

Mottó: „Mi nem ismerjük a g értékét,
mi szeretnénk meghatározni!”



**A szabadesés kísérletes tanítása a
nagyváradi ADY Endre Líceumban**

dr. Bartos-Elekes István, Fizikum

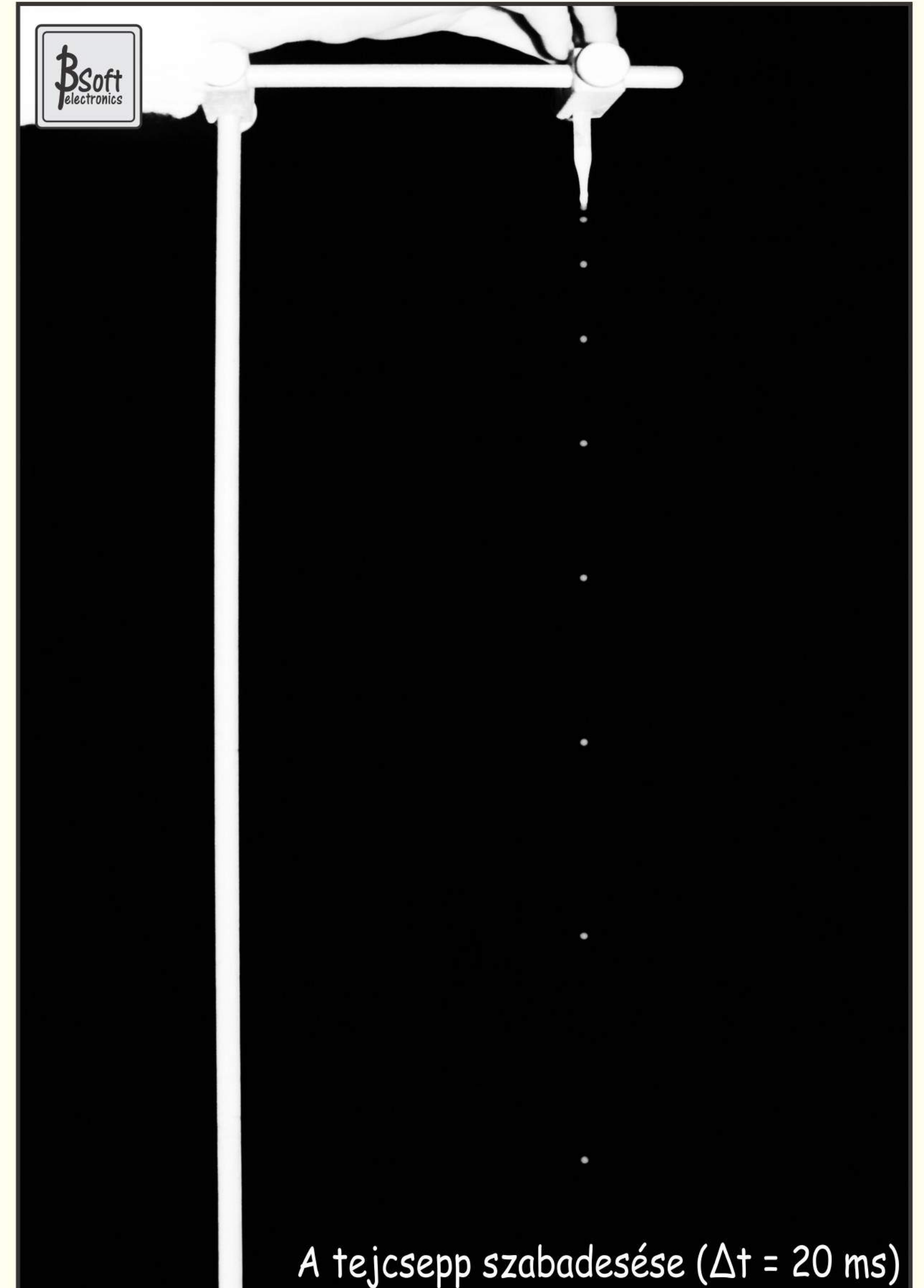
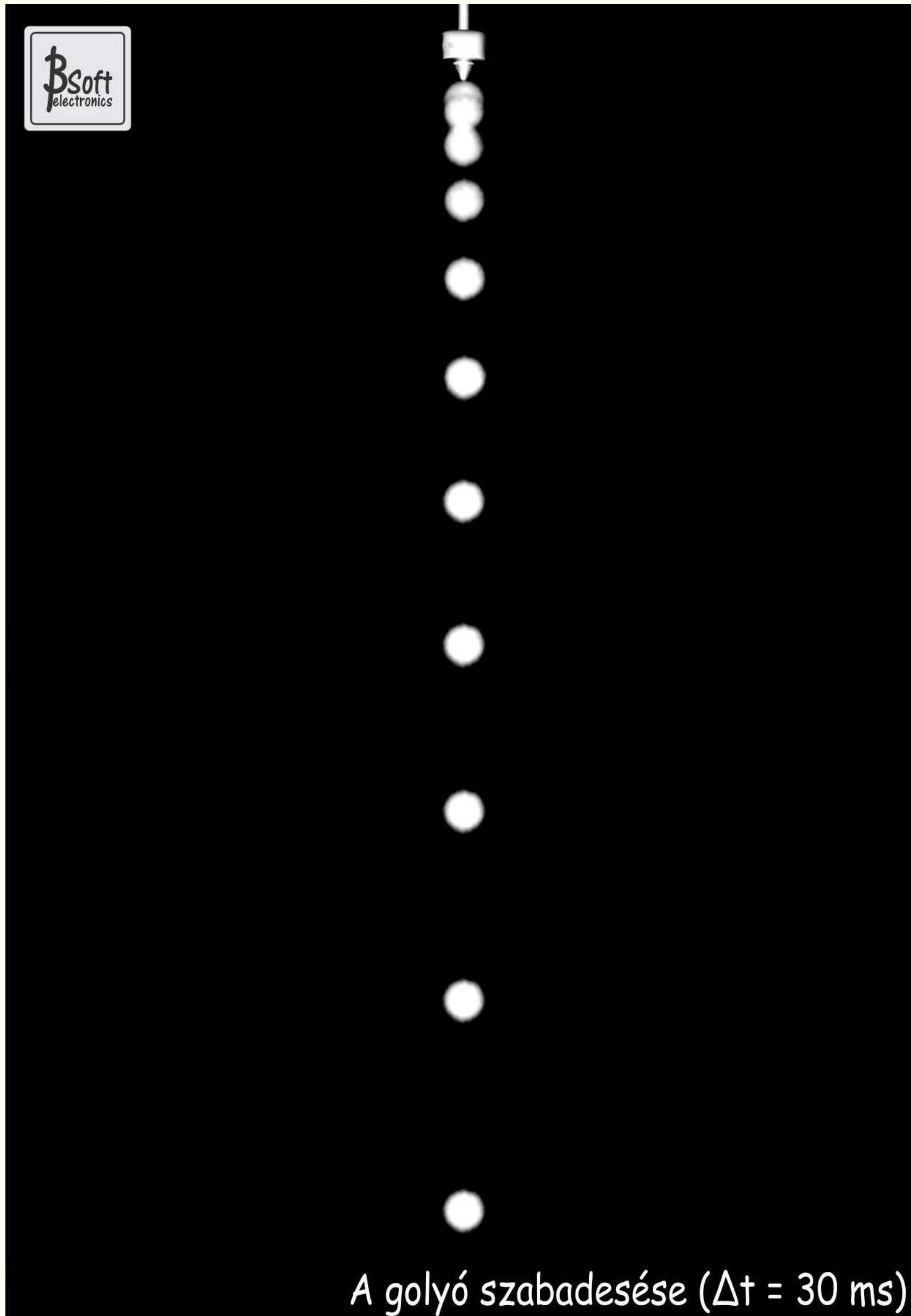
Néhány szó a kísérletről

Még 1976-ban, a ferde torony közelében született meg a gondolat: **otthon én is megmérem a nehézségi gyorsulást!** Mivel a Fizikumban csak méternyi magasságokról lehetett szó, ezért az ezredmásodperceket is mérni képes analóg kronométert készítettem, és szabadalmaztattam (1981). Habár a műszer igen jól mért, a g mégsem akarta elérni a szabványos értéket, különösen a kis magasságoknál volt baj. Lassan kiderült, hogy két fénySOROMPÓVAL nem is lehet helyesen mérni, mert képtelenség pontosan a golyó alá helyezni az első fénySOROMPÓT. A kimaradt néhány tized mm-nek megfelelő esési idő elvesztése óriási hibákat okozott.

A bemutatásra kerülő stroboszkópos módszernél a két villantás kizárja az elhelyezési hibákat, de az első villantásnál a golyó még nem mozdul meg, és csak jóval később (Δt) indul el (remanencia). Ez a néhány ms-nyi késés mérhetetlen, de ennek ellenére a laborgyakorlat folyamán mi mégis meghatározzuk a Δt -t és tőle függetlenül a g -t is. A kísérlet nem alkalmas a precíziós meghatározásokra, de annál inkább szükséges a módszer elvének a megértéséhez. A felgyűlt tapasztalatok alapján hasonló módszert alkalmaztam egy komplex mérőrendszer kifejlesztésekor. A szabadesés mérőközpontjának 2011 tavaszán - **a Fizikum megszüntetése előtt** - készült képe e demó végén látható.

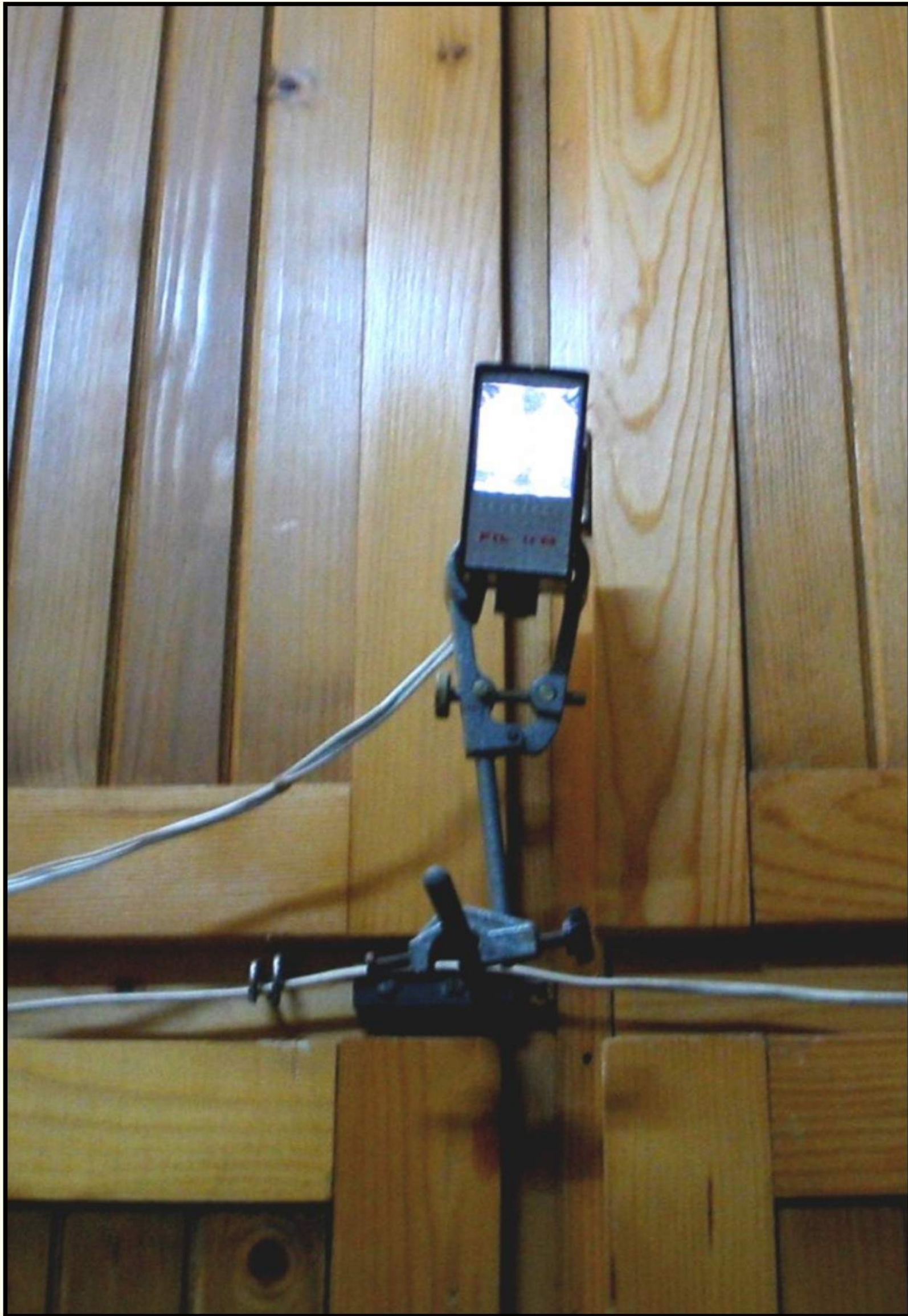
Nem hagytam abba! Egy teljesen új módszert dolgoztam ki, amely a szokásostól eltérően, egészen másként fogja fel a légellenállást. Nem keresek fizikai okokat, hanem a következményekből indulok ki, és meghatározom a sebességtörvény tapasztalati képletét. A demó legvégén, a rövid magyarázattal együtt a majdnem kész miniszabadesés-készülék látható.

Előzetes ismeretek



Az elméleti órákon, illetve a laborgyakorlat előtt a diákok megismerkednek néhány jellegzetes stroboszkópos fényképpel

Stroboszkóp - 1977



A CNC stroboszkóp (1991) 200 kép/s sebességet is elérhet

A stroboszkópos képek készítése

A képek készítését egy számítógép-vezérelt komplex elektronikus berendezés segíti. Egy assembly program **ki-kapcsolatja a teremvilágítást**, és a fényképezőgép kinyitása után két másodperccel **elindíttatja a jelenséget**.

A stroboszkópos képek készítése

A képek készítését egy számítógép-vezérelt komplex elektronikus berendezés segíti. Egy assembly program **ki-kapcsolatja a teremvilágítást**, és a fényképezőgép kinyitása után két másodperccel **elindíttatja a jelenséget**.

A teljesen elsötétített teremben egy nagy fényerejű villanólámpával (blitz), **egymásután**, néhány ezredmásodperces időközökben **megvillantjuk a mozgó testet**.

A stroboszkópos képek készítése

A képek készítését egy számítógép-vezérelt komplex elektronikus berendezés segíti. Egy assembly program **ki-kapcsoltatja a teremvilágítást**, és a fényképezőgép kinyitása után két másodperccel **elindíttatja a jelenséget**.

A teljesen elsötétített teremben egy nagy fényerejű villanólámpával (blitz), **egymásután**, néhány ezredmásodperces időközökben **megvillantjuk a mozgó testet**.

A jelenség ideje alatt a nyitott fényképezőgép a különböző helyzeteket **ugyanazon a képen rögzíti**. A fényképezőgép bezárása megállítja a folyamatot, felgyullad a villany.

