

Designstudie für einen reibungslosen Lamellenlüfter für das Wärmemanagement von Elektronik

Design study for a frictionless air flow blade fan for the heat management of electronics

Ralph Schacht

Universitätsplatz 1
01968 Senftenberg

Reibungslose Kühlung, zuverlässiger Lamellenlüfter, Wärmemanagement, nahezu geräuschlose Kühlung
Frictionless cooling, reliable air flow fan, thermal management, nearly noiseless cooling

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse einer Designstudie für einen reibungslosen Lüfter vorgestellt. Im Gegensatz zu einem piezoelektrisch angetriebenen Lüfter basiert der Lamellenlüfter auf einer flexiblen Lamelle, deren Vibration durch ein Magnetfeld angetrieben wird. Die Lamelle basiert auf einem Polymermaterial. Die Designstudie resultierte in einem Prototyp der Größe 50 x 14 x 35 mm² inkl. Gehäuse. Der Lamellenlüfter erreicht dabei einen max. Volumenstrom von $\dot{V} \sim 14$ l/min sowie einen max. statischen Druck von $p_{\text{stat}} = 3$ Pa.

Einleitung

Kommerziell verfügbare miniaturisierte Axial- oder Radial-Lüfterkonzepte basieren auf einem kugelgelagerten Prinzip, welche, aufgrund von Reibung sich abnutzen und somit eine relativ geringe Lebensdauer (MTTF < 14000 h [Titan, 2012]) haben.

Die am Markt verfügbaren reibungslosen Lüfterkonzepte wie Piezo-elektrische Lüfter (Nutzung des Piezo-elektrischen Effekts) [Piezo fan, 2012] oder Synthetic-Jet Lüfter (Lautsprecherprinzip) [Nuventix, 2012] weisen, aufgrund des Aufbaukonzepts, eine geringere Alterung als miniaturisierte Axial- oder Radial-Lüfter auf. Im Fall des Piezo-elektrischen Lüfter wird die MTTF mit > 4600h angegeben; hier kommt es im Betrieb zu einer Degradation der Klebeschicht zwischen Lamelle und Piezo-Material. Hinzu kommt, dass das Piezo-Element mit einer Betriebsspannung von > 40 V angeregt werden muss. Der Anschaffungspreis, im Vergleich zu den miniaturisierten Axial- und Radiallüftern als auch den Synthetic Jet Lüftern [Kercher, Lee et al., 2003] liegt um den Faktor sechs (~ 200 €) höher [Kimber, Mark et al., 2008].

Synthetic Jet Lüfter haben zwar eine wesentlich bessere MTTF > 100000 h, allerdings liegen der Formfaktor (\varnothing 60 mm) und das Gewicht (125 g), verglichen mit dem Piezo-elektrischen Lüfter (60x 15x 30 mm², 10 g, ohne Ansteuerlektronik), wesentlich darüber.

Im Folgenden wird das Konzept und die Eigenschaften des reibungslosen Lamellenlüfters, ein resultierender Prototyp sowie ein Anwendungsszenario vorgestellt.

Konzept

Der Ansatz des reibungslosen Lamellenlüfter Konzepts greift die Vorteile des Piezo-elektrischen Lüfters (Lamelle) und des Synthetic Jet-Lüfters (magnetische Anregung) auf. Dadurch, dass die Lamelle nicht mehr, wie beim Piezo-elektrischen Lüfter, auf einen Piezo-Aktuator

aufgeklebt wird, sondern in einem Haltblock fixiert und berührungslos angeregt wird, verspricht das Konzept eine wesentlich höhere Lebensdauer.

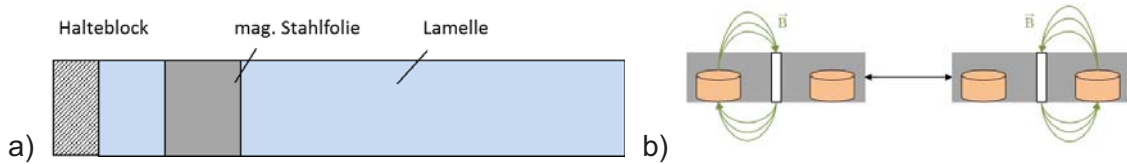


Abb 1: a) Lamelle mit Stahlclip b) Lamellenanregung in Folge eines alternierenden magnetischen Feldes

Das in [Schacht, R. et al., 2012] erstmals vorgestellte Lamellenlüfter Konzept basiert dabei auf einer Polymer-Folienlamelle, welche an einem Ende fixiert wird. Dabei wird eine Stahlfolie auf der Lamelle aufgebracht (s. Abbildung 1a) und zwei magnetische Kernspulen in Höhe der Stahlfolie positioniert (s. Abbildung 2).

