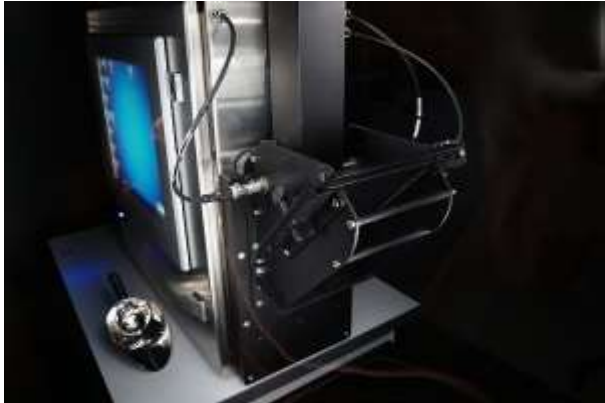
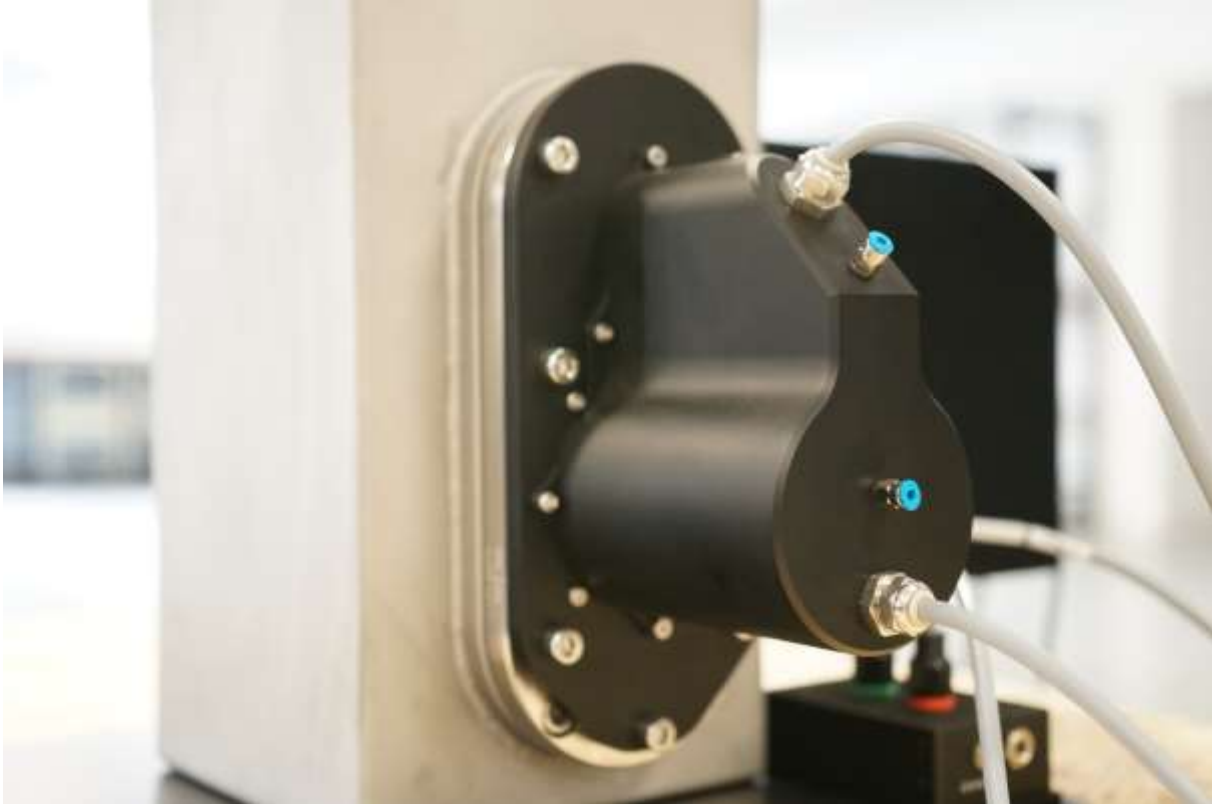


Kontrolle der Kunststoffart von Rezyklaten und Neuware mit Hilfe der NIR-Technologie



Inhaltsverzeichnis

1. Die Sensorik	3
1.1 Das NIR-Dreibereichsverfahren – ein bewährtes Sensorprinzip entlehnt aus dem sichtbaren Wellenlängenbereich	3
1.2 NIR-Sensorik in Lichtleiter- und Festoptikausführung.....	4
2. Untersuchung von Neuware in Hinblick auf die Kunststoffart mittels NIR-Technologie	7
2.1 Messergebnisse mit dem SPECTRO-T-3-60-NIR/NIR-D20	7
2.1.1 Die kompakte Messvorrichtung	7
2.1.2 Referenzieren des Sensors	8
2.1.3 Darstellung der N* <i>i</i> *r*-Werte	8
2.1.4 Ermittlung der N* <i>i</i> *r*-Messwerte	11
2.1.4 Zusammenfassung der Messergebnisse in Bezug auf Neuware	21
3. Untersuchung verschiedener Rezyklate in Hinblick auf die Kunststoffart mittels NIR-Technologie ..	25
3.1 Messergebnisse mit dem SPECTRO-T-3-60-NIR/NIR-D20	27
3.1.1 Die kompakte Messvorrichtung	27
3.1.2 Referenzieren des Sensors	27
3.1.3 Ermittlung der N* <i>i</i> *r*-Messwerte	27
3.1.4 Zusammenfassung der Messergebnisse in Bezug auf Rezyklate	60
4. Fazit.....	64

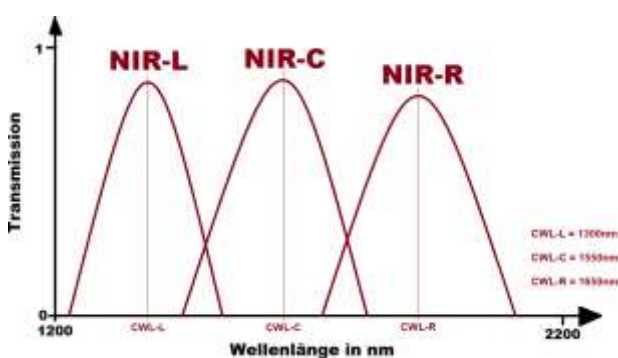
1. Die Sensorik

1.1 Das NIR-Dreibereichsverfahren – ein bewährtes Sensorprinzip entlehnt aus dem sichtbaren Wellenlängenbereich

Üblicherweise werden im Recyclingbereich zur Separation von verschiedenen Kunststoffen sog. Offner-Spektrographen, ausgeführt als hyperspektrale Kameras, eingesetzt. Mit diesen Kameras in Verbindung mit einer breitbandigen NIR-Lichtquelle (beispielsweise aufgebaut aus lichtstarken Halogenstrahlern) wird eine moderate Ortsauflösung und zugleich eine gute spektrale Auflösung der Objekte erreicht. In einem anderen Verfahren wird eine lichtstarke NIR-Lichtquelle über einen Polygonspiegel auf eine zu scannende Oberfläche gerichtet, zudem ist auf den Polygonspiegel eine Optik gerichtet, die einen Teil des NIR-Lichts nach dessen Auftreffen und dessen Reflexion vom Objekt über den rückwärtigen optischen Weg auf diese auftrifft und von dort auf die Apertur eines NIR-Gitterspektrometers gerichtet ist. Der Vorteil beider Verfahren liegt in der spektralen Erfassung eines relativ großen NIR-Wellenlängenbereichs mit gleichzeitiger Ortsauflösung. Dadurch wird es ermöglicht, dass beispielsweise auf einem Förderband verschiedene Objekte, die gleichzeitig, jedoch nebeneinander den Detektionsbereich durchschreiten, als separate Objekte erkannt und zugleich spektral unterschieden werden.

Bei Kunststoffgranulaten hingegen geht es weniger darum, jedes einzelne Korn auf das spektrale Verhalten hin zu untersuchen. Vielmehr soll ein integrales Verfahren möglichst viele Kunststoffpellets zeitgleich erfassen und damit eine verlässliche Information über die Qualität bzw. die Reinheit des Produktes zu erhalten. Auf eine aufwendige Technik, die zur zusätzlichen Ermittlung der Ortsauflösung notwendig wäre, kann somit verzichtet werden. Prinzipiell könnte aber auch ein NIR-Spektrometer inkl. Optik und NIR-Beleuchtung in Betracht gezogen werden, was sich jedoch als recht kostenintensive Lösung herausstellen würde.

Eine kostengünstigere Alternative hierzu stellt ein System dar, das nach dem Dreibereichsverfahren arbeitet. Bei diesem Messverfahren werden drei verschiedene NIR-LED-Typen (jeder LED-Typ deckt dabei einen bestimmten Wellenlängenbereich im NIR ab) auf das zu untersuchende Kunststoffgranulat gerichtet, und mit einem breitbandigen NIR-Empfänger wird das von den Pellets diffus reflektierte Licht detektiert, konvertiert und einer Auswerteeinheit zur Verfügung gestellt.



Analog zur Dreibereichsfarbauswertung im sichtbaren Wellenlängenbereich erfolgt auch hier eine Berechnung der Farbwerte aus den Farbrohdaten NIR-L, NIR-C und NIR-R (analog zu Rot X, Grün Y und Blau Z): $N^*i^*r^*$ (analog $L^*a^*b^*$).

N^* : informiert dabei über den Grauwert des zu untersuchenden Objektes. Je höher der N^* -Wert, desto heller die Objektoberfläche.

i^* : gibt Auskunft über den Verlauf zwischen mittlerem NIR-Wellenlängenbereich (1550nm - Zentralwellenlänge) und kurzem NIR-Wellenlängenbereich (1300nm - Zentralwellenlänge). Ein hoher negativer i^* -Wert informiert dabei über eine Reflexion am Objekt um NIR-L, während ein hoher positiver i^* -Wert auf eine Reflexion am Objekt um NIR-C hindeutet.

r^* : zeigt den Verlauf zwischen mittlerem NIR-Wellenlängenbereich und langem NIR-Wellenlängenbereich (1650nm - Zentralwellenlänge) an. Ein hoher negativer r^* -Wert informiert dabei über eine Reflexion am Objekt um NIR-C, während ein hoher positiver r^* -Wert auf eine Reflexion am Objekt um NIR-R hinweist.

1.2 NIR-Sensorik in Lichtleiter- und Festoptikausführung

Zwei NIR-Sensor-Typen stehen derzeit zur Verfügung:



Die Lichtleiterversion **SPECTRO-T-3-FIO-NIR/NIR + KL-D-0°/45°-22-1200-d80/d110-A3.0-NIR** kommt in erster Linie an Orten mit hoher Kunststoffgranulat-Temperatur (über 100°C) zum Einsatz. Der Sensorkopf KL-D-0°/45°-22-1200-d80/d110-A3.0-NIR ist dabei über die Lichtleiterkabel mit der Auswerteeinheit verbunden (1200mm Länge). Die Kontrollelektronik verfügt über 5 Digitalausgänge, binär kodiert können dadurch 31 verschiedene Produkte abgespeichert und mit Toleranzen versehen werden. Gearbeitet wird hierbei nach dem 0°/45°-Verfahren, d.h. dass die NIR-Lichteinstrahlung senkrecht zur Kunststoffgranulat-Oberfläche erfolgt, wohingegen der Empfangslichtleiter die Kunststoffgranulat-Oberfläche unter einem Winkel von 45° betrachtet. Mittels RS232-Schnittstelle können die Rohdaten aber auch die $N^*i^*r^*$ -Werte digital seriell übertragen

werden. Ferner steht ein RS232/USB sowie ein

RS232/EtherNet-Adapter zur Verfügung. Für Inline-Messungen kann der Sensorkopf in ein Schutzgehäuse integriert werden, das Schutzgehäuse kann dabei mit Druckluft beaufschlagt werden, damit kann eine Verschmutzung der Optik zusätzlich vermieden werden.

Der Sensorkopf wird hierbei mittels Schutzgehäuse auf einem speziell präparierten Schauglas montiert. Zum Kalibrieren wird der Sensorkopf samt Schutzgehäuse auf eine Kalibrierschale positioniert. Zur Kalibrierung stehen definierte Kunststoffkarten zur Verfügung, die aus verschiedenen Kunststoffen gefertigt worden sind.

Die $N^*i^*r^*$ -Werte sind in einem File hinterlegt, jede Kunststoffkarte kann mittels der für die Karte

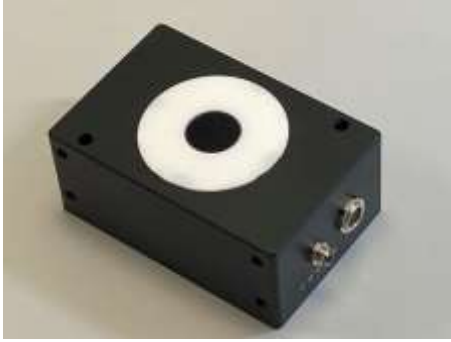
reservierte Nummer während der Kalibrierung aufgerufen werden. Anschließend wird die ausgewählte Karte in die Kalibrierschale eingeführt. Nach Quittieren wird mittels Kalibriersoftware das unter der ausgewählten Karte abgelegte Wertetripel $N^*i^*r^*$ aus dem File ausgelesen und in die Kalibriertabelle eingetragen. Dieser Vorgang kann nun für die vorhandenen Kunststoffkalibrierkarten durchgeführt werden.



Nach Abschluss der Kalibrierung

wird der Sensorkopf wieder auf das Schauglas montiert. Des Weiteren kann die Sensorik aber auch in ein Laborgerät integriert werden. Die Idee dabei ist es, während der Messungen im Labor möglichst mit den gleichen Messmitteln zu arbeiten - weswegen beim Laborgerät darauf geachtet wurde, die gleiche Sensorik im selben Abstand durch das typengleiche Schauglas auf das Kunststoffgranulat gerichtet einzusetzen. Neben dem Laborgerät steht zusätzlich auch eine batteriebetriebene mobile Geräteversion zur Verfügung. Mittels der Windows®-DOCAL-Software werden die $N^*i^*r^*$ -Werte numerisch als auch graphisch angezeigt und ferner in einem File in EXCEL®-Format abgespeichert.





Neben der Lichtleiterversion steht auch ein Messsystem mit Festoptik zur Verfügung. Der NIR-Sensor **SPECTRO-T-3-60-NIR/NIR-D20** arbeitet nach dem $d/0^\circ$ -Verfahren, d.h. diffuses NIR-Licht trifft durch das Schauglas hindurch auf die Granulat-Oberfläche. Unter 0° zur Normalen ist das Empfangsfenster des Sensors hingegen auf die Granulat-Oberfläche gerichtet. Der restliche Messvorgang gleicht dem bereits erläuterten Messvorgang mittels Lichtleiteroptik. Auch bei dieser Version steht eine Inline-Version zur

Verfügung. Die Sensorik wird dabei auf ein speziell für diesen Zweck präpariertes Schauglas montiert. Der NIR-Sensor ist dabei durch ein 9mm dickes Kronglas auf das zu messende Kunststoffgranulat gerichtet. Die Kalibrierung des Messsystems erfolgt hier ebenfalls mit Hilfe einer Kalibrierschale und den entsprechenden Kalibriernormalen (Kunststoffplättchen aus verschiedenen Kunststoffen angefertigt). Zu diesem Zweck wird der NIR-Sensor vom Schauglas abmontiert und auf der Kalibrierschale befestigt.

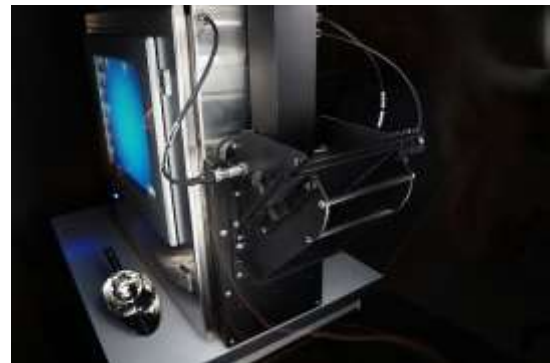


Dazu ist auf der Kalibrierschale eine passende Ausparung vorgesehen. Bei dem

Messsystem mit Festoptik ist allerdings zu beachten, dass am Befestigungsbereich der Schauglas-Einfassung eine Temperatur von 70°C nicht überschritten wird. Andernfalls sollte auf die

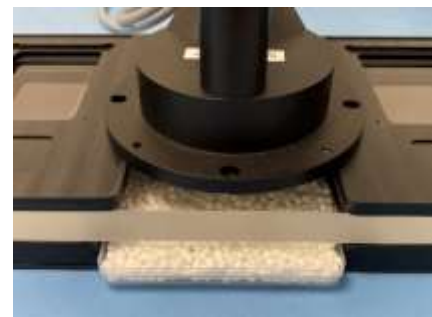


Lichtleitervariante zurückgegriffen werden. Ferner gibt es die Festoptik-NIR-Sensorik auch im Laborgerät; die optische Anordnung ist auch hier identisch zur Platzierung am Schauglas. Wie bei der Lichtleiterversion gibt es auch hierzu eine mobile Einheit. Mit Hilfe der Windows®-DOCAL-PC-Software wird auch hier die Kalibrierung, die Messung sowie die Messdatenabspeicherung vorgenommen. Bei den Labor- sowie den Mobilgeräten kann ein $N^*i^*r^*$ -Messwert über ein Volumen von typ. 3 Liter ermittelt werden. Entsprechend präzise ist auch das Ergebnis.



Steht hingegen nur eine geringe Menge an Kunststoffgranulat-Material für die Untersuchung zur Verfügung, kann auch mittels reduziertem Messaufbau die Kunststoffart ermittelt werden. Auch hierbei wird im nahezu selben Abstand zum Granulat und unter vergleichbaren optischen Bedingungen gemessen.

Sowohl für die Lichtleiterversion SPECTRO-T-3-FIO-NIR/NIR + KL-D- $0^\circ/45^\circ$ -22-1200-d80/d110-A3.0-NIR als auch für die Festoptikversion SPECTRO-T-3-60-NIR/NIR-D20 gibt es dazu eine passende Vorrichtung.

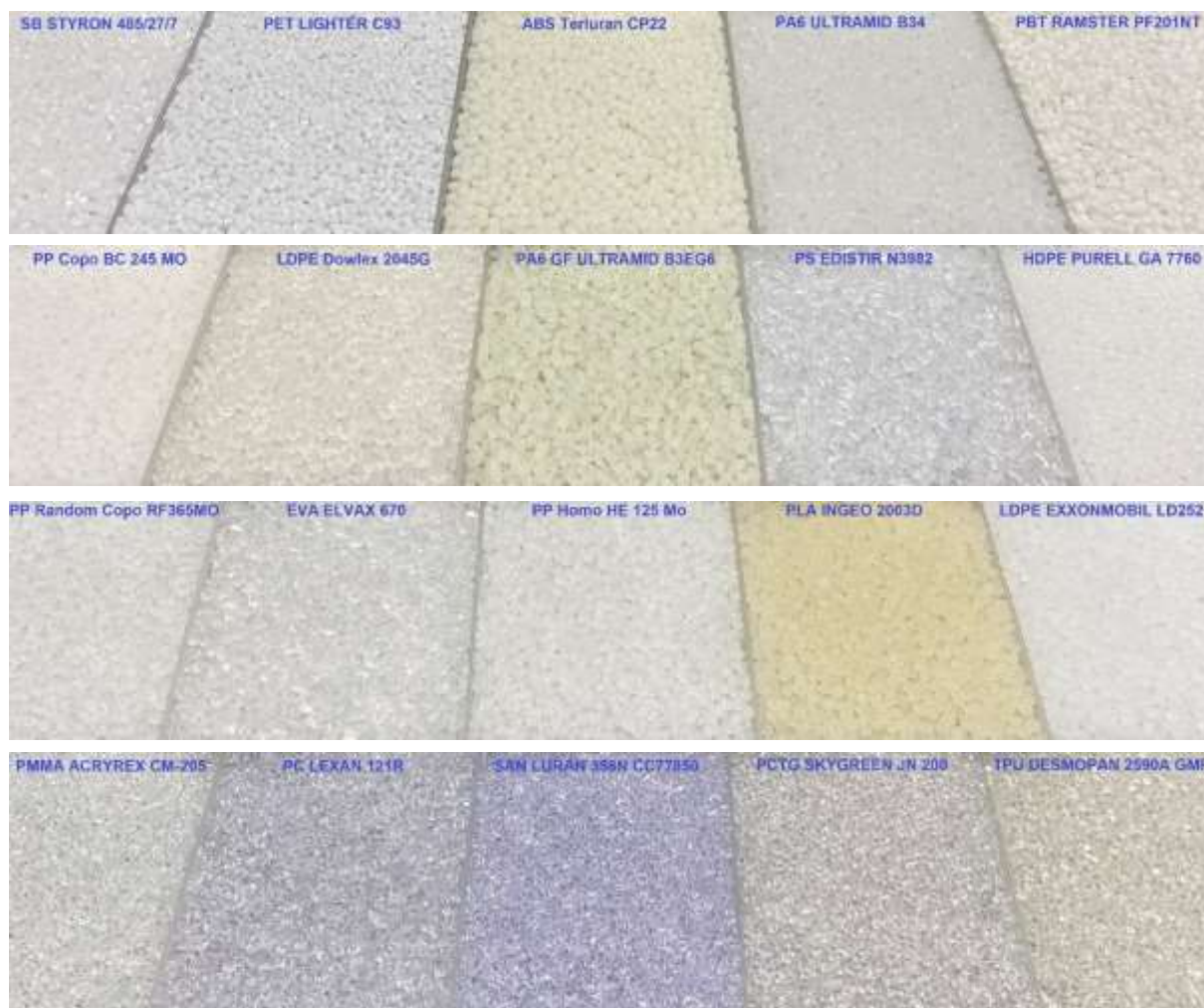




**Untersuchung von Neuware
in Hinblick auf die
Kunststoffart mittels
NIR - Technologie**

2. Untersuchung von Neuware in Hinblick auf die Kunststoffart mittels NIR-Technologie

Folgende Kunststoffgranulate aus Neuware wurden in Bezug auf das NIR-Verhalten untersucht:



2.1 Messergebnisse mit dem SPECTRO-T-3-60-NIR/NIR-D20

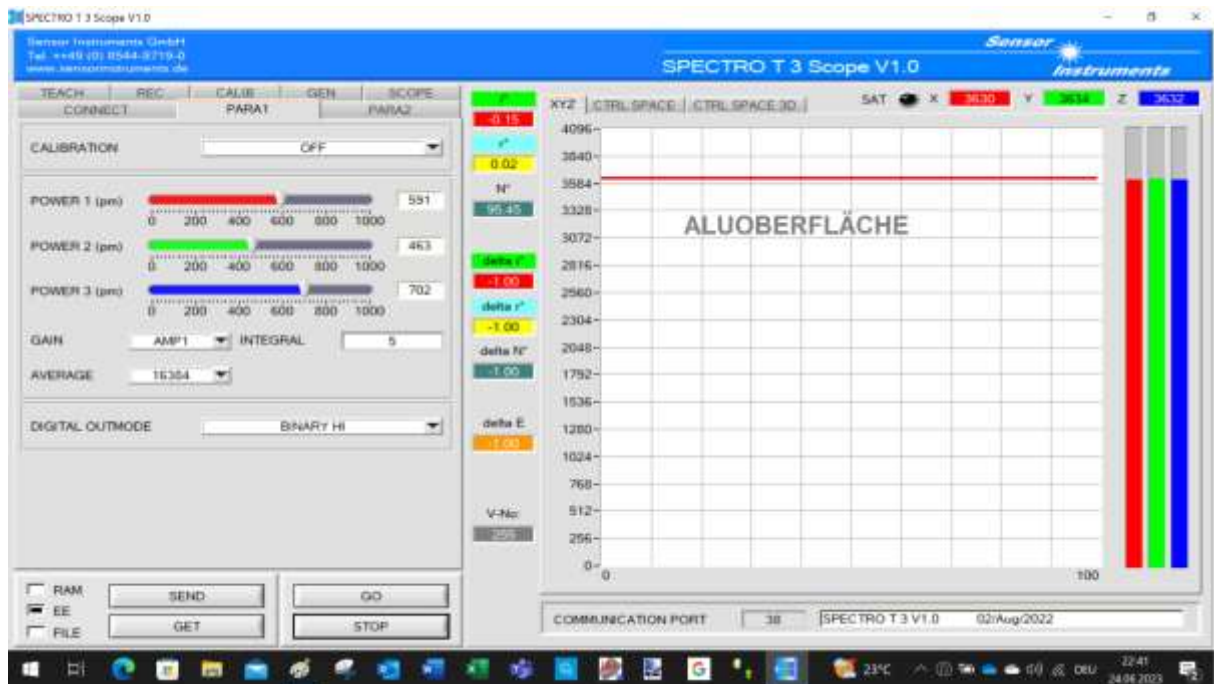
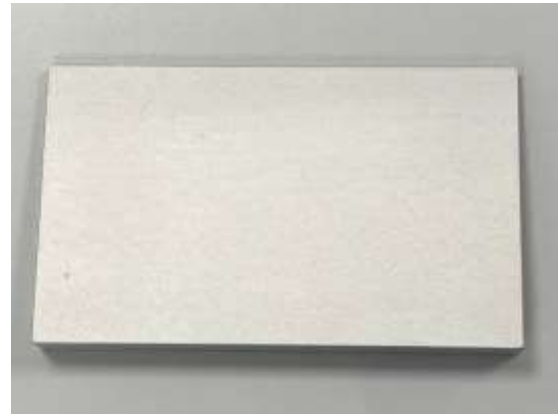
2.1.1 Die kompakte Messvorrichtung



Da von den einzelnen Granulat-Proben nicht genügend Pellets vorhanden waren, um den Trichter des Laborgerätes ausreichend zu befüllen, wurde stattdessen auf die kompaktere Messvorrichtung zurückgegriffen, bei der eine flache, mit Pellets befüllte Schale, unterhalb der Glasplatte vor dem Sensor platziert wird. Um den Einfluss der zufälligen Anordnung der Pellets im Detektionsbereich zu reduzieren wurde die Schale während der Messung unterhalb des Sensors bewegt (Vor-, Rückwärtsbewegung). Bei der Glasplatte wird dieselbe Glasplatte (Material: Kronglas) wie in den Schaugläsern verwendet. Die kompakte Messvorrichtung eignet sich auch zur Aufnahme der Kalibrierkarten (Kunststoffart-Kalibrierung). Die kompakte Messvorrichtung kann somit auch als Kalibriereinheit Verwendung finden. Das Fassungsvermögen der Pellets-Schalen beträgt in etwa 0,1 Liter.

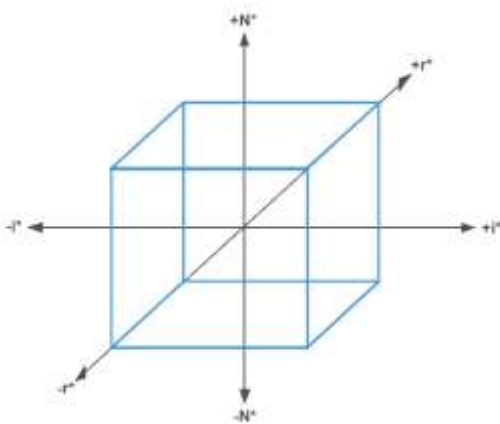
2.1.2 Referenzieren des Sensors

Die optimale Einstellung des verfügbaren Dynamikbereichs des Sensors erfolgt mittels einer im NIR-Bereich für konstante Reflexion sorgende Aluminiumoberfläche. Die Aluplatte dient als Referenzoberfläche für den sog. Weißabgleich. Die drei verfügbaren NIR-LED-Lichtquellen werden dabei so eingestellt, dass die Empfangssignale je Wellenlängenbereich den gleichen Wert anzeigen und in etwa bei einem Wert von 3600 liegen. Die NIR-LED Sendeleistungen können mit Hilfe der Windows®-Software SPECTRO T3 Scope eingestellt werden.

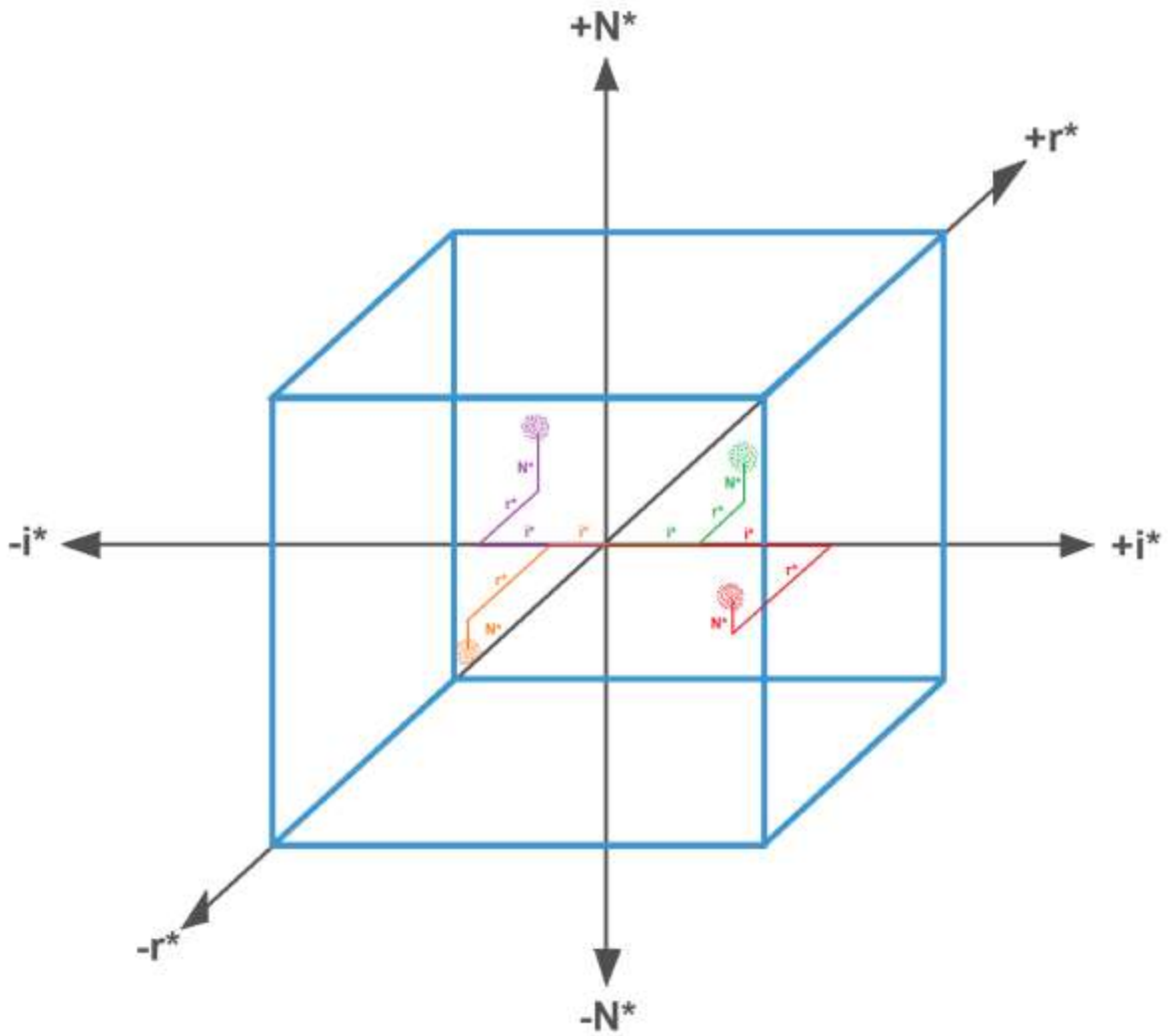


Windows®-Software SPECTRO T3 Scope V1.0

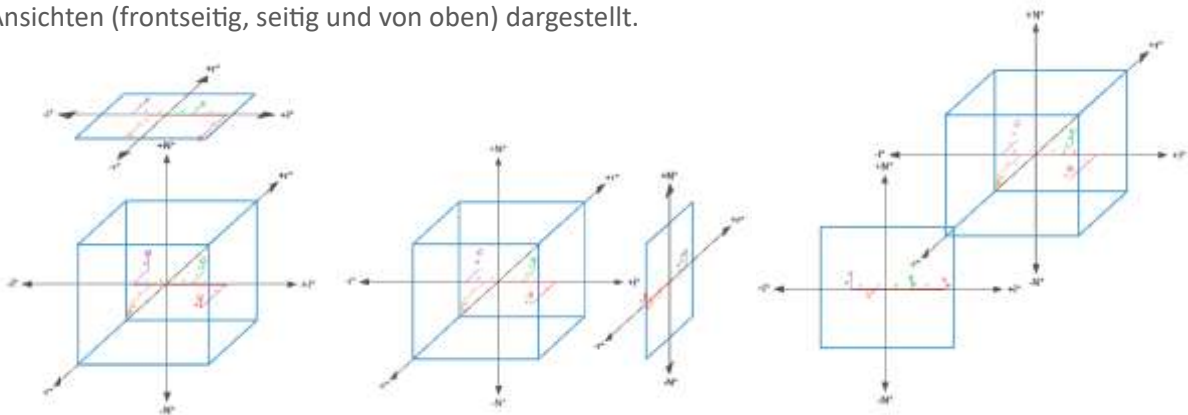
2.1.3 Darstellung der N*i*r*-Werte



Aus den Empfangssignalen X (NIR-L), Y (NIR-C) und Z (NIR-R) werden in Anlehnung an die Methode zur Berechnung der L*a*b*-Farbwerte die N*i*r*-Werte ermittelt. Eine bestimmte Kunststoffart z.B. nimmt dabei einen bestimmten Platz im dreidimensionalen N*i*r*-Raum ein. Wie eingangs schon erwähnt, informiert N* über den Grauwert, während i* über den Signalverlauf im unteren (X-Y) und r* über den Signalverlauf im oberen NIR-Wellenlängenbereich (Y-Z) Auskunft gibt. Im folgenden Bild sind die N*i*r*-Werte von vier verschiedenen Kunststoffarten dargestellt: N*i*r*, N*i*r*, N*i*r* und N*i*r*.



Darstellung beispielsweise von vier verschiedenen Kunststoffarten im $N^*i^*r^*$ -Raum. Die Punkte in den Punktwolken sollen die einzelnen Messwerte wiedergeben. Die Schwankung ergibt sich aus den unterschiedlichen Positionen der Pellets während einer Messung. Am Ende eines Messvorganges wird dann jeweils über die einzelnen Messwerte gemittelt. Um die Darstellung im dreidimensionalen $N^*i^*r^*$ -Raum zu erleichtern, werden auf der Windows®-Bedieneroberfläche **CTRL SPACE 3D** die drei Ansichten (frontseitig, seitig und von oben) dargestellt.