A stroboszkópos képek készítése

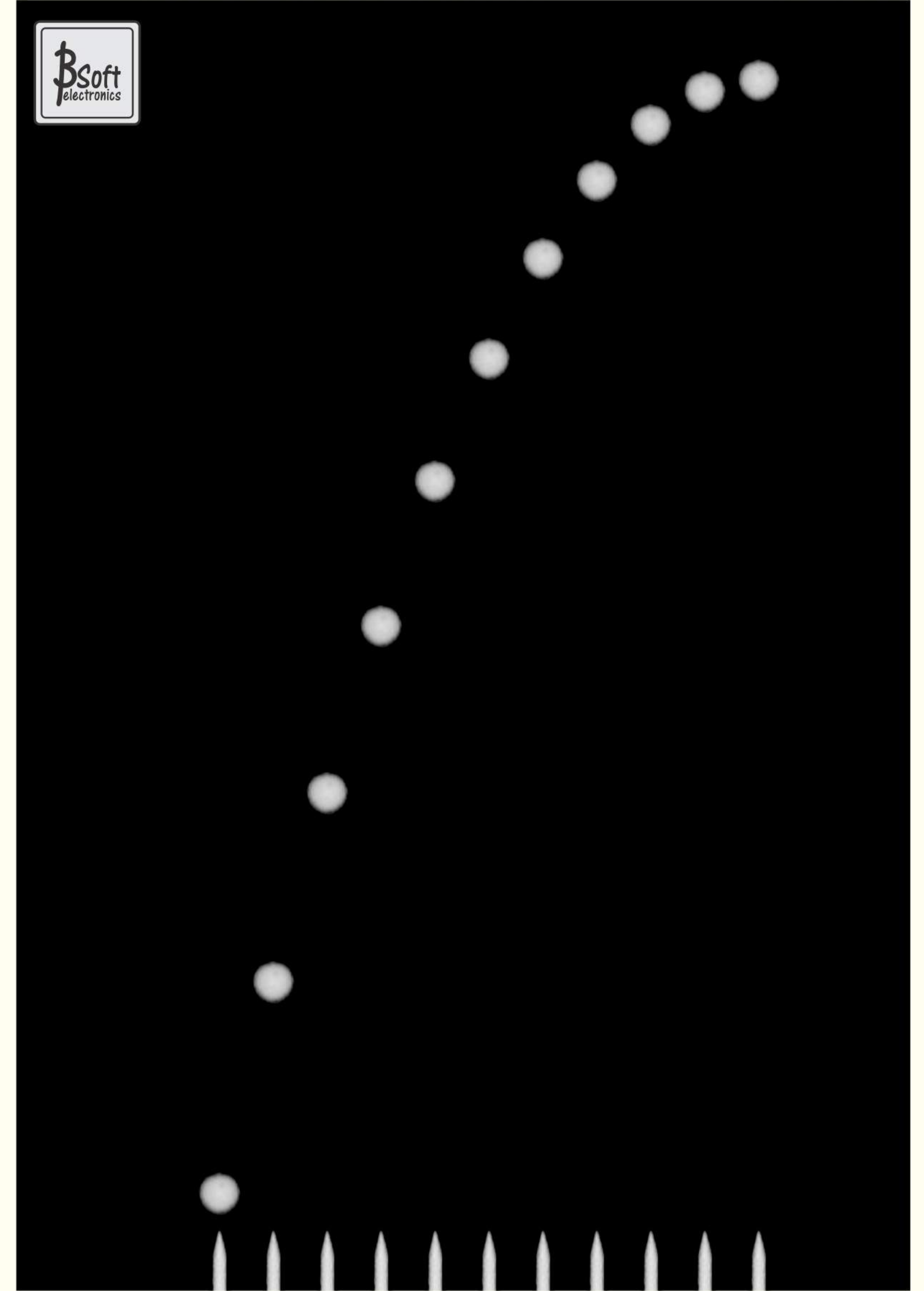
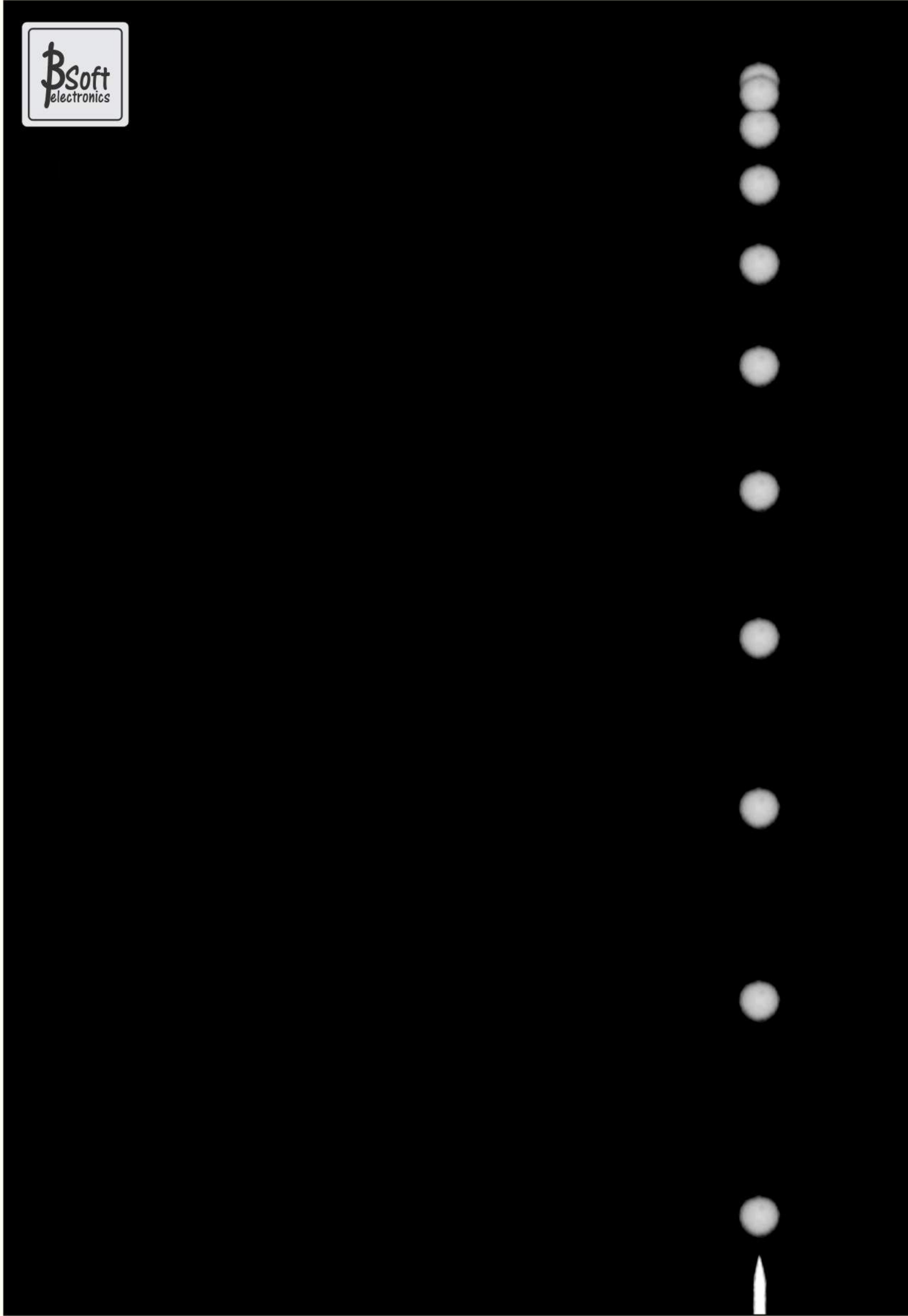
A képek készítését egy számítógép-vezérelt komplex elektronikus berendezés segíti. Egy assembly program **ki-kapcsolatja a teremvilágítást**, és a fényképezőgép kinyitása után két másodperccel **elindíttatja a jelenséget**.

A teljesen elsötétített teremben egy nagy fényerejű villanólámpával (blitz), **egymásután**, néhány ezredmásodperces időközökben **megvillantjuk a mozgó testet**.

A jelenség ideje alatt a nyitott fényképezőgép a különböző helyzeteket **ugyanazon a képen rögzíti**. A fényképezőgép bezárása megállítja a folyamatot, felgyullad a villany.

Ezek a képek „beszédesen” mutatják a jelenség lényegét, sok mindent megértünk belőle, de **hiányzik a diákok saját hozzájárulása, a kísérletezés élménye**.

A stroboszkópos képek elkészültek

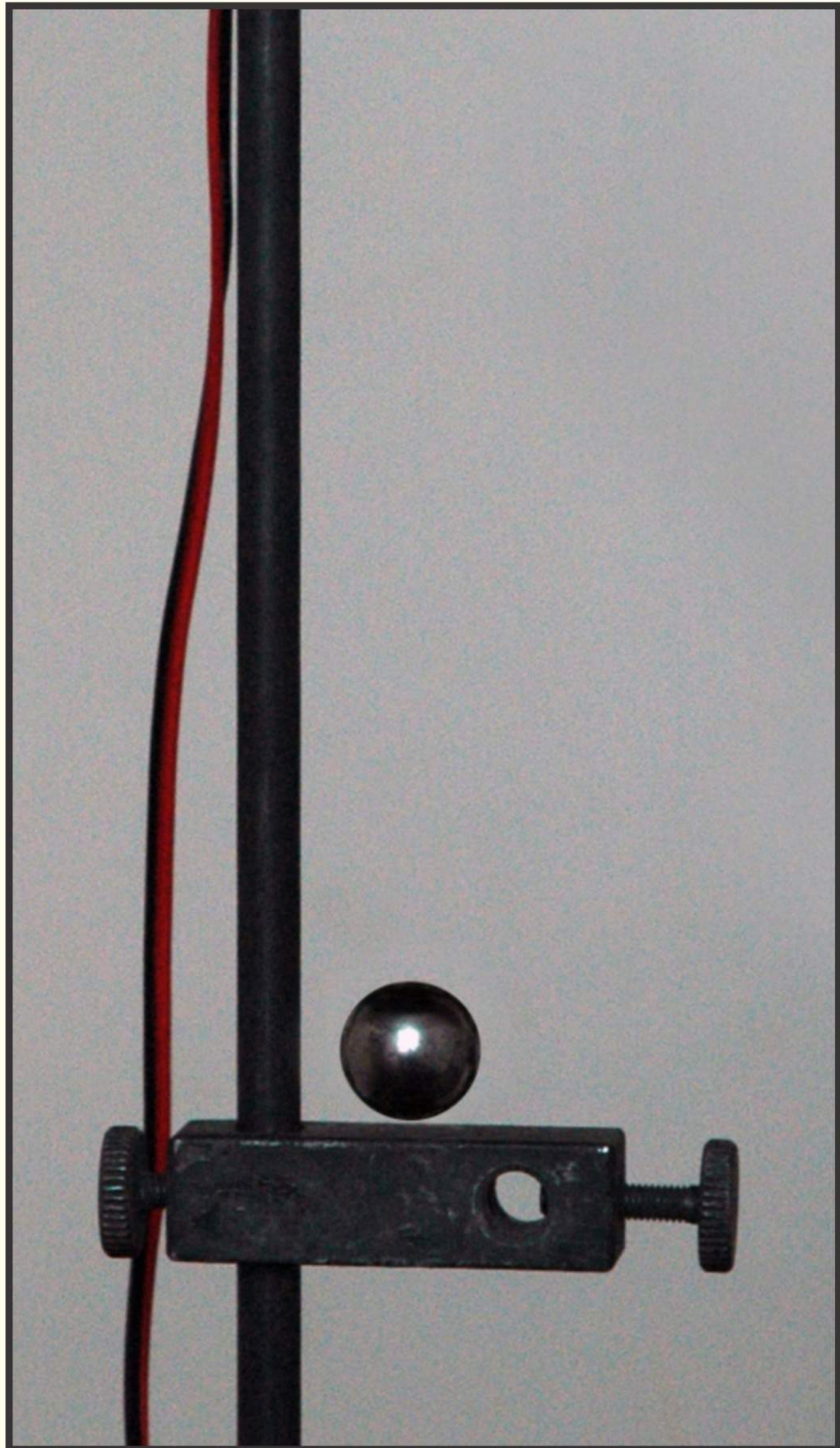


A szabadesést így látja az álló és a jobbra elmozduló megfigyelő

A szabadesés vezérlőrendszere



Egy fényképezőgép helyett sok szem!



Még a magnéziumszalagos időkből tudtam, hogy a szem sokáig megjegyzi a megvilágított tárgyat, a környezetével együtt. A szabades kísérleténél ezt a tapasztalatot használtam fel.

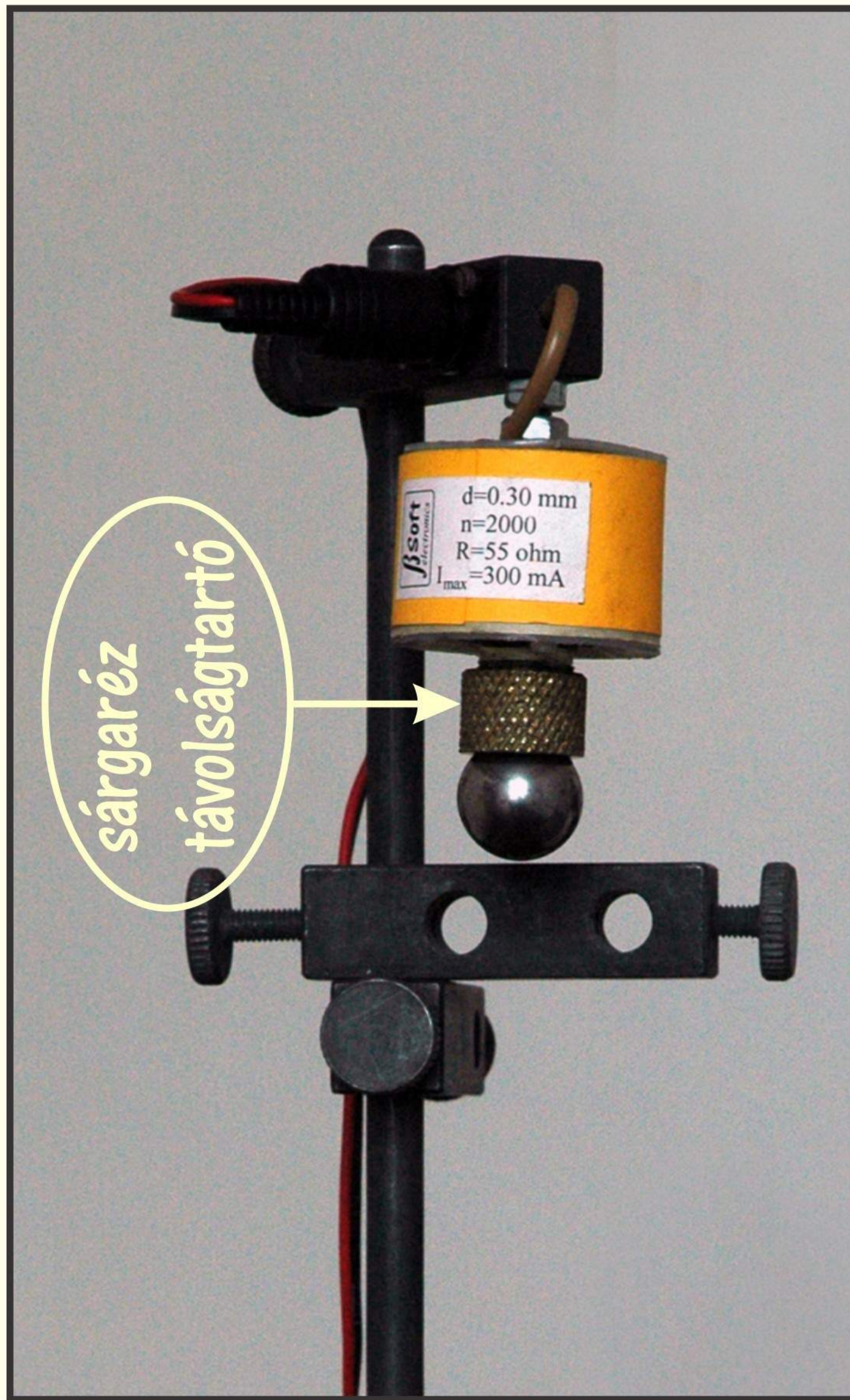
A kísérlet során lényegében stroboszkópos képet készítünk, csak a fényképezőgép helyett a néhány milliomod másodpercig megvillantott golyót a mi szemünkkel „fényképezzük le”.

