

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

**Termoakusztikus jelenségek vizsgálata
projektfeladatban**

Beke Tamás

Témavezető: Dr. Papp Katalin
egyetemi docens

Fizika Doktori Iskola

Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Kísérleti Fizikai Tanszék

2011

Szeged

1. Bevezetés

Az elmúlt években az Európai Unió tagállamaiban szinte egységesen csökkent a felsőoktatásba jelentkező mérnökök száma és egyre kevesebben jelentkeztek a természettudományos szakokra is; a fiatalok nagy része nem érdeklődik a természettudományos tantárgyak és a matematika iránt. Európa jövője szempontjából döntő, hogy a természettudományok oktatása fejlődjön, ezért mielőbb cselekedni kell helyi, regionális, országos, sőt egész EU-s szinten. Olyan tartalmú és módszerű iskolai természettudományos oktatás szükséges, amely tanulóinkat felkészíti arra, hogy a jövőben értsék és tudatosan alkalmazzák a természettudományos és technológiai újításokat. A környezetünk, az egészségünk és a gazdaság tényezőinek megértésében is szerepe van a természettudományos műveltségnek. A természettudományos iskolai projektfeladat – mint kollaboratív tudásmegosztó módszer – egyike lehet, amely megfelel e céloknak.

A kutatásom célja a természettudományos oktatásban alkalmazott projekt kidolgozása és jellemzőinek vizsgálata egy, az iskolai oktatásban eddig nem tárgyalt témán keresztül, valamint a kidolgozott módszer tapasztalatainak bemutatása volt. Az általam kidolgozott tudás-átadási módszer a szorosan vett szakmai és pedagógiai hozzáadott értéken túl alkalmas lehet a természettudományos tantárgyak népszerűsítésére az oktatási rendszer különböző szintjein az általános iskolától kezdődően egészen az egyetemi képzésig.

Az értekezés bevezető részében ismertettem, hogy milyen problémákkal kell szembenézni a természettudományos tantárgyak jelenlegi oktatási folyamatában. A második fejezet egyik célja a természettudományos tantárgyak tanulási folyamatában a motiváció szerepének áttekintése. Ebben a részben a projektmódszer pedagógiai célú hasznosításának lehetőségeit is bemutattam. Az elméleti áttekintés során elemeztem a projektnek, mint módszernek a fejlődését. Ismertettem a projektmódszer különböző meghatározásait, kiemeltem melyek a közös vonások, illetve miben vannak az eltérések. Ismertettem a projektmódszernek, mint tanítási-tanulási stratégiának a fejlődésével, változtatásával kialakult pedagógiai felfogást néhány ország gyakorlatában. A projektmódszer pedagógiai értelmezését először általánosan vizsgáltam, majd az iskolai környezetre, a természettudományos tantárgyakra és ezen belül a fizika tantárgyra összpontosítottam a figyelmet.

A tanár kollégák számára elsősorban azért lehetnek hasznosak a természettudományos projektek, mert segítenek a természettudományok tanításának-tanulásának érdekesebbé tételében, alkalmazásukkal változatossá tehető a tudás átadása, a tanulók esetében sokirányú kompetenciafejlesztésre adnak lehetőséget.

A dolgozatom további részében az általam kifejlesztett termoakusztikai projektjellegű fizikai mérési és vizsgálati feladatot mutattam be részletesen, melyet az úgynevezett Rijke csövekkel végzett kísérletekre alapoztunk. A projekt célja az volt, hogy a tanulók termoakusztikai ismereteinek bővítése mellett egyrészt az alkalmazott informatikai, másrészt a team-munka jellegű képességeik és készségeik is fejlődjenek. Az iskolai projektünkben kihasználtuk az érdeklődésen alapuló oktatási módszer lehetőségeit, aminek a következtében sikerült a diákokat többféle manuális és szellemi tevékenységbe bevonni a csoportos munkavégzés során.

Elsőként a termoakusztika alapfogalmait ismertettem az értekezés harmadik fejezetében, bemutattam a termoakusztika meghatározó kutatási irányait, illetve kapcsolódásukat más kutatási területekhez. A negyedik fejezetben a célkitűzéseimet ismerttettem. A dolgozat ötödik fejezetében a Rijke csövekkel végzett méréssorozatról számoltam be, melyben több természettudományos tantárgy összekapcsolódásának lehetőségére mutattam példát. Az értekezés hatodik fejezetében a Rijke cső egyszerű modelljét ismerttettem, a hetedik fejezetben a modellem továbbfejlesztett változatát mutattam be, végezetül beszámoltam a projekt tapasztalatairól.

