers zu den Erwartungen.

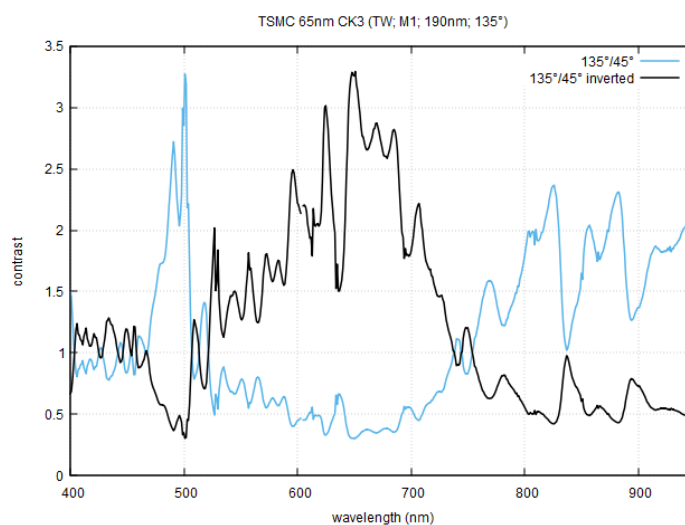


Abbildung 104: Kontrast der Diode C\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 104 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 103. In einem Wellenlängenbereich oberhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen unterhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

#### 5.2.2.4 Teststruktur K\_K0-K\_K3

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

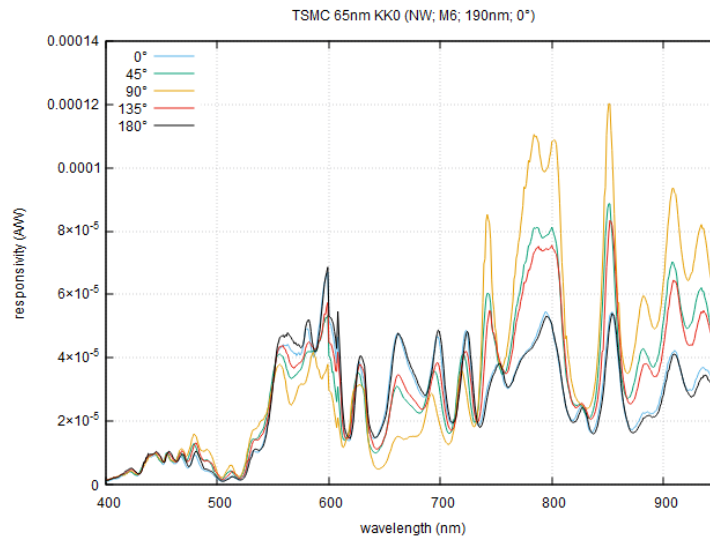


Abbildung 105: Empfindlichkeit der Diode K\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zur Messung der Empfindlichkeit der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1 in Abbildung 69 weist die N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 6 etwas geringere Werte auf. Ebenso ist die Empfindlichkeit bei großen Wellenlängen gedämpfter. Die Sensitivität der Diode hängt wesentlich stärker vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes ab als bei der Messung ohne Polarisationsfilter aus Abbildung 59.

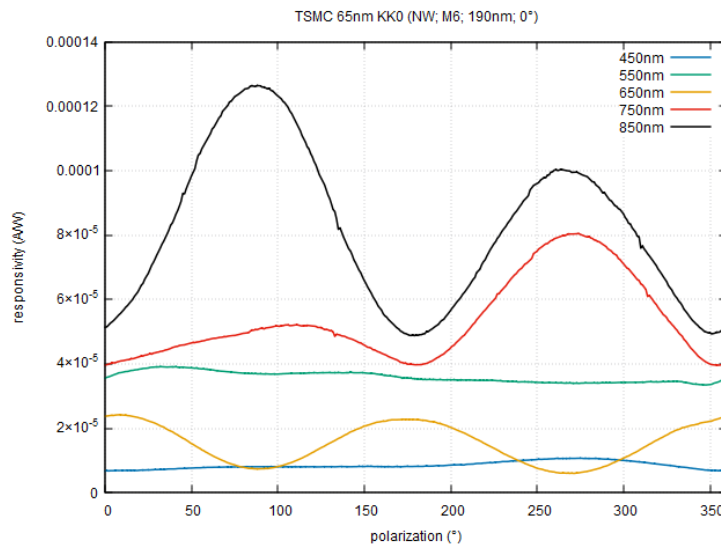


Abbildung 106: Empfindlichkeit der Diode K\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel



In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 106 ist zu erkennen ist, dass bei den Wellenlängen von 750nm und 850nm die Sensitivität bei 90° und 270° ein Maximum und bei 0° und 180° ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt.

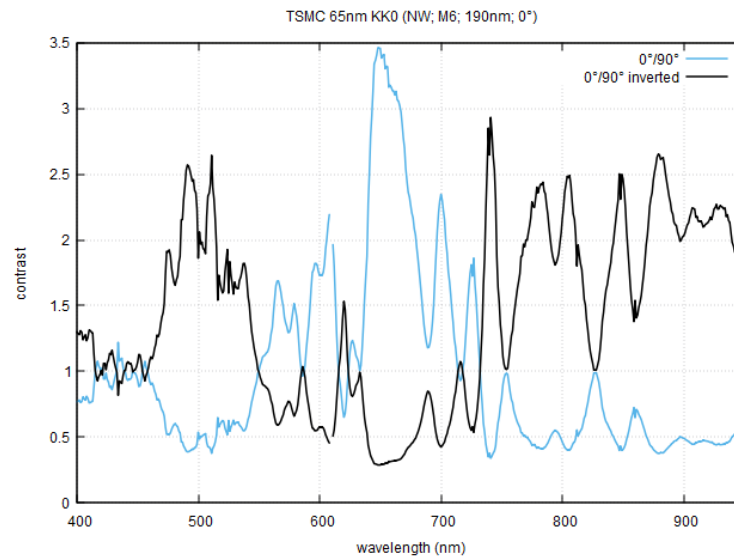


Abbildung 107: Kontrast der Diode  $K_{K0}$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 107 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 106. In einem Wellenlängenbereich unterhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen oberhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 45° ausgemessen.

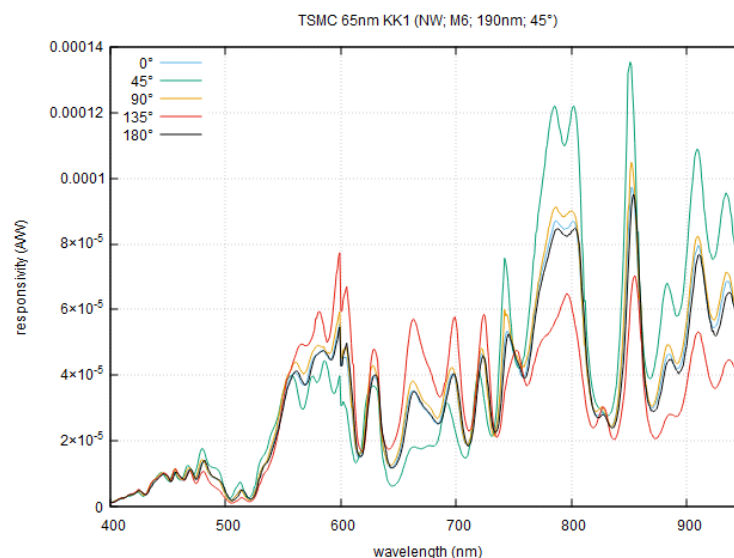


Abbildung 108: Empfindlichkeit der Diode  $K_{K1}$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $45^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 105 der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ . Wie zu erwarten, werden die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $45^\circ$  besitzt.

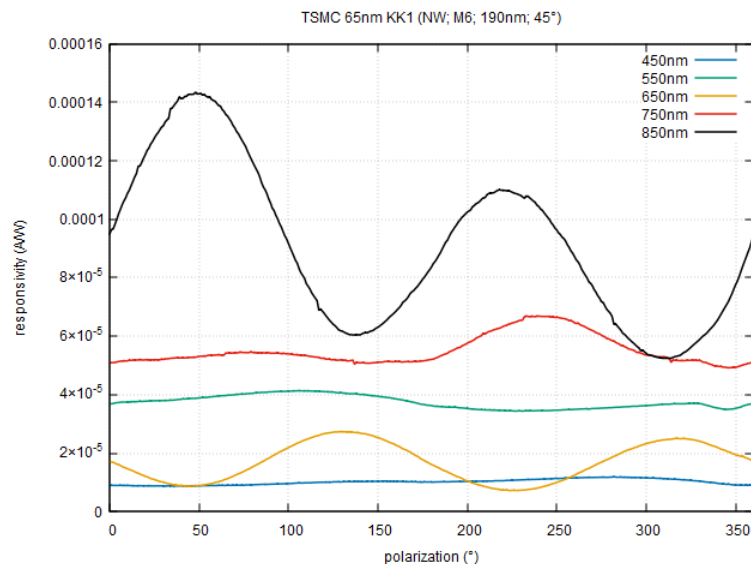


Abbildung 109: Empfindlichkeit der Diode K\_K1 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 109 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei  $135^\circ$  und  $315^\circ$  ein Minimum und bei  $45^\circ$  und  $225^\circ$  ein Maximum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von 650nm verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

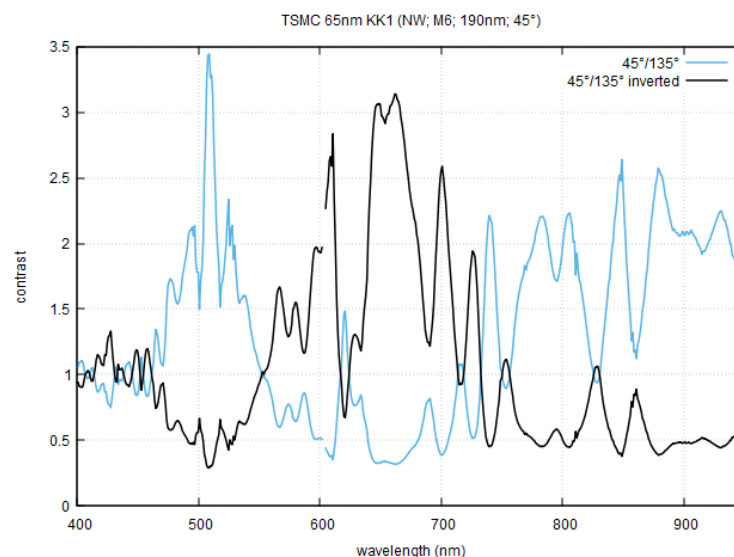


Abbildung 110: Kontrast der Diode K\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 110 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 109. In einem Wellenlängenbereich oberhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1

erreicht. Bei Wellenlängen unterhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

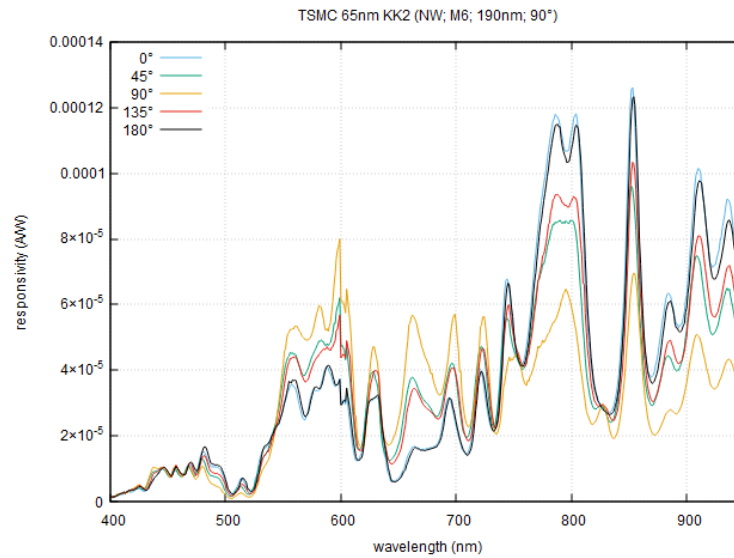


Abbildung 111: Empfindlichkeit der Diode K\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 90° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 105 und 108 der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0° und 45°. Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 0° statt 90° besitzt.

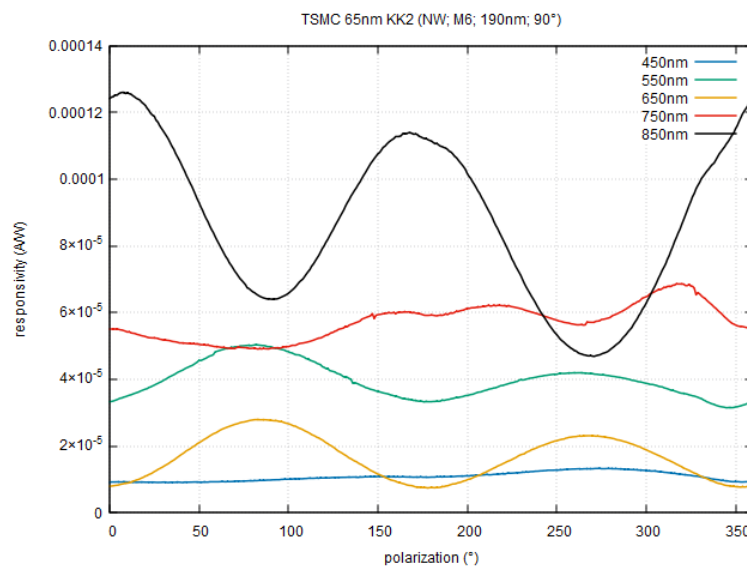


Abbildung 112: Empfindlichkeit der Diode K\_K2 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 112 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den Wellenlängen von 550nm und 650nm bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Minimum und bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Maximum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Bei den restlichen Messungen verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

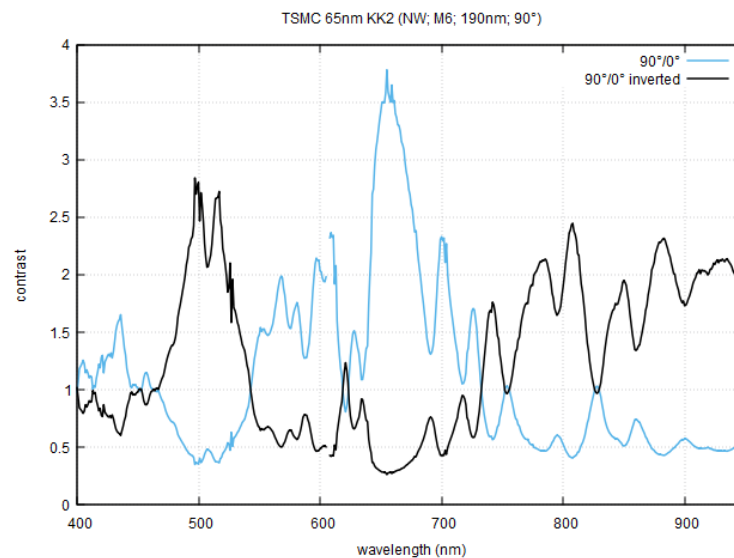


Abbildung 113: Kontrast der Diode  $K\_K2$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 113 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 112. In einem Wellenlängenbereich unterhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen oberhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von  $135^\circ$  ausgemessen.

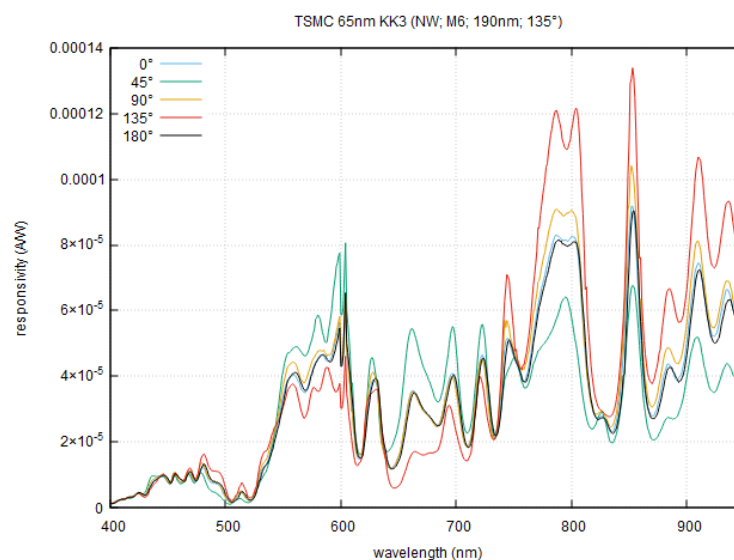


Abbildung 114: Empfindlichkeit der Diode  $K\_K3$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $135^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 105, 108 und 111 der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$ . Die höchsten Werte werden wie erwartet bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $135^\circ$  besitzt.

Ein Vergleich der Messungen aus Abbildung 105, 108, 111 und 114 zeigt, dass die Sensitivität der Zellen bei  $45^\circ$  und  $135^\circ$  die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht kompatibler Polarisationsausrichtung erreicht, während die Messungen mit Filter bei  $0^\circ$  und  $90^\circ$  die höchsten Werte bei jeweils um  $90^\circ$  verschobene Polarisationsausrichtung erhalten. Grund hierfür könnte eine falsche Zuordnung der Teststrukturen sein.

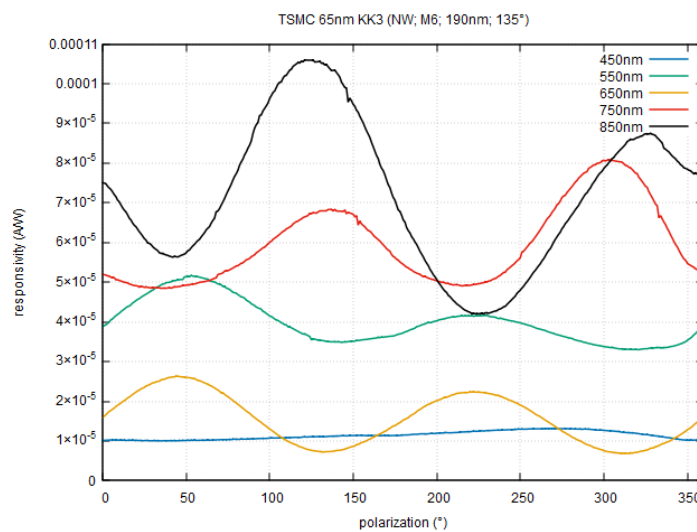


Abbildung 115: Empfindlichkeit der Diode K\_K3 in Abhängigkeit vom Winkel

In der in Abbildung 115 dargestellten Messung folgt die Sensitivität bei den Wellenlängen von 750nm und 850nm der Vorhersage des Satzes von Malus. Bei den anderen Wellenlängen ist das Verhalten invers zu den Erwartungen.

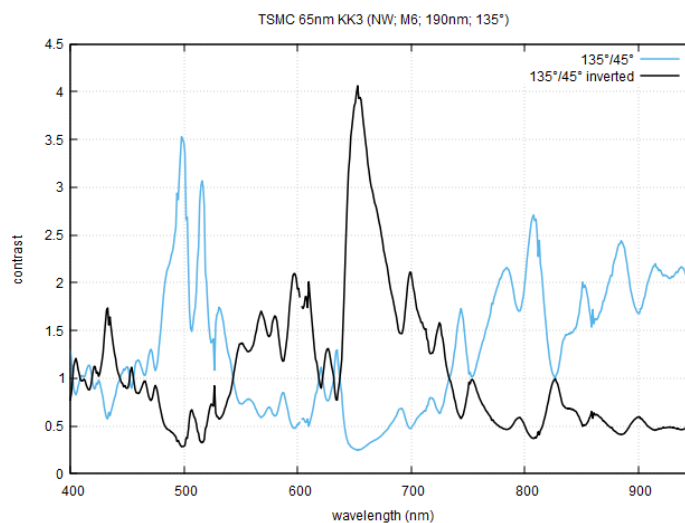


Abbildung 116: Kontrast der Diode K\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 116 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 115. In einem Wellenlängenbereich oberhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen unterhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

#### 5.2.2.5 Teststruktur J\_K0-J\_K3

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

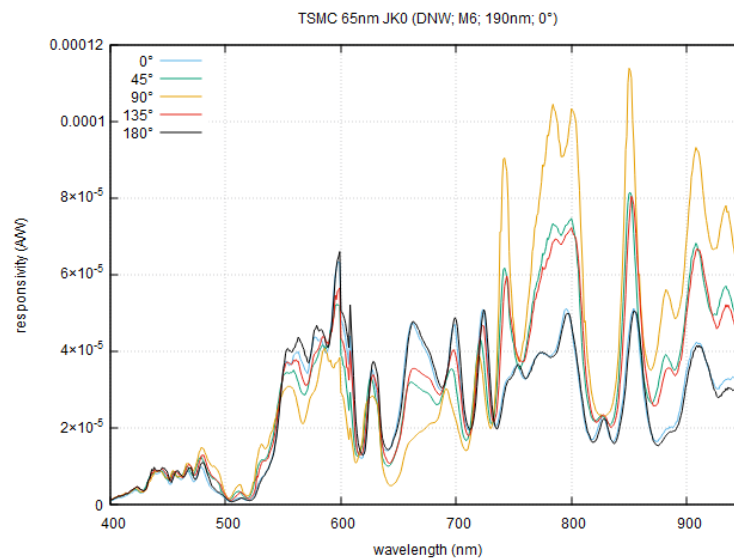


Abbildung 117: Empfindlichkeit der Diode J\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zur Messung der Empfindlichkeit der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1 weist die Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 6 aus Abbildung 117 geringere Werte auf. Des Weiteren ist die Schwingung bei hohen Wellenlängen etwas gedämpfter. Es ist zu erkennen, dass die Sensitivität der Diode wesentlich stärker vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes abhängt als bei der Messung ohne Polarisationsfilter.

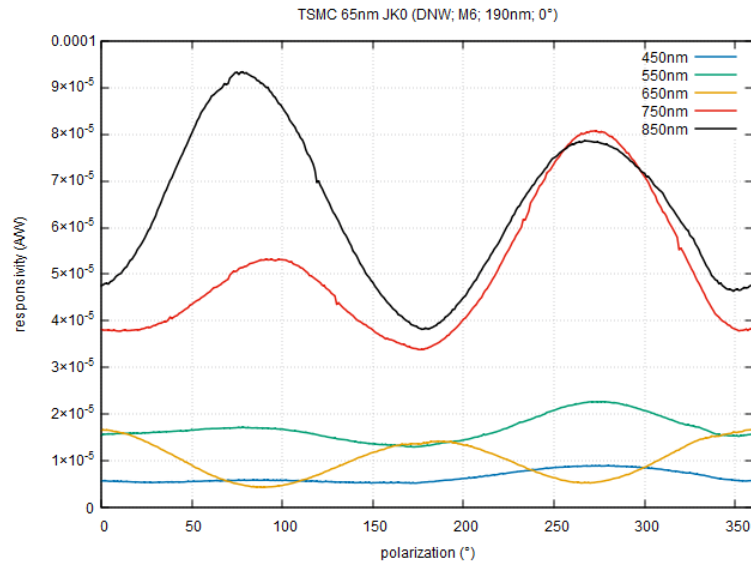


Abbildung 118: Empfindlichkeit der Diode J\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 118 ist zu erkennen, dass bei einer Wellenlänge von 650nm die Sensitivität bei 0° und 180° ein Maximum und bei 90° und 270° ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Bei allen anderen Wellenlängen verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

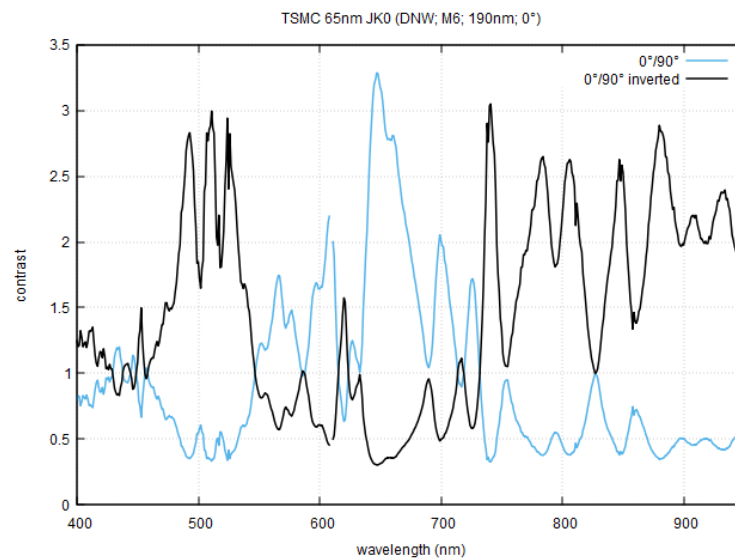


Abbildung 119: Kontrast der Diode J\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 119 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 118. In einem Wellenlängenbereich unterhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen oberhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 45° ausgemessen.