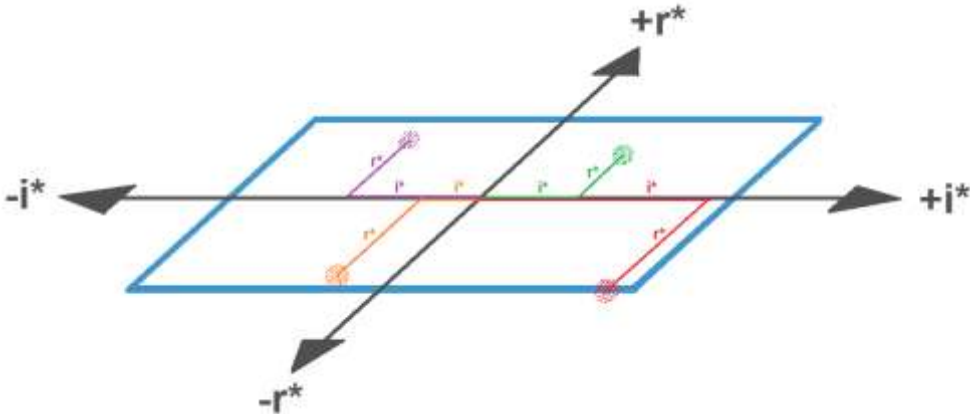


3 Ansichten: von oben

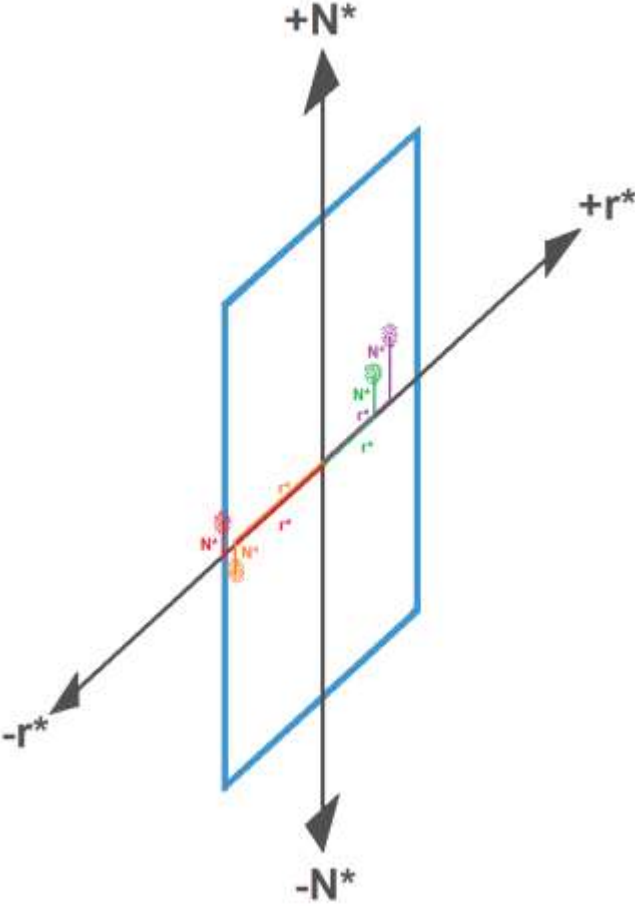
von der Seite

von vorne

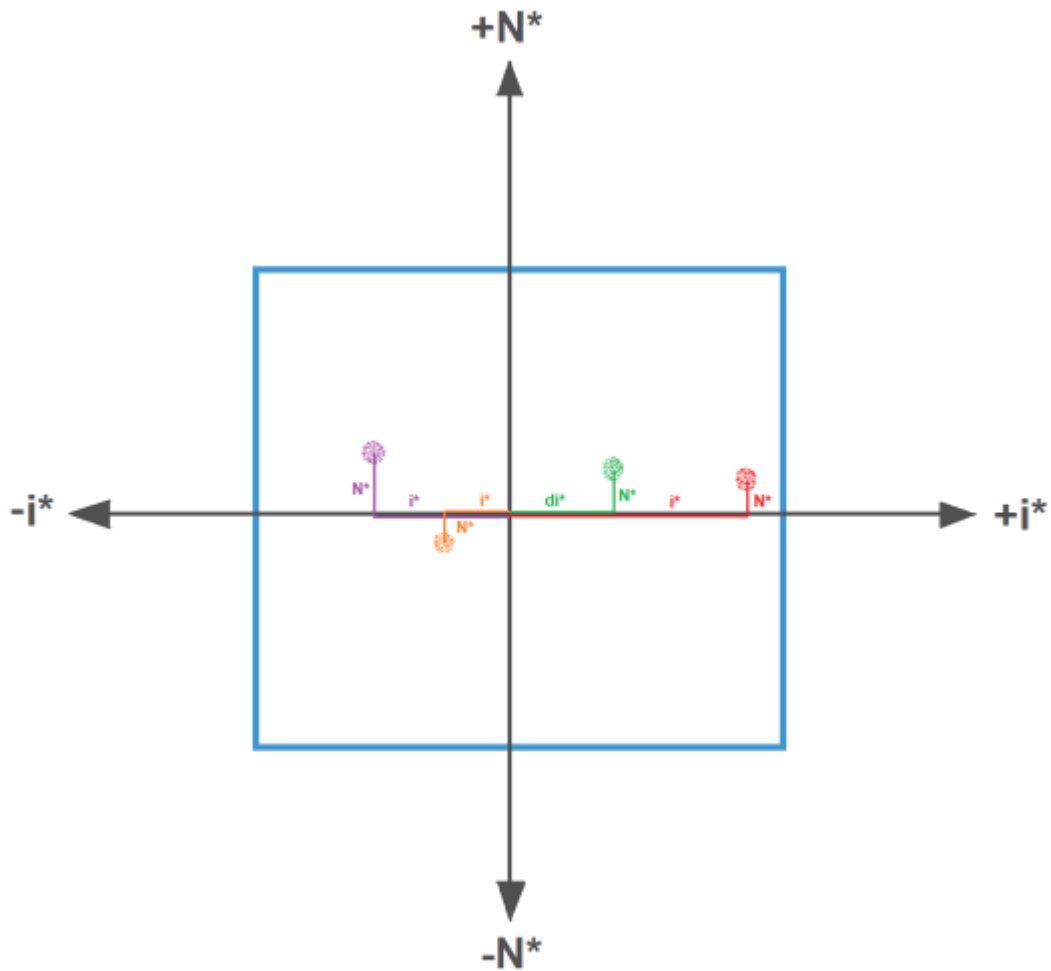
Das i^*r^* -Diagramm gibt Auskunft über den Verlauf der einzelnen Kunststoffproben im NIR-Spektrum, während das i^*N^* - sowie das r^*N^* -Diagramm neben dem Wellenlängenverlauf im unteren (i^*N^*) bzw. im oberen (r^*N^*) Bereich auch Auskunft über den Grauwert gibt.



i^*r^* -Diagramm



r^*N^* -Diagramm



i^*N^* -Diagramm

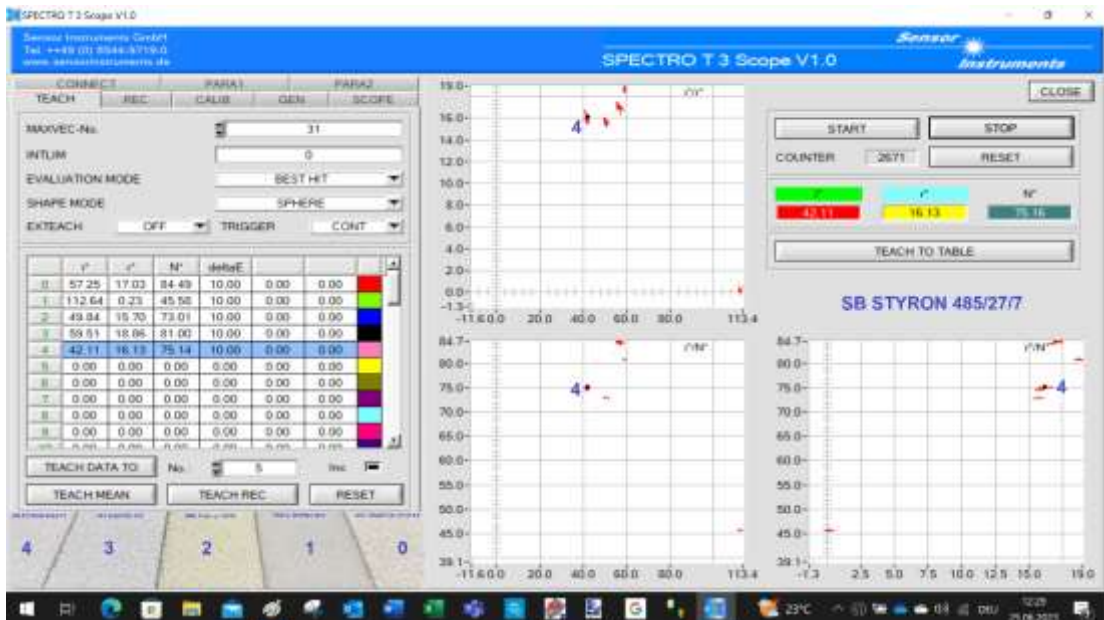
2.1.4 Ermittlung der $N^*i^*r^*$ -Messwerte

Zunächst wurden folgende Granulat-Proben untersucht:

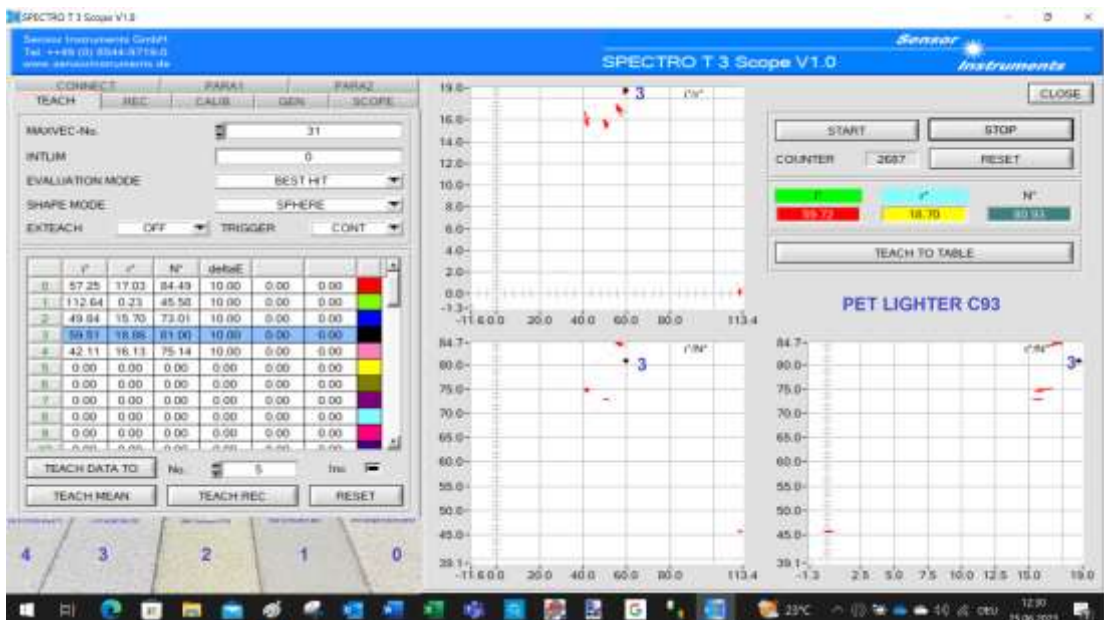
- a) SB STYRON
485/27/7
- b) PET LIGHTER
C93
- c) ABS Terluran
GP22
- d) PA6 ULTRAMID
B3K
- e) PBT RAMSTER
PF201NT



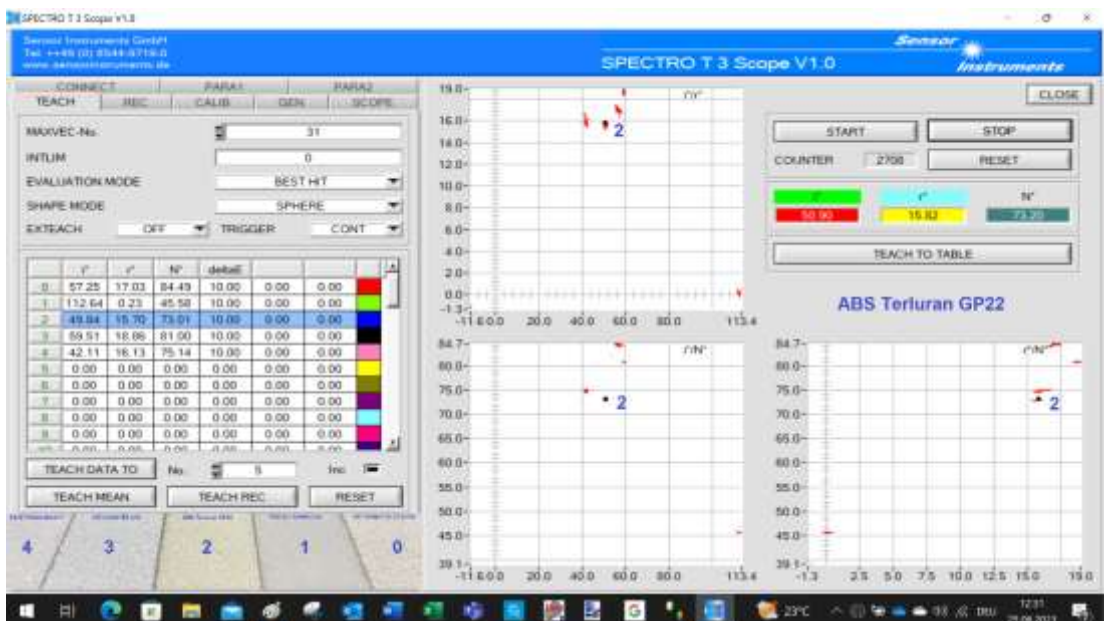
Die Pellets-Schalen wurden dabei der Reihe nach der kompakten Messvorrichtung zugeführt und die Messwerte mittels der **SPECTRO T3 Scope** PC-Software aufgezeichnet.



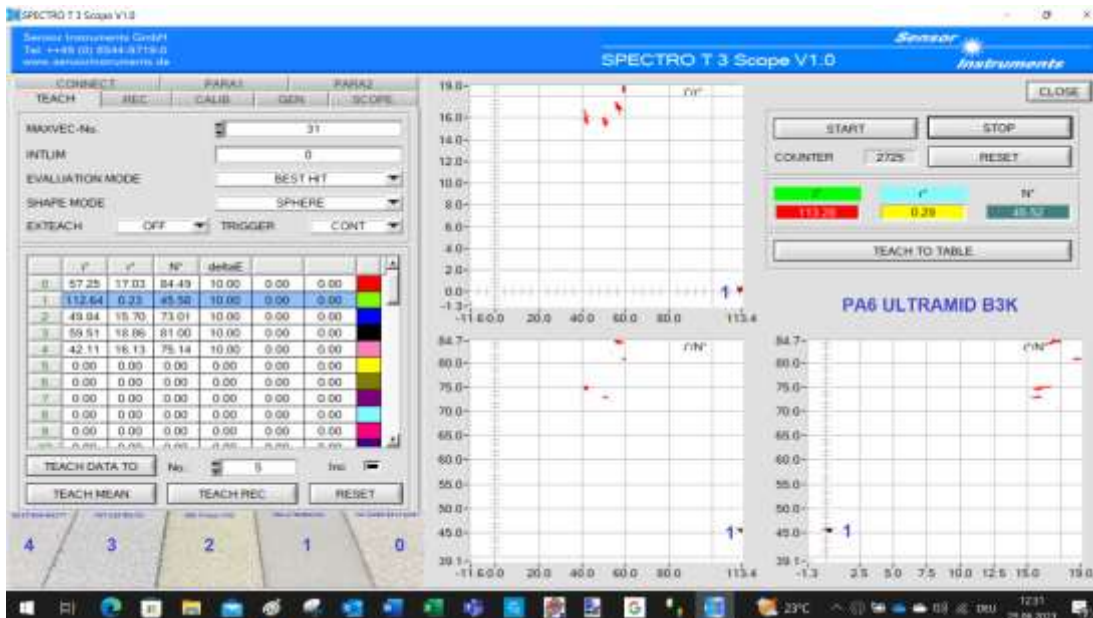
a)



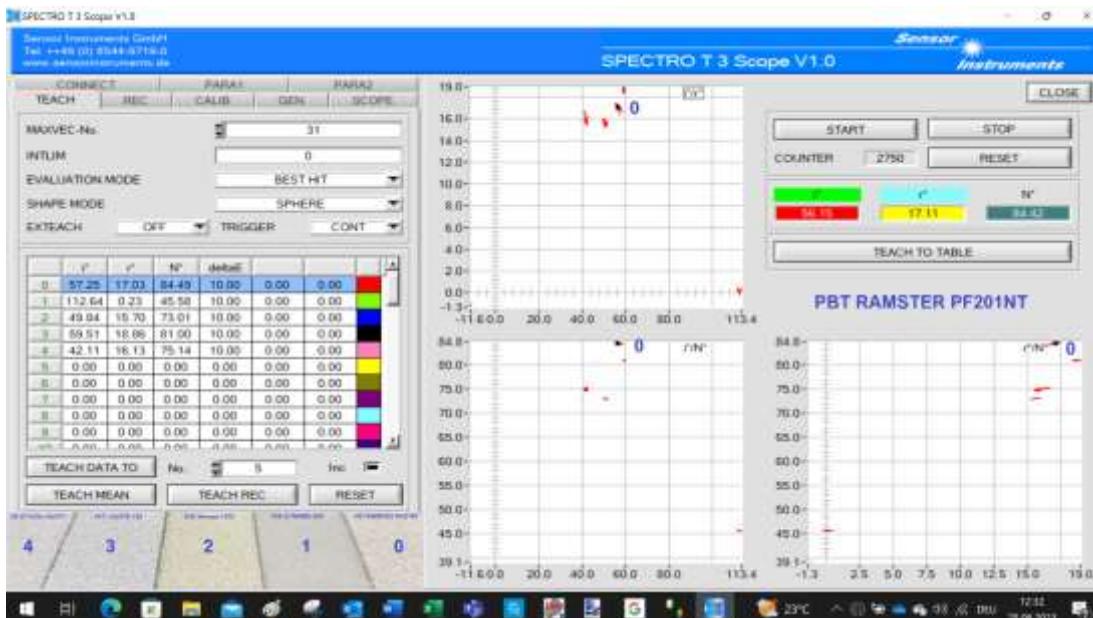
b)



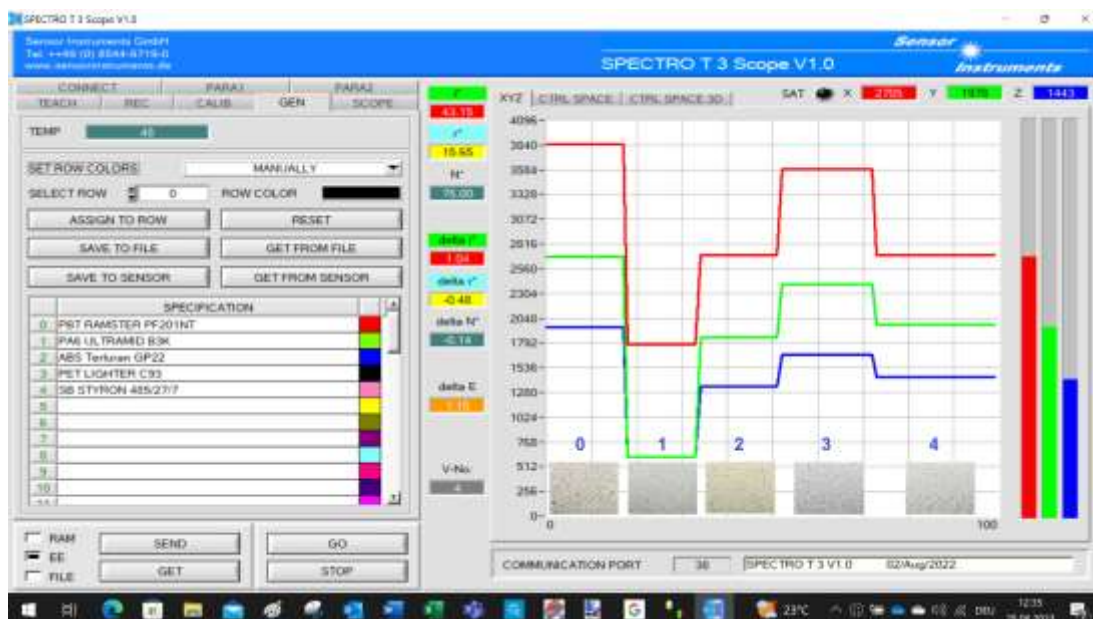
c)



d)

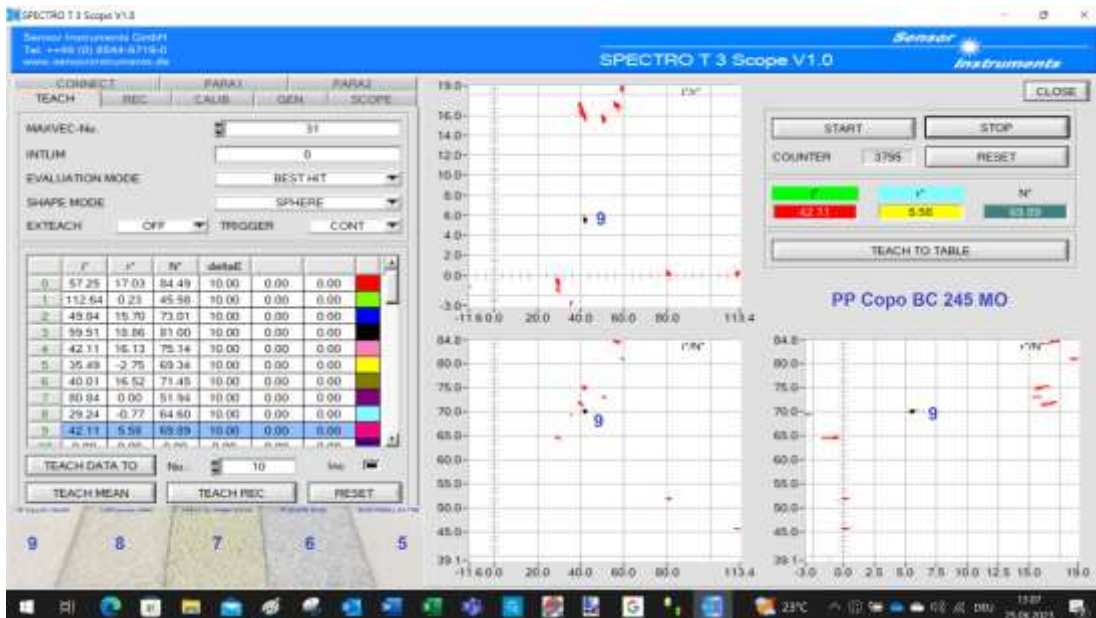


e)

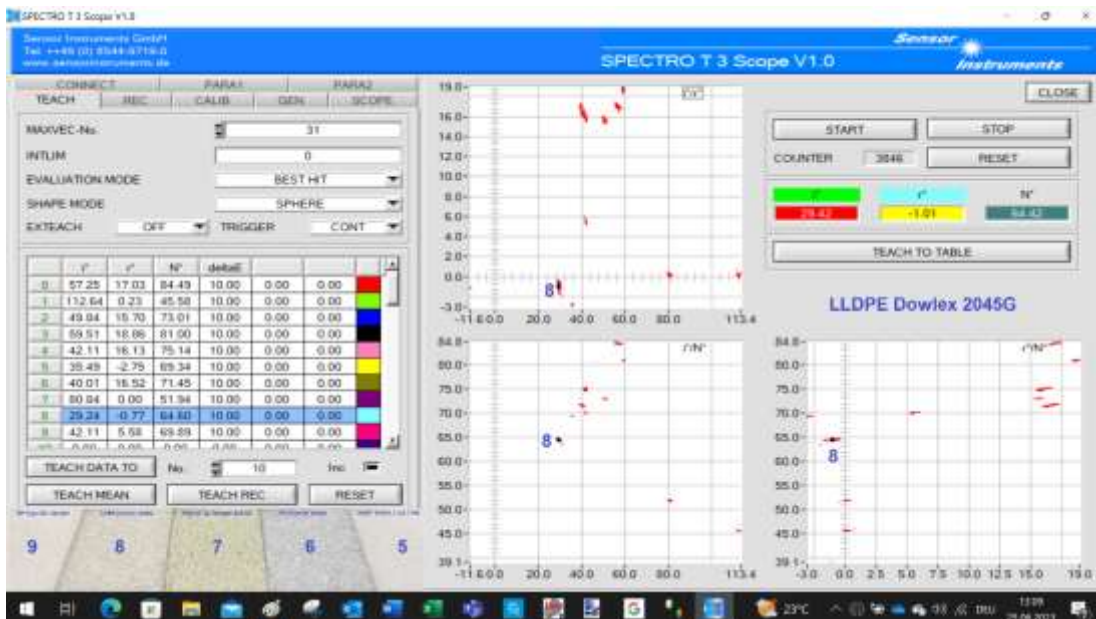


Dann folgten die nächsten 5 Proben:

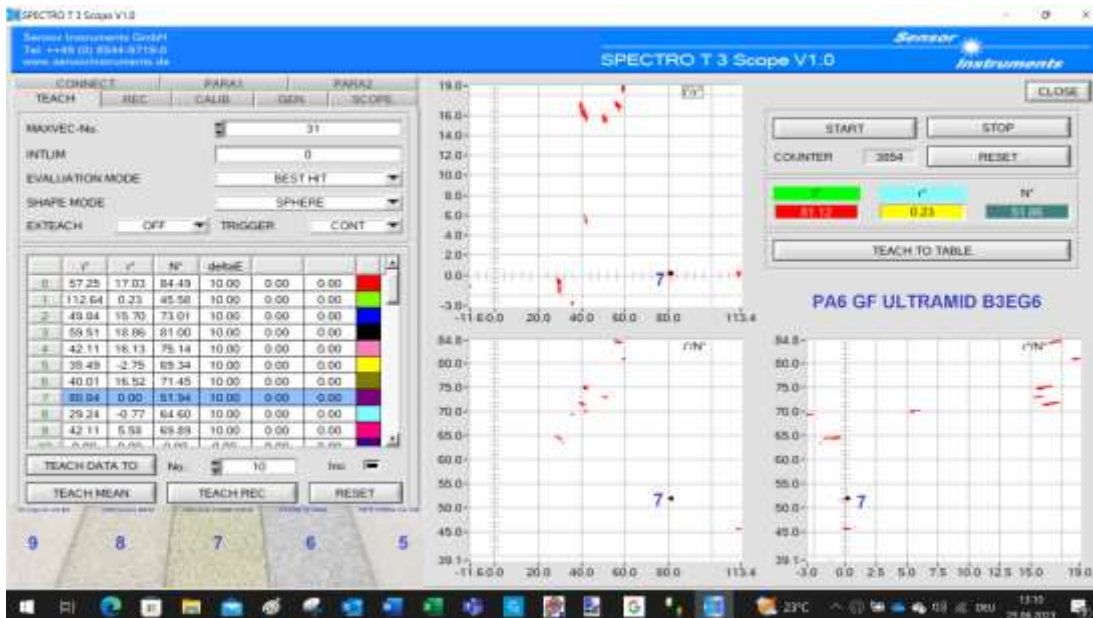
- f) PP Copo BC245
MO
- g) LLDPE DOWLEX
2045G
- h) PA6 GF
ULTRAMID
B3EG6
- i) PS EDISTIR
N3982
- j) HDPE PURELL GA
7760



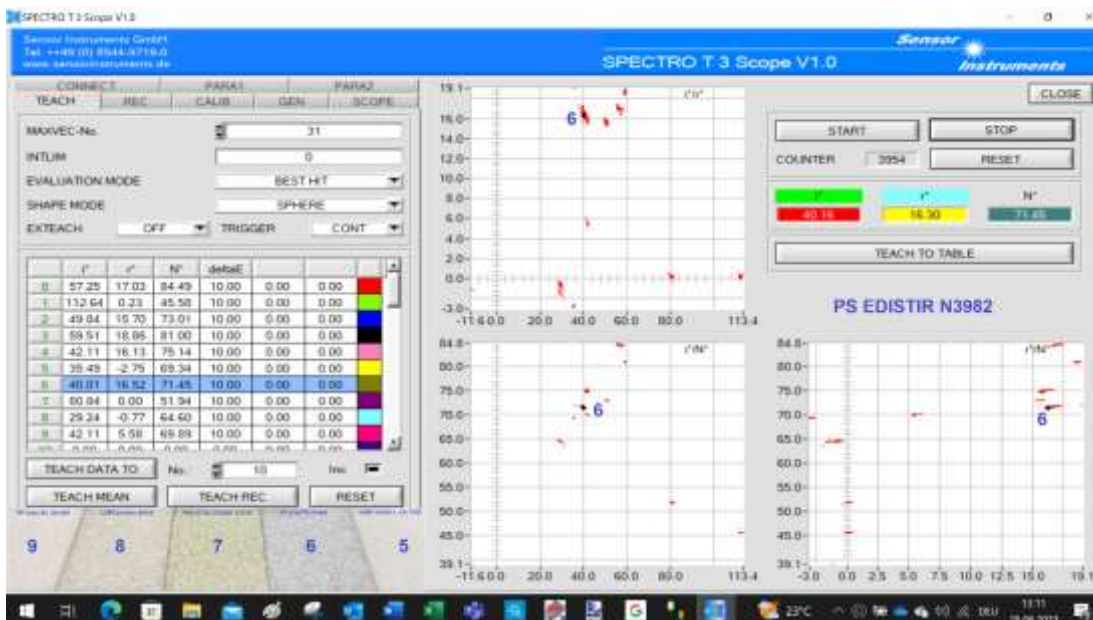
f)



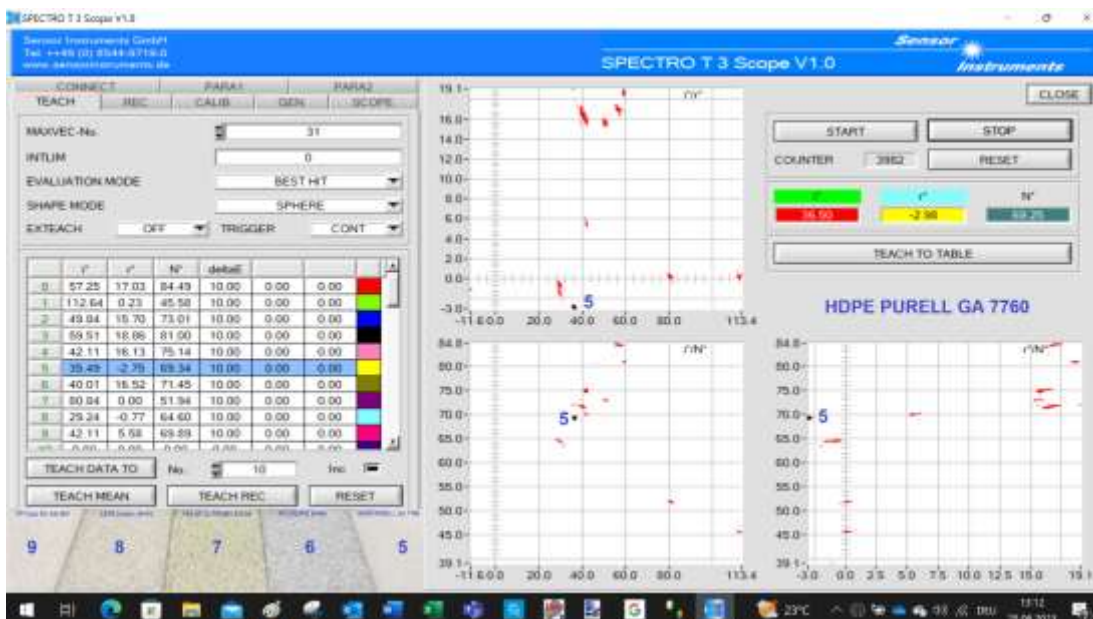
g)



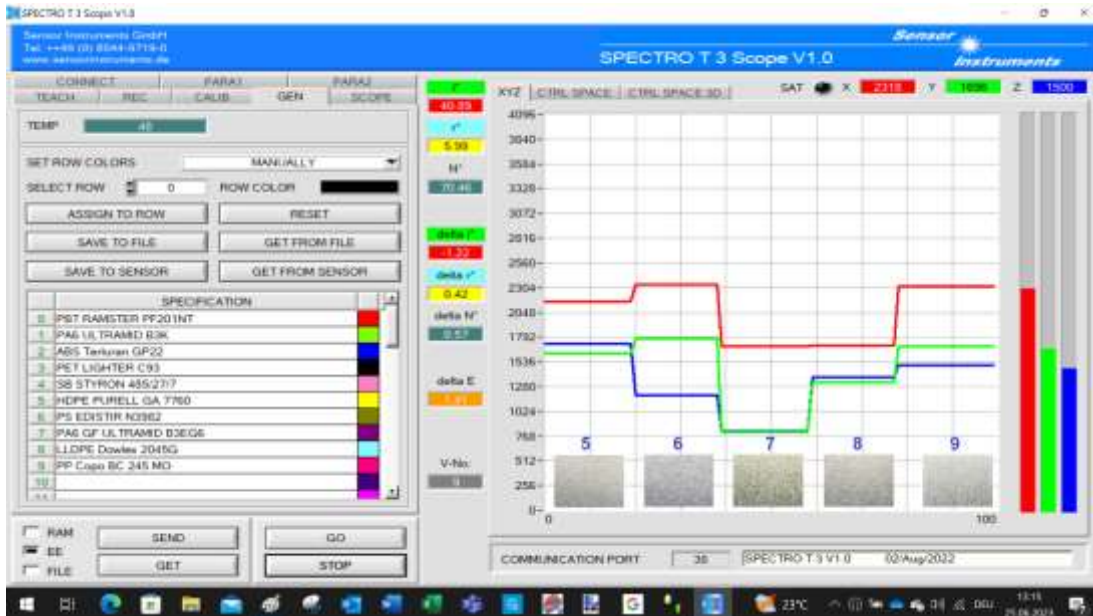
h)



i)

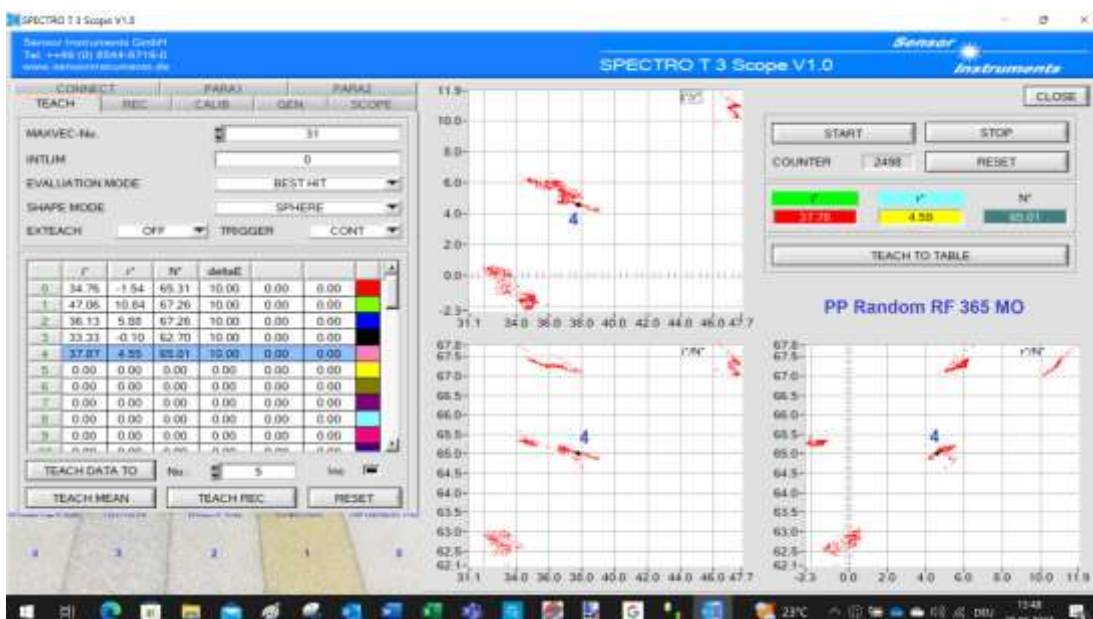


j)

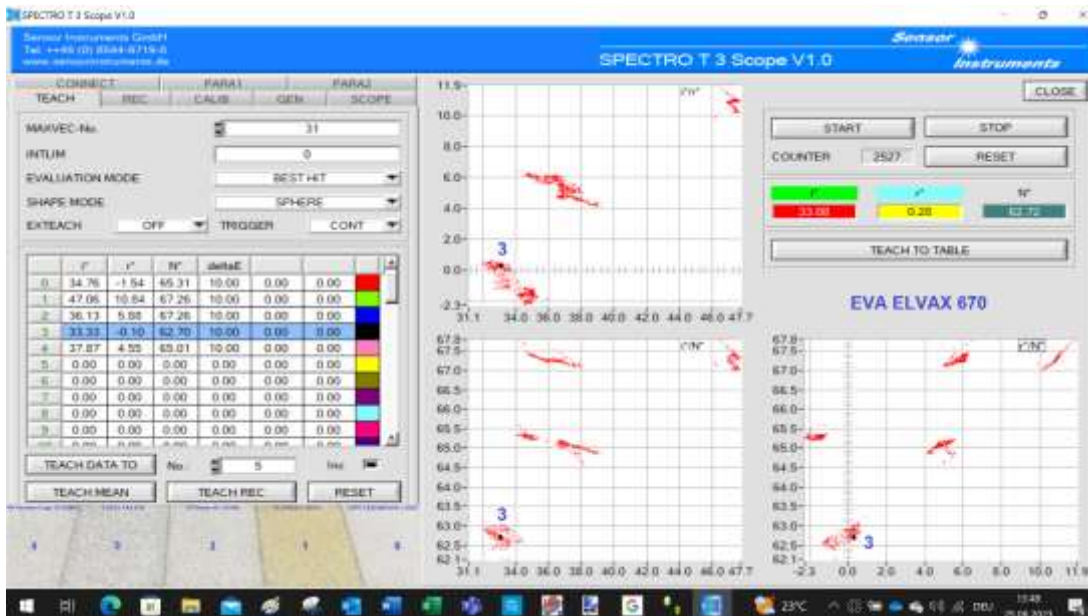


Weitere 5 Neuware-Granulat-Proben:

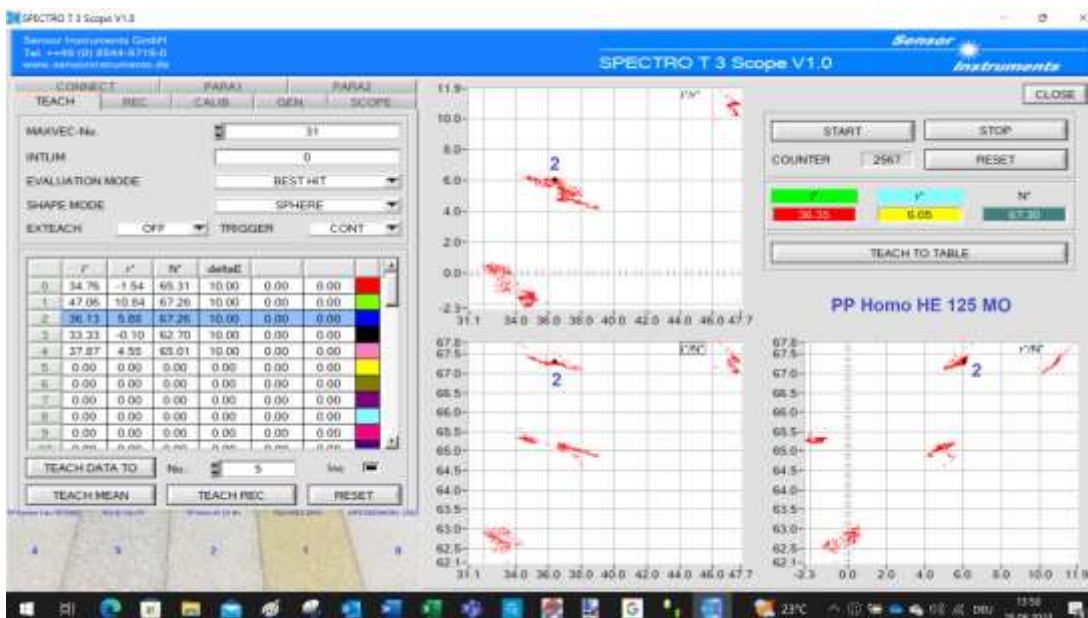
- k) PP Random Copo
RF 365 MO
- l) EVA ELVAX 670
- m) PP Homo HE 125
MO
- n) PLA INGEO
2003D
- o) LDPE
EXXONMOBIL
LD252



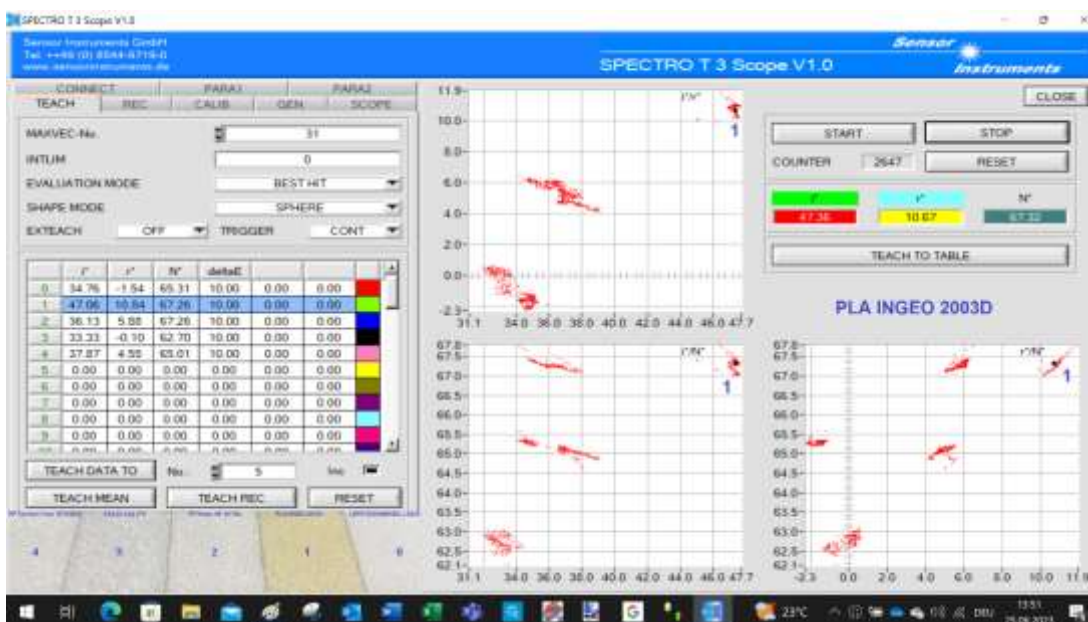
k)



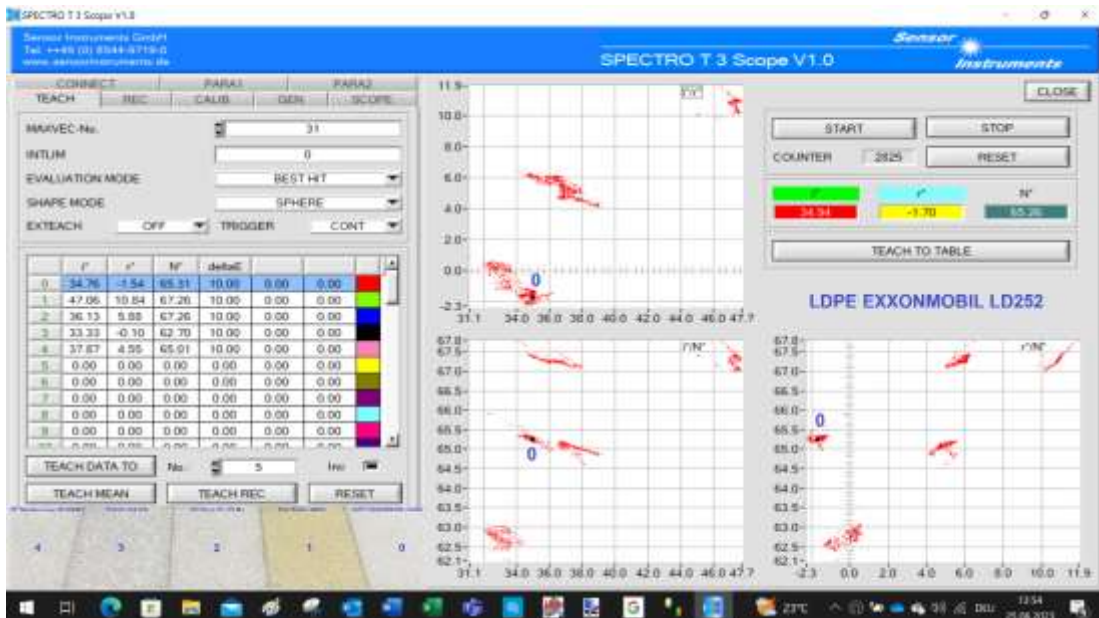
l)