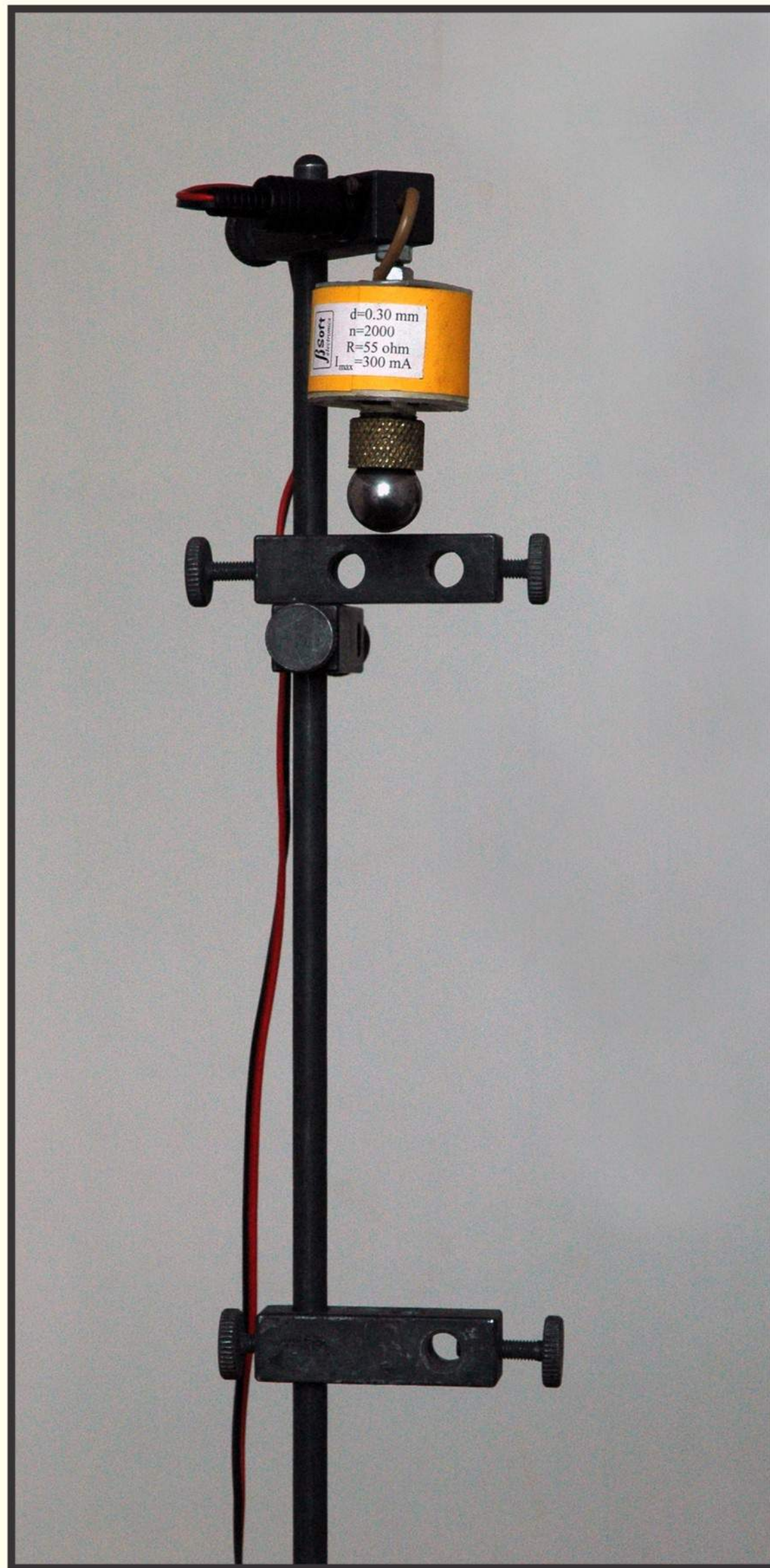
A golyó megfogása

Az asztalokon elhelyezett magas állványokon egy elektromágnes segítségével tartjuk a golyókat.

Az elektromágnes igen erősen vonzza a golyót, amely acélból lévén meg is mágnesesződik, tehát kerülnünk kell az elektromágnes és a golyó közvetlen érintkezését.

Egy sárgaréz távolságtartóval be szabályozhatjuk a vonzást, hogy az áram kikapcsoláskor tényleg leessenek a golyók.



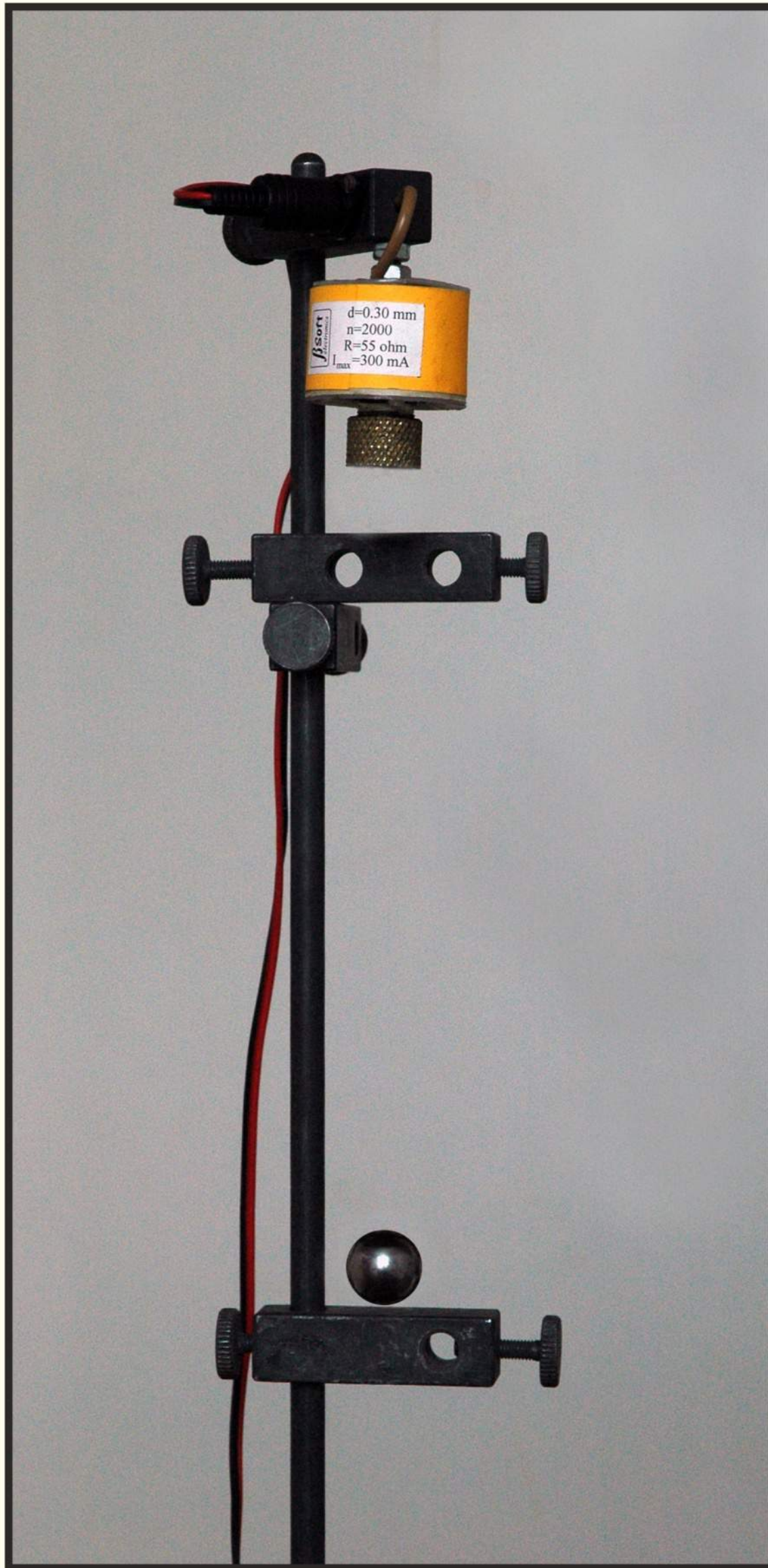


A golyó indítása

A golyó indulási helyzetét egy rögzített helyzetjelzővel határozzuk meg. A kísérlet indításakor a számítógép kikapcsolatja a termvilágítást, majd rövid várakozás után, a **Start** jelzésre kikapcsolja a golyót tartó elektromágnesek áramellátását, ezt azonnal (néhány μs) egy első felvillanással jelzi is. A szemünk a második helyzetjelző magasságában várja a golyó megjelenését.

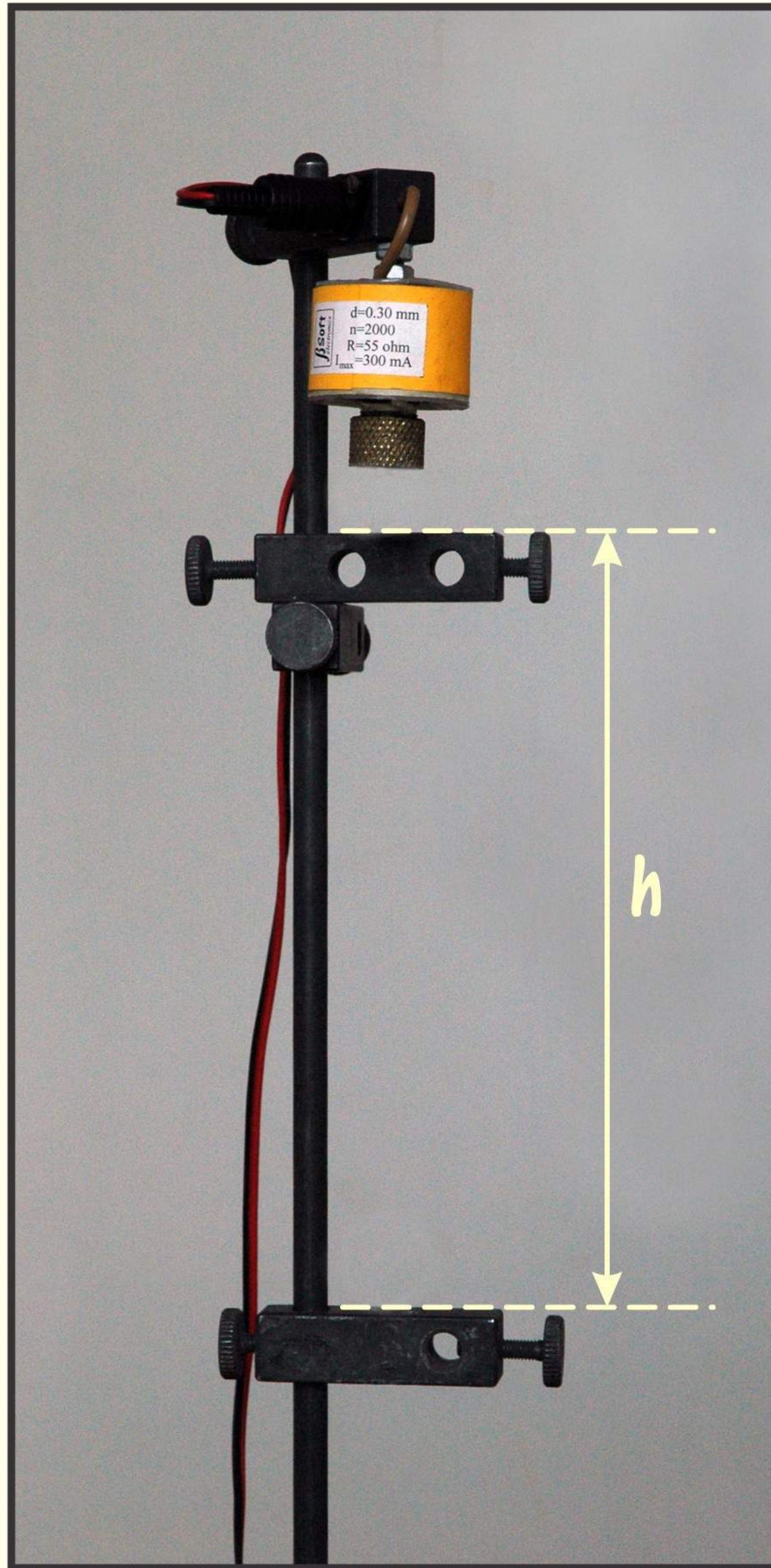
A golyó érkezése

Egy előre meghatározott idő után a teljesen sötét teremben újra felvillantjuk a blitzet, a diákok pedig „lefényképezik” a golyó helyzetét. Egy másodperc elteltével a számítógép visszakapcsolja a teremvilágítást és az elektromágnesek áramellátását. A rendszer készen áll az újabb mérésekre. Néhány próbálkozás után meghatározhatjuk a golyó helyzetét a második felvillanáskor.



A megtett út mérése

Néhány megismételt próbálkozás után elég jól be lehet állítani az alsó referenciát (a felsőt a beszállításkor állítottuk be), így elég nagy pontossággal tudjuk azonosítani a golyó helyzetét a második felvillanáskor. Egyszerű távolságméréssel megállapíthatjuk a golyó által megtett utat az elektromágnes áramának kikapcsolásától (első villanás) a második villanásig.





Fizikum - ADY Endre Líceum, Nagyvárad, 2008



Fizikum - ADY Endre Líceum, Nagyvárad, 2008

Egy adys csoport mérési eredményei



Mérési eredmények

t[ms]	475	450	425	400	375	350	325	300	275	250	225	200	175	150	125	100
h[cm]	105.9	96.3	83.1	75.2	64.3	57.1	47.6	40.2	34.1	28.4	22.1	17.6	13.1	9.5	6.4	3.9

Mérési eredmények

t[ms]	475	450	425	400	375	350	325	300	275	250	225	200	175	150	125	100
h[cm]	105.9	96.3	83.1	75.2	64.3	57.1	47.6	40.2	34.1	28.4	22.1	17.6	13.1	9.5	6.4	3.9

A laborgyakorlat látszólag igen egyszerű, mindenki számára érthető mérési eredményeket ad. Ez egy tipikus mérési sorozat az egyik diák dolgozatából.

Mérési eredmények

t[ms]	475	450	425	400	375	350	325	300	275	250	225	200	175	150	125	100
h[cm]	105.9	96.3	83.1	75.2	64.3	57.1	47.6	40.2	34.1	28.4	22.1	17.6	13.1	9.5	6.4	3.9
t[s]	0.475	0.450	0.425	0.400	0.375	0.350	0.325	0.300	0.275	0.250	0.225	0.200	0.175	0.150	0.125	0.100
t ² [s ²]	0.226	0.203	0.181	0.160	0.141	0.123	0.106	0.090	0.076	0.063	0.051	0.040	0.031	0.023	0.016	0.010
h[m]	1.059	0.963	0.831	0.752	0.643	0.571	0.476	0.402	0.341	0.284	0.221	0.176	0.131	0.095	0.064	0.039
\sqrt{h} [m]	1.029	0.981	0.912	0.867	0.802	0.756	0.690	0.634	0.584	0.533	0.470	0.420	0.362	0.308	0.253	0.197

A laborgyakorlat látszólag igen egyszerű, mindenki számára érthető mérési eredményeket ad. Ez egy tipikus mérési sorozat az egyik diák dolgozatából.

Csak az első két sor jelenti a valódi mérési eredményeket, a többi az ábrázolásokhoz szükséges, kiszámított adatokat tartalmazza.

A mérési eredmények faggatása

Előre látható a megtett út négyzetes függése az időtől. Ezen felületes megállapítás után be is fejezhetnénk a mérések értelmezését, hiszen igazoltnak látszik a jól ismert $h=gt^2/2$ törvény.

A mérési eredmények faggatása

Előre látható a megtett út négyzetes függése az időtől. Ezen felületes megállapítás után be is fejezhetnénk a mérések értelmezését, hiszen igazoltnak látszik a jól ismert $h=gt^2/2$ törvény.

Egy egyszerű számítás a következő szórnyűséget adja:

t[ms]	475	450	425	400	375	350	325	300	275	250	225	200	175	150	125	100
h[cm]	105.9	96.3	83.1	75.2	64.3	57.1	47.6	40.2	34.1	28.4	22.1	17.6	13.1	9.5	6.4	3.9
g[m/s ²]	9.4	9.5	9.2	9.4	9.1	9.3	9.0	8.9	9.0	9.1	8.7	8.8	8.6	8.4	8.2	7.8

A mérési eredmények faggatása

Előre látható a megtett út négyzetes függése az időtől. Ezen felületes megállapítás után be is fejezhetnénk a mérések értelmezését, hiszen igazoltnak látszik a jól ismert $h=gt^2/2$ törvény.

Egy egyszerű számítás a következő szörnyűséget adja:

t[ms]	475	450	425	400	375	350	325	300	275	250	225	200	175	150	125	100
h[cm]	105.9	96.3	83.1	75.2	64.3	57.1	47.6	40.2	34.1	28.4	22.1	17.6	13.1	9.5	6.4	3.9
g[m/s ²]	9.4	9.5	9.2	9.4	9.1	9.3	9.0	8.9	9.0	9.1	8.7	8.8	8.6	8.4	8.2	7.8

→ Ennyire nem változhat a gravitációs gyorsulás! ←

A mérési eredmények faggatása

Előre látható a megtett út négyzetes függése az időtől. Ezen felületes megállapítás után be is fejezhetnénk a mérések értelmezését, hiszen igazoltnak látszik a jól ismert $h=gt^2/2$ törvény.

Egy egyszerű számítás a következő szörnyűséget adja:

t[ms]	475	450	425	400	375	350	325	300	275	250	225	200	175	150	125	100
h[cm]	105.9	96.3	83.1	75.2	64.3	57.1	47.6	40.2	34.1	28.4	22.1	17.6	13.1	9.5	6.4	3.9
g[m/s ²]	9.4	9.5	9.2	9.4	9.1	9.3	9.0	8.9	9.0	9.1	8.7	8.8	8.6	8.4	8.2	7.8

→ Ennyire nem változhat a gravitációs gyorsulás! ←

Óriási hibák vannak, ez az út nem járható!