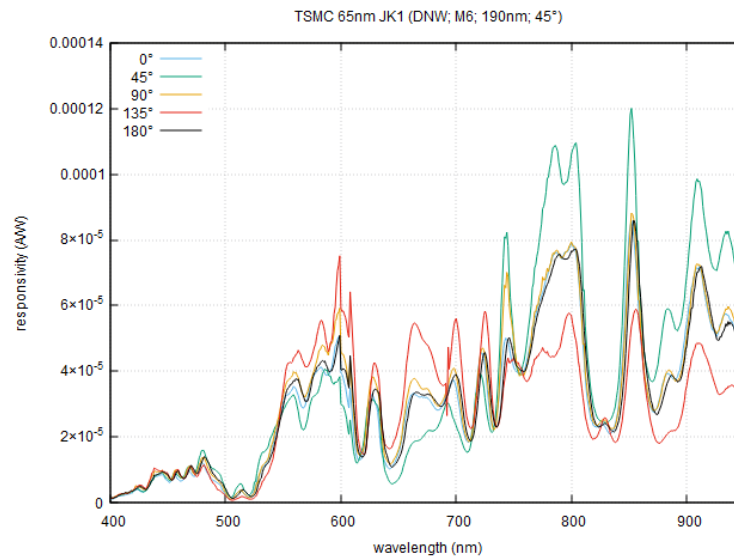


Abbildung 120: Empfindlichkeit der Diode J\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Deep N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 45° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 117 der Deep N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0°. Wie zu erwarten, werden die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 45° besitzt.

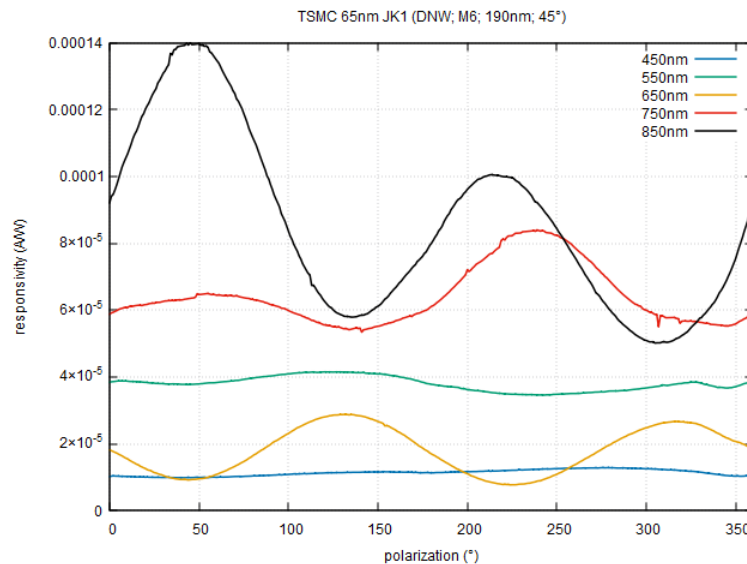


Abbildung 121: Empfindlichkeit der Diode J\_K1 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 121 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei 135° und 315° ein Minimum und bei 45° und 225° ein Maximum erreicht. Dies entspricht dem



erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von 650nm verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

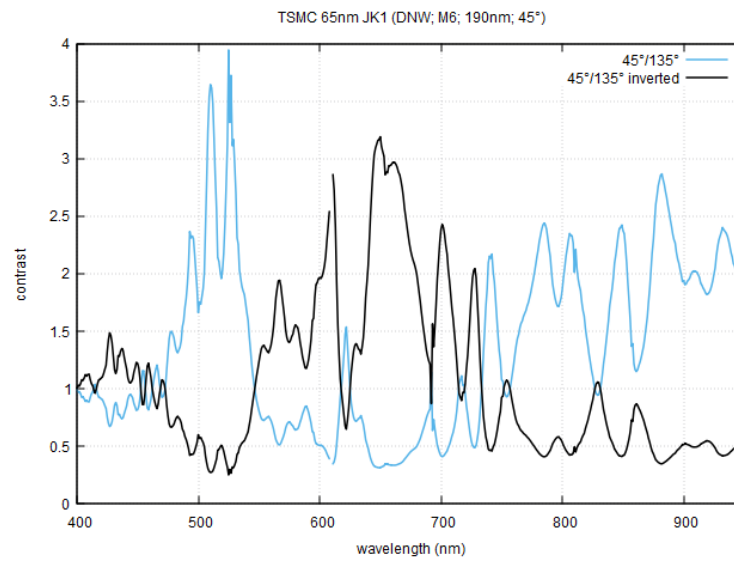


Abbildung 122: Kontrast der Diode J\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurve aus Abbildung 122 entspricht den Ergebnissen in Abbildung 121. In einem Wellenlängenbereich oberhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen unterhalb von 750nm erreicht jedoch die inverse Kontrastkurve Werte oberhalb von 1.

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) mit einem Polarisationsfilter in der Metallage 6, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

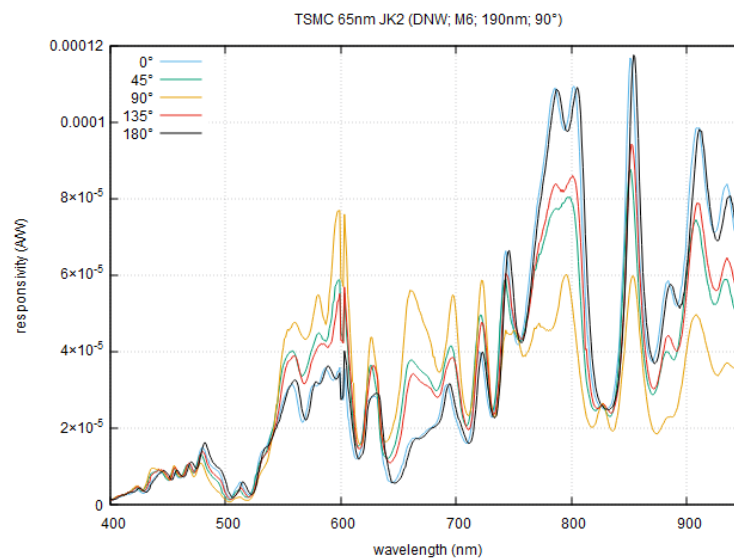


Abbildung 123: Empfindlichkeit der Diode J\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Deep N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 90° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 117 und 120 der

Deep N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$  und  $45^\circ$ . Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $0^\circ$  statt  $90^\circ$  besitzt.

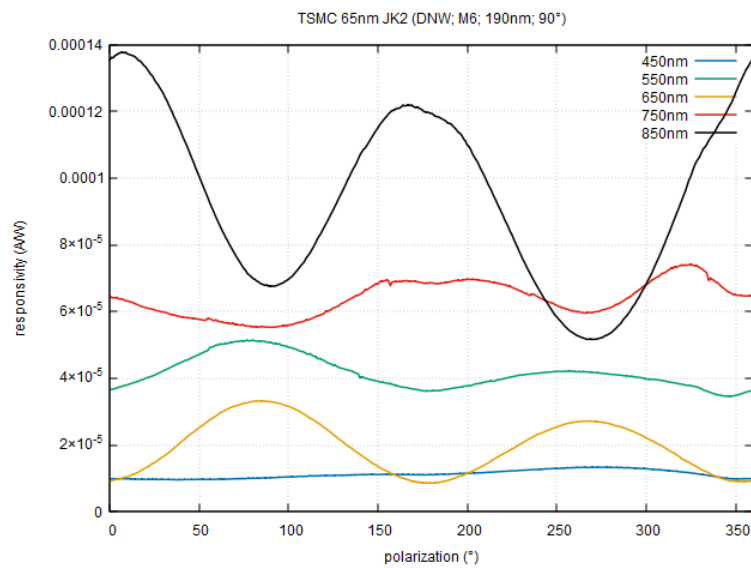


Abbildung 124: Empfindlichkeit der Diode J\_K2 in Abhängigkeit vom Winkel

In der in Abbildung 124 dargestellten Messung folgt die Sensitivität bei den Wellenlängen von 550nm und 650nm der Vorhersage des Satzes von Malus. Bei den anderen Wellenlängen ist das Verhalten invers zu den Erwartungen.

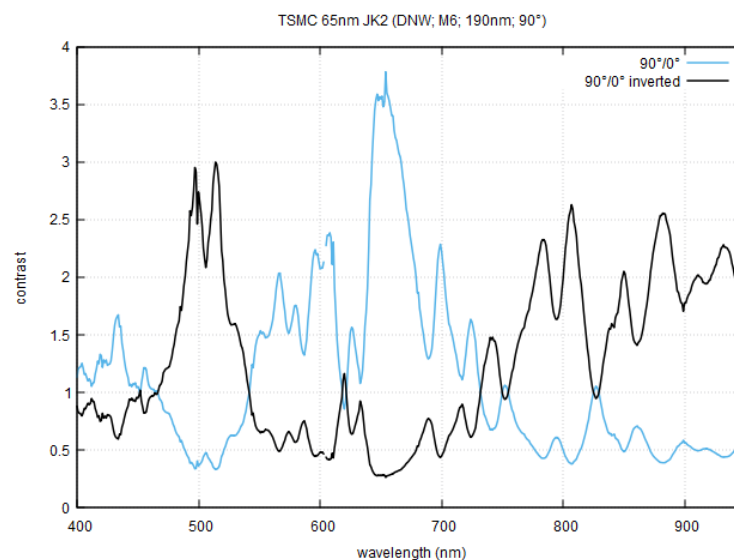


Abbildung 125: Kontrast der Diode J\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 125 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 124. In einem Wellenlängenbereich unterhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen oberhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) mit einem Polarisationsfilter in der Metallage 6, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 135° ausgemessen.

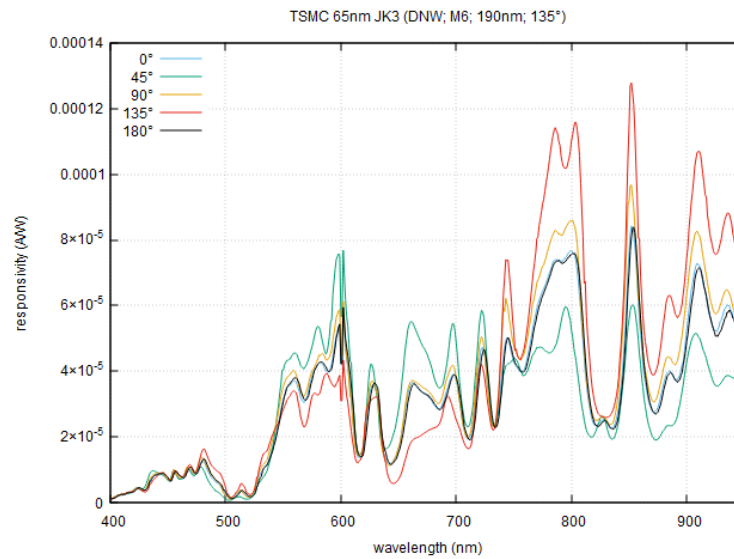


Abbildung 126: Empfindlichkeit der Diode J\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Deep N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 135° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 117, 120 und 123 der Deep N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0°, 45° und 90°. Die höchsten Werte werden wie erwartet bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 135° besitzt.

Ein Vergleich der Messungen aus Abbildung 117, 120 und 123 und 126 zeigt, dass die Sensitivität der Zellen bei 45° und 135° die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht kompatibler Polarisationsausrichtung erreicht, während die Messungen mit Filter bei 0° und 90° die höchsten Werte bei jeweils um 90° verschobene Polarisationsausrichtung erhalten. Grund hierfür könnte eine falsche Zuordnung der Teststrukturen sein.

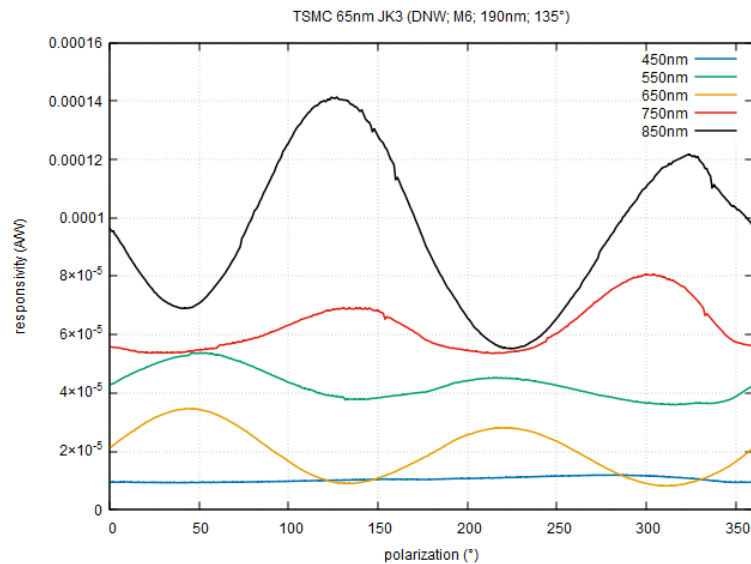


Abbildung 127: Empfindlichkeit der Diode J\_K3 in Abhängigkeit vom Winkel

In der in Abbildung 127 dargestellten Messung folgt die Sensitivität bei den Wellenlängen von 750nm und 850nm der Vorhersage des Satzes von Malus. Bei den anderen Wellenlängen ist das Verhalten invers zu den Erwartungen.

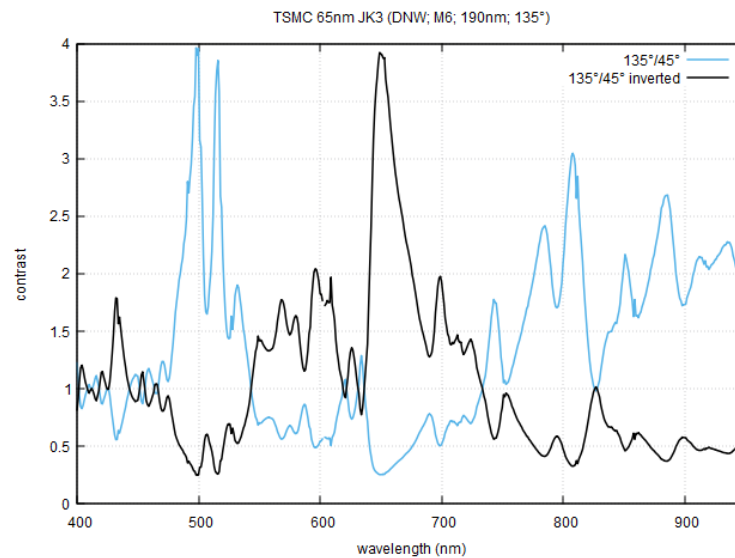


Abbildung 128: Kontrast der Diode J\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 128 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 127. In einem Wellenlängenbereich oberhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen unterhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

### 5.2.2.6 Teststruktur L\_K0-L\_K3

Es wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

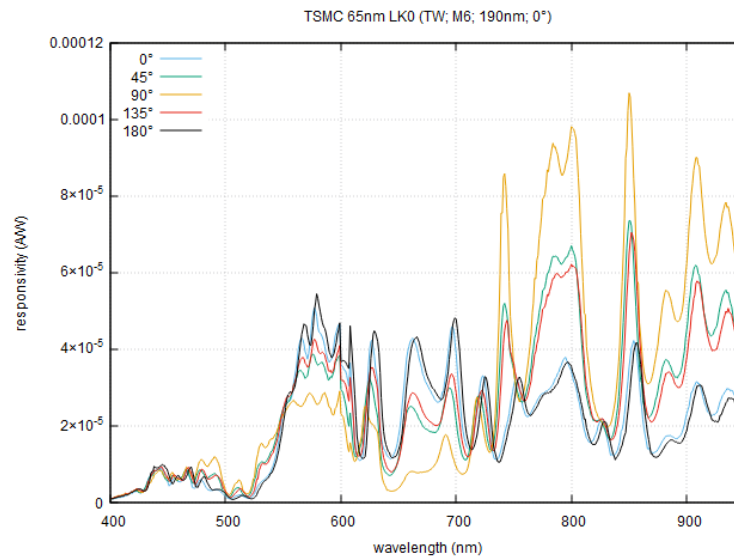


Abbildung 129: Empfindlichkeit der Diode L\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zur Messung der Empfindlichkeit der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1 in Abbildung 93 weist die Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 6 geringere Werte auf. Des Weiteren ist die Schwingung bei hohen Wellenlängen etwas gedämpfter. Ebenso ist auch hier zu erkennen, dass die Sensitivität der Diode wesentlich stärker vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes abhängt als bei der Messung ohne Polarisationsfilter.

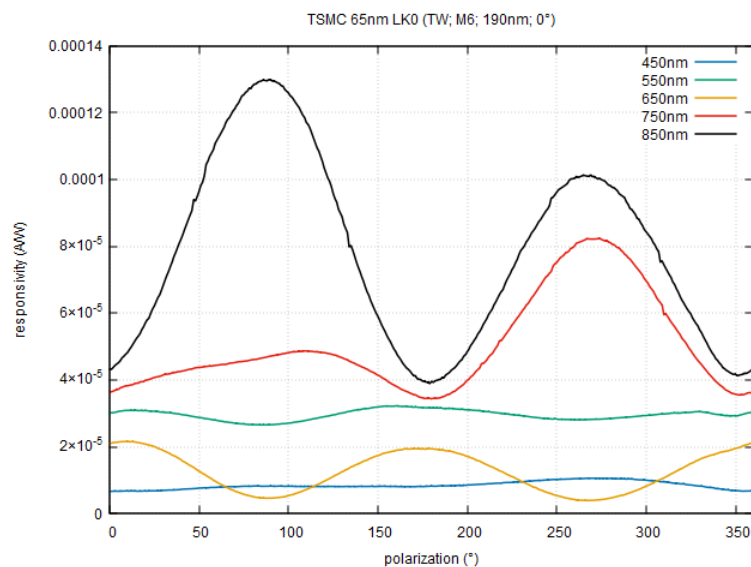


Abbildung 130: Empfindlichkeit der Diode L\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 130 ist zu erkennen, dass bei einer Wellenlänge von 650nm die Sensitivität bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Maximum und bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Bei allen anderen Wellenlängen verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

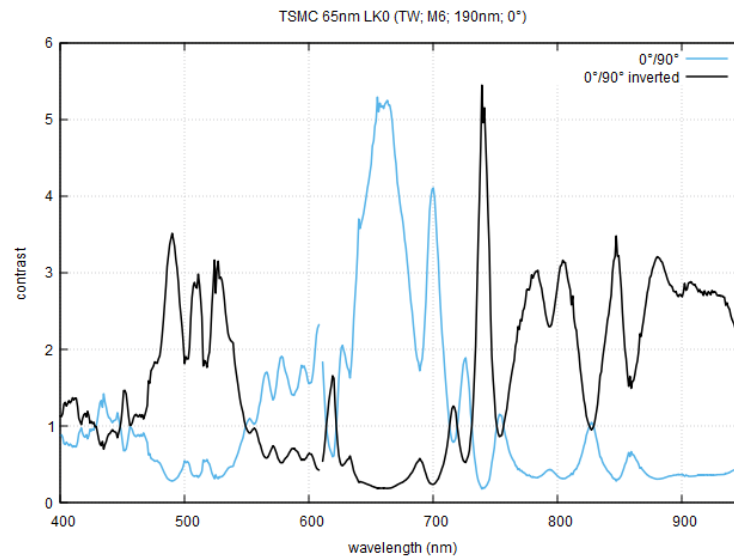


Abbildung 131: Kontrast der Diode L\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 131 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 130. In einem Wellenlängenbereich unterhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen oberhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) mit einem Polarisationsfilter in der Metallage 6, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von  $45^\circ$  ausgemessen.

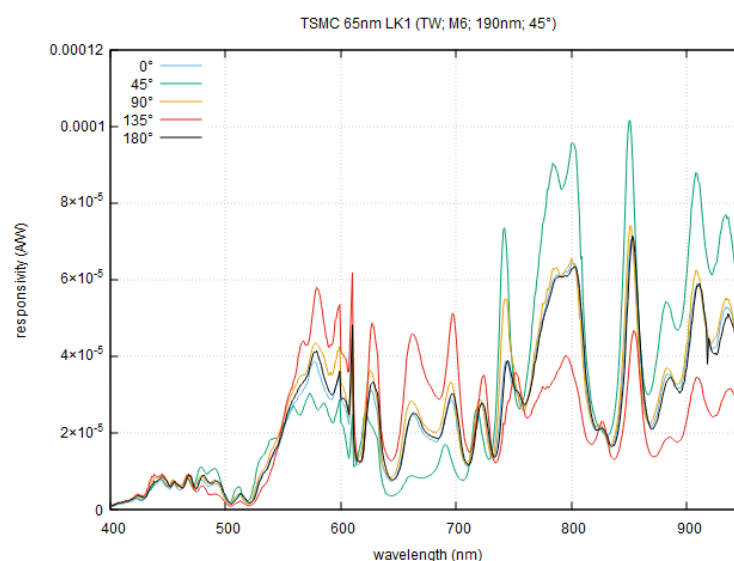


Abbildung 132: Empfindlichkeit der Diode L\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Triple-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $45^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 129 der Triple-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ . Wie zu erwarten, werden die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $45^\circ$  besitzt.

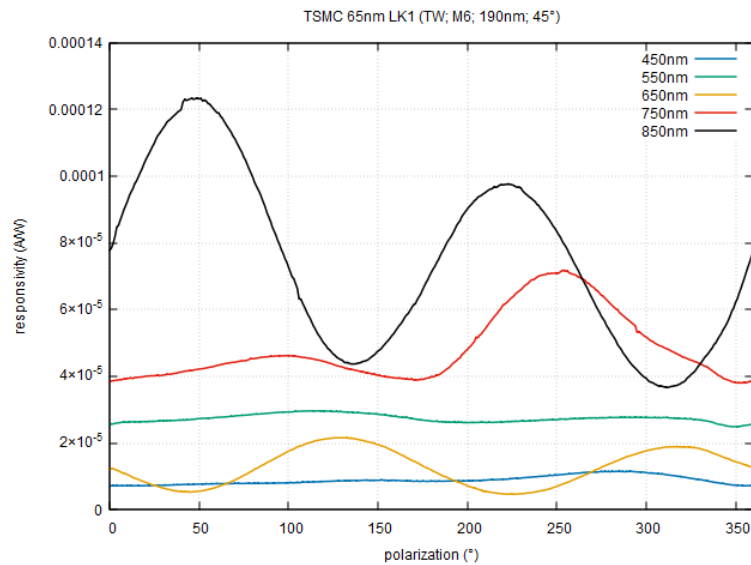


Abbildung 133: Empfindlichkeit der Diode L\_K1 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 133 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei  $135^\circ$  und  $315^\circ$  ein Minimum und bei  $45^\circ$  und  $225^\circ$  ein Maximum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von  $650\text{nm}$  verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

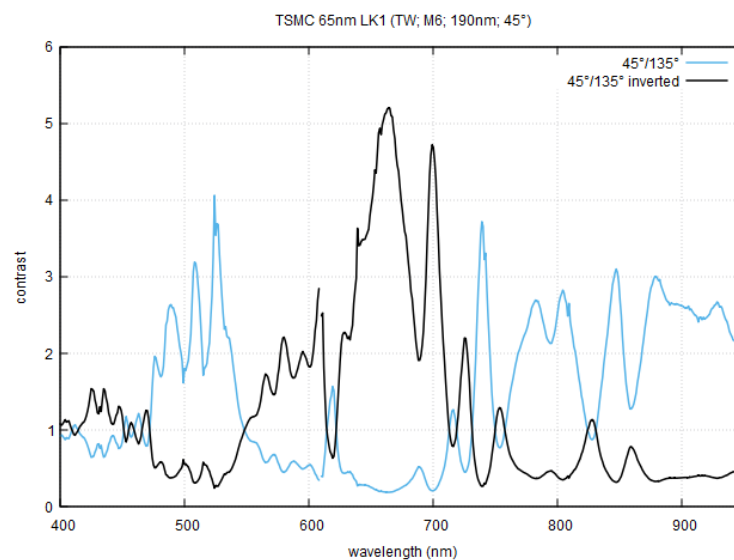


Abbildung 134: Kontrast der Diode L\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurve aus Abbildung 134 entspricht den Ergebnissen in Abbildung 133. In einem Wellenlängenbereich oberhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen unterhalb von 750nm erreicht jedoch die inverse Kontrastkurve Werte oberhalb von 1.