A dolgozatomban ugyan két területet érint (pedagógiai módszertan, illetve termoakusztikai kutatások), de ezek szervesen összekapcsolódnak; mivel igazából akkor tudunk „jól átadni” egy tananyagot, ha nem csak oktatási, hanem kutatási szinten is elmélyülünk benne.

2. A termoakusztikai projekt tudományos előzményei

A termoakusztika a hő hatására létrejövő hanghatás vizsgálatával foglalkozik. Termoakusztikai instabilitásnak nevezzük, ha egy termodinamikai rendszerben a nyomás oszcillációja párosul az egyenetlen hőátadással. Ha a rendszer által kibocsátott hő függ a nyomás és a rendszerben áramló gáz sebességének fluktuációjától, akkor egy visszacsatolási hurok jön létre, ami destabilizálhatja a rendszert.

A Rijke cső egy rezonátor üreg természetes vagy kényszerített konvekciós légárammal, és egy hőforrással a belsejében, ami általában egy felforrósított rács szokott lenni. A Rijke cső segítségével viszonylag kényelmesen tanulmányozhatjuk a termoakusztikai instabilitások kialakulását, mert bizonyos paraméterek esetén a rendszerben erőteljes hang keletkezik ahhoz hasonlóan, ahogy a valós technikai (ipari) berendezésekben is felléphet ilyen termoakusztikai oszcilláció.

A termoakusztika alapvető szerepet játszik számos technikai alkalmazásban pl. szilárd vagy folyékony tüzelésű égőkamrák, rakétahajtóművek, vagy gázturbinák instabilitásai. A kialakuló vibráció és a fokozott hőátadás rontják a berendezés működésének hatásfokát, illetve csökkentik az élettartamot. A rakéták hajtóművei, a gázturbinák igen érzékenyek az égéstérben lezajló termoakusztikai instabilitásokra. A nyomás, illetve az áramlás oszcillációja következtében a motorban felerősödnek a vibrációk, növekszik a hőátadás, csökken a motor hatásfoka; a hajtómű ennek következtében akár meg is sérülhet; ezért is lényeges foglalkozni a termoakusztikus instabilitásokkal.

3. Célkitűzések és alkalmazott vizsgálati módszerek

A termoakusztikus berendezések tervezéséhez és működtetéséhez feltétlenül szükséges a termoakusztikus folyamatok pontosabb ismerete. Mivel a termoakusztikai folyamatok meglehetősen bonyolultak, ezért nincs olyan elmélet, amely egységesen alkalmazható lenne az összes berendezésre. Az akusztika és a termodinamika közötti kapcsolat még nem ismert teljes mértékben; a dolgozatomban ennek a kapcsolatnak néhány jellemzőjét mutattam be. A termoakusztikus folyamatok pontosabb jellemzéséhez kidolgoztam két modellt; a modelljeim megalkotása és igazolása saját kísérleti megfigyeléseimen alapultak. A kísérletekhez Rijke csöveket használtam.

A disszertációm két fő célkitűzése közé tartozott a termoakusztikus folyamatok pontosabb jellemzése és modellezése, illetve pedagógiai szempontból a tanuló projekt munka vizsgálata. A disszertációmban a következő célokat tűztem ki:

- Célom volt, hogy meghatározzam a Rijke cső paramétereit hogyan befolyásolják az instabilitás kialakulását a rendszerben.
- A szakirodalomban korábban nem fordítottak elég hangsúlyt arra, hogy pontosan meghatározzák, hogy mikor megy át a rendszer stabilból instabil állapotba, illetve milyen feltételek között zajlik le a fordított folyamat. Célul tűztem ki, hogy a vizsgálataimban erre is választ keressek és azt kísérleti adatokkal alátámasszam.
- A következő célom az volt, hogy a kísérleti adatok birtokában megadjak egy olyan új matematikai modellt, amely a Rijke csőben lejátszódó termoakusztikus folyamatokat jellemzi. A modellem finomításával el kívántam érni, hogy a vizsgált paraméterek mellett megfelelő pontossággal jellemezhessem a Rijke cső viselkedését.
- A céljaim között szerepelt egy új számítógépes program kifejlesztése, amelyben a kezdő- és peremfeltételek megadása mellett meghatározom a Rijke cső stabil és instabil állapotai közötti határvonalat. A számítógépes program készítéséhez az általam

kifejlesztett modellt használtam; a program segítségével azt is megvizsgáltam, hogy milyen határfeltételek esetén fogadható el a modellem.

