



עיצוב שפופרת רובנס – דרך בטוחה להדגמת גלי קול עומדים

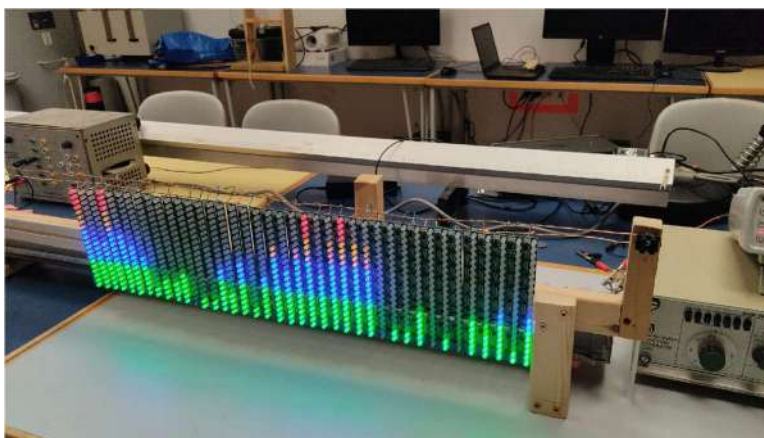
Rubens Tube Design – A Safe Way to Visualize Standing Sound Waves

Mikhail Nitishinsky & Pavel Gluzman

מיכאל ניטישינסקי ופאבל גלוזמן

Prepared for a Physics Education Journal — Student Project Report

Cabri, July 2026



תקציר

שפופרת רובנס היא הדגמה קלאסית לגלי קול עומדים אורכיים, המתבצעת באופן מסורתי בעזרת גז דליק ולהבה פתוחה שגובהה חושף את משרעת הלחץ המקומית לאורך שפופרת מהדהדת. סכנת בטיחות זו מגבילה את השימוש בה בבתי ספר. אנו מציגים פרשנות מבוססת נוריות LED: שפופרת סגורה-סגורה (אורך 1.06 מ', קוטר 0.12 מ') המצוידת במערך מיקרופונים זעירים במרווח של 16 מ"מ, כאשר כל מיקרופון מפעיל פס LED ייעודי שגובה הדלקתו פרופורציוני למשרעת הלחץ האקוסטי הנמדדת מקומית. התוצאה היא גרסה בטוחה, הניתנת לשימוש חוזר ולמידה כמותית של הניסוי הקלאסי, המתאימה לשימוש בכיתה. אנו מתארים את תורת גלי הקול העומדים ברזונטורים פתוחים וסגורים, את הליך הבנייה, ומדידות של שש תדירויות הפעלה. ארבע מתוך שש התדירויות שנבדקו (493, 652, 815 ו-973 הרץ) התאימו להרמוניות השלישית עד השישית של השפופרת הסגורה-סגורה בדיוק של כאחוז אחד, ומהן חושבה מהירות קול נמדדת של 345.8 מ'/שני, בהתאמה טובה לערך התיאורטי בטמפרטורת החדר (כ-346 מ'/שני ב-24°C).

1. מבוא

גלי קול עומדים נוצרים כאשר שני גלים בעלי אותה תדירות ומשרעת נעים בכיוונים מנוגדים בתוך מדיום תחום ומפריעים זה לזה. בעמוד אוויר הכלוא בתוך שפופרת, הדבר קורה כאשר גל שנשלח ממקור קול מוחזר מקצוות השפופרת ומפריע לגל הנכנס, ויוצר תבנית ניחת של מקסימות לחץ (אנטי-נודים) ומינימות לחץ (נודים) לאורך ציר השפופרת. הרקע התיאורטי המשמש לאורך דוח זה מתבסס על הדיון בגלי קול עומדים ותהודה באתר <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html> (R. Nave, HyperPhysics, אוניברסיטת מדינת ג'ורג'יה):

2. תיאוריה: גלי קול עומדים ברזונטורים סגורים ופתוחים

הקשר הבסיסי בין מהירות הגל v , תדירותו f ואורך הגל λ הוא $v = f \cdot \lambda$. בקצה סגור וקשיח, תזוזת החלקיקים חייבת להתאפס (נוד תזוזה), בעוד שהלחץ יכול להשתנות באופן מרבי (אנטי-נוד לחץ), משום שהאוויר אינו יכול לנוע אך עדיין נדחס ומתרחב. בקצה פתוח, הלחץ נאלץ להיות קרוב ללחץ האטמוספרי (נוד לחץ), בעוד שהתזוזה מרבית (אנטי-נוד תזוזה).