Es wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 190nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

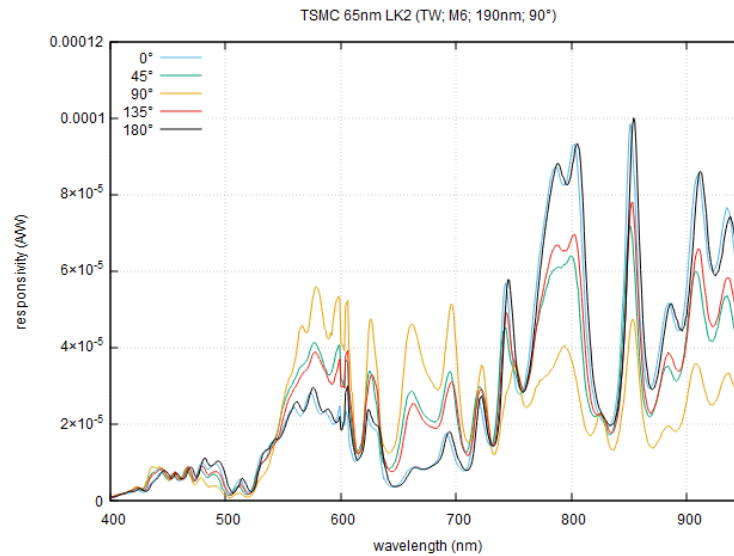


Abbildung 135: Empfindlichkeit der Diode L\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Triple-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 90° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 129 und 132 der Triple-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0° und 45°. Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 0° statt 90° besitzt.

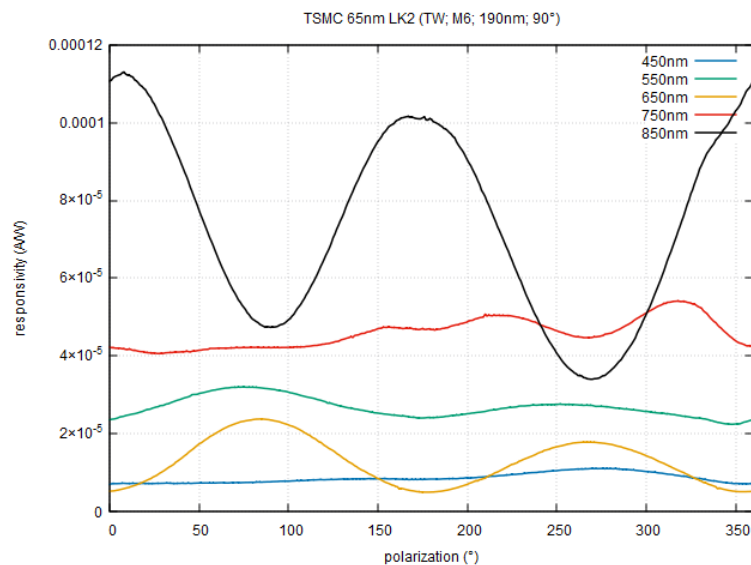


Abbildung 136: Empfindlichkeit der Diode L\_K2 in Abhängigkeit vom Winkel



In der Messung der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 136 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Minimum und bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Maximum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von  $850\text{nm}$  verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

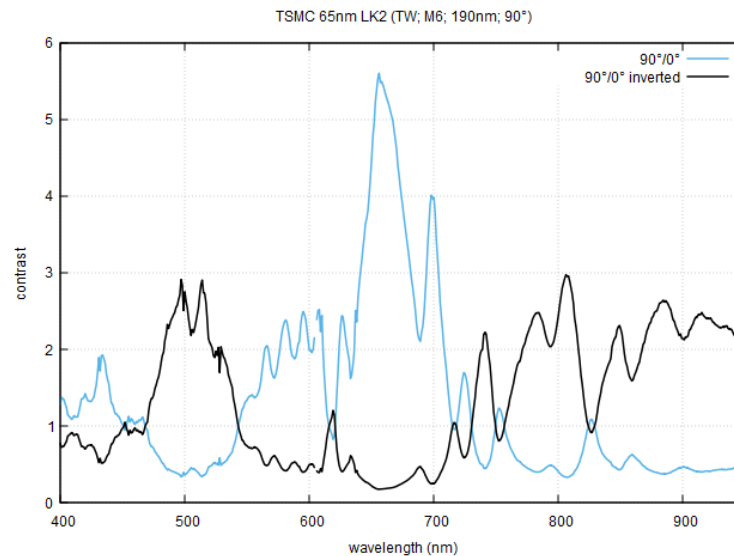


Abbildung 137: Kontrast der Diode L\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 137 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 136. In einem Wellenlängenbereich unterhalb von  $750\text{nm}$  wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen oberhalb von  $750\text{nm}$  erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

Es wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) mit einem Polarisationsfilter in der Metallage 6, einem Pitch von  $190\text{nm}$  und einer Orientierung von  $135^\circ$  ausgemessen.

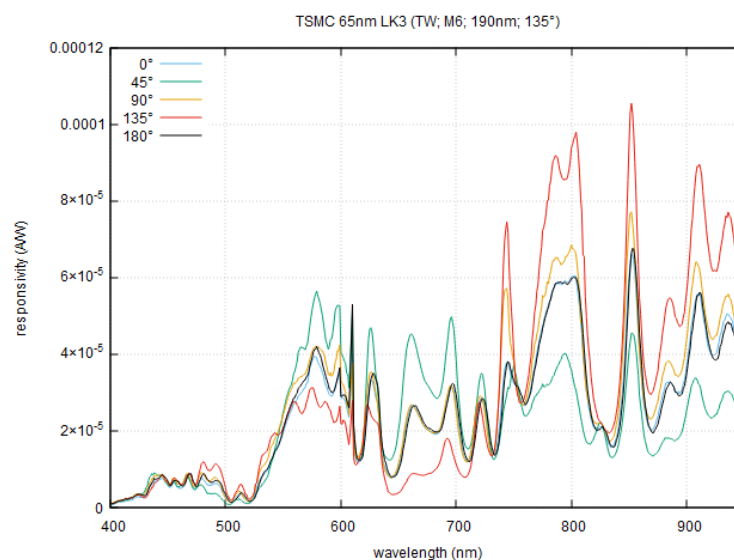


Abbildung 138: Empfindlichkeit der Diode L\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Triple-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $135^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 129, 132 und 135 der Triple-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$ . Die höchsten Werte werden wie erwartet bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $135^\circ$  besitzt.

Ein Vergleich der Messungen aus Abbildung 129, 132 und 135 und 138 zeigt, dass die Sensitivität der Zellen bei  $45^\circ$  und  $135^\circ$  die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht kompatibler Polarisationsausrichtung erreicht, während die Messungen mit Filter bei  $0^\circ$  und  $90^\circ$  die höchsten Werte bei jeweils um  $90^\circ$  verschobene Polarisationsausrichtung erhalten. Grund hierfür könnte eine falsche Zuordnung der Teststrukturen sein.

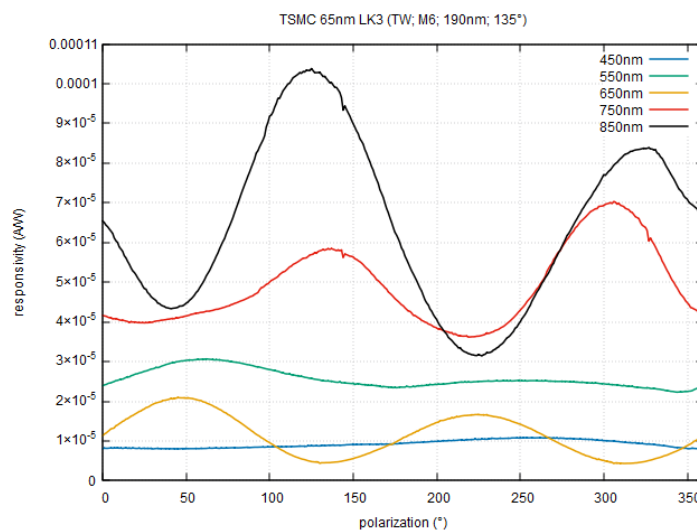


Abbildung 139: Empfindlichkeit der Diode L\_K3 in Abhängigkeit vom Winkel

In der in Abbildung 139 dargestellten Messung folgt die Sensitivität bei den Wellenlängen von 750nm und 850nm der Vorhersage des Satzes von Malus. Bei den anderen Wellenlängen ist das Verhalten invers zu den Erwartungen.

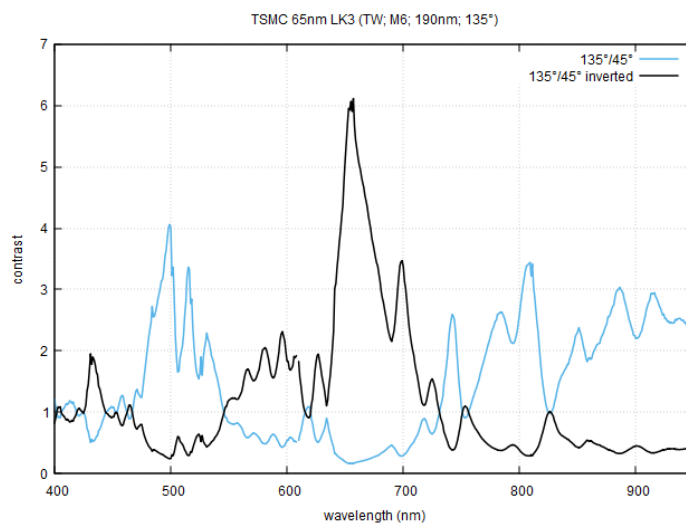
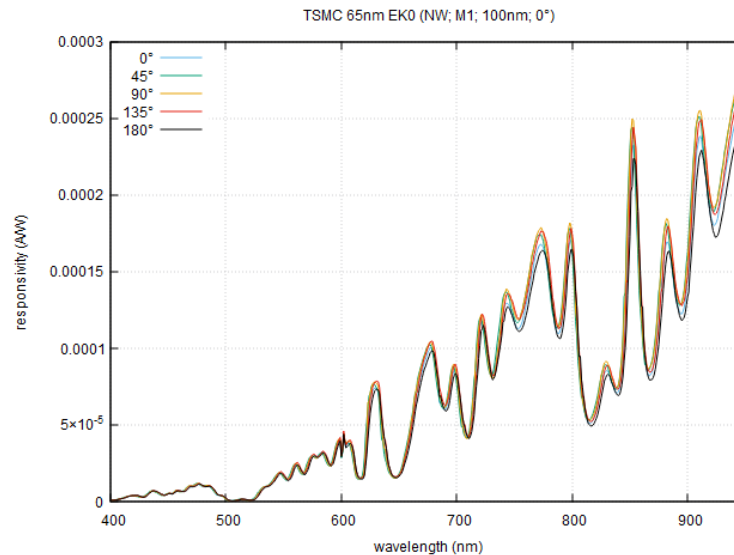


Abbildung 140: Kontrast der Diode L\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 140 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 139. In einem Wellenlängenbereich oberhalb von 750nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht. Bei Wellenlängen unterhalb von 750nm erreicht die inverse Kontrastkurve Werte größer als 1.

#### 5.2.2.7 Teststruktur E\_K0-E\_K3

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 100nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.



*Abbildung 141: Empfindlichkeit der Diode E\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge*

Die Sensitivität der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1 und einem Pitch von 100nm aus Abbildung 141 erreicht ähnliche Werte wie die Sensitivität der N-Well Diode ohne Polarisationsfilter in Abbildung 59. Im Vergleich zur Messung der Empfindlichkeit der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1 und einem Pitch von 190nm in Abbildung 69 weist sie etwa doppelt so große Werte auf. Jedoch ist hier zu erkennen, dass die Sensitivitätsverläufe wesentlich geringer vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes abhängen. Ein Messfehler erscheint wahrscheinlich.

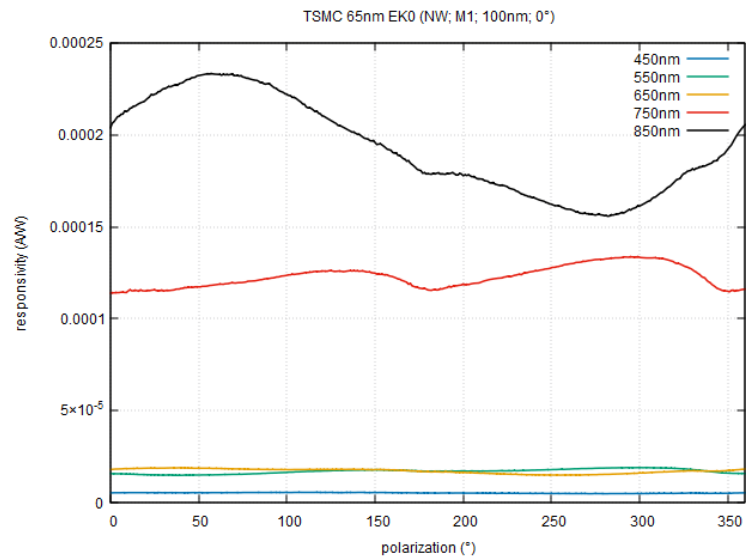


Abbildung 142: Empfindlichkeit der Diode E\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 142 ist die geringe Änderung der Sensitivität vom Polarisationswinkel gut zu erkennen, da die Differenz zwischen Minimum und Maximum viel kleiner ist als bei der Messung aus Abbildung 70. Die Sensitivität bei der Wellenlänge von 850nm erreicht bei 90° ein Maximum und bei 270° ein Minimum. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Zudem besitzt die Messung nur ein Maximum und Minimum statt zwei, wie zu erwarten wäre.

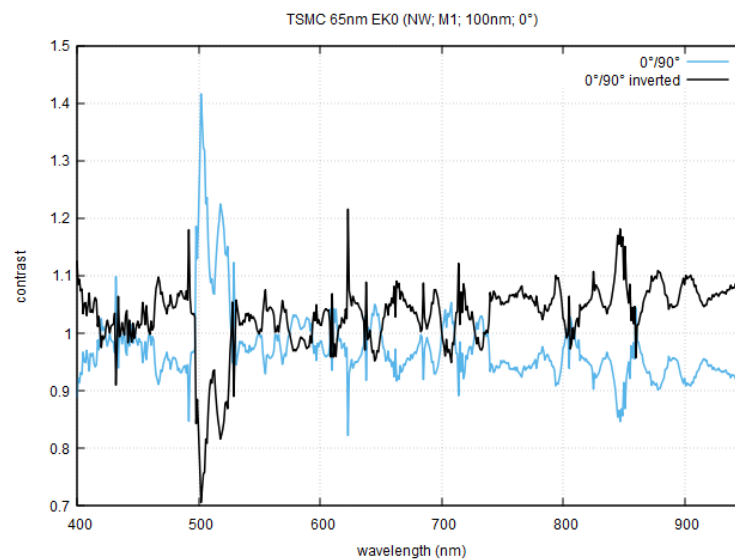


Abbildung 143: Kontrast der Diode E\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zu den Kontrastkurven in Abbildung 71 ergibt sich bei den Kontrastkurven in Abbildung 143 auf Grund der geringen Abhängigkeit vom Polarisationswinkel auch ein geringer Kontrast.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 100nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

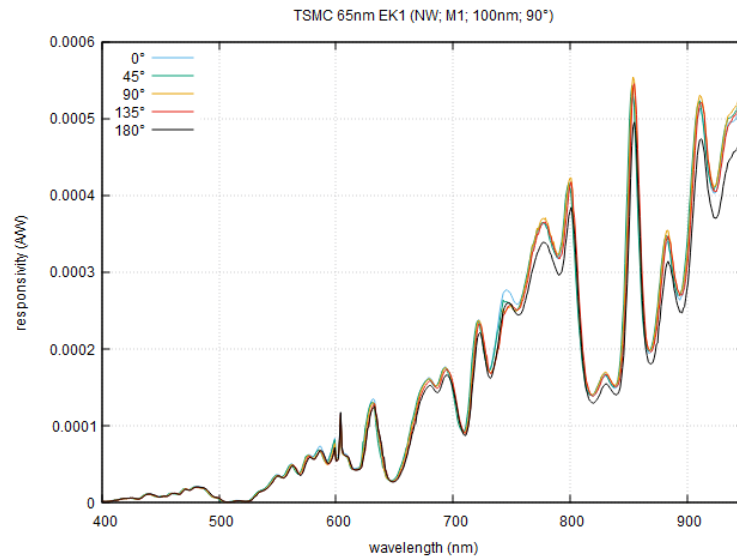


Abbildung 144: Empfindlichkeit der Diode E\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Sensitivitätsverläufe der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 90° aus Abbildung 144 haben wie bei der Messung der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0° aus Abbildung 141 eine geringe Abhängigkeit vom Polarisationswinkel. Jedoch ist hier zu erkennen, dass die Empfindlichkeit um Faktor 2 höher ist als die Empfindlichkeit der N-Well Diode ohne Polarisationsfilter in Abbildung 59. Ein Messfehler erscheint wahrscheinlich.

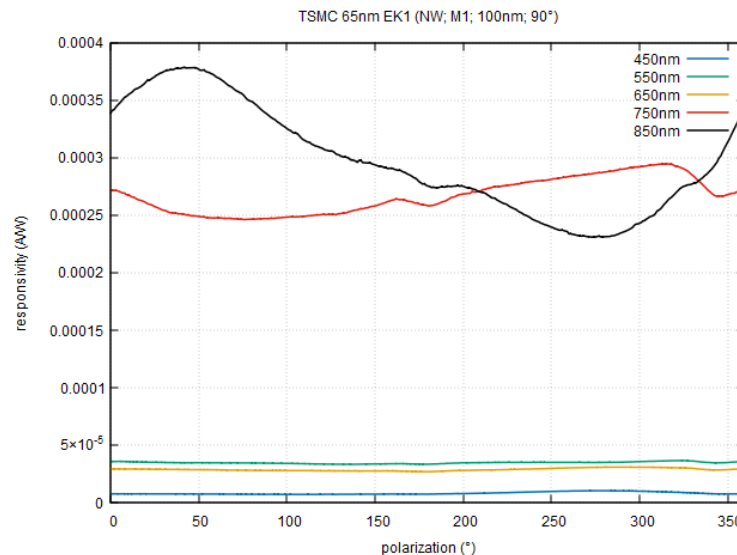


Abbildung 145: Empfindlichkeit der Diode E\_K1 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 145 ist zu erkennen, dass die Differenz zwischen Maximum und Minimum wie bei der Messung aus Abbildung 142 gering ist. Die Sensitivität bei der Wellenlänge von 850nm erreicht

bei 45° ein Maximum statt bei 90°. Ebenso besitzt die Messung nur ein Maximum und Minimum statt zwei, wie zu erwarten wäre.

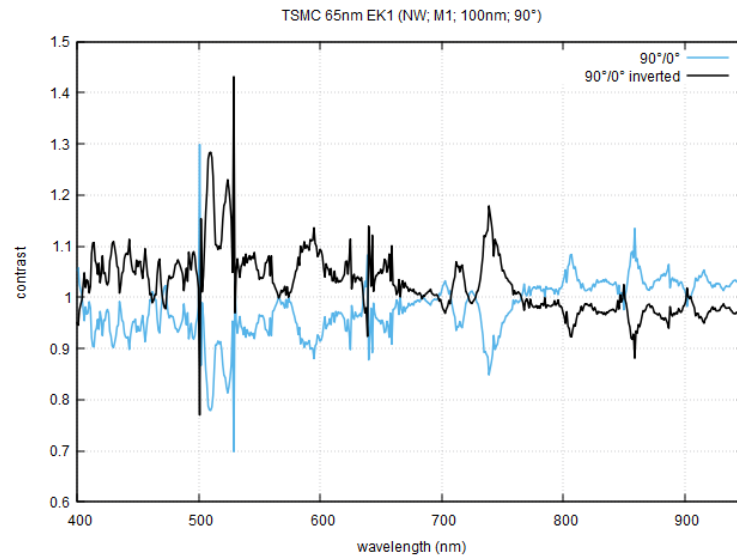


Abbildung 146: Kontrast der Diode E\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zu den Kontrastkurven in Abbildung 71 ergibt sich bei den Kontrastkurven in Abbildung 146 auf Grund der geringen Abhängigkeit vom Polarisationswinkel auch ein geringer Kontrast.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metallage 6, einem Pitch von 100nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

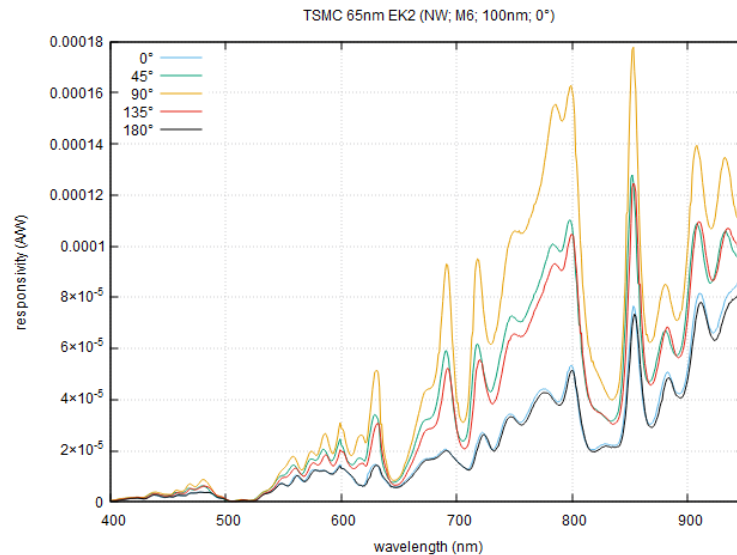


Abbildung 147: Empfindlichkeit der Diode E\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zur Messung der Sensitivität der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metallage 6 und einem Pitch von 190nm aus Abbildung 105 erreicht die Sensitivität der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metallage 6 und einem Pitch von 100nm mit einer Ausrichtung von 0° in Abbildung 147 größere Werte.

Jedoch hat die Sensitivität eine viel stärkere Abhängigkeit vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes und die Schwingung ist bei hohen Wellenlängen gedämpfter als die in den Abbildungen 141 und 144 dargestellte Sensitivität der N-Well Dioden mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1 mit Ausrichtungen von  $0^\circ$  und  $90^\circ$ . Die höchsten Werte werden bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $90^\circ$  statt  $0^\circ$  besitzt.

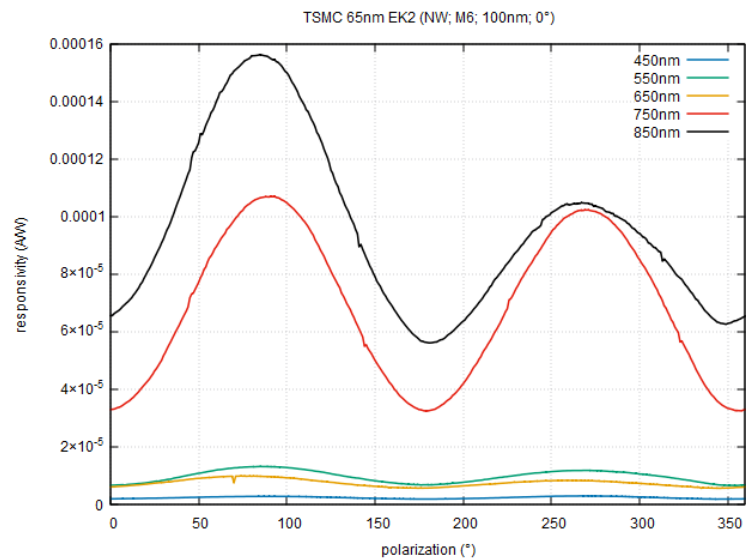


Abbildung 148: Empfindlichkeit der Diode E\_K2 in Abhängigkeit vom Winkel

Das Ergebnis aus Abbildung 147 spiegelt sich in der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 148 wider. Auf Grund der starken Abhängigkeit vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes bildet sich eine große Differenz zwischen Maximum und Minimum. Es ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei allen Wellenlängen bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Maximum und bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten.

