

# פרויקט סוף קורס מבוא להנדסה אופטית

בר בלס

חנן לוגסי

# תיאור המערכת

מטרת המערכת האופטית היא לקבל את התמרת הפורייה של האור המוחזר מ SLM. המערכת מורכבת ממקור אור (לייזר 532 nm) המקרין לעבר SLM (spatial light modulator), האור המוחזר עובר בעדשה, ובמישור פורייה (במוקד) נרצה לאסוף את האור בעזרת מצלמה.

בעבודה זו בחנו שני דרכים להחזיר את האור ממשטח ה SLM:

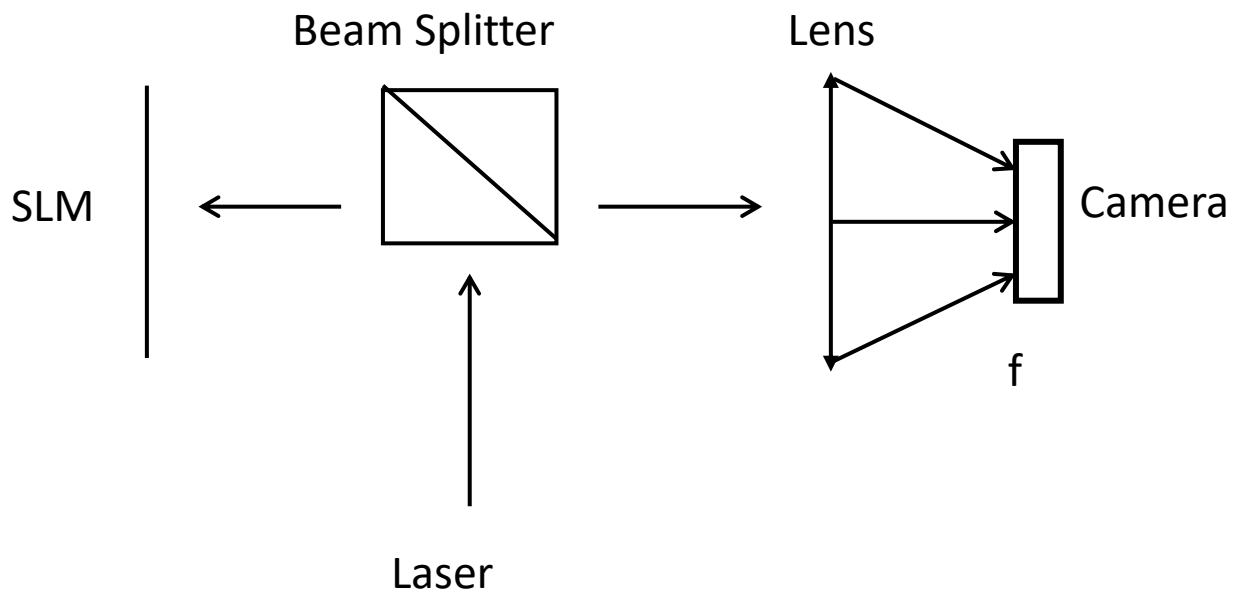
- הצבה של ה SLM בזווית לאלומה הפוגעת.

- על ידי מפצל קרן.

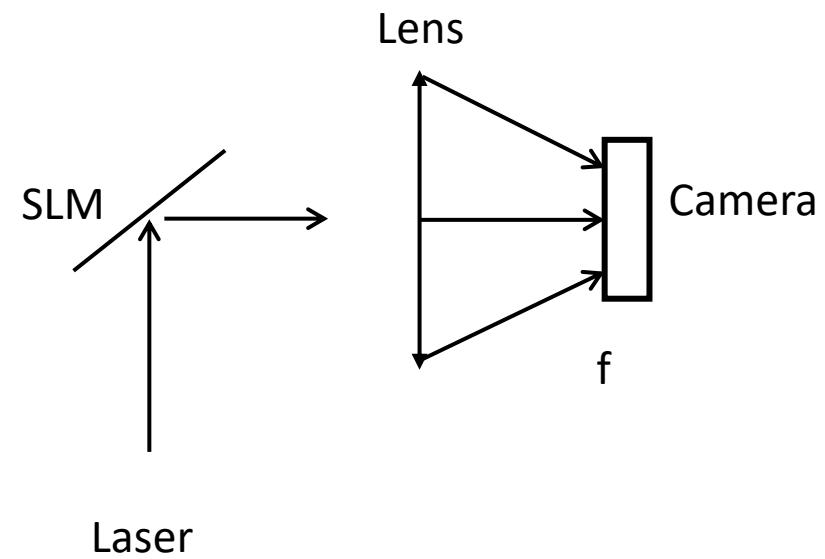
את ה SLM הדמנו ב CODEV על ידי משטח מחזיר ונקודות שדה בזוויות שונות עד לזווית פיזור מקסימאלית שמחושבת בהמשך.

# איור המערכת

אופציה 2



אופציה 1



# דרישות אופטיות ותכנון המערכת

אנו רוצים כי קוטר האלומה הפוגעת ב SLM תהיה כ-90% מהגודל האקטיבי של ה SLM (פגיעה בקצוות ה SLM תיצור דפוסים נוספים בתמונה הסופית).

גודל ה SLM הוא  $8.64 \times 15.36 \text{ mm}$  לכן נגדיר את רוחב הגאוסיאן של האלומה (כשיוורד ל  $1/e^2$ ) להיות  $7.78 \text{ mm}$ .

התחשבנו באלומה כגאוסיאנית אף על פי שניתן היה לקטום את צורת בגאוסיאן על ידי הרחבת האלומה והצבת צמצם, אך בדרך זו נאבד מהעוצמה. דבר זה יכול להיות קריטי במידה ואנו רוצים להשתמש בלייזר ל structural printing.

## דרישות אופטיות ותכנון המערכת

אנו יודעים כי גודל פיקסל ב SLM הוא  $8\mu m$  כלומר המחזור הקצר ביותר הוא  $16\mu m$ . מכאן נוכל לחלץ את זווית הפיזור לפי נוסחת הדיפרקציה:

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{d} = \frac{0.532}{16} \Rightarrow \theta \approx 1.9^\circ$$

כאשר התחשבנו באורך הגל של הלייזר -  $532\text{ nm}$ .

עבור המצלמה, נשתמש במצלמה בעלת חיישן  $\frac{1}{3}''$  כלומר  $4.8 \times 3.6\text{ mm}$

מפה נסיק את אורך המוקד הרצוי על מנת למלא את חיישן המצלמה:

$$f = \frac{h}{\tan(\theta)} = \frac{3.6/2}{\tan(1.9)} \approx 54\text{mm}$$

כאשר עבור  $h$  לקחנו את המימד הקטן של החיישן.

את העדשה נרצה לקרב ככל הניתן ל SLM על מנת לאסוף כמה שיותר מהאור.

# דרישות אופטיות ותכנון המערכת

כמדד לאיכות ביצוע, הסתכלנו על ה MTF, PSF , RIC, spot diagram, WFE.

גודל פיקסל במצלמה הוא כ  $7\mu m$  אם כן, נסתכל על גודל הכתם ונדרוש שיהיה קטן מגודל הפיקסל של המצלמה – מתחת לכך המצלמה תגביל אותנו.

ב PSF נסתכל על ה strehl ratio כשנרצה ביצועים של  $s.r > 0.8$

ב WFE נבחן את קריטריון מרקל וריילי (כאשר איכפת לנו יותר ממרקל)

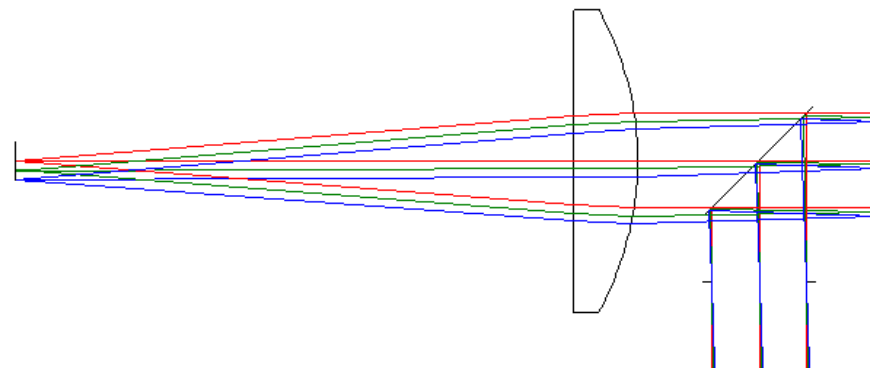
כשכמובן השאיפה באופן כללי היא להיות מוגבלי עקיפה.

# CODEV - סינגלט

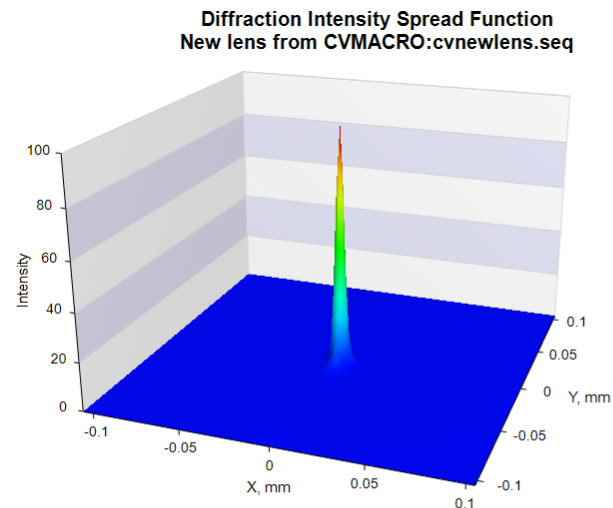
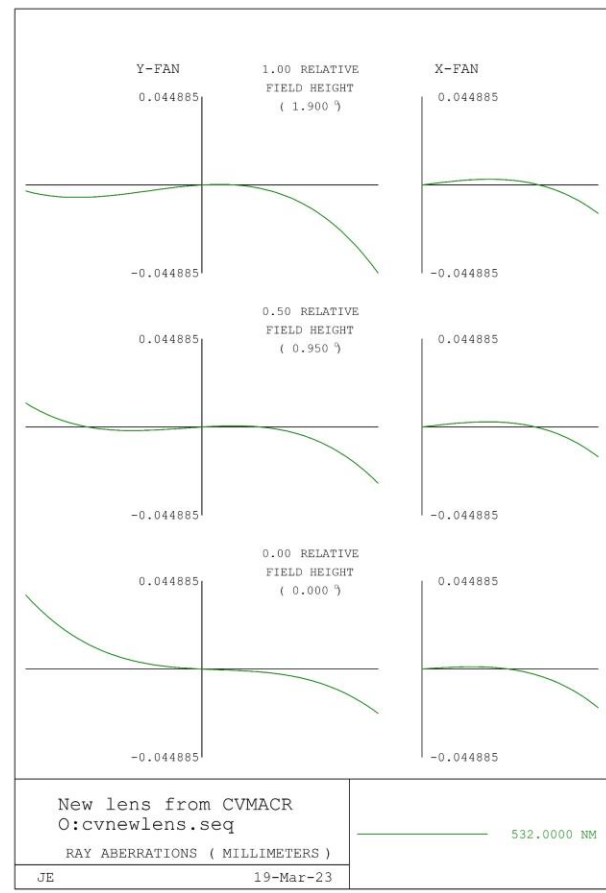
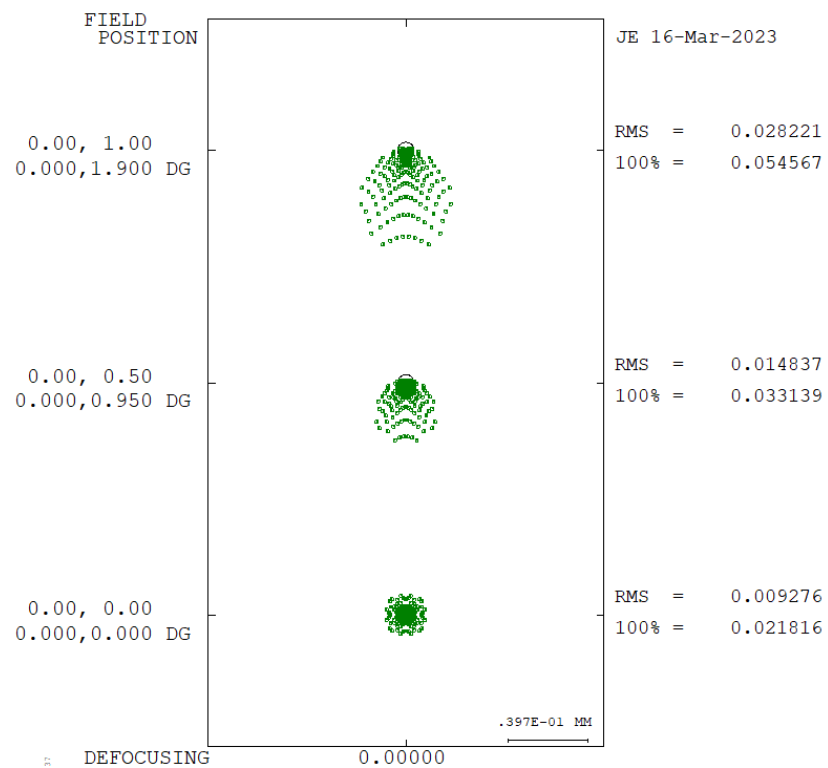
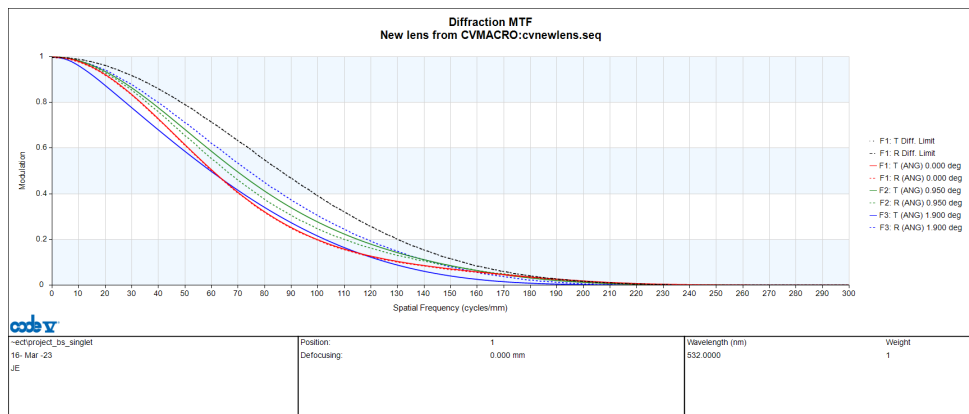
בהתחלה ניסינו לראות את התוצאות שנקבל בעזרת עדשת סינגלט פשוטה. לקחנו עדשה בעלת אורך מוקד  $50\text{mm}$  והתשמנו באופציה של מפצל אלומה.