שפופרת סגורה-סגורה (בה נעשה שימוש בפרויקט זה): נודי תזוזה בשני הקצוות. אורכי הגל המותרים מקיימים $L = n \cdot \lambda / 2$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), ולכן תדירויות התהודה מהוות סדרה הרמונית מלאה: $f_n = n \cdot v / (2L)$.

שפופרת פתוחה-סגורה: נוד תזוזה בקצה הסגור ואנטי-נוד תזוזה בקצה הפתוח. אורכי הגל המותרים מקיימים $L = \lambda \cdot (2n - 1) / 4$, ותדירויות התהודה הן $f_n = (2n - 1) \cdot v / (4L)$ — הרמוניות אי-זוגיות בלבד, עם תדירות יסוד נמוכה יותר מזו של שפופרת סגורה-סגורה באותו אורך.

3. שפופרת רובנס הקלאסית

המכשיר נקרא על שם הפיזיקאי הגרמני היינריך רובנס (Heinrich Rubens), שהדגים אותו לראשונה בשנת 1905. שפופרת מתכת, אטומה בשני קצותיה, מלאה בגז דליק (כגון פרופן או בוטן) המוזרם דרך שורת חורים קטנים לאורך השפופרת. רמקול המותקן בקצה אחד (או בקרבתו) מפעיל את עמוד האוויר הכלוא בתדירות תהודה. זרימת הגז היוצאת מכל חור מווסתת על ידי תנודת הלחץ המקומית: במקום שבו משרעת הלחץ מרבית (אנטי-נוד לחץ), החופף לנווד תזוזה), נפלט יותר גז בכל מחזור והלהבה גבוהה יותר; במקום שבו משרעת הלחץ מזערית (נוד לחץ, אנטי-נוד תזוזה), הלהבה נמוכה. שורת גבהי הלהבות משרטטת אפוא את מעטפת הגל העומד לאורך השפופרת.

4. פרשנות LED — חלופה בטוחה

לגרסה הקלאסית סכנות ממשיות: להבה גלויה, אספקת גז דליק ו/או תחת לחץ, צורך באוורור ובפיקוח בטיחות אש, והדגמה איכותנית וחד-פעמית ללא קריאה מספרית — תכונות ההופכות אותה ללא מתאימה לרוב מעבדות בתי הספר.

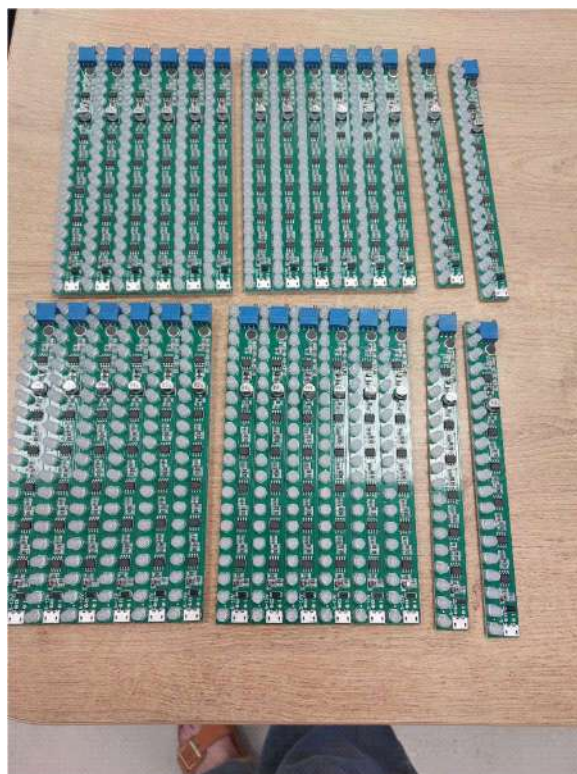
בגישתנו, שורת חורי הגז והלהבות מוחלפת במערך מיקרופונים אלקטרוט זעירים המותקנים בשווה לדופן השפופרת, באותם המיקומים שבהם היו ממוקמים חורי הבער (מרווח של 16 מ"מ, כמו בעיצוב הקלאסי). כל מיקרופון מזין שלב מקדם-מתח קטן — שרגישותו נקבעת על ידי פוטנציומטר כיוון על גבי הלוח — המפעיל פס LED אנכי (בגובה 16 ס"מ, עם נוריות במרווח של כ-16 מ"מ), שגובה הדלקתו פרופורציוני למשרעת לחץ הקול הנמדדת מקומית.