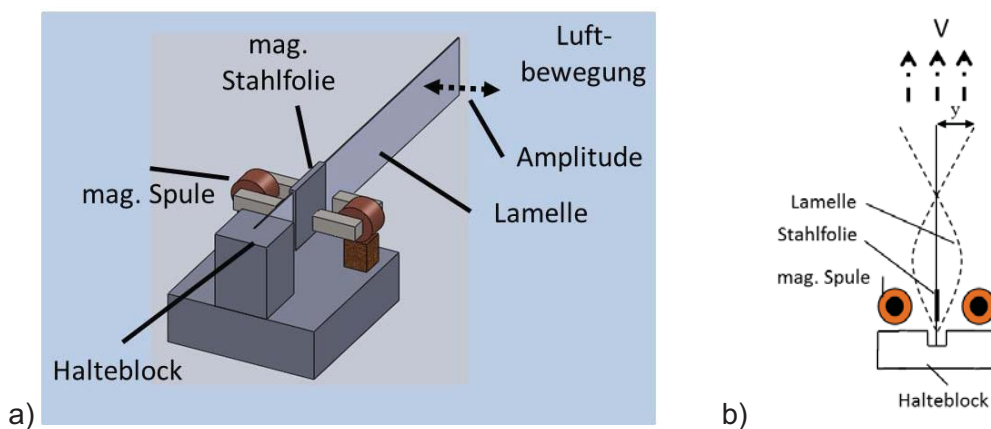


Abb. 2: a) Lamellenlüfter Aufbau und b) Lamellenbewegung.

Durch ein alternierendes elektro-magnetisches Feld wird die Lamelle bei ihrer Resonanzfrequenz zum Schwingen angeregt (s. Abb. 1b). Dabei wird in Richtung des beweglichen Lamellenendes eine Luftbewegung generiert (s. Abb. 2b).

Ein erster Vergleich zwischen dem Piezo-elektrischen Lüfter und dem Lamellenlüfter hat gezeigt, dass bei gleichen geometrischen Abmessungen (Lamellenlänge $L = 70$ mm, Lamellenhöhe $h = 12$ mm, Lamellendicke $t = 0.1$ mm) der Lamellenlüfter einen ca. 65%-ig geringeren Volumenstrom ($\dot{V} = 10.5$ l/min zu 27.5 l/min) liefert und die Verlustleistungsaufnahme um ca. 97% höher liegt ($P_V = 1$ W zu 0.03 W). [Schacht, R. et al., 2012]

In der Designstudie konnte gezeigt werden, dass bei einer Verringerung der Lamellenlänge von 70 mm auf 40 mm (Miniaturisierung) und unter Verwendung von U-Kern Spulen sowie einer ferro-magnetischen Stahlfolie (Dicke = 20 μ m), welche auf ein mechanisch besser geeignetes Lamellenmaterial (MYLAR), auch bzgl. der Zuverlässigkeit, aufgebracht wurden, die Verlustleistung von $P_V = 1$ W auf 0.24 W reduziert und der maximale Volumenstrom von 10 l/min auf 14 l/min ($\rho_{\text{stat}} = 0$ Pa) erhöht werden konnte. Die Effizienz des Lüfters konnte damit um mehr als verdoppelt werden (0.1 % \rightarrow 0.25 %). Das Gewicht betrug dabei weniger als 50g und die geschätzten Produktionskosten liegen bei geschätzten € 5 incl. elektronischer Ansteuerung [Schacht, R. et al., 2014].

Optimierter Prototyp

In Abbildung 3 sind der schematische Aufbau des resultierenden Prototypen mit seinen geometrischen Abmessungen sowie als Foto dargestellt.

