

Veränderung der Mikrofonempfindlichkeit vorpolarisierter Kondensatormessmikrofone unter Langzeiteinwirkung erhöhter Umgebungstemperaturen

André Gerlach¹, Marko Liebler¹, Gerhard M. Sessler²

¹ Robert Bosch GmbH, Forschungscampus, 71272 Renningen, E-Mail: Andre.Gerlach@de.bosch.com

² TU Darmstadt, 64289 Darmstadt, E-Mail: g.sessler@nt.tu-darmstadt.de

Einleitung

Vorpolarisierte Kondensatormikrofone, auch unter der Bezeichnung Elektretmikrofone oder ECM's (Electret Condenser Microphones) bekannt, sind weit verbreitet und haben, unter den üblichen Umweltbedingungen, ausreichende thermische Stabilität. Wenn es sich um Messmikrofone oder Spezialmikrofone handelt, werden an die Stabilität jedoch höhere Anforderungen gestellt. Dann sind ein entsprechend sorgfältiges Design und eine genaue Kenntnis der diesbezüglichen Eigenschaften notwendig.

Dem entsprechend werden der Auswahl der Materialien, insbesondere für die Membran und für das Elektret, sowie den Herstellungs- und Aufladeprozessen erhöhte Beachtung geschenkt und der Zerfall der Empfindlichkeit bei erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit sorgfältig kontrolliert.

Entsprechende Vorgehensweisen und Ergebnisse sind in der Literatur dargestellt. Erste Langzeit-Messungen der Mikrofonempfindlichkeit von vorpolarisierten Kondensatormikrofonen bei Zimmertemperatur und bei erhöhten Temperaturen wurden bereits 1966 und in den Jahren danach vorgestellt. Diese Messungen zeigten schon früh die bemerkenswerte thermische Stabilität der Mikrofone mit Elektreten aus Fluoroethylenpropylene (FEP), auch unter dem Handelsnamen Teflon^R bekannt, einem Kopolymer des Polytetrafluoroethylene (PTFE) [1], im Gegensatz zu Wandlern mit anderen Elektret-Materialien. Eine Folge dieser Erkenntnisse war die Verwendung von Fluorocarbon-Elektreten in den ersten vorpolarisierten *kommerziellen* Mikrofonen im Jahre 1968. Parallel dazu wurden experimentelle Studien mit isothermen und thermisch stimulierten Experimenten und mit der Anwendung von Arrhenius-Extrapolationen veröffentlicht, welche extrapolierte Lebensdauern von 50 oder mehr Jahren ergaben [2-3]. Diese wurden in den Folgejahren noch durch weitere und präzisere Messungen, auch bei hoher Luftfeuchtigkeit ergänzt [4-6].

Besonders detailliert waren dann die Berichte über die Stabilität der Messmikrofone der Firma Brüel & Kjær [7-9]. Diese Messungen wurden wiederum größtenteils bei erhöhten Temperaturen und teilweise auch bei erhöhter Luftfeuchtigkeit durchgeführt und auf Zimmertemperatur extrapoliert. Weiterhin von Bedeutung sind Ergebnisse neuerer Arbeiten über Qualitäts- (aber nicht Mess-) mikrofone [10-13], die ebenfalls wertvolle Informationen bieten, auf die gleichfalls zurückgegriffen wird.

Im Hauptteil der vorliegenden Arbeit werden dann neue, eigene Ergebnisse isothermer Messungen an kommerziellen, vorpolarisierten Messmikrofonen vorgestellt. Aus den älteren und den neuen, eigenen Ergebnissen wird dann,

zusammen mit den vorliegenden Modellen, ein Versuch einer relativ einfachen und plausiblen Interpretation der Ergebnisse der beobachteten Empfindlichkeitszerfälle erstellt.