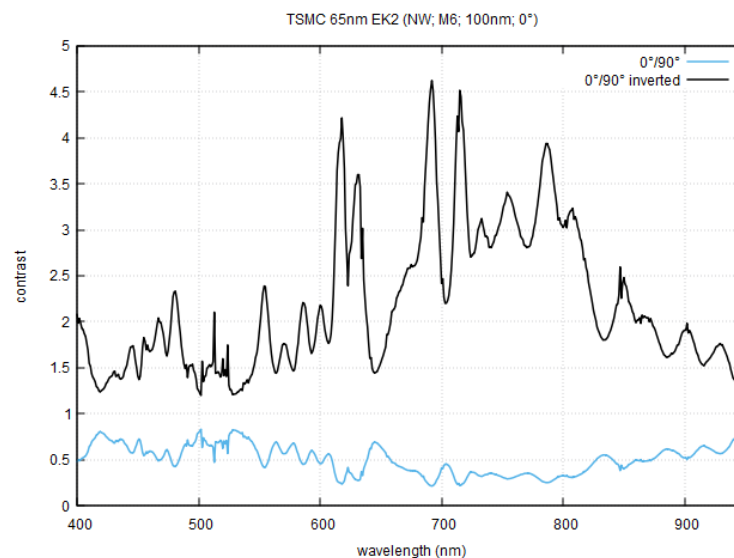


Abbildung 149: Kontrast der Diode E\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die inverse Kontrastkurve in Abbildung 149 erreicht durchgehend Werte größer als 1 bei allen Wellenlängen.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 100nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

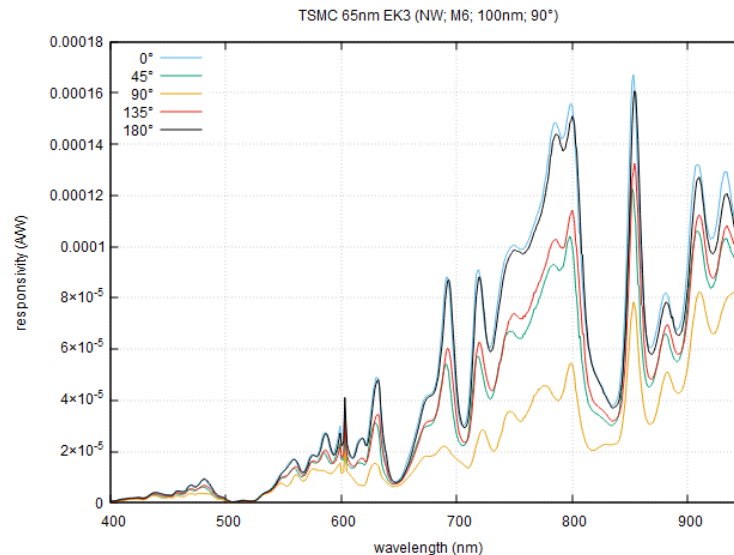


Abbildung 150: Empfindlichkeit der Diode E\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 90° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 147 der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0°. Ebenso ist hier die starke Abhängigkeit der Sensitivität vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes zu erkennen. Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 0° statt 90° besitzt.

Ein Vergleich der Messungen aus Abbildung 141, 144, 147 und 150 zeigt, dass die Sensitivität der Zellen mit Polarisationsfilter in der Metalllage 6 bei 0° und 90° geringere Werte erreicht als die Sensitivität der Zellen mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1. Ebenso ist die Schwingung bei hohen Wellenlängen gedämpfter und die Abhängigkeit vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes viel stärker. Zudem erreichen die Messungen mit Filter in der Metalllage 6 bei 0° und 90° die höchsten Werte bei jeweils um 90° verschobene Polarisationsausrichtung. Grund hierfür könnte eine falsche Zuordnung der Teststrukturen sein.



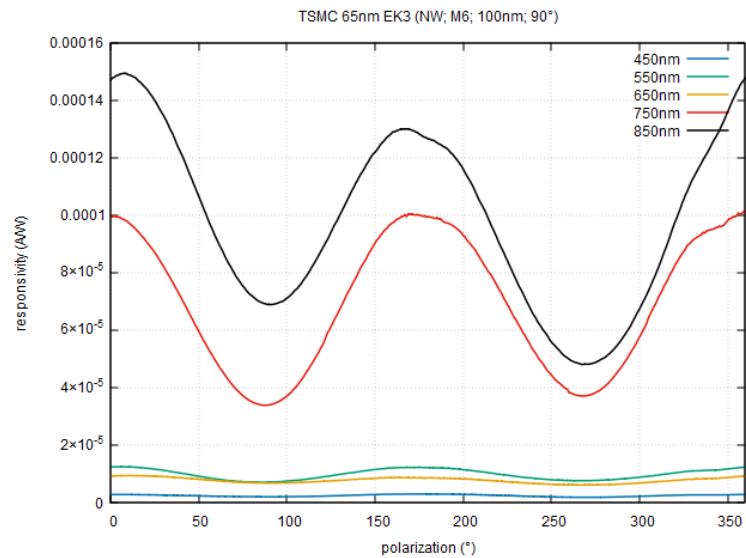


Abbildung 151: Empfindlichkeit der Diode E\_K3 in Abhängigkeit vom Winkel

Das Ergebnis aus Abbildung 150 spiegelt sich in der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 151 wider. Auf Grund der starken Abhängigkeit vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes bildet sich eine große Differenz zwischen Maximum und Minimum. Es ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei allen Wellenlängen bei 0° und 180° ein Maximum und bei 90° und 270° ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten.

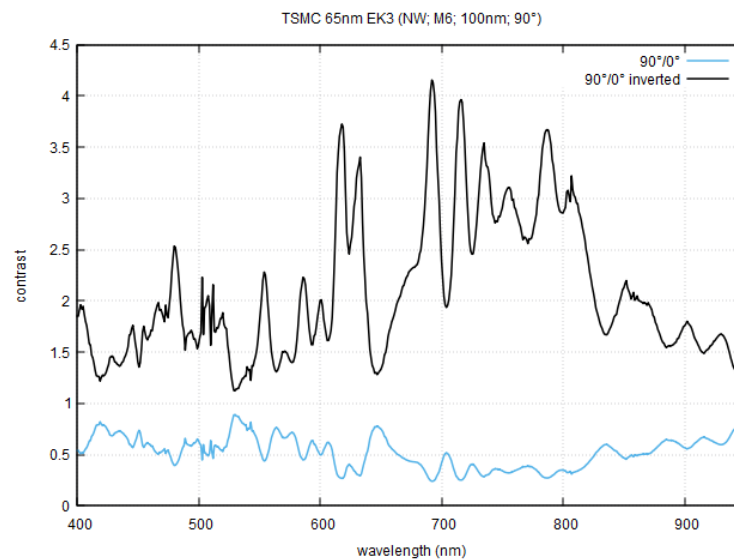


Abbildung 152: Kontrast der Diode E\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die inverse Kontrastkurve in Abbildung 152 erreicht durchgehend Werte größer als 1 bei allen Wellenlängen.

### 5.2.2.8 Teststruktur D\_K0-D\_K3

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 100nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

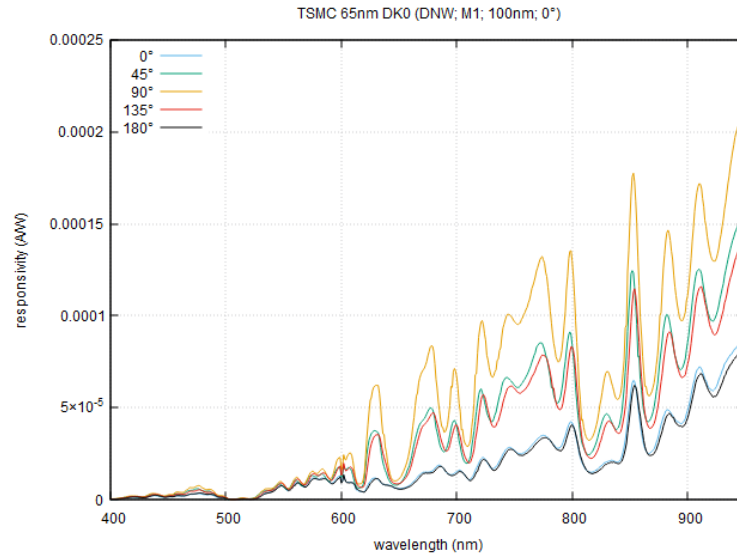


Abbildung 153: Empfindlichkeit der Diode D\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Sensitivität der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1 und einem Pitch von 100nm aus Abbildung 153 hat einen ähnlichen Verlauf wie die Sensitivität der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1 und einem Pitch von 190nm. Ebenso ist die starke Abhängigkeit vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes gut zu erkennen. Die höchsten Werte werden bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 90° statt 0° besitzt.

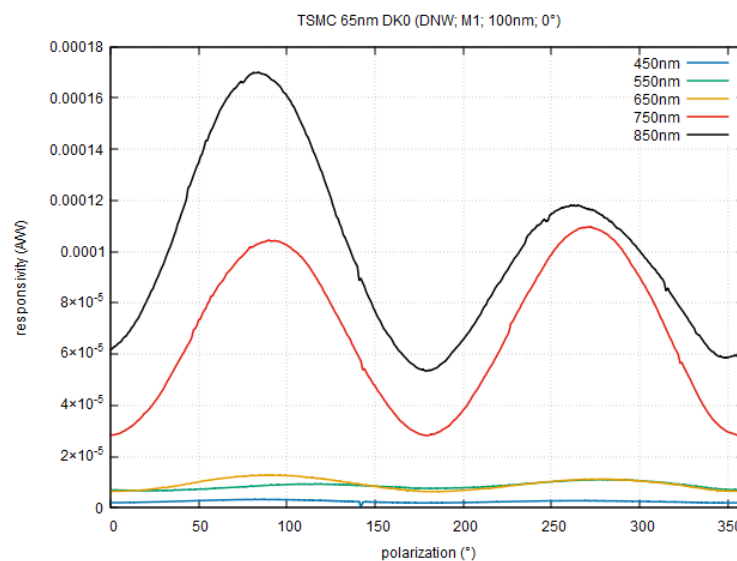


Abbildung 154: Empfindlichkeit der Diode D\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel

Das Ergebnis aus Abbildung 153 spiegelt sich in der Messung der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 154 wider. Auf Grund der starken Abhängigkeit vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes bildet sich eine große Differenz zwischen Maximum und Minimum. Es ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei allen Wellenlängen bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Maximum und bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt.

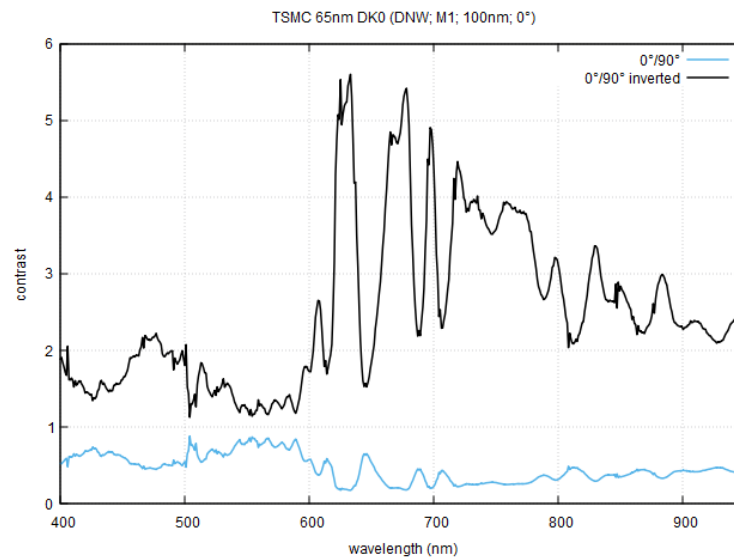


Abbildung 155: Kontrast der Diode  $D_{K0}$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die inverse Kontrastkurve in Abbildung 155 erreicht durchgehend Werte größer als 1 bei allen Wellenlängen.

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 100nm und einer Orientierung von  $90^\circ$  ausgemessen.

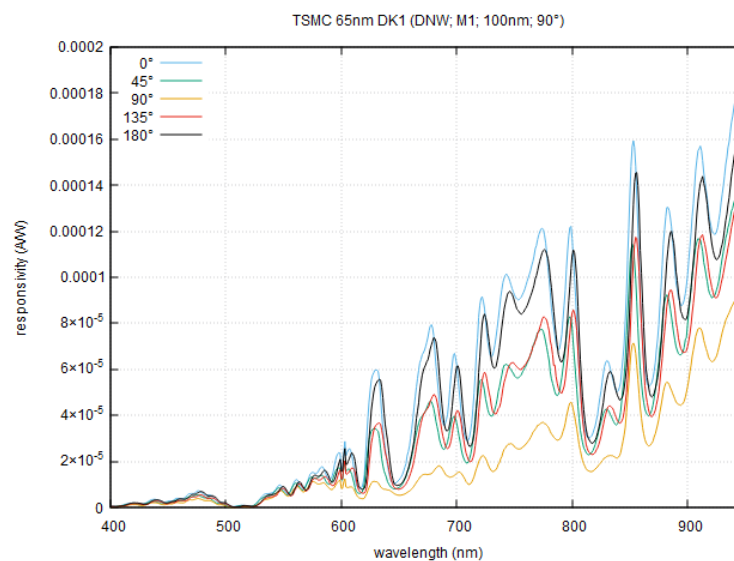


Abbildung 156: Empfindlichkeit der Diode  $D_{K1}$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Deep N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $90^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 153 der Deep N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ . Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $0^\circ$  statt  $90^\circ$  besitzt.

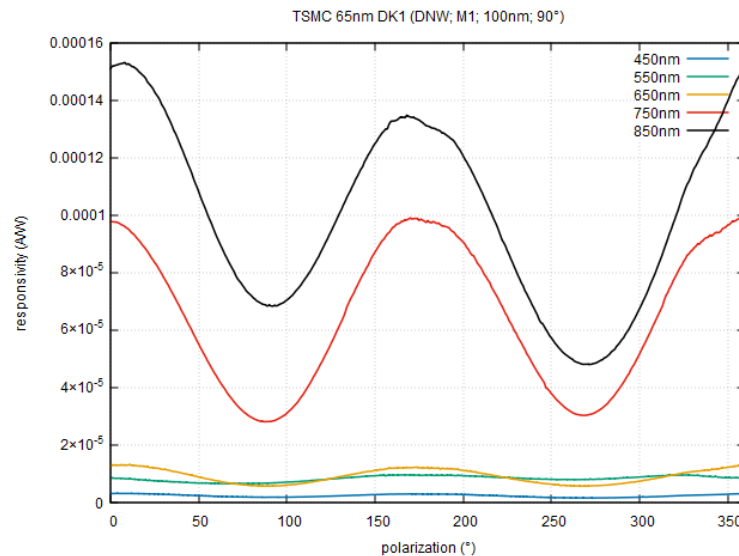


Abbildung 157: Empfindlichkeit der Diode  $D\_K1$  in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 157 ist zu erkennen, dass bei allen Wellenlängen die Sensitivität bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Maximum und bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten.

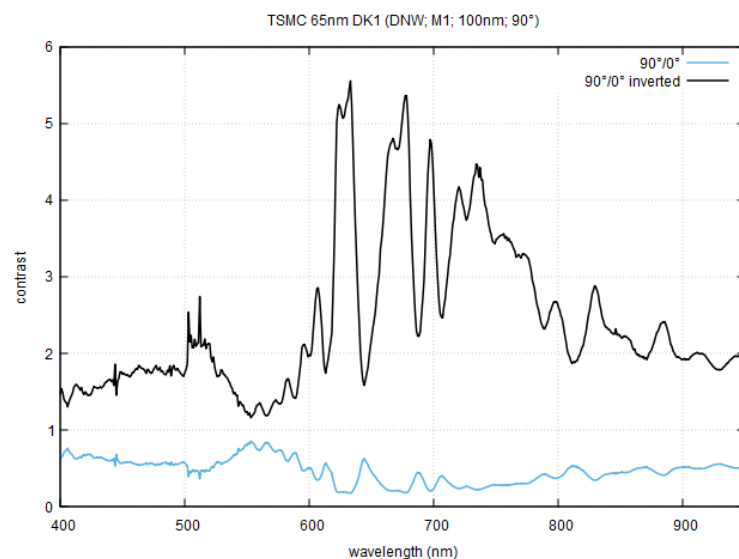


Abbildung 158: Kontrast der Diode  $D\_K1$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die inverse Kontrastkurve in Abbildung 158 erreicht durchgehend Werte größer als 1 bei allen Wellenlängen.

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 100nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

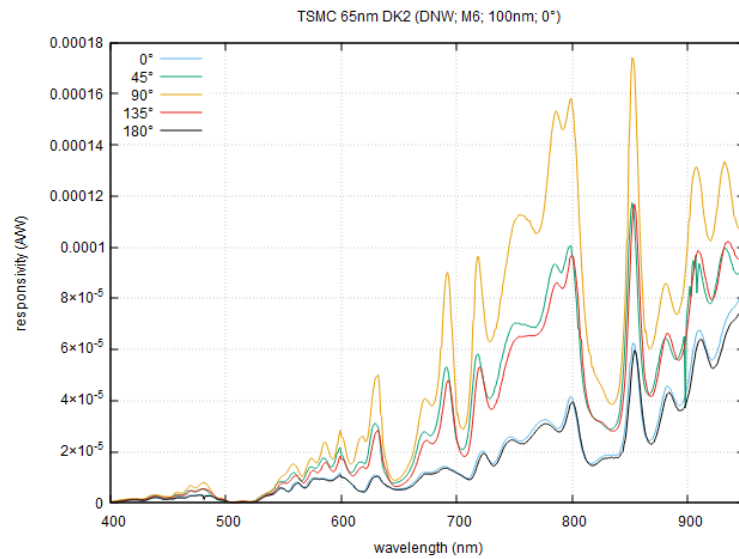


Abbildung 159: Empfindlichkeit der Diode D\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zur Messung der Sensitivität der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 6 und einem Pitch von 190nm aus Abbildung 117 erreicht die Sensitivität der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 6 und einem Pitch von 100nm mit einer Ausrichtung von 0° in Abbildung 159 größere Werte. Jedoch ist die Schwingung bei hohen Wellenlängen gedämpfter als die in den Abbildungen 153 und 156 dargestellten Messungen der Zellen in der Metalllage 1. Die höchsten Werte werden bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 90° statt 0° besitzt.

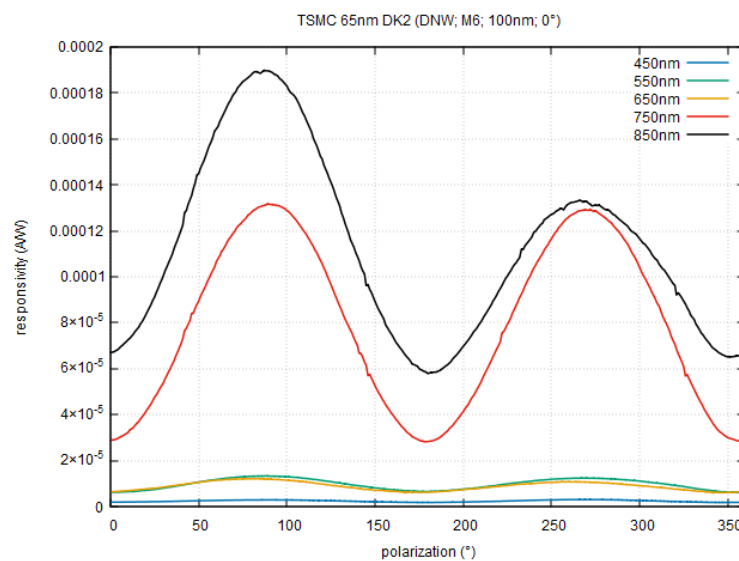


Abbildung 160: Empfindlichkeit der Diode D\_K2 in Abhängigkeit vom Winkel

Das Ergebnis aus Abbildung 159 spiegelt sich in der Messung der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 160 wider. Auf Grund der starken Abhängigkeit vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes bildet sich eine große Differenz zwischen Maximum und Minimum. Es ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei allen Wellenlängen bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Maximum und bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt.

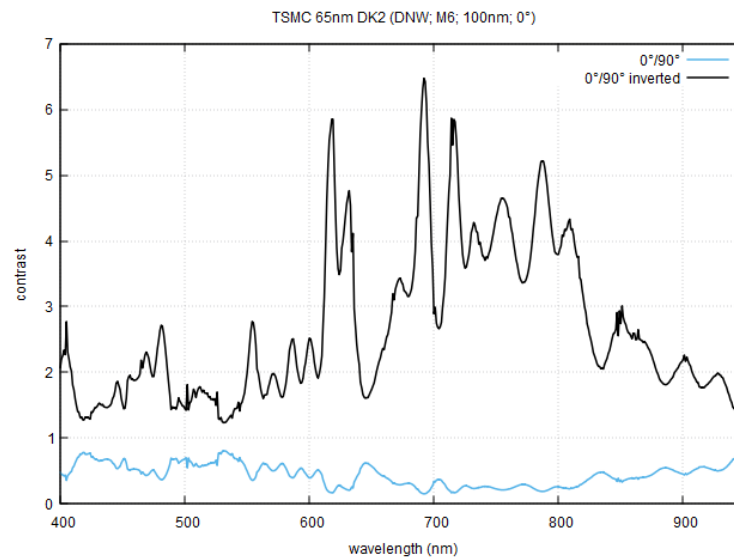


Abbildung 161: Kontrast der Diode  $D_{K2}$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die inverse Kontrastkurve in Abbildung 161 erreicht durchgehend Werte größer als 1 bei allen Wellenlängen.

Es wird eine Deep N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.2) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 100nm und einer Orientierung von  $90^\circ$  ausgemessen.

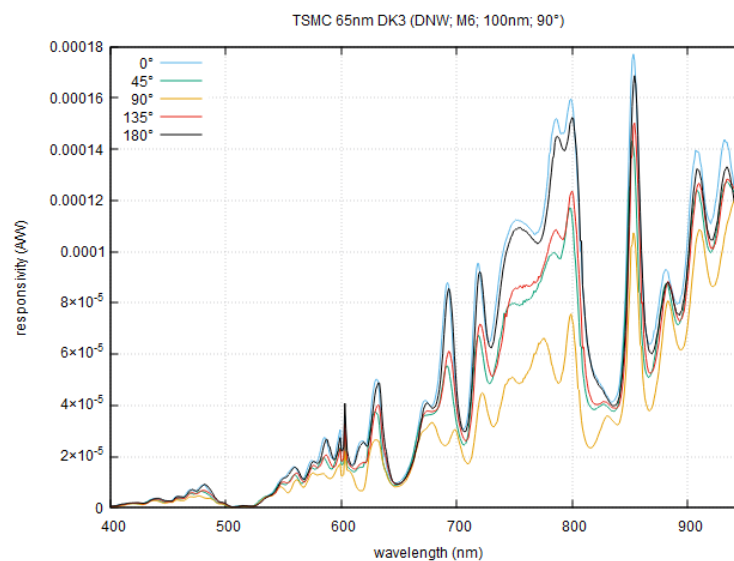


Abbildung 162: Empfindlichkeit der Diode  $D_{K3}$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Deep N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $90^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 159 der Deep N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ . Ebenso ist hier die starke Abhängigkeit der Sensitivität vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes zu erkennen. Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $0^\circ$  statt  $90^\circ$  besitzt.

Ein Vergleich der Messungen aus Abbildung 153, 156, 159 und 162 zeigt, dass die Schwingung der Sensitivität bei hohen Wellenlängen der Zellen mit Polarisationsfilter in der Metalllage 6 bei  $0^\circ$  und  $90^\circ$  gedämpfter ist als bei den Zellen mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1. Zudem erreicht die Sensitivität der Zellen bei allen Messungen die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht bei jeweils um  $90^\circ$  verschobene Polarisationsausrichtung. Grund hierfür könnte eine falsche Zuordnung der Teststrukturen sein.