A mérési eredmények faggatása

Előre látható a megtett út négyzetes függése az időtől. Ezen felületes megállapítás után be is fejezhetnénk a mérések értelmezését, hiszen igazoltnak látszik a jól ismert $h=gt^2/2$ törvény.

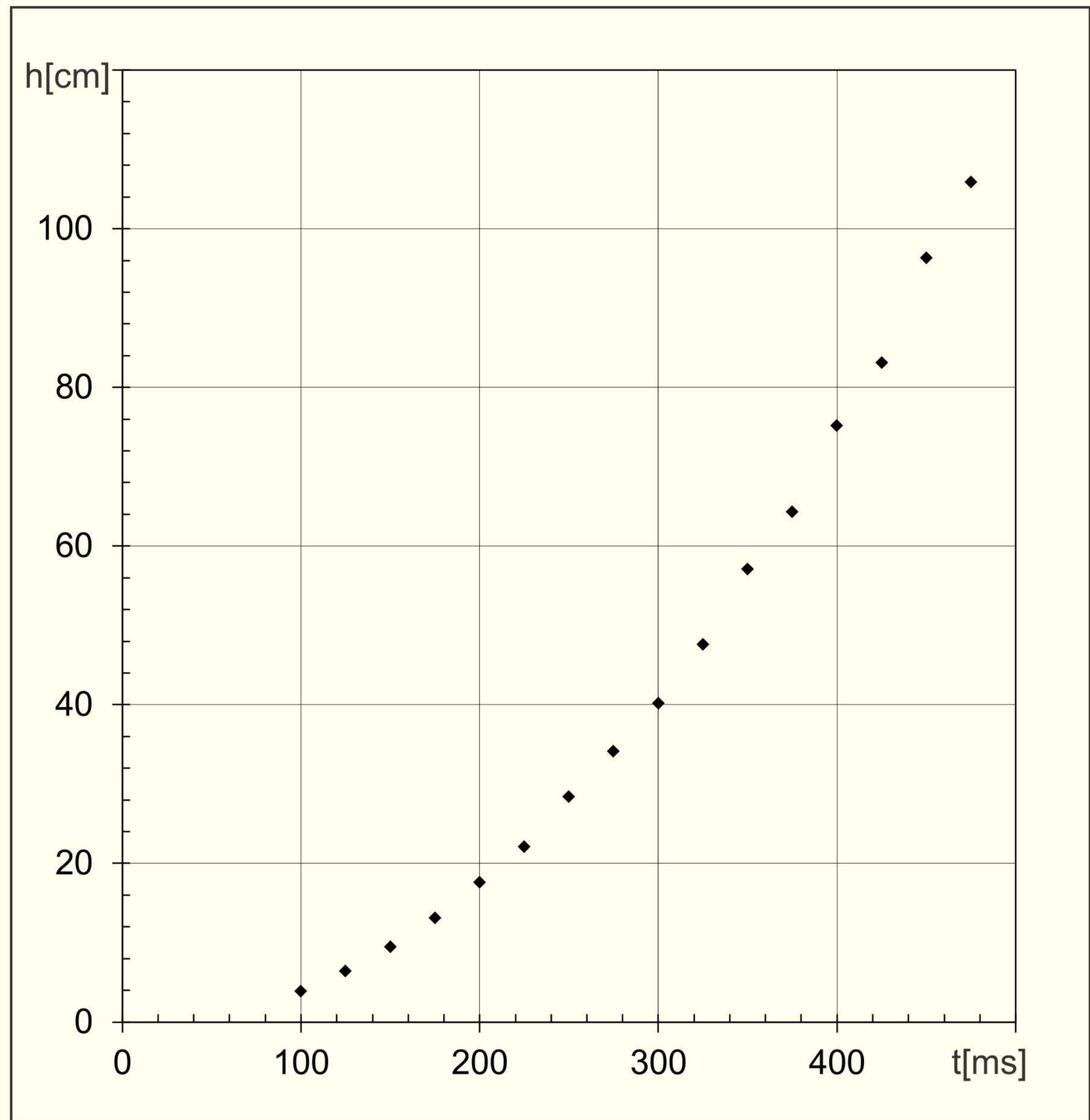
Egy egyszerű számítás a következő szórnyűséget adja:

t[ms]	475	450	425	400	375	350	325	300	275	250	225	200	175	150	125	100
h[cm]	105.9	96.3	83.1	75.2	64.3	57.1	47.6	40.2	34.1	28.4	22.1	17.6	13.1	9.5	6.4	3.9
g[m/s ²]	9.4	9.5	9.2	9.4	9.1	9.3	9.0	8.9	9.0	9.1	8.7	8.8	8.6	8.4	8.2	7.8

A fizikus egy mérési sorozat elvégzése után **nem számol**, hanem **ábrázolja** a mérési eredményeket és megpróbálja értelmezni azokat. **Egy grafikon sokszorosán többet mond el a jelenségről, mint egy mérési táblázat.**

A szabadon eső test útgrafikonja

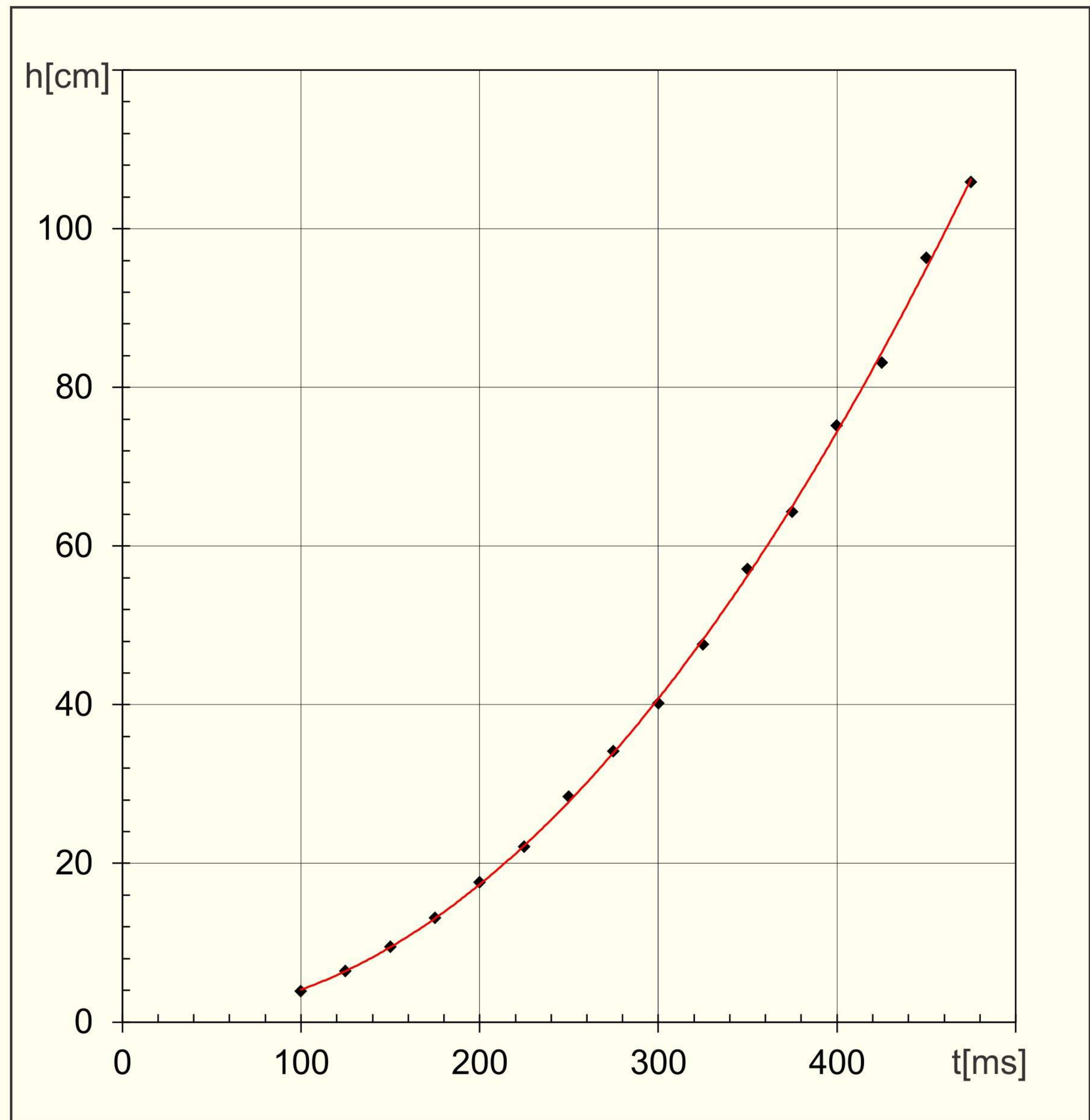
t[ms]	h[cm]
475	105.9
450	96.3
425	83.1
400	75.2
375	64.3
350	57.1
325	47.6
300	40.2
275	34.1
250	28.4
225	22.1
200	17.6
175	13.1
150	9.5
125	6.4
100	3.9



A mérési pontok egy másodfokú összefüggésre hasonlítanak

A szabadon eső test útgrafikonja

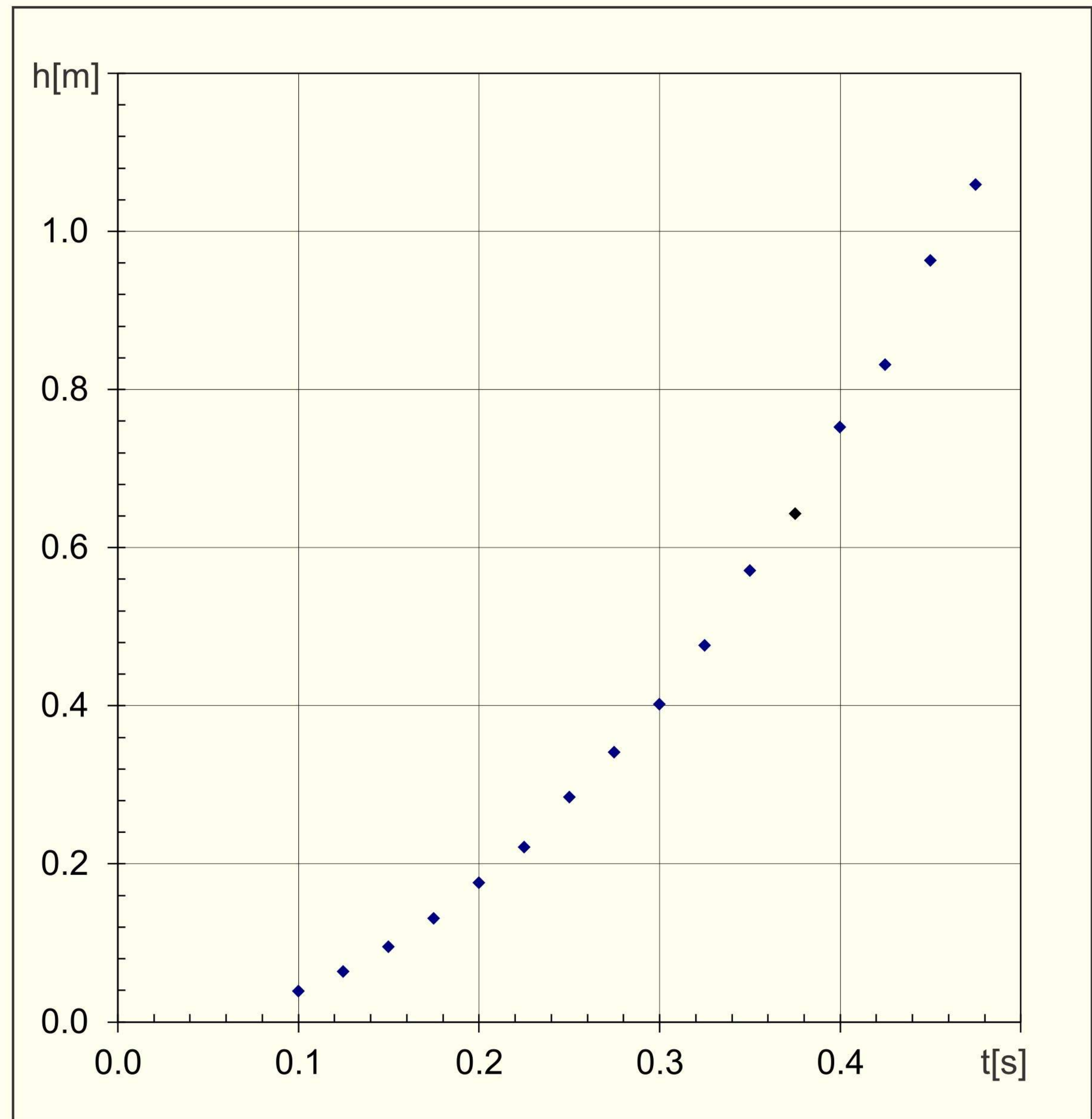
t[ms]	h[cm]
475	105.9
450	96.3
425	83.1
400	75.2
375	64.3
350	57.1
325	47.6
300	40.2
275	34.1
250	28.4
225	22.1
200	17.6
175	13.1
150	9.5
125	6.4
100	3.9



A mérési pontokra egy másodfokú görbét fektetünk

A szabadon eső test útgrafikonja SI-ben

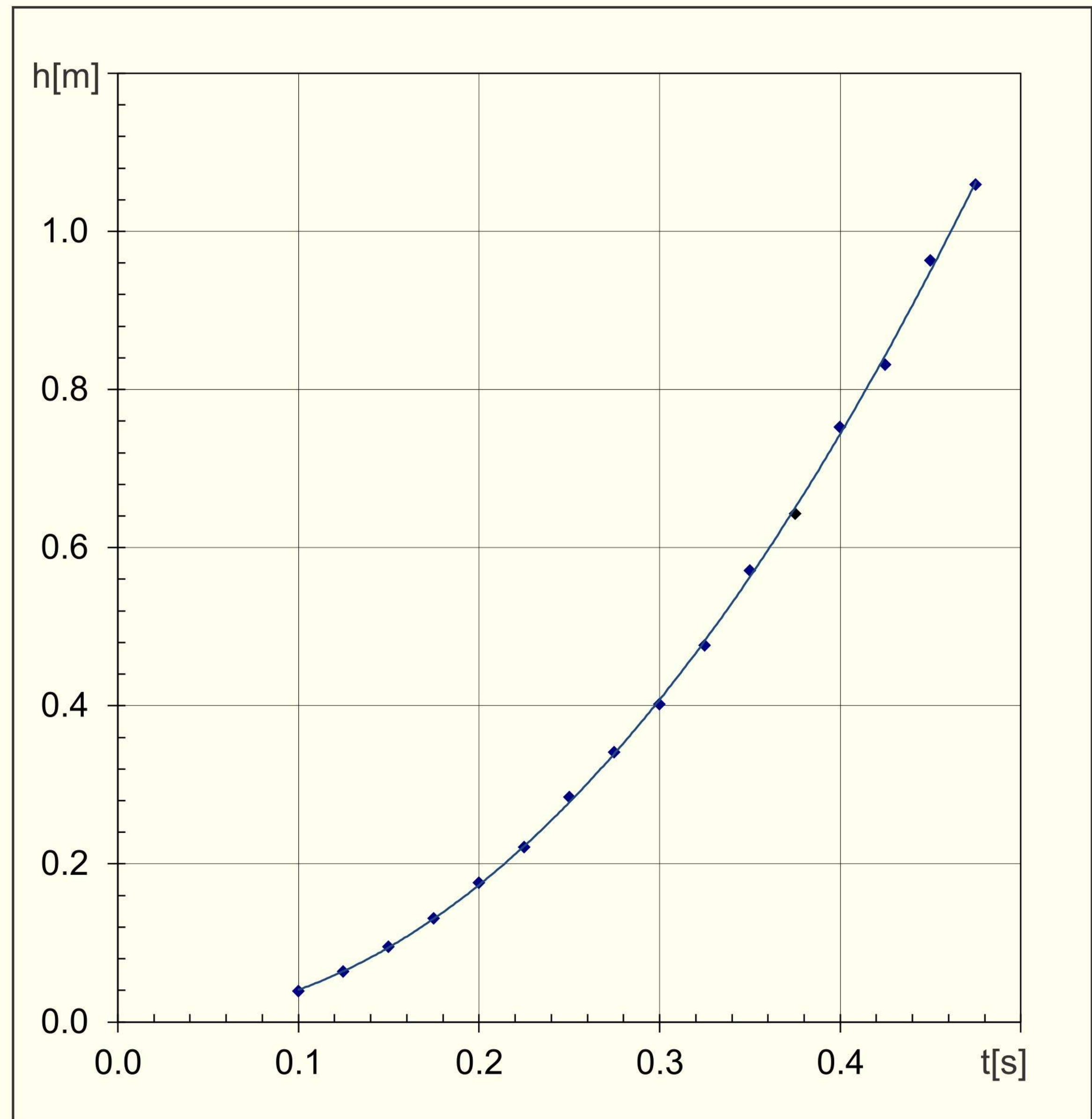
t[s]	h[m]
0.475	1.059
0.450	0.963
0.425	0.831
0.400	0.752
0.375	0.643
0.350	0.571
0.325	0.476
0.300	0.402
0.275	0.341
0.250	0.284
0.225	0.221
0.200	0.176
0.175	0.131
0.150	0.095
0.125	0.064
0.100	0.039



A mérési pontok egy másodfokú összefüggésre hasonlítanak

A szabadon eső test útgrafikonja SI-ben

t[s]	h[m]
0.475	1.059
0.450	0.963
0.425	0.831
0.400	0.752
0.375	0.643
0.350	0.571
0.325	0.476
0.300	0.402
0.275	0.341
0.250	0.284
0.225	0.221
0.200	0.176
0.175	0.131
0.150	0.095
0.125	0.064
0.100	0.039



A mérési pontokra egy másodfokú görbét fektetünk

A másodfokú görbe nem rejteget valamit?