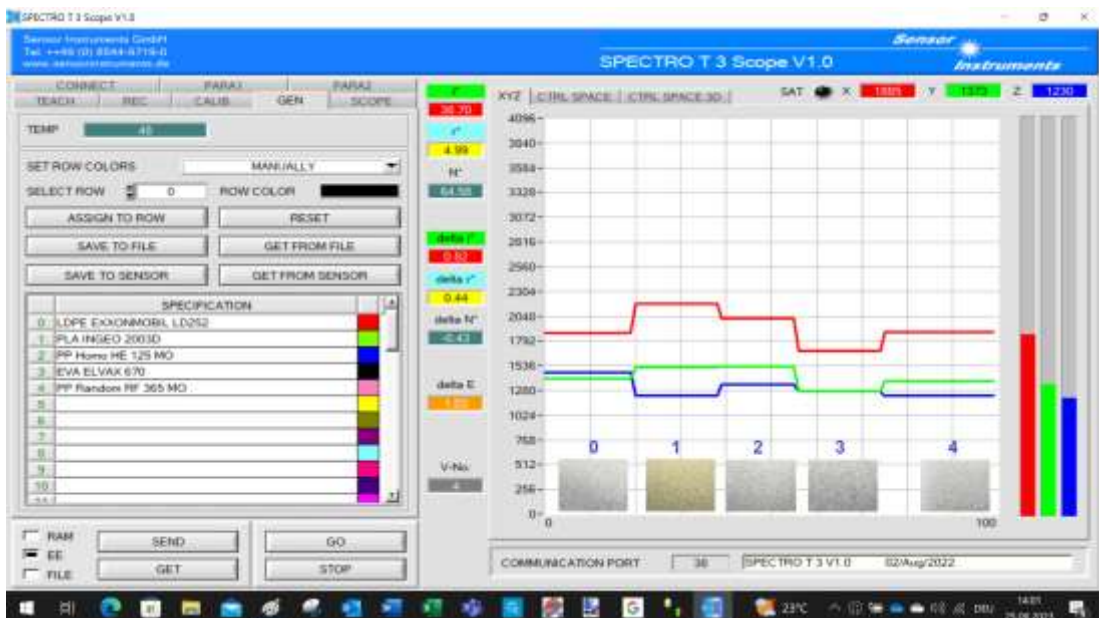
m)



n)



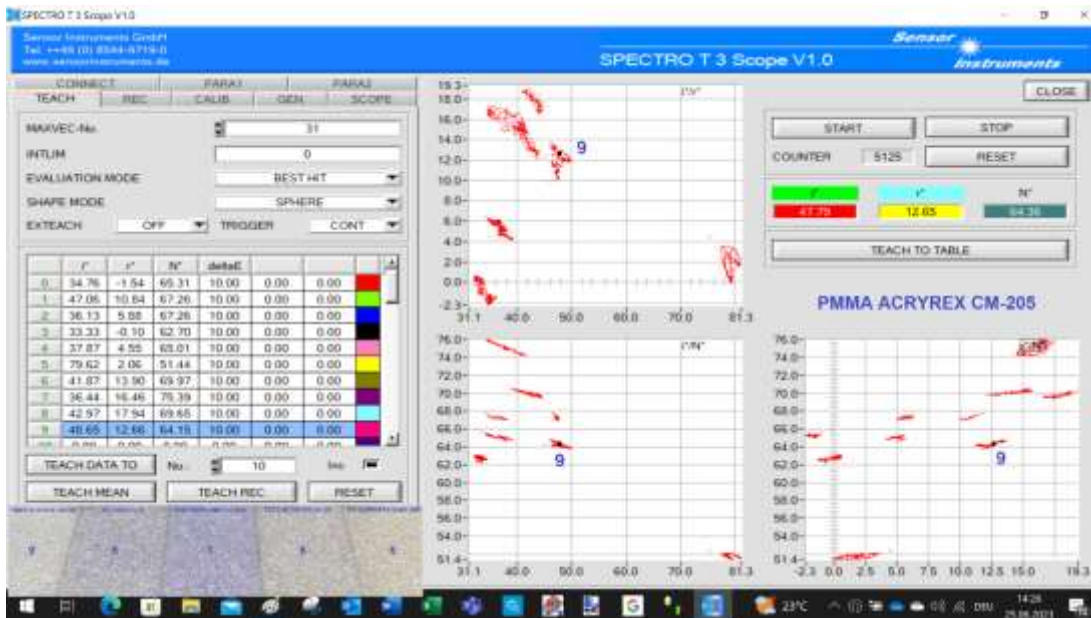
o)



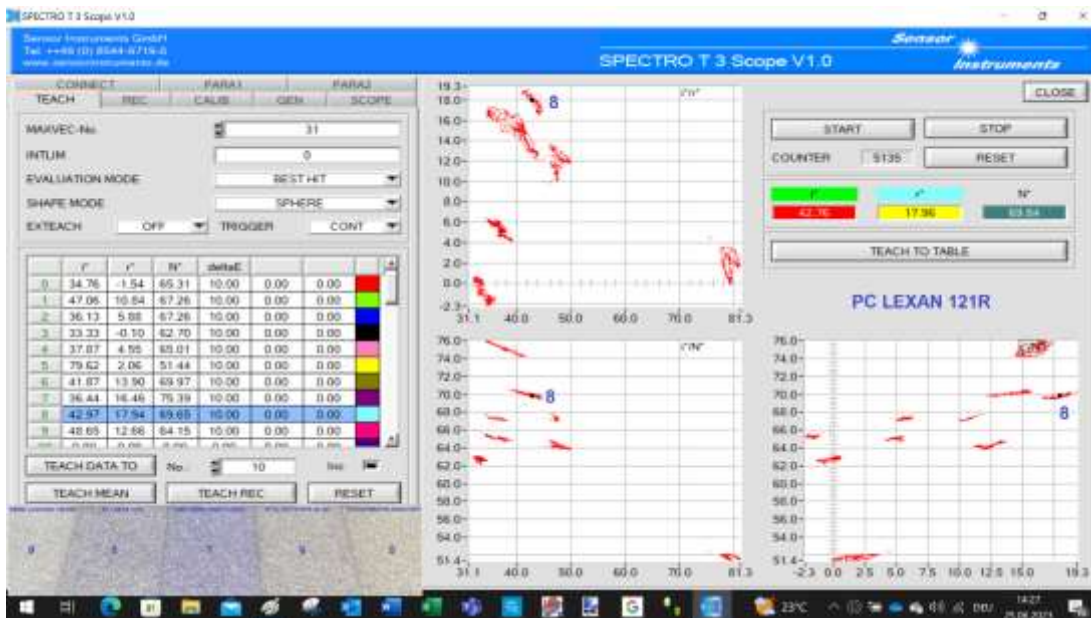
Und die nächsten 5 Neeware-Granulat-Proben:

- p) PMMA ACRYREX CM-205
- q) PC LEXAN 121R
- r) SAN LURAN 358N CC77850
- s) PCT6 SKYGREEN JN200
- t) TPU DESMOPAN 2599A GMP

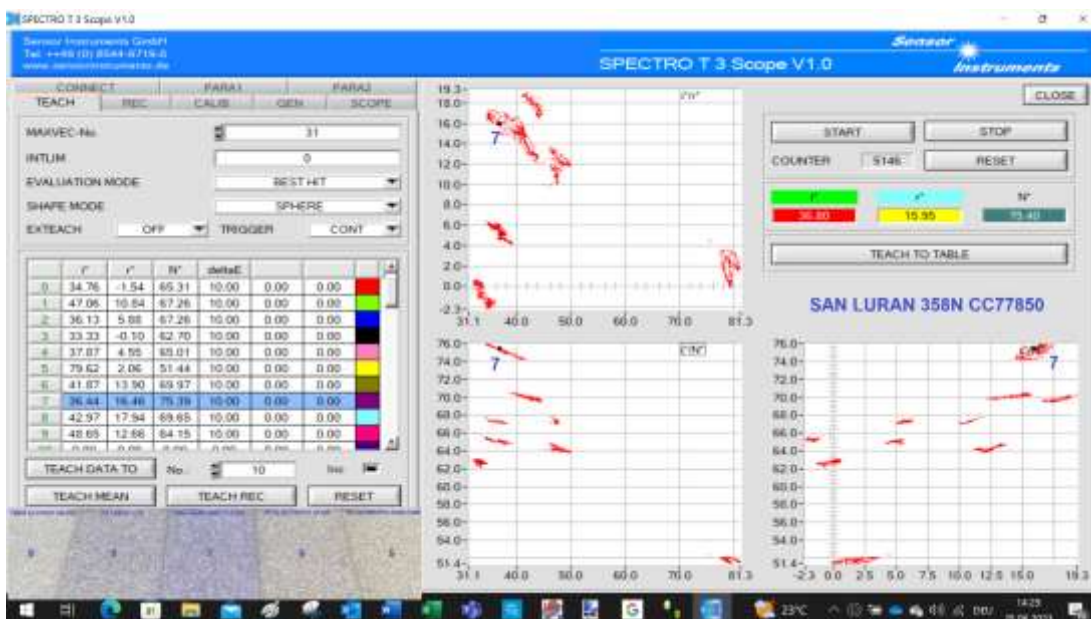




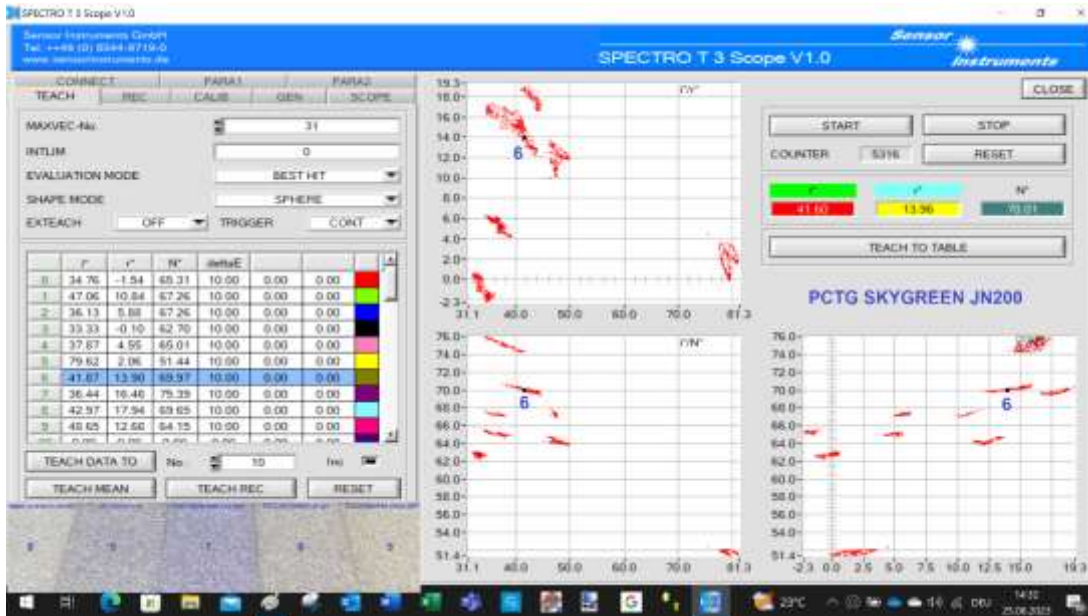
p)



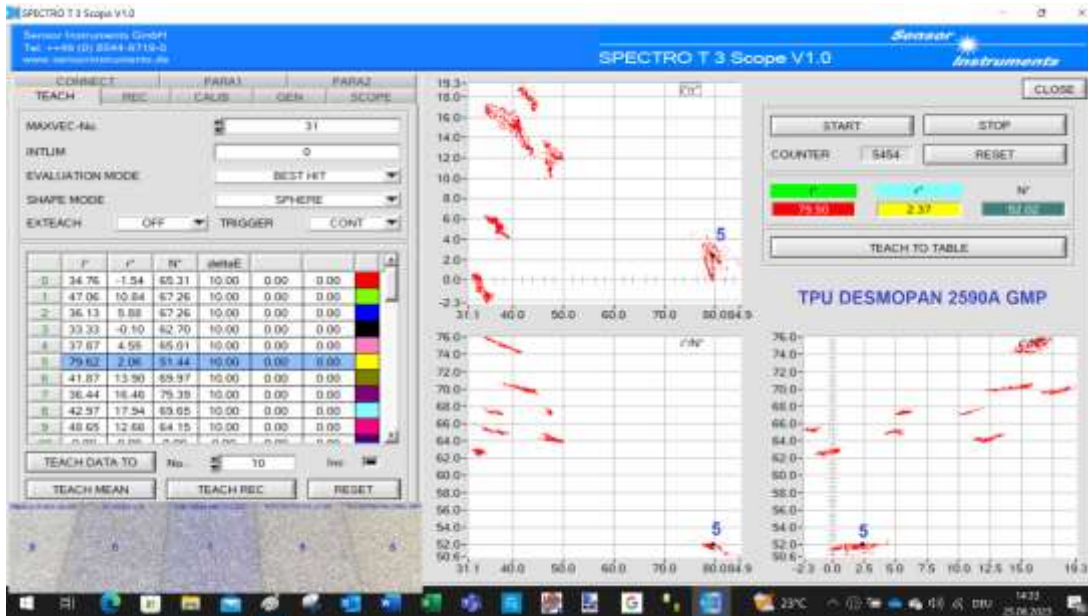
q)



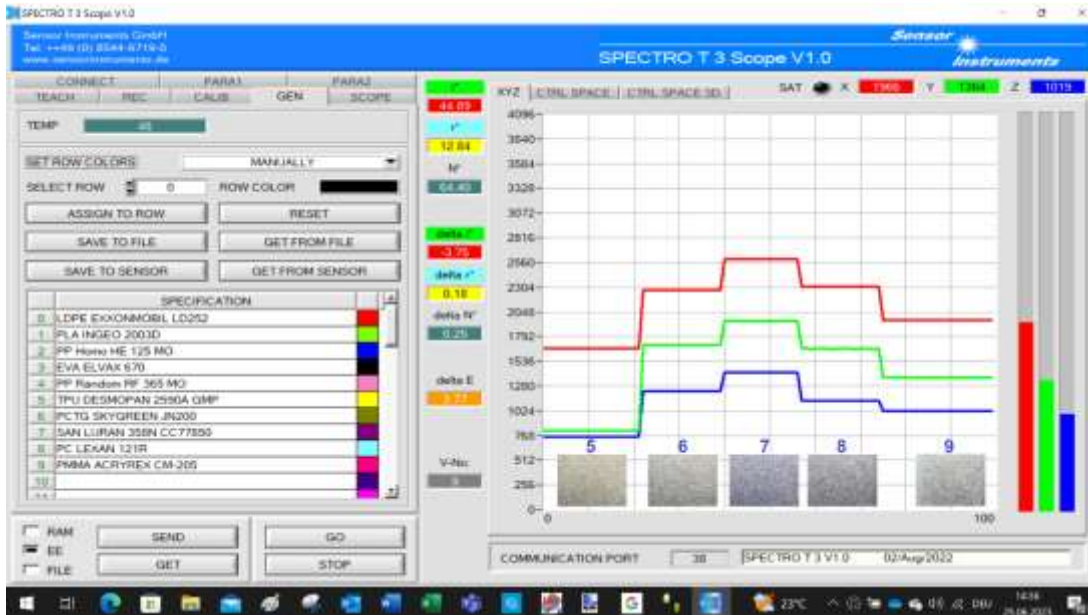
r)



s)



t)

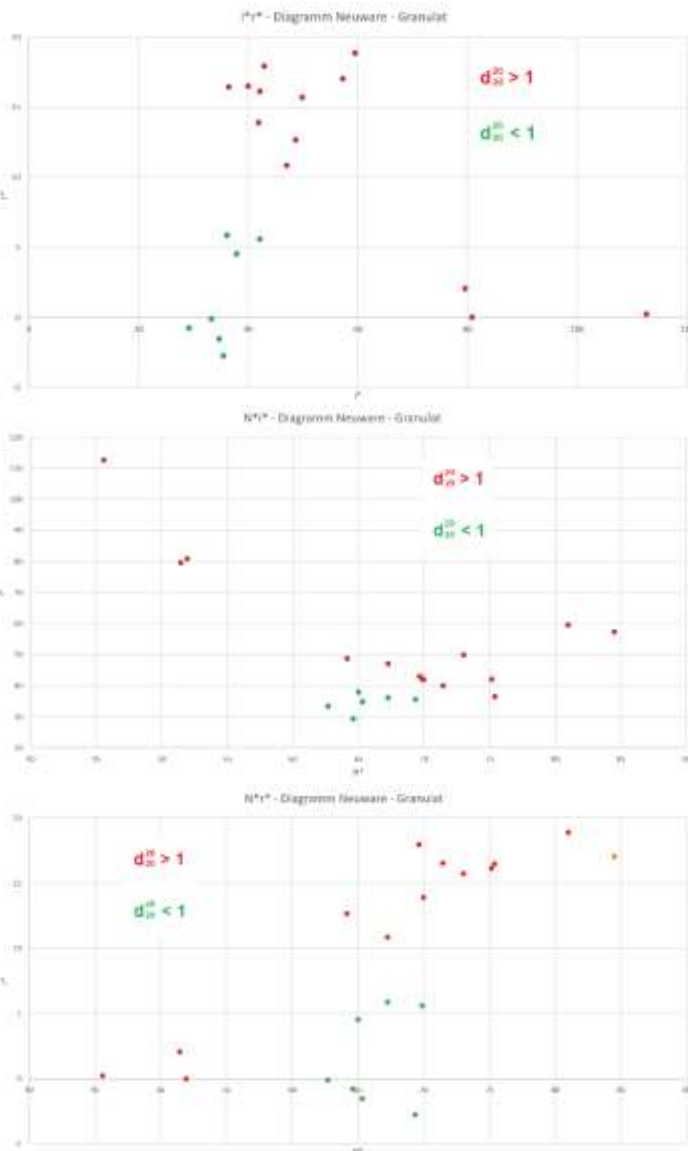
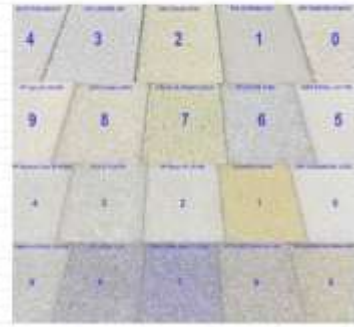


2.1.4 Zusammenfassung der Messergebnisse in Bezug auf Neuware

Erfreulicherweise konnten auch bei den transparenten Granulat-Proben reproduzierbare Messergebnisse erzielt werden. Das dürfte vermutlich damit zusammenhängen, dass mit diffuser Beleuchtung und unter einem Betrachtungswinkel um die 0° zur Normalen gearbeitet worden ist. Dadurch konnten Direktreflexionen an den Pellets, die das Messergebnis beeinträchtigt hätten, weitestgehend von der Empfängerseite ferngehalten werden.

Zusammengefasst in einer Tabelle ergeben sich für die 20 verschiedenen Produkte folgende Werte:

NEUWARE - GRANULATPROBEN GEMESSEN MIT DEM SPECTRO-T-3-60 NIR/MIR D20	d_{30}^{20}	Kunststoffart	N^*	i^*	r^*	SPECTRO T3 Scope V3.0 Nummer
GRANULAT - BEZEICHNUNG	rel. Dichte zu Wasser					
PEI DAWGHTER HYDROENT	>1	PEI	86,49	57,75	17,03	0
PA6 (1) TRAGAR DRE	>1	PA6	47,59	110,65	10,13	1
ABS TELURMAN SP22	>1	ABS	73,01	49,98	15,7	2
PEI LIGHTER C81	>1	PEI	81	58,11	18,86	3
PEI SYNDOM ABS/1777	>1	PEI	75,16	42,11	16,13	4
HDPE PURBELL DA 7702	<1	HDPE	99,38	25,49	-2,75	5
PEI EIBER N302	>1	PEI	71,45	48,01	16,52	6
PA6 (1) ULTRAMED BEEBA	>1	PA6	51,98	81,89	0	7
LLDPE SCHWEN 20450	<1	LLDPE	94,8	21,28	-0,77	8
PP GODO FC 145 MO	<1	PP	99,89	42,11	5,58	9
LDPE KROKONORU 12021	<1	LDPE	91,31	34,76	-1,54	0
PLA HAGED 20001	>1	PLA	67,26	47,66	10,88	1
PP HEMO PE 125 MO	<1	PP	67,26	36,13	-3,89	2
EVA FIVAR 620	<1	EVA	61,7	33,33	0,1	3
PP BANCORA FC 165 MO	<1	PP	95,31	17,87	4,55	4
TPU DIAMOPAN 2700 LGMP	>1	TPU	51,48	79,62	2,66	5
PCG SCHWEN 16200	>1	PCG	69,87	41,87	-13,9	6
NAN LURAN 3700 CCT7830	>1	Acrylnitril	75,39	76,44	10,46	7
PE LEXAN 123H	>1	PE	69,85	42,97	17,56	8
PMMA ACRYCEL CM-200	>1	PMMA	64,15	48,65	12,66	9



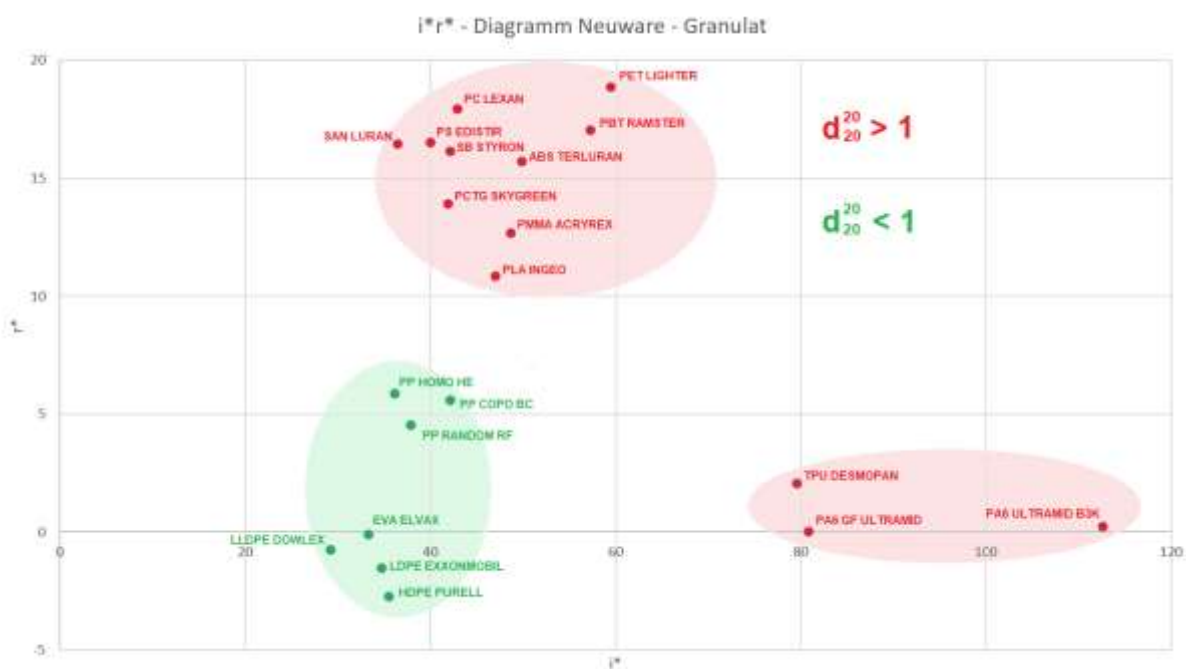
Bei der Darstellung der Messwerte in den einzelnen Diagrammen (i^*r^* -, N^*i^* - sowie N^*r^* -Diagramm) ist eine Anhäufung der Kunststoffgranulate mit einem spezifischen Gewicht unterhalb von 1 innerhalb eines gewissen Sektors festzustellen, hingegen befinden sich Neuware-Pellets mit einer Wichte oberhalb von 1 außerhalb dieses Bereiches. Ferner kann dem i^*r^* -Diagramm entnommen werden, dass sich die PP-Typen innerhalb der spezifischen Dichte von <1 im oberen Teil des grün markierten Bereichs des i^*r^* -Diagramms befinden, während der LLDPE-, LDPE-, HDPE- sowie EVA-Typ im unteren grün markierten Bereich zu finden sind. Bei den Neuware-Granulaten mit einer spezifischen Dichte von >1 kann eine Gruppierung der PA6-Typen inkl. TPU beobachtet werden. Im N^*i^* - sowie im N^*r^* -Diagramm ist zudem zu sehen, dass auch der N^* -Wert dieser Granulat-Typen weit unterhalb der Werte der restlichen Granulat-Typen liegt. Diese Untergruppe erscheint im NIR-Bereich somit dunkler im Vergleich zu den anderen Typen. Im Folgenden wurden die einzelnen Granulate tabellarisch in verschiedene Gruppen unterteilt:

Hoher i^* - Wert (> 70):	Hoher r^* - Wert (>10):	Niedriger i^* - (<50) und niedriger r^* - Wert (<10):
TPU DESMOPAN	PET LIGHTER	PP HOMO HE
PA6 GF ULTRAMID	PC LEXAN	PP COPD BC
PA6 ULTRAMID B3K	PBT RAMSTER	PP RANDOM RF
	PS EDISTIR	EVA ELVAX
	SAN LURAN	LDPE DOWLEX
	SB STYRON	LDPE EXXONMOBIL
	ABS TERLURAN	HDPE PURELL
	PCTG SKYGREEN	
	PMMA ACRYREX	
	PLA INGEO	
Niedriger N^* - Wert (<55): Hoher N^* - Wert (>75):		
TPU DESMOPAN	PET LIGHTER	
PA6 GF ULTRAMID	PBT RAMSTER	
PA6 GF ULTRAMID	SAN LURAN	
	SB STYRON	

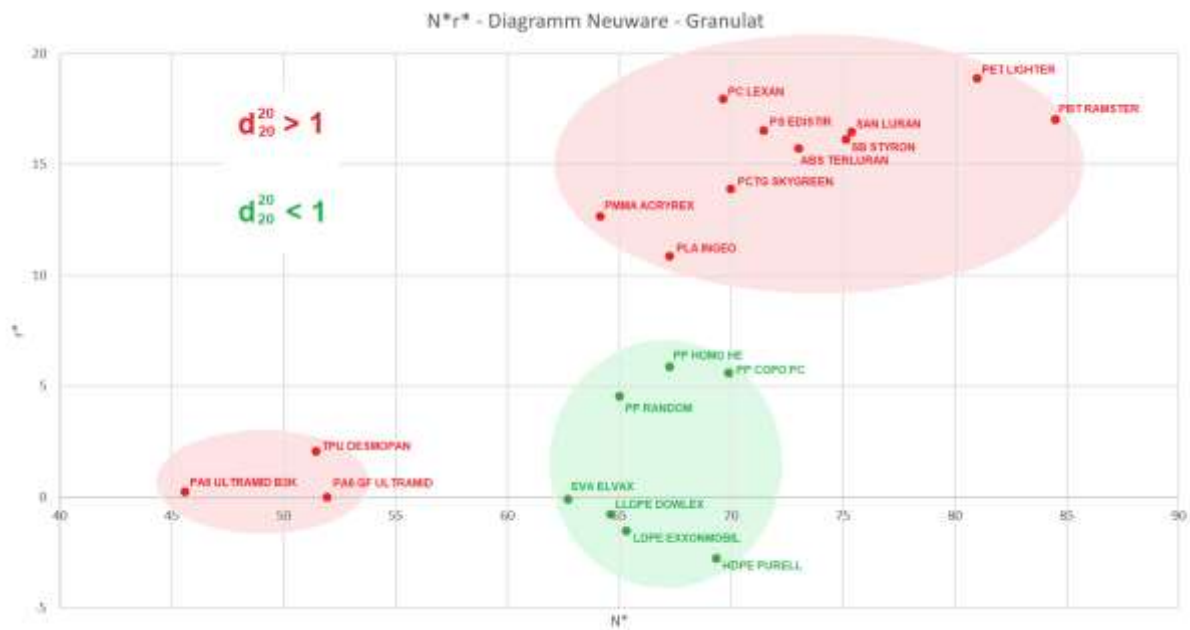
Es sollte noch hinzugefügt werden, dass es sich bei den Neuware-Granulat-Proben teilweise um klare, d.h. optisch im visuellen Wellenlängenbereich sehr transparente Artikel handelt. Transparente Materialien neigen dabei weniger zu diffuser Rückstreuung, wodurch bei diesen Proben eine eher geringere Signalstärke (N^*) zu beobachten sein sollte. Bei den gemessenen Proben handelt es sich dabei um folgende Typen:

SAN LURAN, PC LEXAN, PCTG SKYGREEN, TPU DESMOPAN, PMMA ACRYREX, EVA ELVAX, PS EDISTIR, LDPE DOWLEX

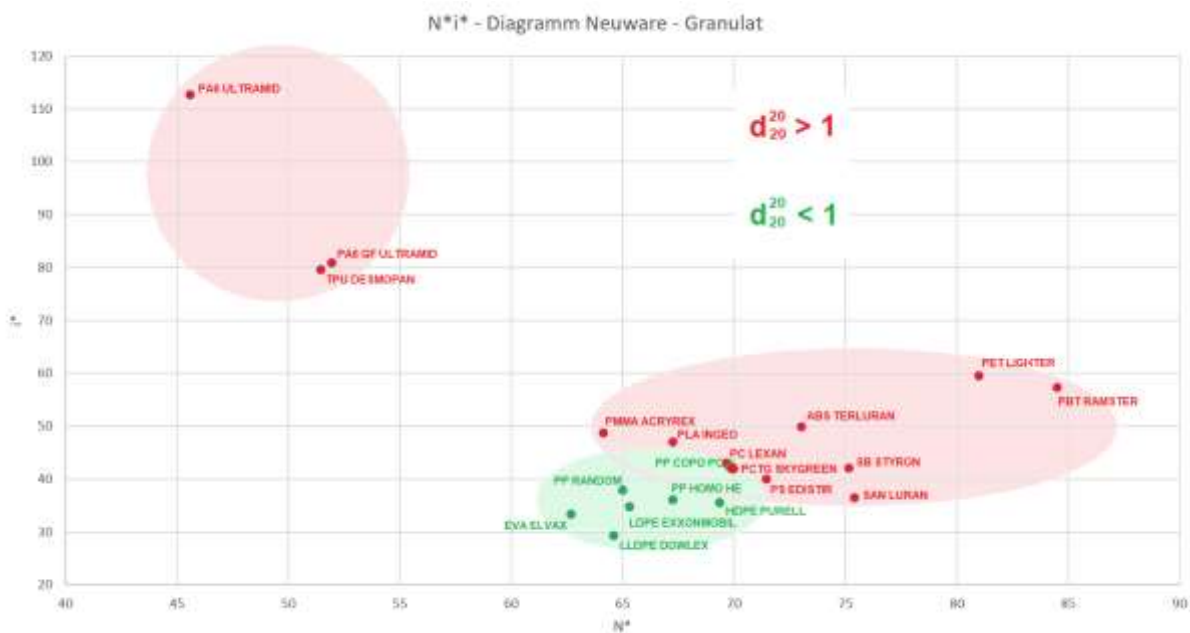
Da jedoch zwischen dem visuell transparenten Erscheinungsbild der Granulat-Proben und dem N^* -Wert kein direkter Zusammenhang festzustellen ist, kann man davon ausgehen, dass sich das optisch transparente Verhalten dieser Materialien in erster Linie auf den visuellen Wellenlängenbereich beschränkt.



Im oben gezeigten i^*r^* -Diagramm ist die Einteilung der gemessenen Neuware-Granulat-Proben in den einzelnen Gruppen dargestellt (farblich hinterlegt). Insbesondere die grüne Gruppe könnte nochmals unterteilt werden, in eine Untergruppe mit einem r^* -Wert <2 und in eine Gruppe der Polyethylene inkl. dem Copolymer Ethylen-Vinylacetat mit einem r^* -Wert >2 in eine Gruppe der Polypropylene. Im i^* -Wert ist auch ein leichter Unterschied in den beiden Untergruppen zu sehen: PP-Gruppe: $i^* > 36$ und für die PE/EVA-Gruppe: $i^* < 36$.



Auch im N*i*-Diagramm ist die Gruppenbildung recht gut zu sehen. Polyurethane und Polyamide absorbieren NIR-Licht anscheinend stärker als andere Kunststoffarten, bei zumindest im sichtbaren Wellenlängenbereich als hell erscheinende Oberflächen.



N*i*-Diagramm



3. Untersuchung verschiedener Rezyklate in Hinblick auf die Kunststoffart mittels NIR-Technologie

Bei nahezu 70 verschiedenen Rezyklaten wurde das NIR-Absorptionsverhalten untersucht:





3.1 Messergebnisse mit dem SPECTRO-T-3-60-NIR/NIR-D20

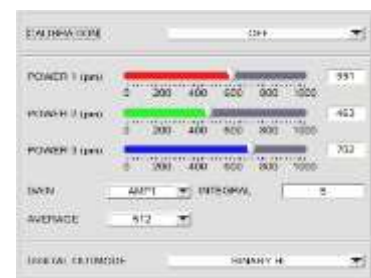
3.1.1 Die kompakte Messvorrichtung



Zur Ermittlung der $N^*i^*r^*$ -Werte wird ebenfalls die kompakte Messvorrichtung verwendet (das Fassungsvermögen der Pellets-Schalen beträgt in etwa 0,1 Liter), da auch hier für die Untersuchung der Proben nicht ausreichend Material zur Nutzung des Laborgerätes mit dem großen Trichter vorhanden war (ca. 2-3 Liter an Rezyklat-Material je Probe wären dabei sinnvoll). Zur Ermittlung eines Durchschnittswertes und um eine Abhängigkeit des Messergebnisses von der zufälligen Lage der Pellets im Erfassungsbereich des Messgerätes weitestgehend zu vermeiden, ist es empfehlenswert, die Pellets-Schale während des Messvorgangs in der Messvorrichtung zu bewegen. Die Dauer der Messung kann in der Windows®-PC-Software eingestellt werden.

3.1.2 Referenzieren des Sensors

Hierzu wird ebenfalls die Aluminiumplatte (Referenzoberfläche) eingesetzt und folglich werden dieselben Einstellparameter verwendet. Der Average-Wert hat hierbei keinerlei Einfluss auf die Signalhöhen und kann auch entsprechend auf 16384 angehoben werden. Lediglich die Scanzzeit sowie die Messgenauigkeit wird dadurch erhöht.



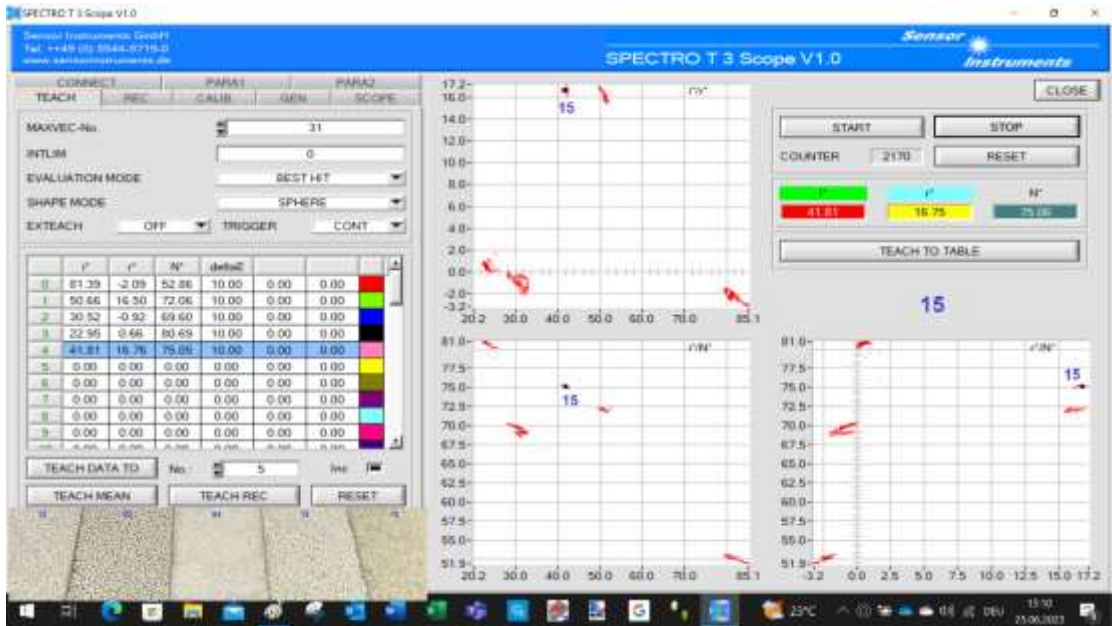
3.1.3 Ermittlung der $N^*i^*r^*$ -Messwerte

Die knapp 70 Rezyklat-Proben werden dabei jeweils in 5er-Gruppen zusammengefasst, damit die graphische Darstellung in der GUI nicht zu unübersichtlich wird.