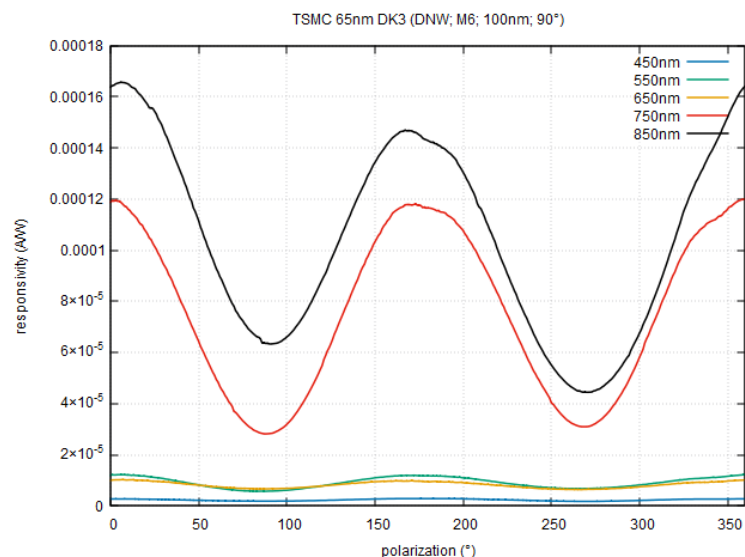


Abbildung 163: Empfindlichkeit der Diode D\_K3 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 163 ist zu erkennen, dass bei allen Wellenlängen die Sensitivität bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Maximum und bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten.

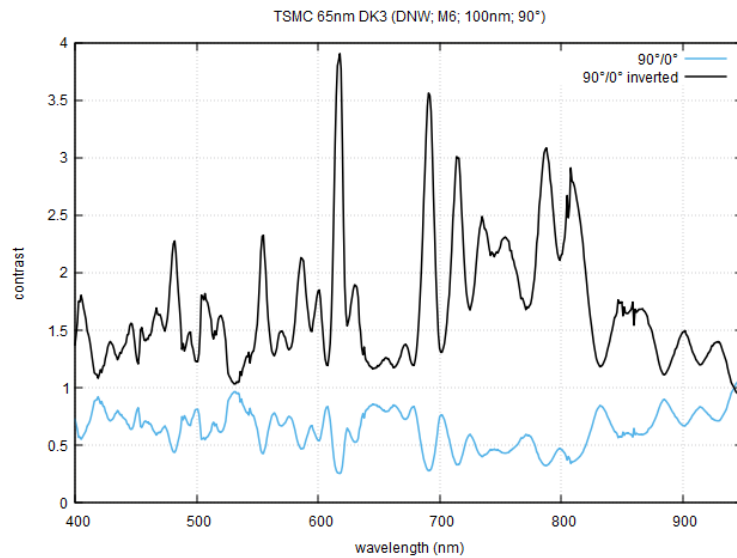


Abbildung 164: Kontrast der Diode  $D_{K3}$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die inverse Kontrastkurve in Abbildung 164 erreicht durchgehend Werte größer als 1 bei allen Wellenlängen.

#### 5.2.2.9 Teststruktur $F_{K0}$ - $F_{K3}$

Es wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 100nm und einer Orientierung von  $0^\circ$  ausgemessen.

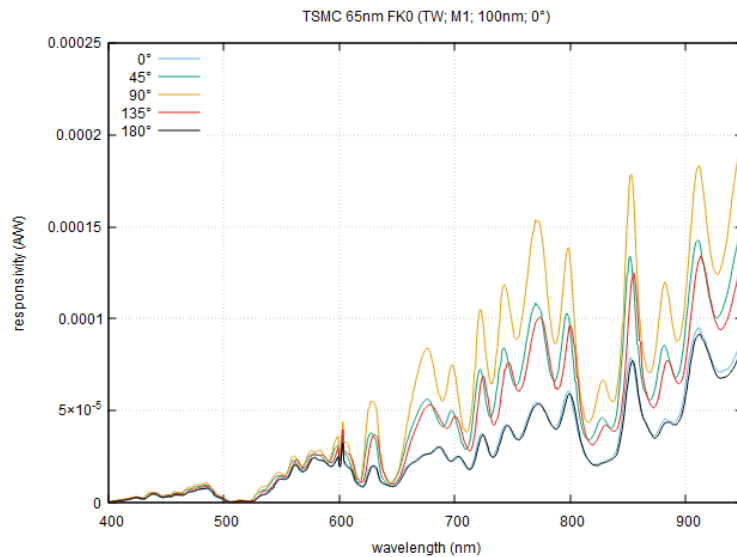


Abbildung 165: Empfindlichkeit der Diode  $F_{K0}$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Sensitivität der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1 und einem Pitch von 100nm aus Abbildung 165 hat einen ähnlichen Verlauf wie die Sensitivität der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1 und einem Pitch von 190nm aus Abbildung 93. Ebenso ist die starke Abhängigkeit vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes gut zu erkennen. Die höchsten Werte



werden bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $90^\circ$  statt  $0^\circ$  besitzt.

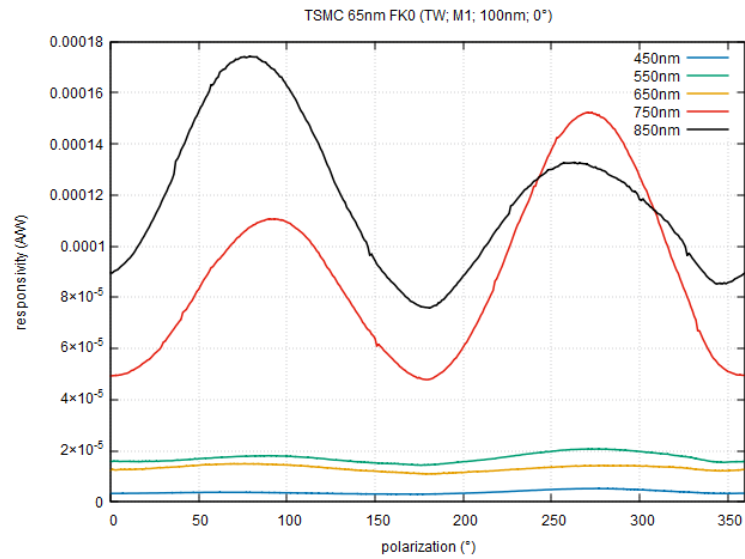


Abbildung 166: Empfindlichkeit der Diode F\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel

Das Ergebnis aus Abbildung 165 spiegelt sich in der Messung der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 166 wider. Auf Grund der starken Abhängigkeit vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes bildet sich eine große Differenz zwischen Maximum und Minimum. Es ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei allen Wellenlängen bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Maximum und bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt.

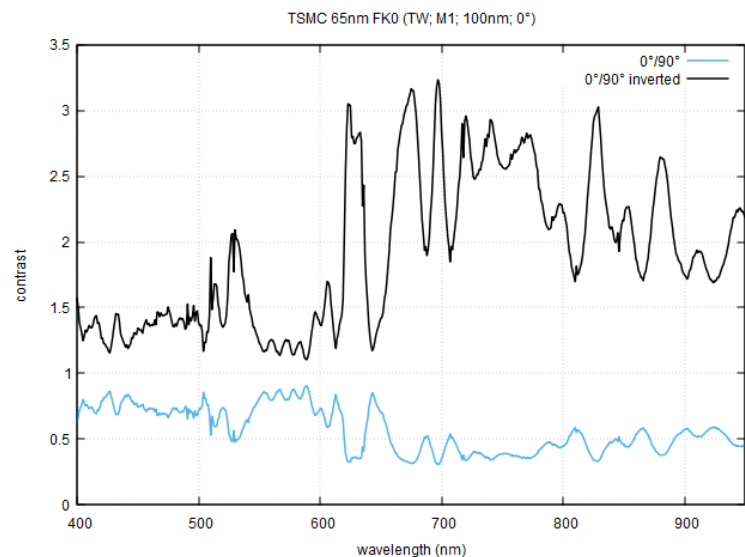


Abbildung 167: Kontrast der Diode F\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die inverse Kontrastkurve in Abbildung 167 erreicht durchgehend Werte größer als 1 bei allen Wellenlängen.

Es wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 100nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

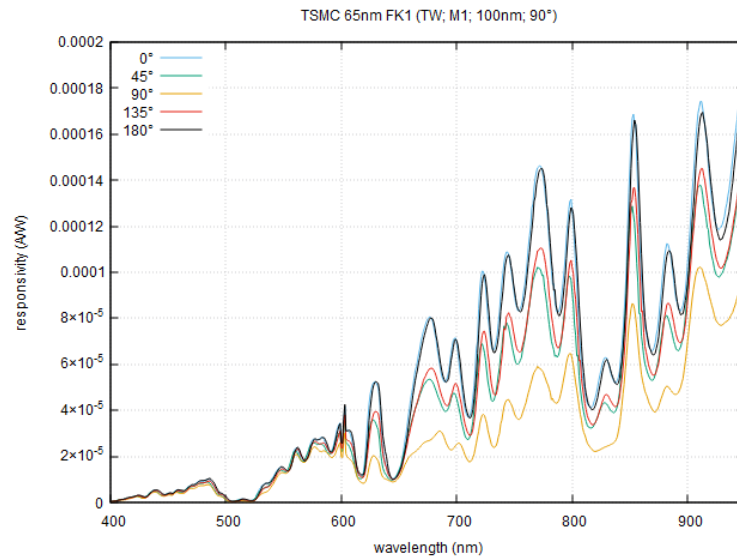


Abbildung 168: Empfindlichkeit der Diode F\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Triple-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 90° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 165 der Triple-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0°. Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 0° statt 90° besitzt.

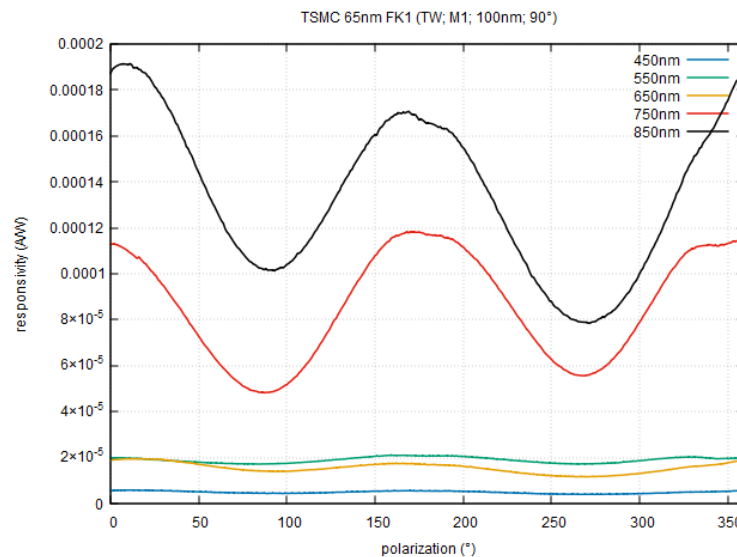


Abbildung 169: Empfindlichkeit der Diode F\_K1 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 169 ist zu erkennen, dass bei allen Wellenlängen die Sensitivität bei 0° und 180° ein Maximum und bei 90° und 270° ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten.

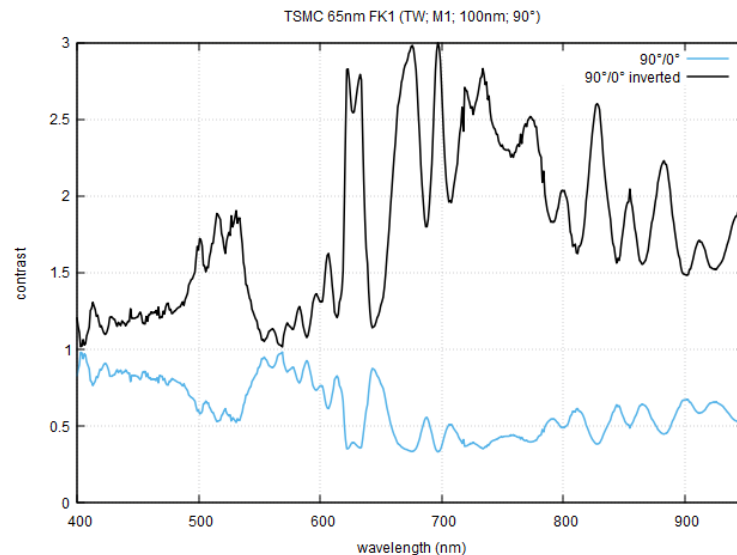


Abbildung 170: Kontrast der Diode F\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die inverse Kontrastkurve in Abbildung 170 erreicht durchgehend Werte größer als 1 bei allen Wellenlängen.

Es wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 100nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

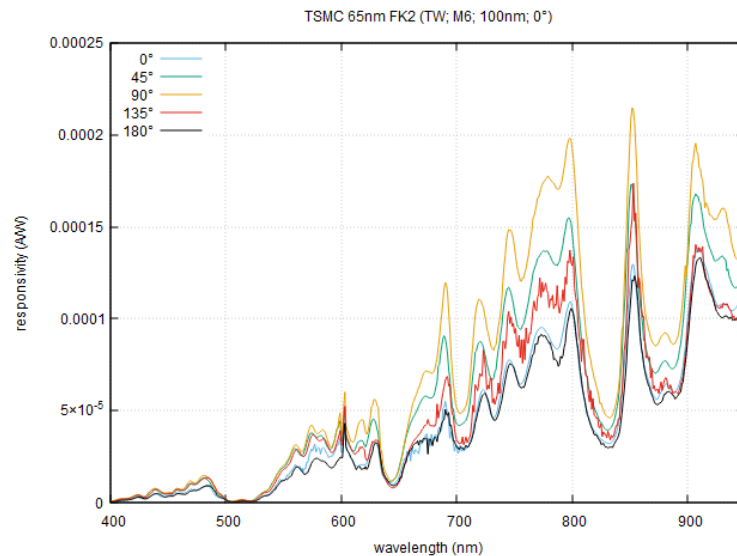


Abbildung 171: Empfindlichkeit der Diode F\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zur Messung der Sensitivität der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 6 und einem Pitch von 190nm aus Abbildung 129 erreicht die Sensitivität der Deep N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 6 und einem Pitch von 100nm mit einer Ausrichtung von 0° in Abbildung 171 größere Werte. Jedoch ist die Schwingung bei hohen Wellenlängen gedämpfter als die in den Abbildungen 165 und 168 dargestellten Messungen der Zellen in der Metalllage 1.

Die höchsten Werte werden bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $90^\circ$  statt  $0^\circ$  besitzt.

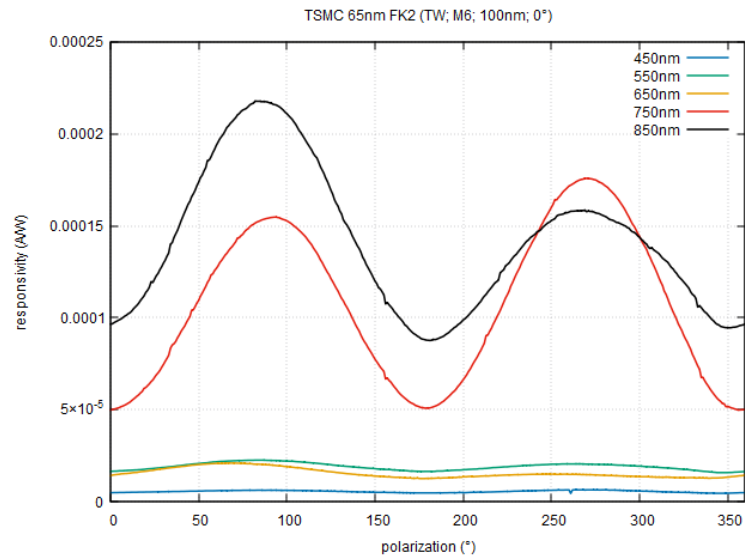


Abbildung 172: Empfindlichkeit der Diode F\_K2 in Abhängigkeit vom Winkel

Das Ergebnis aus Abbildung 171 spiegelt sich in der Messung der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 172 wider. Auf Grund der starken Abhängigkeit vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes bildet sich eine große Differenz zwischen Maximum und Minimum. Es ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei allen Wellenlängen bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Maximum und bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt.

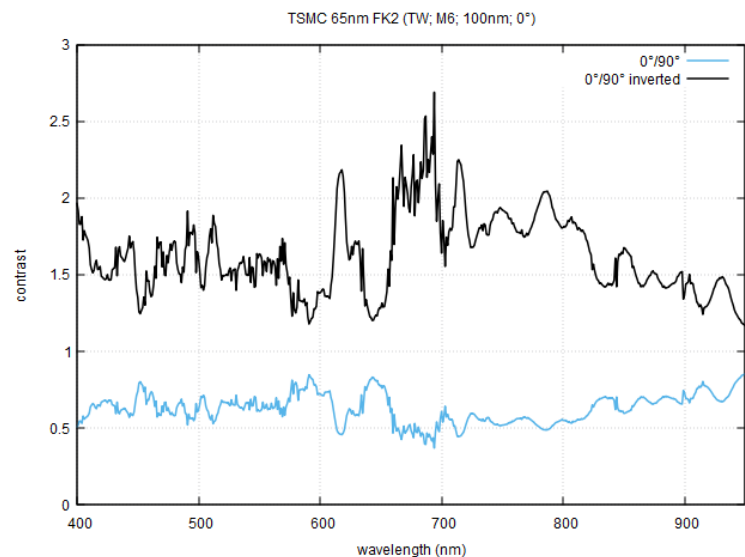


Abbildung 173: Kontrast der Diode F\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die inverse Kontrastkurve in Abbildung 155 erreicht durchgehend Werte größer als 1 bei allen Wellenlängen.

Es wird eine Triple-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.3) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 100nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

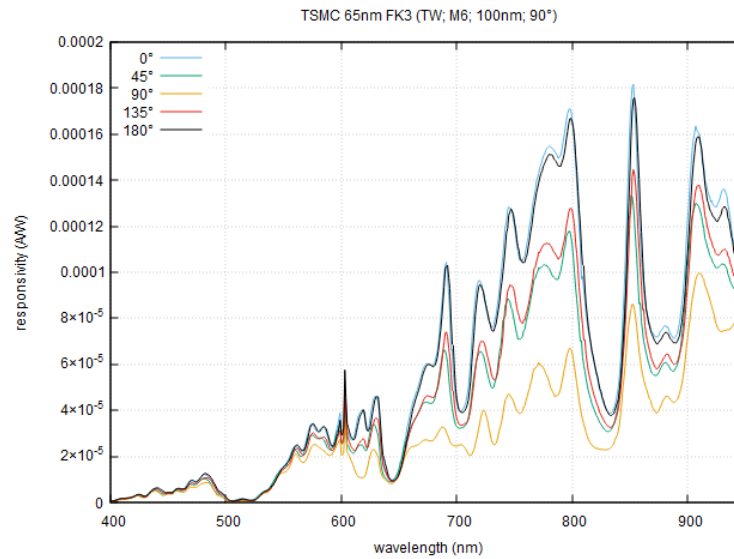


Abbildung 174: Empfindlichkeit der Diode F\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der Triple-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 90° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 171 der Triple-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0°. Ebenso ist hier die starke Abhängigkeit der Sensitivität vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes zu erkennen. Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 0° statt 90° besitzt.

Ein Vergleich der Messungen aus Abbildung 165, 168, 171 und 174 zeigt, dass die Schwingung der Sensitivität bei hohen Wellenlängen der Zellen mit Polarisationsfilter in der Metalllage 6 bei 0° und 90° gedämpfter ist als bei den Zellen mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1. Zudem erreicht die Sensitivität der Zellen bei allen Messungen die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht bei jeweils um 90° verschobene Polarisationsausrichtung. Grund hierfür könnte eine falsche Zuordnung der Teststrukturen sein.

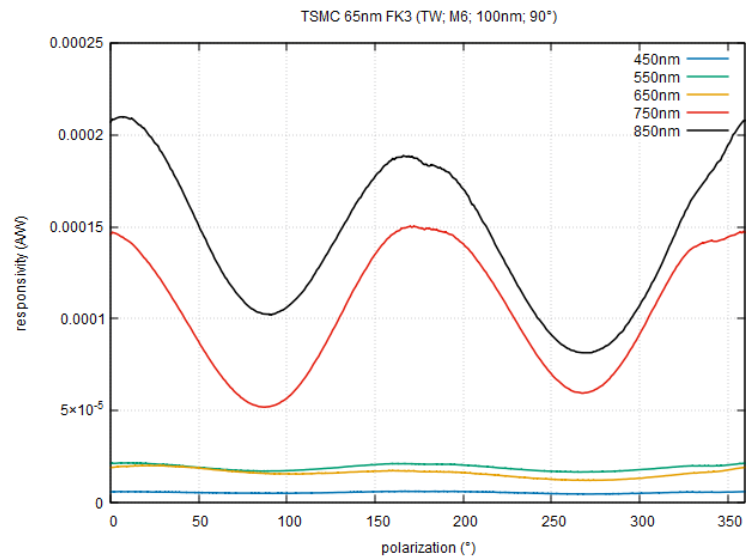


Abbildung 175: Empfindlichkeit der Diode F\_K3 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der Triple-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 175 ist zu erkennen, dass bei allen Wellenlängen die Sensitivität bei 0° und 180° ein Maximum und bei 90° und 270° ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten.

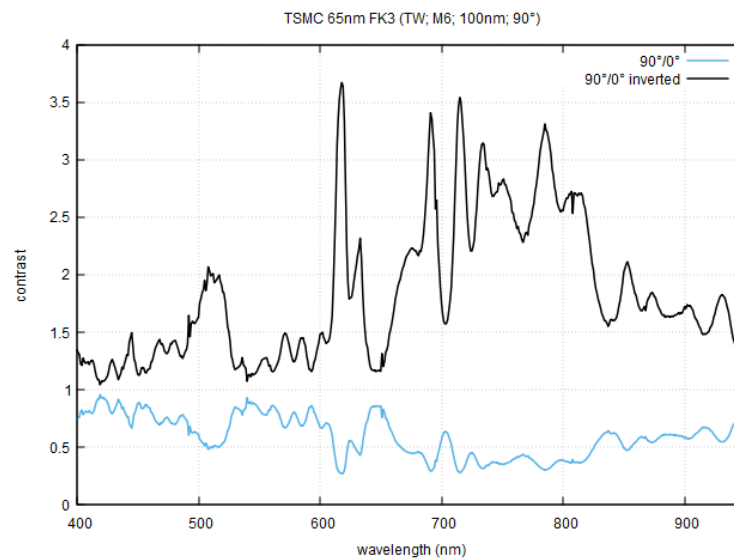


Abbildung 176: Kontrast der Diode F\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die inverse Kontrastkurve in Abbildung 176 erreicht durchgehend Werte größer als 1 bei allen Wellenlängen.

#### 5.2.2.10 Teststruktur G\_K0-G\_K3

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 290nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

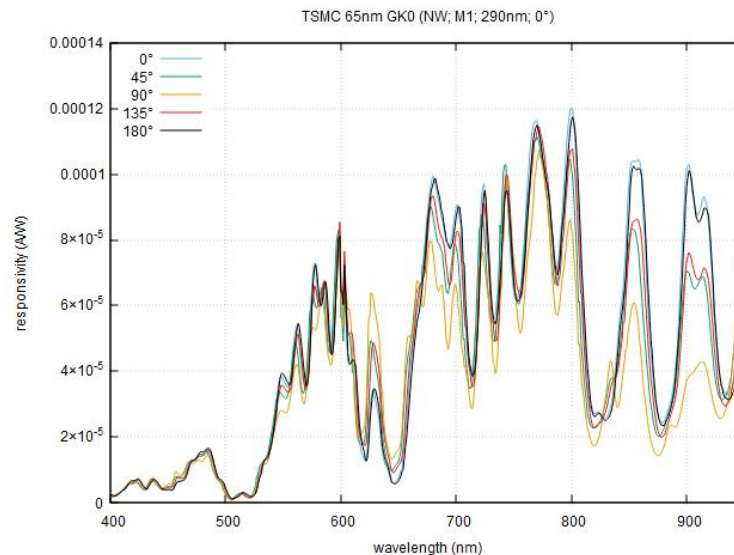


Abbildung 177: Empfindlichkeit der Diode G\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zu den Messungen der N-Well Dioden mit Polarisationsfilter mit einem Pitch von 190nm und 100nm weist die N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1 und einem Pitch von 290nm aus Abbildung 177 eine geringere Sensitivität auf. Ebenso ist die Empfindlichkeit bei großen Wellenlängen etwas gedämpfter. Die Sensitivität der Diode hängt geringer vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes ab als bei den vorherigen Messungen. Wie zu erwarten, werden die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 0° besitzt.