A továbbiakban azt fogjuk megvizsgálni, hogy tényleg egyszerű négyzetes összefüggésről van-e szó, vagy a valódi görbe alakjából más, szabad szemmel nem látható fizikai jelenségre is következtethetünk.

A másodfokú görbe nem rejteget valamit?

A továbbiakban azt fogjuk megvizsgálni, hogy tényleg egyszerű négyzetes összefüggésről van-e szó, vagy a valódi görbe alakjából más, szabad szemmel nem látható fizikai jelenségre is következtethetünk.

Ha a látott jelenségre érvényes a $h=gt^2/2$ törvény, akkor - a mérési eredményekből ábrázolva - a megtett út $h=f(t^2)$ grafikonja csak egy, az **origón áthaladó egyenes** lehet.

A másodfokú görbe nem rejteget valamit?

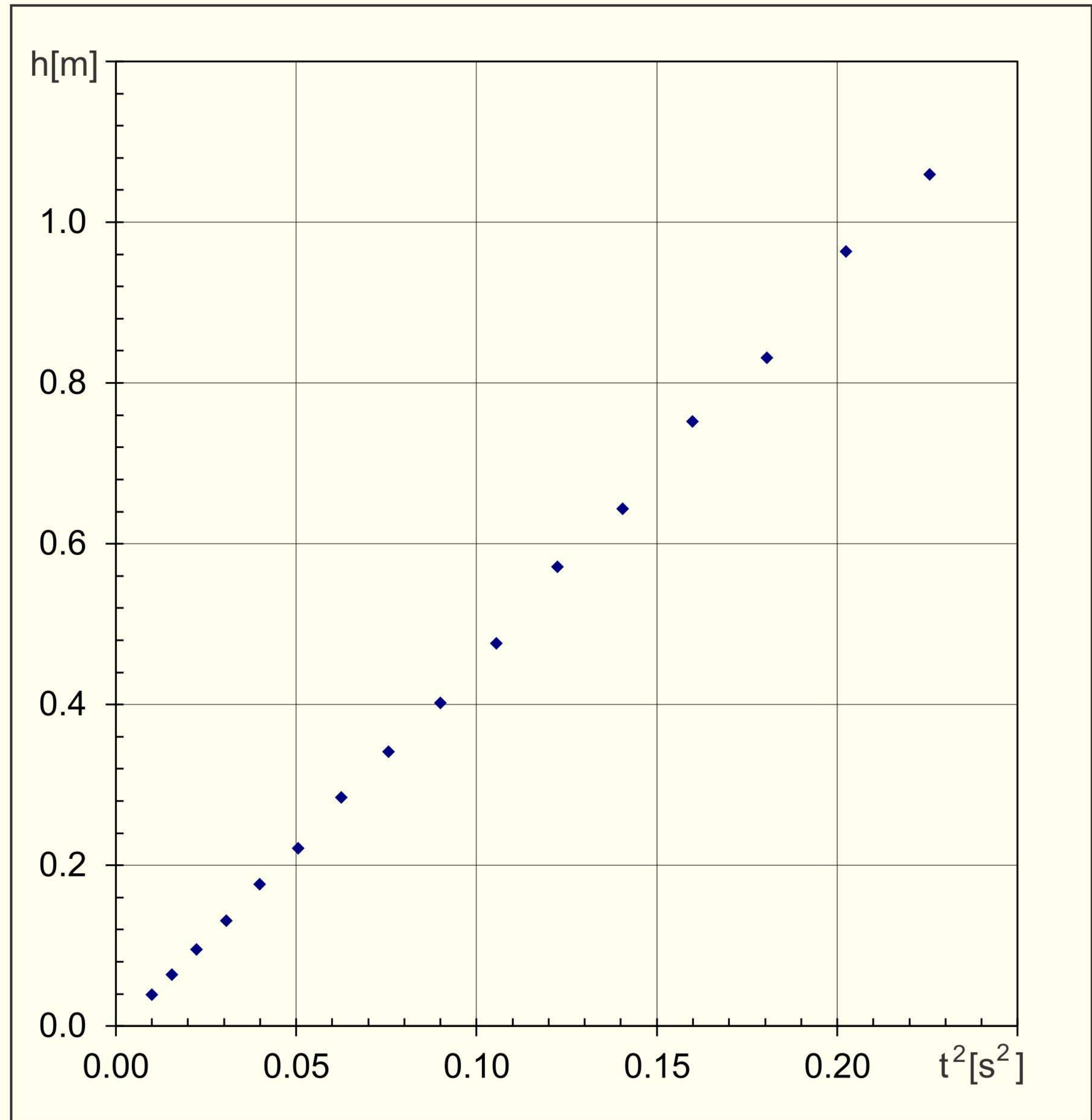
A továbbiakban azt fogjuk megvizsgálni, hogy tényleg egyszerű négyzetes összefüggésről van-e szó, vagy a valódi görbe alakjából más, szabad szemmel nem látható fizikai jelenségre is következtethetünk.

Ha a látott jelenségre érvényes a $h=gt^2/2$ törvény, akkor - a mérési eredményekből ábrázolva - a megtett út $h=f(t^2)$ grafikonja csak egy, az **origón áthaladó egyenes** lehet.

A legkisebb négyzetek elvét alkalmazzuk, és megkeressük azt az egyenest, amely legjobban megközelíti a $h=f(t^2)$ segítségével kiszámított pontokat. Az egyenes irányítáéyzője tartalmazza a mozgás gyorsulását, így könnyen meghatározhatjuk a gravitációs gyorsulást is.

Az út grafikonja a t^2 függvényében

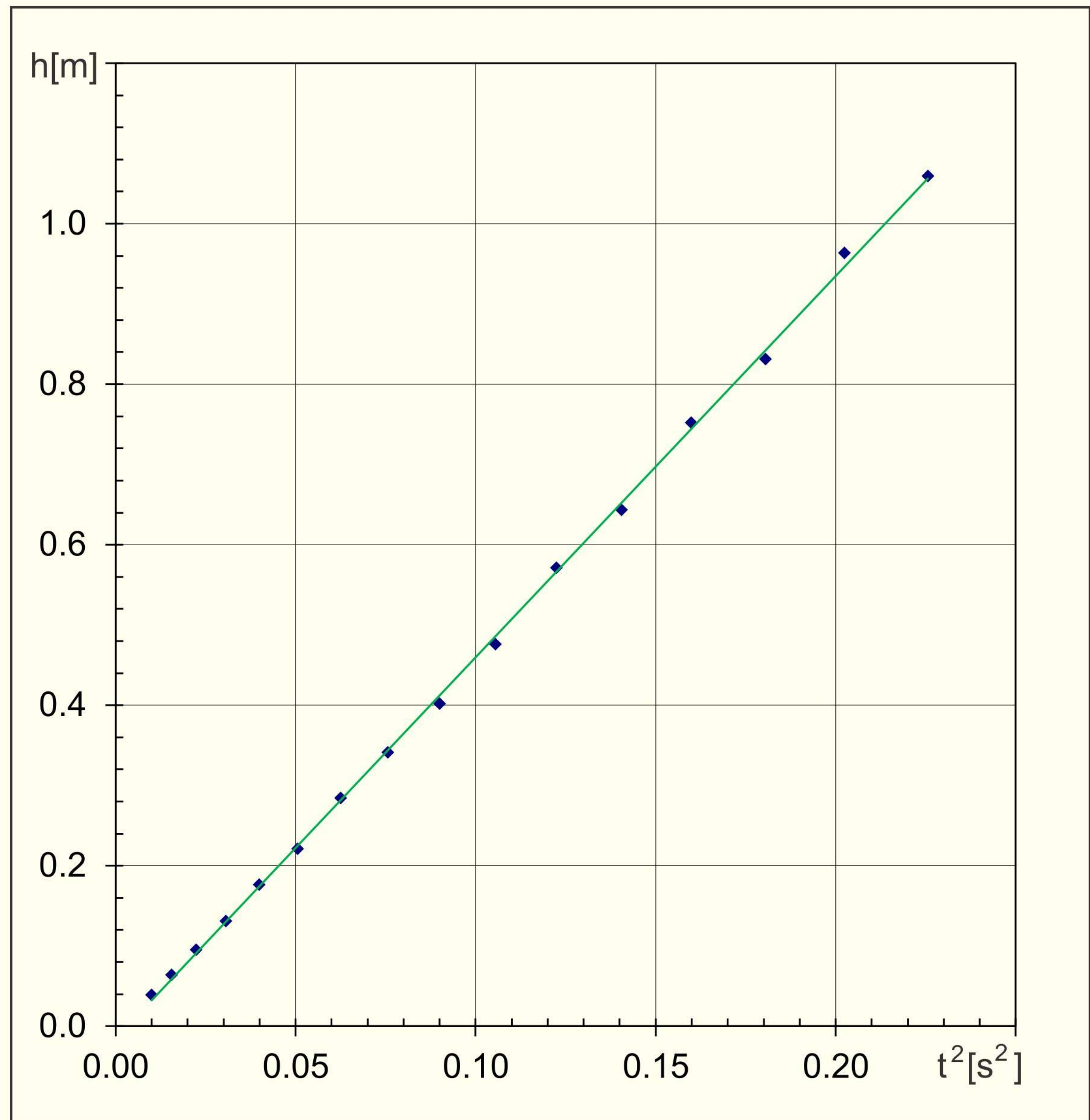
$t^2[s^2]$	$h[m]$
0.226	1.059
0.203	0.963
0.181	0.831
0.160	0.752
0.141	0.643
0.123	0.571
0.106	0.476
0.090	0.402
0.076	0.341
0.063	0.284
0.051	0.221
0.040	0.176
0.031	0.131
0.023	0.095
0.016	0.064
0.010	0.039



A mérési pontok egy elsőfokú összefüggésre hasonlítanak

Az út grafikonja a t^2 függvényében

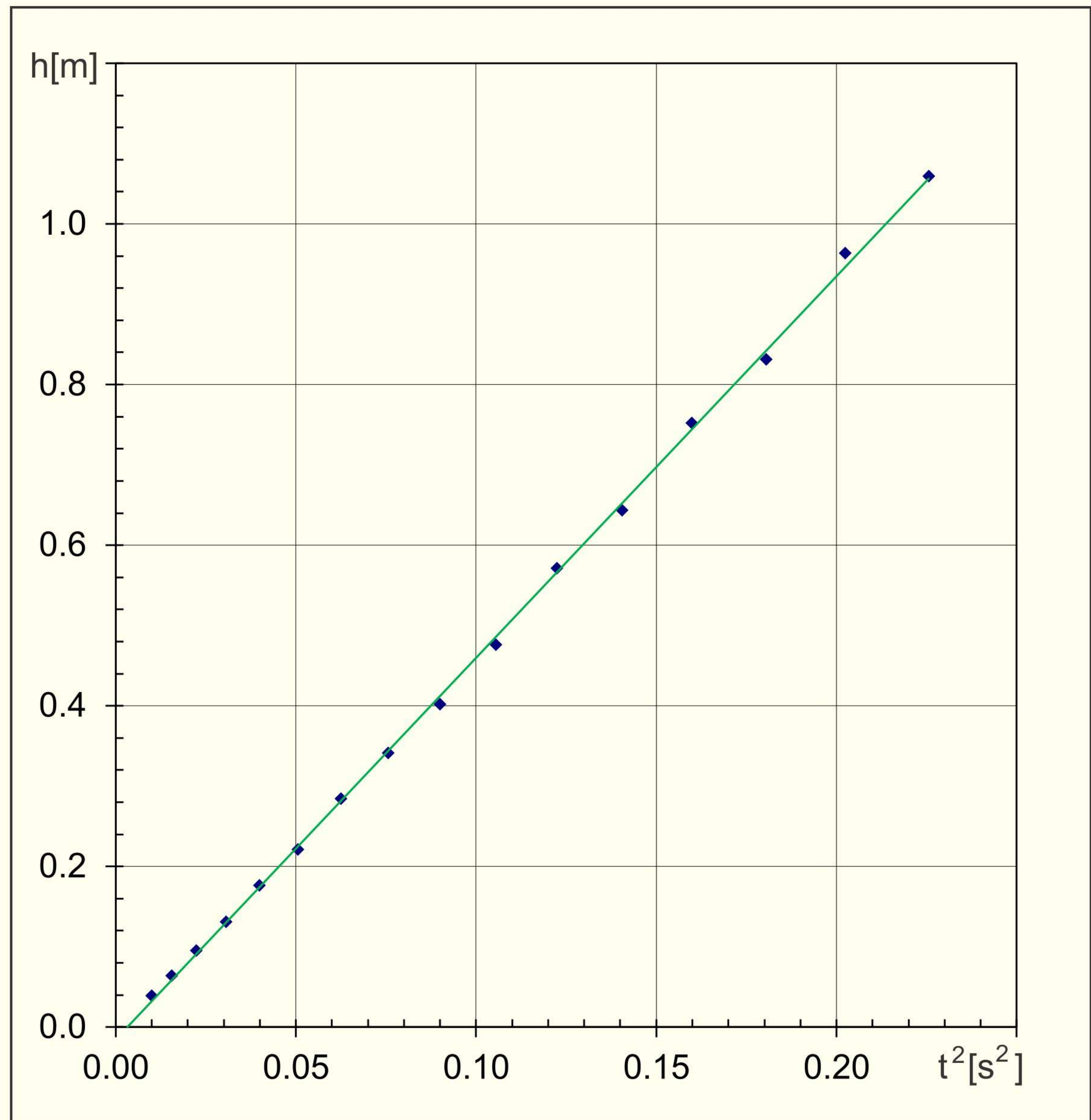
$t^2[s^2]$	$h[m]$
0.226	1.059
0.203	0.963
0.181	0.831
0.160	0.752
0.141	0.643
0.123	0.571
0.106	0.476
0.090	0.402
0.076	0.341
0.063	0.284
0.051	0.221
0.040	0.176
0.031	0.131
0.023	0.095
0.016	0.064
0.010	0.039



A mérési pontokra egy elsőfokú görbét fektetünk

Az út grafikonja a t^2 függvényében

$t^2[s^2]$	$h[m]$
0.226	1.059
0.203	0.963
0.181	0.831
0.160	0.752
0.141	0.643
0.123	0.571
0.106	0.476
0.090	0.402
0.076	0.341
0.063	0.284
0.051	0.221
0.040	0.176
0.031	0.131
0.023	0.095
0.016	0.064
0.010	0.039



Az elsőfokú görbe nem megy át az origón!

Az elsőfokú görbe nem megy át az origón!

Ez valójában azt jelenti, hogy a mozgás rövidebb ideig tart, mint azt mi elképzeltük, vagyis a mérési eredményeink helytelenek. Természetesen, a készülékek pontossági osztálya és az igen sok mérés ezt az utóbbi feltevést nem látszik igazolni.

Az elsőfokú görbe nem megy át az origón!