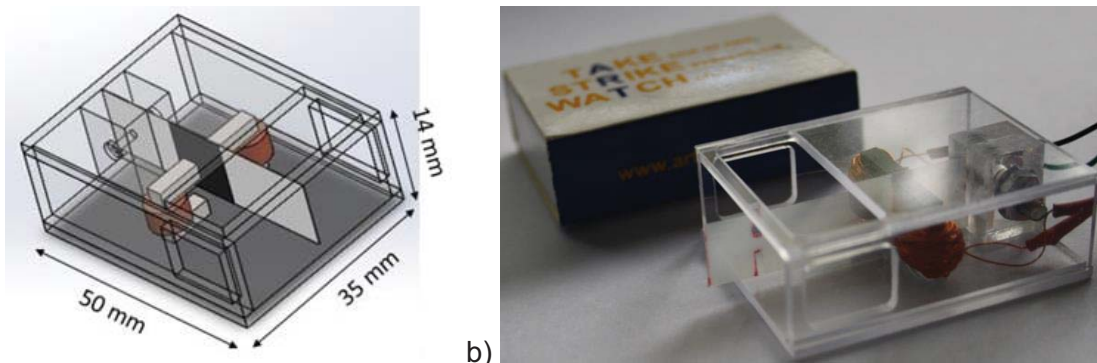


Bild 3: a) Schematischer Aufbau und Geometriedaten, b) Erstes miniaturisiertes Lamellenlüfter-Design

In Folge der Miniaturisierung (verkürzte Lamellenlänge) stieg die Resonanzfrequenz von 18 Hz [Schacht, R. et al., 2012] auf 125 Hz [Schacht, R. et al., 2014], welche nun theoretisch im hörbaren Bereich liegt, aber zu einer kaum hörbaren Geräuschentwicklung führte.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Designstudie in Richtung Effizienzsteigerung und Reduzierung der Verlustleistung sowie Größe wurden die folgenden Eigenschaften für den optimierten Prototyp gewählt:

- U-Kern statt Stabkernspulen
- Magnetisches Stahlfolie statt magnetischem Stahlclip
- MYLAR statt PVC-U
- Spuleninduktivität: $1000\mu\text{H} \rightarrow 470\mu\text{H}$
- Lamellenlänge: 70 mm \rightarrow 40 mm (f_{res} : 18 Hz \rightarrow 125 Hz)
- P_v : 1 W \rightarrow 0,24 W
- \dot{V} : 10 l/min \rightarrow 14 l/min (bei $p = 0$ Pa)

Abbildung 4 zeigt die statische Druck-Volumenstrom-Kennlinie. Ein max. statischer Druck von 3 Pa und einem max. Volumenstrom von 14 l/min bei einer Verlustleistung von 240 mW konnten erreicht werden.

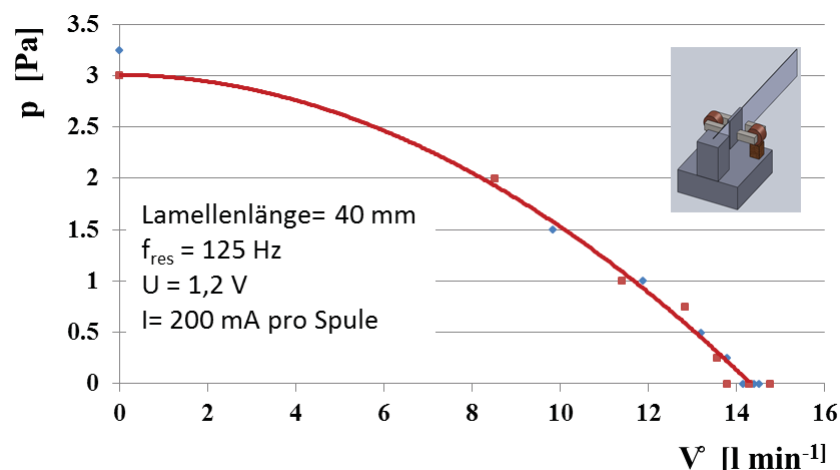


Abb. 4 Statische Druck-Volumenstrom-Kennlinie für den optimierten Prototyp

Anwendungsszenario zur Kühlung eines elektronischen Bauelements

Um das Potential und den Einsatz des Lüfterkonzepts zu demonstrieren, wurde der Lüfter vor ein elektronisches Bauteil (hier ein Thermischer Test Chip (TTC)) positioniert. Die Temperatur wurde dabei im Inneren des Bauteils über eine Diode und an der Oberfläche per IR-Thermographie gemessen. Abbildung 5 zeigt den schematischen und den experimentellen Versuchsaufbau.