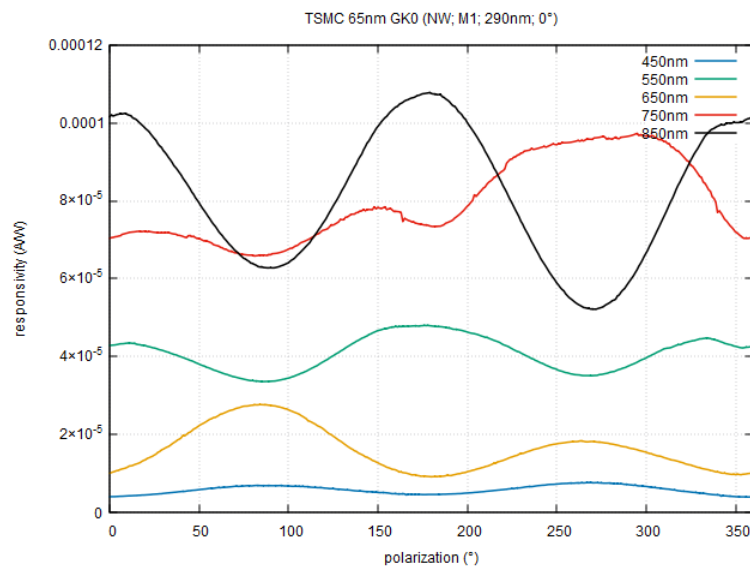


Abbildung 178: Empfindlichkeit der Diode G\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 178 ist die geringere Änderung der Sensitivität vom Polarisationswinkel zu erkennen, da die Differenz zwischen Minimum und Maximum etwas kleiner ist als bei den vorherigen

Messungen. Es ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Maximum und bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von  $650\text{nm}$  verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

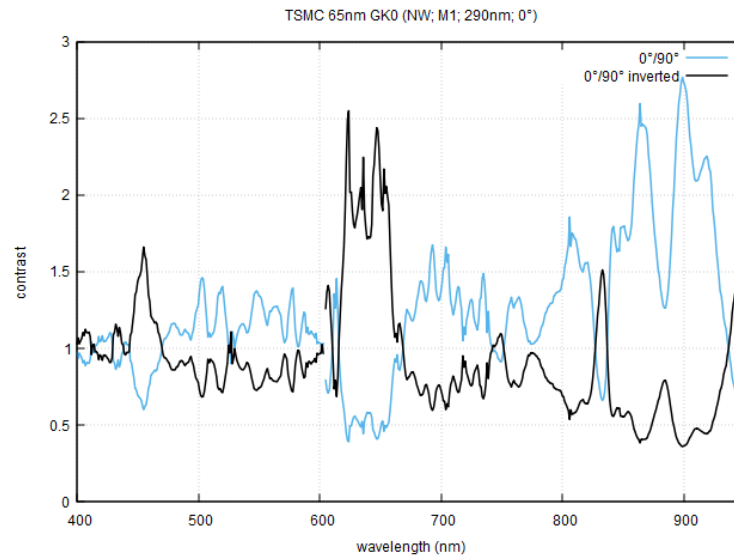


Abbildung 179: Kontrast der Diode  $G\_K0$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurve in Abbildung 179 erreicht bei Wellenlängen über  $850\text{nm}$  wesentlich größere Werte als 1. Jedoch erreicht der Kontrast bei manchen Wellenlängen auch kleinere Werte als 1.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von  $290\text{nm}$  und einer Orientierung von  $45^\circ$  ausgemessen.

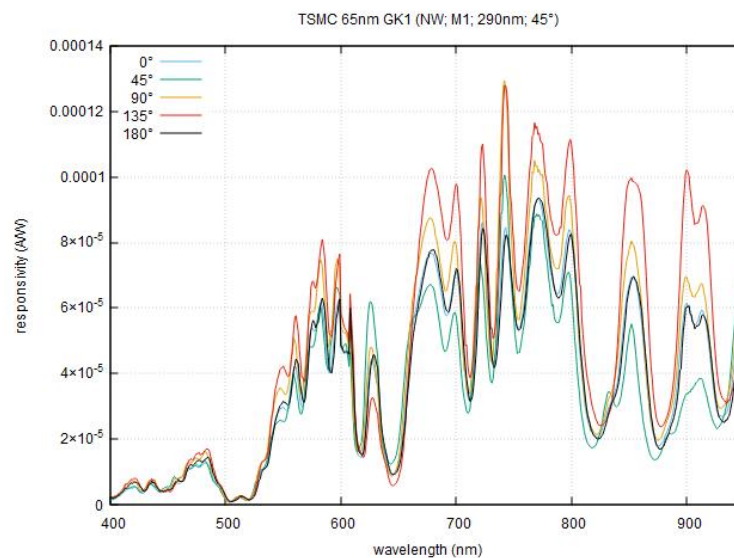


Abbildung 180: Empfindlichkeit der Diode  $G\_K1$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $45^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 177 der N-Well Diode bei einer



Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ . Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $135^\circ$  statt  $45^\circ$  besitzt.

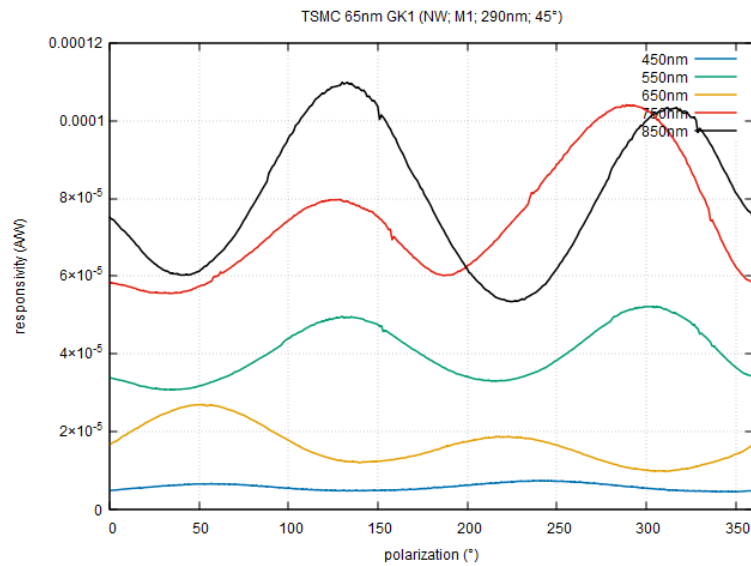


Abbildung 181: Empfindlichkeit der Diode G\_K1 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 181 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei der Wellenlänge von 650nm bei  $45^\circ$  und  $225^\circ$  ein Maximum und bei  $135^\circ$  und  $315^\circ$  ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Bei den restlichen Messungen verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

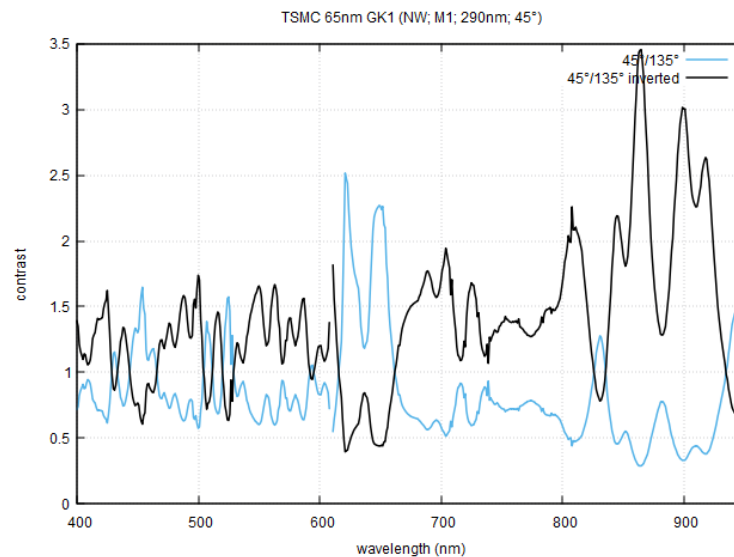


Abbildung 182: Kontrast der Diode G\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 182 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 181. Nur in einem Wellenlängenbereich um 650nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 290nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

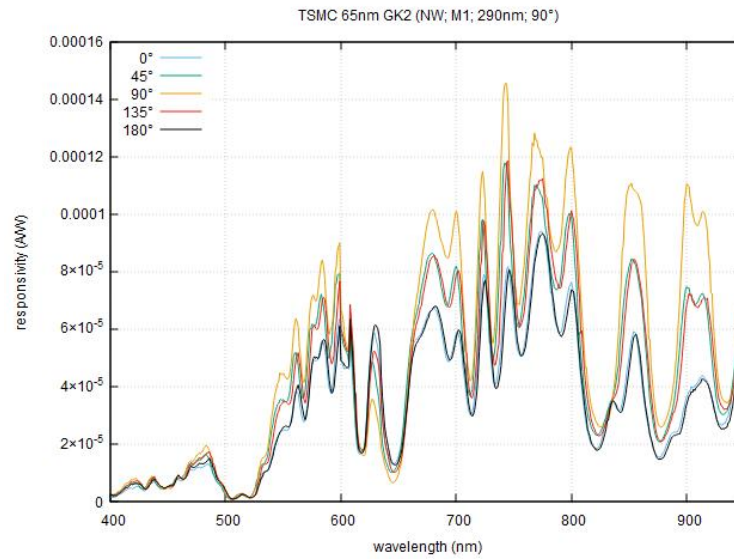


Abbildung 183: Empfindlichkeit der Diode G\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 90° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 177 und 180 der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0° und 45°. Die höchsten Werte werden wie erwartet bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 90° besitzt.

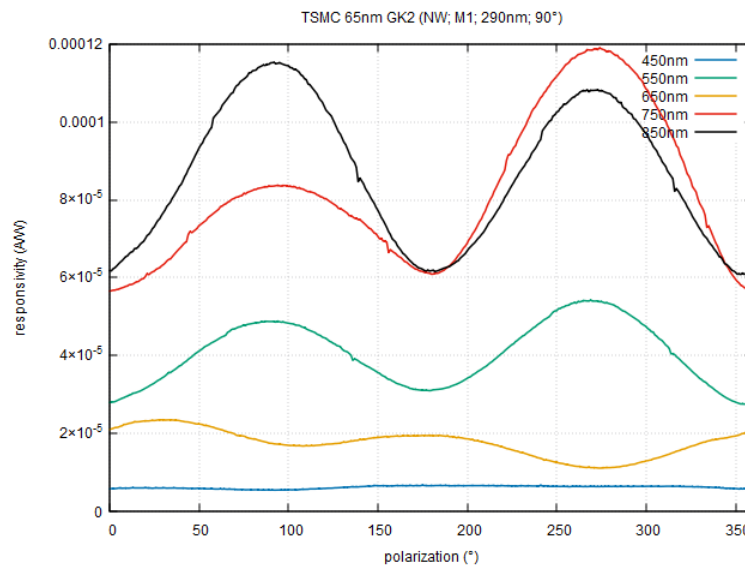


Abbildung 184: Empfindlichkeit der Diode G\_K2 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 184 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei 90° und 270° ein Maximum und bei 0° und 180° ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten

Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von 650nm verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

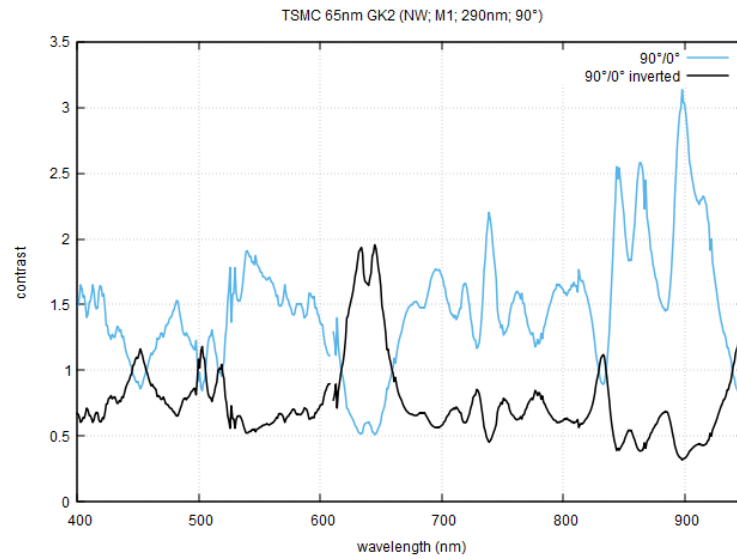


Abbildung 185: Kontrast der Diode G\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 185 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 184. Der Kontrast erreicht in fast allen Bereichen Werte größer als 1. Nur in einem Wellenlängenbereich um 650nm wird der Kontrast kleiner als 1.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 1, einem Pitch von 290nm und einer Orientierung von 135° ausgemessen.

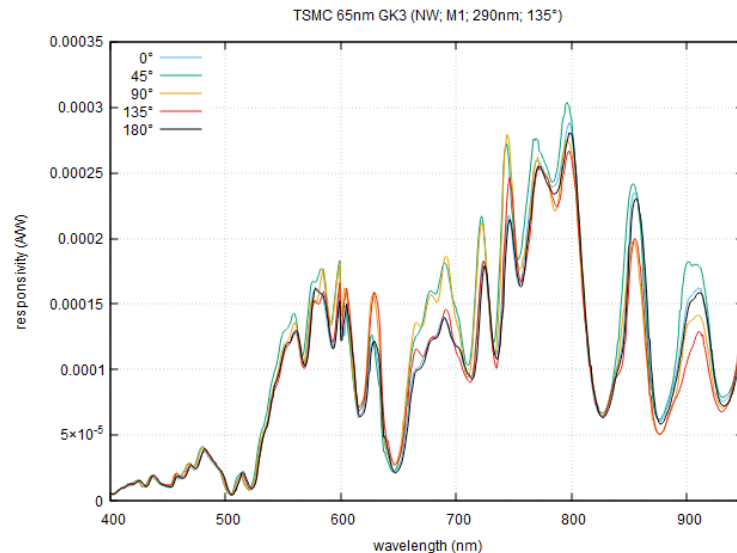


Abbildung 186: Empfindlichkeit der Diode G\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Messung der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 135° hat eine viel höhere Empfindlichkeit als die N-Well Dioden bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0°, 45° und 90° aus Abbildung 177, 180 und 183. Die Sensitivität erreicht ähnliche Werte wie die N-Well Diode ohne Polarisationsfilter

aus Abbildung 59. Ein Messfehler erscheint wahrscheinlich. Die höchsten Werte werden bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $45^\circ$  statt  $135^\circ$  besitzt.

Ein Vergleich der Messungen aus Abbildung 177, 180, 183 und 186 zeigt, dass die Sensitivität der Zellen bei  $0^\circ$  und  $90^\circ$  die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht kompatibler Polarisationsausrichtung erreicht, während die Messungen mit Filter bei  $45^\circ$  und  $135^\circ$  die höchsten Werte bei jeweils um  $90^\circ$  verschobene Polarisationsausrichtung erhalten. Grund hierfür könnte eine falsche Zuordnung der Teststrukturen sein.

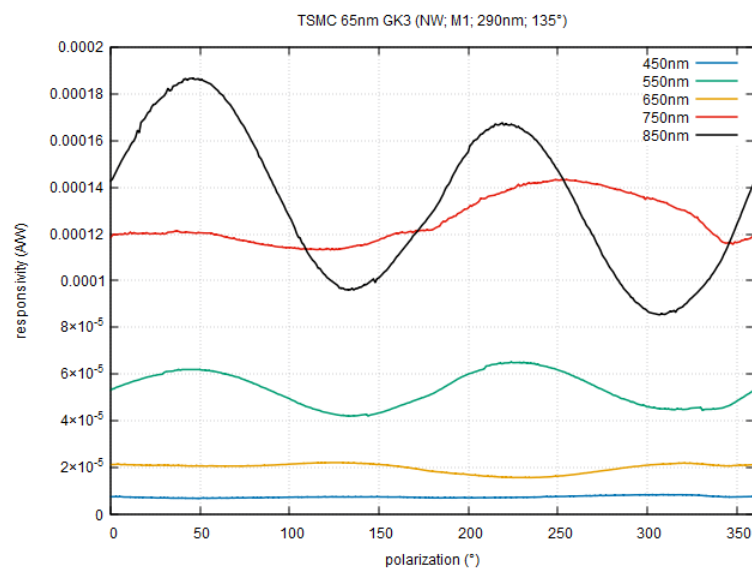


Abbildung 187: Empfindlichkeit der Diode G\_K3 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 187 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei allen Wellenlängen bei  $45^\circ$  und  $225^\circ$  ein Maximum und bei  $135^\circ$  und  $315^\circ$  ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt.

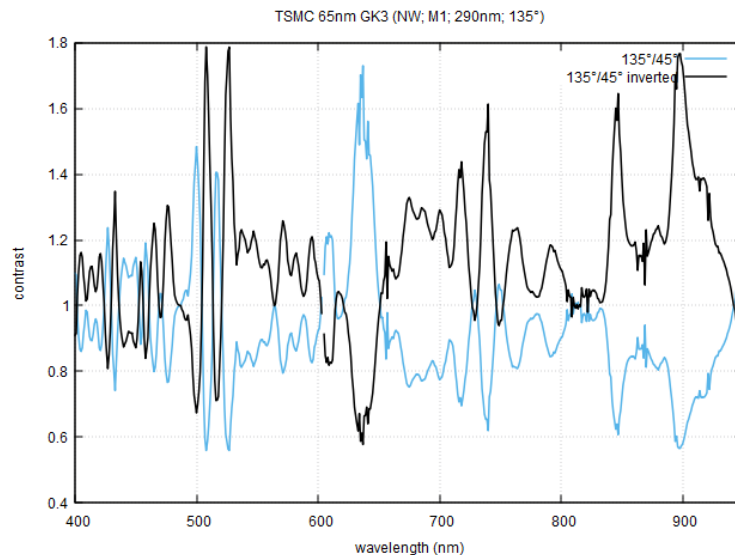


Abbildung 188: Kontrast der Diode G\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 188 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 187. Der Kontrast erreicht in fast allen Bereichen Werte kleiner als 1. Nur in einem Wellenlängenbereich um 650nm wird der Kontrast etwas größer als 1.

#### 5.2.2.11 Teststruktur H\_K0-H\_K3

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 290nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

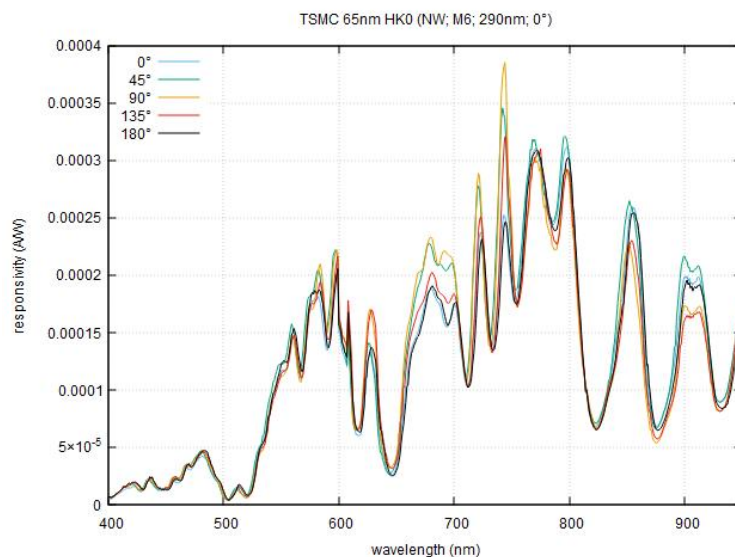


Abbildung 189: Empfindlichkeit der Diode H\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zu der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 1 und einem Pitch von 290nm aus Abbildung 177 weist die N-Well Diode mit Polarisationsfilter in der Metalllage 6 aus Abbildung 189 eine viel höhere Sensitivität auf. Ebenso ist die Empfindlichkeit bei großen Wellenlängen stärker gedämpft als bei der Zelle mit der Metalllage 1. Die Sensitivität der Diode hängt

geringer vom Polarisationswinkel des einfallenden Lichtes ab als bei den vorherigen Messungen. Wie zu erwarten, werden die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $0^\circ$  besitzt.

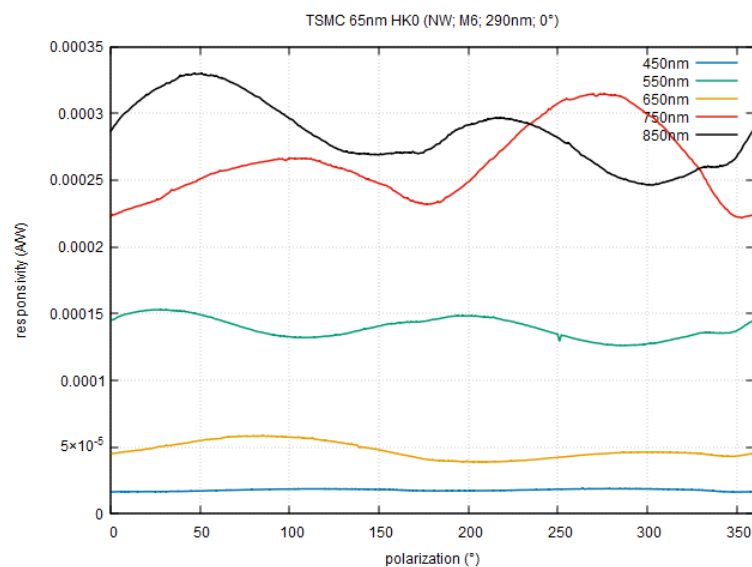


Abbildung 190: Empfindlichkeit der Diode H\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 190 ist die geringe Änderung der Sensitivität vom Polarisationswinkel gut zu erkennen, da die Differenz zwischen Minimum und Maximum kleiner ist als bei vorherigen Messungen.

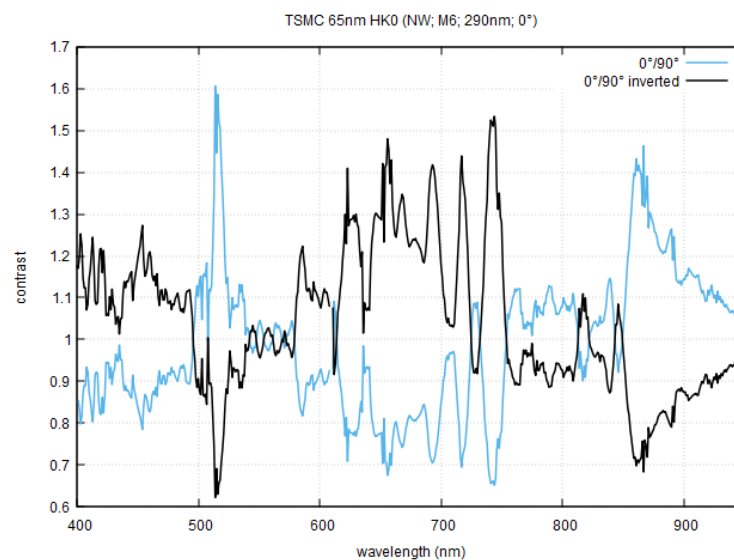


Abbildung 191: Kontrast der Diode H\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

In der Kontrastkurve aus Abbildung 191 ist zu erkennen, dass der Kontrast geringer ist als bei den Teststrukturen mit einem Pitch von 190nm und 100nm. Außerdem hat der Kontrast eine starke Abhängigkeit von der Wellenlänge.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 290nm und einer Orientierung von 45° ausgemessen.

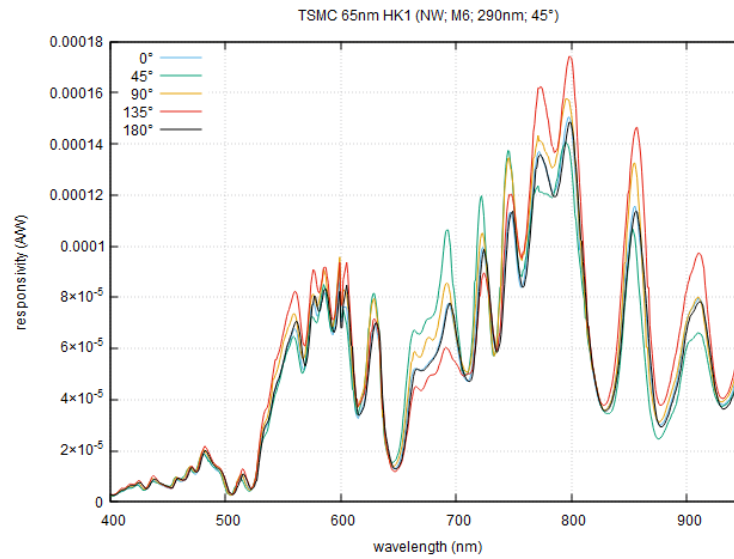


Abbildung 192: Empfindlichkeit der Diode H\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Messung der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 45° hat einen ähnlichen Verlauf wie die N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0° aus Abbildung 189, jedoch erreicht die Empfindlichkeit nur in etwa die Hälfte der Werte. Die höchsten Werte werden bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 135° statt 45° besitzt.