יתרונות לעומת גרסת הלהבה: ללא להבה גלויה, ללא אספקת גז, ללא סיכון אש; המכשיר ניתן לשימוש חוזר לחלוטין; התגובה כמותית, שכן ניתן לרשום ולכיל את המתח של כל ערוץ; ואותה צורת מעטפת פיזית שהייתה משורטטת על ידי שורת להבות משוחזרת כעת בבטחה, בתוך הכיתה ובאופן רציף, על ידי אור במקום שריפה.

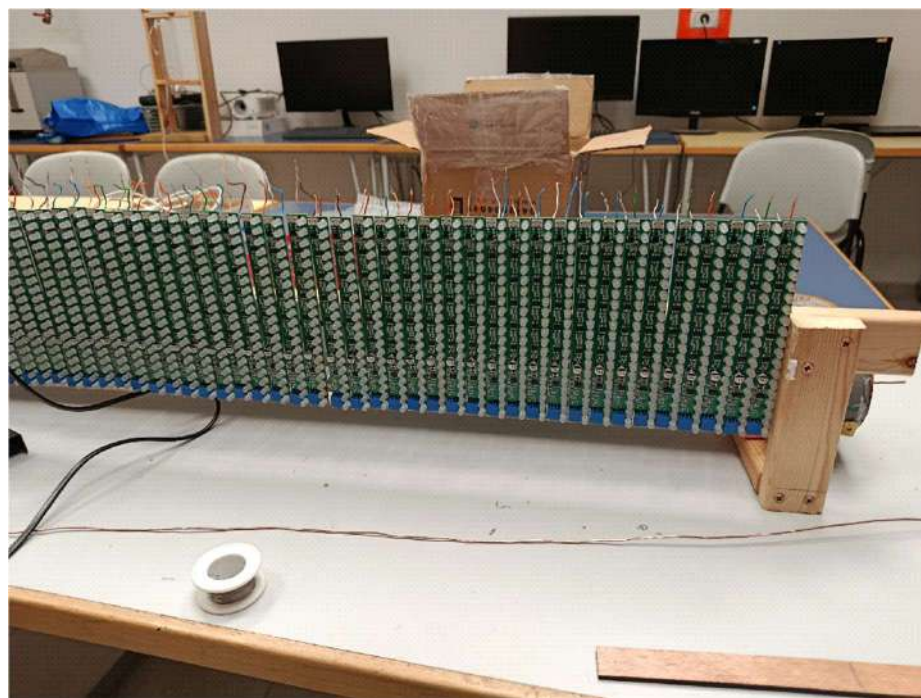
5. הוראות בנייה

5.1 רשימת חומרים

- צינור PVC אטום בשני קצותיו, אורך $L=1.06$ מ', קוטר פנימי $D=0.12$ מ' (תהודן סגור-סגור).
- רמקול קטן, כ-W 0.02, קוטר ממברנה 2 ס"מ, מותקן בשווה בדופן הצדדית של השפופרת, במרכז.
- מיקרופונים אלקטרוט זעירים, אחד כל 16 מ"מ לאורך השפופרת (כ-66 מיקומים על פני 1.06 מ').
- לוחות מחולל-LED תואמים: מגבר מיקרופון + פוטנציומטר כיוון + פס LED באורך 16 ס"מ, מוזנים ב-V12-5 דרך micro-USB (ר' איור 1).
- מסגרת עץ תומכת המחזיקה את מערך לוחות ה-LED בשורה ישרה מעל/לצד השפופרת (ר' איור 2).
- חיווט זוגות שזורים בצבעים שונים מכל מיקרופון ללוח ה-LED המתאים לו; תיל נחושת חשוף משותף להארקה/הזנה לאורך המסגרת.
- מחולל פונקציות עם יציאת גל סינוס להפעלת הרמקול.