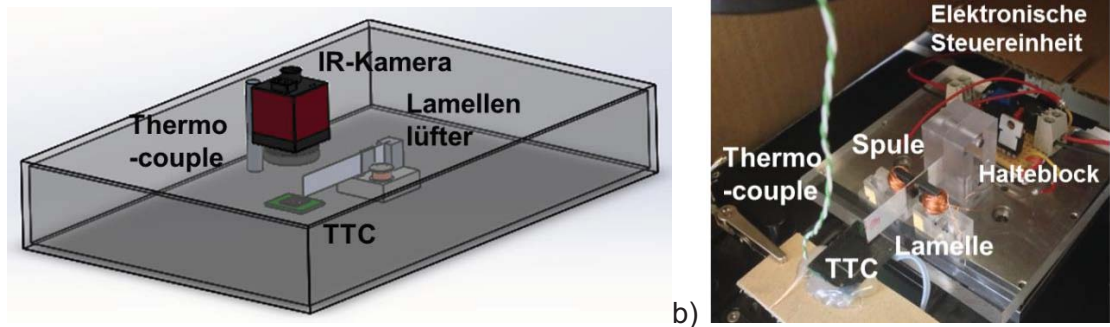


Abb. 5: Demonstration des Kühlpotentials a) Schematische Darstellung des Testaufbaus, b) Abbildung des Testaufbaus

Es wurden vier verschiedene Lamellenanordnungen (Lamelle hat keine, halbe oder volle Überlappung über den TTC oder in vertikaler Position zum TTC-Bereich) untersucht (Abbildung 6). Die Anordnungen a und b zeigten verwertbare Ergebnisse und werden im weiteren Verlauf weiter berücksichtigt.

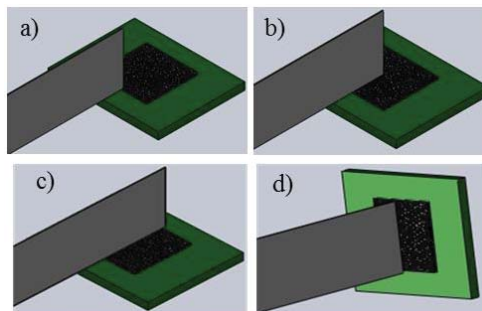


Abb. 6 Lamellenpositionen zur Bestimmung des Kühlverhaltens: Lamelle hat a) keine, b) halbe Überlappung über den TTC-Bereich.

Tabelle 1 fasst die Randbedingungen der Untersuchung zusammen.

Tab. 1: Lamellengeometrie und Messrandbedingungen sowie die TTC Eigenschaften.

Lamellenlänge	35 mm
Lamellenhöhe	12 mm
Frequenz	130 Hz
P_v	700 mW
$T_{Umg.}$	22 °C
A_{TTC}	11.8 x 11.8 mm ²
$A_{TTC-Aufbau}$	20 x 25 mm ²

Abbildung 7 stellt die Lamellenabmessungen sowie die Lage der Federstahlfolie dar.

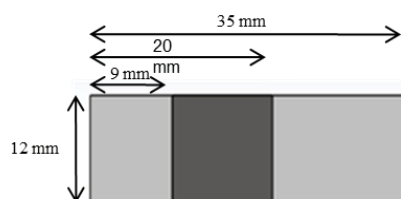


Fig. 7 Lamellenabmessungen und Position der Federstahlfolie

Abbildung 8 zeigt eine Infrarot-Kameraaufnahme der Temperaturverteilung für die TTC-Aufbau unter Belastung.

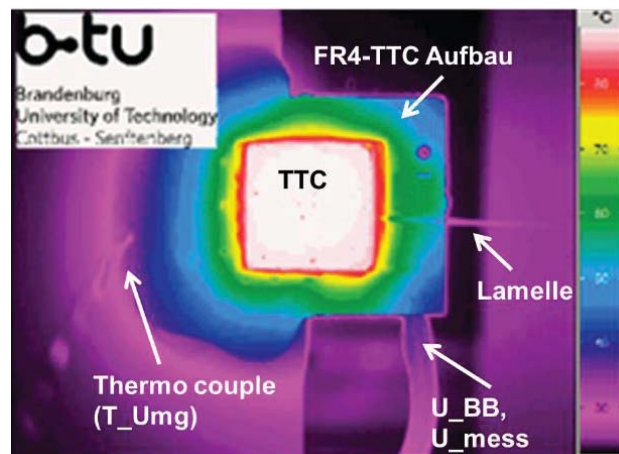


Abb. 8: Draufsicht auf den Versuchsaufbau und die Temperaturverteilung der TTC- und der FR4-Flip-Chip-Baugruppe (IR-Bild).