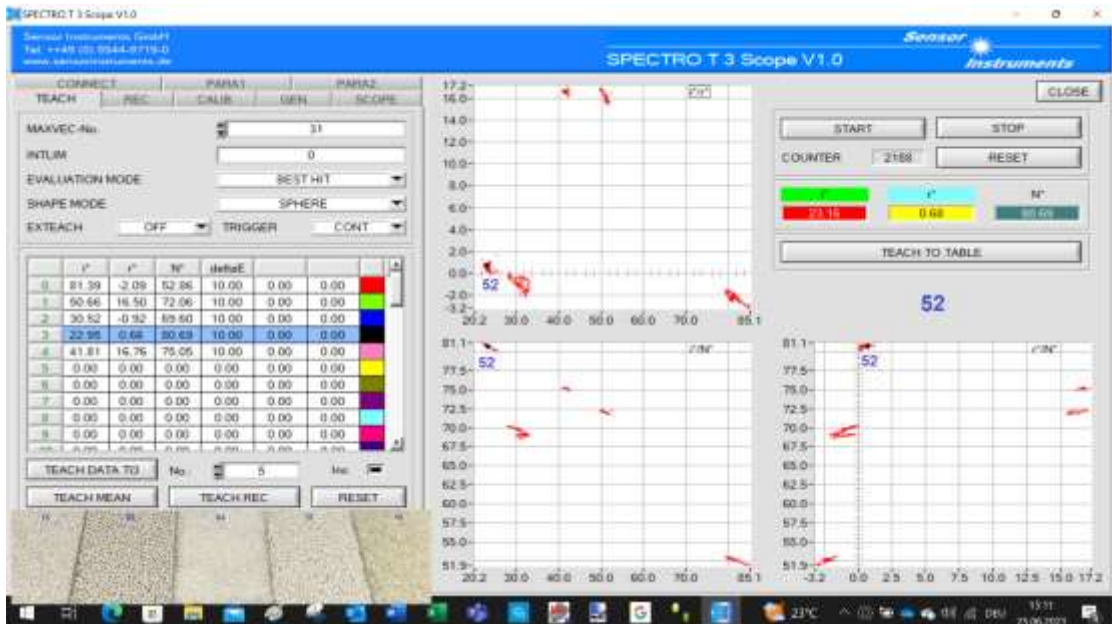
1. Quintett

- a) 10 Beige-Weiß semitransparent PO, Wichte <1
- b) 18 Weiß PET, Wichte >1
- c) 64 Weiß semitransparent, Wichte <1
- d) 52 Beige, Wichte >1
- e) 15 Weiß PET, Wichte >1

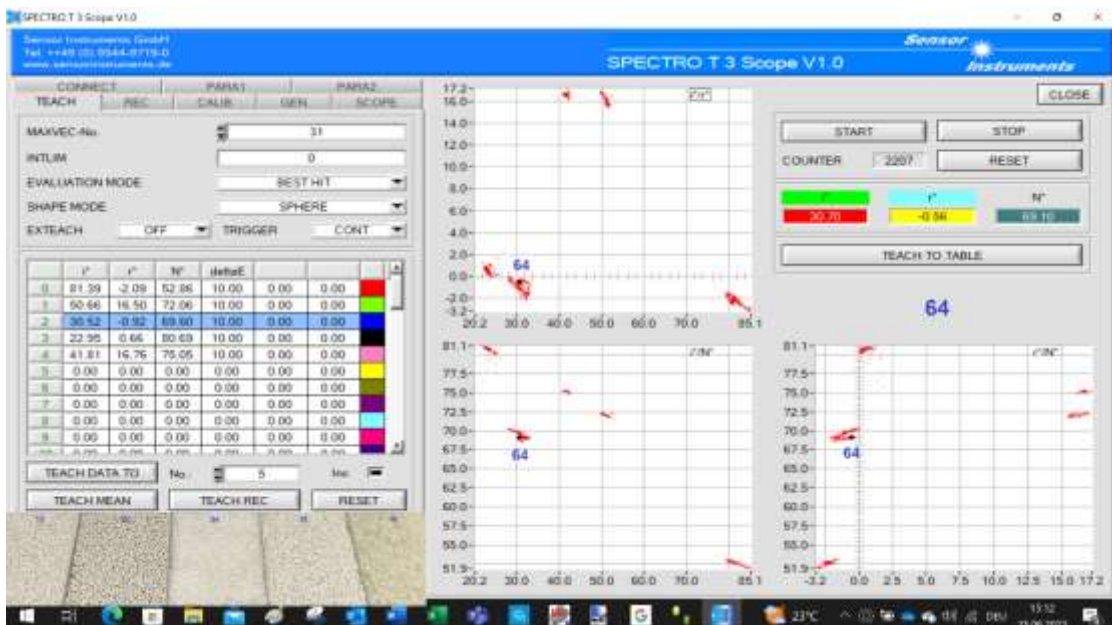




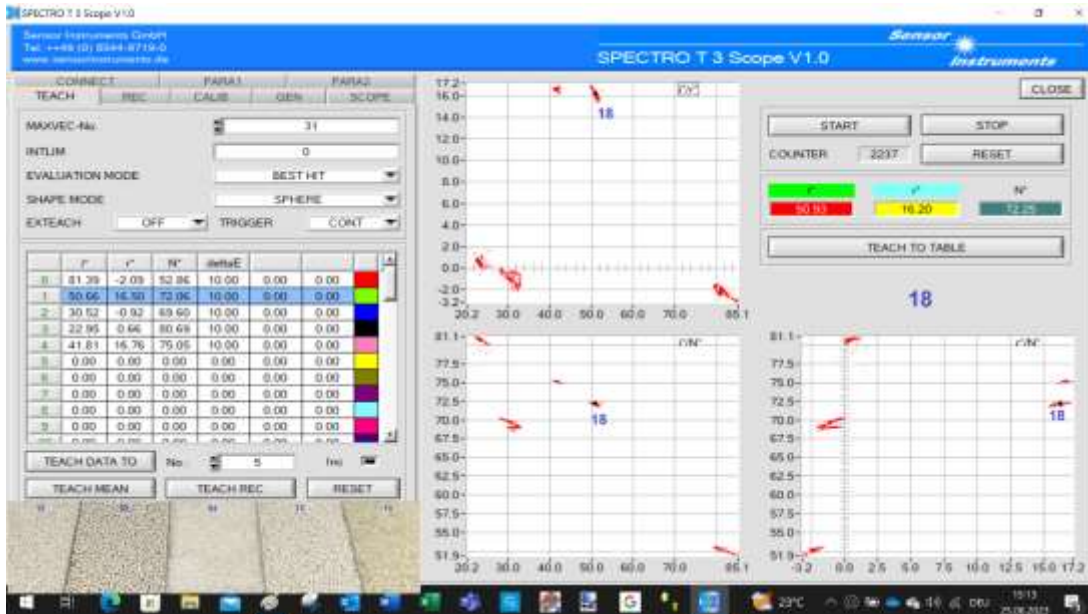
e)



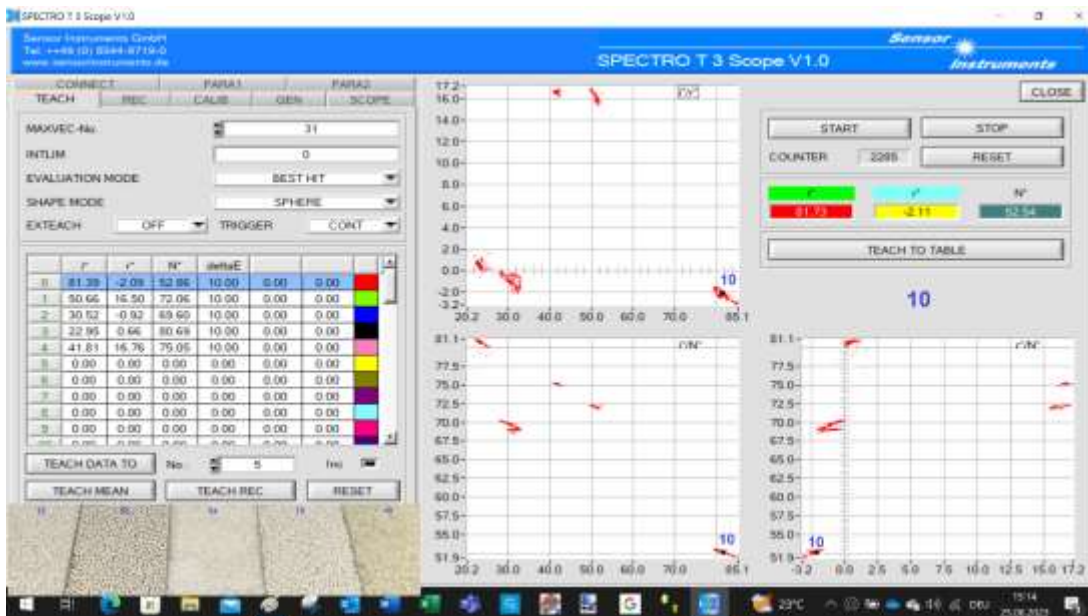
d)



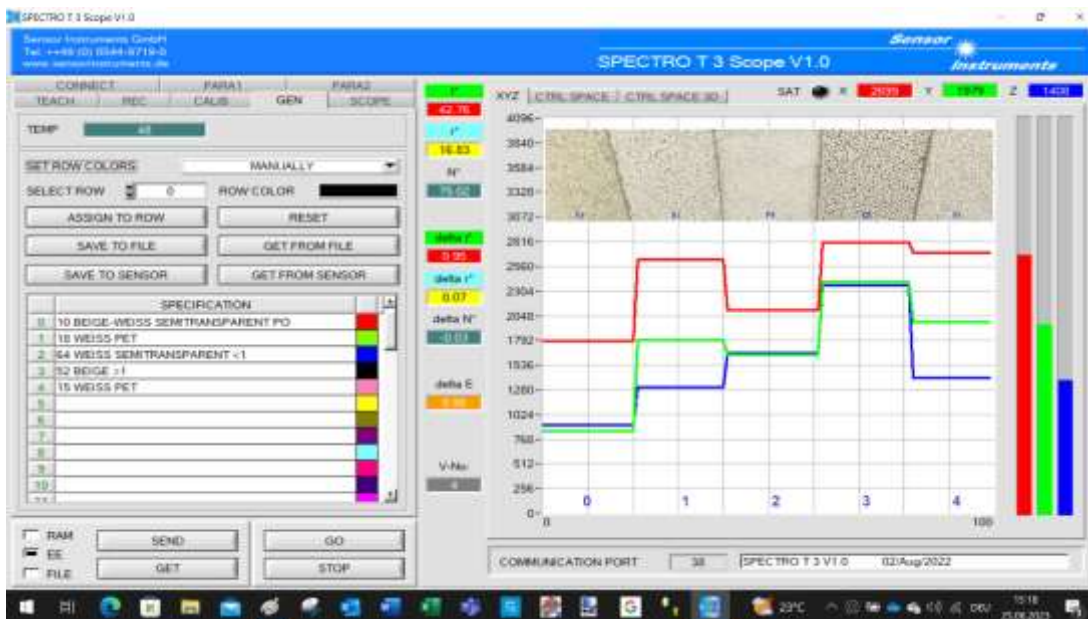
c)



b)

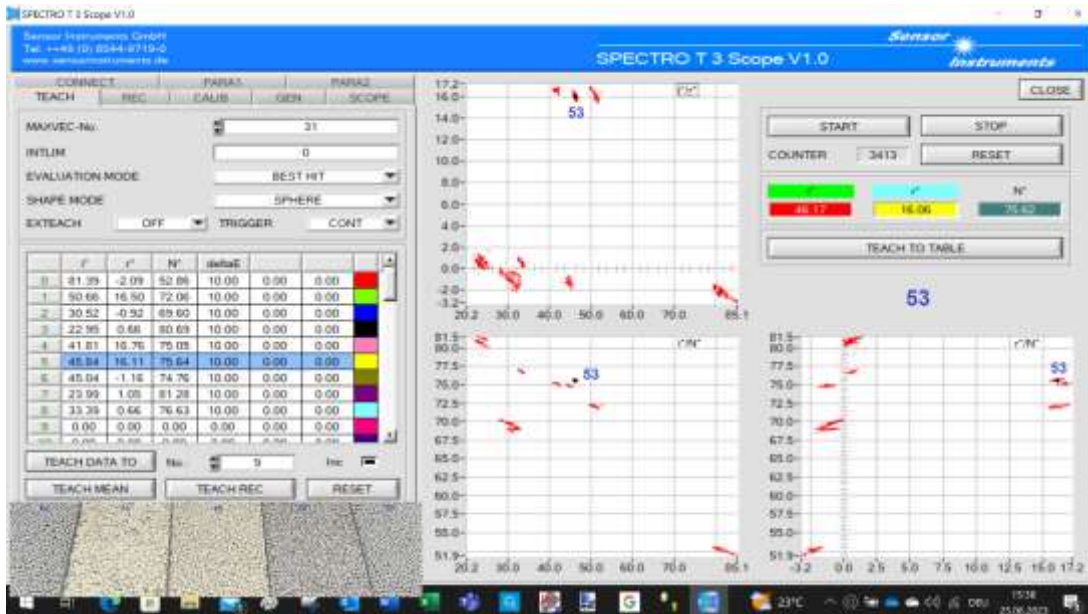
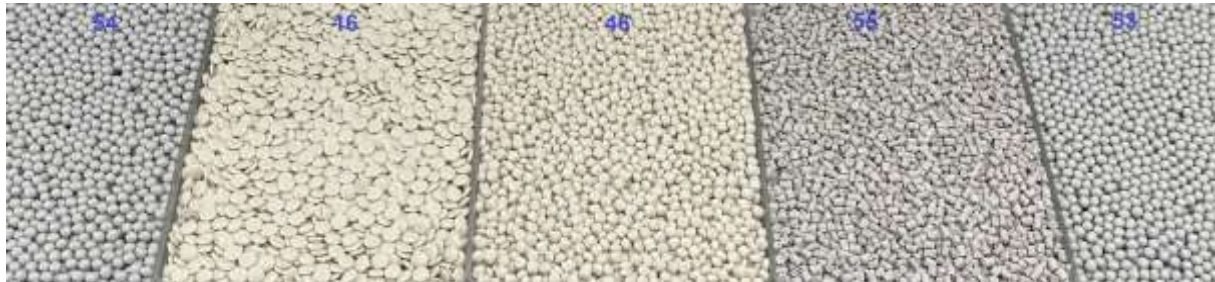


a)

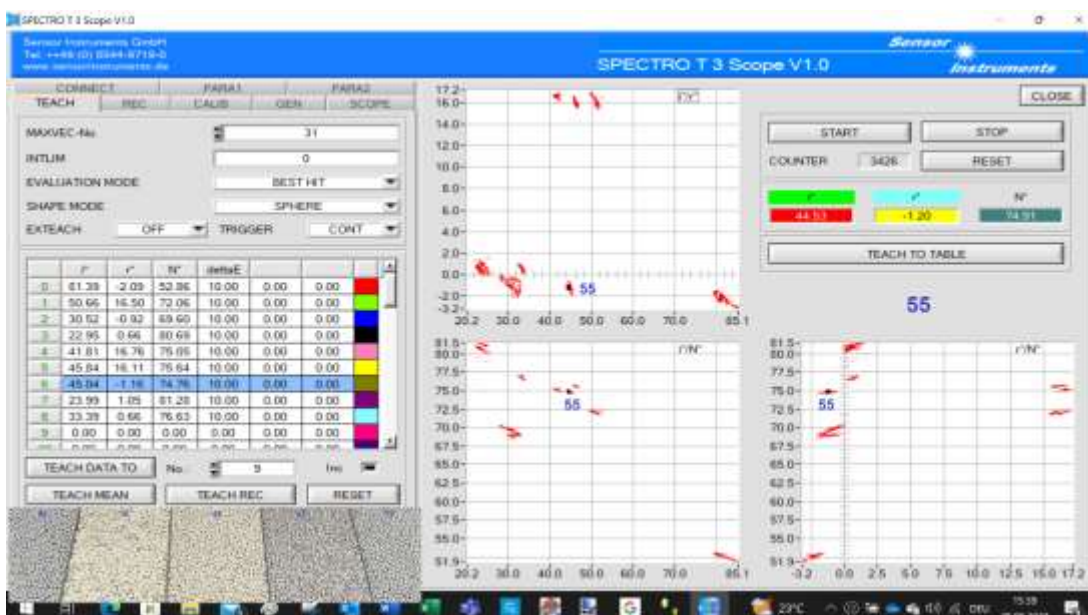


2. Quintett

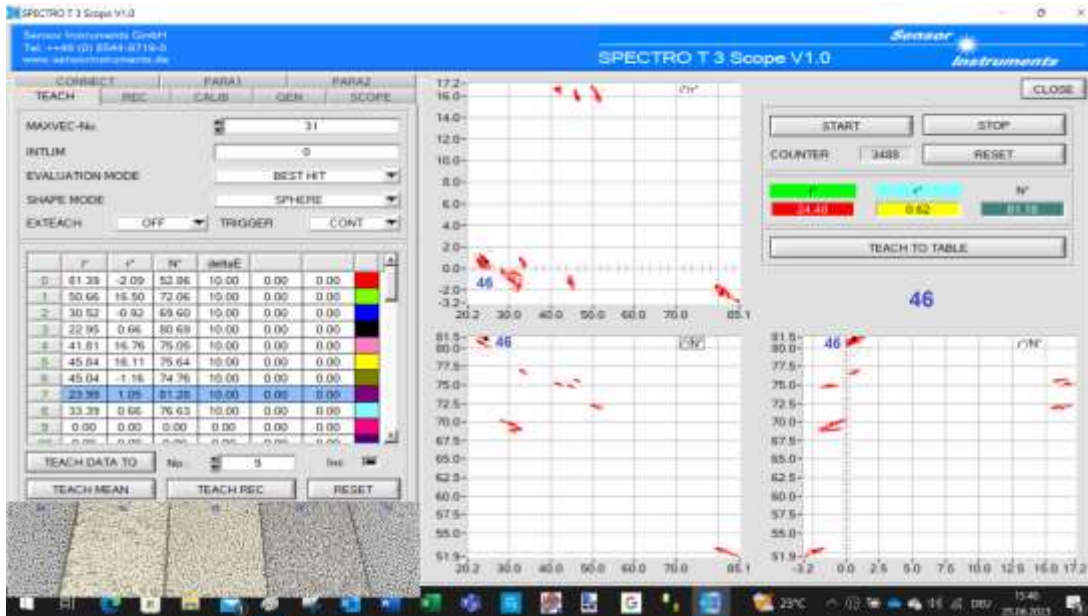
- f) 53 Grau PET, Wichte >1
- g) 55 Grau-Beige, Wichte >1
- h) 46 Hellbeige, Wichte <1
- i) 16 Hellbeige PO, Wichte <1
- j) 54 Grau PET, Wichte >1



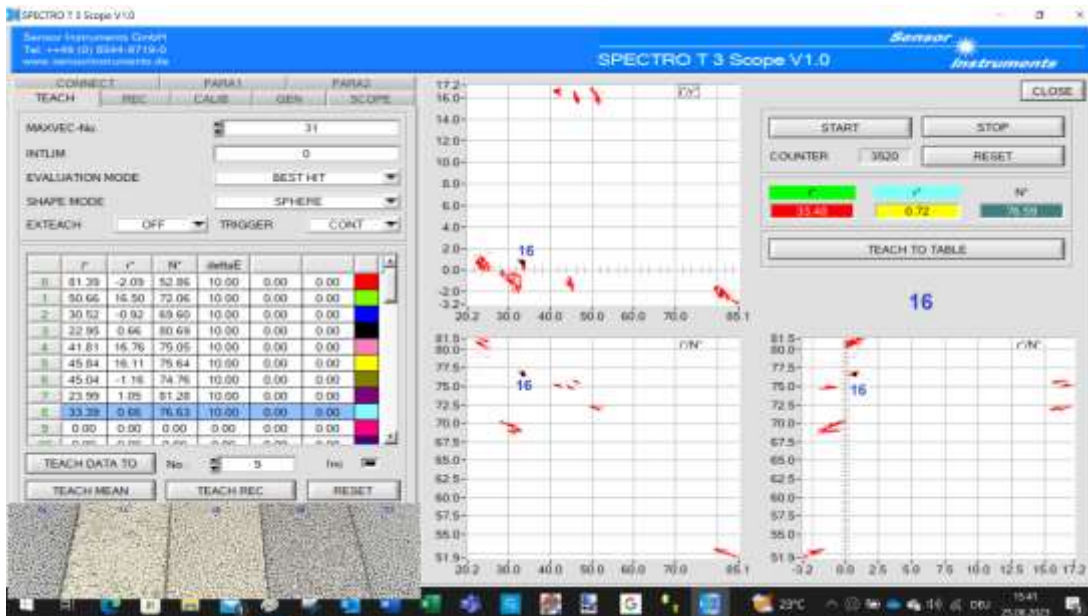
f)



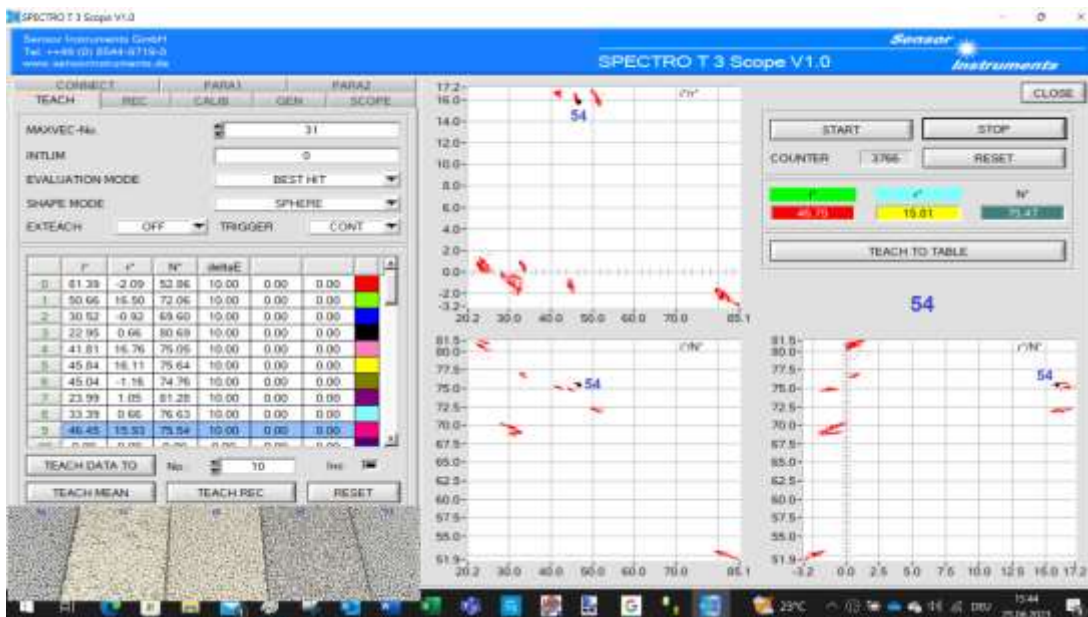
g)



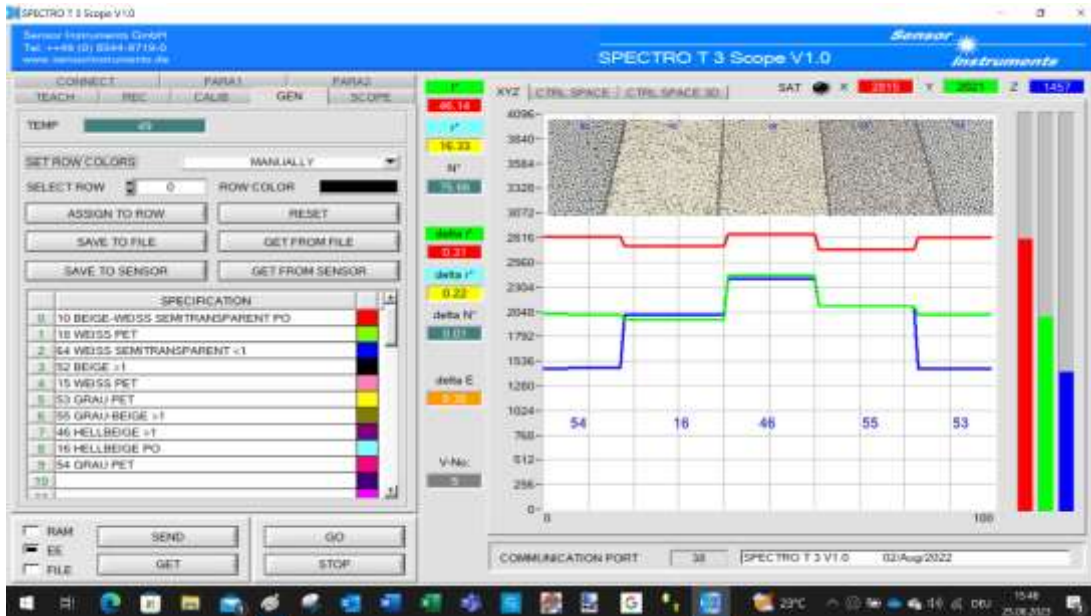
h)



i)

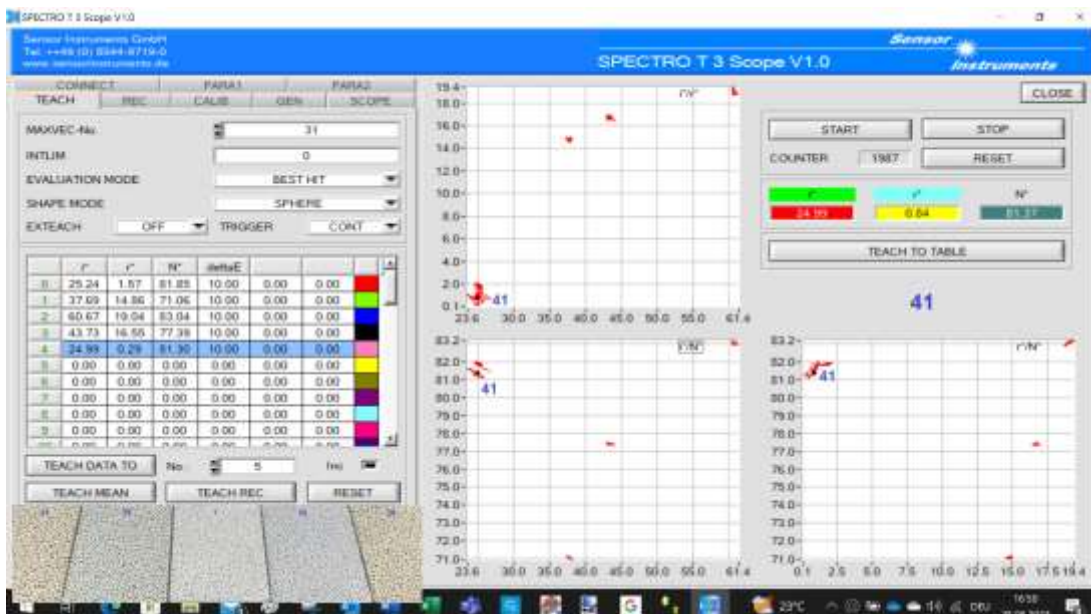
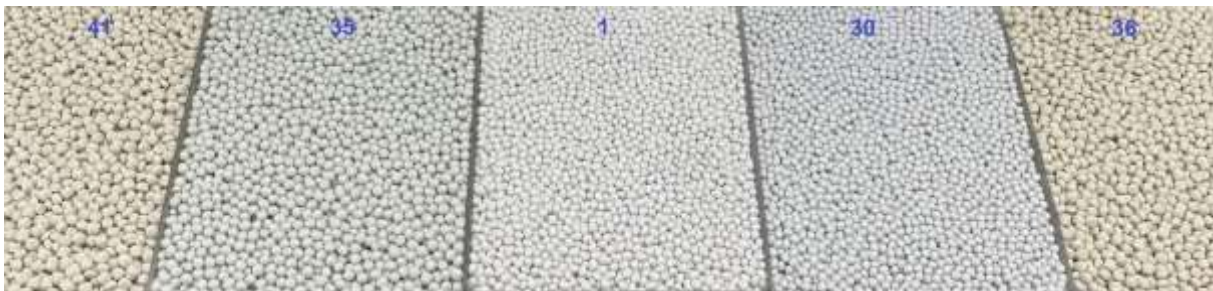
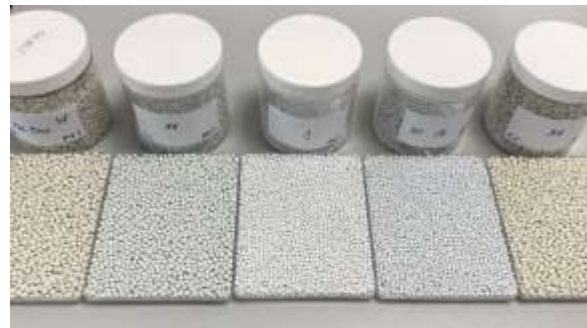


j)

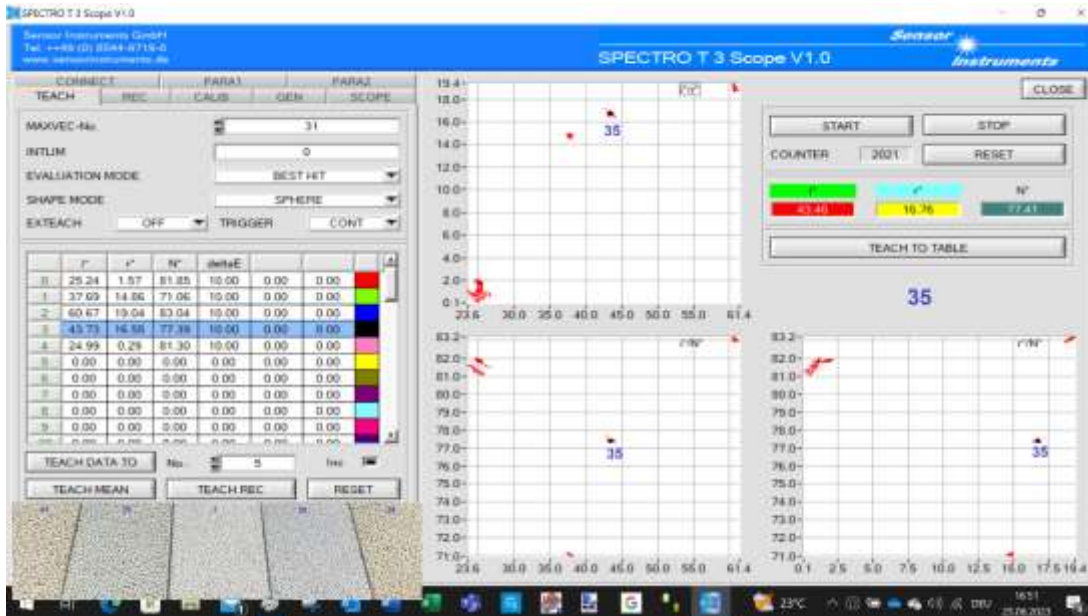


3. Quintett

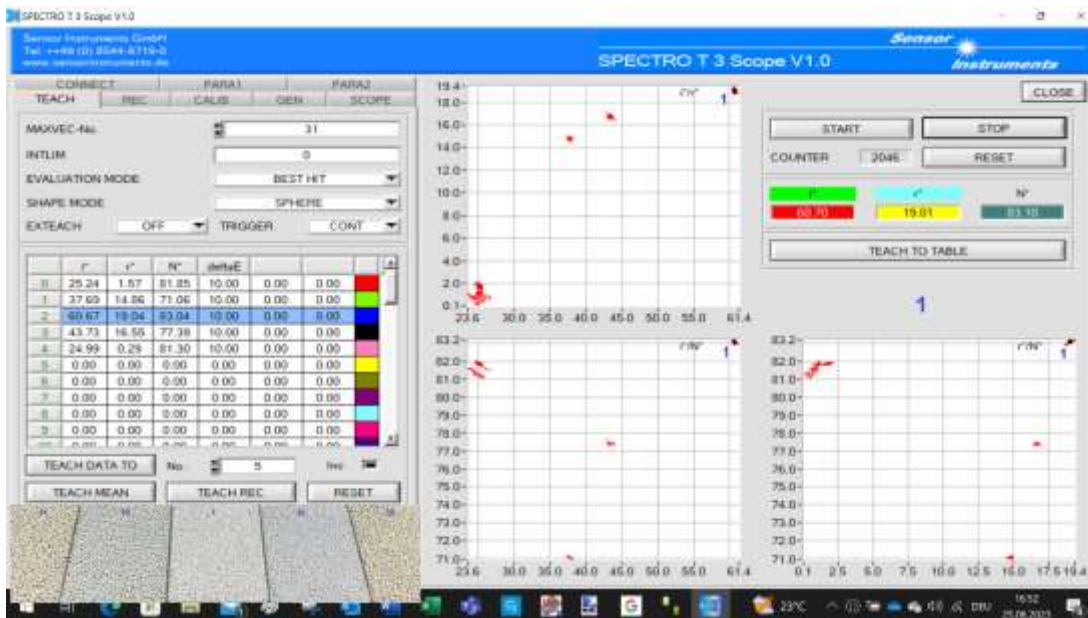
- k) 36 Beige, Wichte <1
- l) 30 Hellblau, Wichte >1
- m) 1 Weiß PET, Wichte >1
- n) 35 Hellgrünblau, Wichte >1
- o) 41 Beige, Wichte <1



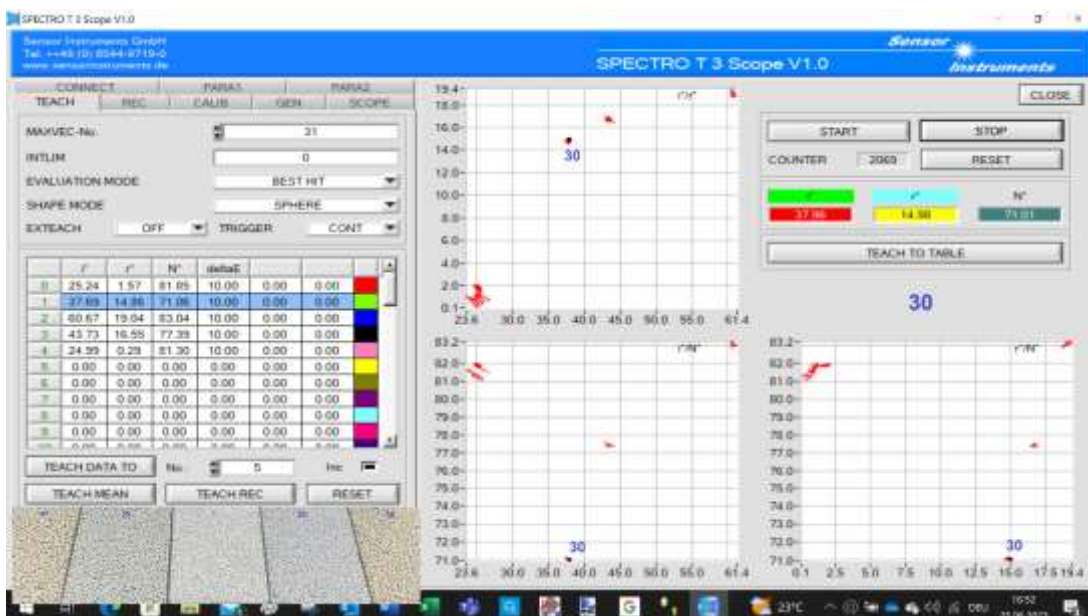
o)



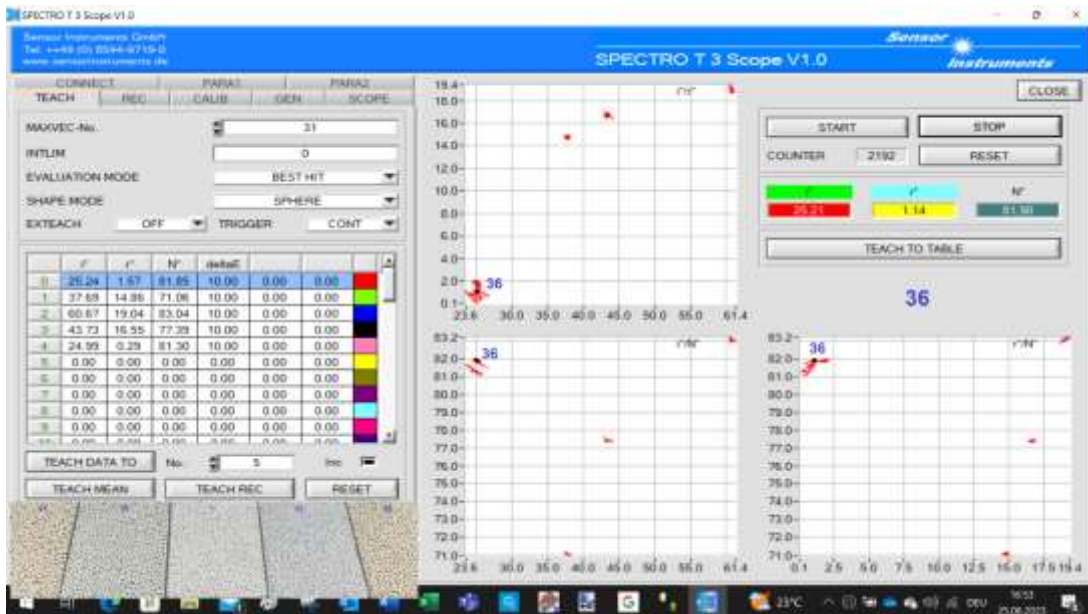
n)



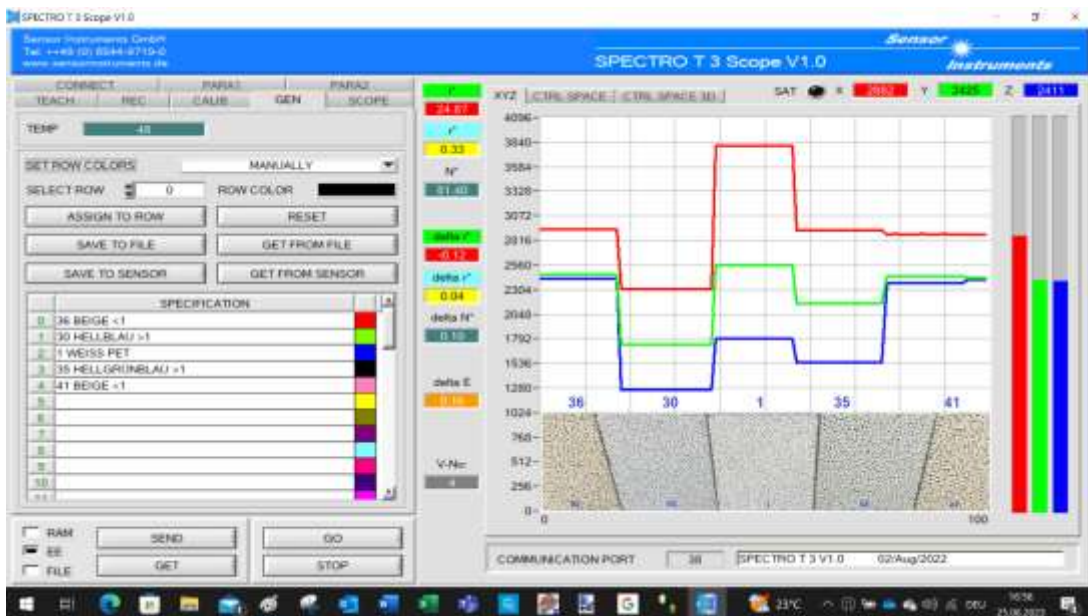
m)



l)



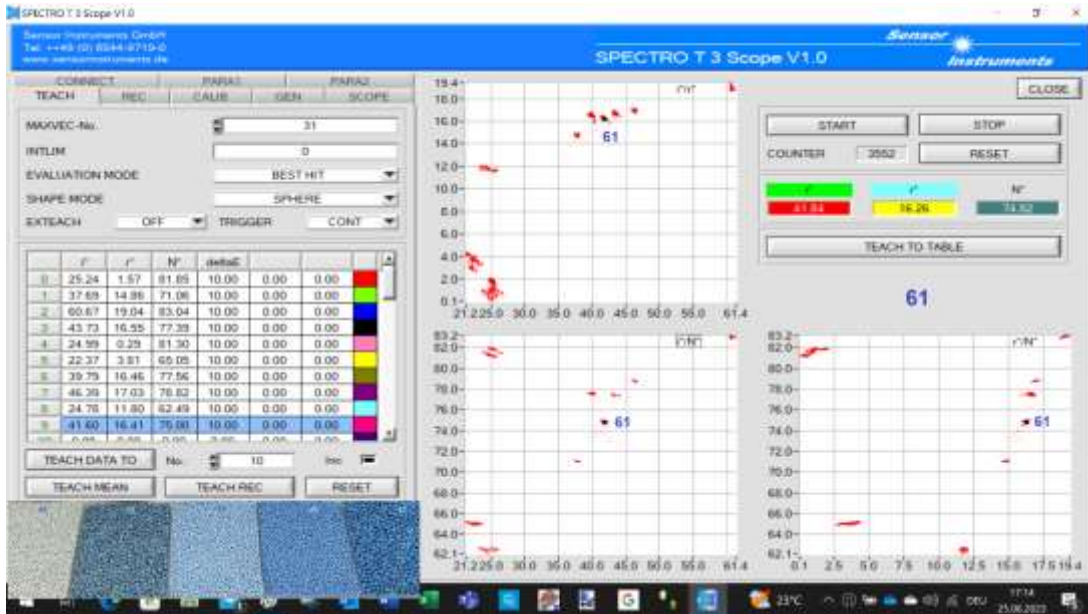
k)