- Ha a Rijke cső gerjeszthető az adott paraméterek mellett, akkor megvizsgáltam, hogy milyen frekvenciájú alap és felharmonikusok szólhatnak meg a cső gerjesztett állapotaiban. Ha a rács pozíciója vagy a rácsot fűtő teljesítmény kicsit megváltozik, akkor a hang frekvenciája is változik, a kísérletek során ezt is megvizsgáltam.
- A céljaim közé tartozott, hogy megvizsgáljam a termoakusztikus projekt munka diákokra gyakorolt hatásait. Céлом volt, hogy megmutassam, pedagógiai szempontból is van-e értelme és haszna a projektnek.
- Egy kérdőíves vizsgálatban arra kerestem választ, hogy az iskolánk tanulói hogyan viszonyulnak a projektmunkához. A céljaim közé tartozott, hogy megmutassam, a projektfeladatok pozitívan befolyásolják a tanulók tantárgyakhoz fűződő attitűdjét.

A termoakusztikus projektünk első állomásában 7 darab, különböző méretű Rijke csövet használtunk. Az elsődleges céloom az volt, hogy meghatározzam azokat a körülményeket, amelyek a termoakusztikai rendszert a stabilból az instabil állapotba viszi, illetve fordítva. A méréseket a tanulók a vezetésem mellett úgy hajtották végre, hogy elsőként a rácspozíciót fixáltuk, majd beállítottuk a csőben áramló levegő intenzitását, és ezután állítottuk be a dróthálót fűtő teljesítményt. Minden rácspozíció esetén nullától a maximális értékig változtattuk a csőben áramló légáram intenzitását, majd a fűtőteljesítményt is fokozatosan növeltük. A fenti paraméter-hármasok függvényében vizsgáltuk, hogy stabil-e a rendszerünk, vagy instabil állapotban van. Mindeközben mértük a rács hőmérsékletét, és ha megszólalt a hang, akkor mértük a hangkibocsátás időtartamának hosszát (a hang rögzítésére és elemzésére mikrofont és hangkártyával rendelkező számítógépet használtunk), és speciális hangintenzitás mérővel a kibocsátott hang erősségét is mértük. A rendszer gerjesztéséhez szükséges kritikus teljesítmény az a minimális teljesítmény, amit ha túllépünk, akkor már gerjeszthető az adott körülmények között a termoakusztikus rendszer. A kritikus teljesítmény esetén a rendszerbe bevitt energia éppen egyensúlyban van a veszteségek miatt kiáramló energiával. A kísérletek során a rendszer stabilitásának határát jelző kritikus teljesítményeket 4 rácspozícióban vizsgáltuk részletesen.

4. Új tudományos eredmények

4.1. Tantárgy-pedagógiai eredmények

4.1.1. Tantárgyak közötti integráció lehetőségeinek vizsgálata

Bemutattam, hogy milyen lehetőségei vannak a természettudományos tantárgyak komplex, integrált szemléletű oktatásának. Kidolgoztam egy tématervet, amelyben az ismereteket egy konkrét téma köré szerveztük; ez hazánkban a fizika tanításának hagyományosan elfogadott, megszokott felépítéséhez képest újszerű megközelítést jelent. Bemutattam, hogy a természettudományos tananyag ilyen témaegységek köré felépített rendszere lehetőséget nyújt arra, hogy a kevésbé motivált tanulókat is bevonjuk a tanítási-tanulási folyamatba. A dolgozatban bemutattam, hogy a fizika a kötelezően előírt tananyagban felül hogyan bővíthető és gazdagítható olyan ismeretekkel, amelyek több diák érdeklődését is felkeltik (Beke, 2009ab).