בחנו שלוש נקודות שדה על פי  $object\ angle$  ב  $0^\circ, 0.95^\circ, 1.9^\circ$  על מנת לדמות את הדיפרקציה מה-SLM.

```
INFINITE CONJUGATES
EFL      49.6658
BFL      46.1777
FFL      -9.6658
FNO       6.3838
IMG DIS  45.9887
OAL      25.3000
PARAXIAL IMAGE
HT        1.6476
ANG        1.9000
ENTRANCE PUPIL
DIA       7.7800
THI        0.0000
EXIT PUPIL
DIA      39.9761
THI     -209.0208
```



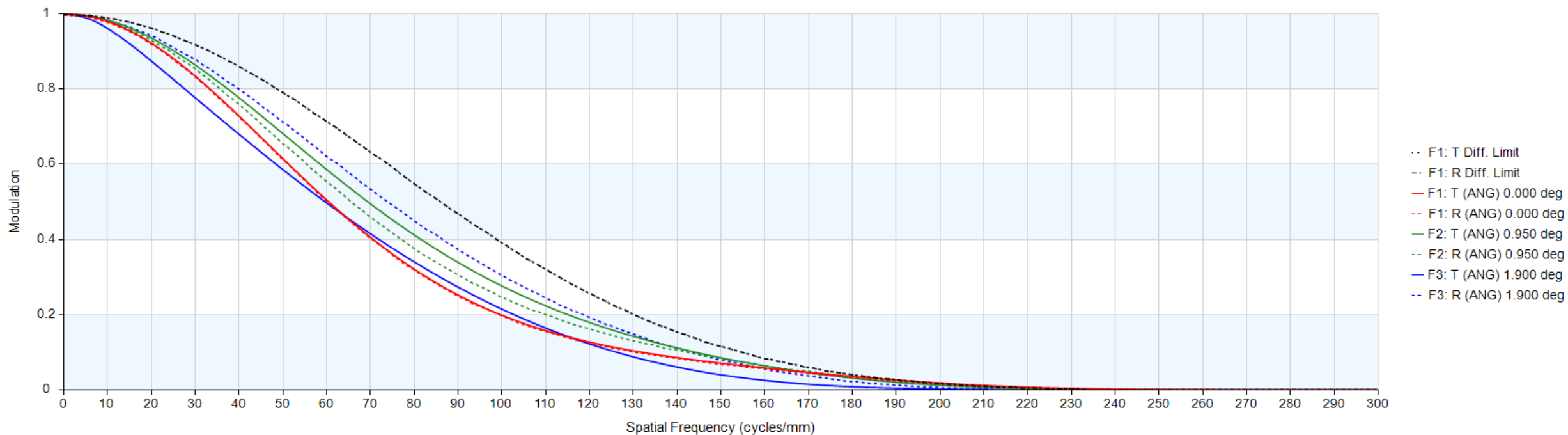
# CODEV – סינגלט, ביצועים



Field (ANG):	3, (0.000, 1.900) deg	Wavelength (nm)
Position:	1	532.0000
Defocusing:	0.000 mm	
Strehl Ratio:	0.652	



Diffraction MTF  
New lens from CVMACRO:cvnewlens.seq

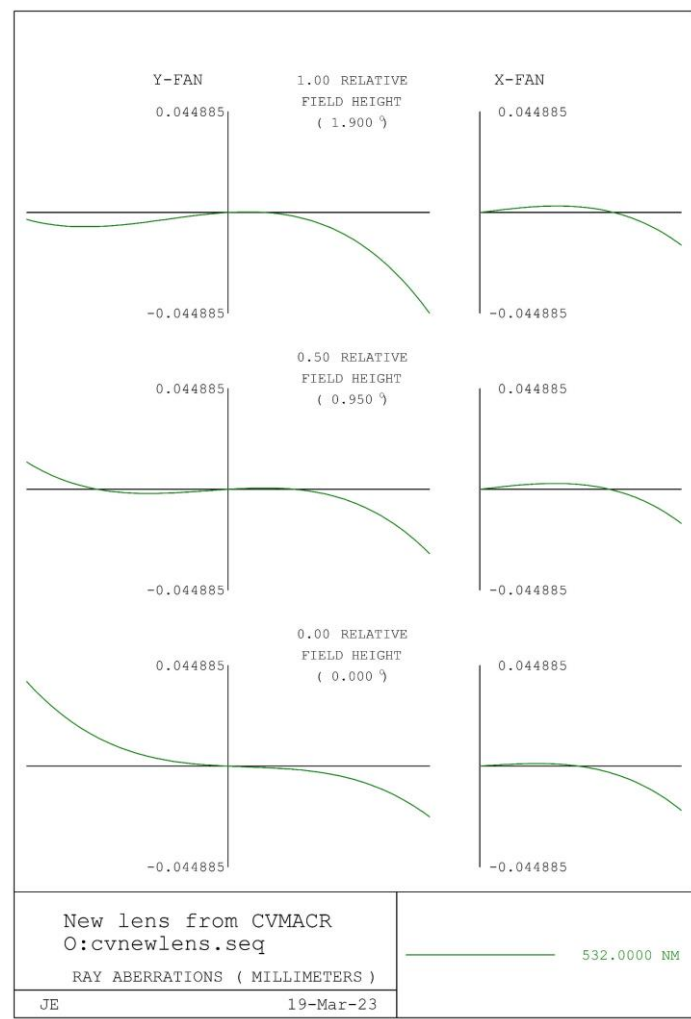


~ect\project\_bs\_singlet  
16- Mar -23  
JE

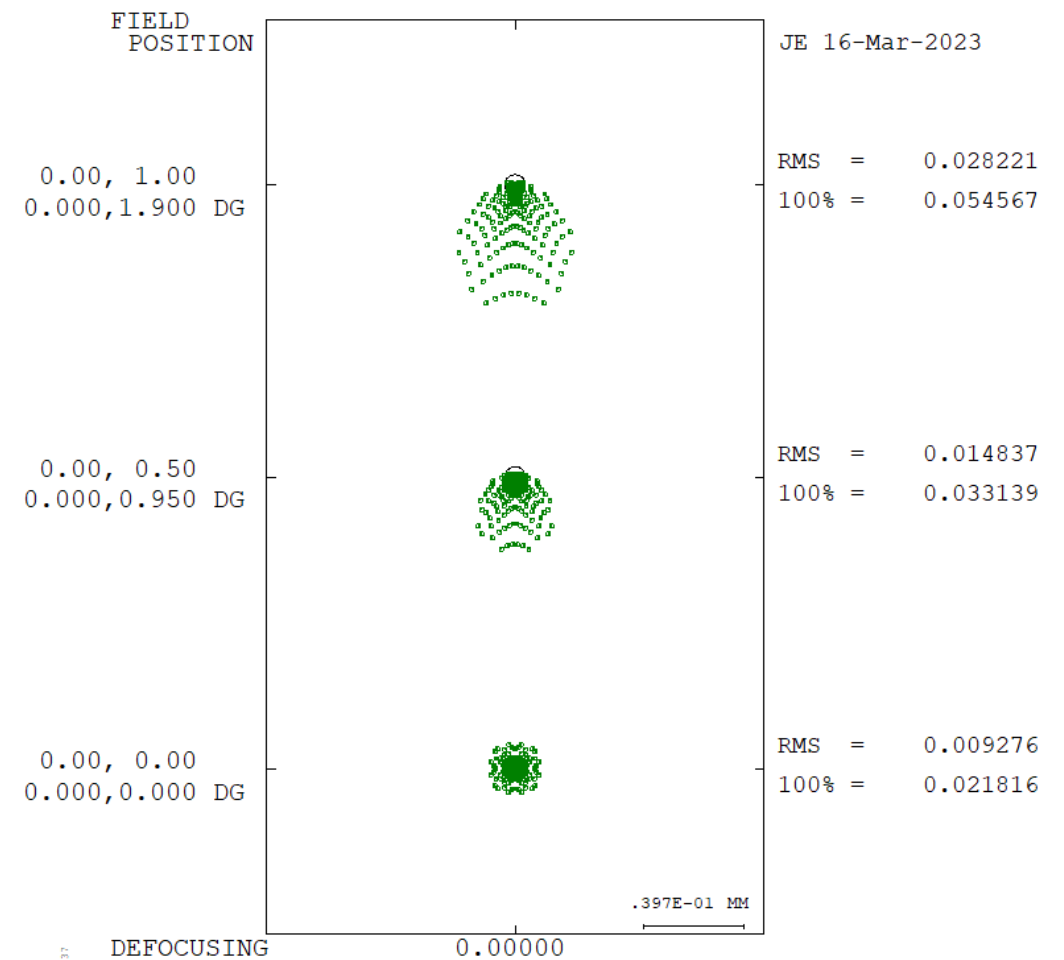
Position: 1  
Defocusing: 0.000 mm

Wavelength (nm) 532.0000  
Weight 1

אנו רואים כי הביצועים אמנם לא מוגבלי עקיפה, אך הם גם לא מאוד גרועים.

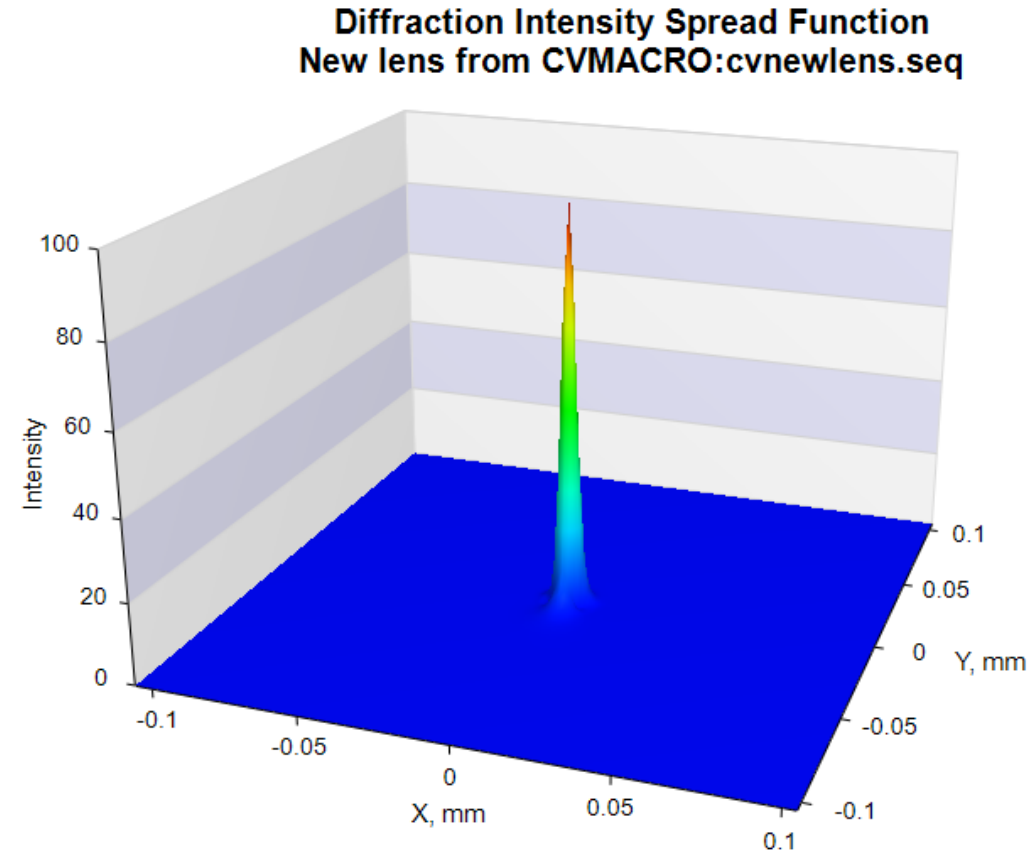


בעיוותים ניתן לראות בבירור עיוות ספרי בנקודת השדה המרכזית בעוד שבנקודות השדה האחרות אנו רואים כי התווספה גם קומה.

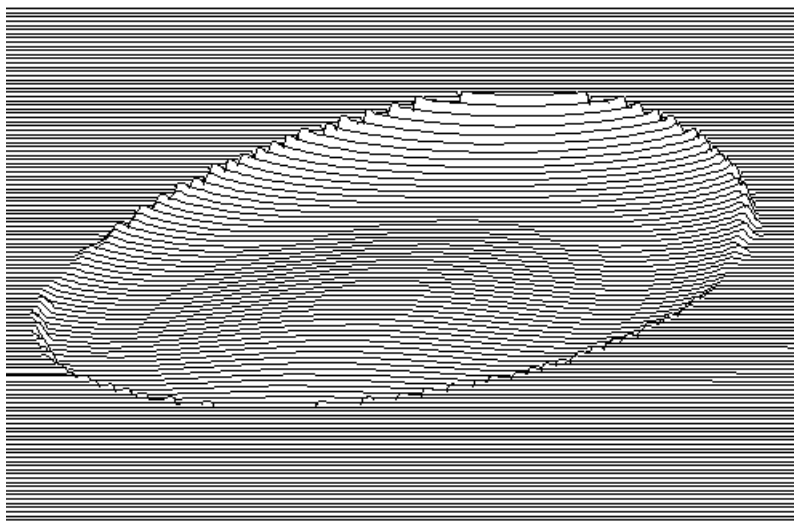


אנו רואים כי הביצועים אינם מספקים. גם עבור נקודת השדה המרכזית, גודל הכתם ( $21\mu m$ ) גדול פי 3 מגודל הפיקסל במצלמה

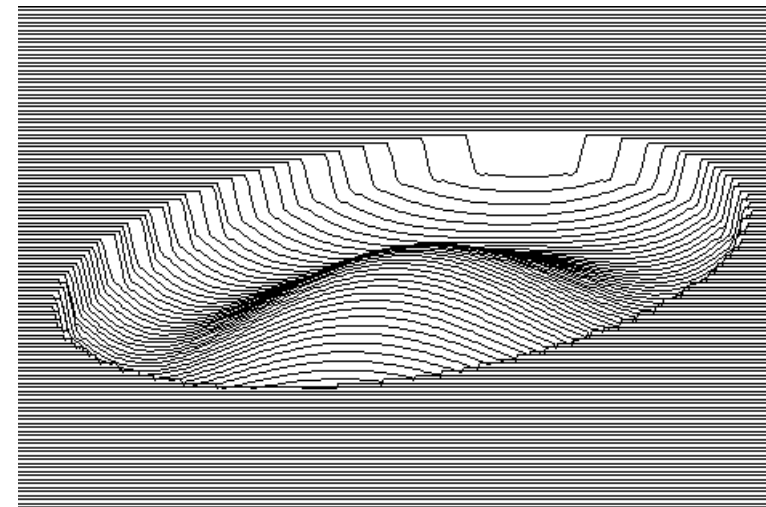
עבור ה psf הסתכלנו על נקודת  
השדה השלישית (בעלת הזווית  
הגדולה ביותר) וניתחנו את  
הביצועים שלה, בהנחה שהביצועים  
של נקודות השדה האחרות טובות  
יותר.  
כאן נוכל להסתכל על ה strehl ratio  
כשנרצה ביצועים של  $s.r > 0.8$   
אנו רואים כי עבור הסינגלט קיבלנו  
יחס של 0.652 ולכן לא מספיק טוב.



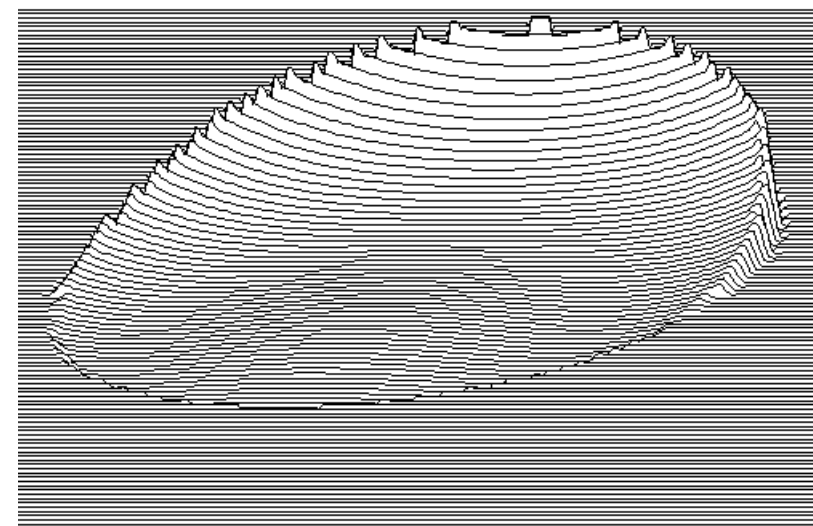
Field (ANG):	3, (0.000, 1.900) deg	Wavelength (nm)
Position:	1	532.0000
Defocusing:	0.000 mm	
Strehl Ratio:	0.652	



Wave aberrations in hundredths of wavelength 532.0NM  
 RMS = 0.143 waves P-V = 1.521 waves



Wave aberrations in hundredths of wavelength 532.0NM  
 RMS = 0.100 waves P-V = 0.318 waves



Wave aberrations in hundredths of wavelength 532.0NM  
 RMS = 0.293 waves P-V = 2.667 waves

גם כאן ניתן לראות כי הביצועים אינם מספקים.  
 באופן כללי נרצה לקריטריון מרקל, כלומר  $RMS < 0.07\lambda$   
 מאחר ואנו מצפים לביצועים פחות או יותר שווים על פני  
 המערכת שלנו נוכל להסתכל גם על  $P - V < \frac{\lambda}{4}$ . עבור הסינגלט  
 לא קיבלנו מדדים קרובים לרצוי.