Ez valójában azt jelenti, hogy a mozgás rövidebb ideig tart, mint azt mi elképzeltük, vagyis a mérési eredményeink helytelenek. Természetesen, a készülékek pontossági osztálya és az igen sok mérés ezt az utóbbi feltevést nem látszik igazolni.

A mérések során a diákok észre szokták venni, hogy az igen kis időintervallumok esetén a mindenkinek egyformán elengedett golyó nem minden csoportban teszi meg ugyanazt az utat, ugyanannyi idő alatt. Ez lehetetlen, bizonyára az egyedi kísérleti eszközök különböznek egymástól.

Az elsőfokú görbe nem megy át az origón!

Ez valójában azt jelenti, hogy a mozgás rövidebb ideig tart, mint azt mi elképzeltük, vagyis a mérési eredményeink helytelenek. Természetesen, a készülékek pontossági osztálya és az igen sok mérés ezt az utóbbi feltevést nem látszik igazolni.

A mérések során a diákok észre szokták venni, hogy az igen kis időintervallumok esetén a mindenkinek egyformán elengedett golyó nem minden csoportban teszi meg ugyanazt az utat, ugyanannyi idő alatt. Ez lehetetlen, bizonyára az egyedi kísérleti eszközök különböznek egymástól.

Az egyetlen lehetséges különbség az egyes elektromágnesek felépítésében lehet. Az áram kikapcsolása után az elektromágnes (a vas remanenciája miatt) még visszatartja a golyót, és ez okozza a néhány ms-ra becsült késést.

Hogyan tovább?

Ha feltételezzük, hogy csak ez a jelenség áll a késés mögött, akkor a megadott, pontosnak hitt t időből le kell vonnunk a mindegyik elektromágnesre jellemző egyedi elengedési Δt_{egyedi} időt, így a mozgás valódi idejét t_v -vel jelölve felírhatjuk: $h = gt_v^2/2$, ahol t_v időt visszaszámíthatjuk a mérési eredményeinkből.

Hogyan tovább?

Ha feltételezzük, hogy csak ez a jelenség áll a késés mögött, akkor a megadott, pontosnak hitt t időből le kell vonnunk a mindegyik elektromágnesre jellemző egyedi elengedési Δt_{egyedi} időt, így a mozgás valódi idejét t_v -vel jelölve felírhatjuk: $h = g t_v^2 / 2$, ahol t_v időt visszaszámíthatjuk a mérési eredményeinkből.

A $t_v = t - \Delta t_{\text{egyedi}}$ helyettesítéssel az új függvényünk így alakul: $h = g (t - \Delta t_{\text{egyedi}})^2 / 2$. Ennek ábrázolása lehetetlen, mert nem ismerjük az egyedi elengedési időt (Δt_{egyedi}).

Hogyan tovább?

Ha feltételezzük, hogy csak ez a jelenség áll a késés mögött, akkor a megadott, pontosnak hitt t időből le kell vonnunk a mindegyik elektromágnesre jellemző egyedi elengedési Δt_{egyedi} időt, így a mozgás valódi idejét t_v -vel jelölve felírhatjuk: $h = gt_v^2/2$, ahol t_v időt visszaszámíthatjuk a mérési eredményeinkből.

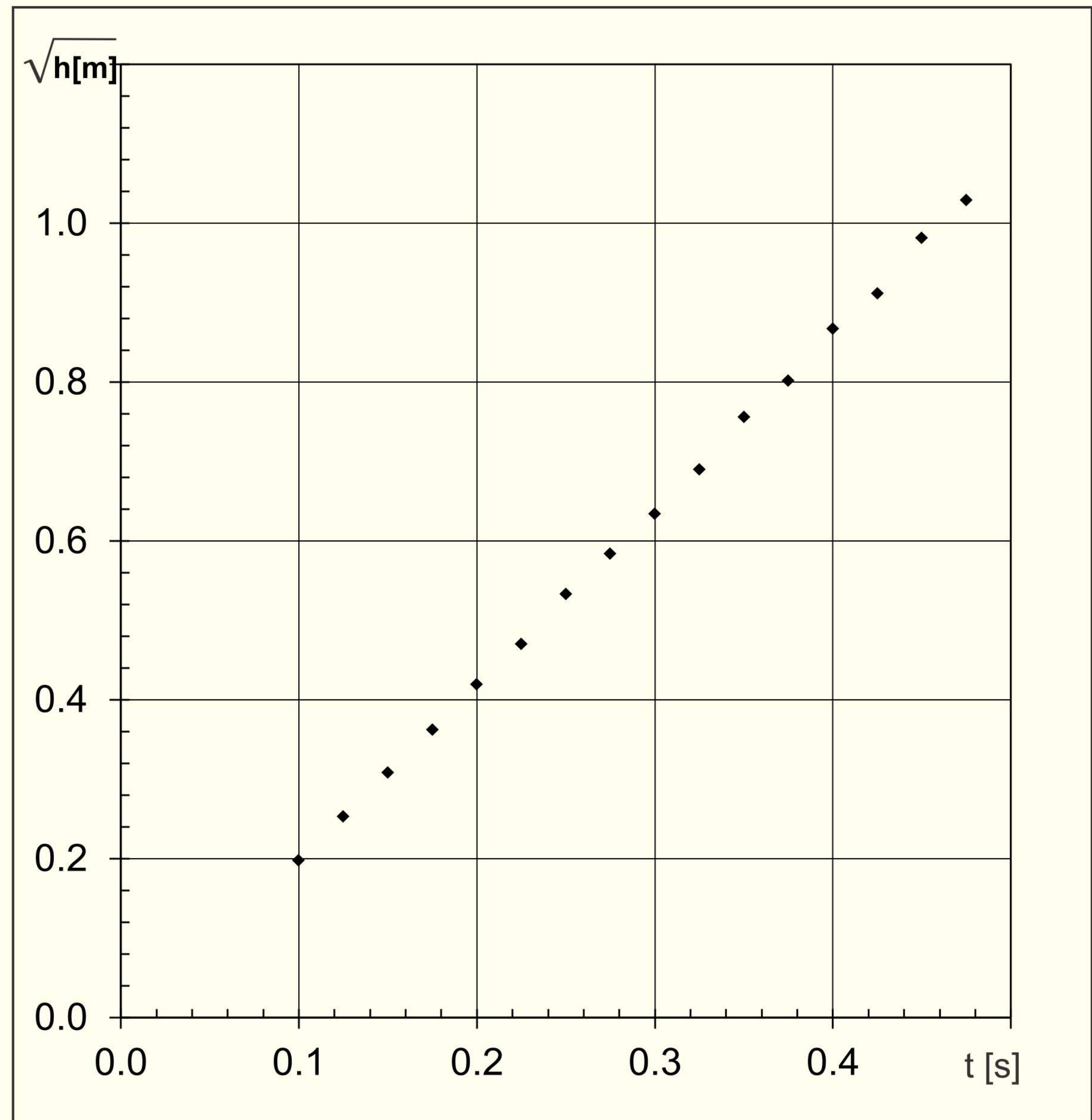
A $t_v = t - \Delta t_{\text{egyedi}}$ helyettesítéssel az új függvényünk így alakul: $h = g(t - \Delta t_{\text{egyedi}})^2/2$. Ennek ábrázolása lehetetlen, mert nem ismerjük az egyedi elengedési időt (Δt_{egyedi}).

Ha az előbbi egyenletből gyököt vonunk, akkor a következő kifejezéshez jutunk:

$$\sqrt{h} = \sqrt{g/2} (t - \Delta t_{\text{egyedi}}) = \sqrt{g/2} t - \sqrt{g/2} \Delta t_{\text{egyedi}}$$

$A\sqrt{h}$ grafikonja az idő függvényében

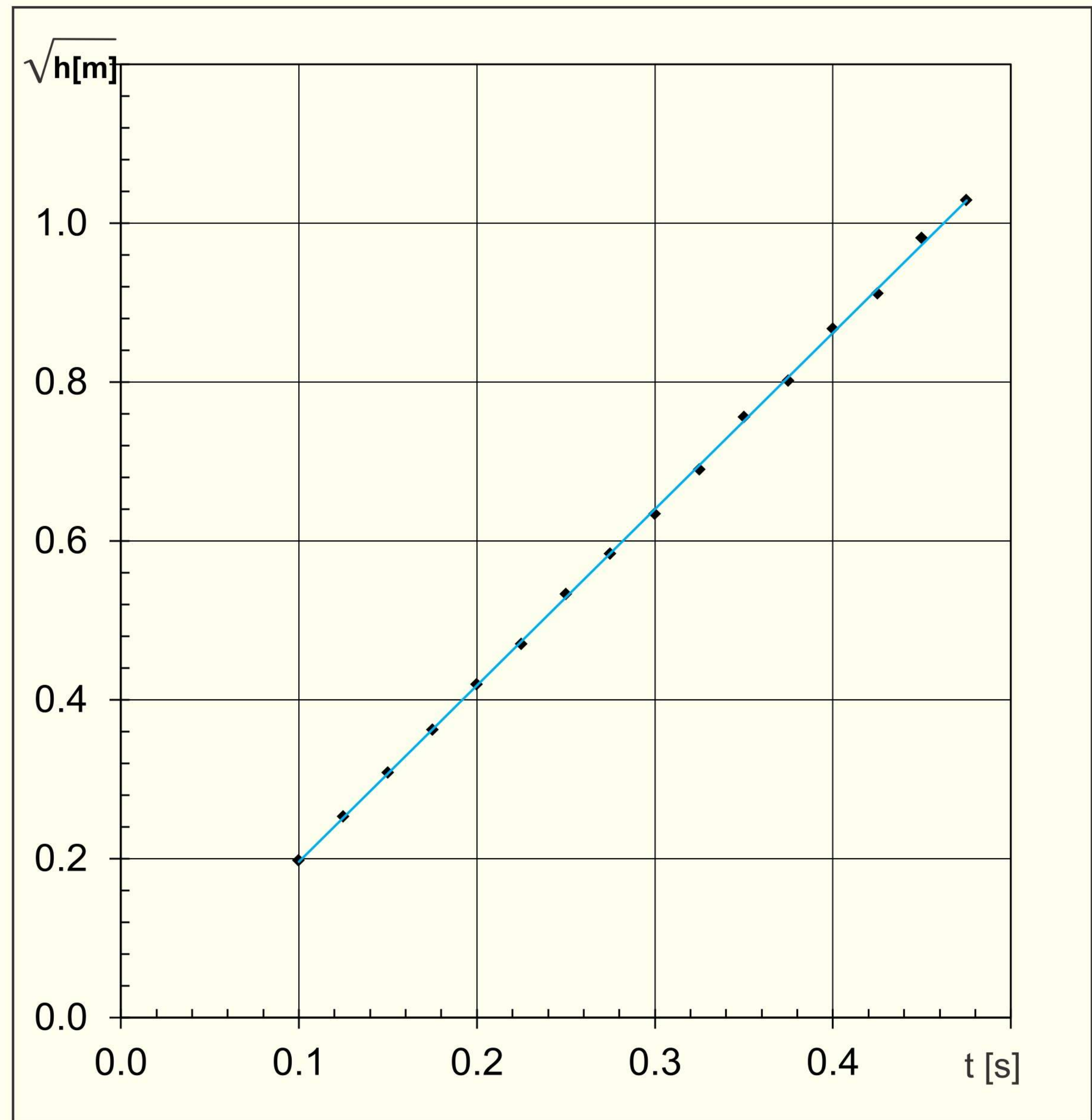
t[s]	\sqrt{h} [m]
0.475	1.029
0.450	0.981
0.425	0.912
0.400	0.867
0.375	0.802
0.350	0.756
0.325	0.690
0.300	0.634
0.275	0.584
0.250	0.533
0.225	0.470
0.200	0.420
0.175	0.362
0.150	0.308
0.125	0.253
0.100	0.197



A mérési pontok egy elsőfokú összefüggésre hasonlítanak

$A\sqrt{h}$ grafikonja az idő függvényében

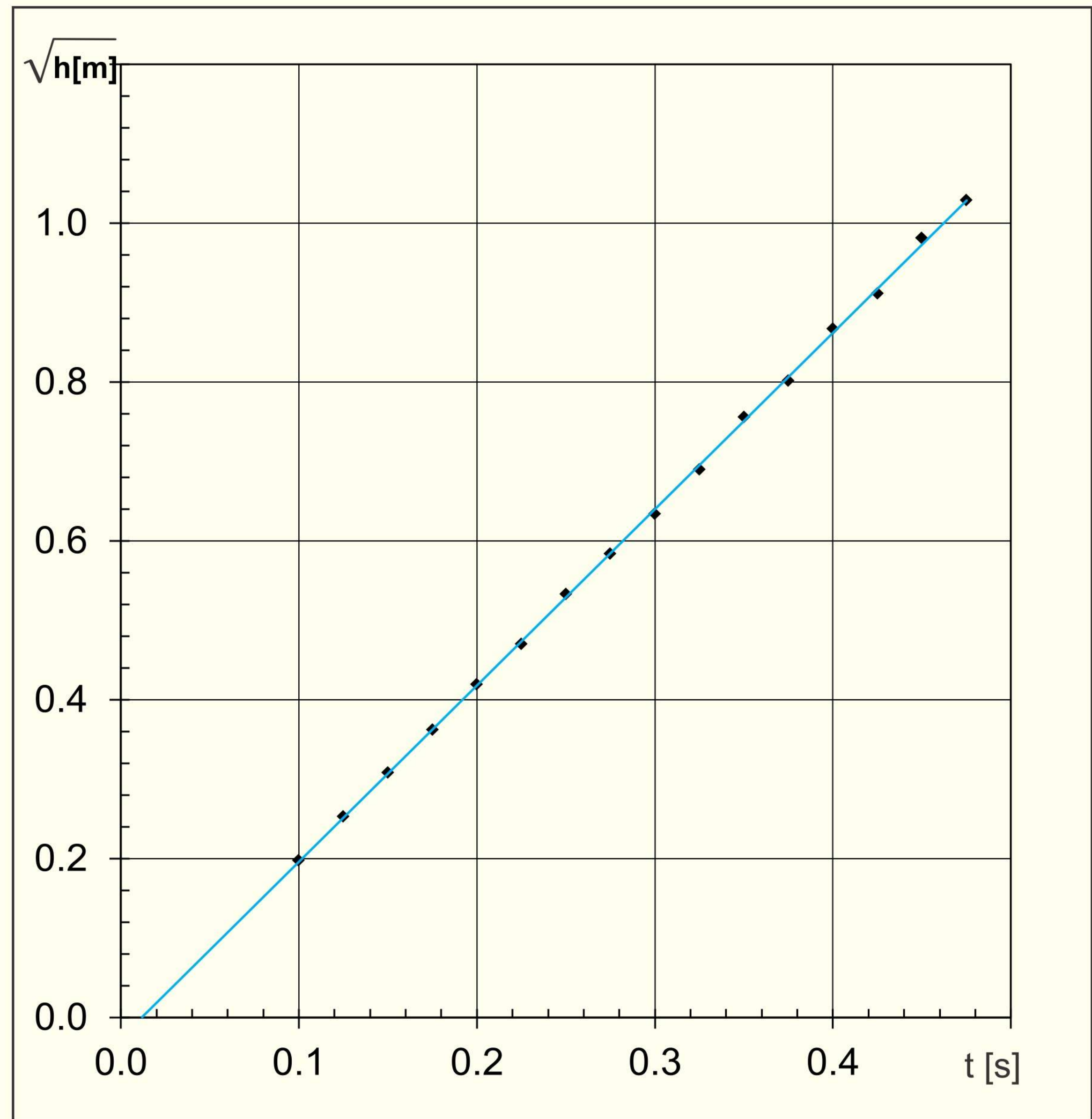
t[s]	\sqrt{h} [m]
0.475	1.029
0.450	0.981
0.425	0.912
0.400	0.867
0.375	0.802
0.350	0.756
0.325	0.690
0.300	0.634
0.275	0.584
0.250	0.533
0.225	0.470
0.200	0.420
0.175	0.362
0.150	0.308
0.125	0.253
0.100	0.197