4.1.2. A vizsgálatok elméleti háttérének és kísérleti feltételeinek megteremtése

Összegyűjtöttem, rendszereztem a vizsgálatok elméleti háttérét megvilágító termoakusztikai alapfogalmakat, a meghatározó kutatási irányokat, illetve kapcsolódásukat más kutatási területekhez. A témakör ilyen jellegű áttekintésével a hazai szakirodalom eddig nem foglalkozott mélyrehatóan, ezért bizonyos értelemben ez hiánypótlásnak számít (Beke, 2011b). A termoakusztikai jelenségek tanulmányozásához olyan kísérleteket gyűjtöttem, alakítottam át, illetve fejlesztettem ki, melyek olcsó, minden oktatási intézményben

megtalálható eszközökkel végezhető el. Ezek a kísérletek a fizikát tanító kollégáknak segítséget nyújthatnak pl. a fakultatív tanulói kísérletek egyszerű eszközökkel történő elvégzéséhez. Az általam összegyűjtött, illetve továbbfejlesztett kísérletek a diákok életkorának és tudásának megfelelően különböző módon értelmezhetőek a középiskolás szinttől az egyetemi szintű fizikatanításig (Beke, 2009cd).

4.1.3. A projektmódszer alkalmazásának motivációs hatása

A kutatásaim során vizsgáltam, hogy a projektmódszer alkalmazása milyen hatást gyakorol a tanulók motivációs szintjére a természettudományok általános és középfokú oktatásában. A vizsgálataim két tanéven keresztül tartottak. A különböző diákcsoportok „attitűd” mérései alapján megállapítottam, hogy a természettudományos tantárgyak oktatásában a projektmódszer az általános és a középiskolás korú tanulóknál sikeresen alkalmazható; segít abban, hogy a diákok természettudományos tantárgyakhoz kapcsolódó attitűdjét pozitív irányban befolyásolja. A természettudományos projektek alkalmasak arra, hogy motiváljuk a tanulókat a természettudományos tantárgyak tanulására; a projektek hatására a diákok tudásszintje növekszik, ismereteik bővülnek és a képességeik, kompetenciáik is fejlődnek (Beke, 2011c).

A termoakusztikus projektünk során megvizsgáltam, hogy a résztvevő diákjaink tanulmányi munkájában, „tanulási teljesítményében” mennyire „mérhető” a projektfeladatban való részvétel hatása. A két tanéven keresztül folytatott követéses vizsgálataim alapján kimutattam, hogy azoknak a tanulóknak, akik hosszabb távon részt vettek a projektünkben javult a fizika és az informatika tanórai teljesítménye és a projektmunka hatására a tanulók egyenletesebben teljesítettek a témazáró dolgozatokban is. A projektmunkában résztvevő gimnáziumi tanulók magasabb teljesítményt nyújtottak fizikából a korábbi teljesítményszintjükhez képest, eredményük informatikából is javult. (A kontroll mintában gyakorlatilag nem változott a teljesítmény sem fizikából, sem informatikából; itt a teljesítményszintek átlagos ingadozása 1%-nál kisebb volt.) A hosszú távú követéses vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy az integrált természettudományos projektfeladatok alkalmasak arra, hogy javítsák a résztvevő tanulók természettudományos tantárgyakban nyújtott tanórai teljesítményét több tantárgy esetén is (Beke, 2011c).

Egy kérdőíves vizsgálatban arra kerestem választ, hogy a projektfeladatokban való részvétel hogyan befolyásolta a tanulók projektekkel kapcsolatos attitűdjét. Elsősorban a természettudományos tantárgyakkal kapcsolatosan szerettem volna megtudni, vajon milyen hatást gyakoroltak a természettudományos jellegű projektek a diákok tantárgyakhoz fűződő „beállítódására”. A kutatásaim alapján megállapítottam, hogy a tanulók döntő többsége általában szívesen vett részt a különböző projektekben és a projektfeladatok során úgy érezték, hogy van értelme és haszna a munkájuknak. A méréseim alapján kimutattam, hogy mindegyik projektfeladat pozitív irányban befolyásolta a diákok attitűdjét; a legnagyobb mértékű javulást az integrált természettudományos projektfeladatokban való részvétel esetén kaptam (Beke, 2011c).

4.2. A termoakusztikai vizsgálatok eredményei

A termoakusztikai projektben 3 fő célt fogalmaztam meg: 1. a gimnáziumunk tanulóival közösen megvizsgáltam a gázzal fűtött Rijke csövek viselkedését; 2. építettem egy elektromosan fűtött Rijke csövet, hogy az adatokat pontosítsam; 3. kifejlesztettem két különböző számítási modellt a rendszer stabilitásának meghatározására a kísérletek során megfigyelt adatok alapján.