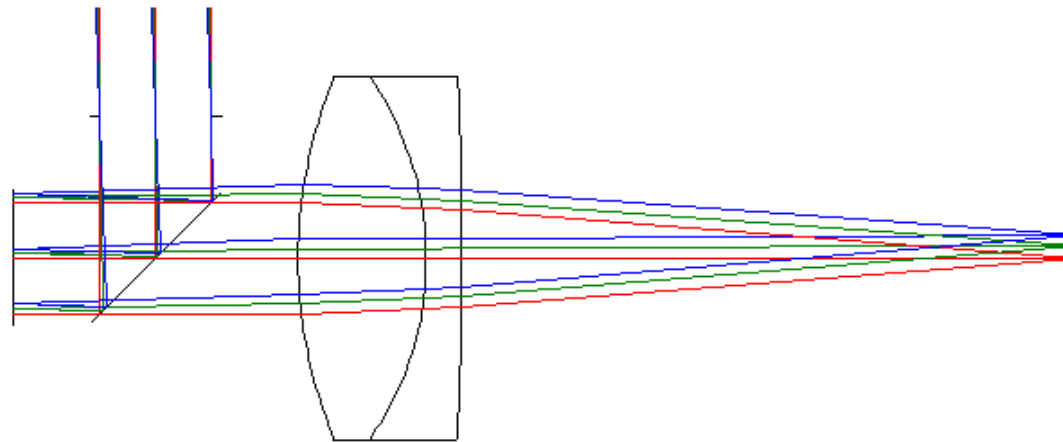
# CODEV – דובלט + מפצל

## INFINITE CONJUGATES

EFL	50.1252
BFL	43.3922
FFL	-10.0074
FNO	6.4428
IMG DIS	43.3307
OAL	31.5000
PARAXIAL IMAGE	
HT	1.6628
ANG	1.9000
ENTRANCE PUPIL	
DIA	7.7800
THI	0.0000
EXIT PUPIL	
DIA	38.9685
THI	-207.6753

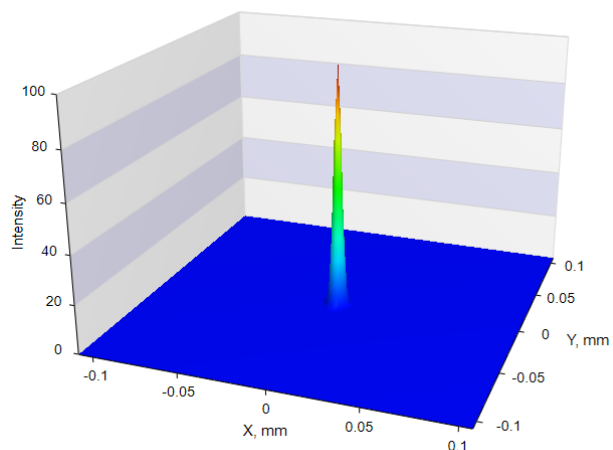
העדשה הבאה שניסינו היא דובלט.

עבור עדשה זו ניסוי לעשות את שתי האופציות – עם מפצל קרן וללא מפצל קרן כאשר מציבים את ה SLM בזווית.



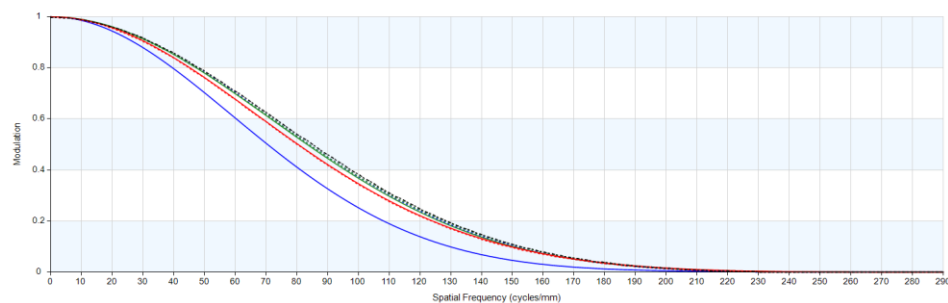
# CODEV – דובלט + מפצל, ביצועי

Diffraction Intensity Spread Function  
New lens from CVMACRO:cvnewlens.seq



Field (ANG):	3, (0.000, 1.900) deg	Wavelength (nm)
Position:	1	532.0000
Defocusing:	0.000 mm	
Strehl Ratio:	0.805	

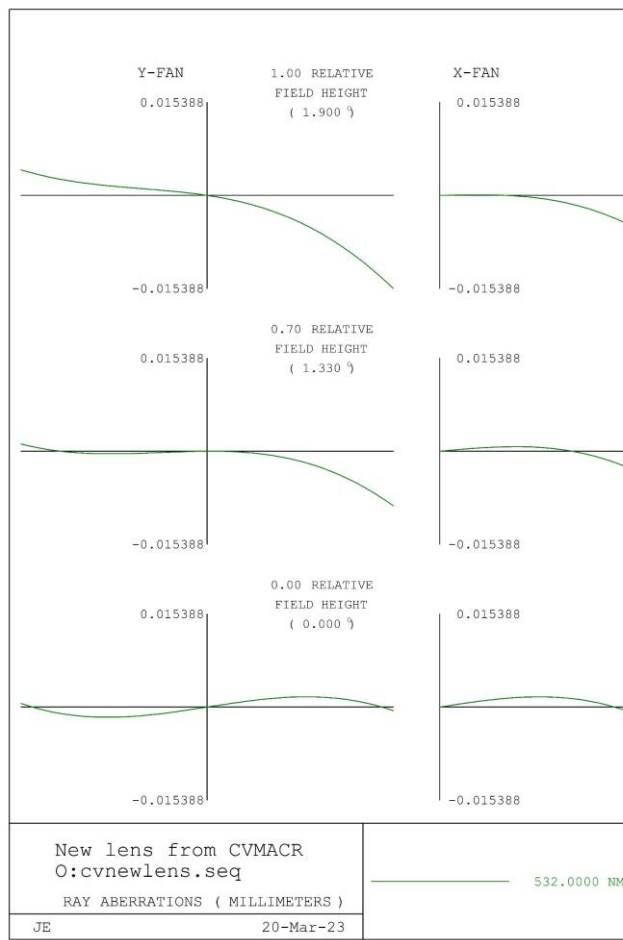
Diffraction MTF  
New lens from CVMACRO:cvnewlens.seq



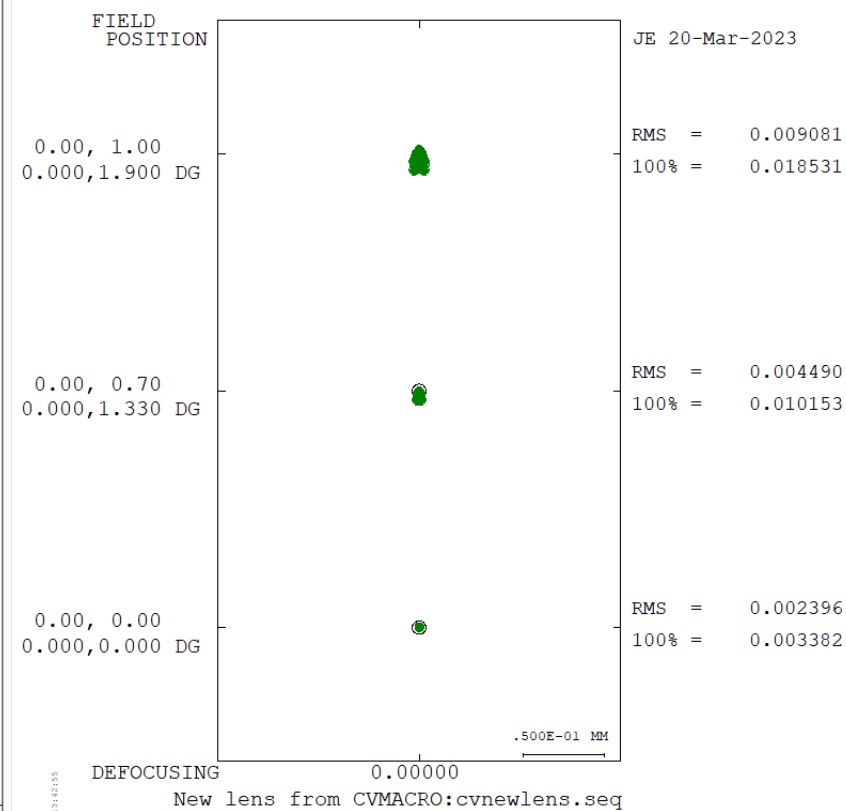
codev

~ectproject\_bs\_doublet  
20-Mar-23  
JE

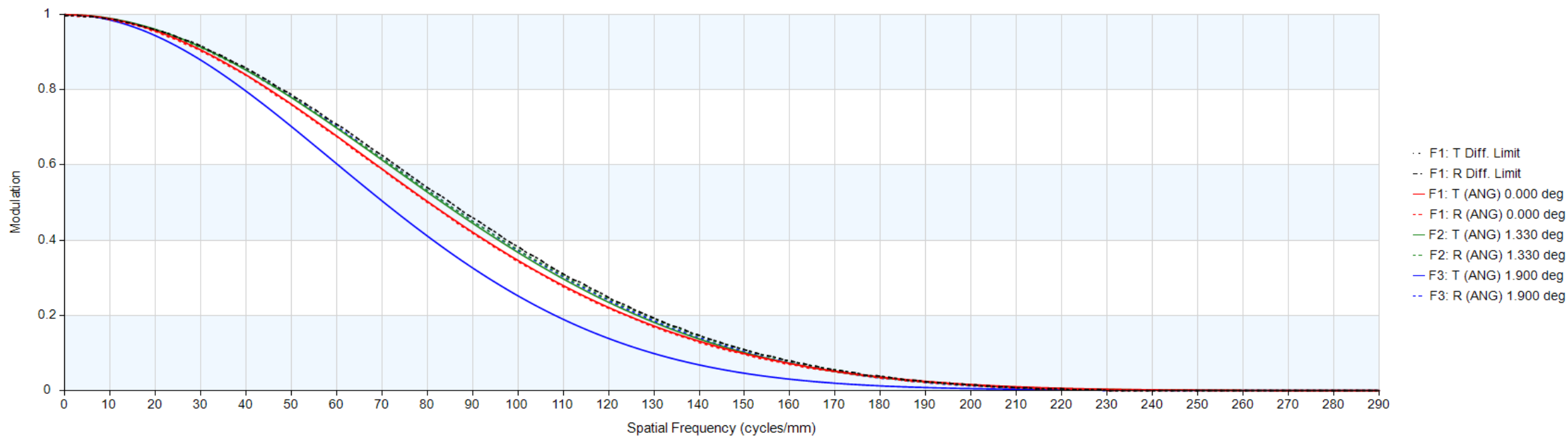
Position: 1  
Defocusing: 0.000 mm  
Wavelength (nm): 532.0000



FIELD POSITION



# Diffraction MTF New lens from CVMACRO:cvnewlens.seq



~ect\project\_bs\_doublet

20- Mar -23

JE

Position:

1

Defocusing:

0.000 mm

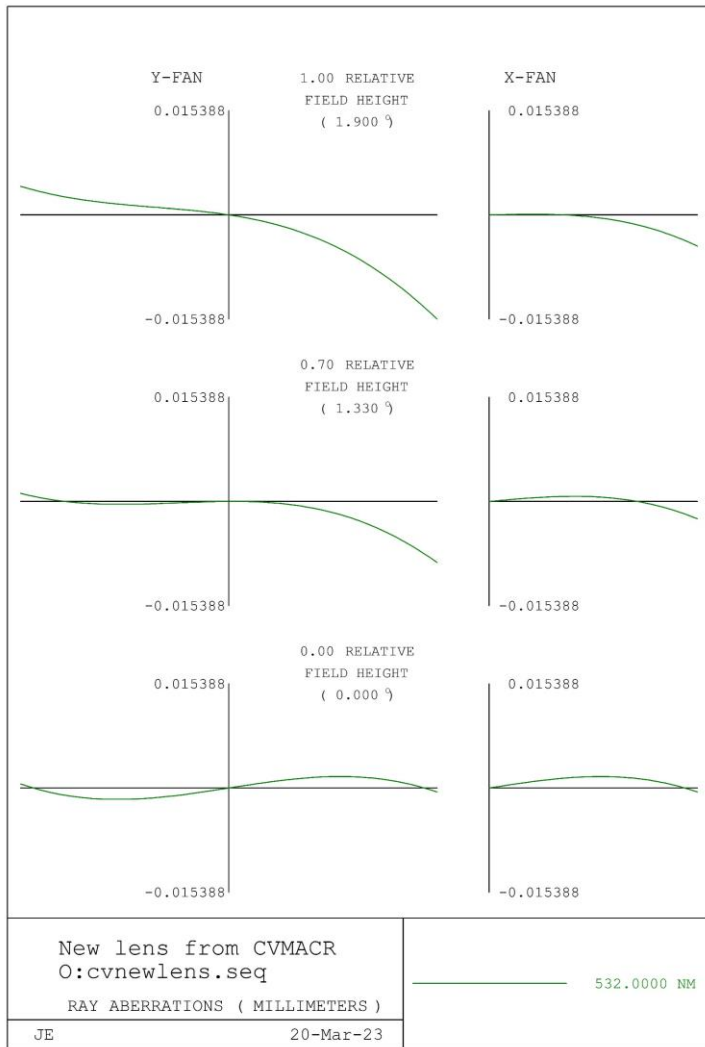
Wavelength (nm)

532.0000

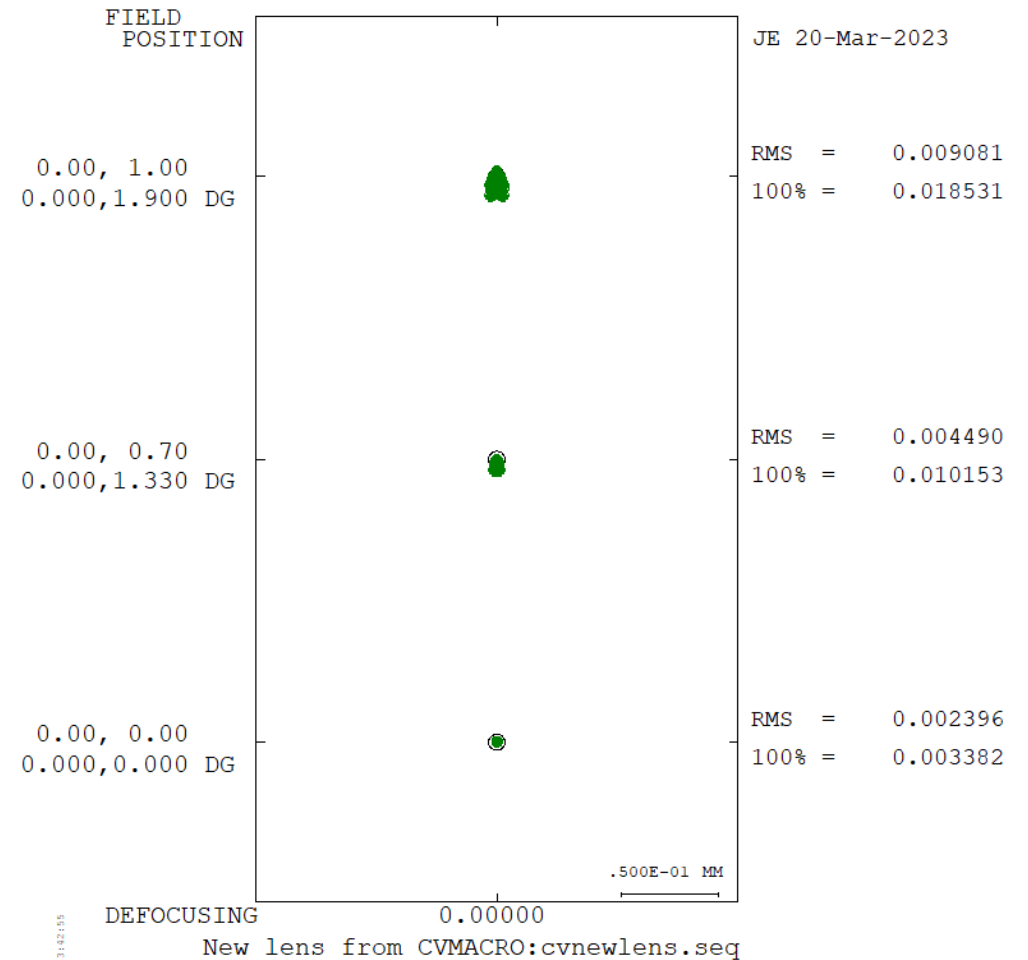
Weight

1

ניתן לראות שכעת הביצועים הרבה יותר טובים.  
נקודת השדה הקיצונית מעט פחות טובה מהאחרות אך עדיין במצב יותר טוב ממה  
שקיבלנו בעזרת הסינגלט.  
שתי נקודות השדה האחרות כבר ממש קרובות לגבול עקיפה.