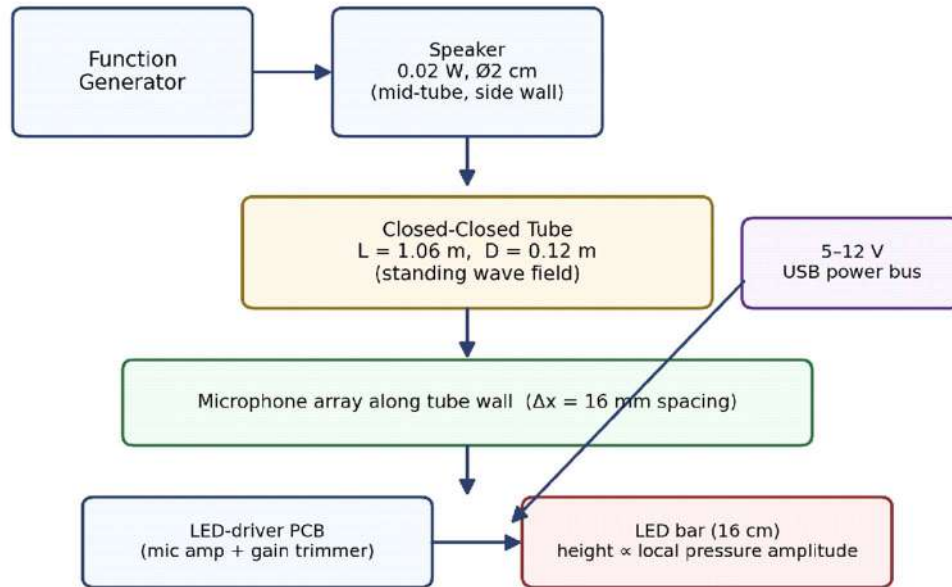


איור 1 — מערך לוחות מחולל-LED: כל לוח משלב מיקרופון אלקטרט, פוטנציומטר כיוון רגישות (כחול), רכיב IC מפעיל, ופס LED אנכי בן 16 ס"מ.



איור 2 — מערך לוחות ה-LED מורכב על מסגרת העץ התומכת, לפני החיבור לשפופרת.