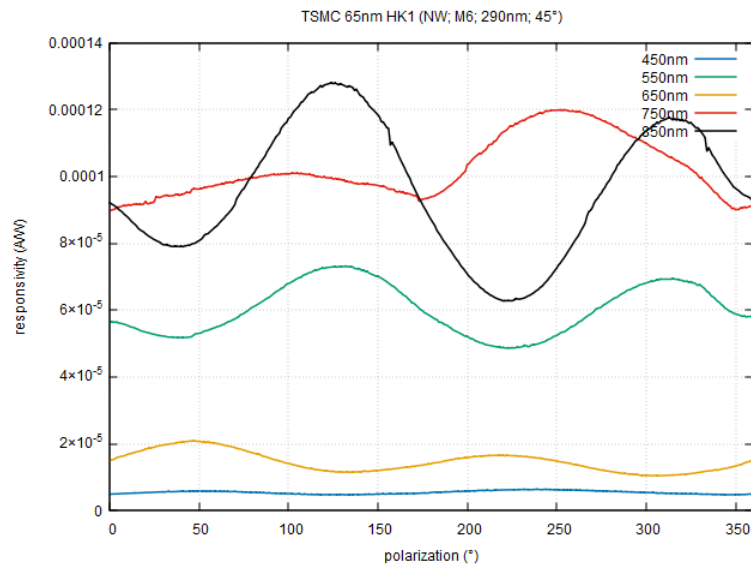


Abbildung 193: Empfindlichkeit der Diode H\_K1 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 193 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei der Wellenlänge von 650nm bei 45° und 225° ein Maximum und bei 135° und 315° ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem

erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Bei den restlichen Messungen verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

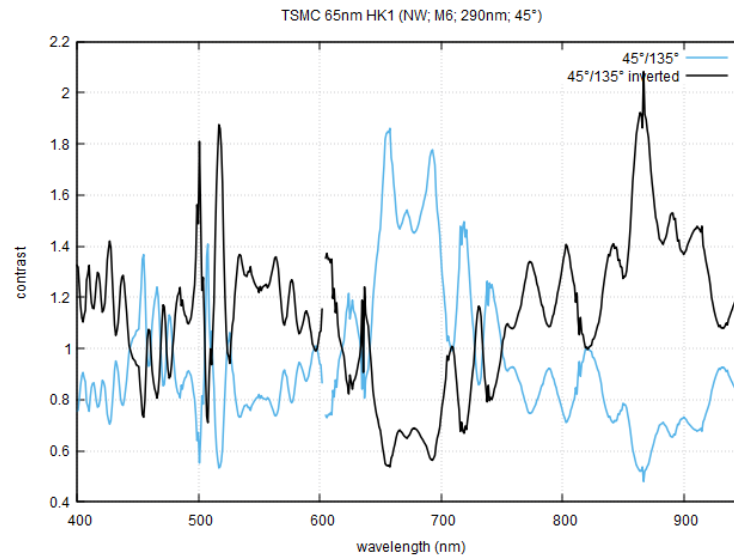


Abbildung 194: Kontrast der Diode H\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 194 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 193. Nur in einem Wellenlängenbereich um 650nm wird ein Kontrast größer als 1 erreicht.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 290nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

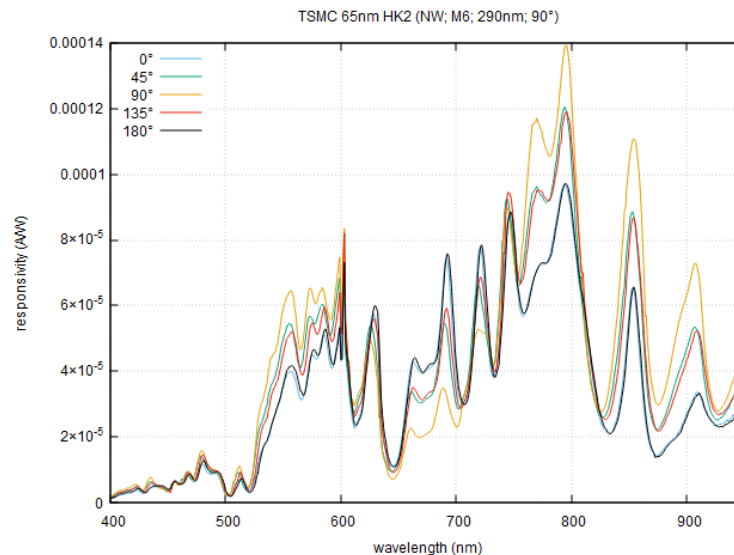


Abbildung 195: Empfindlichkeit der Diode H\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Messung der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 90° hat einen ähnlichen Verlauf wie die Messungen der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0° und 45° aus Abbildung 189 und 192, jedoch erreicht die Empfindlichkeit geringere Werte. Die höchsten Werte werden wie



erwartet bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $90^\circ$  besitzt.

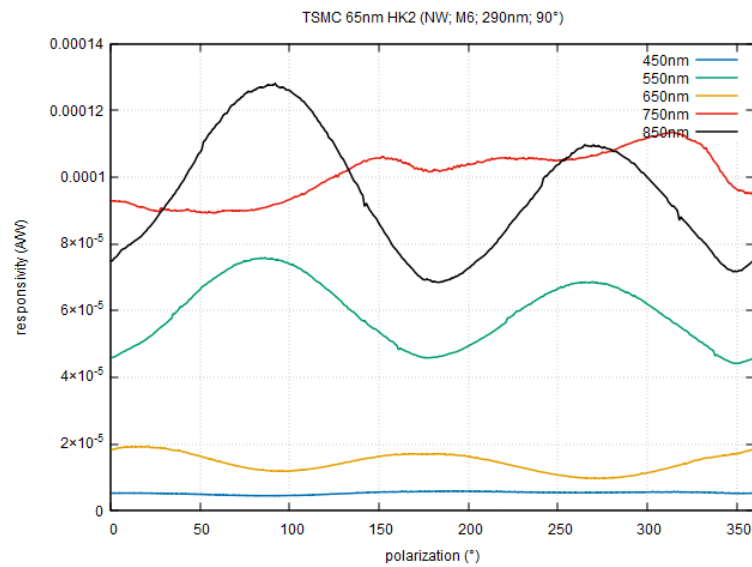


Abbildung 196: Empfindlichkeit der Diode H\_K2 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 196 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Maximum und bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von 650nm verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

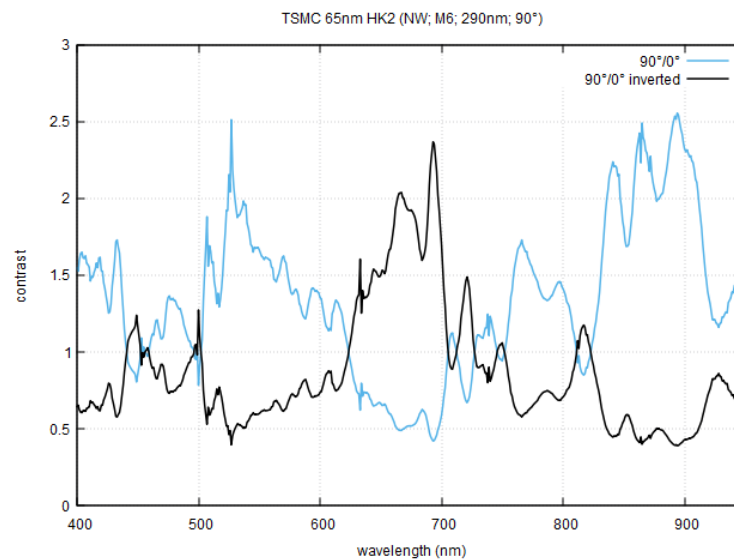


Abbildung 197: Kontrast der Diode H\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 197 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 196. Der Kontrast erreicht in fast allen Bereichen Werte größer als 1. Nur in einem Wellenlängenbereich um 650nm wird der Kontrast kleiner als 1.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in der Metalllage 6, einem Pitch von 290nm und einer Orientierung von 135° ausgemessen.

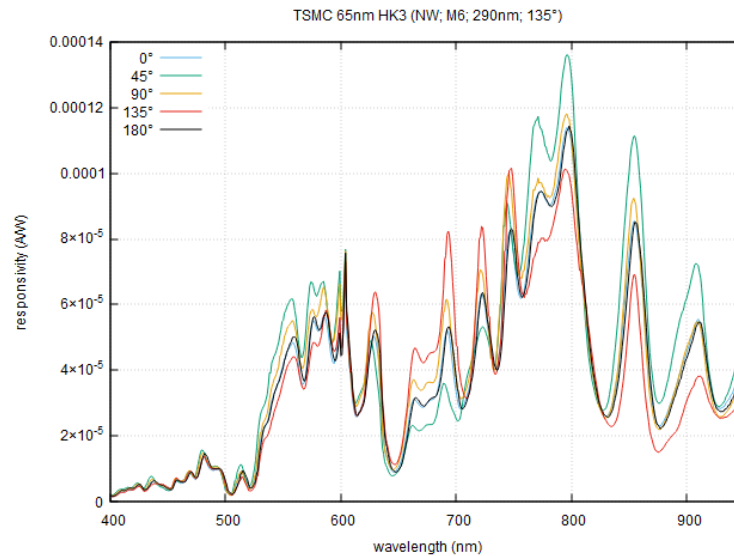


Abbildung 198: Empfindlichkeit der Diode H\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Messung der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 135° hat einen ähnlichen Verlauf wie die N-Well Dioden bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0°, 45° und 90° aus Abbildung 189, 192 und 195. Die Sensitivität erreicht ähnliche Werte wie die N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 90° aus Abbildung 195. Die höchsten Werte werden bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 45° statt 135° besitzt.

Ein Vergleich der Messungen aus Abbildung 189, 192, 195 und 198 zeigt, dass die Sensitivität der Zellen bei 0° und 90° die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht kompatibler Polarisationsausrichtung erreicht, während die Messungen mit Filter bei 45° und 135° die höchsten Werte bei jeweils um 90° verschobene Polarisationsausrichtung erhalten. Grund hierfür könnte eine falsche Zuordnung der Teststrukturen sein.

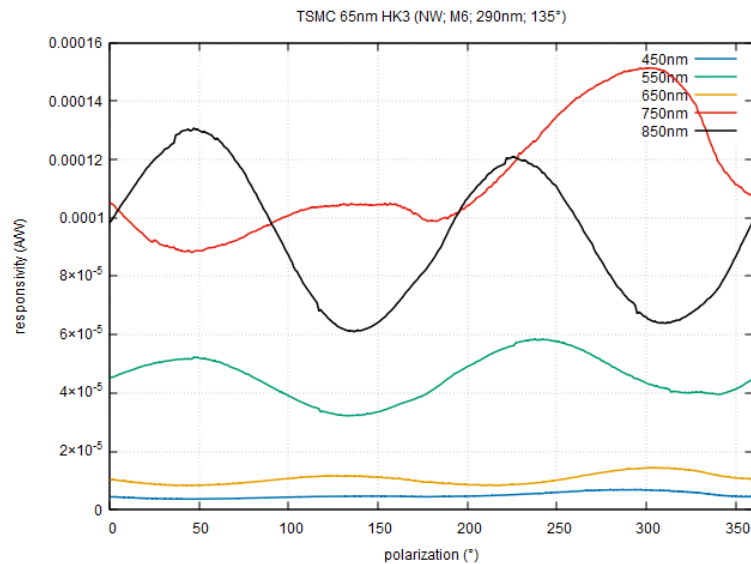


Abbildung 199: Empfindlichkeit der Diode H\_K3 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 199 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei allen Wellenlängen bei 45° und 225° ein Maximum und bei 135° und 315° ein Minimum erreicht. Dieser Verlauf der Sensitivität ist invers zu dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt.

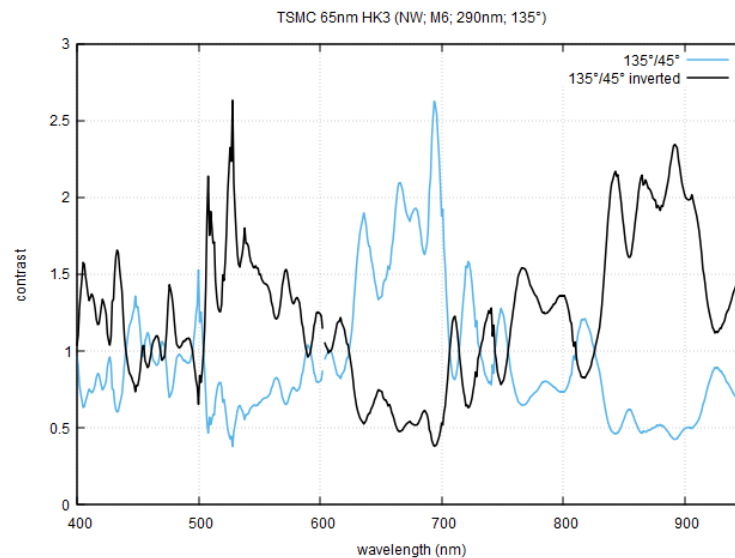


Abbildung 200: Kontrast der Diode H\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kontrastkurven in Abbildung 200 entsprechen den Verläufen aus Abbildung 199. Der Kontrast erreicht in fast allen Bereichen Werte kleiner als 1. Nur in einem Wellenlängenbereich um 650nm wird der Kontrast größer als 1.

### 5.2.2.12 Teststruktur I\_K0-I\_K3

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in den Metalllagen 1 und 6, einem Pitch von 290nm und einer Orientierung von 0° ausgemessen.

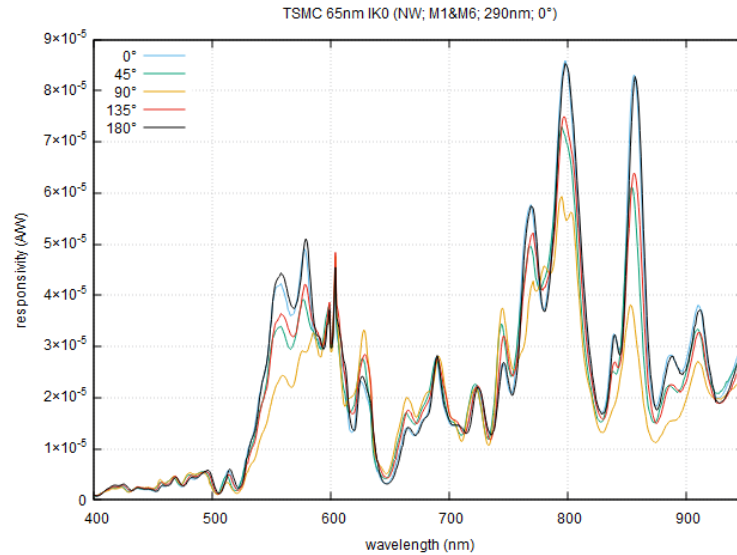


Abbildung 201: Empfindlichkeit der Diode I\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Im Vergleich zu den Messungen der N-Well Dioden mit Polarisationsfilter mit einem Pitch von 190nm und 100nm weist die N-Well Diode mit Polarisationsfilter in den Metalllagen 1 und 6 und einem Pitch von 290nm aus Abbildung 201 eine wesentlich geringere Sensitivität auf. Ebenso ist die Empfindlichkeit bei großen Wellenlängen stark gedämpft. Wie zu erwarten, werden die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 0° besitzt.

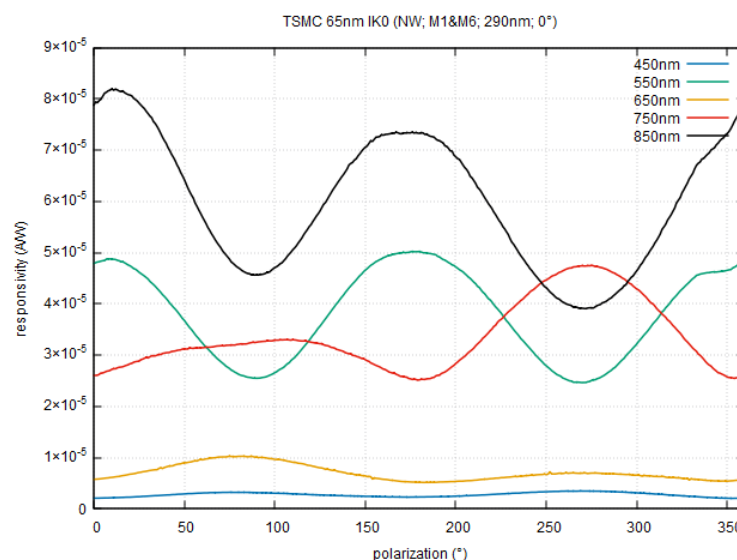


Abbildung 202: Empfindlichkeit der Diode I\_K0 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 202 ist erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Maximum und bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Bei den Messungen von 650nm und 750nm verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

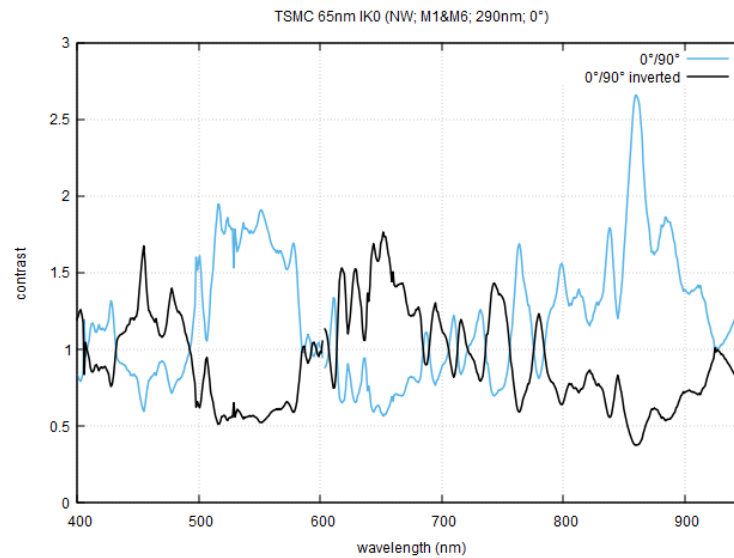


Abbildung 203: Kontrast der Diode I\_K0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

In der Kontrastkurve in Abbildung 203 ist zu erkennen, dass der Kontrast in einem Wellenlängenbereich bei 500nm-600nm und ab 750nm Werte größer als 1 erreicht.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in den Metalllagen 1 und 6, einem Pitch von 290nm und einer Orientierung von  $45^\circ$  ausgemessen.

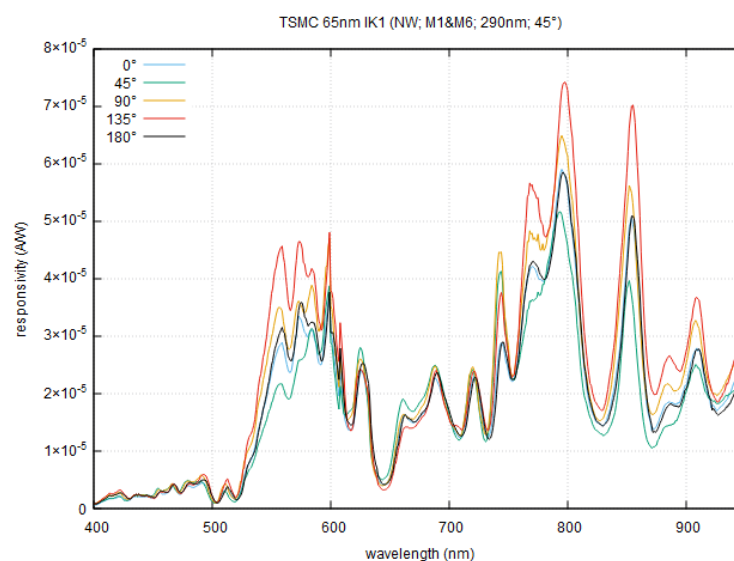


Abbildung 204: Empfindlichkeit der Diode I\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $45^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 201 der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ . Die höchsten Werte werden jedoch bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $135^\circ$  statt  $45^\circ$  besitzt.

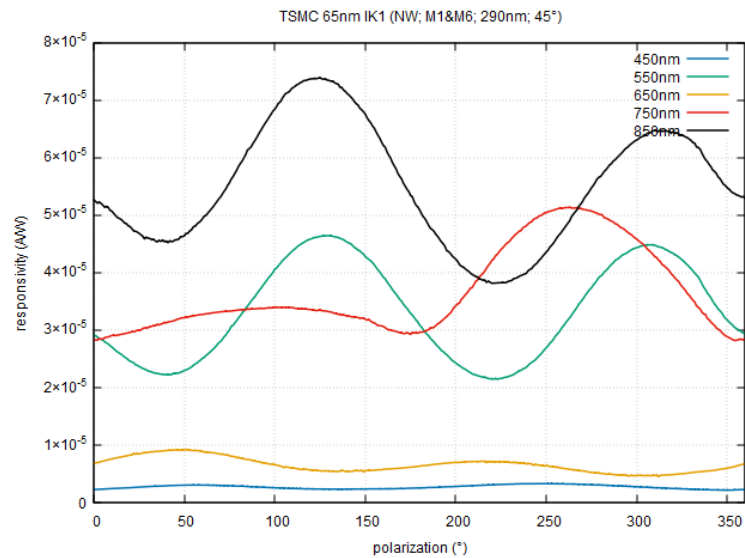


Abbildung 205: Empfindlichkeit der Diode I\_K1 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 205 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei der Wellenlänge von 650nm bei  $45^\circ$  und  $225^\circ$  ein Maximum und bei  $135^\circ$  und  $315^\circ$  ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Bei den restlichen Messungen verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

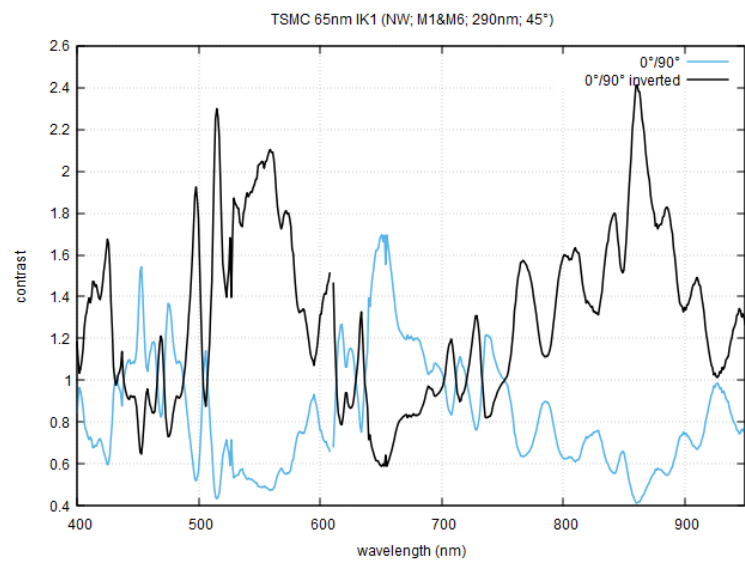


Abbildung 206: Kontrast der Diode I\_K1 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

In der Kontrastkurve in Abbildung 206 ist zu erkennen, dass der Kontrast in einem Wellenlängenbereich um 650nm Werte größer als 1 erreicht.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in den Metalllagen 1 und 6, einem Pitch von 290nm und einer Orientierung von 90° ausgemessen.

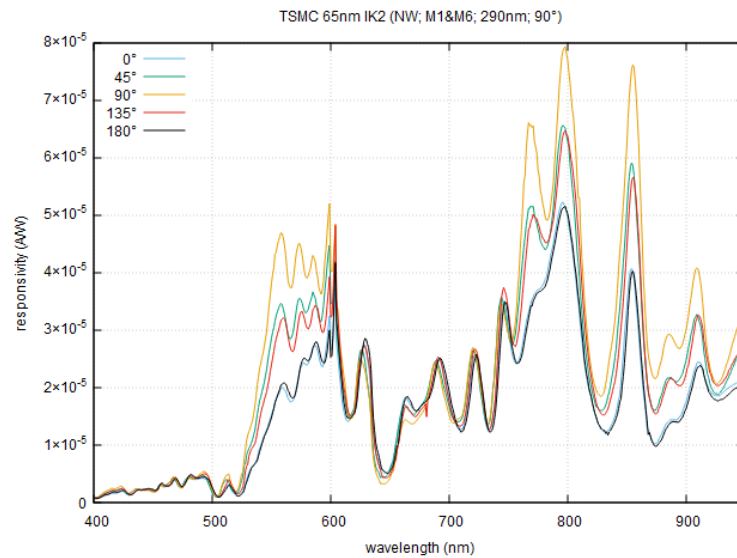


Abbildung 207: Empfindlichkeit der Diode I\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Empfindlichkeit der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von 90° ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 201 und 204 der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von 0° und 45°. Die höchsten Werte werden wie erwartet bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von 90° besitzt.