Zusätzlich zu den Messungen der *Stabilität der Empfindlichkeit* von vorpolarisierten Mikrofonen wird in der Literatur auch über direkte Messungen der *Elektret-Stabilität* von Fluorocarbon-Elektreten berichtet [3,7,10-12,14-17]. Daneben wurden auch theoretische Modelle zum Ladungszerfall in diesem Material erstellt und teilweise mit den Messergebnissen verglichen [16 -18]. Da die Elektret-Stabilität die Empfindlichkeits-Stabilität mitbedingt, muss auch über diese Ergebnisse berichtet werden. Dies soll direkt in nächsten Abschnitt, vor der Diskussion der Empfindlichkeits-Stabilität, geschehen.

Stand des Wissens zur Entladung von Elektreten unter Temperatureinwirkung

Nach den vorliegenden Ergebnissen ist der Zerfall der Empfindlichkeit eines vorpolarisierten Mikrofonen auf zwei Ursachen zurückzuführen, nämlich die Änderung der mechanischen Spannung der Membran sowie die Abnahme der Ladungsdichte auf dem Elektret [7,10,12,13]. Während der erste Effekt zu einer leichten Zunahme der Empfindlichkeit führt, bedingt die Abnahme der Ladungsdichte eine Abnahme der Empfindlichkeit. Die Veränderung der mechanischen Spannung von Metallmembranen ist schon in frühen Untersuchungen gut erforscht worden [18] und ist für eine Reihe von Membranmaterialien bekannt. Für den Ladungszerfall in Elektretmikrofonen gibt es dagegen wegen der Überlagerung der beiden Effekte keine derart gesicherten Daten. Deswegen ist es nützlich, den Ladungszerfall auch direkt an den Polymerfolien und nicht nur in Mikrofonen zu erforschen.

Entsprechende Messungen an den Fluorocarbon Materialien wurden immer wieder bei erhöhter Temperatur durchgeführt (s. oben) und auch durch verschiedene Modelle interpretiert. Zur Auswertung und Extrapolation auf Zimmertemperatur wurden Arrhenius-Auftragungen gewählt (s. nächster Abschnitt). Beispiele sind frühe Messungen [3] an Fluorocarbon, Polyester, Polycarbonate und Polyimide, welche bereits die deutlich höhere Lebensdauer der Fluorocarbon Elektrete mit extrapolierten Werten von 50 Jahren bei Zimmertemperatur zeigten. Dies entspricht einer Zunahme der Lebensdauer von 150°C bis 25°C um etwa 6 bis 7 Größenordnungen. Spätere Messungen ergaben teils eine etwas größere [7] und teils eine etwas geringere [11,12] Zunahme von 7 bzw. 5 Größenordnungen in diesem Temperaturbereich. Da bei diesen Versuchen der Typ und die Herkunft der verwendeten Fluorocarbon Folien nicht

bekannt sind, sind derartige Abweichungen nicht verwunderlich. Entsprechend weisen auch die ermittelten Aktivierungsenergien Werte im Bereich von 1,2 bis 1,7 eV auf.

Die Interpretation der Messergebnisse erfolgte auch in der Vergangenheit oft durch die Annahme einer Überlagerung von zwei exponentiellen Zerfällen. Dies lässt sich am besten bei einer doppelt logarithmischen Auftragung des Oberflächenpotentials als Funktion der Zeit ersehen. Ein entsprechender Ansatz [15] erklärt die experimentellen Ergebnisse gut. Weniger gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment wird mit einem Modell erzielt, welches von stetiger Ladungsträgererzeugung und Trägervernichtung durch Rekombination ausgeht und welches im Endeffekt einen anfänglichen exponentiellen Ladungszерfall und später eine lineare Ladungsabnahme voraussagt [16,17]. Wir werden deshalb die von uns beobachteten Empfindlichkeitsabfälle im Folgenden durch einen doppelt-logarithmischen Zerfall zu erklären versuchen.