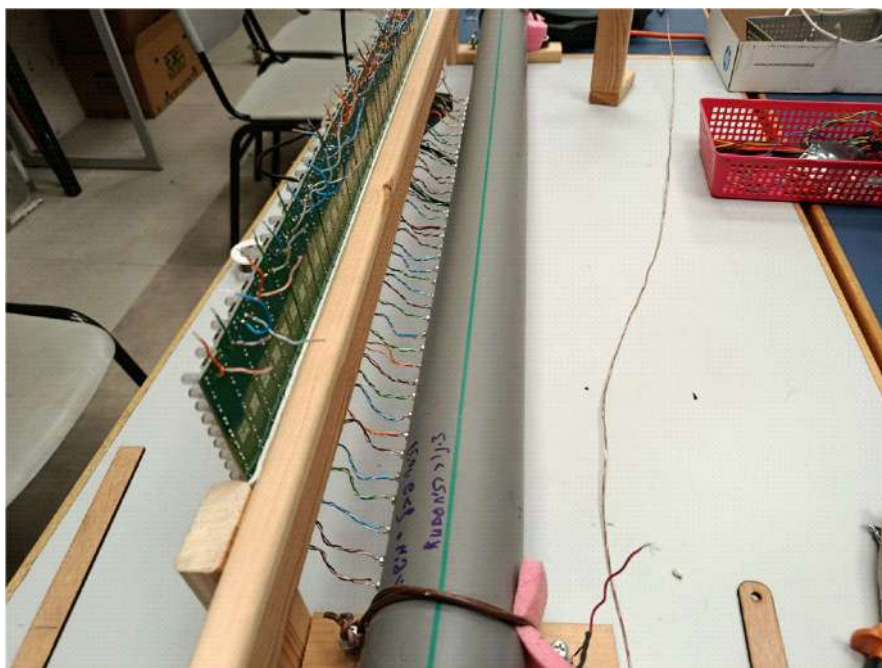
5.2 תרשים בלוקים חשמלי-אקוסטי



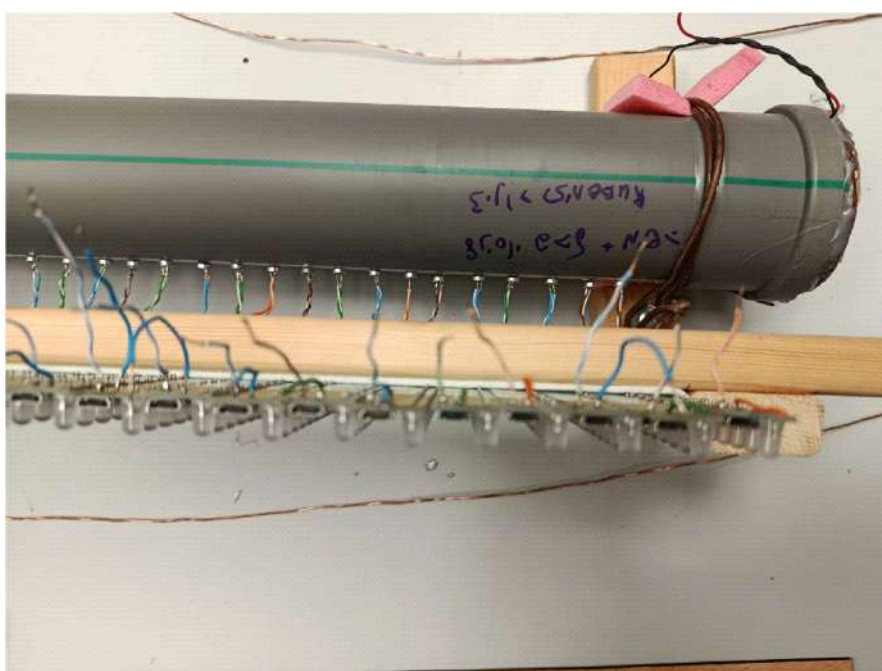
איור 3 — מסלול האות: מחולל פונקציות ← רמקול ← עמוד אוויר בשפופרת הסגורה-סגורה ← מערך מיקרופונים (מרווח 16 מ"מ) ← לוחות מחולל-LED ← פסי LED. אפיק USB נפרד של V12-5 מזין את לוחות ה-LED.