4.2.1. A paraméterek hatása a termoakusztikus jelenségekre

Kísérleti úton újdonságként kimutattam, hogy a termoakusztikus rendszer fő paramétereit (Rijke cső geometriai adatai, cső helyzete, rács áteresztő képessége, rács pozíciója, légáram intenzitása, hőteljesítmény) tekintve minden paraméter esetén létezik egy alsó és egy felső

küszöbérték. Az alsó küszöbérték alatt, illetve a felső küszöbérték felett nem gerjeszthető a rendszer. Az eddigi kutatások általában csak a hőteljesítmény és a légáram intenzitás alsó küszöbértékét említik. A vizsgálatok alapján újdonságként megállapítottam, hogy az összes említett paraméter esetén van alsó és felső küszöbérték is, a rács fűtésének időtartamát tekintve csak az alsó küszöbértékét figyeltem meg (Beke, 2009cd).

A termoakusztikus vizsgálatokban egy vízszintes helyzetű, árammal fűtött Rijke csövet alkalmaztam a kísérletekhez. A mérési eredmények alapján újdonságként megállapítottam, hogy a cső hangkibocsátását a cső geometriai paraméterein kívül a cső helyzete (a vízszintessel bezárt dőlésszöge), a rács helyzete, rácsra jutó hőteljesítmény, a rács hőmérséklete, a csövön átáramló légáram intenzitása, a fűtés időtartama és a rács átteresztőképessége határozza meg együttesen. (Az eddigi kutatások csak a rácsot fűtő teljesítmény és a légáram intenzitásának a szerepét vizsgálták.) Kidolgoztam egy módszert arra, hogy a fő rendszer paramétereiket egymástól függetlenül tudjam változtatni és a szerepüket így külön-külön tudjam vizsgálni (Beke, 2010a).

4.2.2. A termoakusztikus folyamatok modellezése

A valós rendszerekben lezajló termoakusztikus folyamatok általában nagyon bonyolultak. Az instabilitások modellezésekor először egy „egyszerűsített” modellt dolgoztam ki. Megvizsgáltam, hogy az egyes légáram intenzitás értékek mellett mekkora az a legkisebb hőteljesítmény, amivel éppen gerjeszteni lehet a rendszerünket; meghatároztam azt a határvonalat, ami a rendszer stabil állapotát az instabil állapottól elválasztja. A stabilitási határvonalat kiszámítottam mind a négy általam előre kijelölt rácspozíció ($x_r=L/8$, $x_r=L/4$, $x_r=3L/8$, és $x_r=5L/8$) esetén. Megállapítottam, hogy a stabilitási határvonalak parabola-szerű görbék, melyeknek van egy legalacsonyabb pontja, ekkor kell a legkisebb hőteljesítmény a rendszer gerjesztéséhez (Beke, 2010a).

Megállapítottam, hogy az „egyszerűsített” modellem általában jóval kisebb kritikus teljesítményt ad meg, mint amit a méréseim során tapasztaltam. A vizsgálataim alapján az eltérés akár 30% – 50% is lehet a közepes légáram intenzitás tartományban, magasabb légáram intenzitások esetében a hiba 40% – 100%-os.

4.2.3. A modell továbbfejlesztése, rendszer-stabilitási vizsgálatok

A kísérleti eredményeim és elméleti megfontolások közötti eltérés indokolta, hogy az „egyszerűsített” modellemt továbbfejlesszem és a rendszer stabil és instabil állapota közötti átmenetet pontosabban meghatározom. A Rijke cső belsejében kialakuló hőmérsékletet és a hőtranszfer folyamatát részletesen is megvizsgáltam. Új elméleti megfontolásokat tettem a Rijke típusú termoakusztikus folyamatok általánosítására; ennek során a hőtranszfer analízisében figyelembe vettem a hőkonvekció, a hővezetés és a hősugárzás hatását is. A hőátadás vizsgálatára új egydimenziós modellt dolgoztam ki, a kapott eredményeim a közepes légáram intenzitás és közepes hőteljesítmény esetén nagyon jól egyeztek az általam mért értékekkel (Beke, 2010d).