In Abbildung 9 ist das Ergebnis des zeitlichen Abkühlverhaltens für die elektronische Komponente, vor ($t = 0$ s) und nach dem Einschalten ($t > 0$ s) des Lüfters, dargestellt.

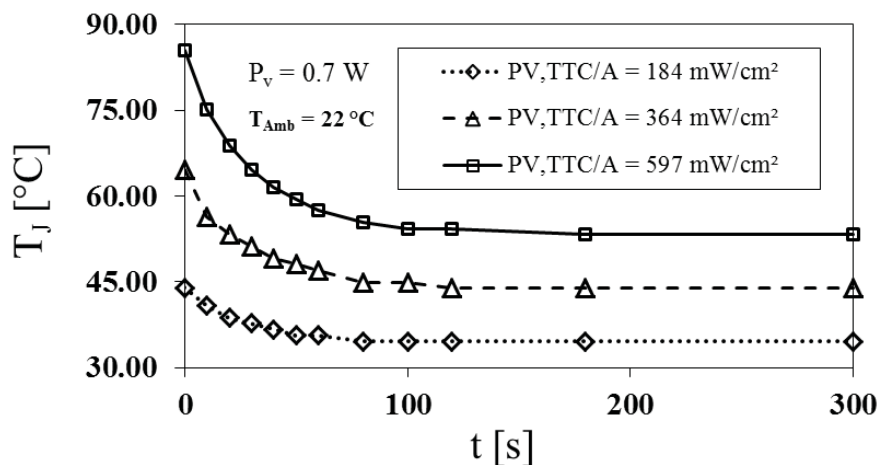


Abb. 9: Transientes Chip-Temperaturverhalten $T_J(t)$ nach dem Einschalten des Lamellenlüfters für drei verschiedenen TTC-Verlustleistungen.

Für den Fall $P_V / A = 597$ mW/cm² konnte die Temperatur hierbei um ca. $\Delta T = 30$ K gesenkt werden, was den Anwendungsnutzen demonstriert.

Häufig wird der Wärmeübergangskoeffizient α

$$\alpha = \frac{P_{V,Wärme}}{A \cdot (T_J - T_{Umgebung})} \quad (1)$$

für eine Performanceabschätzung angegeben; mit $P_{V,Wärme}[W]$ als Verlustleistung in einem Heizwiderstand und $T_J[K]$ und $T_{Umgebung}[K]$ als Verbindungs- und Umgebungstemperatur (Gleichung 1).

Tabelle 2 fasst die Auswertung für den Wärmeübergangskoeffizienten α , für zwei verschiedene TTC-Leistungsverlusten unter zwei verschiedenen Lamellenpositionen (s. Abbildung 6a und b) bei natürlicher (ohne Lüfter) und forcierter Konvektion (mit aktiven Lüfter) zusammen.

Tabelle 2: Wärmeübergangskoeffizient α für zwei verschiedene TTC-Leistungsabfälle bei unterschiedlicher Lamellenposition bei natürlicher (ohne Lüfter) und forcierter Konvektion (mit aktiven Lüfter).

TTC Verlustleistung	$P_{V,TTC}/A= 148 \text{ mW/cm}^2$		$P_{V,TTC}/A= 597 \text{ mW/cm}^2$	
Lüfter Verlustleistung	$P_V = 700 \text{ mW}$		$P_V = 700 \text{ mW}$	
	$\alpha / \text{W/m}^2\text{K}$		$\alpha / \text{W/m}^2\text{K}$	
	ohne Überlappung	teilweise Überlappung	ohne Überlappung	teilweise Überlappung
Natürliche Konvektion	23	23	26	26
Forcierte Konvektion	40	37	48	45

Es ist zu beobachten, dass der Wärmeübergangskoeffizient unter den untersuchten Randbedingungen sich gegenüber natürlicher Konvektion um den Faktor 1,5 bis 1,9 verbessert.

Klassifizierung

Mehrere reibungsbehaftete und reibungslose Lüfter Lösungen sind mehr oder weniger am Markt erhältlich. Um das neue Konzept mit den Vorhandenen zu klassifizieren wird in Tabelle 3 dieser den Anderen gegenüber gestellt.

Tabelle 3: Vergleich zwischen Axial und Radial Mini Lüftern, Piezo-Lüfter und neuem Lamellenlüfter Prototyp.