Arrhenius-Gleichung zur Beschreibung des Zusammenhangs von Temperatur und Lebensdauer

Die Arrhenius-Gleichung [19] beschreibt die Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante bei Prozessen, bei denen auf molekularer Ebene eine Aktivierungsenergie E_A überwunden werden muss. Die Gleichung gestattet die Berechnung der Zeitkonstante τ_E bei der zugeordneten Einsatztemperatur T_E sowie einer Prüftemperatur T_P und der bei dieser ermittelten Zeitkonstante τ_P :

$$\tau_E = \tau_P \cdot e^{\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_P} \right)} \quad (1)$$

$R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$ ist die universelle Gaskonstante.

Eine Auswertung für das Elektret im Mikrofon Brüel & Kjær 4155 ist beispielsweise mit [7] möglich. [7] Fig. 10 ist zu entnehmen, dass für $T_E = 25^\circ\text{C}$ im Vergleich zu $T_P = 150^\circ\text{C}$ das Verhältnis der zugeordneten Zeitkonstanten $\tau_E/\tau_P = 10^7$ beträgt. Mit

$$E_A = R \cdot \ln \left(\frac{\tau_E}{\tau_P} \right) / \left(\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_P} \right) \quad (2)$$

kann eine Aktivierungsenergie $E_A = 1,35 \cdot 10^5 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$, entsprechend 1,4 eV ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Daten kann nun ausgehend von der Prüftemperatur $T_P = 150^\circ\text{C}$ ein Stabilitätsfaktor für weitere Temperaturniveaus berechnet werden. In der vorliegenden Arbeit wurden Mikrofone bei $T = 95^\circ\text{C}$ ausgelagert, der Ladungszерfall erfolgt dabei um einen Faktor 313,5 mal langsamer als bei $T = 150^\circ\text{C}$.

In [7] wird für die Abnahme der Elektretladungsdichte σ ein exponentieller Zusammenhang

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

vorausgesetzt und die Annahme getroffen, dass die Mikrofonempfindlichkeit entsprechend der Ladungsdichte abnimmt. Aus experimentellen Daten wird ein Wert von

0,025 dB/hour bei 150°C ermittelt. Dies entspricht einer Zeitkonstanten von $\tau_{150} = 14,48$ Tagen. Mit Hilfe des Stabilitätsfaktors erhält man somit aus den Daten in [7] bei $T = 95^\circ\text{C}$ eine Zeitkonstante von $\tau_{95} = 4539$ Tagen. Dieser Wert aus der Literatur soll später mit den eigenen Versuchsergebnissen verglichen werden.

Versuchsdurchführung

Eine Übersicht der für die Langzeituntersuchung verwendeten vorpolarisierten Messmikrofone ist in Tabelle 1 dargestellt. Teilweise wurden diese Mikrofone neu gekauft, teilweise dem vorhandenen Bestand entnommen. Zu Beginn der Untersuchung wurden alle Mikrofone kalibriert. Hierzu wurde das Signal eines Mikrofon-Kalibrators (Brüel & Kjær, Typ 4231) über 10s aufgezeichnet, mit Hilfe der Software ArtemiS (HEAD acoustics GmbH) der Schalldruckpegel berechnet und der entsprechende Kalibrierwert gespeichert. Die komplette Messkette, bestehend aus Mikrofonkapseln, Vorverstärker GRAS 26CA, Kabel, Messdatenerfassung (Messmodul DIC6B, ZODIAC DATA SYSTEMS GmbH) und -auswertung blieb über die gesamte Messdauer unverändert. Als Referenz wurde neben den bei erhöhter Temperatur ausgelagerten Mikrofonen auch eine Mikrofonkapsel GRAS Typ 40AE bei Raumtemperatur mitgeführt. Zur Untersuchung des Einflusses dauerhaft erhöhter Umgebungstemperaturen auf die Mikrofonempfindlichkeit wurden die Mikrofonkapseln in einer geschlossenen Petrischale in zwei Wärmeöfen (Heraeus T 6030) bei 87°C bzw. 95°C gelagert und in regelmäßigen Abständen zur Messung der Mikrofonempfindlichkeit entnommen. Nach Entnahme aus dem Wärmeofen und Abkühlen auf Raumtemperatur wurde wie oben beschrieben der Schalldruckpegel gemessen. Die Zeitintervalle zwischen den Messungen wurden mit zunehmender Auslagerungszeit vergrößert. Die Untersuchung fand im Zeitraum 19.09.2013 - 02.03.2015 (Ende 87°C) / 23.01.2017 (Ende 95°C) statt.