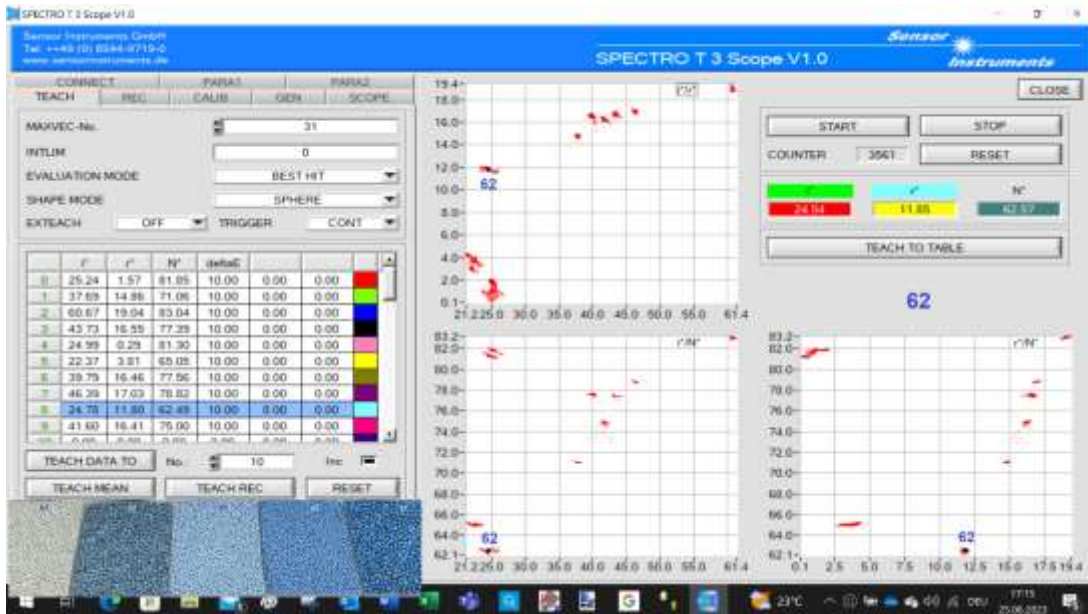
4. Quintett

- p) 38 Hellblau, Wichte <1
- q) 65 Hellblau PET, Wichte >1
- r) 17 Hellblau PET, Wichte >1
- s) 62 Graublau, Wichte >1
- t) 61 Hellblau Mix PET, Wichte >1

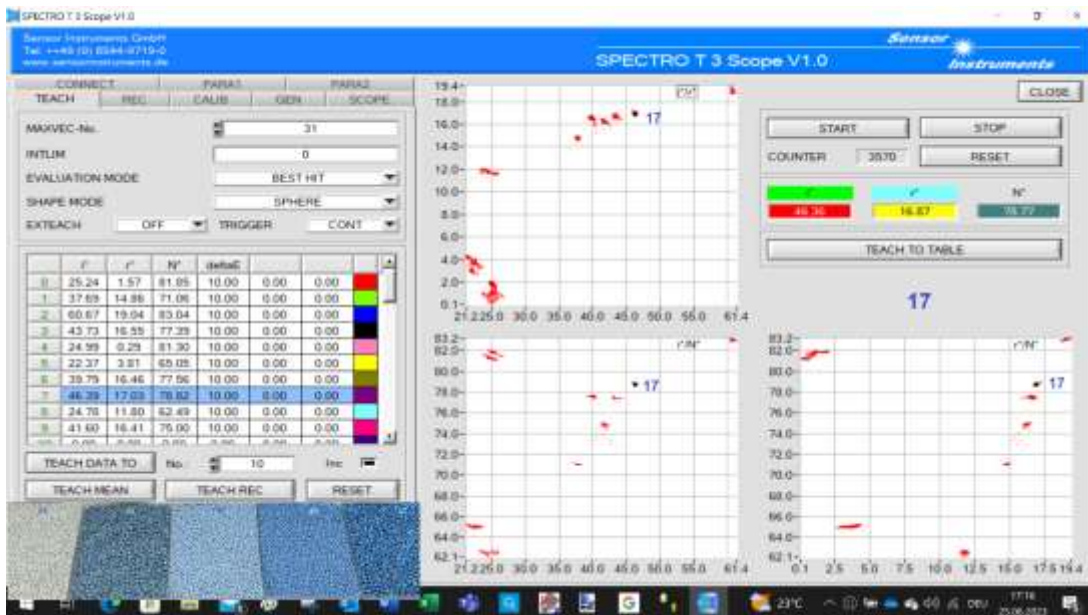




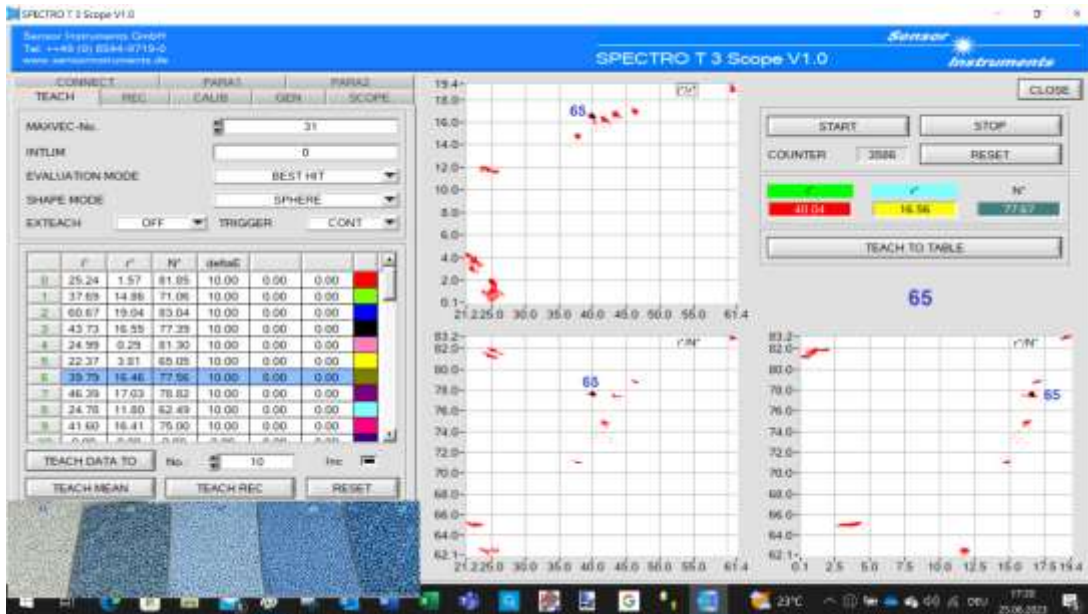
t)



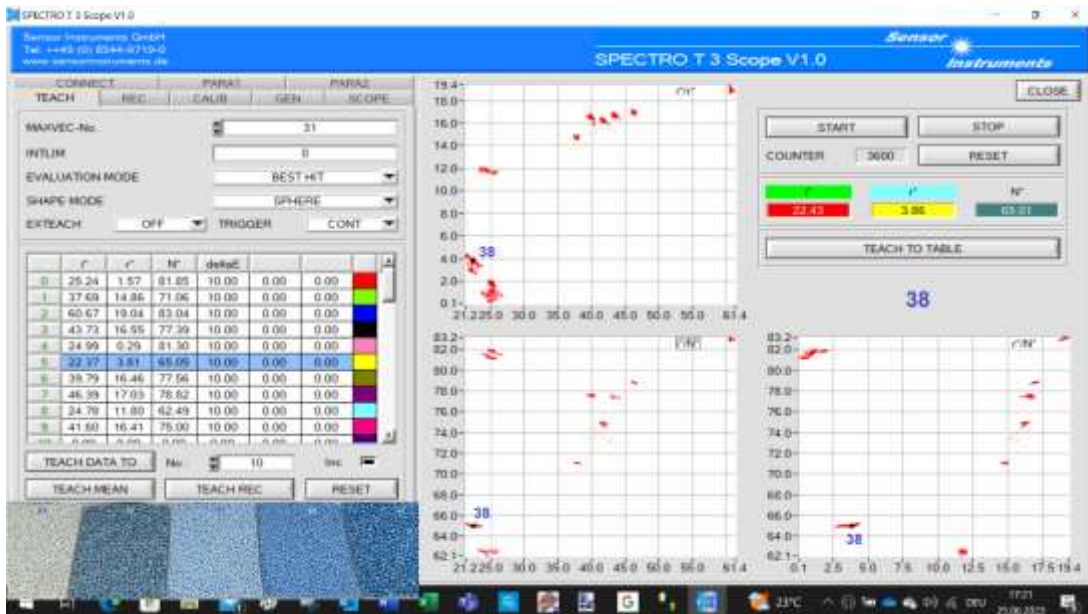
s)



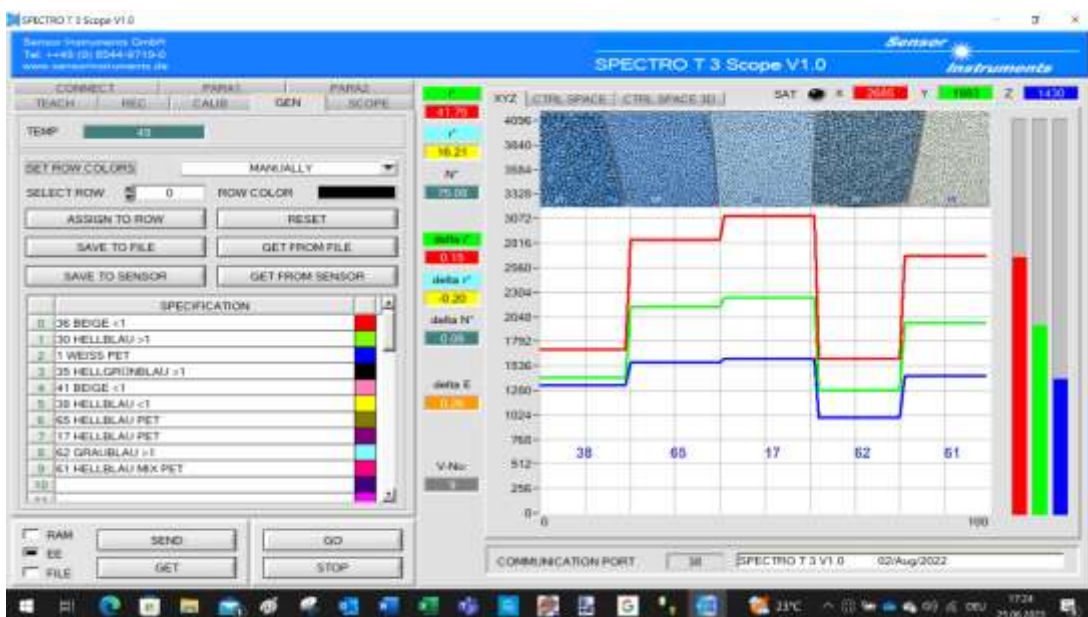
r)



q)



p)



5. Quintett

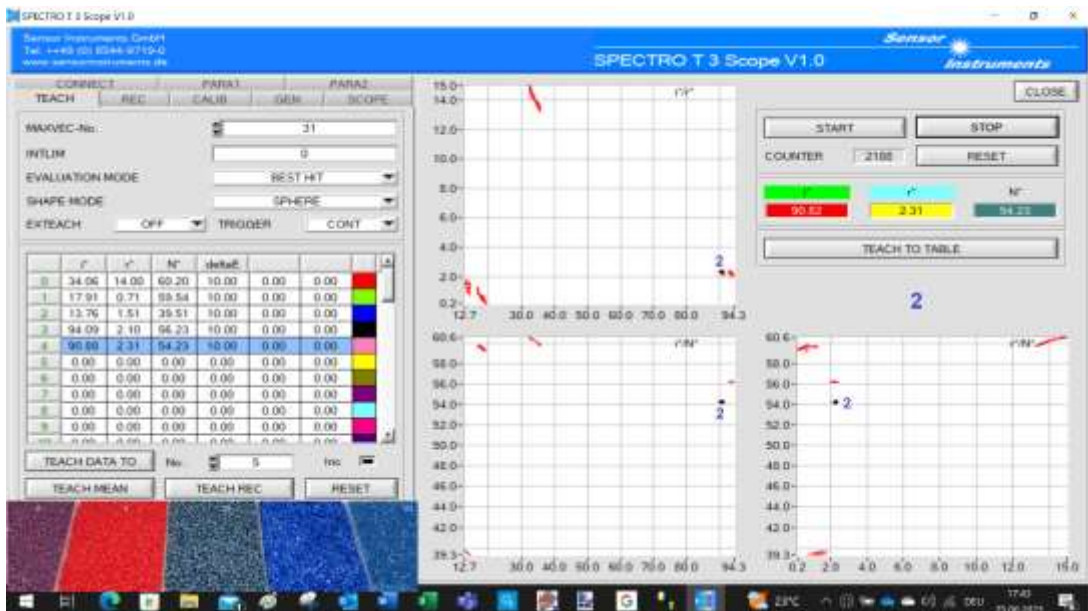
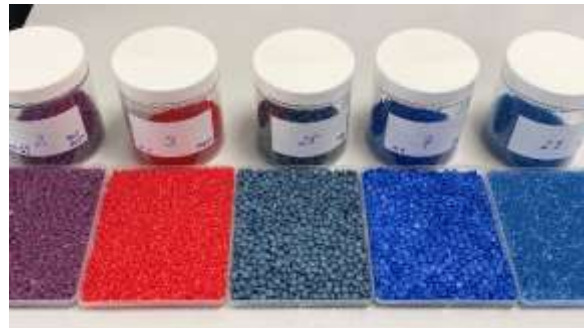
u) 23 Blau transparent, Wichte >1

v) 7 Blau PO, Wichte <1

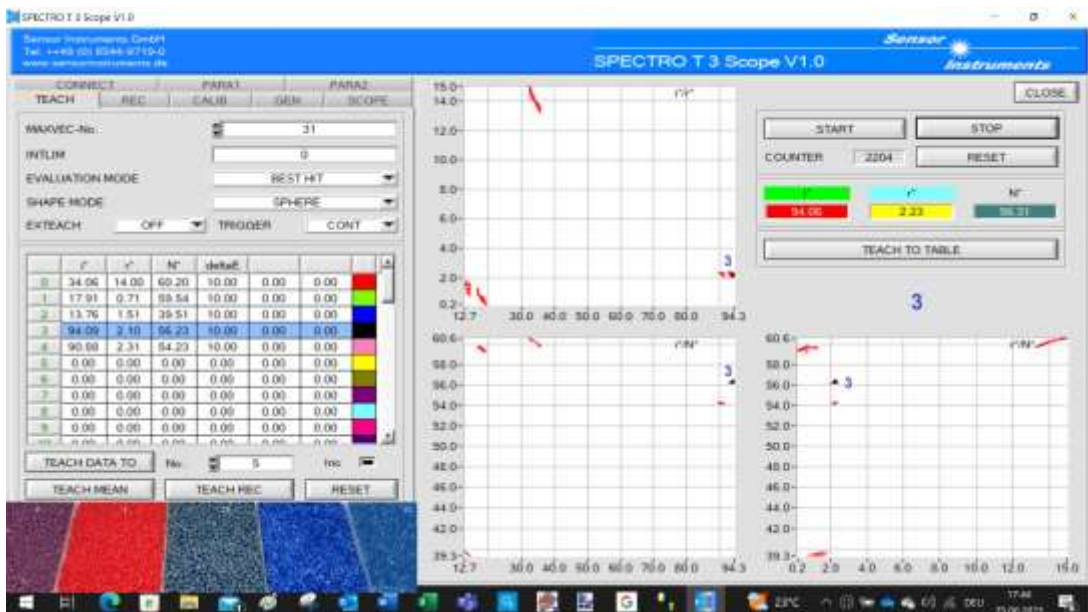
w) 25 Graublau PO, Wichte <1

x) 3 Rot, Wichte >1

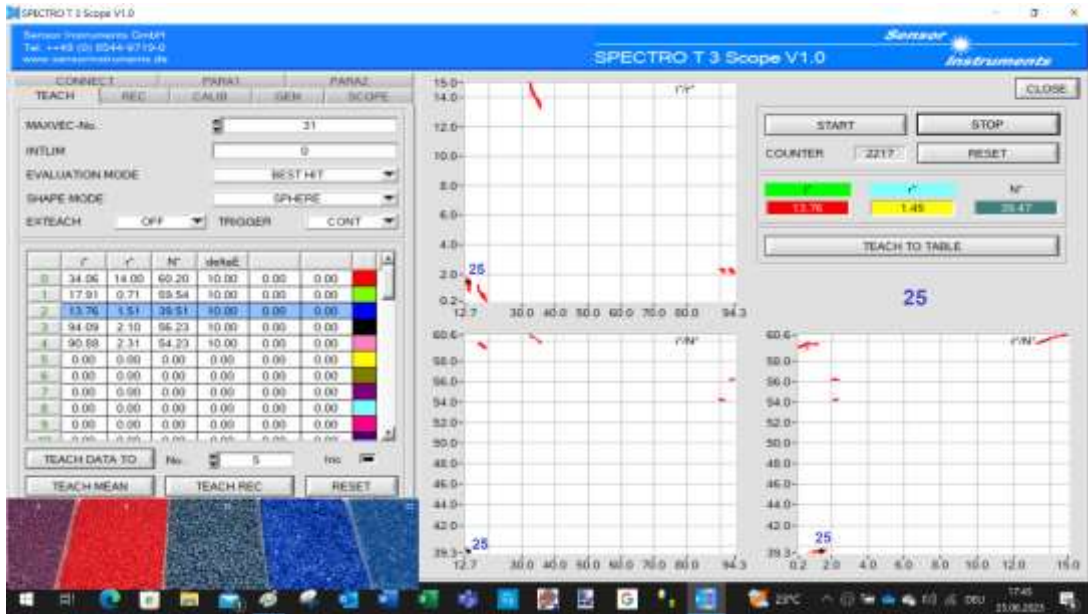
y) 2 Violett, Wichte >1



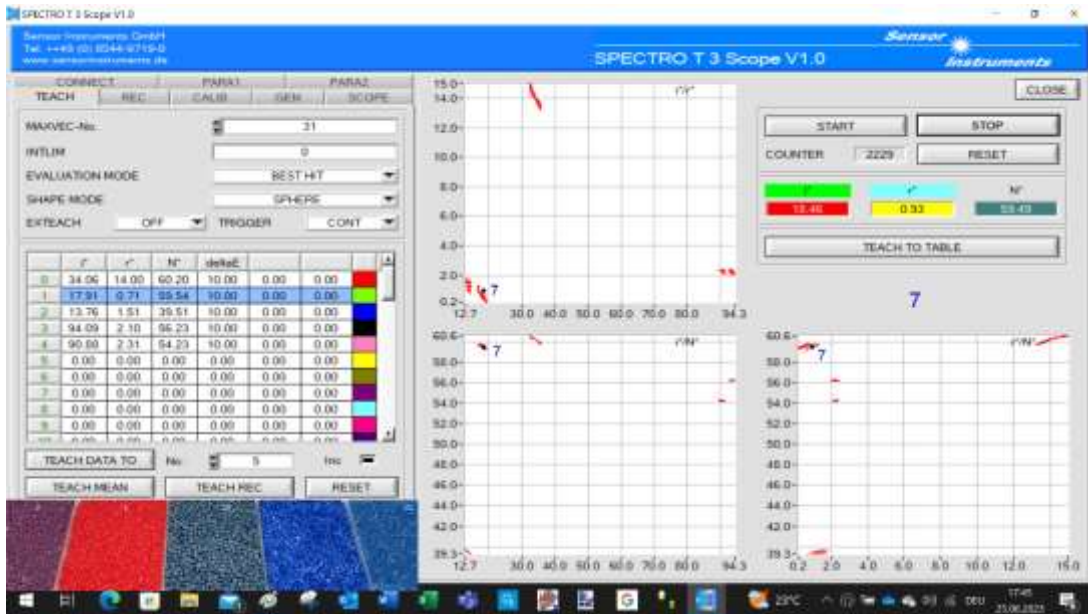
y)



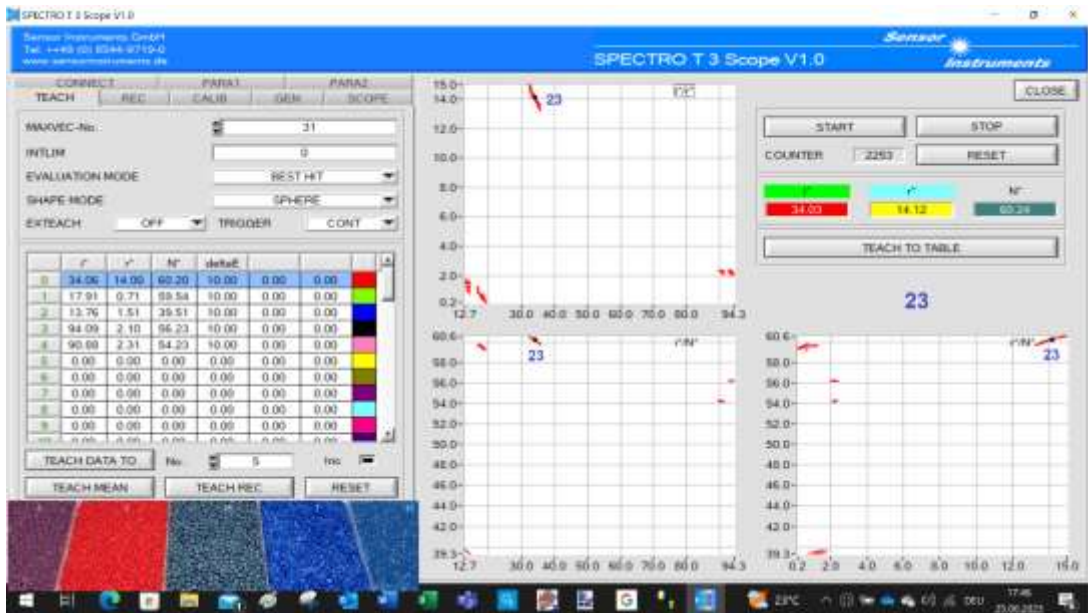
x)



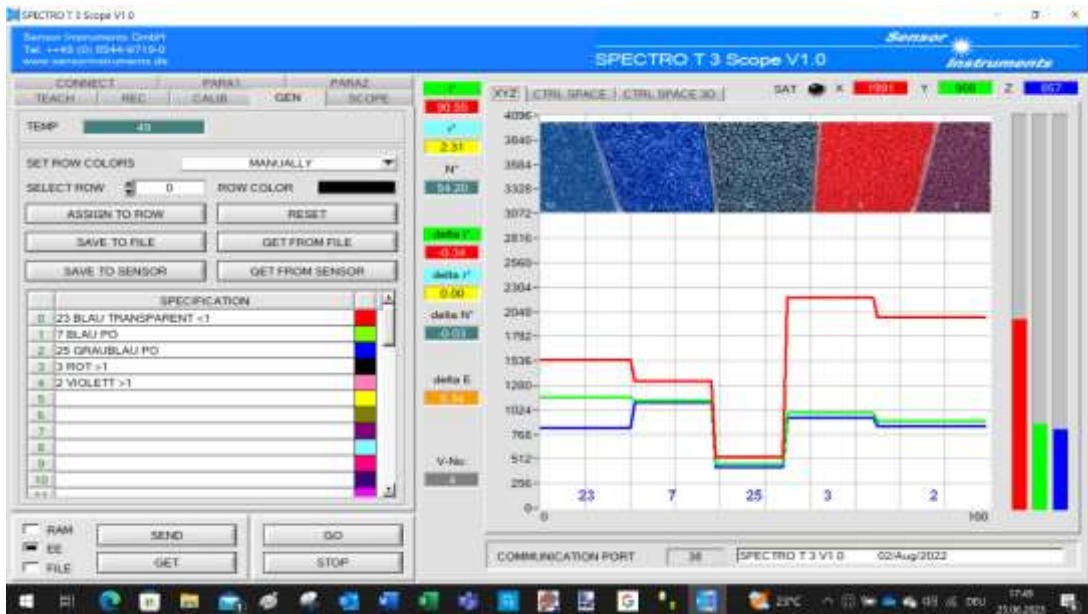
w)



v)



u)



6. Quintett

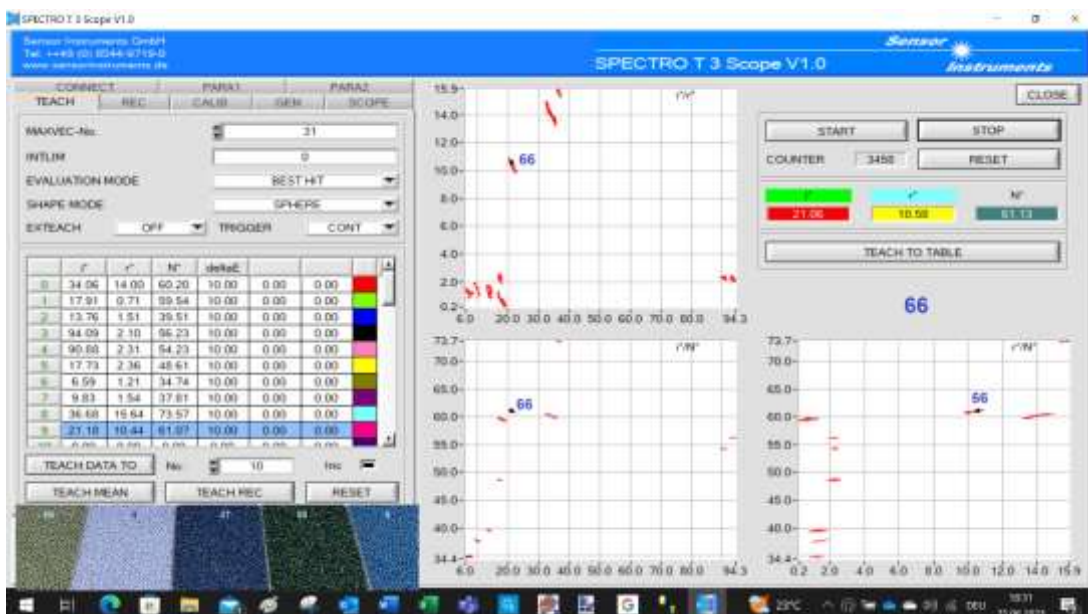
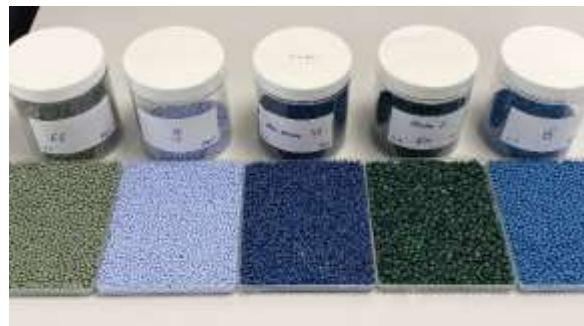
z) 6 Blau, Wichte <1

A) 50 Dunkelgrün, Wichte <1

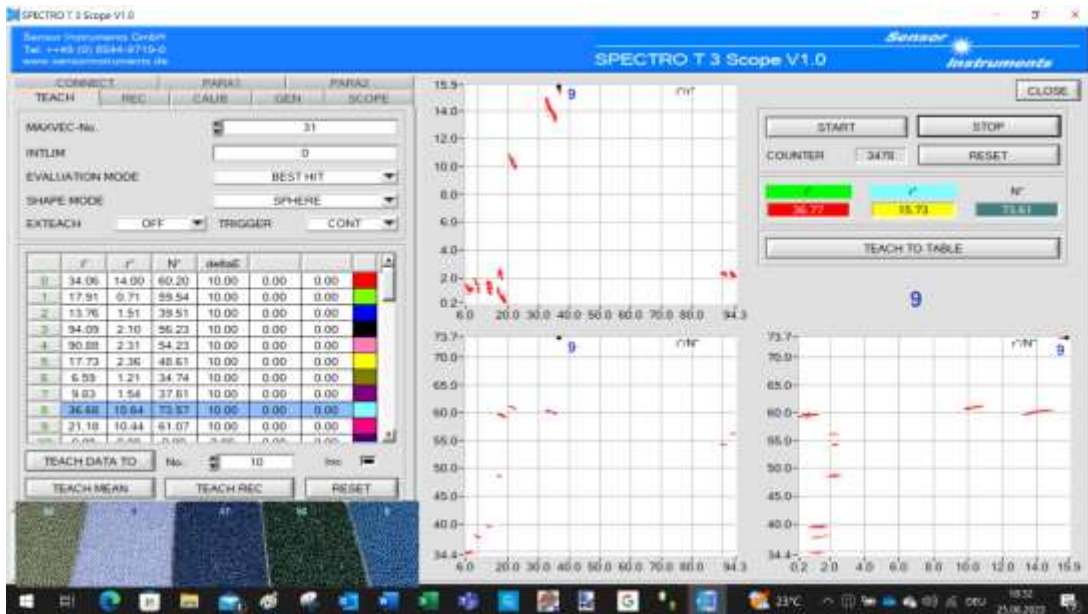
B) 47 Dunkelblau, Wichte <1

C) 9 Hellblau PET, Wichte >1

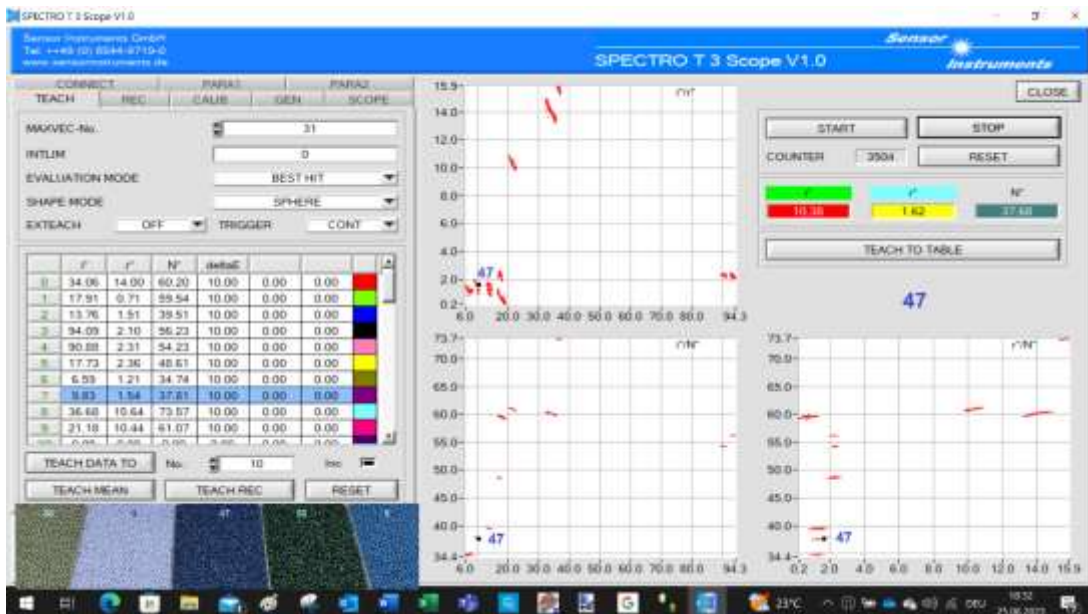
D) 66 Oliv, Wichte >1



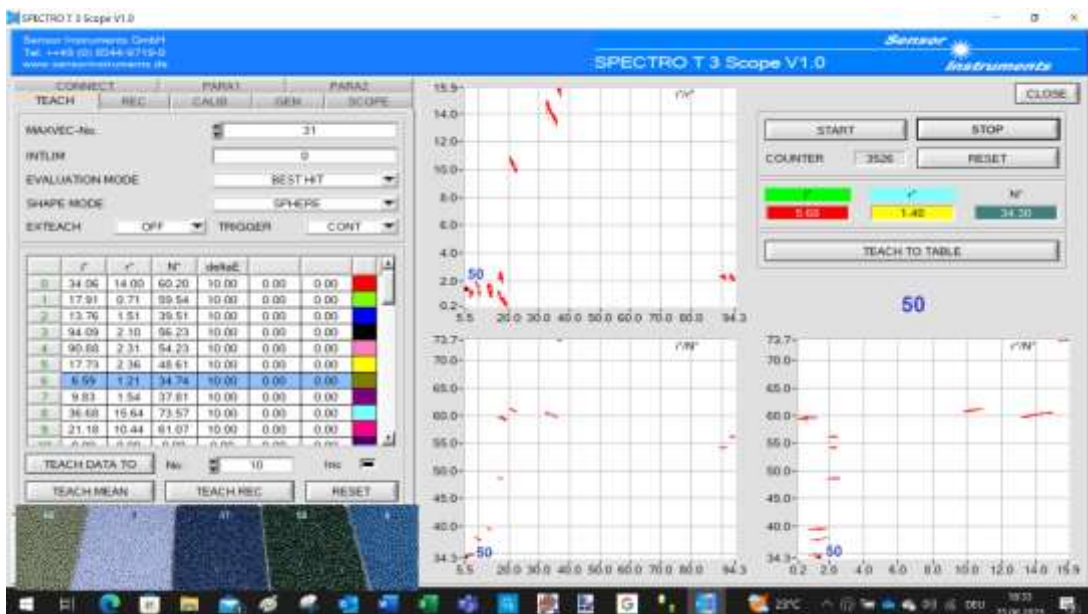
D)



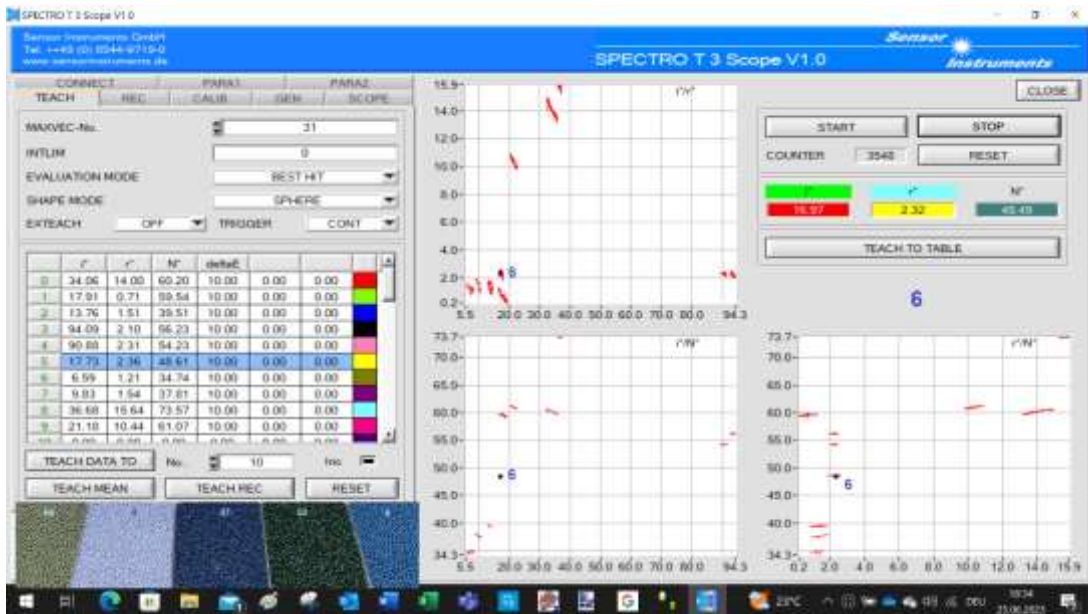
C)



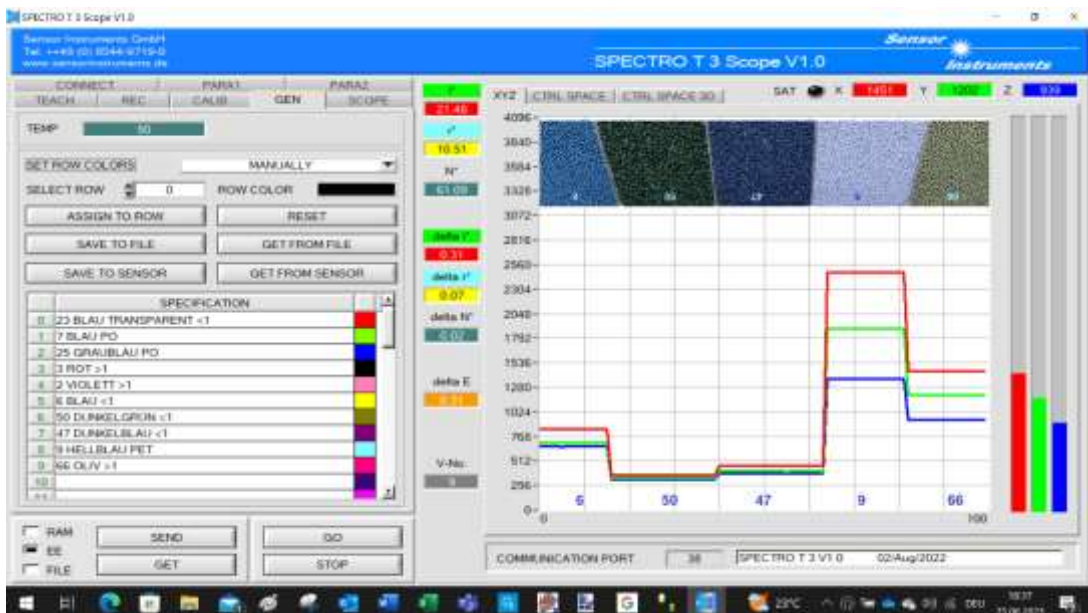
B)



A)



z)