A mérési pontokra egy elsőfokú görbét fektetünk

$A\sqrt{h}$ grafikonja az idő függvényében

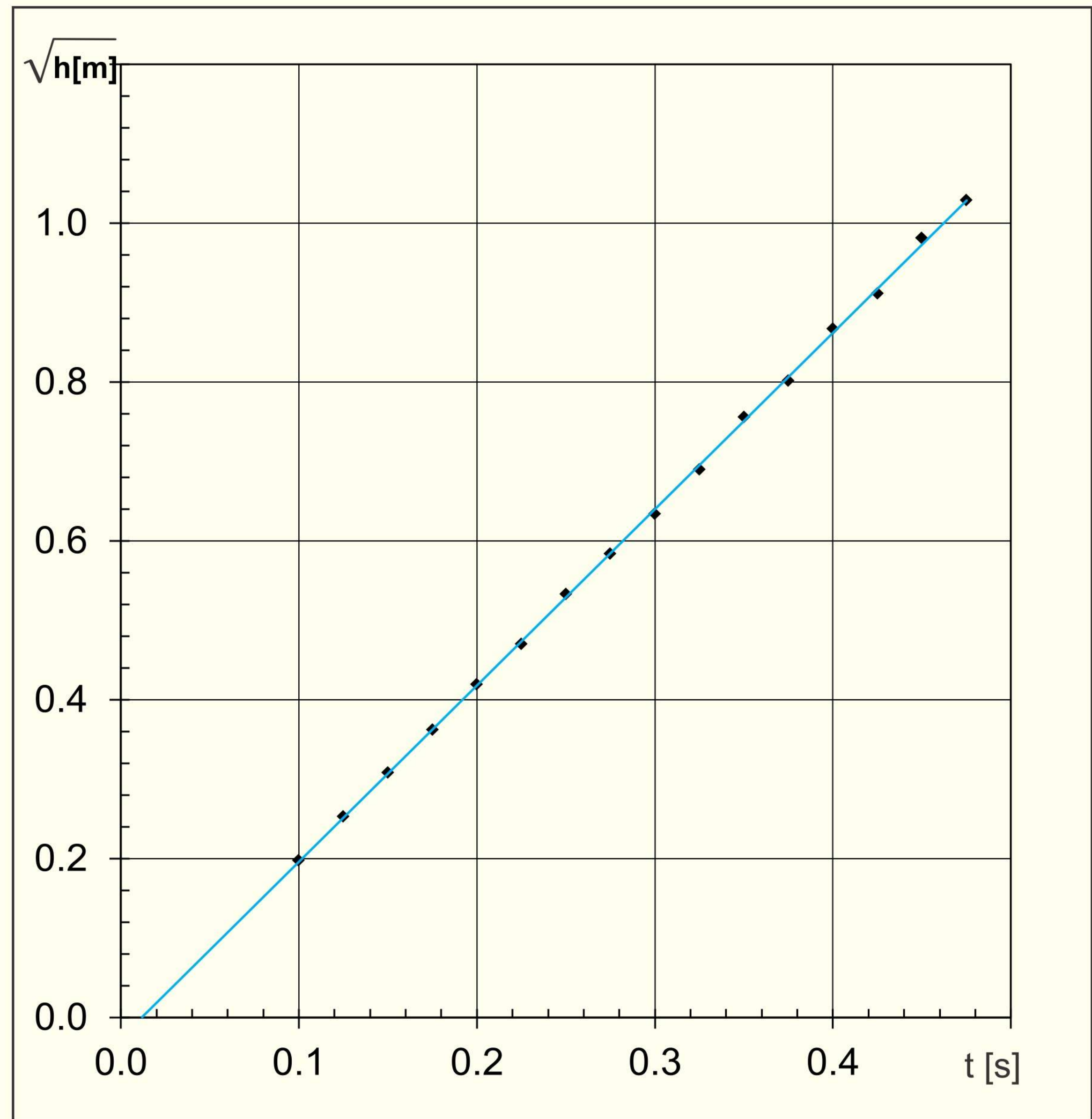
t[s]	\sqrt{h} [m]
0.475	1.029
0.450	0.981
0.425	0.912
0.400	0.867
0.375	0.802
0.350	0.756
0.325	0.690
0.300	0.634
0.275	0.584
0.250	0.533
0.225	0.470
0.200	0.420
0.175	0.362
0.150	0.308
0.125	0.253
0.100	0.197



Az elsőfokú görbe csak nem megy át az origón!

$A\sqrt{h}$ grafikonja az idő függvényében

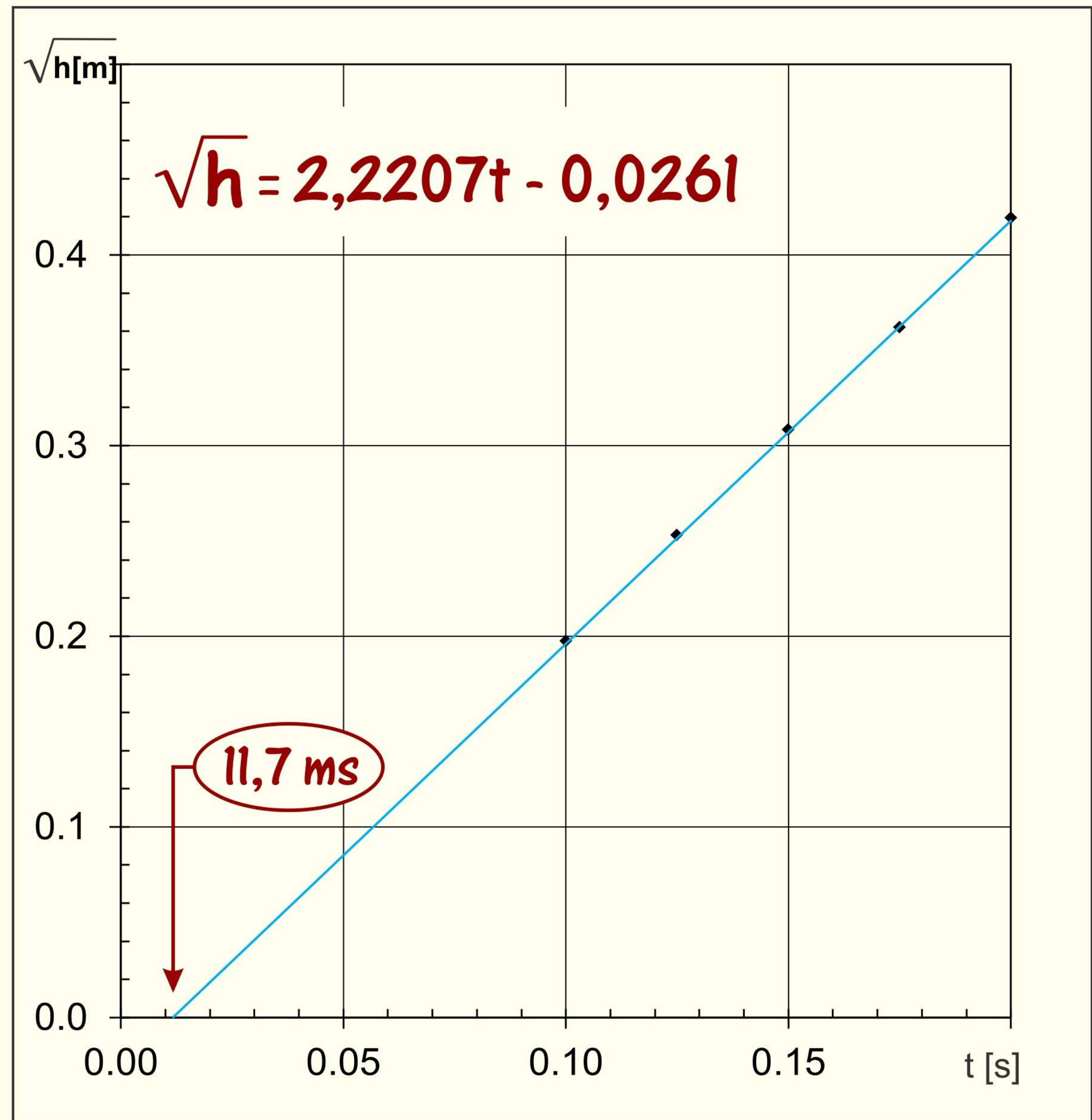
t[s]	\sqrt{h} [m]
0.475	1.029
0.450	0.981
0.425	0.912
0.400	0.867
0.375	0.802
0.350	0.756
0.325	0.690
0.300	0.634
0.275	0.584
0.250	0.533
0.225	0.470
0.200	0.420
0.175	0.362
0.150	0.308
0.125	0.253
0.100	0.197



Az elsőfokú görbének **nem kell átmennie az origón!**

$A\sqrt{h}$ grafikonja az idő függvényében (részlet)

t[s]	\sqrt{h} [m]
0.475	1.029
0.450	0.981
0.425	0.912
0.400	0.867
0.375	0.802
0.350	0.756
0.325	0.690
0.300	0.634
0.275	0.584
0.250	0.533
0.225	0.470
0.200	0.420
0.175	0.362
0.150	0.308
0.125	0.253
0.100	0.197



Az elsőfokú görbének **nem kell átmennie az origón!**

A mérési eredmények értékelése, hibaforrások

A mérési eredményeket elemezve és felhasználva a legkisebb négyzetek elvét megkapjuk a jelenséget leíró elsőfokú görbe tapasztalati egyenletét:

A mérési eredmények értékelése, hibaforrások

A mérési eredményeket elemezve és felhasználva a legkisebb négyzetek elvét megkapjuk a jelenséget leíró elsőfokú görbe tapasztalati egyenletét:

$$\sqrt{h} = m \cdot t + n = 2,2207 \cdot t - 0,0261 \text{ tapasztalati egyenlet}$$

A mérési eredmények értékelése, hibaforrások

A mérési eredményeket elemezve és felhasználva a legkisebb négyzetek elvét megkapjuk a jelenséget leíró elsőfokú görbe tapasztalati egyenletét:

$$\sqrt{h} = m \cdot t + n = 2,2207 \cdot t - 0,0261 \quad \text{tapasztalati egyenlet}$$

$$\sqrt{h} = \sqrt{g/2} \cdot t - \sqrt{g/2} \cdot \Delta t_{\text{egyedi}} \quad \text{elméleti egyenlet}$$

A mérési eredmények értékelése, hibaforrások

A mérési eredményeket elemezve és felhasználva a legkisebb négyzetek elvét megkapjuk a jelenséget leíró elsőfokú görbe tapasztalati egyenletét:

$$\sqrt{h} = m \cdot t + n = 2,2207 \cdot t - 0,0261 \quad \text{tapasztalati egyenlet}$$

$$\sqrt{h} = \sqrt{g/2} \cdot t - \sqrt{g/2} \cdot \Delta t_{\text{egyedi}} \quad \text{elméleti egyenlet}$$

A kísérletet leíró elsőfokú görbe tapasztalati egyenletét és az elméleti meggondolás egyenletét összehasonlítva megkapjuk a gravitációs gyorsulás értékét ebben a kísérletben: $\sqrt{g/2} = m; \longrightarrow g = 2 \cdot m^2 = 2 \cdot 2,2207^2 = 9,86 \text{ m/s}^2$, ami a kísérleti körülmények ismeretében igen jó eredménynek számít.

Ezzel a módszerrel megkapott $g=9,86 \text{ m/s}^2$ hibája jobb, mint $\pm 0,1 \text{ m/s}^2$ ($\pm 1,0\%$). A fő hibaforrást a távolságok leolvasási pontatlansága jelenti, mert az időintervallumok pontatlansága $\pm 10 \mu\text{s}$ alatt van (kvarcetalonokkal ellenőriztük). Az időintervallumokat a számítógép belső kvarcoszcillátorából nyerjük a megszakítások teljes letiltása után, innen van a $\pm 10 \mu\text{s}$ alatti pontosság.

Ezzel a módszerrel megkapott $g=9,86 \text{ m/s}^2$ hibája jobb, mint $\pm 0,1 \text{ m/s}^2$ ($\pm 1,0\%$). A fő hibaforrást a távolságok leolvasási pontatlansága jelenti, mert az időintervallumok pontatlansága $\pm 10 \mu\text{s}$ alatt van (kvarcetalonokkal ellenőriztük). Az időintervallumokat a számítógép belső kvarcoszcillátorából nyerjük a megszakítások teljes letiltása után, innen van a $\pm 10 \mu\text{s}$ alatti pontosság.

Az elektromágnes visszatartási idejét a következő módon számíthatjuk ki: $n = -m \cdot \Delta t_{\text{egyedi}}$, majd:

$$\Delta t_{\text{egyedi}} = -n/m = -(-0,0261)/2,2207 \text{ s} = 11,7 \text{ ms}$$

Ezzel a módszerrel megkapott $g=9,86 \text{ m/s}^2$ hibája jobb, mint $\pm 0,1 \text{ m/s}^2$ ($\pm 1,0\%$). A fő hibaforrást a távolságok leolvasási pontatlansága jelenti, mert az időintervallumok pontatlansága $\pm 10 \mu\text{s}$ alatt van (kvarcetalonokkal ellenőriztük). Az időintervallumokat a számítógép belső kvarcoszcillátorából nyerjük a megszakítások teljes letiltása után, innen van a $\pm 10 \mu\text{s}$ alatti pontosság.

Az elektromágnes visszatartási idejét a következő módon számíthatjuk ki: $n = -m \cdot \Delta t_{\text{egyedi}}$, majd:

$$\Delta t_{\text{egyedi}} = -n/m = -(-0,0261)/2,2207 \text{ s} = 11,7 \text{ ms}$$

Ez az érték is bőven belefér a szokásos értékhatárba, hiszen az elektromágnes általában 8-15 ms-ig tartja vissza a golyót (könnyen ellenőrizhetjük, ha a szabadesés törvényét ismertnek tekintjük, és $g=9,81 \text{ m/s}^2$ -tel számolunk).

Következtetések

Egy **egész osztállyal** elvégezhető kísérletet láttunk. Ez a módszer lehetőséget nyújt a **szabadesés úttörvényének igazolására**, valamint az **elektromágnes visszatartási idejének meghatározására**.

Következtetések

Egy **egész osztállyal** elvégezhető kísérletet láttunk. Ez a módszer lehetőséget nyújt a **szabadesés úttörvényének igazolására**, valamint az **elektromágnes visszatartási idejének meghatározására**.

A legkisebb négyzetek elve alkalmazásával a megkapott úttörvény deriválásával eljutunk a **pillanatnyi-sebesség törvényéhez**, illetve az egymásmelletti mérések segítségével egy-egy pontban megkaphatjuk az **átlagsebességet** is.

Következtetések

Egy **egész osztállyal** elvégezhető kísérletet láttunk. Ez a módszer lehetőséget nyújt a **szabadesés úttörvényének igazolására**, valamint az **elektromágnes visszatartási idejének** meghatározására.

A legkisebb négyzetek elve alkalmazásával a megkapott úttörvény deriválásával eljutunk a **pillanatnyi-sebesség törvényéhez**, illetve az egymásmelletti mérések segítségével egy-egy pontban megkaphatjuk az **átlagsebességet** is.

A **nagy visszatartási idő** miatt a gravitációs gyorsulás meghatározása **egy mérésből lehetetlen** az elektromágnes kikapcsolása és egy helyzetérzékelő alkalmazásával. Nálunk léteznek ilyen ipari berendezések (ráadásul mechanikai érzékelővel), csak **„nem tudom”** hogyan működnek.

A megfigyelési idő folytonos csökkentésével, feltételezve, hogy a visszatartási idő egy beállított elektromágnesnél lényegesen nem változik, a módszer lehetővé teszi a gravitációs gyorsulás elég jó meghatározását. Ez valójában azt jelenti, mintha igen **sok helyzetérzékelőnk lenne**, és eltekintenénk a visszatartási idő esetleges megváltozásától.