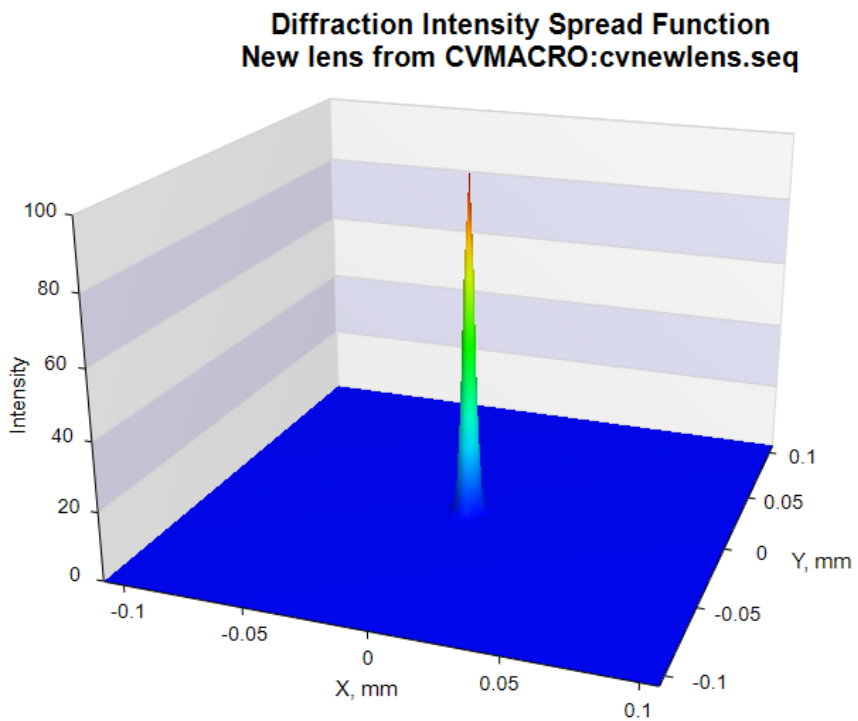
ניתן לראות כי יש תיקון מסויים לעיוות הספרי ובאופן כללי גודל העיוותים קטן יותר. שוב ניתן לראות (בעיקר לפי ה RIC) שמחוץ לציר המרכזי מתווספת גם קומה.



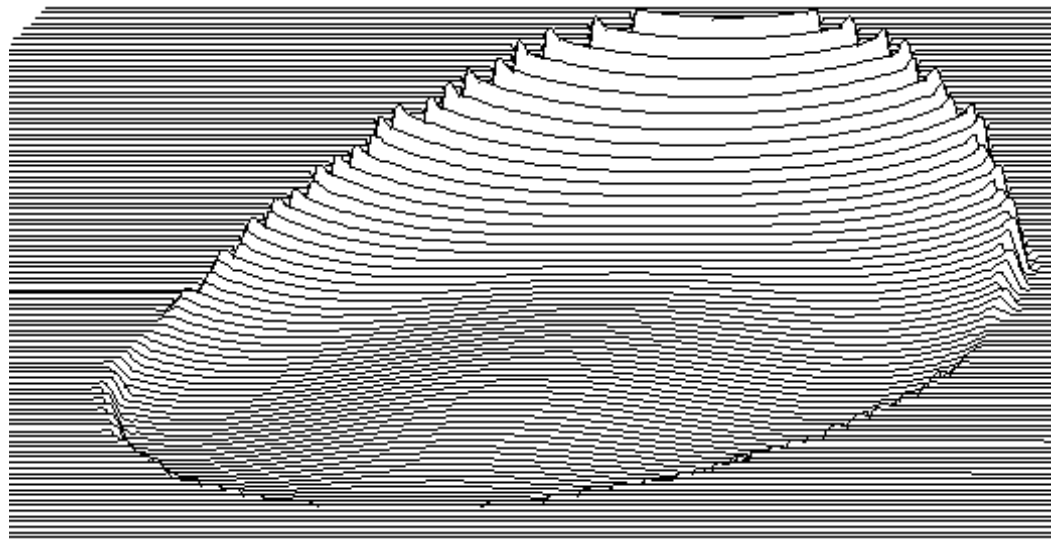
עבור הדובלט המצב כבר יותר טוב. ניתן לראות שבציר המרכזי וגם בזוויות קטנות אנו מוגבלי עקיפה. בזווית הסף הרלוונטית לנו אנו כבר לא מוגבלי עקיפה וגודל הכתם הוא בערך פי 2.5 מגודל פיקסל.



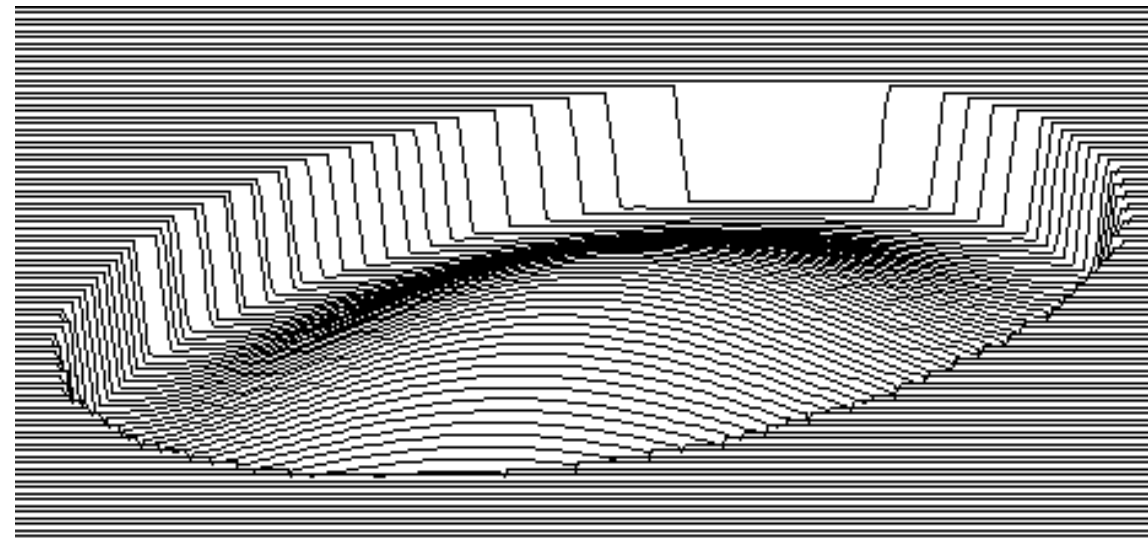
אנו רואים כעת כי עבור הדובלט אנו עוברים את היחס הרצוי של 0.8 גם עבור נקודת השדה הקיצונית.



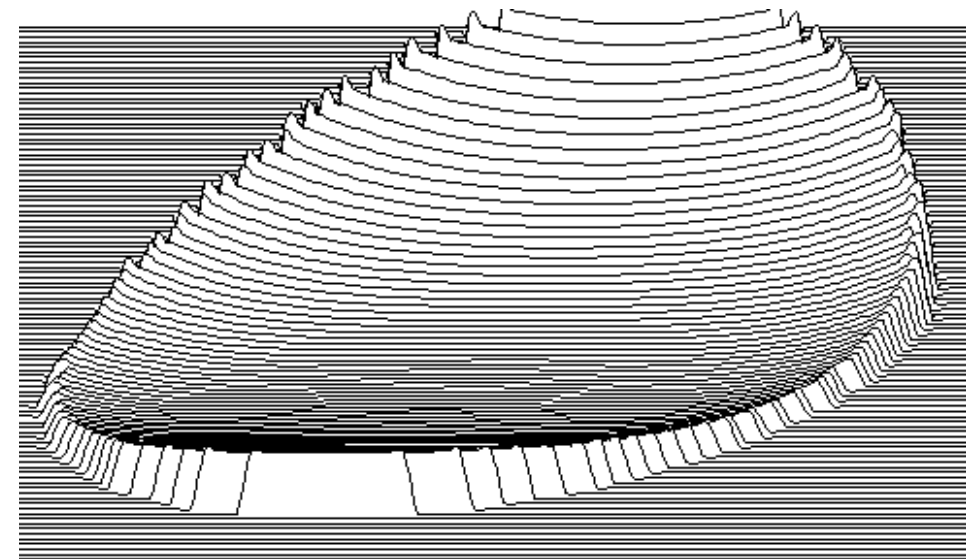
Field (ANG):	3, (0.000, 1.900) deg	Wavelength (nm)
Position:	1	532.0000
Defocusing:	0.000 mm	
Strehl Ratio:	0.805	



Wave aberrations in hundredths of wavelength 532.0NM  
 RMS = 0.041 waves P-V = 0.437 waves



Wave aberrations in hundredths of wavelength 532.0NM  
 RMS = 0.043 waves P-V = 0.151 waves



Wave aberrations in hundredths of wavelength 532.0NM  
 RMS = 0.088 waves P-V = 0.762 waves

בהסתכלות על ה WFE אנו רואים כי עבור נקודת השדה המרכזית אנו עומדים בשני הקריטריונים. עבור נקודת השדה המרכזית ה RMS מעט קטן יותר (אף על פי שה P-V גדול יותר). נקודת השדה הקיצונית כצפוי נותנת את הביצועים הכי פחות טובים, אבל עם זאת הם לא גרועים מאוד.

באופן כללי זו בהחלט עדשה שניתן להשתמש בה במערכת שלנו. יהיו מעט עיוותים בקצוות אך לא משהו שלא ניתן להסתדר איתו.

# Tolerances

נבדוק את השוני בביצועים עבור ארבעה פרמטרים:

- הטיית העדשה.

- הטיית משטח ה SLM.

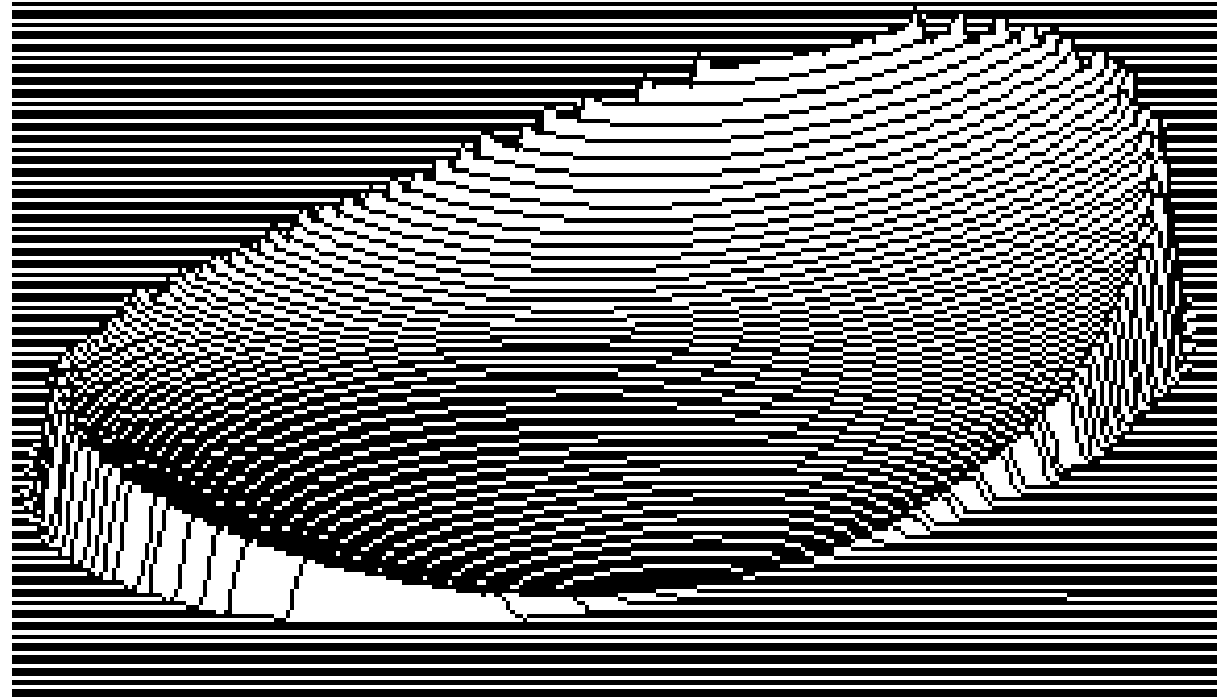
- מרכז העדשה ביחס לאלומה ב-Y.

- מרכז העדשה בציר Z.

אנו מניחים כי את מרכז האלומה ב SLM ניתן לראות על פי העין מאחר ואנו דורשים ממילא כי האלומה תהיה קטנה משטח ה SLM.

את כל הנ"ל נבדוק עבור נקודת השדה ב-  $1.33^\circ$ , תוך הנחה שגם אם הביצועים בקצה מעט פחות טובים נוכל להסתדר איתם.

# הטיית העדשה

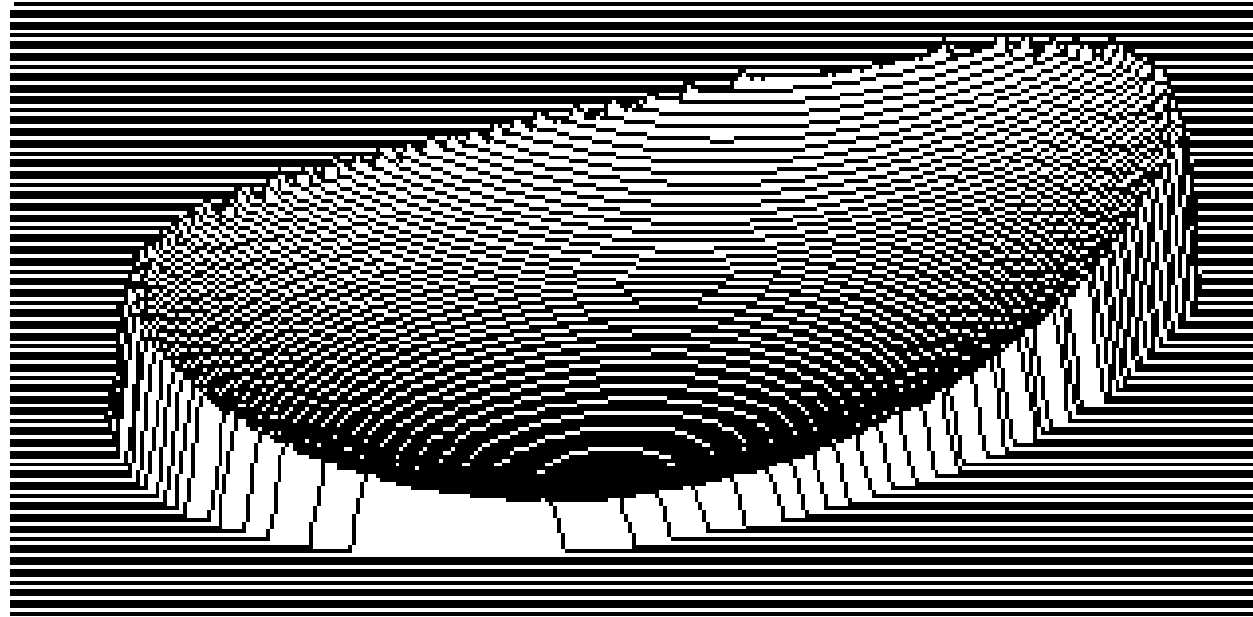


Wave aberrations in hundredths of wavelength      532.0NM  
RMS = 0.071 waves      P-V = 0.647 waves

ההטייה הגדולה ביותר שהגענו אליה על פי הקריטריון שהצבנו, היא  $1.4^\circ$  שהביאה אותנו ל  $RMS = 0.071\lambda$ .