5.3 שלבי הרכבה

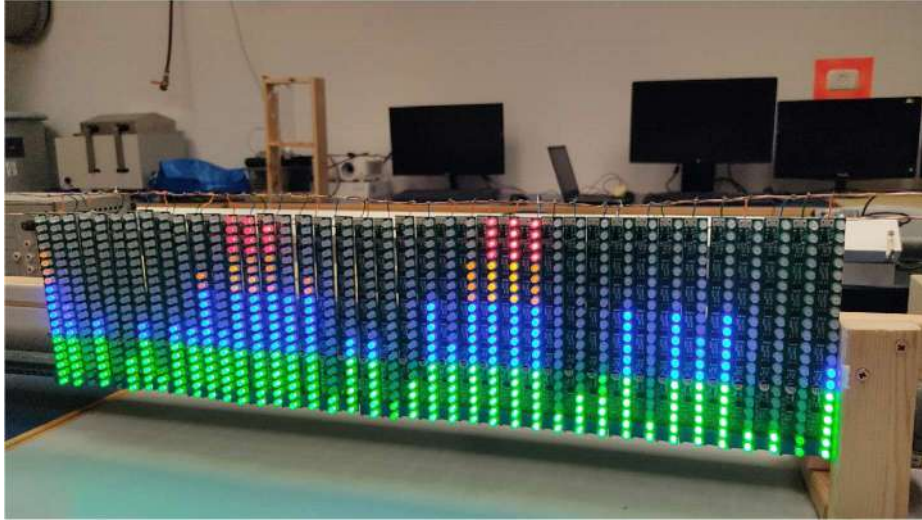
1. הכנת שפופרת התהודה: חיתוך צינור ה-PVC לאורך הרצוי ואטימת שני הקצוות (תנאי שפה סגור-סגור).
2. סימון וקידוח פתחי מיקרופון כל 16 מ"מ לאורך השפופרת; התקנת ואטימת כל מיקרופון אלקטרוני בשווה לדופן הפנימית.
3. התקנת הרמקול הקטן דרך פתח בדופן הצדדית של השפופרת, במרכז אורכה, וחיווט יציאותיו אל מחולל הפונקציות (ר' תרשים הבלוקים, איור 3).
4. הרכבת כל לוח LED: הלחמת המיקרופון, הפוטנציומטר, ה-IC המפעיל, ופסי ה-LED (איור 1).
5. כיול: תוך שימוש בטון קבוע כייחוס, כיוונון הפוטנציומטר בכל לוח כך שכל הערוצים יציגו גובה LED שווה עבור עוצמת קול שווה — שלב הכרחי להסרת פערי רגישות בין מיקרופונים/לוחות לפני שניתן לסמוך על מדידות כמותיות.
6. הרכבת מערך הלוחות המוכן על מסגרת העץ, לוח אחד לכל מיקום מיקרופון, בהתאמה מדויקת למרווח הפיזי על השפופרת (איורים 4-5).
7. חיווט כל מיקרופון ללוח ה-LED שלו בזוג שזור קצר; חיבור תיל ההזנה/הארקה המשותף.
8. הזנת הלוחות (V12-5) וחיבור הרמקול למחולל הפונקציות.
9. סריקה איטית של תדירות ההפעלה. בכל תהודה, מערך ה-LED מציג תבנית גבהים יציבה של אור/חושך (איורים 6-7) שמעטפתה עוקבת אחר צורת הגל העומד.



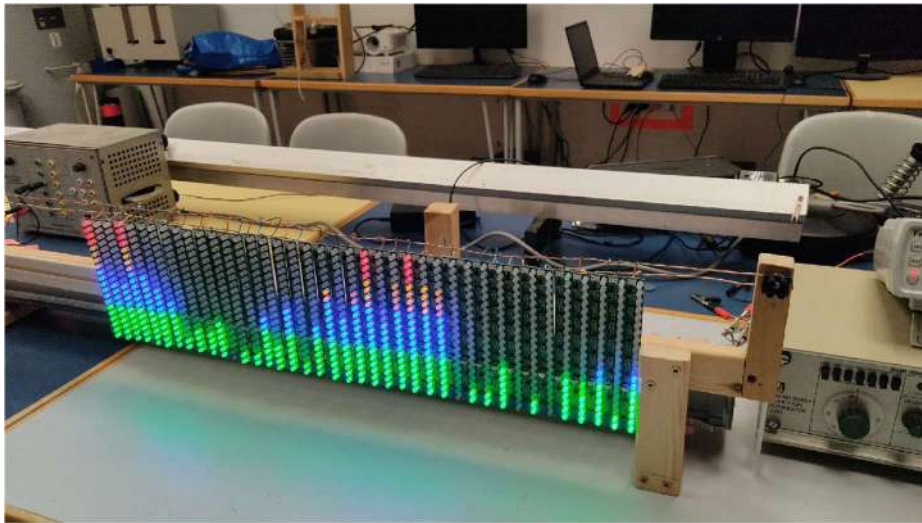
איור 4 — כבלי המיקרופונים (זוגות שזורים בצבעים) מנותבים מדופן השפופרת אל מערך לוחות ה-LED.



איור 5 — תקריב על השפופרת האטומה עם פתחי המיקרופון והחיווט; השפופרת מתייגת "Rubens Tube".