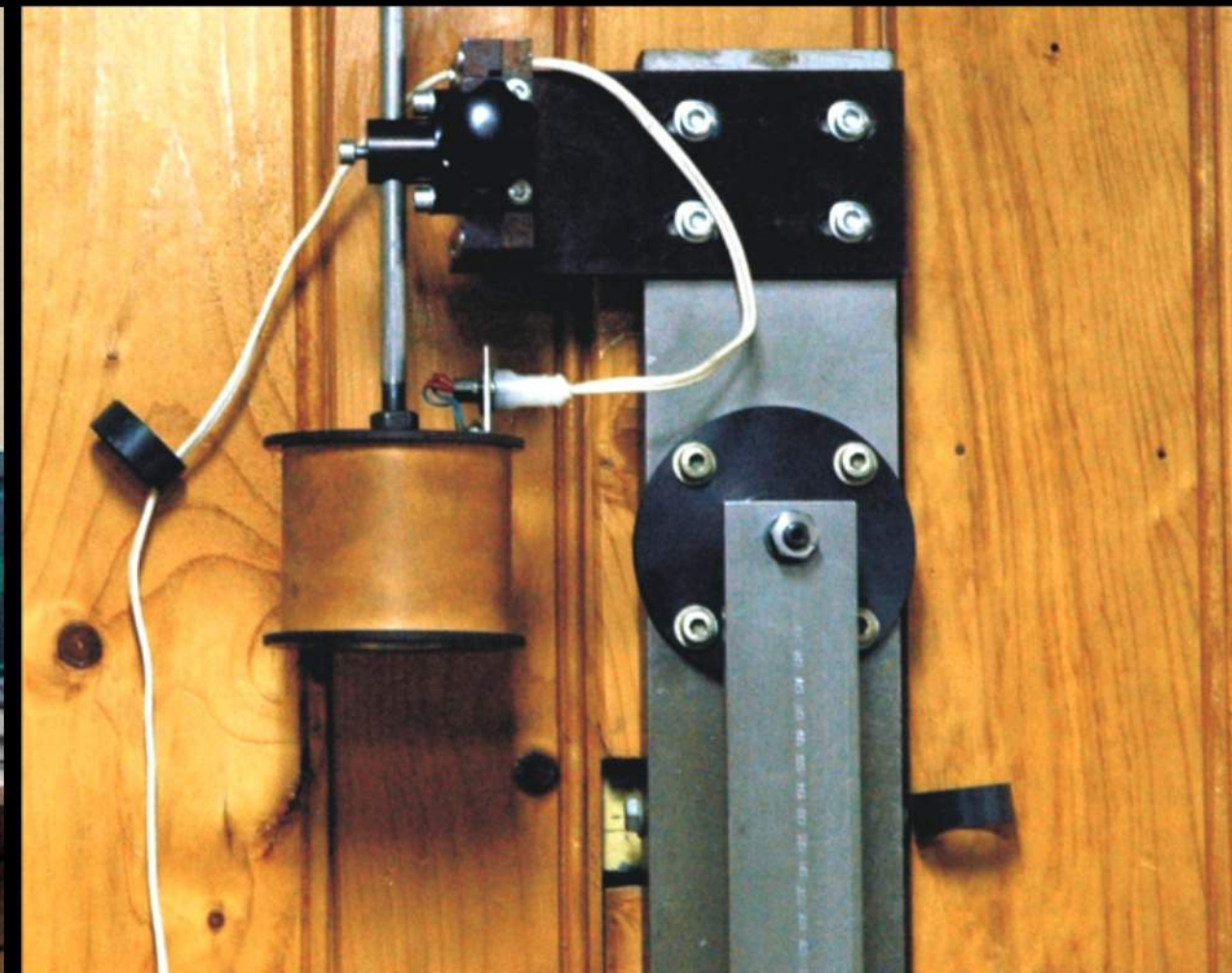
A megfigyelési idő folytonos csökkentésével, feltételezve, hogy a visszatartási idő egy beállított elektromágnesnél lényegesen nem változik, a módszer lehetővé teszi a gravitációs gyorsulás elég jó meghatározását. Ez valójában azt jelenti, mintha igen sok helyzetérzékelőnk lenne, és eltekintենék a visszatartási idő esetleges megváltozásától.

Egy precíziós mérőberendezés (1500 mm-es tolómérő, 0,01 mm pontosságú helymeghatározás) tervezése során ebből a nagy visszatartási időből indultunk ki, itt az elektromágnes egyáltalán nem tartalmaz vasat (légmagos tekercs), a Lenz törvényből származó visszatartás elhanyagolhatósága érdekében pedig az elektromágnes áramát egy számvezérelt táp csökkenti igen lassan (kb. 2 s) addig, amíg a golyó le nem esik.

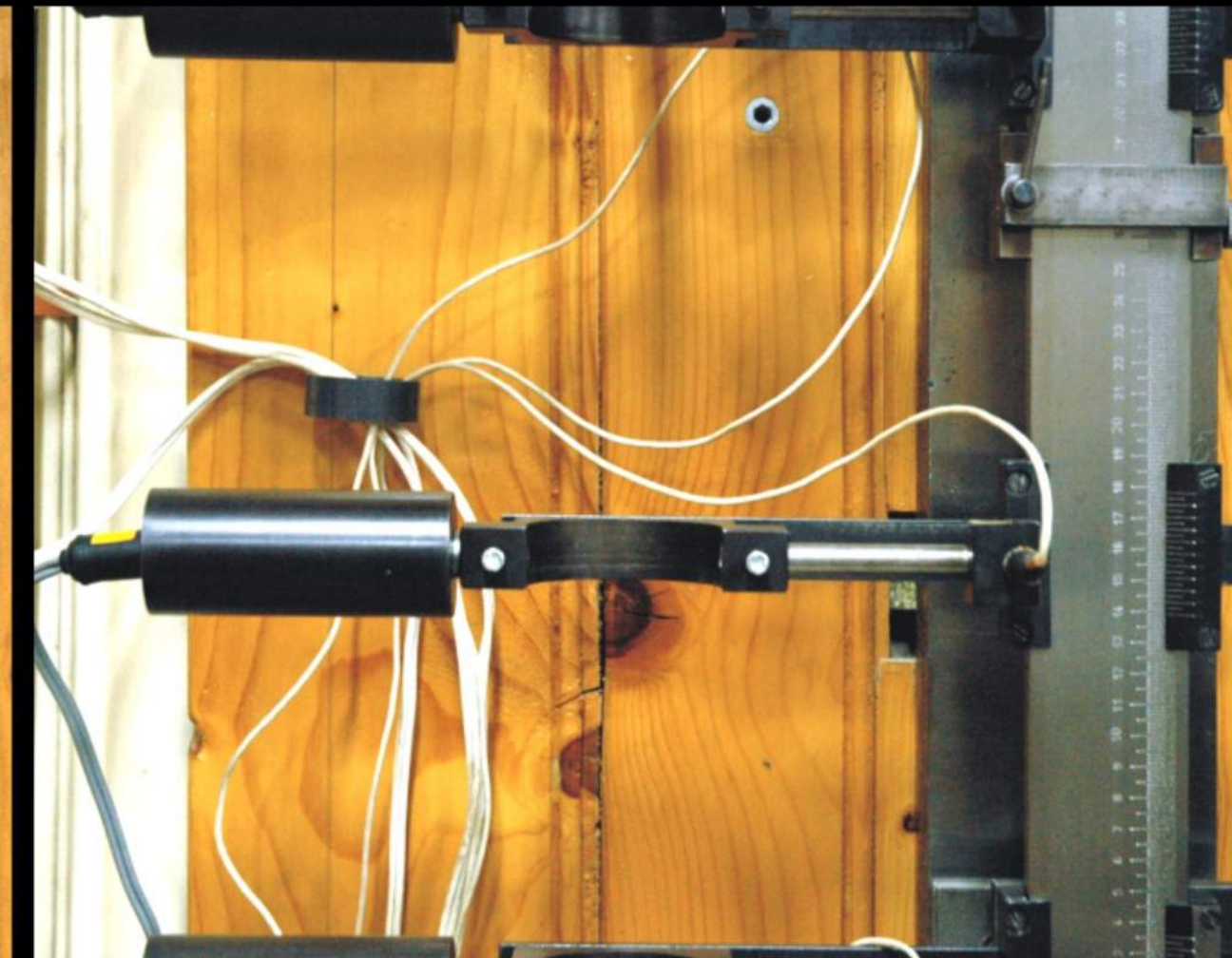
ADY Endre Líceum, Nagyváradi - 2011 márciusa



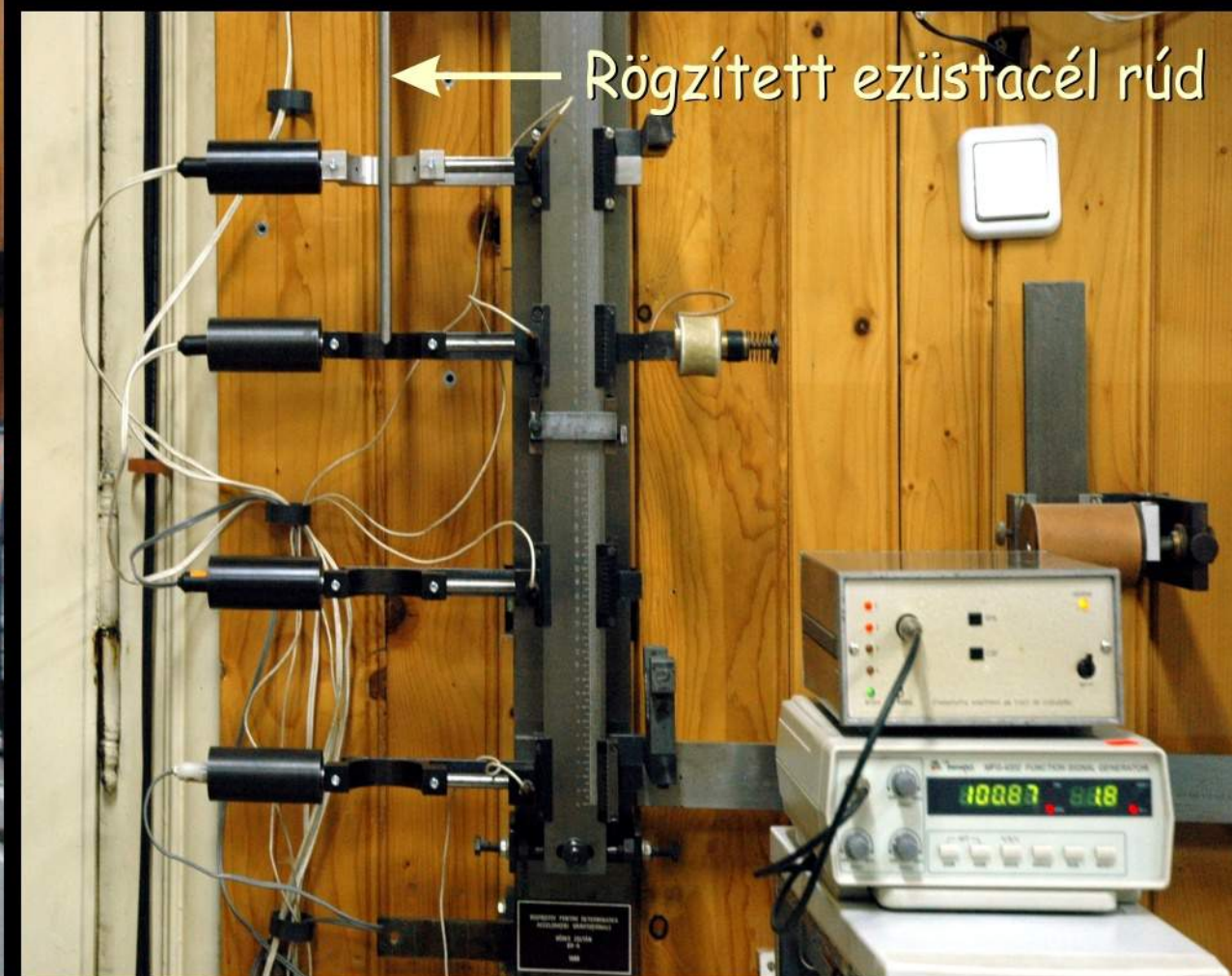
Mérőközpont



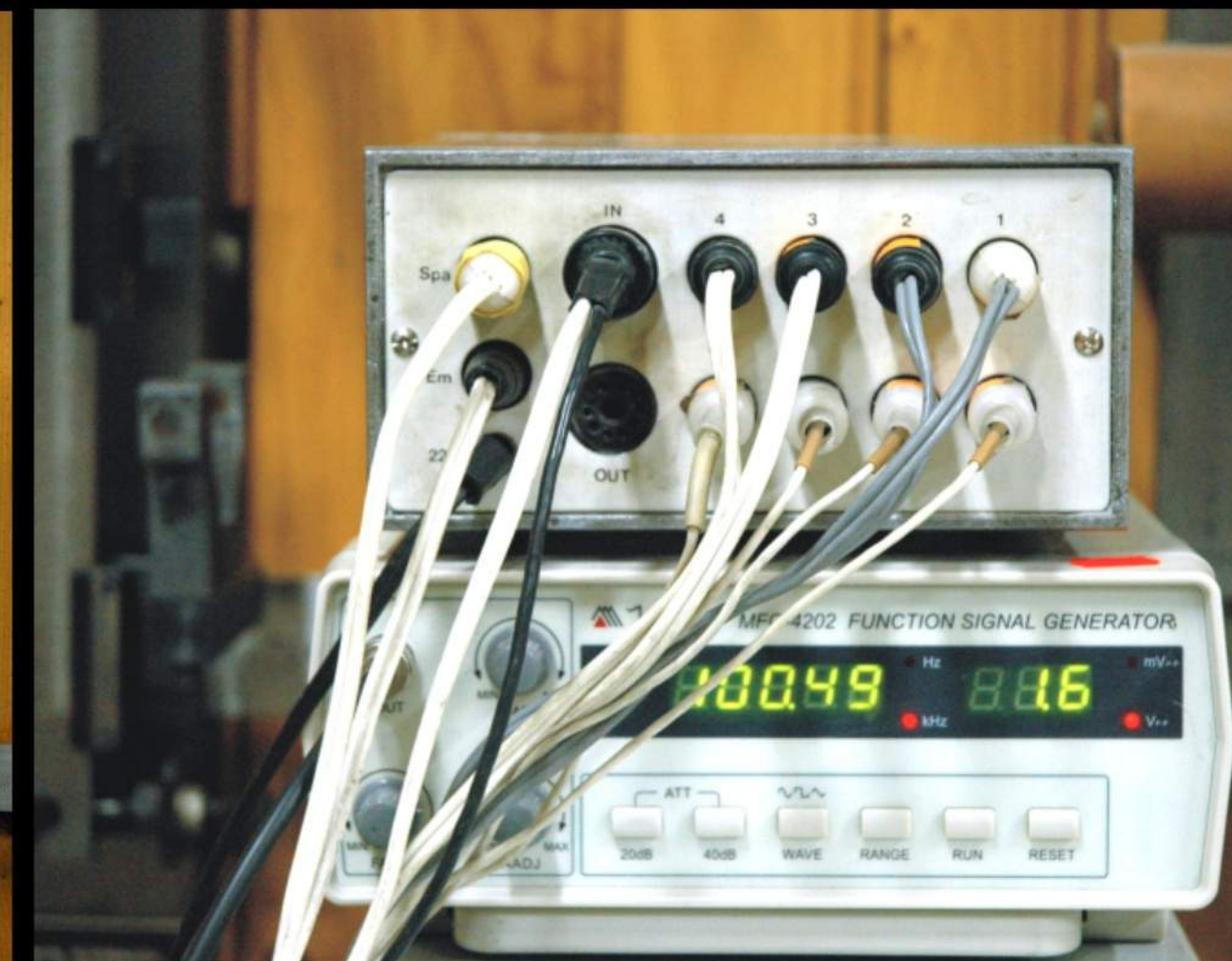
Az elektromágnes



Precíziós fényzorompó



A fényzorompó kalibrálása



A kronométer csatlakozásai

A szabadesés mérőrendszere 1989 óta készül, mindig csak egy kicsit...
Most komoly felújításba kezdtem: csak mikroszkóppal olvasható optikai
mérőléc kerül beszerelésre. A pontosság 1/1000 mm lesz, ha lesz!

Néhány szó egy jövőbeni kísérletről

A komplex szabadesési centrum nem hozott elfogadható megoldást a nehézségi gyorsulás értékének gyakorlati meghatározására még az ismert légellenállási formulák alkalmazásával sem. Egy tökéletesnek ígérkező mérés technikai megfontolásban a sebességtől függő légellenállást így képzeltem el: $F(v) = Mv^2 + Nv$, sikerült integrálnom, de a transzcendens egyenletrendszer megoldása még numerikusan sem sikerült, mert csak egy explicitálható ismeretlent tartalmaz.

Látványosan egyszerűbb egy sebességsonda alkalmazása, ugyanis a légellenállás következményeként a nem lineárisan növekvő sebességet $v(t) = At^2 + Bt + C$ formában képezem el, ahol az A, B, C állandók a lineáristól való eltérést írják le. Az Atomórához kalibrált rendszeremmel könnyen meghatározható a három tapasztalati állandó, majd a deriválás utáni szabadtag (B) maga a „nyugalmi”, a légellenállás nélküli nehézségi gyorsulás lesz.

Talán még marad annyi erőm, hogy a nehézségi gyorsulás ismerete nélkül is meghatározzam annak értékét a váradi Ady Endre Líceum megszüntetett Fizikumában.



A miniszabadesés-készülék a konyhaasztalon

Köszönöm a figyelmet!



Tavirózsák a nagyváradi várban