	SUNON Mini Radiallüfter	Mini Axiallüfter	Piezoelectric Lüfter	Lamellenlüfter-Prototyp
L x W x H [mm³]	9 x 9 x 3	25 x 25 x 10	69 x 30 x 15	50 x 35 x 14
P_V [mW]	185	n. v.	30	240
U_{Versorgung} [V]	3	n. v.	> 40	1.2
$\rho_{stat,max}$ [Pa] (at $\dot{V} = 0 \text{ l/min}$)	4.44	43	3.5	3
\dot{V}_{max} [l/min] (at $\rho_{stat} = 0 \text{ Pa}$)	1.17	13	27.5	14
η [%]	0.047	n. v.	5.35	0.249

Der statische Wirkungsgrad des Lüfters wurde nach Gleichung 2 bestimmt.

$$\eta = \frac{\rho_{stat} \cdot \dot{V}}{P_V} \quad (2)$$

Im Falle des statischen Drucks erreichen die reibungsbehafteten Lüfter um eine Größenordnung höheren maximalen statischen Druck als die reibungslosen Lüfter. Im Falle des Volumenstroms ist zu erkennen, dass der piezo-elektrisch angetriebene Lüfter aufgrund des Konstruktionskonzeptes einen doppelt so hohen maximalen Volumenstrom aufweist. Vergleicht man die Verlustleistung und den Wirkungsgrad, so zeigt der piezo-elektrisch angetriebene Lüfter den geringsten Stromverbrauch und den besten Wirkungsgrad. Es muss jedoch eine wesentlich höhere Versorgungsspannung von > 40 V bereitgestellt werden. Bei den geometrischen Abmessungen haben die reibungsbehafteten Lüfter einen kleineren Formfaktor als die Reibungslosen.

Der Lamellenlüfter-Prototyp ist im Mittelfeld einzuordnen. Er hat einen, mit dem Radiallüfter vergleichbaren Volumenstrom und ist doppelt so groß wie der Radiallüfter. Im Vergleich zum piezo-elektrisch angetriebenen Lüfter hat er einen vergleichbaren maximalen statischen Druck und vergleichbare geometrische Abmessungen. Die Verlustleistung und die Spannungsversorgung verhalten sich entgegengesetzt.

Zusammenfassung

Zuverlässige miniaturisierte Lüfter mit kleinem Formfaktor sind dann von Interesse, wenn sie die Wärmeübertragung in elektronischen Geräten verbessern helfen, indem sie die Luftzirkulation in bestimmten Bereichen erhöhen, die sonst thermisch nicht beherrschbar wären.

Dieser Beitrag fasst die Ergebnisse einer Designstudie für ein miniaturisiertes Lamellenlüfter Konzept zusammen, die zum Ziel hatte die Verlustleistung und die Lüftergröße zu reduzieren sowie den Wirkungsgrad zu erhöhen.

Je nach Randbedingung konnten akzeptable Volumenströme von 5 bis 17 l/min (@ 0 Pa) und ein statischer Druck von bis zu 3 Pa erreicht werden.

Bzgl. der Miniaturisierung konnte gezeigt werden, dass eine kleine Bauform mit Gehäuse, bei geringem Gewicht und Kosten möglich ist.

Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass die Bauteiltemperatur eines elektronischen Bauelements mit dem Lamellenlüfter, je nach Verlustleistungsdichte, um bis zu 30% reduziert werden kann.

Lebensdauertests stehen noch aus.

Literatur

Kercher, Lee et al., 2003: "Microjet Cooling Devices for thermal Management of Electronics", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. Vol. 26, pp. 359-366, Juni 2003

Kimber, Mark et al., 2008: "Quantification of Piezoelectric Fan Flow Rate Performance and Experimental Identification of Installation Effects" 978-1-4244-1701-8/08/\$25.00 ©2008 IEEE.

Kimber, Mark et al., 2009: "Pressure and Flow Rate Performance of Piezoelectric Fans" IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 32, No. 4, December 2009.

Nuventix, 2012 : Membran fan, SynJet® Low Profile Cooler. Co. Nuventix (www.nuventix.com)

Piezo fan, 2012: www.piezo.com (Part Number: RFN1-LV-02)

Schacht, R. et al., 2012: "Frictionless Air Flow Blade Fan for Thermal Management of Electronics," 13th IEEE ITherm Conference, San Diego, USA, 978-1-4244-9532-0/12/\$31.00 ©2012 IEEE

Schacht, R. et al., 2014, "Feasibility and design study of a frictionless air mover for thermal management of electronics", Journal of Physics Conference Series 07/2014; 525(1):012026. DOI:10.1088/1742-6596/525/1/012026

Titan, 2012: Radial fan, www.Titan-cd.com