זוהי ודאי זווית שלא נוכל להבחין על פי העין ונצטרך לכוון את זווית העדשה בצורה מדוייקת יותר.

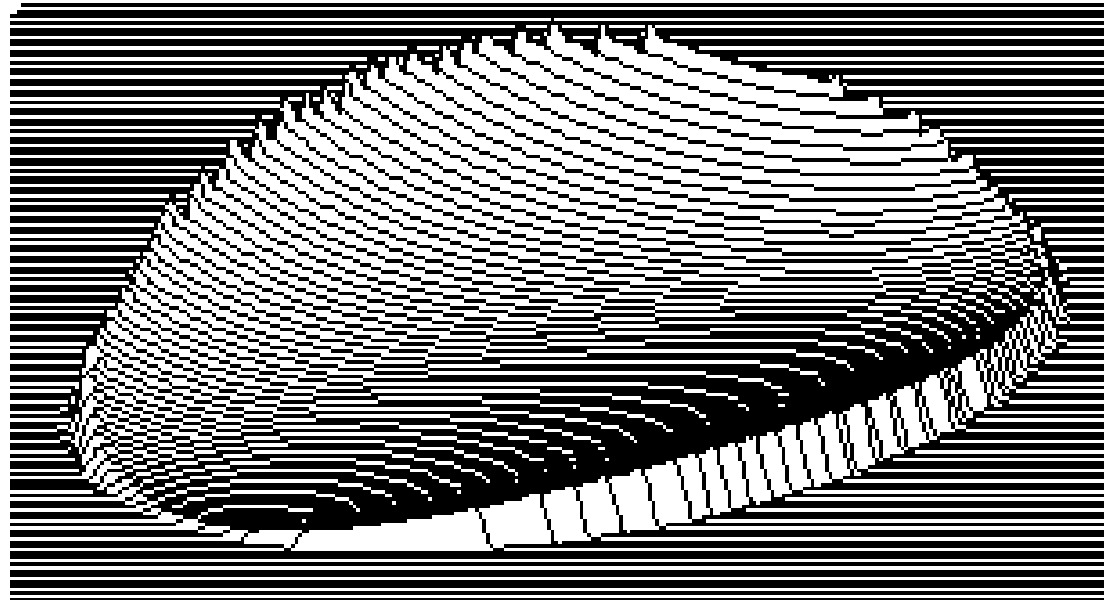
# הטיית העדשה



Wave aberrations in hundredths of wavelength      532.0NM  
RMS =    0.233 waves                      P-V =    1.601 waves

בדקנו מה יהיו התוצאות עבור סטייה של 3 מעלות, תוך הנחה שזו בערך הסטייה שנוכל להבחין בעין. כפי שניתן לראות התוצאות לא קרובות לרצוי, מה שמחזק את ההבנה כי נצטרך כוונן מדויק יותר מעין אנושית.

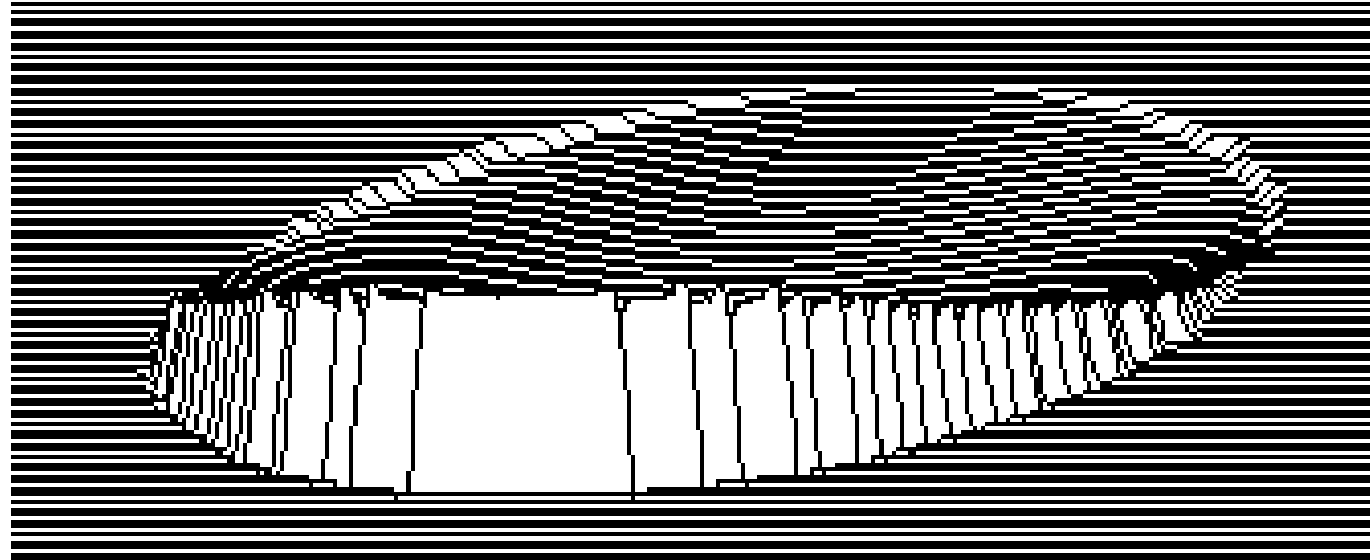
# הטיית ה SLM



Wave aberrations in hundredths of wavelength      532.0NM  
RMS =    0.070 waves                      P-V =    0.670 waves

עבור הטיית ה SLM המצב היה דומה אך אפילו רגיש עוד יותר.  
קיבלנו זווית הסטה מקסימאלית של  $1.25^\circ$  על מנת לעמוד בקריטריון של  $0.07\lambda$   
שוב, אנו מבינים כי מבחינת זוויות נצטרך כוונן מדויק יותר מהעין.

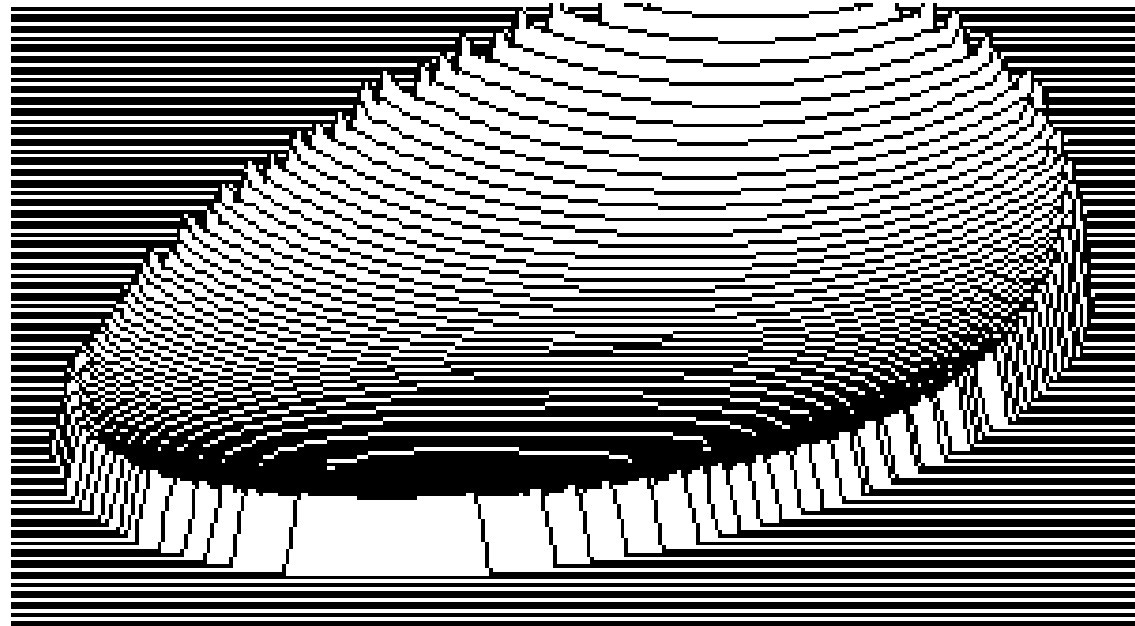
## מרכז העדשה – ציר Y



Wave aberrations in hundredths of wavelength 532.0NM  
RMS = 0.070 waves P-V = 0.676 waves

כאן הגענו לסטייה של  $2.7\text{ mm}$  על מנת לעמוד בדרישות. זו אמנם סטייה שכנראה נוכל להבחין בעין, אך עדיין הכוונון צריך להיעשות בצורה עדינה ומדוייקת.

## מרכז העדשה – ציר Z



Wave aberrations in hundredths of wavelength 532.0NM  
RMS = 0.070 waves P-V = 0.601 waves

בציר זה, כצפוי יש יותר רגישות מאחר וכשאנו זזים בציר זה אנו יוצאים מפוקוס.  
הגענו לערך של  $41\mu m$  על מנת לעמוד בדרישות.  
דבר זה יכול להעיד כי עדיף לעבוד עם עדשת צילום בעלת פוקוס פנימי.



# CODEV – דובלט ללא מפצל

כעת, ניסינו את אותה העדשה בדיוק אך ללא המפצל קרן, והצבנו את ה SLM בזווית 15 מעלות מאחר וה SLM לא עובד טוב בזוויות גדולות.

## INFINITE CONJUGATES

EFL -50.1252

BFL -43.3922

FFL -12.0074

FNO 6.4428

IMG DIS -43.3283

OAL -29.5000

## PARAXIAL IMAGE

HT 1.6628

ANG 1.9000

## ENTRANCE PUPIL

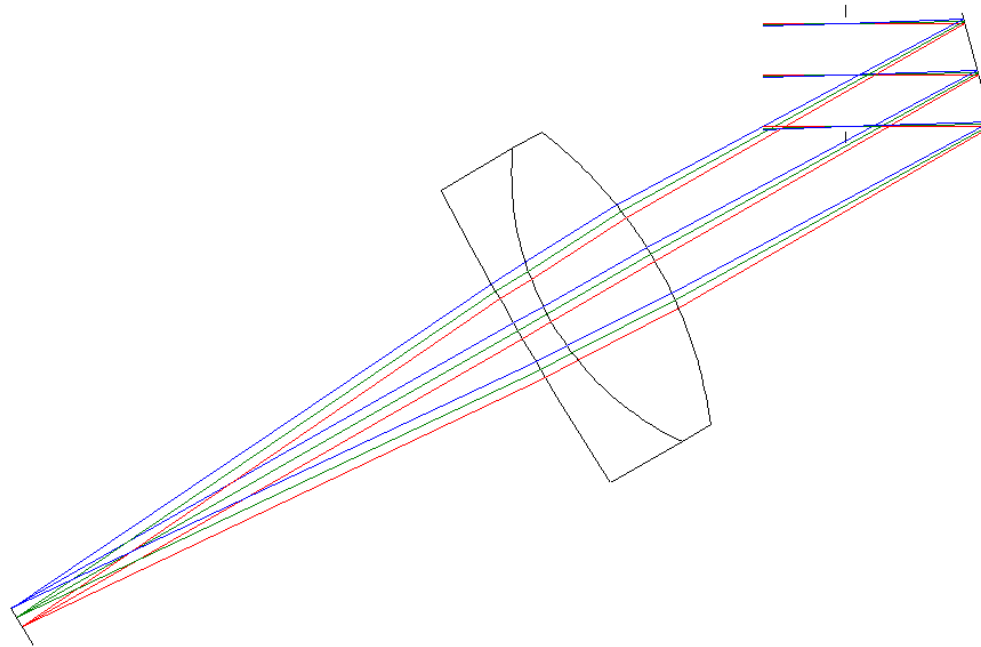
DIA 7.7800

THI 0.0000

## EXIT PUPIL

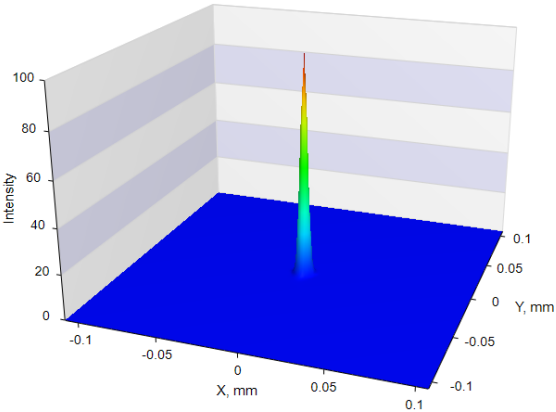
DIA 32.4778

THI 165.8565



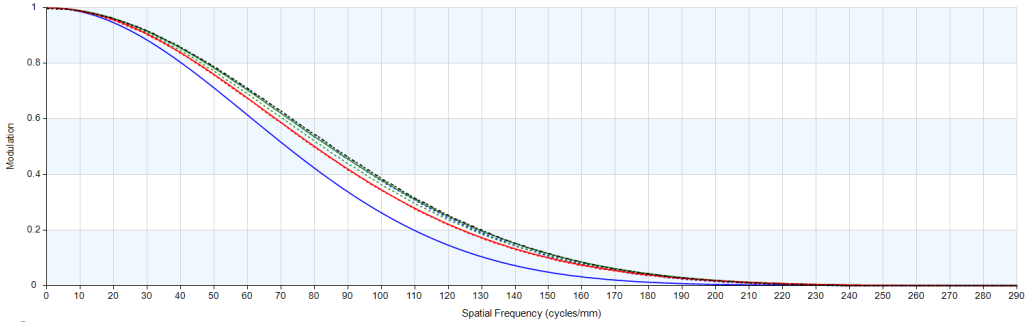
# CODEV – דובלט ללא מפצל, ביצועים

Diffraction Intensity Spread Function  
New lens from CVMACRO:cvnewlens.seq



Field (ANG):	3, (0.000, 1.900) deg	Wavelength (nm)
Position:	1	532.0000
Defocusing:	0.000 mm	
Strehl Ratio:	0.810	

Diffraction MTF  
New lens from CVMACRO:cvnewlens.seq



FIELD  
POSITION

0.00, 1.00  
0.000,1.900 DG

0.00, 0.50  
0.000,0.950 DG

0.00, 0.00  
DG

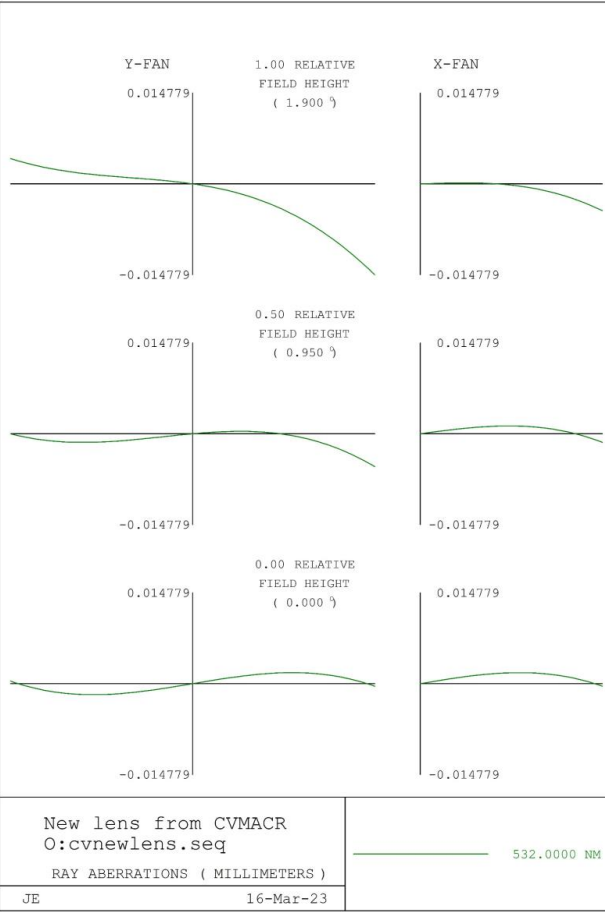
-- F1: T Diff. Limit  
-- F1: R Diff. Limit  
-- F1: T (ANG) 0.000 deg  
-- F1: R (ANG) 0.000 deg  
-- F2: T (ANG) 0.950 deg  
-- F2: R (ANG) 0.950 deg  
-- F3: T (ANG) 1.900 deg  
-- F3: R (ANG) 1.900 deg