Az általam kidolgozott eljárásban elsőként kiválasztottam a rácspozíciót, majd a légáram intenzitást; ezután meghatároztam azt a kritikus hőteljesítményt, ami már elegendő volt ahhoz, hogy a rendszer instabil állapotba kerüljön; úgy, hogy egy többszörösen egymásba ágyazott iteratív eljárással meghatároztam a cső belsejében a hőmérséklet térbeli eloszlását és a rácsról a rajta átáramló levegőbe konvekcióval átadott hőteljesítményt, illetve a hősugárzás és a hővezetés hatását is figyelembe vettem (Beke, 2010d).

4.2.4. A továbbfejlesztett modellen alapuló számítógépes szimuláció

A Rijke cső stabilitási határainak meghatározására kifejlesztettem egy új számítógépes algoritmust, amely a „továbbfejlesztett” modellemben alapult. Ebben részletesen megvizsgáltam a veszteségek hatásait és a termoakusztikai rendszerben fellépő csillapítási mechanizmust. Első lépésben a rácspozíciót fixáltam, majd beállítottam a légáram intenzitást

és a fűtőteljesítményt. Ha a rendszer stabil az adott körülmények között, akkor változtattam a fűtőteljesítményen, majd kezdtem előlről a tesztelést. Az általam kifejlesztett eljárás segítségével meghatároztam a rendszer stabil és instabil állapotát elválasztó határvonalat (Beke, 2010b).

Megállapítottam, hogy a „továbbfejlesztett” modellemből elméletileg kapott adatok pontosabbak a korábbi modellektől. A „továbbfejlesztett” modellem alapján sokkal jobb egyezést kaptam; közepes hőteljesítmény és légáram intenzitás mellett a kísérletekből kapott és a modell alapján számított görbe között jóval kisebbek az eltérések, mint az „egyszerű” modellem esetén, ezért a „továbbfejlesztett” modellem jobban alkalmas a valós fizikai rendszer leírására. Ebben a tartományban a mért és a számított értékek közötti különbség általában 15%-nál kisebb, tehát a „továbbfejlesztett” modellem jóval pontosabb, mint az eredeti „egyszerű” modellem (Beke, 2010b).

Az „egyszerű” és a „továbbfejlesztett” modellem jóságát megítélhetjük a modellekből kiszámított kritikus teljesítmények és a mérésekből meghatározott kritikus teljesítmények közötti relatív hiba segítségével. A relatív hibák nagyságát különböző rácspozíciók és különböző légáram intenzitás értékek mellett határoztam meg. Az általam kifejlesztett modelleket összehasonlítottam más szerzők modelljeivel a relatív hibák nagyságai alapján. Megállapítottam, hogy az „egyszerű” modellemből kapott relatív hibák 28% és 43% között voltak; a „továbbfejlesztett” modellem relatív hibái 14% és 30% között helyezkedtek el, de volt olyan légáram intenzitás tartomány, ahol a modellem relatív hibái 5% alatt maradtak. A „továbbfejlesztett” modellem a relatív hibák alapján pontosabb, mint a más kutatók által megadott modellek.

Numerikus szimulációkat végeztem a termoakusztikus folyamatok modellezésére a rendszer különböző működési tartományaiban. A szimulációs számítógépes programot C++ nyelven készítettem el. Bemutattam, hogy az összetett modellem alapján kapott frekvenciák jól egyeznek a mérési eredményekkel. Az összetett modellem alapján számított eltérés 1%-nál kisebb, ami jobb, mint az eddig mások által megadott értékek (Beke, 2011a).

5. Az eredmények hasznosítása

A termoakusztikai projektünkben a diákokkal olyan termoakusztikus folyamatokat vizsgáltam és modelleztem, amelyek valós technikai rendszerekben is felléphetnek. A projekt folyamán csoportmunkában végeztük kísérleteinket Rijke csövekkel. Alapvetően olyan olcsó eszközöket használtunk, amelyek minden iskolában megtalálhatók. Kimutattam, hogy a tanulóknak nem csak a termoakusztikai ismereteik gyarapodtak, hanem a természettudományos gondolkodásuk, problémalátó és problémamegoldó képességük is fejlődött, illetve bővültek az alkalmazott informatikai ismereteik is. A természettudományos kompetenciák mellett a szociális jellegű készségeik is fejlődtek (Beke, 2009a-d).