7. Quintett

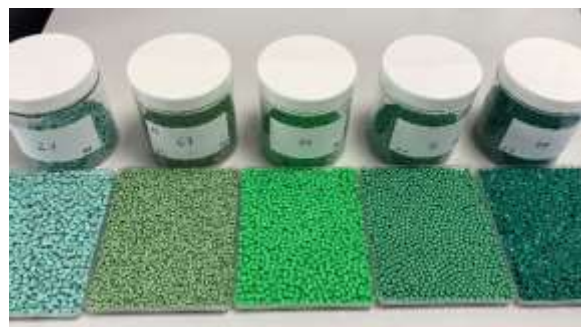
E) 44 Grün, Wichte <1

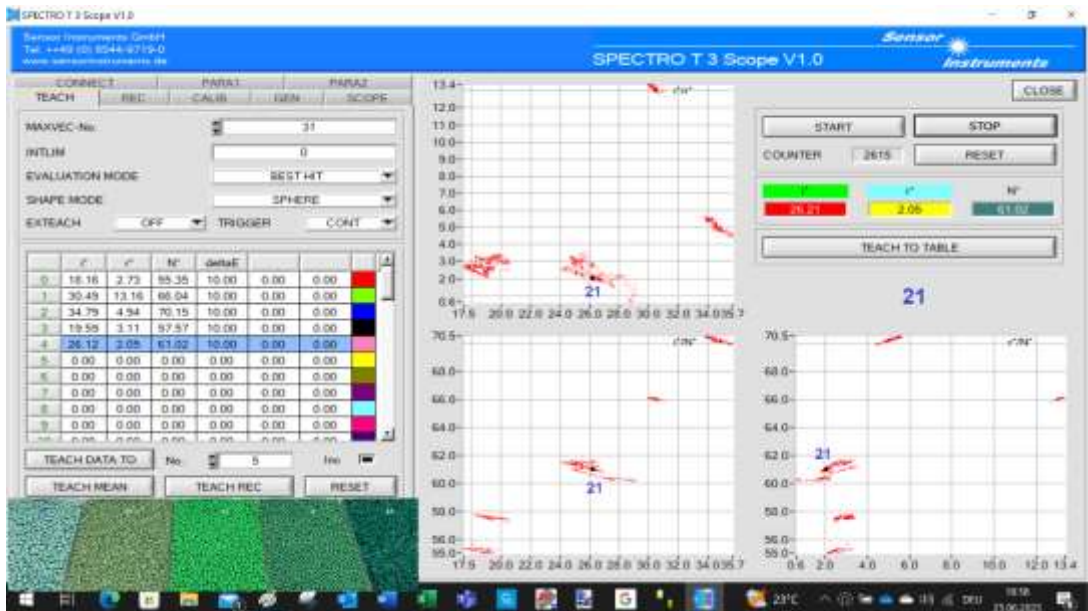
F) 4 Grün, Wichte <1

G) 11 Hellgrün PO, Wichte <1

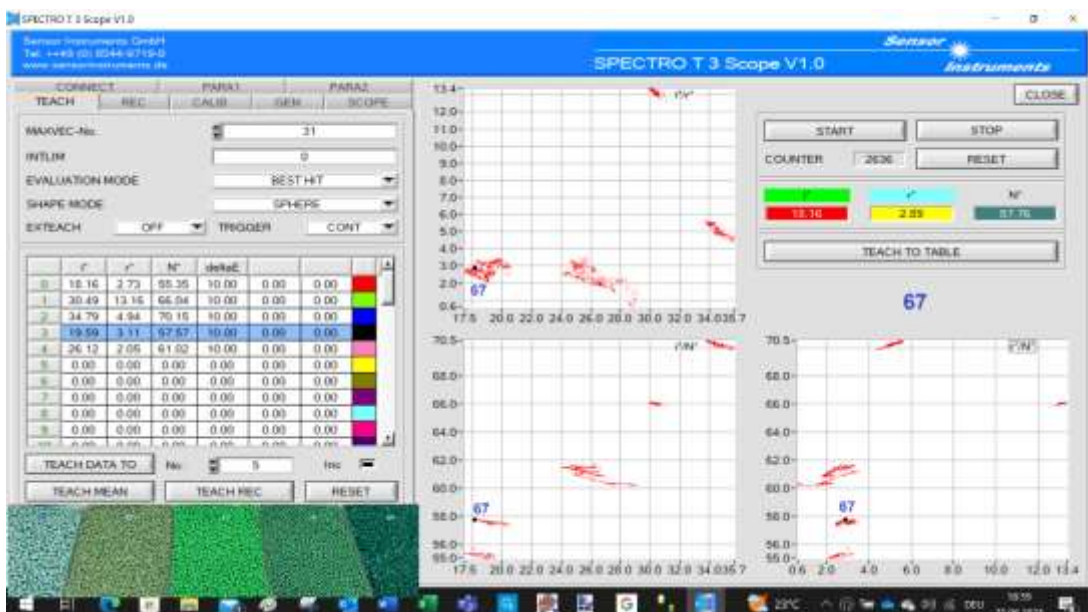
H) 67 Oliv, Wichte <1

I) 21 Türkis PO, Wichte <1

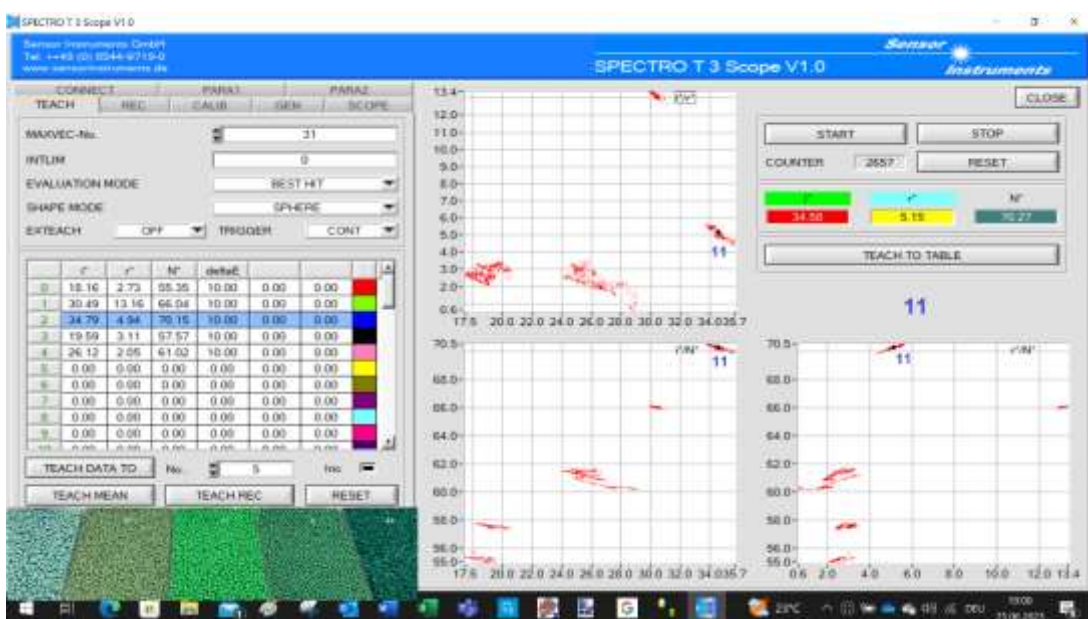




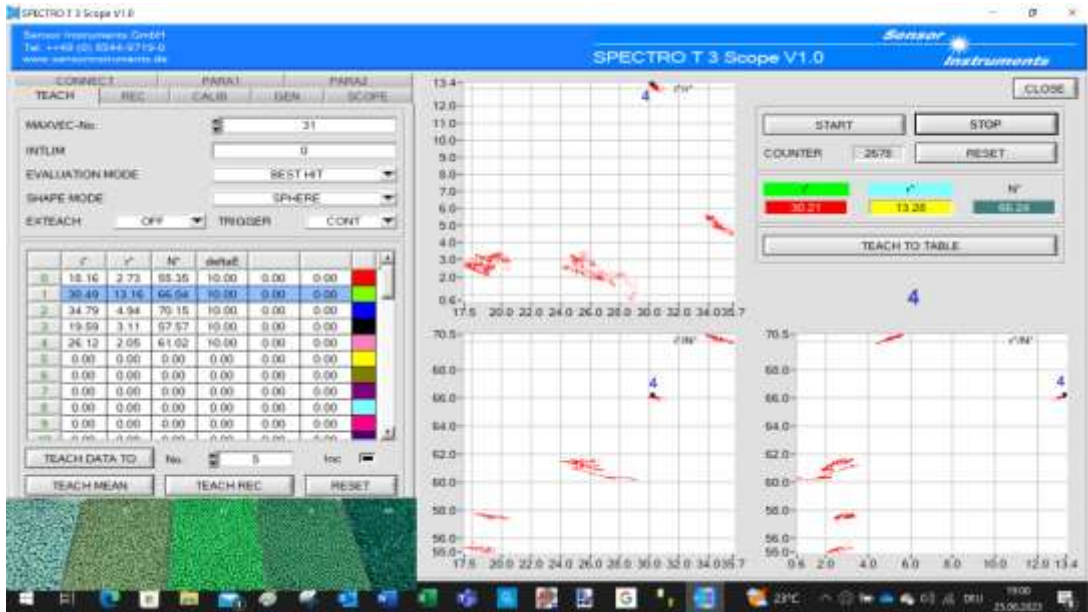
I)



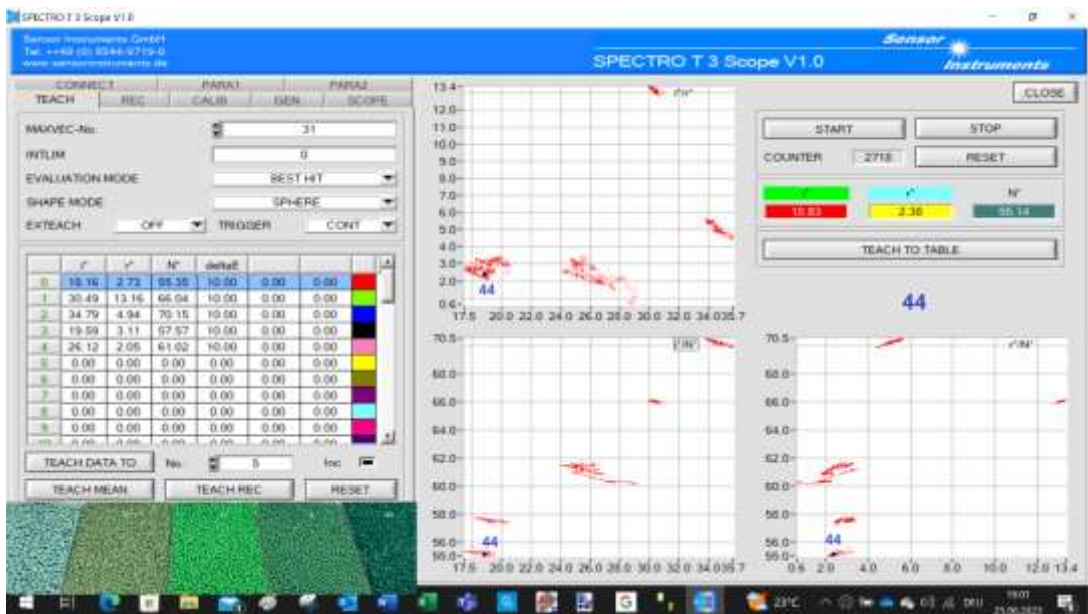
H)



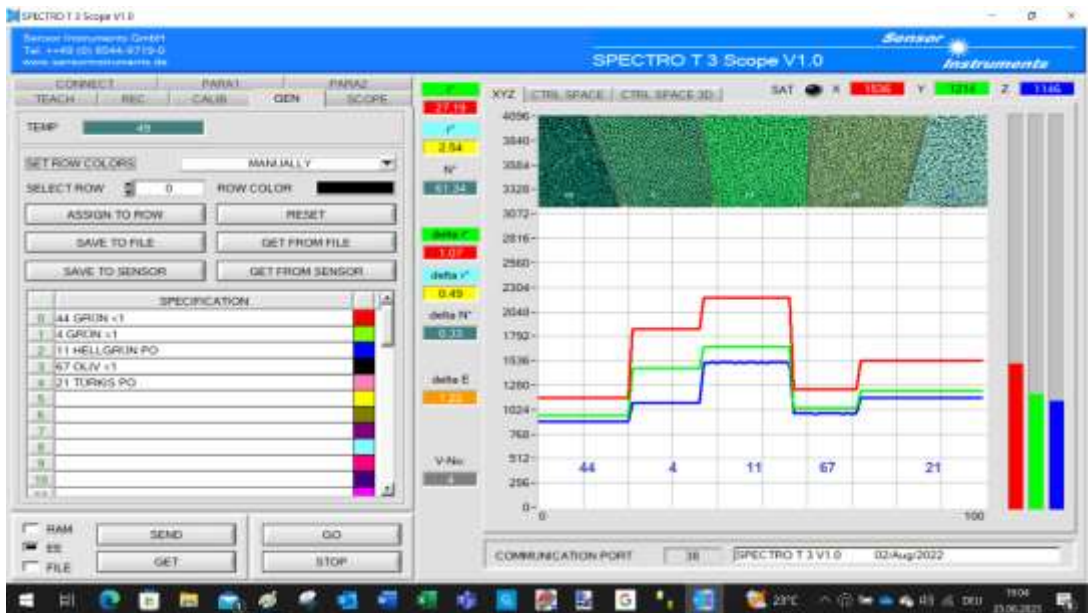
G)



F)



E)



8. Quintett

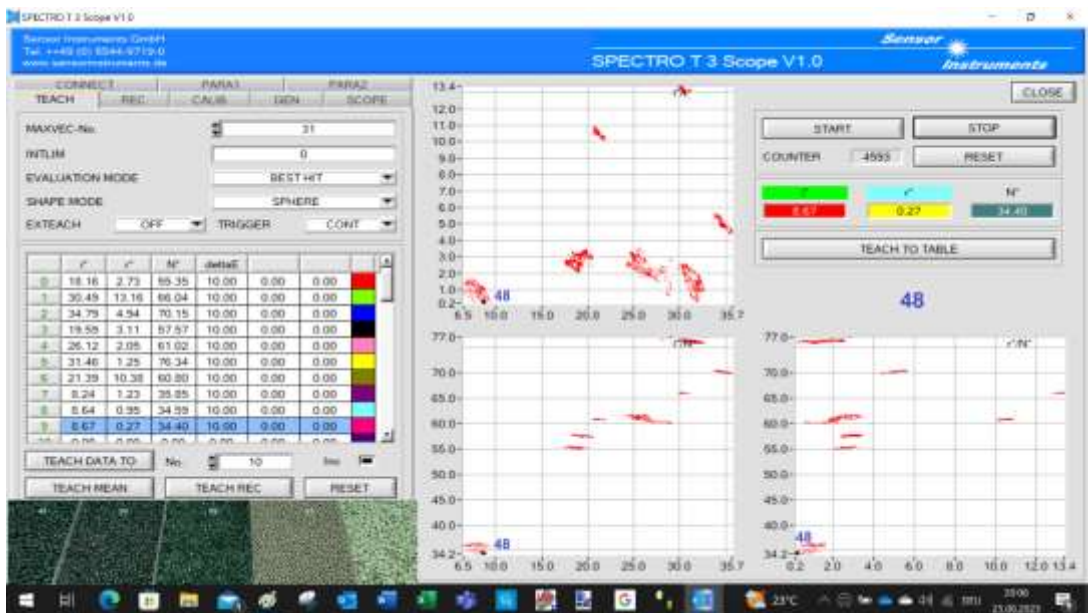
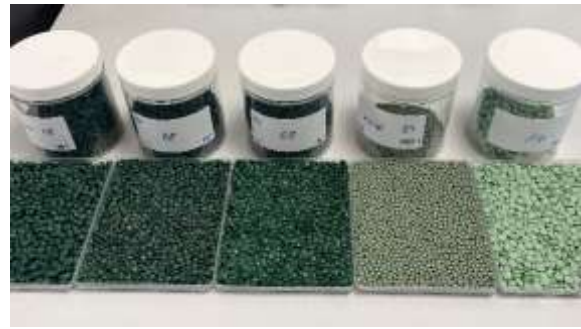
J) 24 Türkis PO, Wichte <1

K) 51 Oliv, Wichte >1

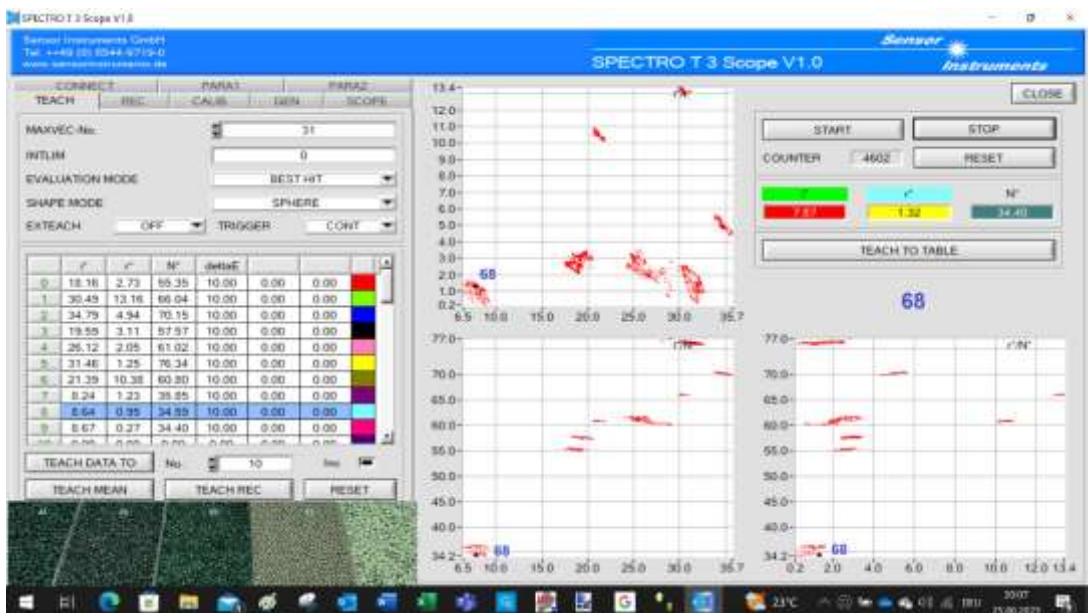
L) 69 Dunkelgrün, Wichte <1

M) 68 Dunkelgrün Mix, Wichte <1

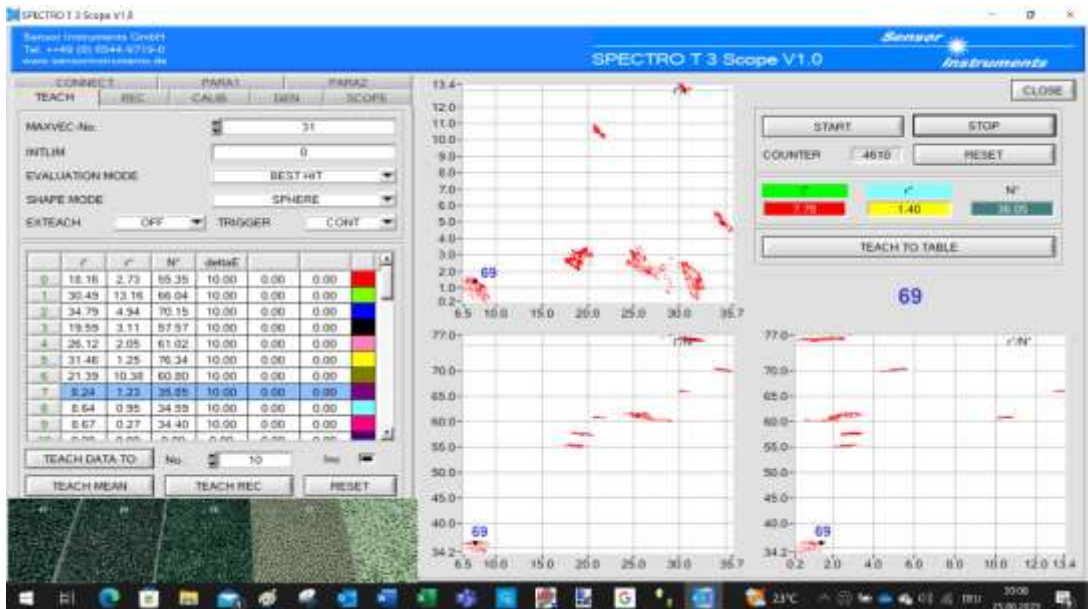
N) 48 Dunkelgrün, Wichte <1



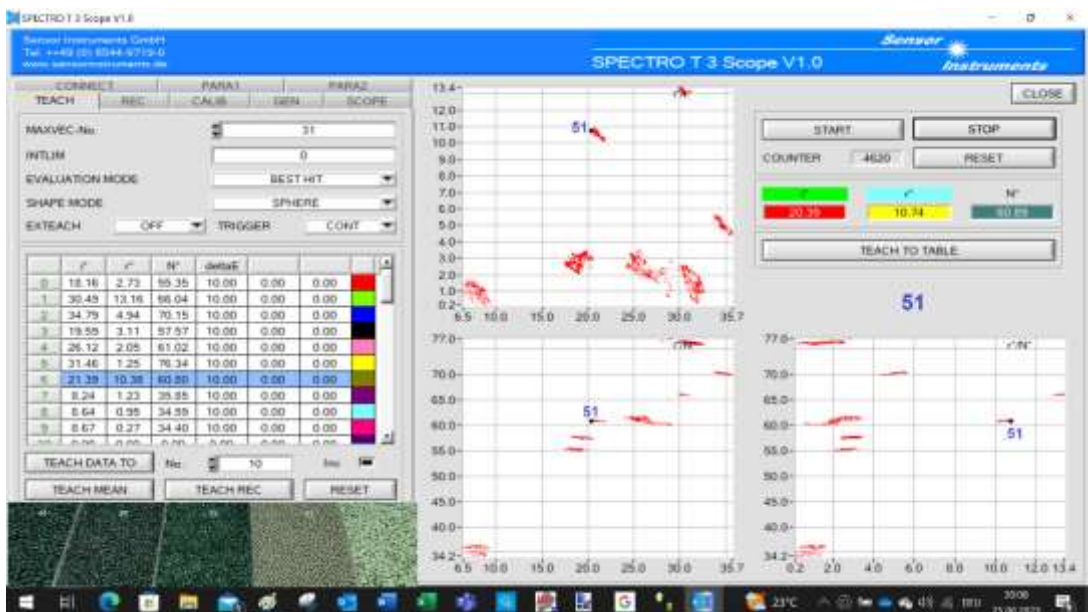
N)



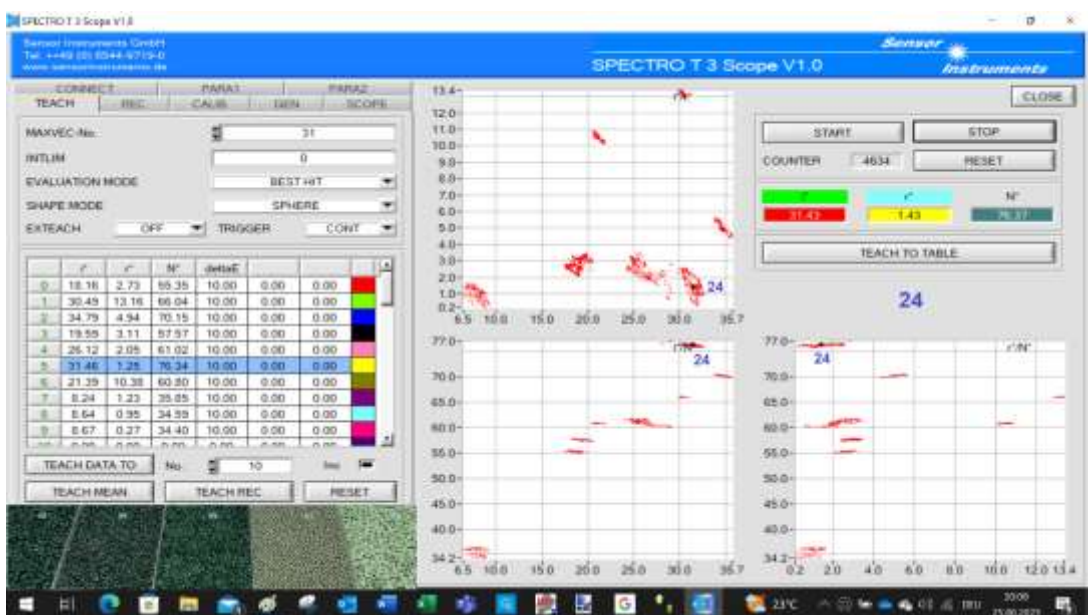
M)



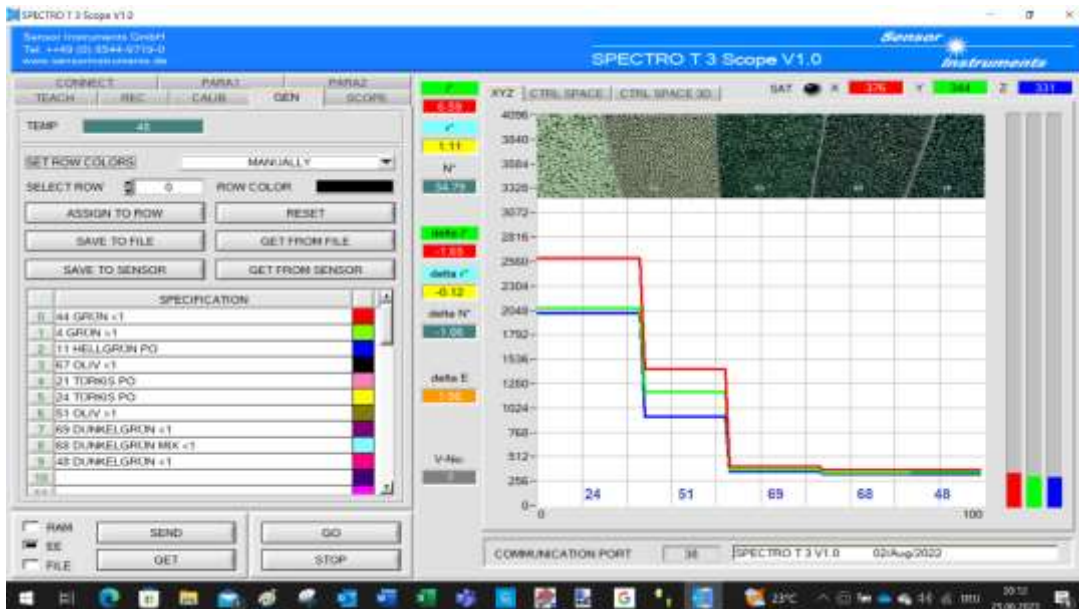
L)



K)

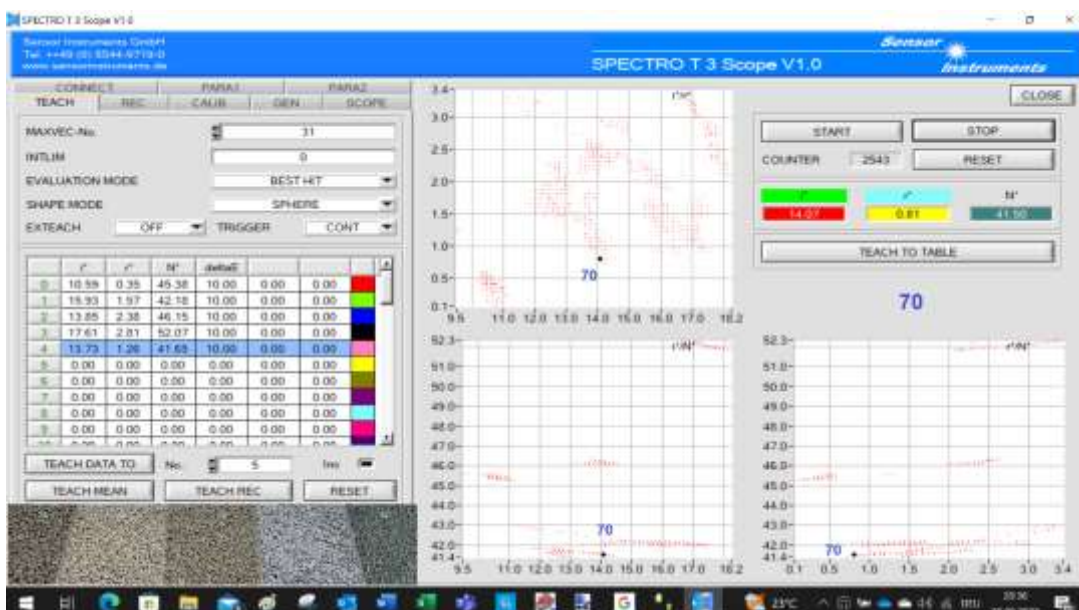


J)

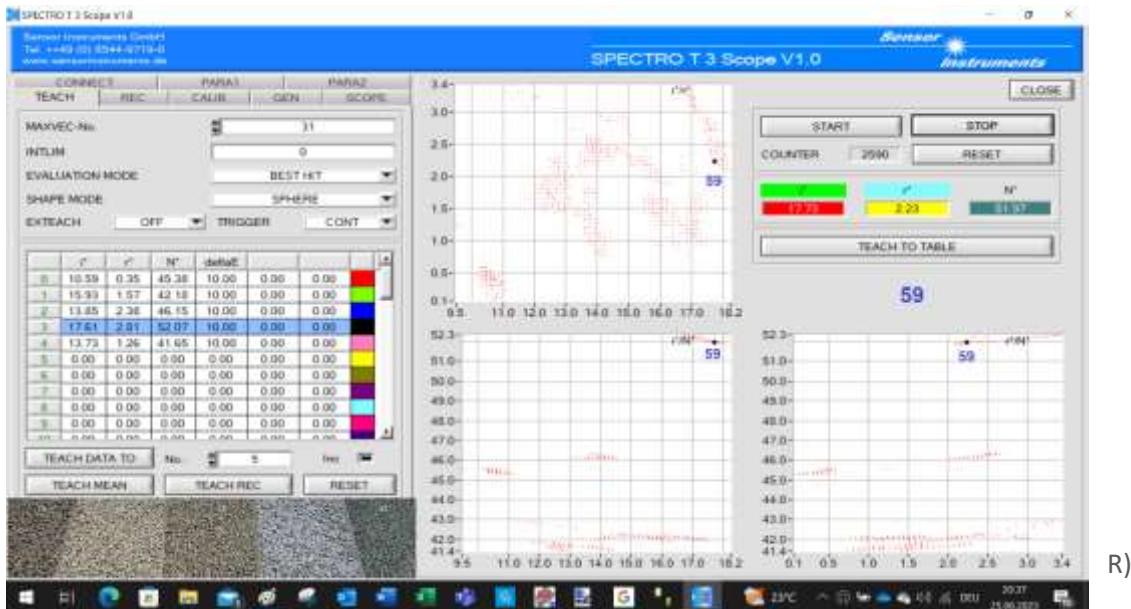


9. Quintett

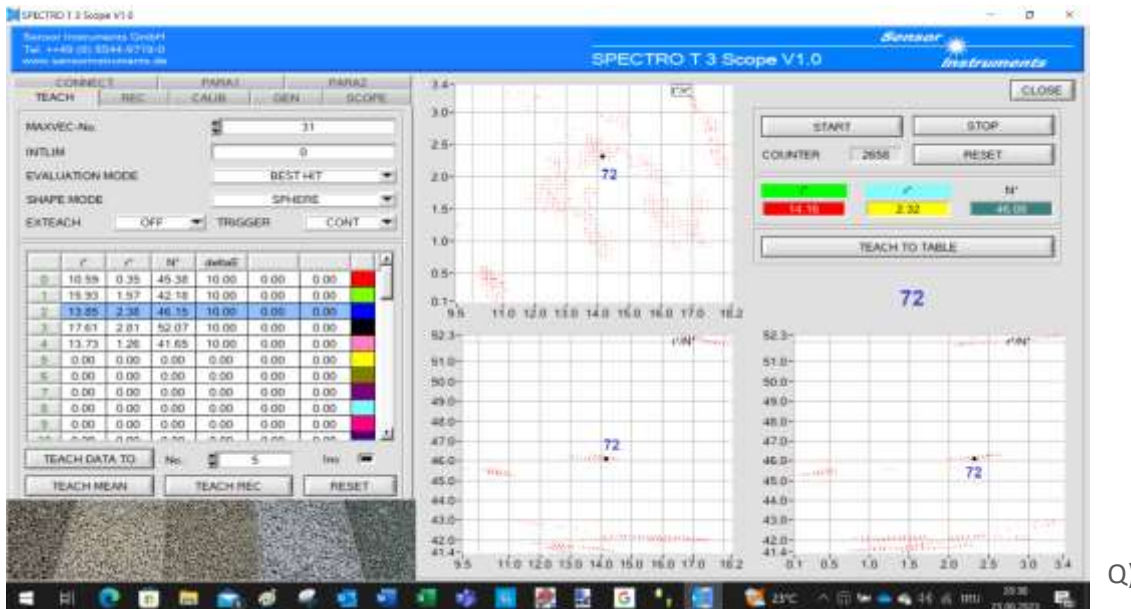
- O) 42 Graugrün, Wichte <1
- P) 12 Grau PO, Wichte <1
- Q) 72 Graubeige, Wichte <1
- R) 59 Grau, Wichte <1
- S) 70 Dunkelgrau, Wichte <1



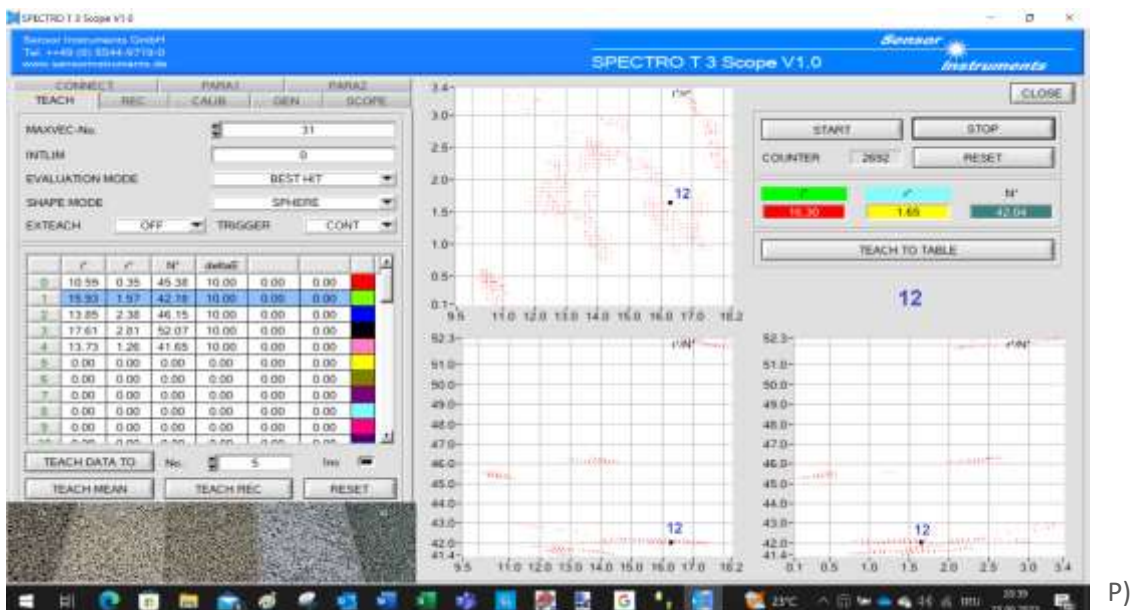
S)



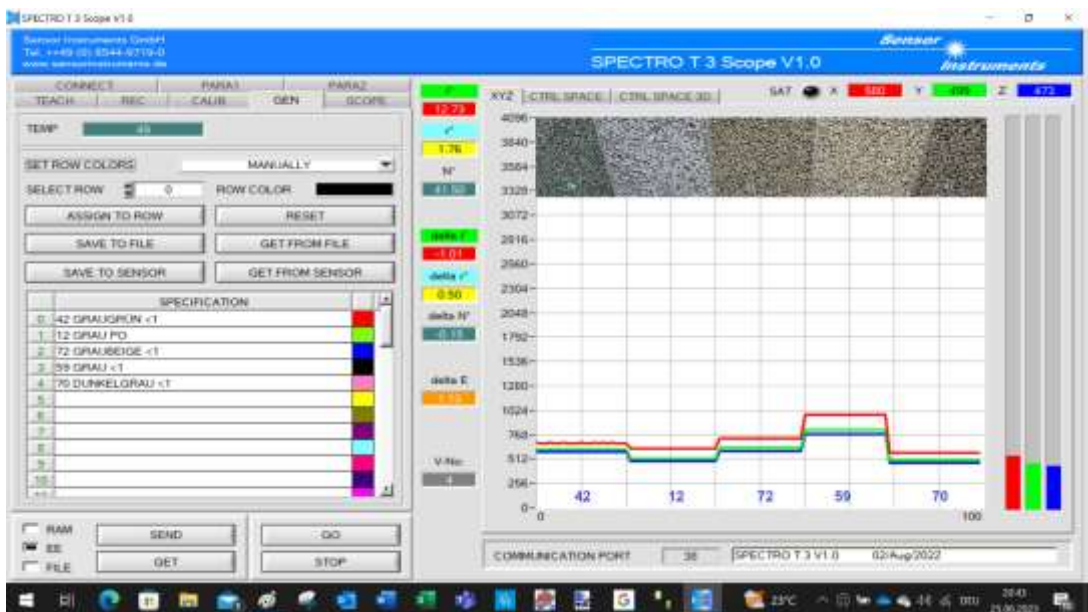
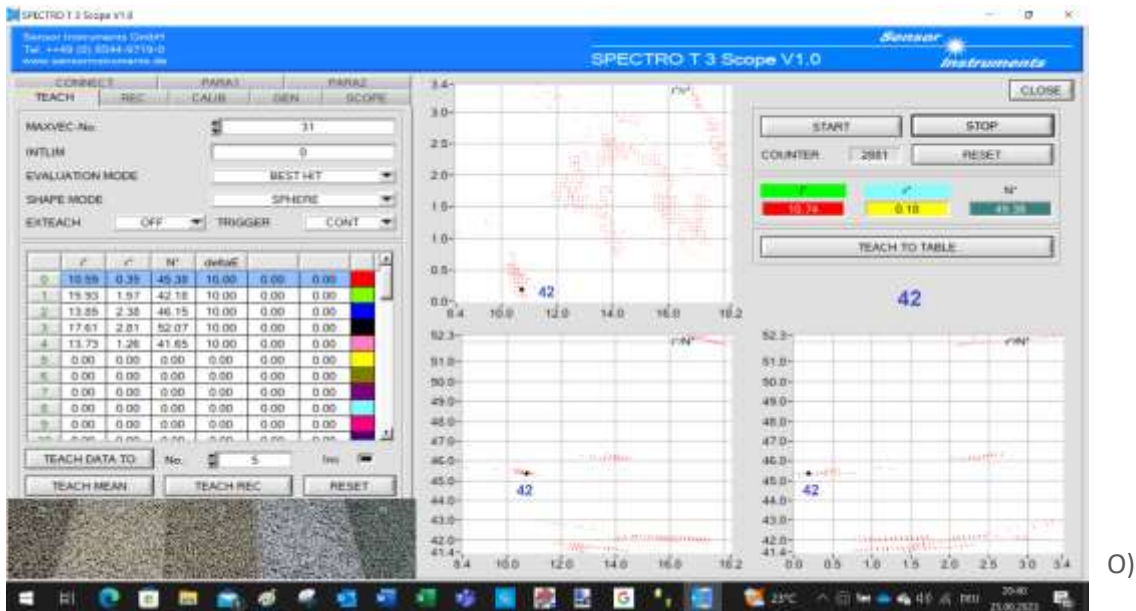
R)



Q)



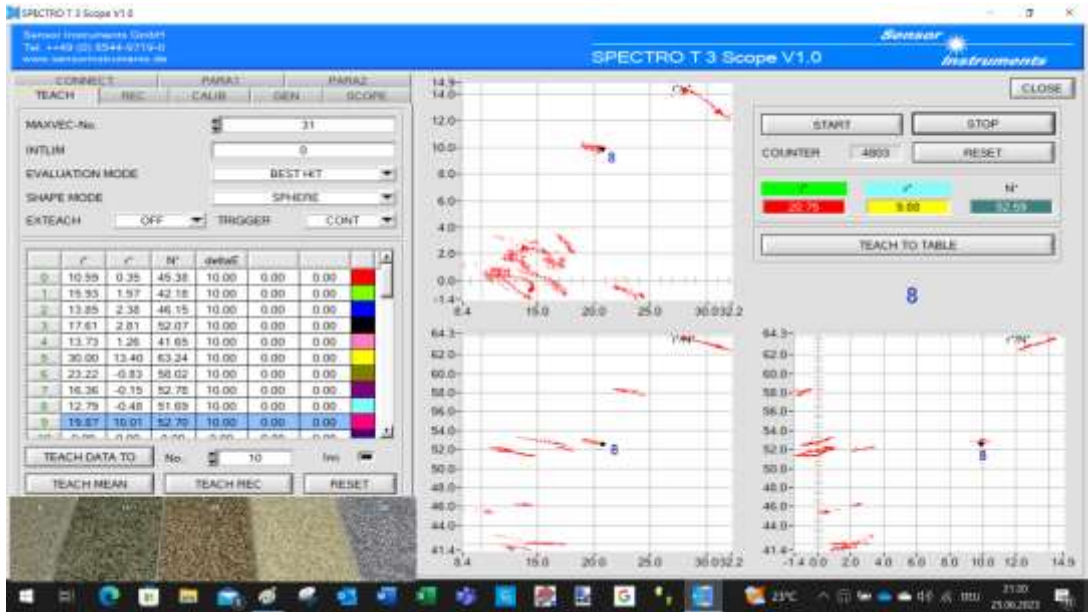
P)