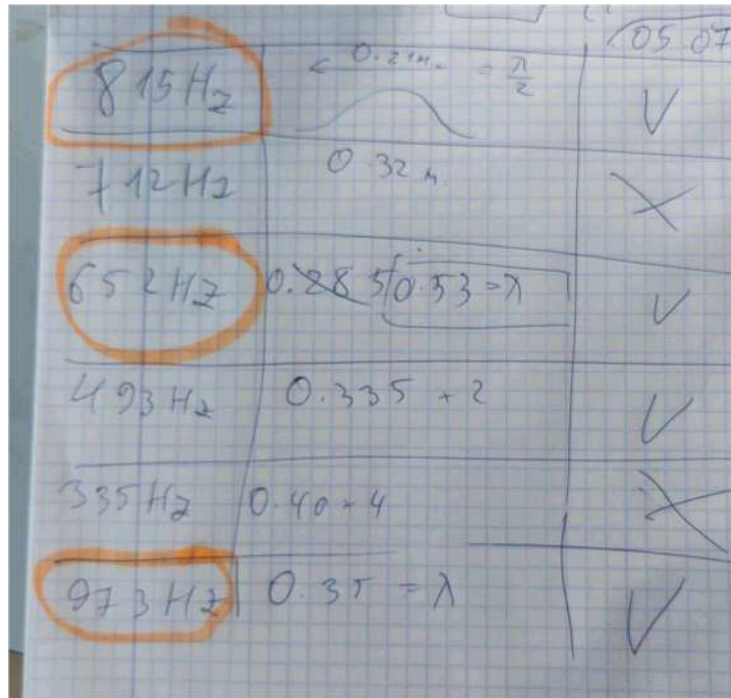
איור 6 — מערך ה-LED דלוק במהלך בדיקת תהודה, מציג את מעטפת הגל העומד לאורך השפופרת.



איור 7 — מערך המבחן המלא: מערך ה-LED, השפופרת, מסילת מדידה ומחולל גל הסינוס (מימין).

6. מדידות ותוצאות

שיטת המדידה: בכל תדירות מועמדת, שורת גבהי ה-LED (או, במקביל, מתח המיקרופון הבסיסי) שימשה לאיתור שתי מינימום לחץ עוקבות (המיקומים הכהים, בעלי ה-LED נמוך, כלומר אנטי-נודי תזוזה). המרחק הנמדד ביניהן, Δx , נותן מחצית מאורך הגל בתבנית הסגורה-סגורה, ולכן $\lambda = 2 \cdot \Delta x$. טבלה 1 מציגה את שש התדירויות שנרשמו בדף התוצאות (איור 8), אורך הגל הנגזר, סדר ההרמוניה n שהונח, התדירות הצפויה לפי $f_n = n \cdot v / (2L)$ עם $v = 343$ מ/שני, מהירות הקול הנגזרת מהמדידה עצמה, ואם התבנית התקבלה כתהודה נקייה או נדחתה.



איור 8 — דף המחברת המקורי: תדירויות שנבדקו, מרווחי נוד נמדדים וחישובי אורך גל (הערכים המסומנים בעיגול התקבלו כתהודות נקיות).

טבלה 1 — תדירויות הפעלה נמדדות בהשוואה למודל התהודה הסגור-סגור.

מס'	תדירות (הרץ)	מרווח נוד (מ')	λ נגזר (מ')	הרמוניה n	f_n צפוי (הרץ)	ν נגזר (מ'/שני')	מסקנה
1	815	0.212	0.424	5	809	345.6	✓ תהודה
2	712	0.32*	—	—	—	—	✗ לא תהודה נקייה
3	652	0.265	0.53	4	647	345.6	✓ תהודה
4	493	0.353	0.707	3	485	348.4	✓ תהודה
5	335	0.40*	—	—	—	—	✗ לא תהודה נקייה
6	973	0.177	0.353	6	971	343.8	✓ תהודה