JE 16-Mar-2023

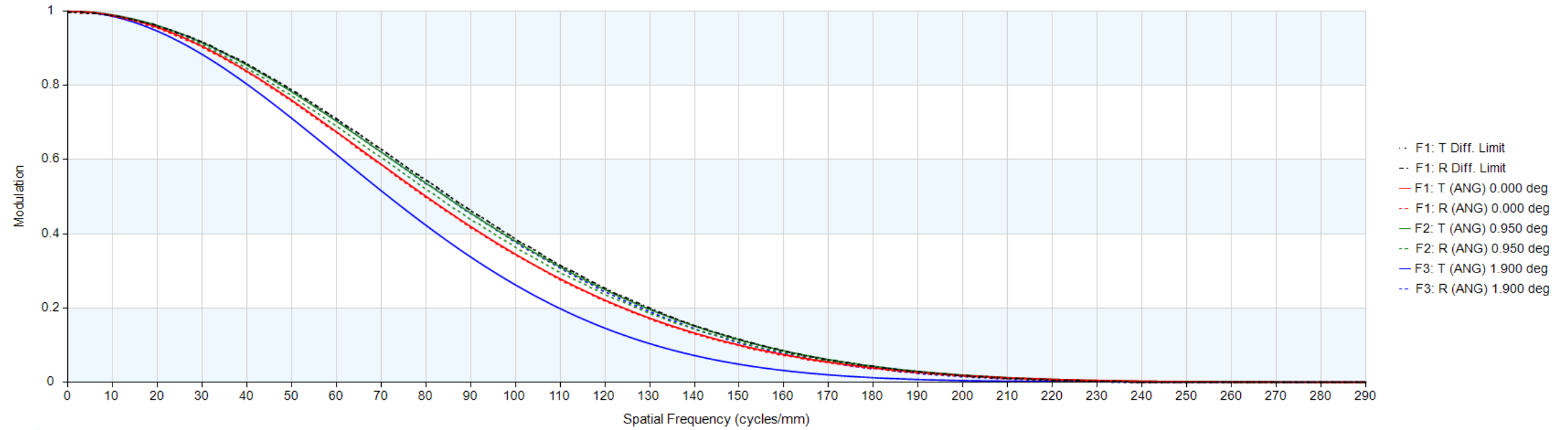
RMS = 0.01045  
100% = 0.02125

RMS = 0.00338  
100% = 0.00818

RMS = 0.00249  
100% = 0.00358



Diffraction MTF  
New lens from CVMACRO:cvnewlens.seq

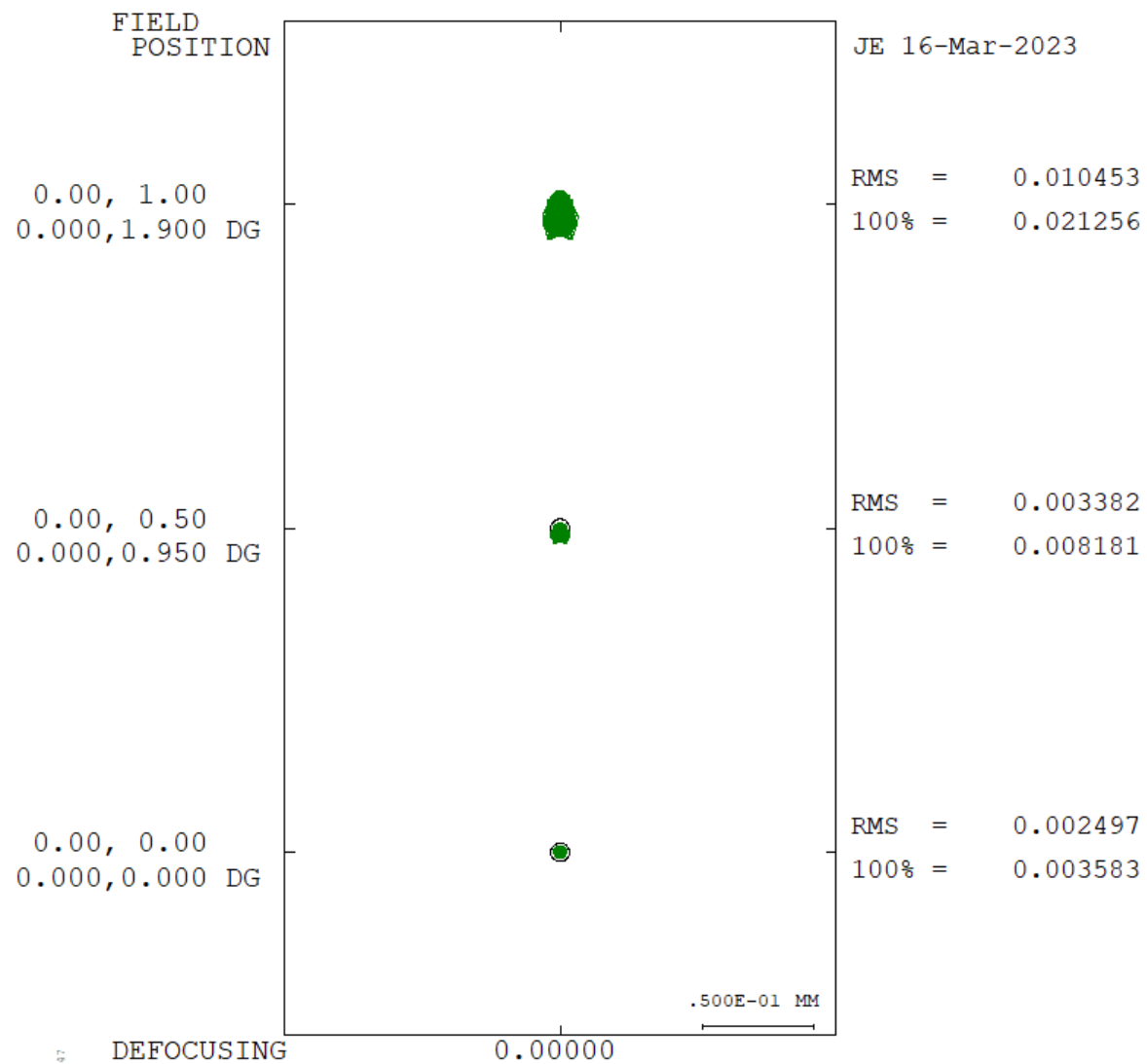
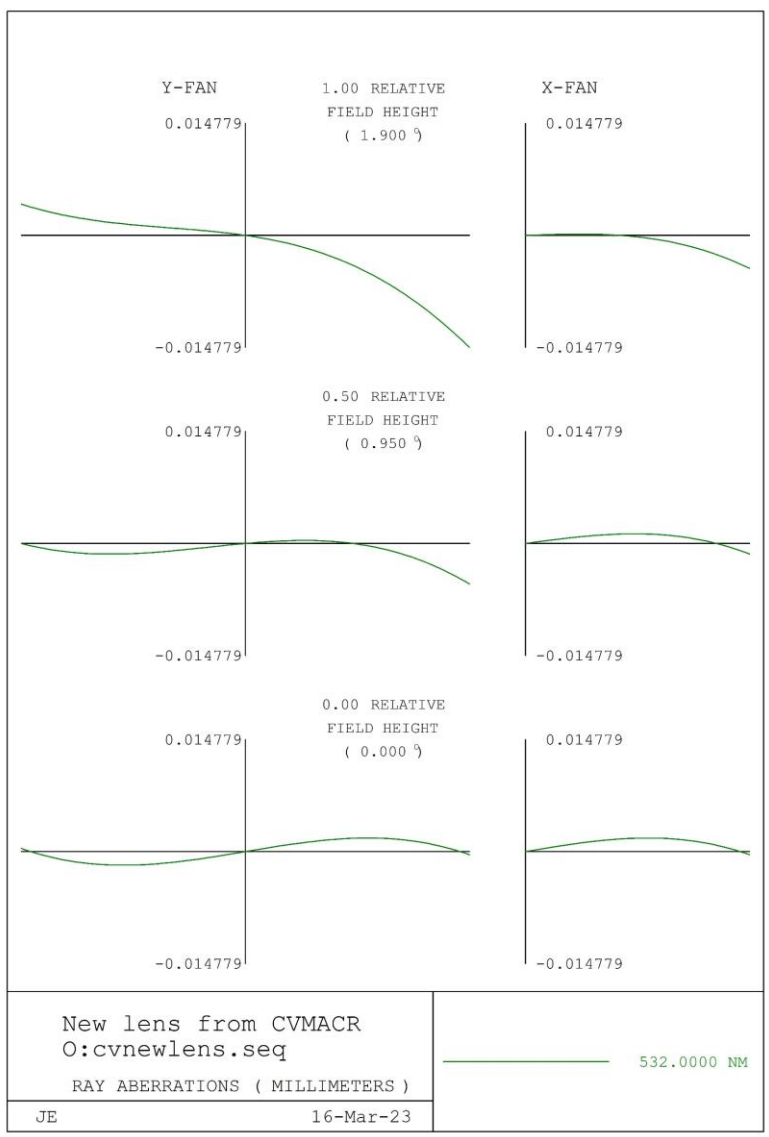


~ct\project\_angle\_final  
16- Mar -23  
JE

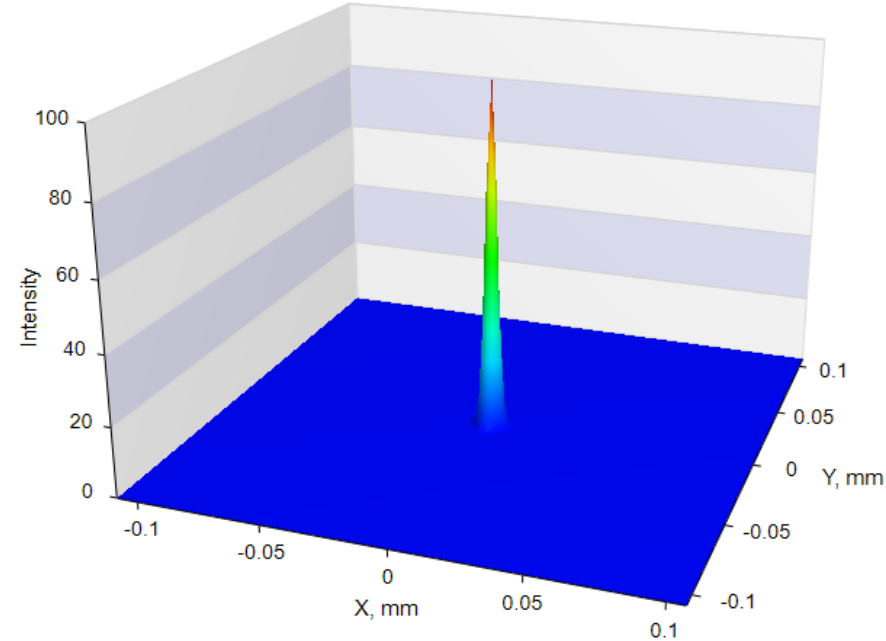
Position: 1  
Defocusing: 0.000 mm

Wavelength (nm)  
532.0000

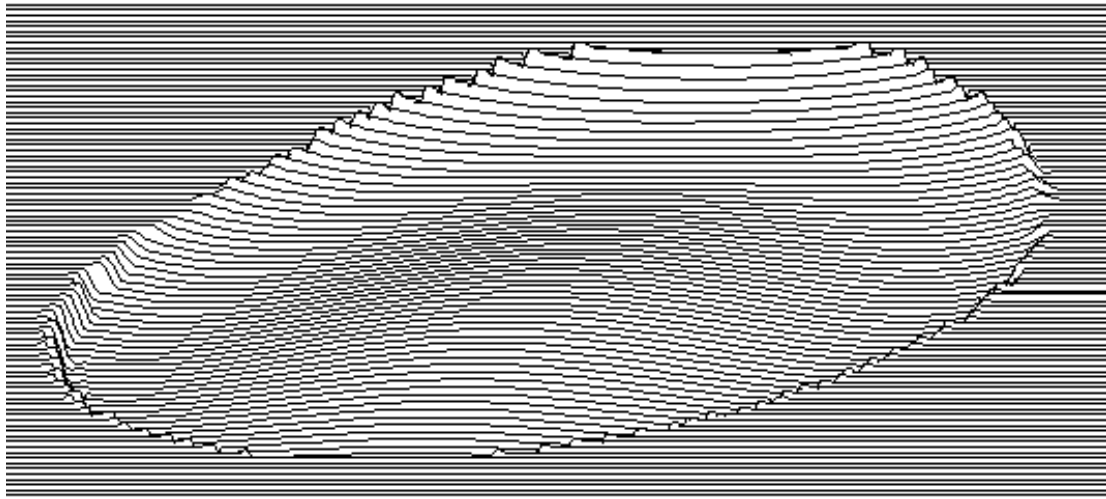
Weight  
1



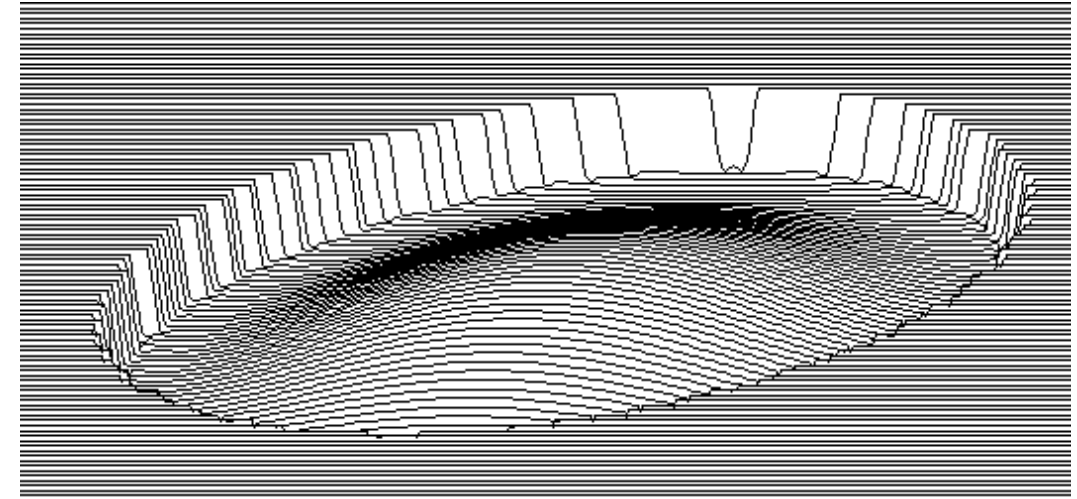
Diffraction Intensity Spread Function  
New lens from CVMACRO:cvnewlens.seq



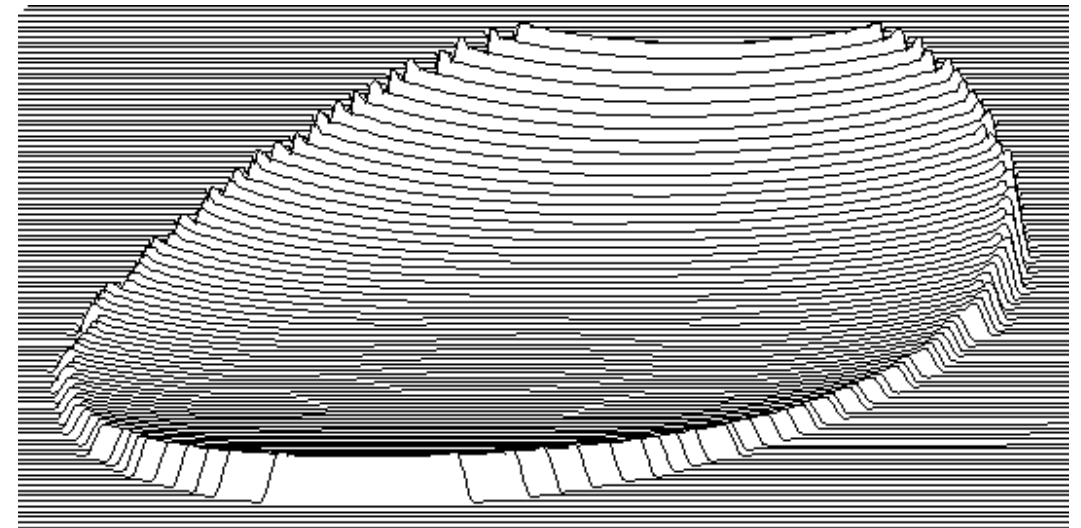
Field (ANG):	3, (0.000, 1.900) deg	Wavelength (nm)
Position:	1	532.0000
Defocusing:	0.000 mm	
Strehl Ratio:	0.810	



Wave aberrations in hundredths of wavelength 532.0NM  
 RMS = 0.035 waves P-V = 0.312 waves



Wave aberrations in hundredths of wavelength 532.0NM  
 RMS = 0.047 waves P-V = 0.163 waves



Wave aberrations in hundredths of wavelength 532.0NM  
 RMS = 0.088 waves P-V = 0.836 waves

אנו רואים כי לא היה שוני בין הביצועים עם המפצל  
 לביצועים ללא המפצל.  
 באופן עקרוני כשהכל מכוון בצורה אידיאלית אכן לא נצפה  
 לשוני, אך בתצורה ללא המפצל אנו מאמינים כי יהיה מעט  
 קשה יותר לכוון את הזוויות כמו שצריך.  
 מעבר לכך ישנה גם ירידה בביצועים של ה SLM עצמו  
 בעקבות זווית ולכן ייתכן שיהיה עדיף לעבוד דווקא עם  
 מפצל.