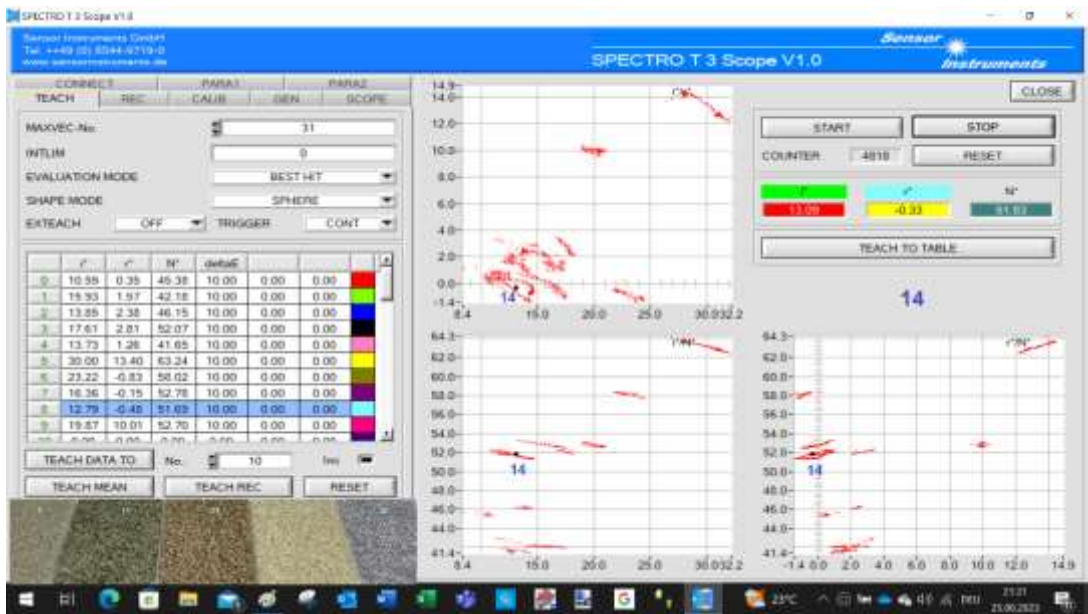
10. Quintett

- T) 28 Grau transparent PET, Wichte >1
- U) 31 Beige LLDPE, Wichte <1
- V) 34 Braun PO, Wichte <1
- W) 14 Oliv PO, Wichte <1
- X) 8 Oliv transparent PET, Wichte >1

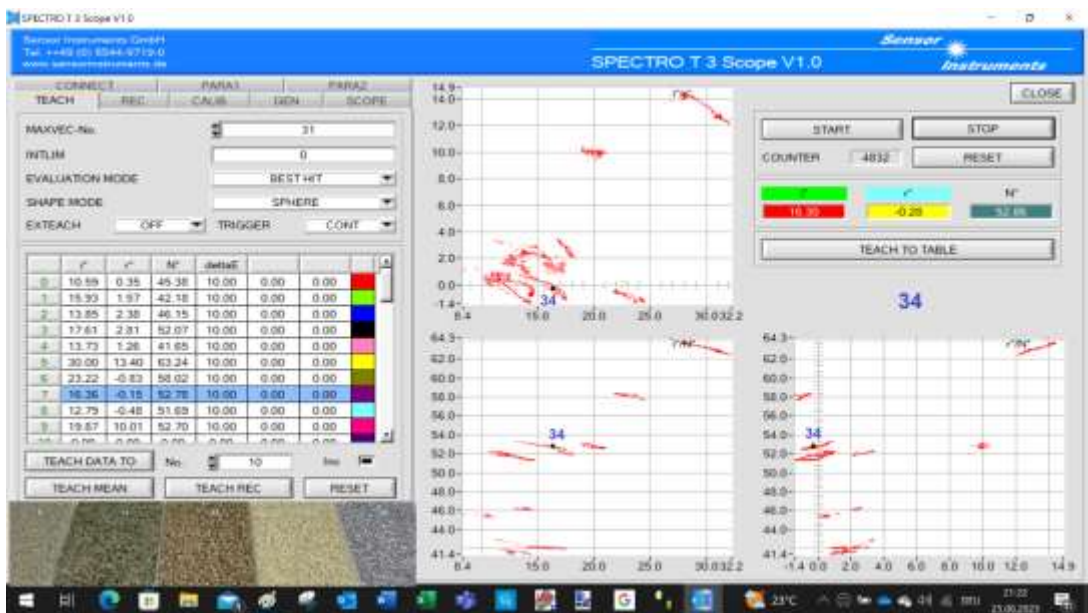




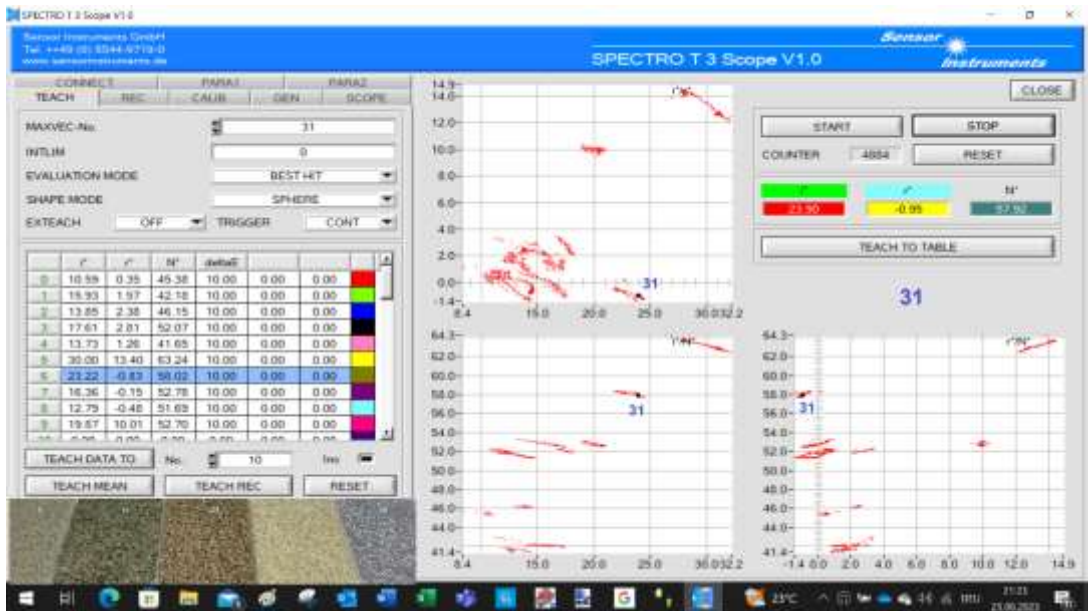
X)



W)



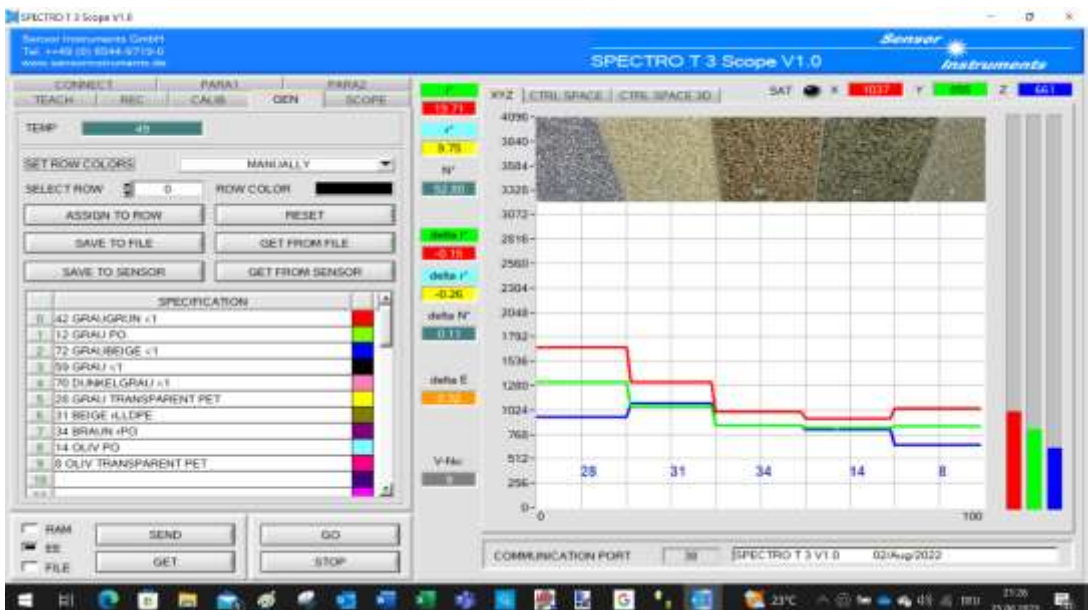
V)



U)



T)



11. Quintett

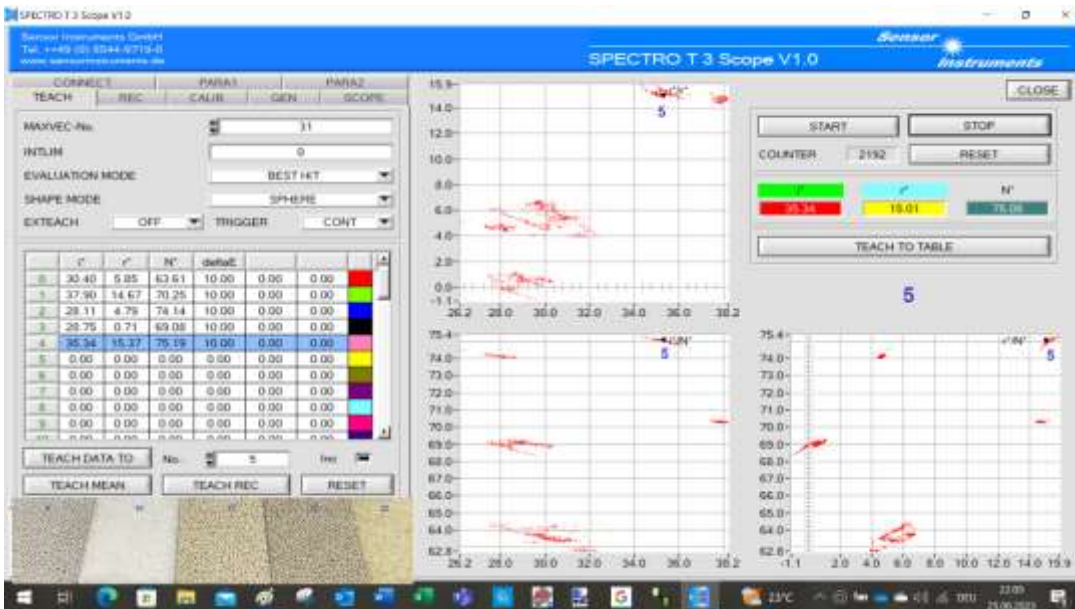
Y) 22 Beige transparent PO, Wichte <1

Z) 37 Beige, Wichte >1

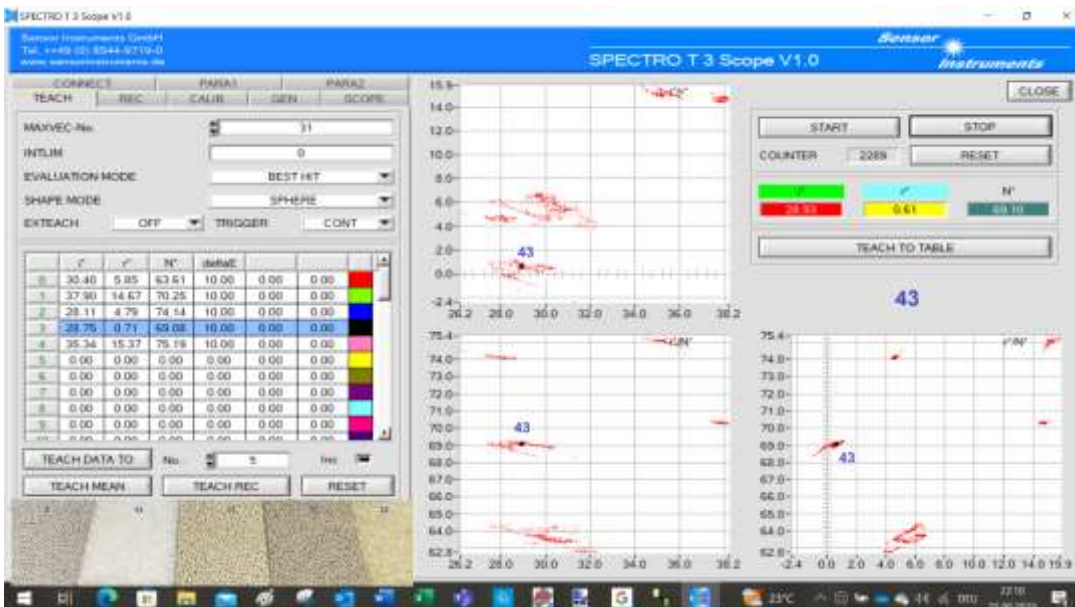
aa) 13 Beige, Wichte >1

bb) 43 Weiß transparent, Wichte <1

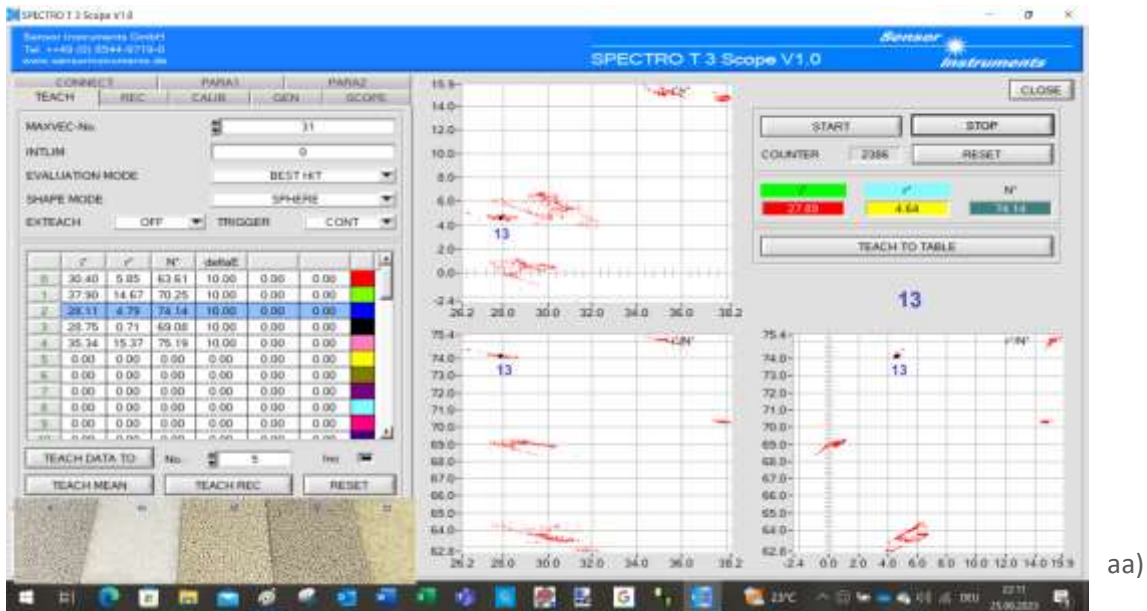
cc) 5 Beige PET, Wichte >1



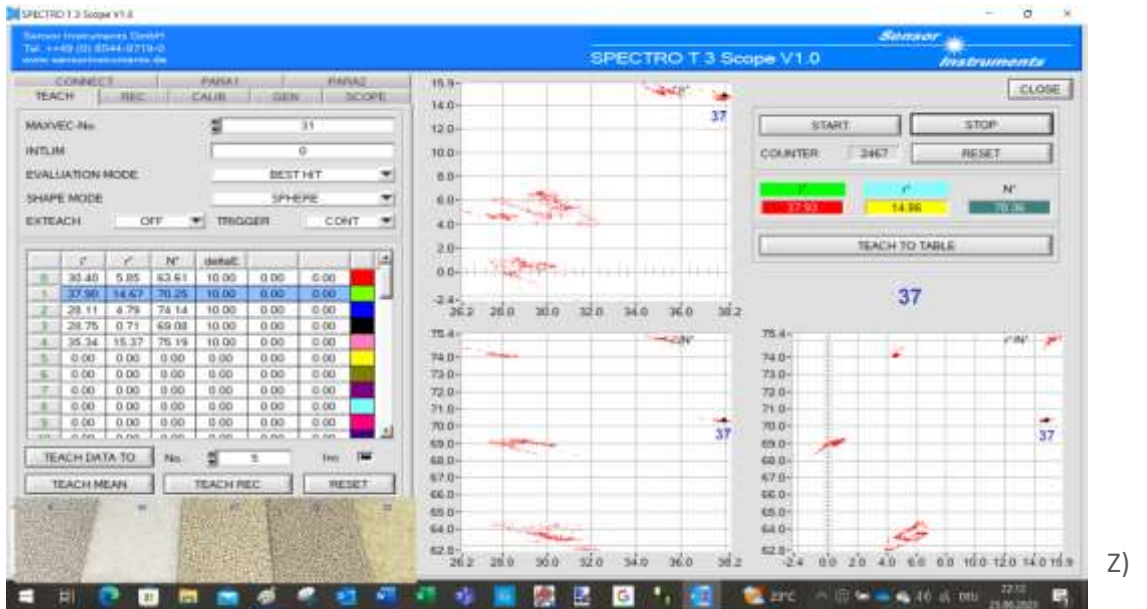
cc)



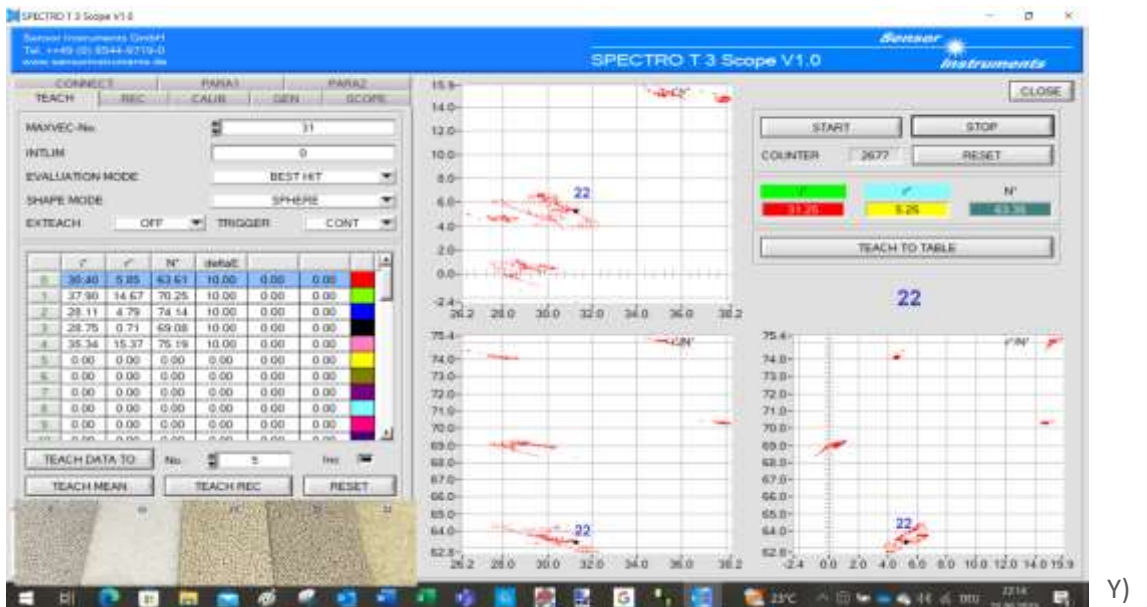
bb)



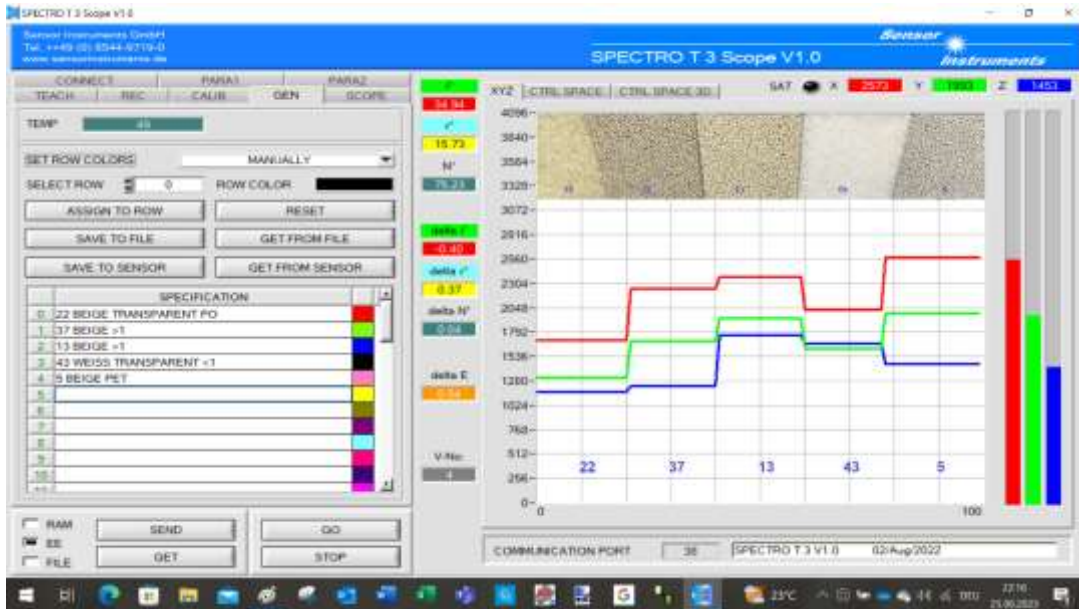
aa)



Z)



Y)



12. Quintett

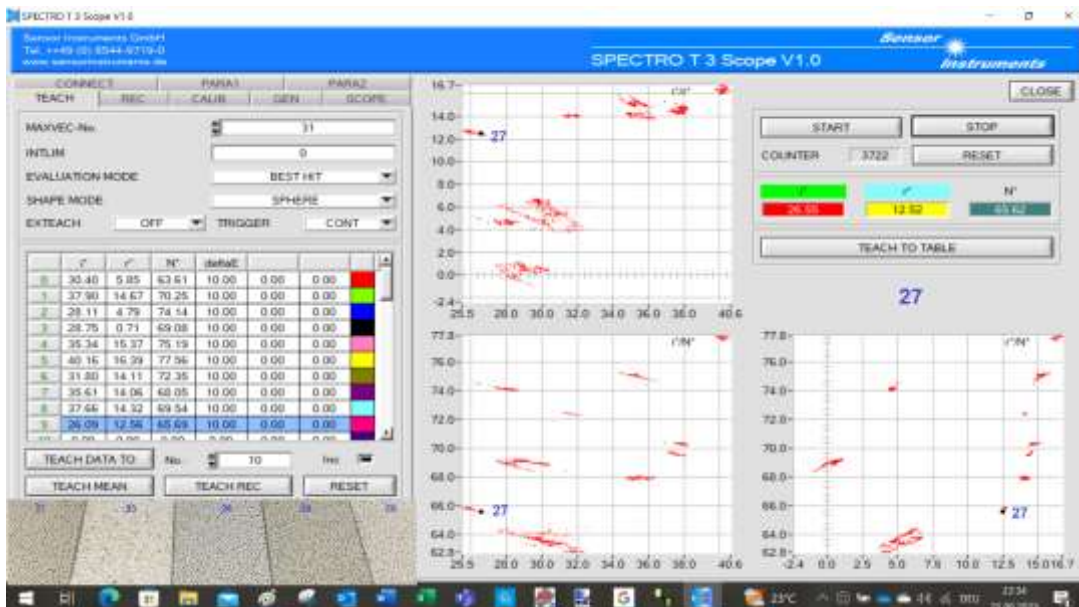
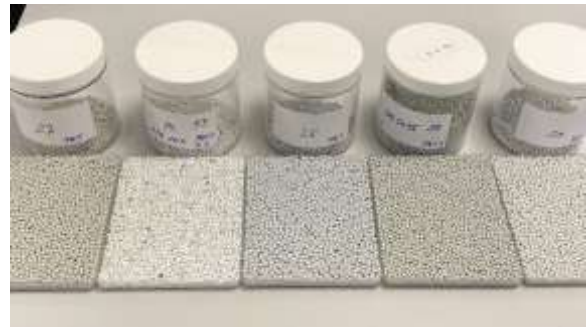
dd) 20 Hellgrau PET, Wichte >1

ee) 39 Grüngrau, Wichte >1

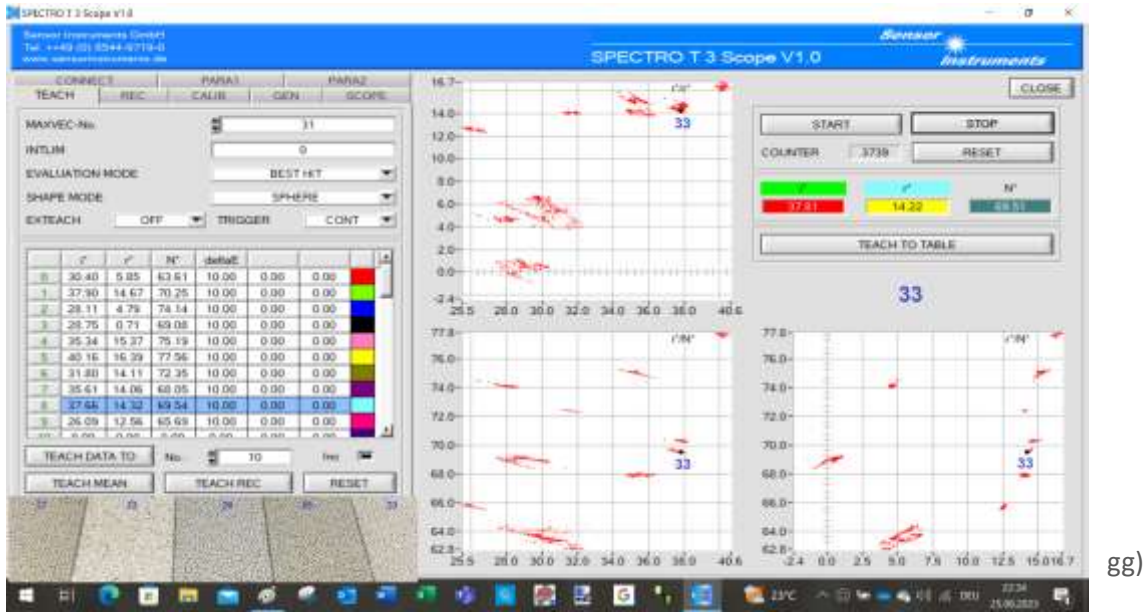
ff) 26 Grau PET, Wichte >1

gg) 33 Grauweiß Mix, Wichte >1

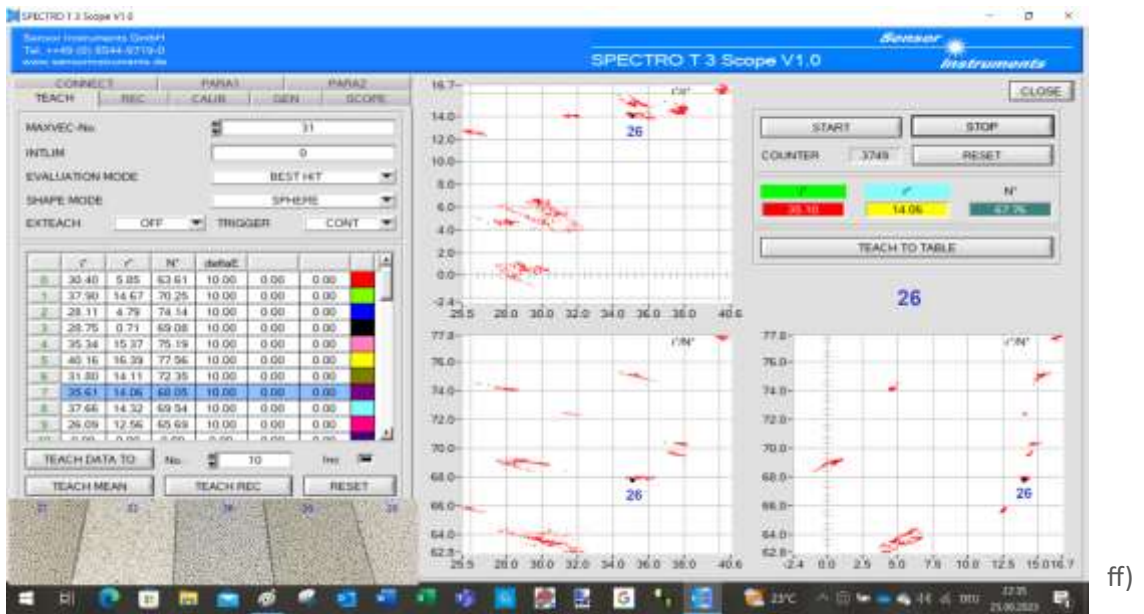
hh) 27 Grüngrau PET, Wichte >1



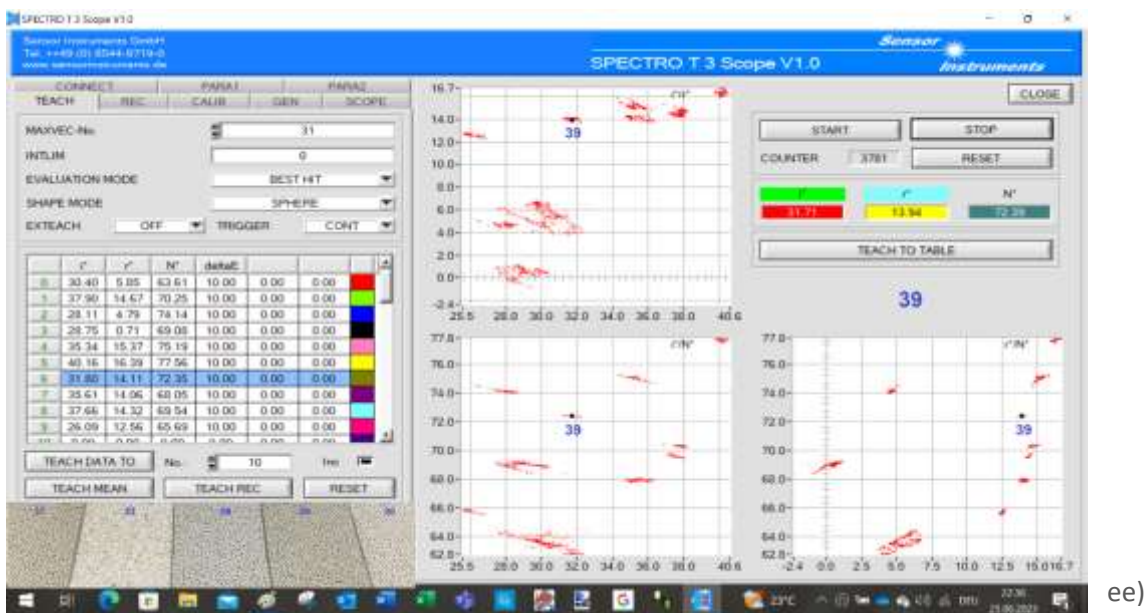
hh)



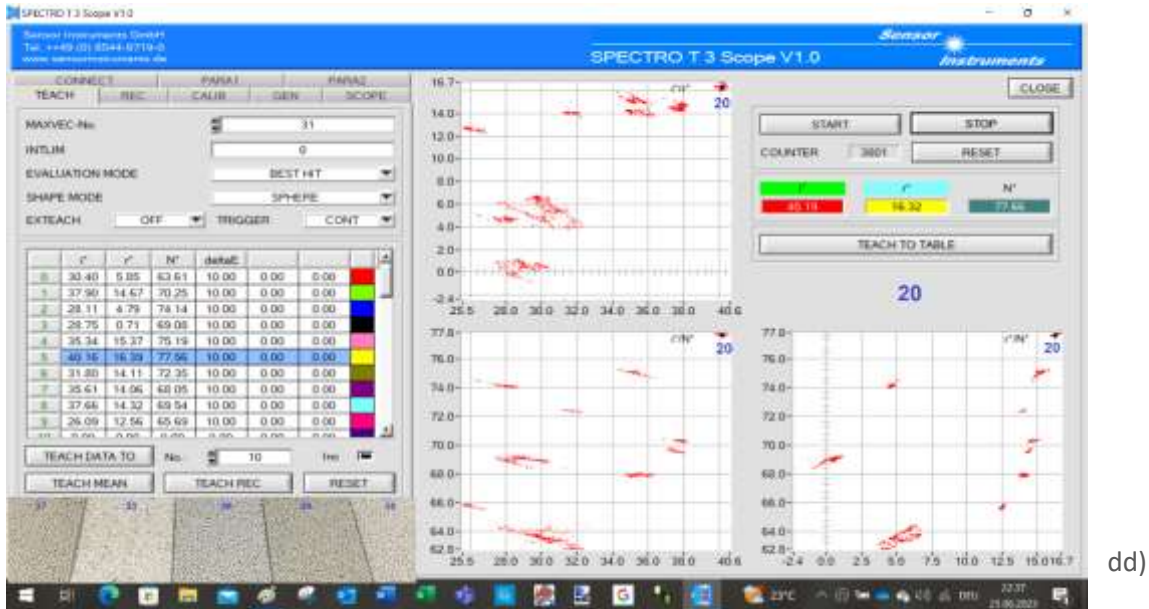
gg)



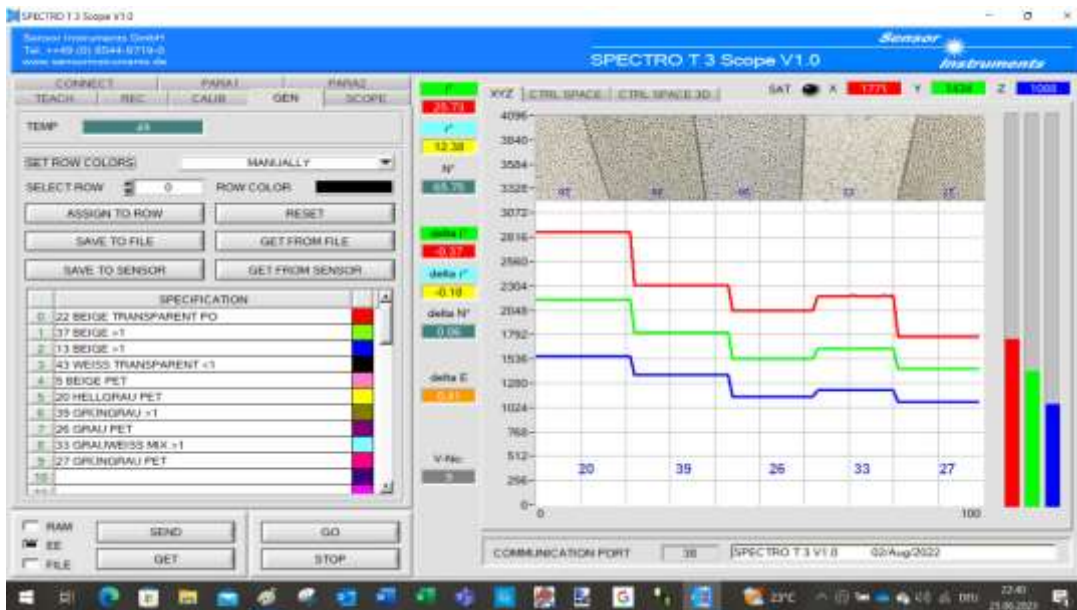
ff)



ee)

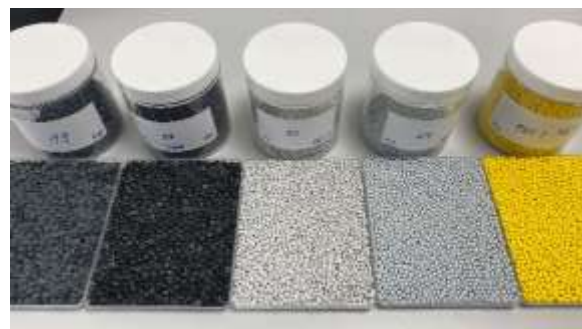


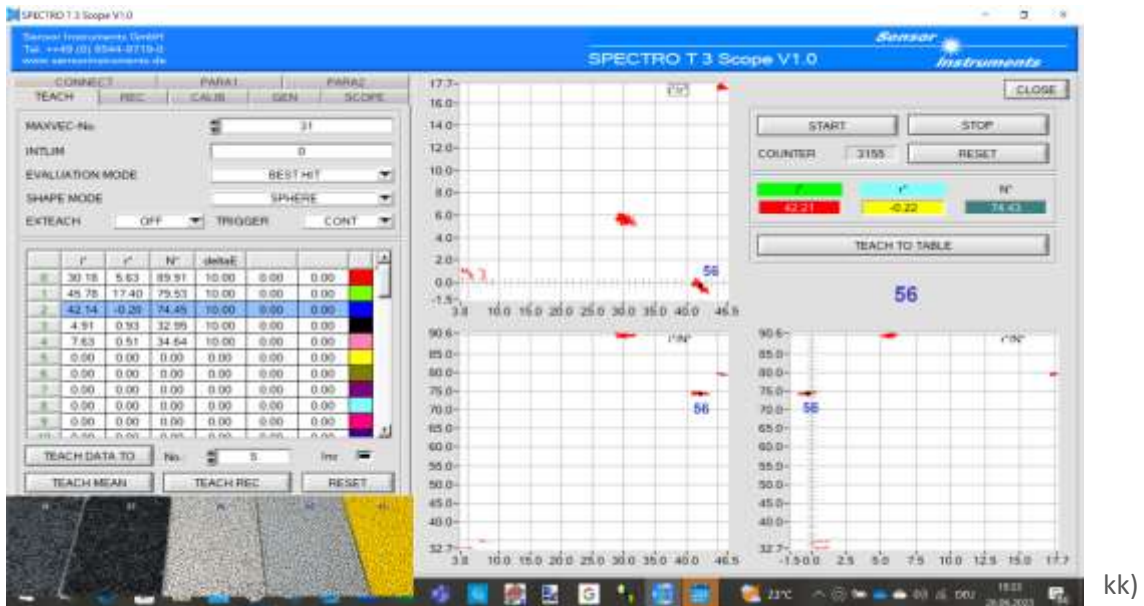
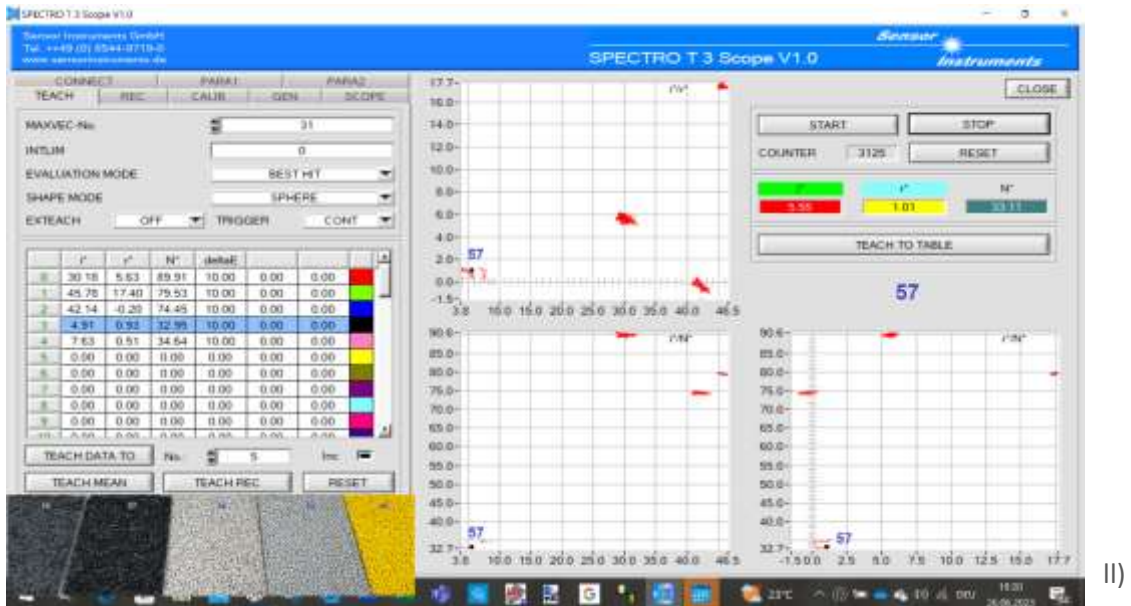
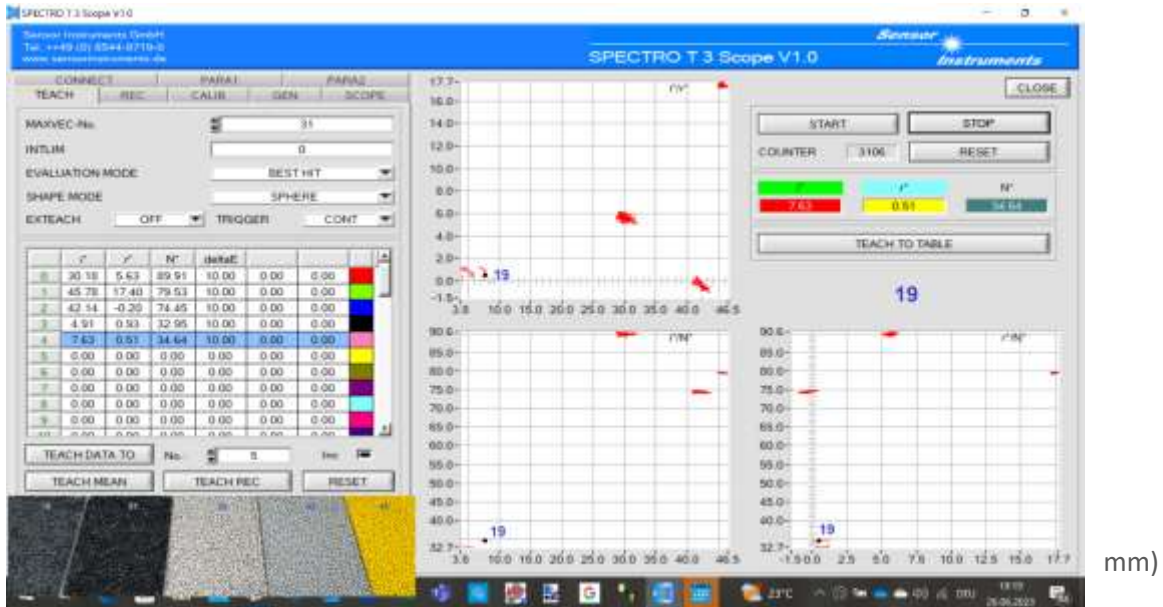
dd)