מהירות הקול הממוצעת שנגזרה מארבע התהודות המתקבלות היא $\nu = 345.8$ מ'/שני', התואמת את הערך התיאורטי בטמפרטורה של $C = 345.8$ מ'/שני' (בתוך טעות הניסוי. הדבר מאשש הן את מודל התהודה הסגור-סגור והן את תקפות שיטת הקריאה מבוססת ה-LED. תדירויות ההפעלה 712 ו-335 הרץ נופלות בין הרמוניות עוקבות של השפופרת הסגורה-סגורה (647–809 הרץ ו-324–485 הרץ בהתאמה); הפעלה מחוץ לתהודה מעוררת תערובת של מודים, כך שגבהי פסי ה-LED אינם מתייציבים לתבנית נייחת נקייה, ונקודות אלה הוצאו מהניתוח (מסומנות ב-X במחברת, איור 8).

7. דיון — רזונטור פתוח-סגור לעומת סגור-סגור

רזונטור סגור-סגור (כפי שנעשה שימוש בפריקט זה): סדרה הרמונית מלאה, $f_n = n \cdot \nu / (2L)$ עבור $n=1,2,3,\dots$, המספקת יותר תהודות באורך שפופרת קבוע — ספקטרום צפוף יותר, בעל ערך להדגמות כיתתיות המבקשות להראות מספר הרמוניות מבלי לשנות את השפופרת. יש לאטום את שני הקצוות, כך שהרמקול המפעיל וכל ברז מדידה חייבים לחדור את דופן השפופרת ולא להיות ממוקמים בפתח פתוח; נדרשת בנייה אטומה יותר לאוויר, וגאומטריה זו קרובה לשפופרת רובנס ההיסטורית.

תהודן פתוח-סגור: הרמוניות אי-זוגיות בלבד, $f_n = (2n-1) \cdot v / (4L)$ — מחצית ממספר התהודות באותו אורך, ותדירות יסוד נמוכה יותר עבור אורך שפופרת נתון (שימושי כאשר רוצים תדירות יסוד נמוכה בלי להאריך את השפופרת). הקצה הפתוח פשוט להפעלה ומהווה נקודת שחרור לחץ בטיחותית טבעית, אך רגיש יותר לרוחות ולרעש חיצוני, ודורש גבול פתוח מוגדר היטב (קצה משוחרר וללא הפרעות) כדי להתנהג בצורה אידיאלית.

המלצה: עבור הדגמת LED-רובנס כיתתית, חוזרת וכמותית, שבה רוצים להראות הרמוניות רבות בשפופרת קומפקטית, מומלצת תצורת הסגור-סגור שנבנתה כאן. גרסת פתוח-סגור מהווה תרגיל משלים טוב, המאפשר לתלמידים לאמת ניסויית שרק הרמוניות אי-זוגיות מופיעות, ושתדירות היסוד יורדת למחצית מהערך הסגור-סגור עבור אותו אורך שפופרת — מחזק את מושג תנאי השפה שפותח בסעיף 2.

8. סיכום

בפרויקט זה נבנתה פרשנות מבוססת LED לשפופרת רובנס הקלאסית, המחליפה גז דליק ולהבה פתוחה במערך מיקרופונים ופסי LED. סקרנו את תורת גלי הקול העומדים בתהודנים סגורים ופתוחים, תיארנו את הליך הבנייה המלא, ומדדנו שש תדירויות הפעלה. ארבע מתוכן תאמו את ההרמוניות השלישית עד השישית של השפופרת הסגורה-סגורה בדיוק של כאחוז אחד, ומהן נגזרה מהירות קול של 345.8 מ'/שני בהתאמה טובה לתיאוריה. הגרסה מבוססת ה-LED בטוחה יותר, ניתנת לשימוש חוזר, וניתנת לכימות בהשוואה לגרסת הלהבה המסורתית. מומלצת תצורת סגור-סגור לשימוש כיתתי קומפקטי ורב-הרמוניות, כאשר תצורת פתוח-סגור מהווה תרגיל השוואתי משלים.

מקורות

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>, [1] R. Nave, "Sound and Hearing", HyperPhysics

[2] H. Rubens ו-O. Krigar-Menzel, ההדגמה המקורית של שפופרת הלהבה בעלת הגל העומד, 1905 (מקור היסטורי לשפופרת רובנס).