Az általam összegyűjtött és továbbfejlesztett termoakusztikai kísérletek mindegyikét tényleges tanítási környezetben is kipróbáltam. Az egyszerű hétköznapi eszközökkel végezhető kísérletekből minden évben bemutatót tartottam az érdeklődő tanulóknak, szülőknek, tanároknak. A bemutató előadásokkal elősegítettem a termoakusztikus kísérleteknek a fizikatanításban való felhasználását, elterjedését (Beke, 2010c).

A projektmódszer felhasználási lehetőségeit bemutattam a pedagógus kollégák számára, ezzel segítettem a projektmódszer elterjedését a természettudományos tantárgyak iskolai oktatásában. A termoakusztikus projekt folyamán vizsgáltam a módszer használhatóságát, hatékonyságát a résztvevő diákok közép, illetve hosszabb távú tanulmányi teljesítményét illetően (Beke, 2011c). A saját vizsgálataim mellett a tanár kollégák és a diákok visszajelzései megerősítik azt a véleményemet, hogy a projektmódszer kiválóan alkalmas a természettudományos tantárgyak feldolgozására részben vagy akár egészében is.

A projektelvű oktatási módszerek fejlesztését hasznosnak és szükségesnek ítélem. A jövőben szeretnék még több témát, tananyagot projektszerűen feldolgozni. A Rijke csövel kapcsolatban is még számos kérdés megoldásra vár (pl. örvények keletkezési mechanizmusa,

vagy a hiszterézis jelenségének pontosabb modellje), ezekre eddig még nem születtek kielégítő megoldások. Az eddigi projektfeladatok során elért eredmények ösztönzést adnak a téma további kutatására.

A disszertáció témaköréhez kapcsolódó publikációk

Beke Tamás (2009a) Termoakusztikus jelenségek vizsgálata iskolai projektfeladatban. *A fizika tanítása*, **17** (4), 7–14.

Beke Tamás (2009b) Termoakusztikus projektfeladat Rijke-cső vizsgálatára. *Fizikai Szemle*, **59** (7–8), 253–257.

Beke Tamás (2009c) Observation of thermoacoustic phenomena in a school project. *Physics Education*, **44** (5), 536–548.

Beke Tamás (2009d) Thermoacoustic school project. *Acta Didactica Napocensia*, **2** (2), 9–24.

Beke Tamás (2010a) Thermoacoustic school project work with an electrically heated Rijke tube. *Physics Education*, **45** (5), 516–528.

Beke Tamás (2010b) Modelling of thermoacoustic phenomena in an electrically heated Rijke tube. *European Journal of Physics*, **31** (6), 1331–1344.

Beke Tamás (2010c) Termoakusztikus iskolai projektfeladat Rijke csővel. in: *Fizikatanítás Tartalman és Érdekesen* (szerk. Juhász András és Tél Tamás), ELTE, Fizika Doktori Iskola, Budapest, 453–460.

Beke Tamás (2010d) Elektromosan fűtött Rijke-cső termoakusztikus modellje. *Fizikai Szemle*, **60** (9), 305–311.

Beke Tamás (2011a) Rijke-type thermoacoustic oscillations. *European Journal of Physics*, **32** (2), 305–327.

Beke Tamás (2011b) Termoakusztikai érdekességek. *Fizikai Szemle*, **61** (5) 165–169.

Beke Tamás (2011c) A projektmunka hatásai a természettudományos tantárgyak tanulásában. *Iskolakultúra*, **11** (4–5) 3–21.

Egyéb publikációk

Beke Tamás (2008a) Lézerek alkalmazása az orvostudományban. *A fizika tanítása*, **16** (2), 14–19.

Beke Tamás (2008b) Az orvosi és a kozmetológiai gyakorlatban használt lézerek és kezelési módszerek. *A fizika tanítása*, **16** (3), 3–10.

Beke Tamás (2008c) A szeméttengeren innen, az üveghegyen túl. *A fizika tanítása*, **16** (4), 7–13.

Beke Tamás (2008d) Iskolanővérek Kalocsán. *Neveléstörténet*, **5** (1-2), 72–102.

Beke Tamás (2009e) Professional scientific blog. *Acta Didactica Napocensia*, **2** (1), 49–58.

Beke Tamás (2009f) Application of the table manager program in the physics education. *Acta Didactica Napocensia*, **2** (3), 61–74.

Beke Tamás (2009g) Az atomenergia szerepe hazánk energiaellátásában. *A fizika tanítása*, **17** (2), 18–24.