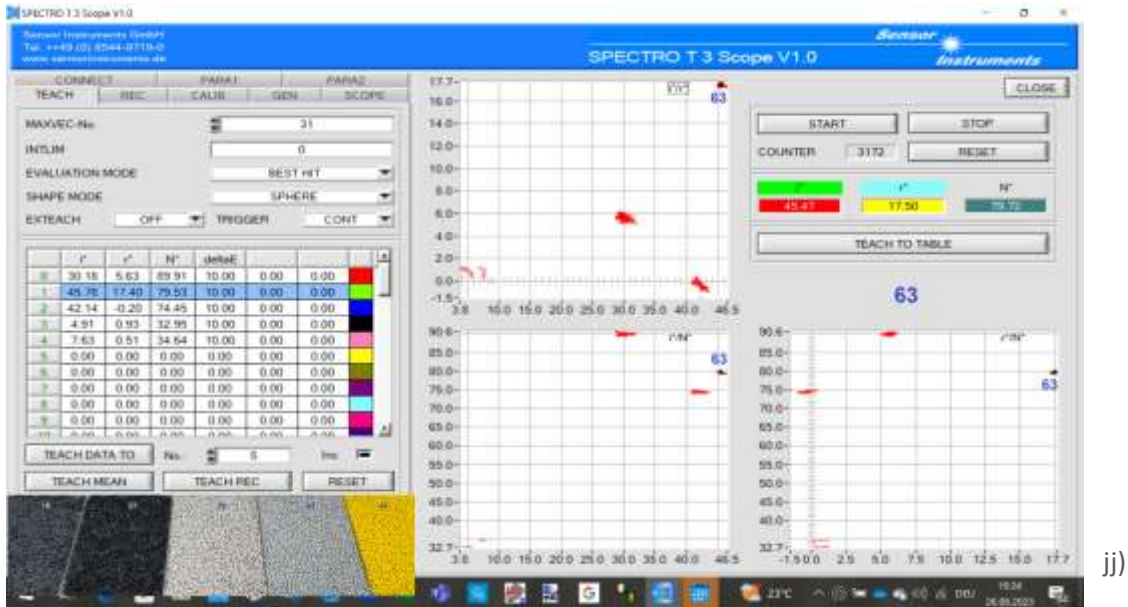


13. Quintett

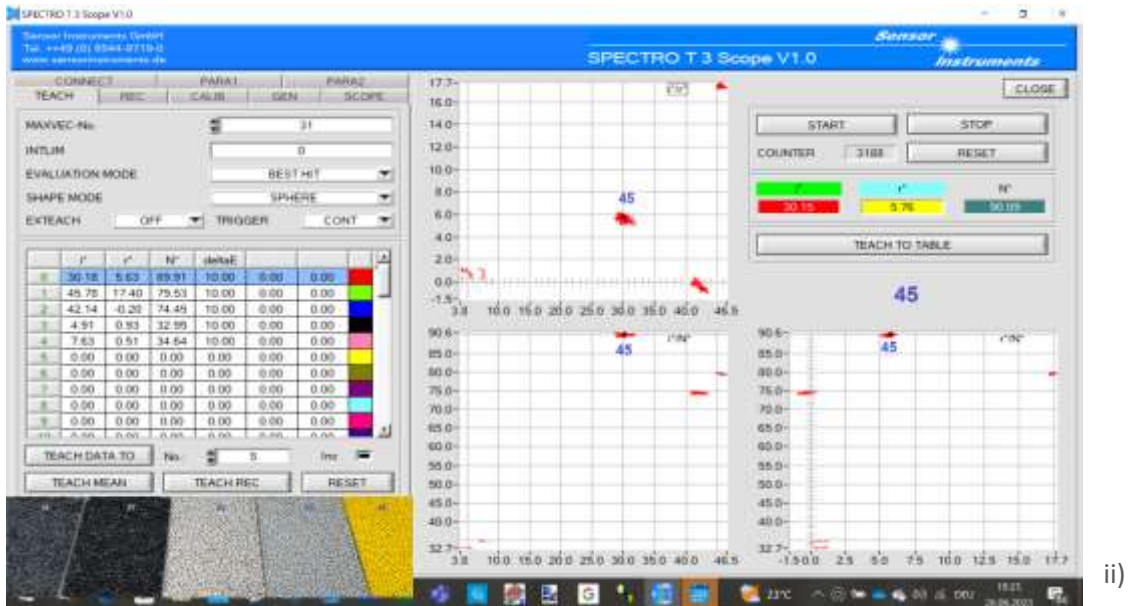
- ii) 45 Gelb, Wichte >1
- jj) 63 Grau, Wichte >1
- kk) 56 Hellgrau, Wichte >1
- ll) 57 Schwarz HDPE, Wichte <1
- mm) 19 Dunkelgrau PO, Wichte <1



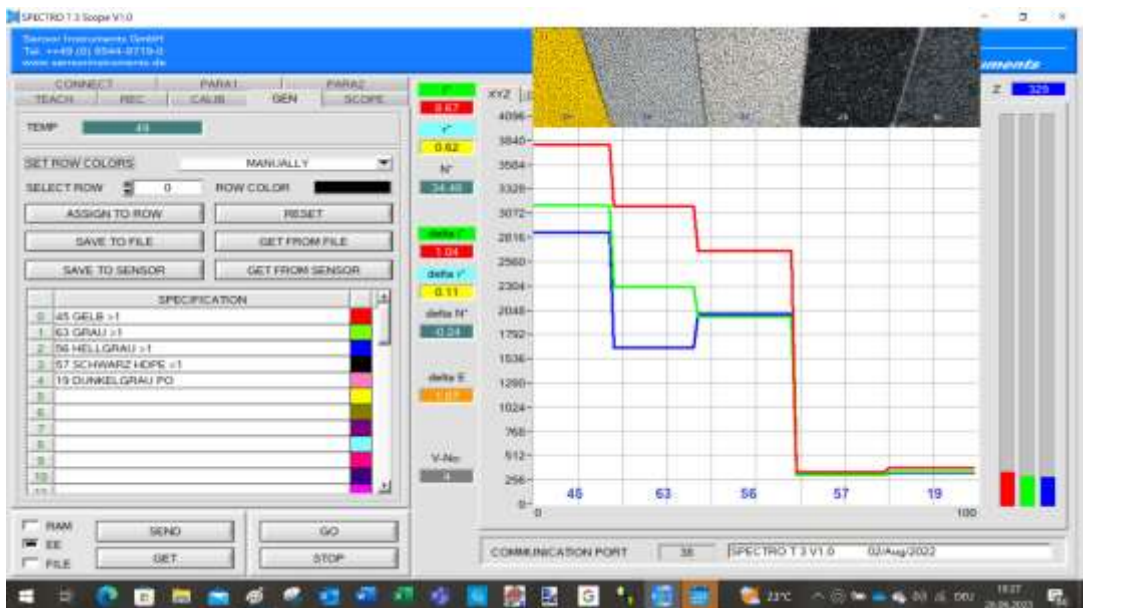




jj)



ii)



14. Quintett

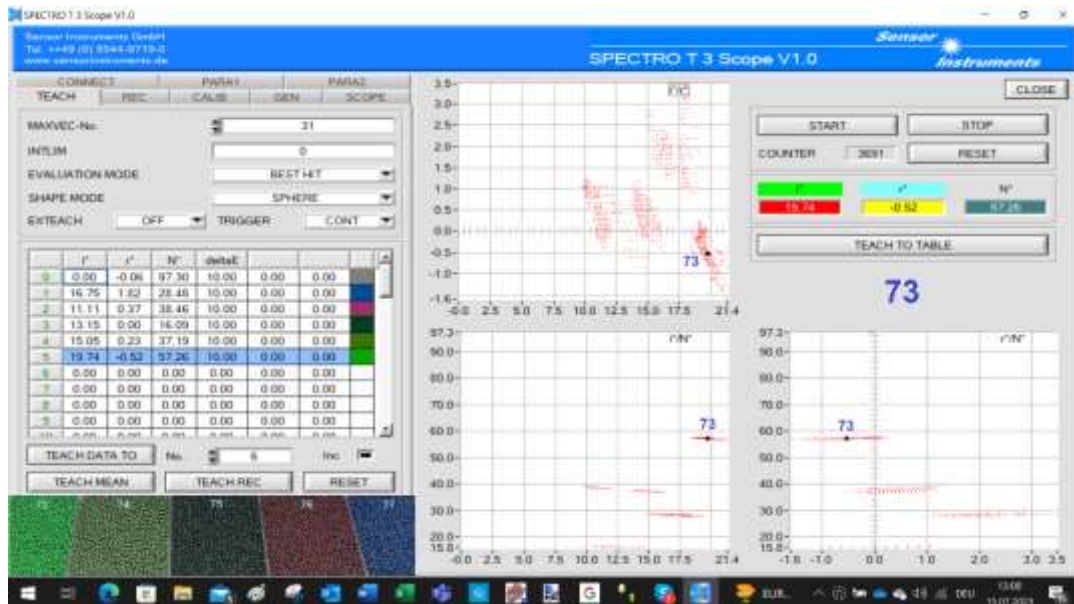
nn) 77 Blau FC 387, Wichte <1

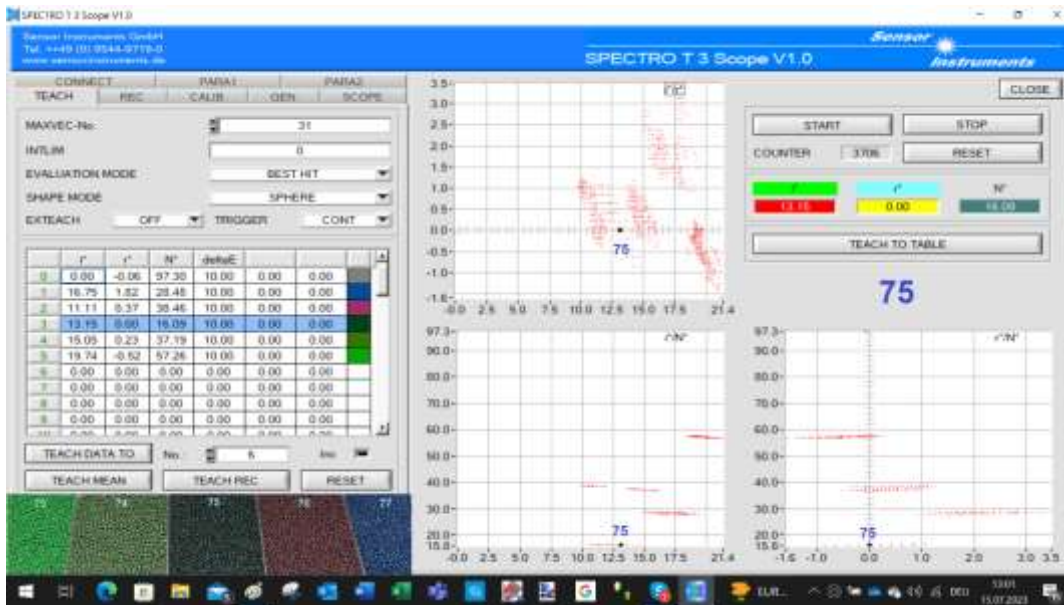
oo) 76 Rot FC 071, Wichte <1

pp) 75 Grün FC 144, Wichte <1

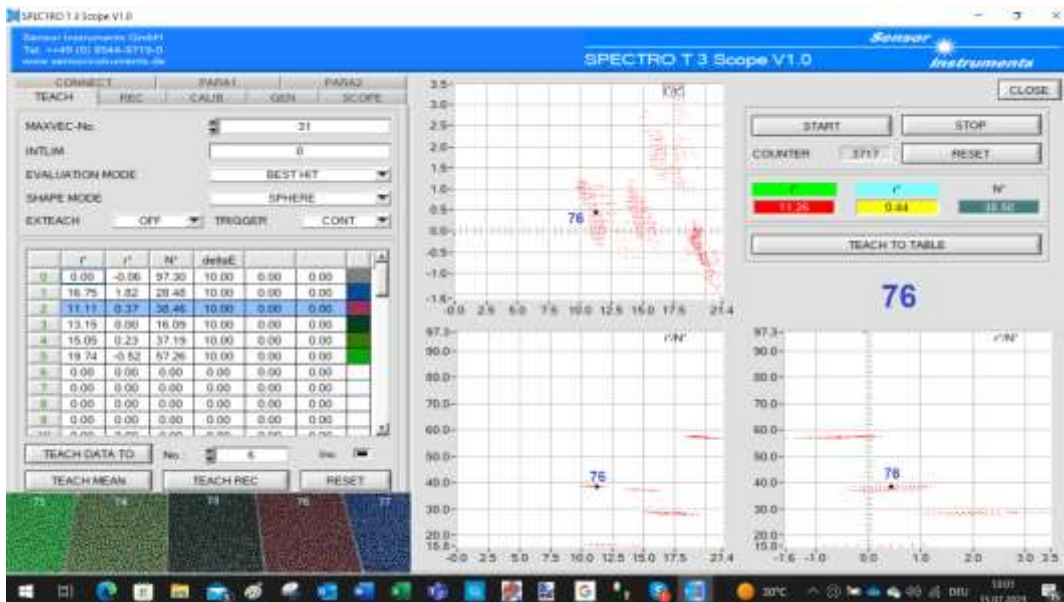
qq) 74 Grün FC 040, Wichte <1

rr) 73 Grün FC 049, Wichte <1

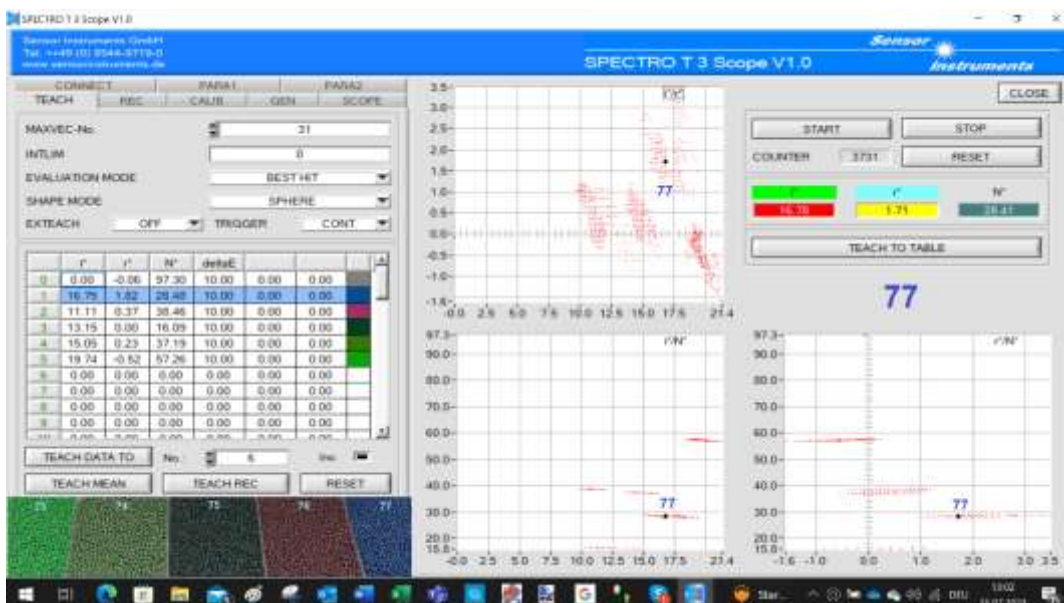




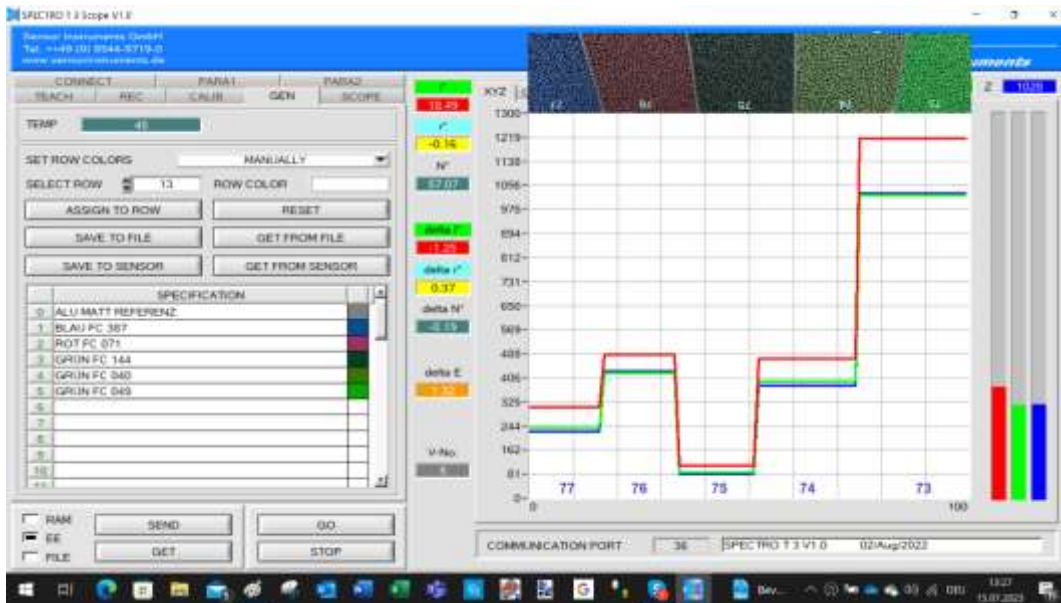
pp)



oo)



nn)



3.1.4 Zusammenfassung der Messergebnisse in Bezug auf Rezyklate

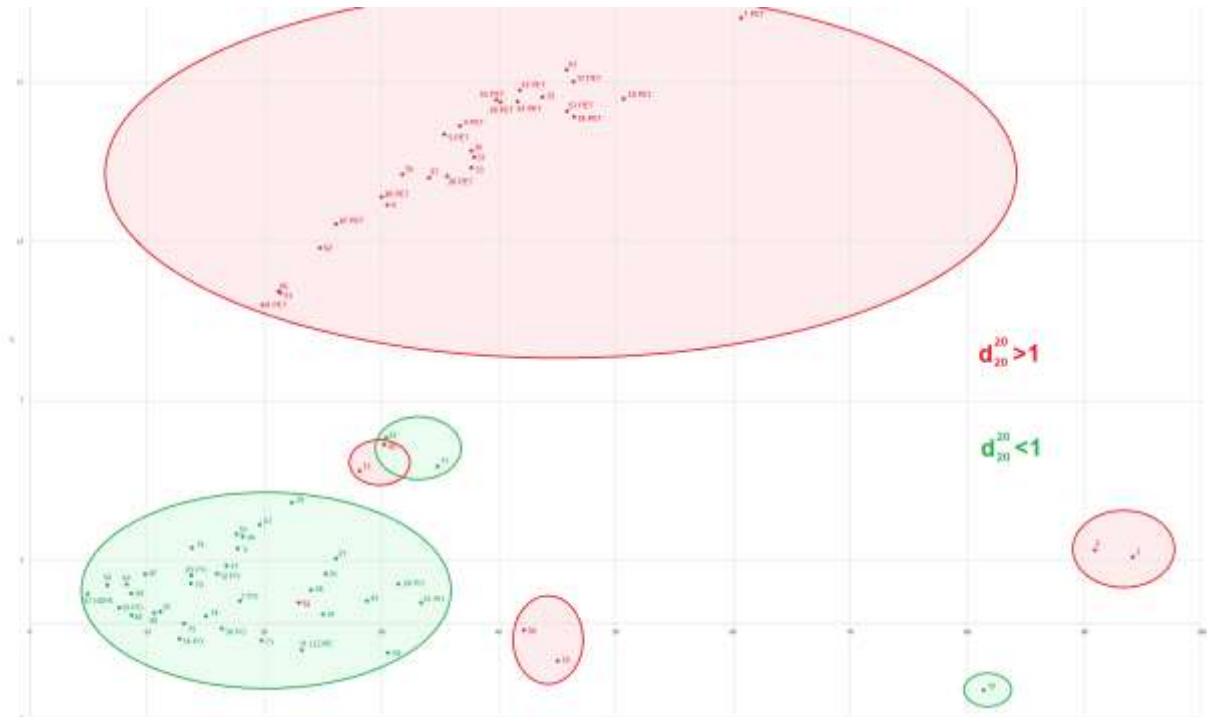
In den folgenden beiden Tabellen sind die $N \cdot i \cdot r^*$ -Werte der einzelnen Rezyklate aufgelistet und farblich nach Wichte <1 und Wichte >1 unterteilt.

REZYKLAT	BEZICHLUNG	rel. Dichte zu Wasser	Grundstoffen	N^*	i^*	r^*	SPECTRO TR Scopes V1.0 Nummer
10	WEISS SEMITRANSPARENT	>1	PD	52,88	65,33	-2,05	0
18	WEISS	>1	PET	72,06	50,88	56,5	1
54	WEISS SEMITRANSPARENT	>1		69,9	55,52	-0,32	2
52	BENGE	>1		80,69	22,85	0,96	3
15	WEISS	>1	PET	75,05	41,81	46,76	4
13	GRAU	>1	PET	75,44	45,84	46,11	5
55	GRÜNBENGE	>1		74,76	45,28	-1,36	6
46	HELLBLAU	>1		52,28	23,99	1,23	7
10	HELLBENGE	>1	PD	58,43	33,34	0,96	8
34	ORANG	>1	PET	75,44	46,83	0,99	9
39	ROTT	>1		61,89	25,24	5,17	10
30	HELLBLAU	>1		71,06	45,69	14,86	11
15	WEISS	>1	PET	85,04	90,97	29,04	12
15	HELLORANGBLAU	>1		77,29	41,72	18,25	13
41	BLAU	>1		81,4	34,59	9,25	14
38	HELLBLAU	>1		65,05	22,27	3,81	15
45	HELLBLAU	>1	PET	77,56	38,79	16,46	16
17	HELLBLAU	>1	PET	78,82	46,39	17,29	17
42	GRÜNBLAU	>1		62,49	24,78	11,8	18
43	HELLBLAU MIT	>1	PET	75	41,6	16,41	19
23	BLAU TRANSPARENT	>1		60,2	34,06	0,4	20
7	BLAU	>1	PD	58,54	15,91	6,71	21
40	GRÜNBLAU	>1	PD	68,51	18,76	1,91	22
3	ROTT	>1		56,23	44,99	8,1	23
2	WEISS	>1		54,29	60,88	0,91	24
8	BLAU	>1		48,01	17,75	2,36	25
31	ORANGBLAU	>1		54,74	6,99	1,71	26
47	ORANGBLAU	>1		37,81	9,88	1,54	27
8	HELLBLAU	>1	PET	71,57	36,55	15,04	28
36	ORANG	>1		61,07	21,35	15,44	29
14	ORANG	>1		55,15	18,28	2,72	30
4	ORANG	>1		68,08	36,49	13,28	31
11	HELLGRÜN	>1	PD	70,11	34,79	4,88	32
47	ORANG	>1		57,57	25,29	3,11	33
11	TÜRBLAU	>1	PD	63,88	38,11	3,95	34
18	ORANG	>1	PI	55,24	31,46	1,21	35
13	ORANG	>1	PD	60,8	21,29	10,18	36
39	ORANGBLAU	>1		55,81	6,24	1,21	37
38	ORANGBLAU MIT	>1		44,55	8,84	0,91	38
46	ORANGBLAU	>1		44,4	8,17	0,27	39
42	ORANGBLAU	>1		45,18	10,55	0,25	40
12	ORANG	>1	PI	52,28	15,99	1,17	41
11	ORANGBLAU	>1		46,15	13,85	2,18	42
10	ORANG	>1		52,89	17,76	2,82	43
10	ORANGBLAU	>1		41,63	12,73	1,16	44
18	ORANG TRANSPARENT	>1	PET	62,24	33	13,4	45
11	ORANG	>1	PI/PP	46,01	25,27	0,43	46
38	ORANG	>1	PD	52,78	16,36	0,15	47
14	ORANG	>1	PI	51,85	12,29	0,44	48
18	ORANG TRANSPARENT	>1	PET	52,2	19,87	10,51	49
22	ORANG TRANSPARENT	>1	PD	44,62	8,8	5,85	50
17	ORANG	>1	PD	70,21	37,8	14,47	51
13	ORANG	>1	PD	74,24	28,33	4,79	52
15	ORANG TRANSPARENT	>1		69,26	28,71	0,21	53
15	ORANG	>1	PET	75,29	21,24	25,17	54
10	HELLGRÜN	>1	PET	77,56	40,58	16,39	55
39	ORANGBLAU	>1		72,91	31,8	10,51	56
20	ORANG	>1	PI	68,05	15,42	14,96	57
15	ORANG MIT	>1		69,74	17,88	14,71	58
21	ORANGBLAU	>1	PET	65,48	26,09	12,46	59
45	ORANG	>1		69,81	31,18	5,63	60
35	ORANG	>1		79,53	45,28	1,4	61
36	HELLGRÜN	>1		64,45	42,34	-0,7	62
17	ORANGBLAU	>1	HOPE	12,29	4,91	0,81	63
19	ORANGBLAU	>1	PI	44,14	12,64	0,51	64
17	BLAU FC 387	>1		24,48	16,71	1,41	65
16	ROT FC 071	>1		35,46	11,51	0,11	66
75	GRÜN FC 144	>1		36,99	13,25	0	67
18	GRÜN FC 040	>1		17,23	13,81	0,23	68
73	GRÜN FC 040	>1		17,26	18,74	-0,53	69



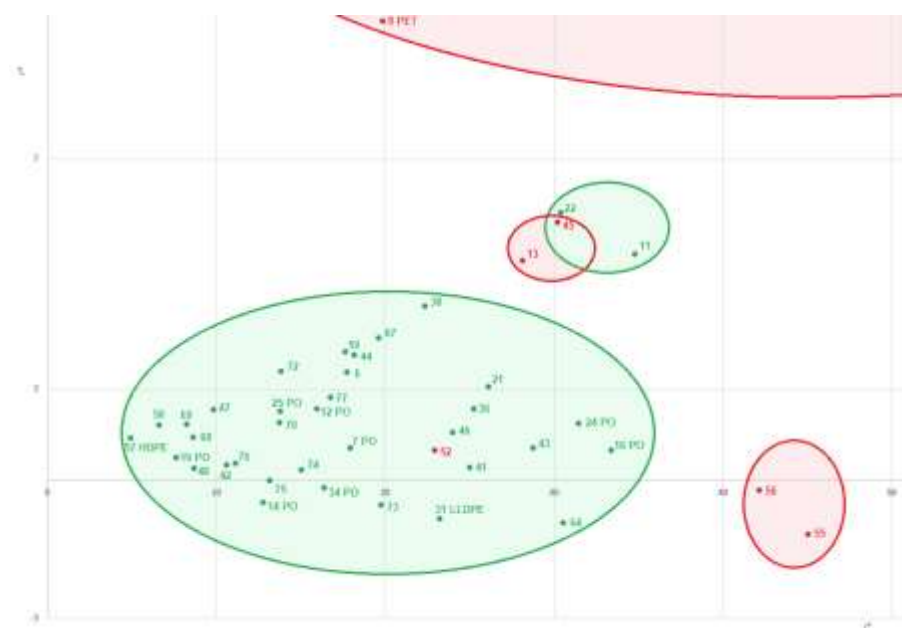
3.1.4.1 i^*r^* -Diagramm

Im Folgenden ist die Platzierung der verschiedenen Rezyklate im i^*r^* -Diagramm gezeigt. Auch hierbei liefert die Wichte einen ersten Hinweis bei der Einteilung der Rezyklate in bestimmte Gruppen, zumal nicht bei allen untersuchten Rezyklaten bekannt war, um welche Kunststoffart es sich denn eigentlich handelt. Im i^*r^* -Diagramm wurden die Rezyklate, bei denen die Kunststoffart vom jeweiligen Recyclingunternehmen mitgeteilt wurde, entsprechend gekennzeichnet. Die PETs und die POs bilden im i^*r^* -Diagramm sicherlich die beiden Hauptgruppen. Die Platzierung der Rezyklate ist dabei der Platzierung der Neuware-Granulate recht ähnlich.



Auch bei der Nebengruppe mit der Wichte >1 bei $i^* > 80$ gibt es gewisse Parallelen, was vermuten lässt, dass es sich bei den Rezyklaten 2 und 3 um PA6- oder um TPU-basierte Kunststoffe handeln könnte.

Bei 45 handelt es sich streng genommen um kein Rezyklat im herkömmlichen Sinne, sondern vielmehr um ein Masterbatch. Bei den Rezyklaten 13 und 52 handelt es sich dem Aussehen nach vermutlich um keine PET-basierenden Rezyklate. Gleiches gilt für die Rezyklate 56 und 55, wenngleich beide einen hohen i^* -Wert aufweisen und somit im i^*r^* -Diagramm



außerhalb der PO-Gruppe angesiedelt sind. Die Rezyklate 11 und 22 hingegen, weisen für PO einen eher untypisch hohen r^* -Wert auf.



55: $N^* = 74.76$ $i^* = 45.04$ $r^* = -1.16$

56: $N^* = 74.45$ $i^* = 42.14$ $r^* = -0.20$



11: $N^* = 70.15$ $i^* = 34.79$ $r^* = 4.94$

22: $N^* = 63.61$ $i^* = 30.40$ $r^* = 5.85$



2: $N^* = 54.23$ $i^* = 90.88$ $r^* = 2.31$

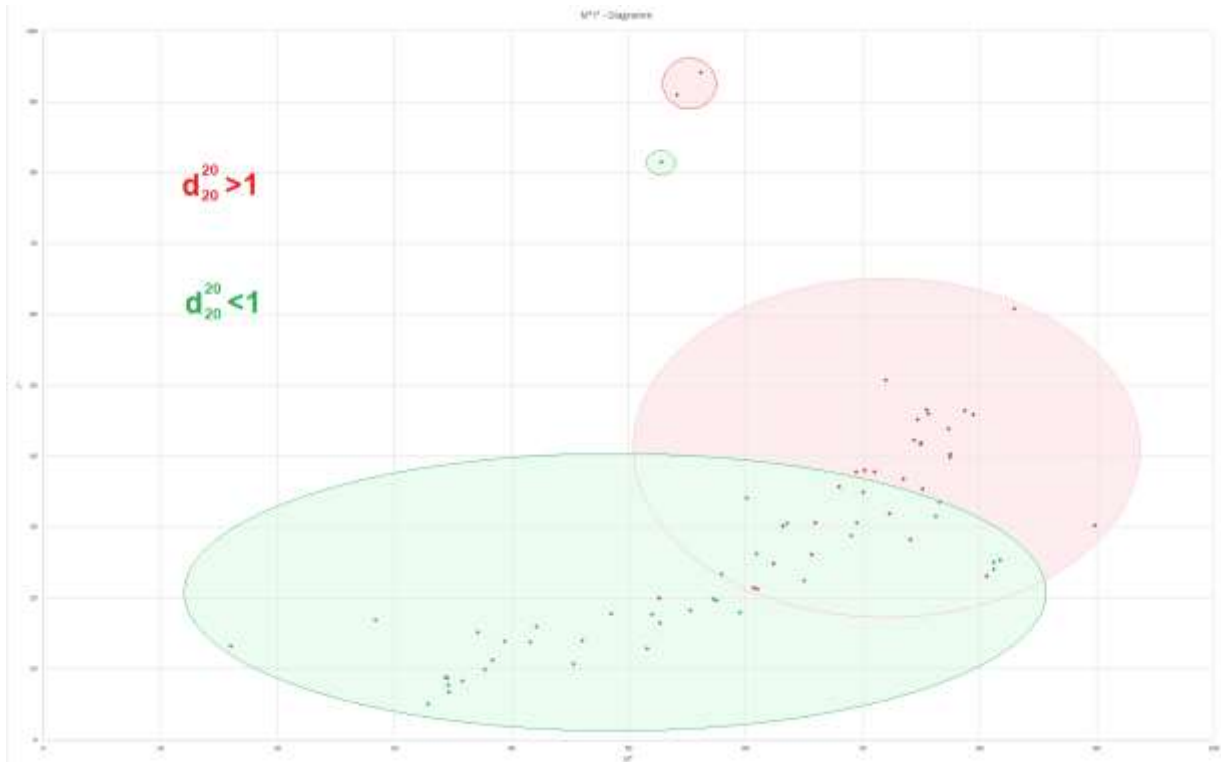
3: $N^* = 56.23$ $i^* = 94.09$ $r^* = 2.10$



13: $N^* = 74.14$ $i^* = 28.11$ $r^* = 4.79$

52: $N^* = 80.69$ $i^* = 22.95$ $r^* = 0.66$

3.1.4.2 N^{*}i^{*}-Diagramm



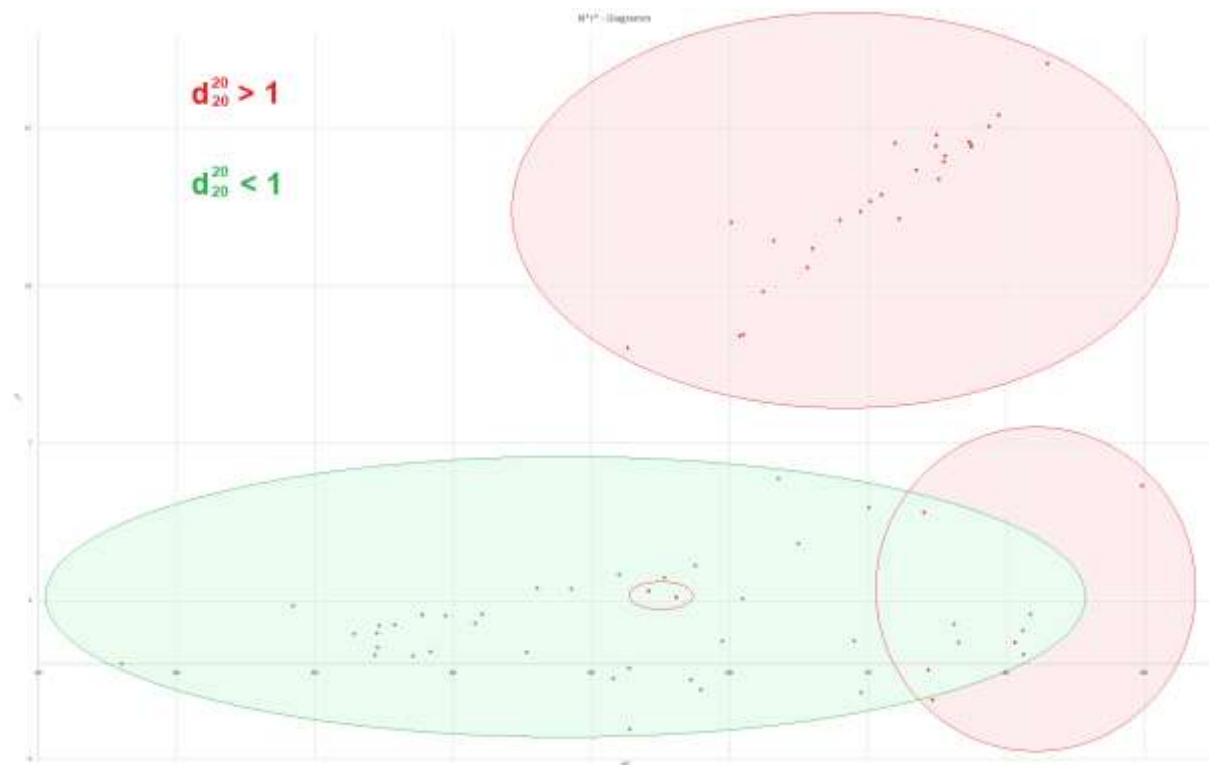
Im N^{*}i^{*}-Diagramm überschneiden sich zwar beide Hauptgruppen (Wichte <1 und Wichte >1), jedoch liegen die Rezyklate mit Wichte >1 eher im rechten Bereich (höherer N^{*}-Wert) des Diagramms. Rezyklat 8 fällt allerdings durch den doch recht niedrigen N^{*}-Wert auf. Die Ursache für den niedrigen N^{*}-Wert („Grauwert“) ist wahrscheinlich in der Semitransparenz dieses Rezyklats zu suchen. Ein Teil des eingestrahelten Infrarotlichts geht dadurch aus Sicht des Sensors doch verloren.



8: N^{*} = 52.7 i^{*} = 19.87 r^{*} = 10.01

3.1.4.3 N*r*-Diagramm

Im N*r*-Diagramm ist wiederum die Abtrennung zwischen PET- und PO-basierenden Rezyklaten zu erkennen. Die beiden mit Wichte >1 und niedrigen N*- sowie r*-Wert versehenen Rezyklate verfügen über einen hohen i*-Wert, sodass zwar im N*r*-Diagramm eine anscheinende Überlappung vorliegt, bei der räumlichen Betrachtungsweise hingegen nicht.



4. Fazit

Sowohl bei den Neuware-Granulaten als auch bei den Rezyklaten scheint eine eindeutige Unterscheidung der einzelnen Artikel mittels Dreibereichsverfahren gegeben. Damit steht eine kostengünstige, einfach zu handhabende und zudem kompakte Messeinheit zur Verfügung, die sowohl im Labor als auch im Inline-Bereich eingesetzt werden kann.