# Tolerances

ה Tolerances היו זהים למקרה הקודם, וזה לא מפתיע כיוון שההטיות נבדקות ביחס לכיווןן אידיאלי.  
אנו כן מניחים כי בפועל תצורה זו של המערכת תהיה מעט קשה יותר לכיווןן.

# *double gauss* - CODEV

## INFINITE CONJUGATES

EFL	49.9881
BFL	30.7183
FFL	75.4280
FNO	6.4252
IMG DIS	30.6959
OAL	68.9837

## PARAXIAL IMAGE

HT	1.6583
ANG	1.9000

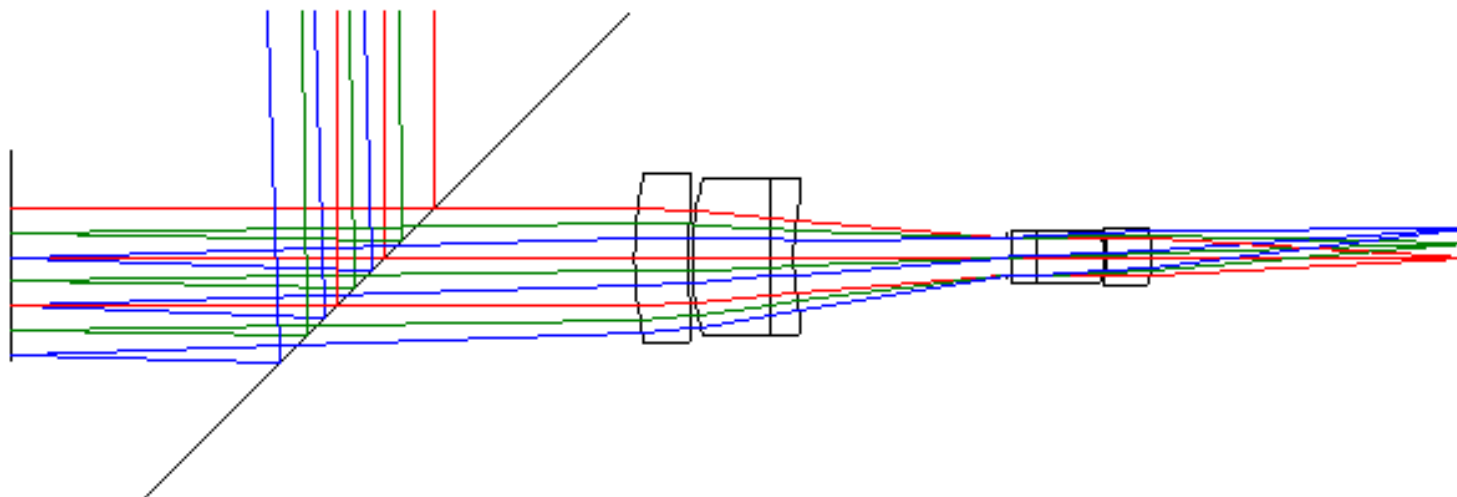
## ENTRANCE PUPIL

DIA	7.7800
THI	119.0003

## EXIT PUPIL

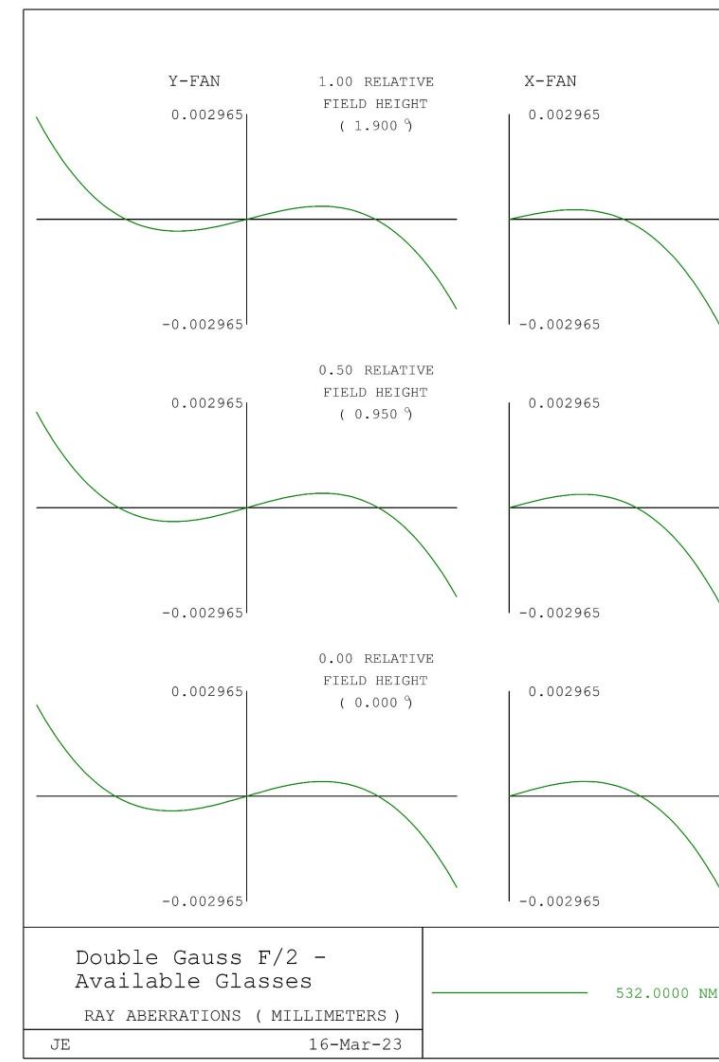
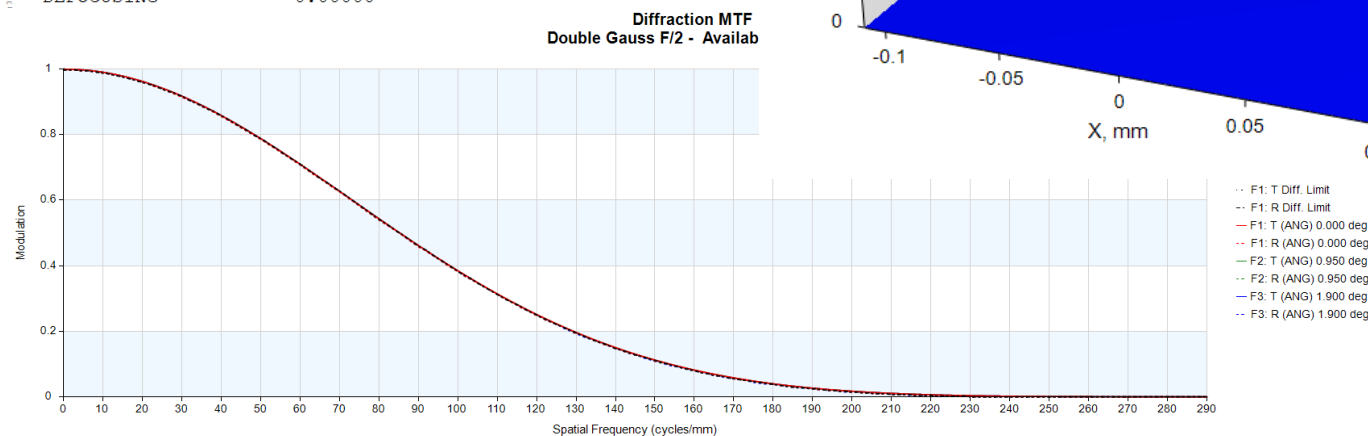
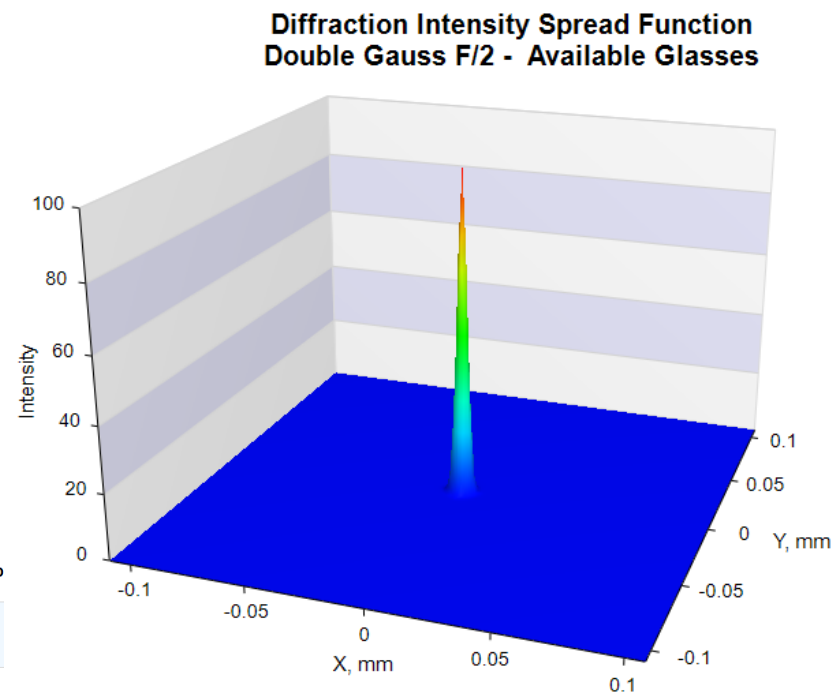
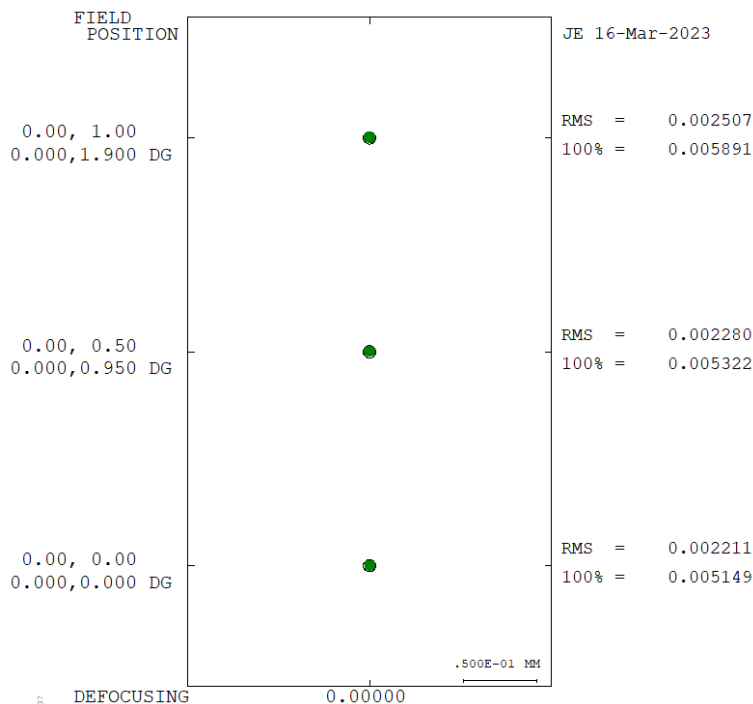
DIA	8.9256
THI	-26.6303

לבסוף, העדשה האחרונה שרצינו לראות היא *double gauss*. אמנם הביצועים של הדובלט היו די טובים, אך מאחר וזו עדשה קטלוגית, שאמנם מעט יותר יקרה, כדאי יהיה אולי לעבוד איתה.