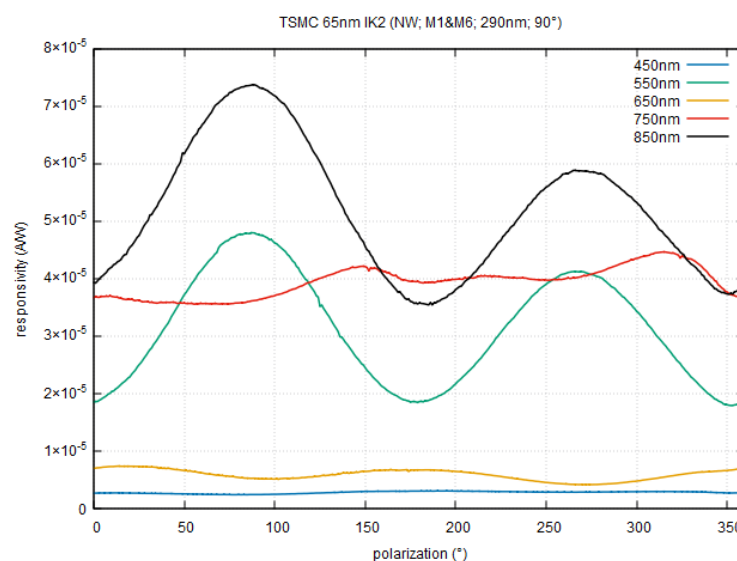


Abbildung 208: Empfindlichkeit der Diode I\_K2 in Abhängigkeit vom Winkel

In der Messung der N-Well Diode mit Polarisationsfilter in Abbildung 208 ist zu erkennen, dass die Sensitivität bei den meisten Wellenlängen bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ein Maximum und bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ein Minimum erreicht. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, welches aus dem Satz von Malus folgt. Nur bei einer Messung von  $650\text{nm}$  verläuft die Sensitivität invers zu den Erwartungen.

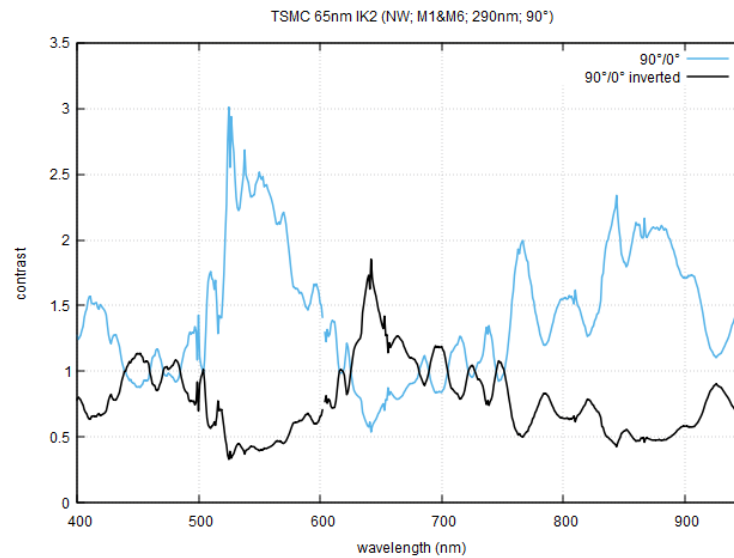


Abbildung 209: Kontrast der Diode I\_K2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

In der Kontrastkurve in Abbildung 209 ist zu erkennen, dass der Kontrast in einem Wellenlängenbereich bei  $500\text{nm}$ – $600\text{nm}$  und ab  $750\text{nm}$  Werte größer als 1 erreicht.

Es wird eine N-Well Diode (siehe Kapitel 2.1.1) mit einem Polarisationsfilter in den Metalllagen 1 und 6, einem Pitch von  $290\text{nm}$  und einer Orientierung von  $135^\circ$  ausgemessen.

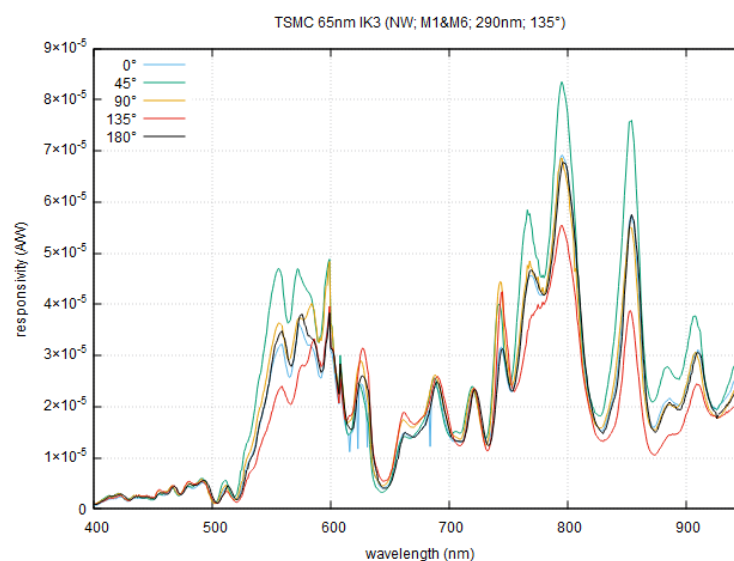


Abbildung 210: Empfindlichkeit der Diode I\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge



Die Empfindlichkeit der N-Well Diode mit einem Polarisationsfilter bei Ausrichtung von  $135^\circ$  ist sehr ähnlich zum Verlauf aus Abbildung 201, 204 und 207 der N-Well Diode bei einer Polarisationsfilterausrichtung von  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$ . Die höchsten Werte werden bei Bestrahlung mit Licht erreicht, welches einen Polarisationswinkel von  $45^\circ$  statt  $135^\circ$  besitzt.

Ein Vergleich der Messungen aus Abbildung 201, 204, 207 und 210 zeigt, dass die Sensitivität der Zellen bei  $0^\circ$  und  $90^\circ$  die höchsten Werte bei Bestrahlung mit Licht kompatibler Polarisationsausrichtung erreicht, während die Messungen mit Filter bei  $45^\circ$  und  $135^\circ$  die höchsten Werte bei jeweils um  $90^\circ$  verschobene Polarisationsausrichtung erhalten. Grund hierfür könnte eine falsche Zuordnung der Teststrukturen sein.

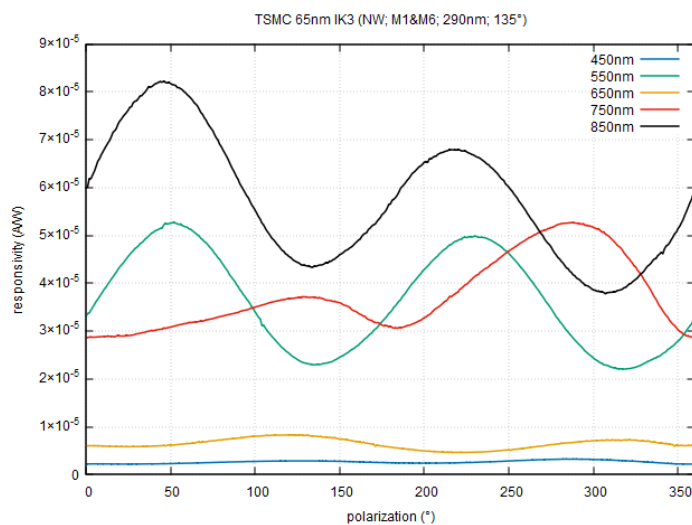


Abbildung 211: Empfindlichkeit der Diode I\_K3 in Abhängigkeit vom Winkel

In der in Abbildung 211 dargestellten Messung folgt die Sensitivität bei einer Wellenlänge von 650nm und 750nm der Vorhersage des Satzes von Malus. Bei den anderen Wellenlängen ist das Verhalten invers zu den Erwartungen.

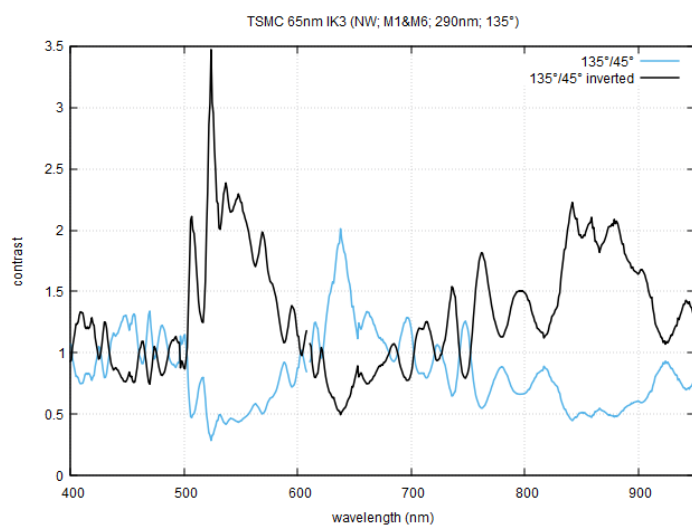


Abbildung 212: Kontrast der Diode I\_K3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge

In der Kontrastkurve in Abbildung 212 ist zu erkennen, dass der Kontrast in einem Wellenlängenbereich um 650nm Werte größer als 1 erreicht.

### 5.3 Auswertung der Messergebnisse

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass die Poldi Zellen ohne Polarisationsfilter einen ähnlichen Verlauf der Sensitivität aufweisen. Die Sensitivität hängt stark von der Wellenlänge ab, wobei die unterschiedlichen Polarisationswinkel einen sehr geringen Einfluss haben. Je höher die Wellenlänge desto größer wird auch die Sensitivität. Bei den Poldi Zellen mit Polarisationsfilter hingegen ist zu beobachten, dass die Sensitivität im Allgemeinen niedriger ist. Bei diesen Teststrukturen hängt die Sensitivität stark von der Wellenlänge und den unterschiedlichen Polarisationswinkeln ab. Die stärkste Abhängigkeit von den unterschiedlichen Polarisationswinkeln zeigen die Teststrukturen E, D und F in der Metalllage 6. Betrachtet man beispielsweise die N-Well Diode mit unterschiedlichen Polarisationsfiltern stellt man fest, dass die Sensitivität der Teststrukturen in der Metalllage 1 bei hohen Wellenlängen über 900nm weiter ansteigt, während sie bei den Teststrukturen in der Metalllage 6 gedämpft wird. Dies ist sehr gut bei den Teststrukturen E, D und F zu erkennen, da diese Filter sich nur in der Metalllage unterscheiden. Darüber hinaus hat der Pitch ebenso einen Einfluss auf die Sensitivität. Die Strukturen mit einem Pitch von 100nm und 190nm haben bei hohen Wellenlängen über 900nm eine identische Sensitivität und eine viel höhere Sensitivität als die Strukturen mit einem Pitch von 290nm. Wenn man sich die Sensitivität im Wellenlängenbereich um 850nm betrachtet, stellt man fest, dass der unterschiedliche Pitch eine große Auswirkung aufweist, die unterschiedlichen Metalllagen jedoch nicht. Hier haben die Strukturen mit einem Pitch von 100nm eine deutlich höhere Sensitivität als die Strukturen mit einem Pitch von 190nm und 290nm. Im Wellenlängenbereich von 700nm-800nm haben die Teststrukturen in der Metalllage 6 und einem Pitch von 100nm eine höhere Sensitivität als die anderen Teststrukturen. Die Sensitivität in den darunter liegenden Wellenlängen verlaufen bei allen Teststrukturen recht ähnlich. Man kann jedoch beobachten, dass bei dem Wellenlängenbereich von 450nm-650nm die Teststrukturen mit einem Pitch von 190nm und 290nm eine höhere Empfindlichkeit als die Strukturen mit einem Pitch von 100nm aufweist. Abschließend kann man sagen, dass die Teststrukturen in der Metalllage 1 und einem Pitch von 100nm oder 190nm am besten geeignet sind für hohe Wellenlängen über 900nm. Hier zeigt die Poldi Zelle A\_K3 mit der Deep N-Well Diode die höchste Empfindlichkeit. Dagegen sind die Teststrukturen in der Metalllage 6 und einem Pitch von 100nm besser geeignet für Wellenlängen um 850nm. Hier weist die Poldi Zelle F\_K2 mit der Triple-Well Diode die höchste Empfindlichkeit auf. Dasselbe gilt auch für den Wellenlängenbereich von 700nm-800nm. Vergleicht man die Teststrukturen, die sich nur von den Diodentypen unterscheiden, so ist zu erkennen, dass die Triple-Well

Diode eine leicht höhere Empfindlichkeit besitzt als die Deep N-Well und die N-Well Diode. Lediglich im Vergleich der Strukturen K, J und L in der Metalllage 6 und einem Pitch von 190nm weist die N-Well Diode eine etwas höhere Empfindlichkeit auf. Die Messungen der Teststruktur I in den Metalllagen 1 und 6 und einem Pitch von 290nm zeigt, dass durch die beiden Metalllagen die Empfindlichkeit im Gegensatz zu den anderen Strukturen am geringsten ist.

*Tabelle 5: Maximale Sensitivität*

Wellenlänge in nm	Teststruktur	Diodentyp	Maximale Sensitivität in A/W
400-500	C_K3	TW	~0,25E-4
500-600	G_K2	NW	~0,9E-4
600-700	F_K2	TW	~1,2E-4
700-800	F_K2	TW	~2E-4
800-900	F_K2	TW	~2,15E-4
900-950	A_K3	DNW	~2,3E-4

Bei den Kontrastkurven der Teststrukturen B, A und C in der Metalllage 1 und einem Pitch von 190nm ist zu erkennen, dass die Dioden mit einer Polarisationsausrichtung von 0° und 90° einen ähnlichen Verlauf haben. Es wird ein Kontrast größer als 1 unterhalb einer Wellenlänge von 750nm erreicht. Im Wellenlängenbereich von 600-700nm wird ein Wert von bis zu 4 erreicht. Die Dioden mit einer Polarisationsausrichtung von 45° und 135° weisen ebenso einen ähnlichen Verlauf zueinander auf. Der Kontrast erreicht Werte größer als 1 in einem Wellenlängenbereich von 450-500nm und oberhalb von 750nm. Dieselben Verläufe sind auch bei den Teststrukturen K, J und L in der Metalllage 6 und einem Pitch von 190nm zu beobachten. Die Teststruktur L erreicht hierbei die höchsten Kontrastwerte. In einem Wellenlängenbereich von 600-700 erreicht der Kontrast Werte bis zu 5,6. Bei den Teststrukturen E, D und F in den Metalllage 1 und 6 und einem Pitch von 100nm ist zu erkennen, dass die Kontrastkurven durchgehend Werte kleiner als 1 erreichen. Bei den Teststrukturen G, J und I in den Metalllagen 1 und 6 und einem Pitch von 290nm ist zu beobachten, dass die Verläufe der Kontrastkurven sich ähneln. Bei den Dioden mit einer Polarisationsausrichtung von 0° und 90° werden fast in allen Wellenlängenbereichen bis auf den Bereich um 650nm Werte größer als 1 erreicht. Dagegen erreichen die Dioden mit einer Polarisationsausrichtung von 45° und 135° nur in dem Wellenlängenbereich um 650nm Werte größer als 1.

Tabelle 6: Maximaler Kontrast

Wellenlänge in nm	Teststruktur	Diodentyp	Metalllage	Pitch in nm	Maximaler Kontrast
400-500	B_K3	NW	M1	190	~4,3
500-600	J_K1	DNW	M6	190	~4
600-700	L_K2	TW	M6	190	~5,6
700-800	L_K1	TW	M6	190	~3,8
800-900	L_K3	TW	M6	190	~3,4
900-950	G_K2	NW	M1	290	~3

## 6 Zusammenfassung

Der POLDI Testchip wurde im Rahmen einer Masterarbeit in einer 65nm CMOS Technologie entworfen und anschließend vom Hersteller TSMC produziert. Dieser Testchip besitzt unterschiedliche Photodioden, Polarisationsfilter und einen Transimpedanzverstärker. Diese Teststrukturen wurden durch entsprechende Messungen charakterisiert, um festzustellen, ob sich diese Technologie und die entworfenen Schaltungen und Bauteile zur Nutzung als optischer Winkelgeber eignen. Das Testsystem für die Charakterisierung der Teststrukturen wurde in diesem Projekt erfolgreich entworfen. Dazu wurde mithilfe der Software Altium Designer eine Leiterplatte erstellt, die es ermöglicht hat, die Messungen durchzuführen. Da die Leiterplatte erfolgreich entworfen wurde und keine DRC Fehler aufwies, wurde sie zur Produktion freigegeben. Nach der Fertigstellung wurde der POLDI Testchip auf die Platine platziert und gebondet. Im nächsten Schritt wurde die Platine mit allen weiteren Komponenten bestückt bzw. belötet und zum Abschluss die Messungen durchgeführt. Die Messungen an den optischen Strukturen wurden im Labor bei advlCo microelectronics durchgeführt, während der Transimpedanzverstärker in der FH Dortmund im Labor für integrierten Schaltungsentwurf ausgemessen worden ist. Aus den Messungen des Kapitels 5.1 des Transimpedanzverstärkers geht hervor, dass das Ausgangssignal der transienten Messung stark verrauscht ist. Es ist jedoch nicht klar, ob die Signalquelle, der Vorwiderstand oder der Transimpedanzverstärker selbst die Rauschquelle darstellt. Das Ausgangssignal weist zudem ein starkes Über- und Unterschwingen auf. Der Grund dafür könnte der Einfluss parasitärer Induktivitäten und Kondensatoren sein. Die Messungen der Poldi-Zellen zeigen, dass bei steigender Wellenlänge die Empfindlichkeit ebenso steigt. Jedoch ist im Wellenlängenbereich oberhalb von 850nm zu erkennen, dass die Sensitivität der Sensoren in der Metalllage 6 gedämpft wird. Aus diesem Grund erreicht die Zelle A\_K3 bei Wellenlängen oberhalb von 850nm die höchste Empfindlichkeit, wohingegen die Zelle F\_K2 im Wellenlängenbereich von 650-850nm die höchste Empfindlichkeit erreicht.

## 7 Quellenverzeichnis

[1] DIEKMANN, Markus: Entwurf von integrierten Dioden mit Polarisationsfiltern und eines Transimpedanzverstärkers für die Nutzung in einem optischen Winkelgeber in 65nm CMOS Technologie. Fachhochschule Dortmund, 2020

[2] UHLRICH, Hahn: Physik für Ingenieure. Oldenbourg Verlag München Wien, 2007

[3] MOLEX, 2&4-Pin Header: Produkte [online]. Zugriff am 11.01.2023. Verfügbar unter: [https://www.molex.com/pdm\\_docs/sd/039301040\\_sd.pdf](https://www.molex.com/pdm_docs/sd/039301040_sd.pdf)

[4] WÜRTH ELEKTRONIK, Header: Produkte [online]. Zugriff am 11.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.we-online.com/components/products/datasheet/61300311121.pdf>

[5] MOLEX, Koaxialsteckverbinder: Produkte [online]. Zugriff am 11.01.2023. Verfügbar unter: [https://www.molex.com/webdocs/datasheets/pdf/en-us/0731000114\\_RF\\_COAX\\_CONNECTORS.pdf](https://www.molex.com/webdocs/datasheets/pdf/en-us/0731000114_RF_COAX_CONNECTORS.pdf)

[6] MURATA, Innovator in Electronics: PDF Catalog Library [online]. Verfügbar unter: <https://www.murata.com/en-eu/api/pdfdownloadapi?cate=cgsubNoiseSupprFilterBlockType&partno=BNX002-11>

[7] ROHDE&SCHWARZ, Labornetzgerät HMC 8043: Produkte [online]. Zugriff am 11.01.2023. Verfügbar unter: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/HMC804x\\_dat\\_de\\_en\\_3607-0169-3x\\_v0200.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/HMC804x_dat_de_en_3607-0169-3x_v0200.pdf)

[8] KEITHLEY, Sourcemeter 2401: Produkte [online]. Zugriff am 11.01.2023. Verfügbar unter: [https://download.tek.com/manual/2400S-900-01\\_K-Sep2011\\_User.pdf](https://download.tek.com/manual/2400S-900-01_K-Sep2011_User.pdf)

[9] KEITHLEY, Multimeter DMM6500: Produkte [online]. Zugriff am 11.01.2023. Verfügbar unter: [https://www.datatec.eu/media/pdf/aa/27/95/Keithley-DMM6500-DB-1\\_DEPwWmcPtodPQI.pdf](https://www.datatec.eu/media/pdf/aa/27/95/Keithley-DMM6500-DB-1_DEPwWmcPtodPQI.pdf)

[10] AGILENT TECHNOLOGIES, Multimeter U3401A: Produkte [online]. Zugriff am 11.01.2023. Verfügbar unter:  
<https://docs.rs-online.com/dceb/0900766b80e0eae6.pdf>

[11] ROHDE&SCHWARZ, Funktionsgenerator HMF2525: Produkte [online]. Zugriff am 11.01.2023. Verfügbar unter:  
[https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/HMF25xx\\_DE\\_V02\\_Datenblatt.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/HMF25xx_DE_V02_Datenblatt.pdf)

[12] ROHDE&SCHWARZ, Oszilloskop RTB2004: Produkte [online]. Zugriff am 11.01.2023. Verfügbar unter:  
[https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/RTB2000\\_bro\\_de\\_3607-4270-11\\_v0700.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/RTB2000_bro_de_3607-4270-11_v0700.pdf)

[13] KEITHLEY, Picoamperemeter 6482: Produkte [online]. Zugriff am 11.01.2023. Verfügbar unter: <https://download.tek.com/manual/6482-901-01.pdf>

## 8 Anhang

### 8.1 Gnuplot Skripte für die Charakterisierung der Poldi-Zellen

```
set title "TSMC 65nm AK0 (DNW; M1; 190nm; 0{\260})"
set xlabel "polarization ({\260})"
set ylabel "responsivity (A/W)"
set xrange [0:360]
set grid
plot "AK0_ch0_polarized.dat" u 1:2 w l lw 1.5 lc 6 tit "450nm", \
     "AK0_ch0_polarized.dat" u 1:3 w l lw 1.5 lc 2 tit "550nm", \
     "AK0_ch0_polarized.dat" u 1:4 w l lw 1.5 lc 4 tit "650nm", \
     "AK0_ch0_polarized.dat" u 1:5 w l lw 1.5 lc 7 tit "750nm", \
     "AK0_ch0_polarized.dat" u 1:6 w l lw 1.5 lc 8 tit "850nm"
```

```
set title "TSMC 65nm AK0 (DNW; M1; 190nm; 0{\260})"
set xlabel "wavelength (nm)"
set ylabel "responsivity (A/W)"
set key left top
set xrange [300:950]
set yrange [0:]
set grid
plot "AK0.dat" u ($1+300):3 w l lc 3 tit "0{\260}", \
     "AK0.dat" u ($1+300):4 w l lc 2 tit "45{\260}", \
     "AK0.dat" u ($1+300):5 w l lc 4 tit "90{\260}", \
     "AK0.dat" u ($1+300):6 w l lc 7 tit "135{\260}", \
     "AK0.dat" u ($1+300):7 w l lc 8 tit "180{\260}"
```

```
reset
set title "TSMC 65nm AK0 (DNW; M1; 190nm; 0{\260})"
set xlabel "wavelength (nm)"
set ylabel "contrast"
set xrange [400:950]
set key right
set grid
plot "AK0.dat" u ($1+400):($3/$5) w l lw 1.5 lc 3 tit "0{\260}/90{\260}", \
     "AK0.dat" u ($1+400):($5/$3) w l lw 1.5 lc 8 tit "0{\260}/90{\260} inverted",
```

## 9 Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Benutzung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Wörtlich übernommene Sätze und Satzteile sind als Zitate belegt, andere Anlehnungen hinsichtlich Aussage und Umfang unter Quellenangabe kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen und ist auch noch nicht veröffentlicht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift