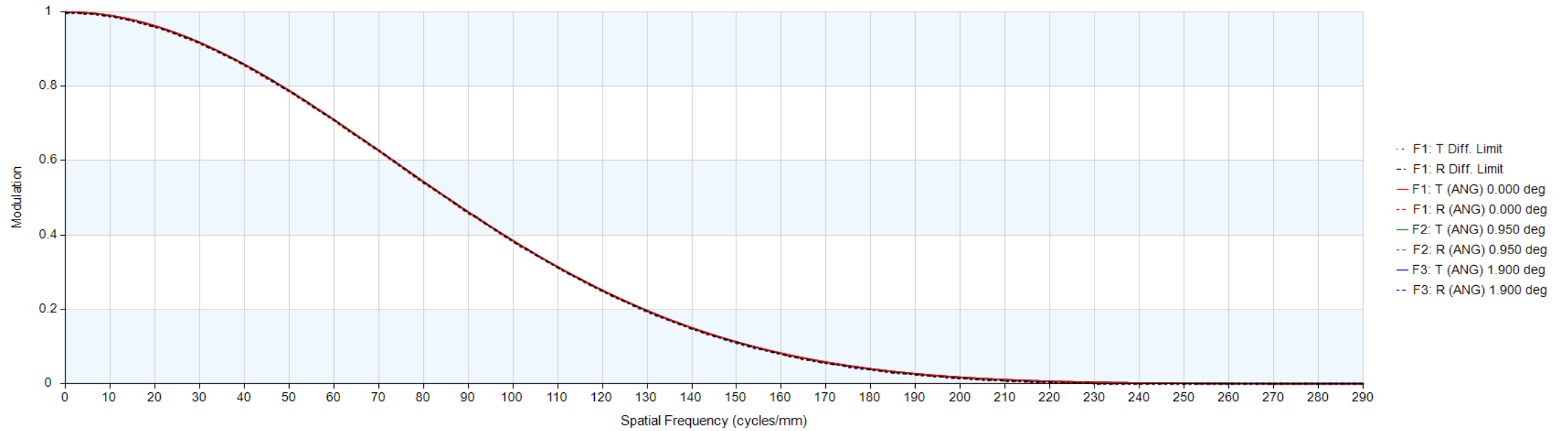


# ביצועים, *double gauss* - CODEV



# Diffraction MTF

## Double Gauss F/2 - Available Glasses

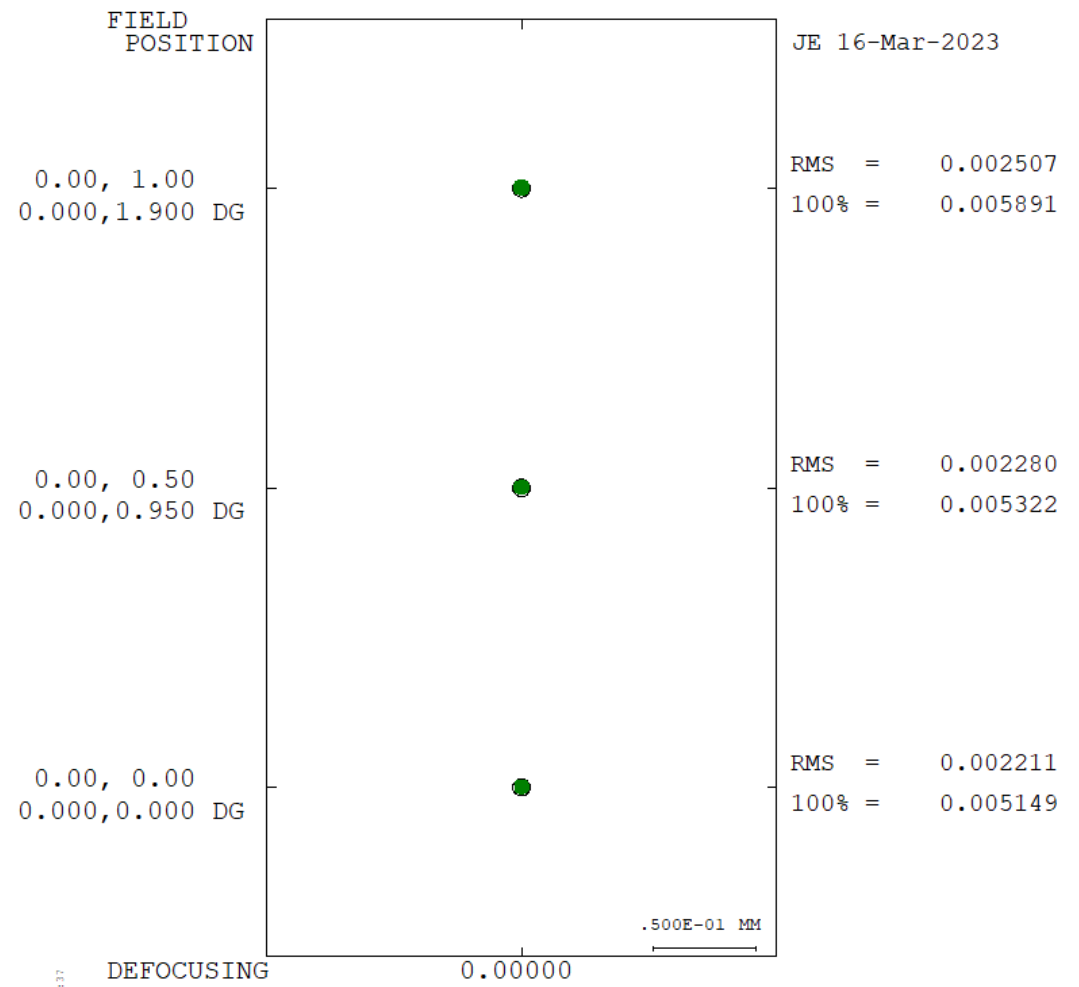
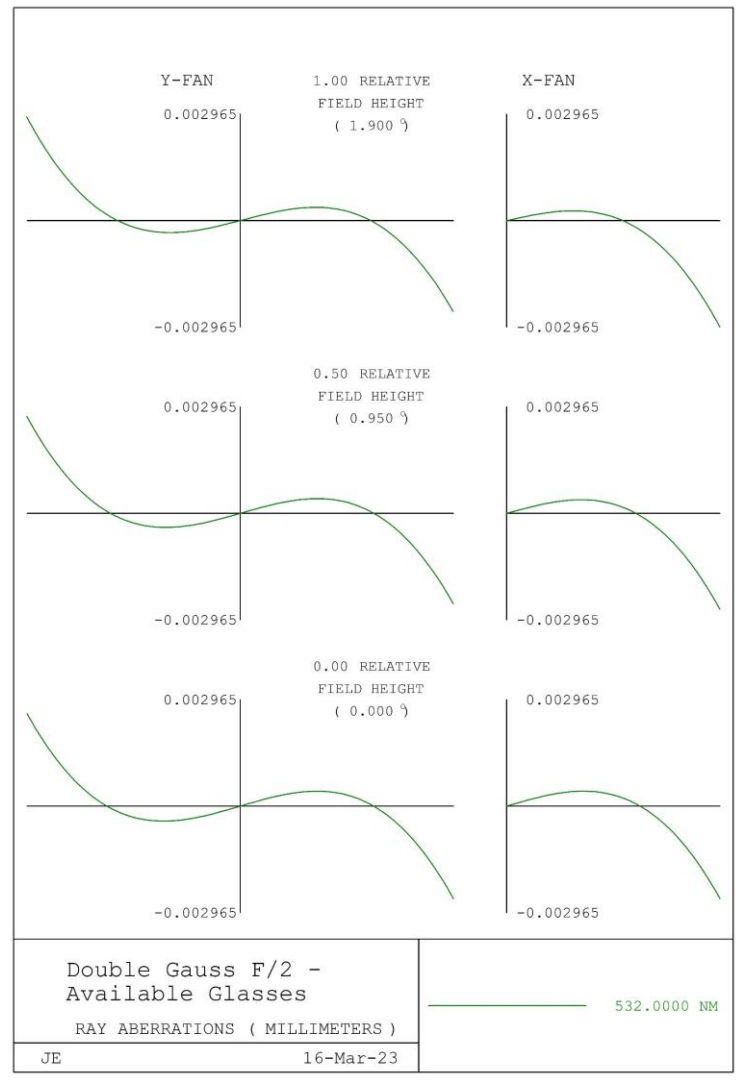


~\project\_bs\_\_dblgauss  
16- Mar -23  
JE

Position: 1  
Defocusing: 0.000 mm

Wavelength (nm)  
532.0000

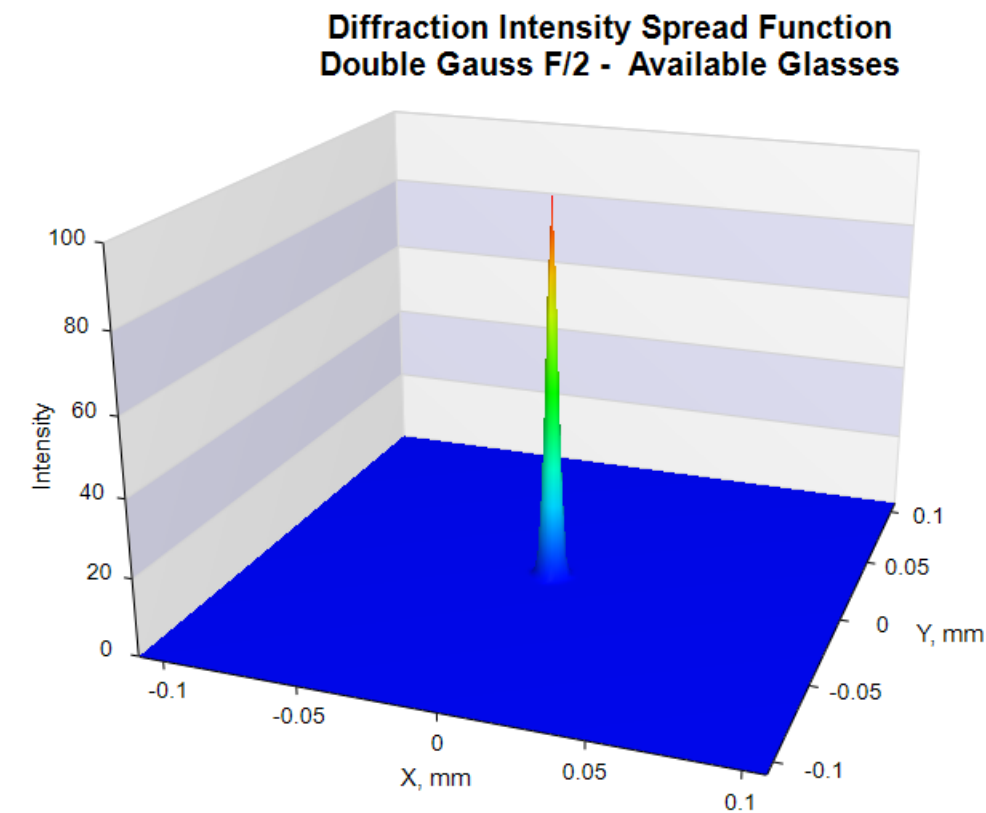
Weight  
1



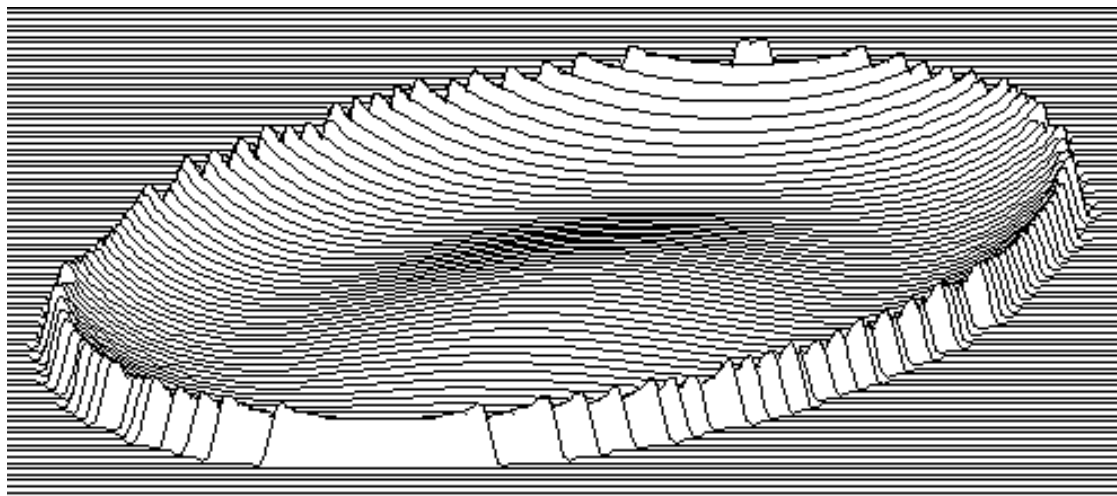
כאן ניתן לראות שאנו מוגבלי עקיפה בכל נקודות השדה, וזאת ללא אופטימיזציה של הפרמטרים.

ניתן לראות עיוות ספרי מתוקן, אך מסדר גודל פחות לעומת העדשות האחרות.  
לגבי הקומה, לפחות בעין אנו לא רואים.

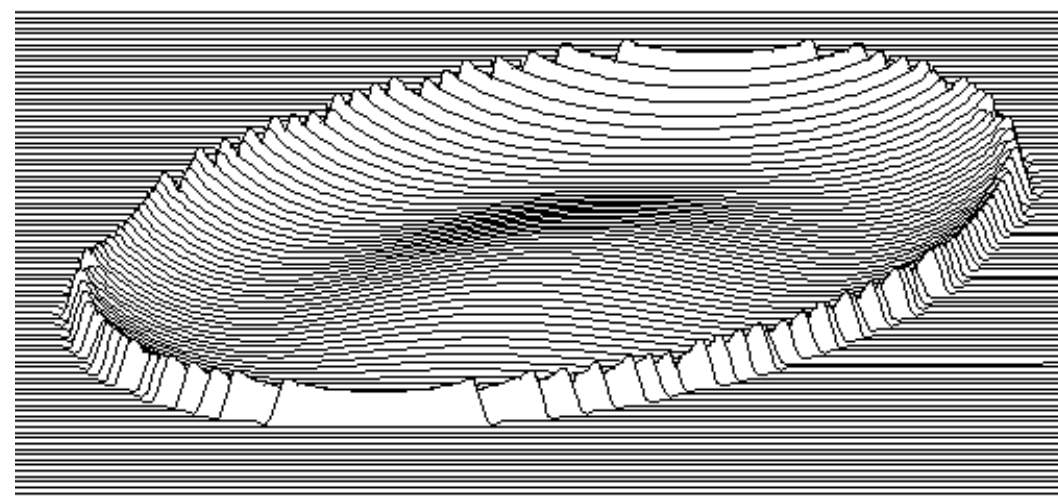
אנו רואים כאן כי היחס קרוב מאוד  
ל-1  
מה שאומר שאנו בביצועים כמעט  
אופטימאליים.



Field (ANG):	3, (0.000, 1.900) deg	Wavelength (nm) 532.0000
Position:	1	
Defocusing:	0.000 mm	
Strehl Ratio:	0.997	

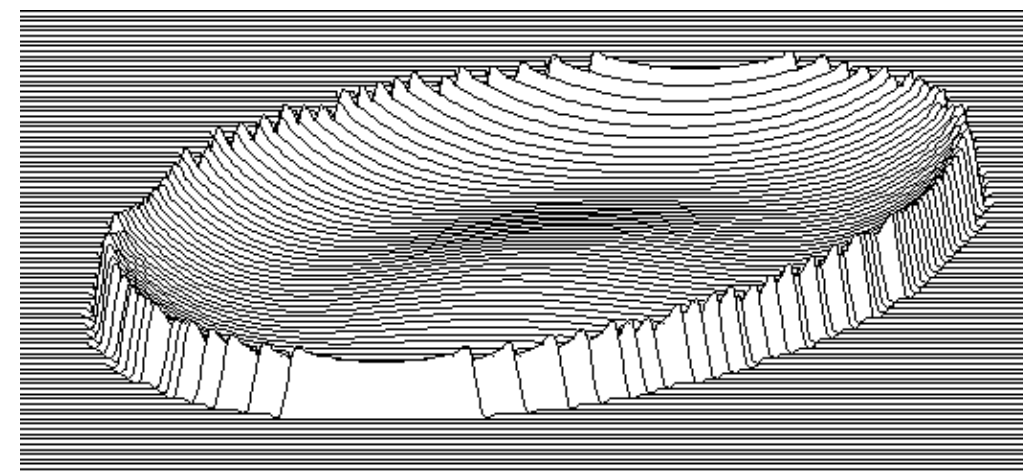


Wave aberrations in hundredths of wavelength    532.0NM  
 RMS =    0.009 waves        P-V =    0.066 waves



Wave aberrations in hundredths of wavelength    532.0NM  
 RMS =    0.009 waves        P-V =    0.058 waves

גם לפי ה WFE ניתן לראות כי אנו עומדים בשני הקריטריונים לכל נקודות השדה.



Wave aberrations in hundredths of wavelength    532.0NM  
 RMS =    0.009 waves        P-V =    0.085 waves

# סיכום

בפרוייקט זה סימלצנו מערכת אופטית שאמורה להשתמש ב SLM על מנת לקבל הולוגרמה במישור פורייה.

בחנו 2 דרכים למערכת – הצבת ה SLM בזווית או שימוש במפצל קרן.

כמו כן בחנו את השימוש בעדשת סינגלט פשוטה, עדשת דובלט ועדשת דאבל גאוס.

ראינו כי על פי הסימולציות, לא היה הבדל בביצועים בין שתי הדרכים להרכבת המערכת. בהצבה אידיאלית כנראה באמת לא יהיה שוני בביצועים. עם זאת ההצבה של ה SLM בזווית תהיה מעט קשה יותר וכן יתווספו בעיות שיצור ה SLM בעצמו. מצד שני אם אנו לא רוצים לוותר על עוצמה, ייתכן שעדיף להשקיע את הזמן בהצבה מדויקת של ה SLM ולא לוותר על כל העוצמה שתיפול במפצל האלומה.

מצאנו כי עדשת הדובלט עשתה עבודה לא רעה בכלל וניתן להשתמש בה. עם זאת, אם מתאפשר כמובן שעדשת צילום תיתן תוצאות טובות יותר ותהיה נוחה יותר בכוון המערכת.

עבור עדשת הדובלט, בדקנו את הביצועים עבור טולרנסים שונים כגון הטיית העדשה בזווית, מרכוז בצירים שונים והטיית ה-SLM. מצאנו כי זווית של  $3^\circ$  פוגעת בביצועים משמעותית ולכן יש להביא בחשבון כוון מעבר לעין אנושית. מרכז העדשה בציר Y היה מספיק סובלני לכוון אנושי אך עדיין דרש דיוק, בציר Z יש להגיע לדיוק גבוה מאוד.