Tabelle 1: Mikrofonkapseln der Untersuchung

Firma	Typ	Temperatur	Jahr der Herstellung
GRAS	40AE	95°C	2008
GRAS	40BE	95°C	2000
Brüel & Kjær (B&K)	4155	95°C	1996
Brüel & Kjær (B&K)	4189	95°C	1998
PCB	377B02	95°C	2013
PCB	377B02	87°C	2013

Messergebnisse Temperaturlagerung 95°C

In Abbildung 1 sind für die unter 95°C ausgelagerten Mikrofone die Messergebnisse der normierten Mikrofonempfindlichkeit über der Auslagerungszeit dargestellt. Man erkennt einen unterschiedlich starken Abfall im ersten Jahr der Auslagerung und die Separierung in zwei Gruppen. Nach etwa 3 1/2 Jahren Auslagerung ist die Empfindlichkeit $S(t)$ bei den Mikrofonen der einen Gruppe auf etwa 60% des Startwertes S_0 abgefallen, bei den Mikrofonen der zweiten Gruppe auf unter 40%. Auf Grundlage der oben beschriebenen theoretischen Modelle zum Ladungszерfall

und den Entladungsmechanismen wurde versucht, die Messdaten durch verschiedene analytische Ansatzfunktionen anzunähern. Hierbei hat sich gezeigt, dass über die gesamte Beobachtungszeit die Daten weder durch eine einfache Exponentialfunktion, noch durch eine e-Funktion mit zusätzlich linearem Anteil gut approximiert werden können.

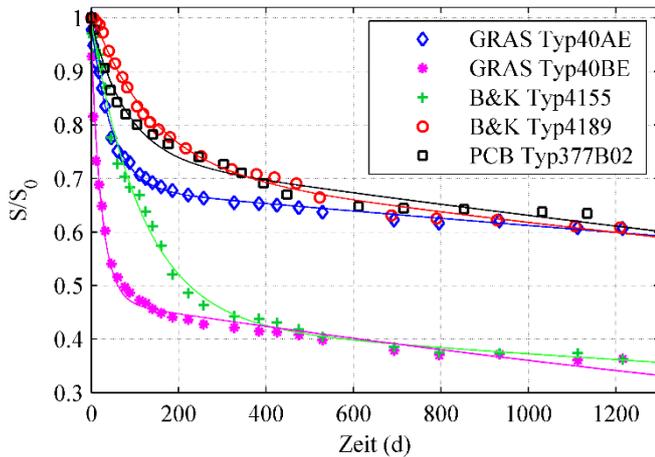


Abbildung 1: Verlauf der gemessenen normierten Mikrofonempfindlichkeit über der Auslagerungszeit in Tagen bei Temperaturlagerung unter 95°C für unterschiedliche Mikrofontypen. Darstellung der einzelnen Messpunkte und in Form durchgezogener Linien der Verlauf der entsprechenden Fitfunktionen. Die Fitfunktionen wurden nach Gl. (4) mit den in Tabelle 2 angegebenen Parametern berechnet.

Eine gute Approximation der Kurvenverläufe konnte mit der Annahme von zwei auftretenden Zerfallsprozessen und damit einem Ansatz aus zwei Exponentialfunktionen erzielt werden:

$$f = A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4)$$

Die so ermittelten Parameter sind in Tabelle 2 dargestellt. Die entsprechend hieraus berechneten analytischen Funktionen sind in Abbildung 1 in Form durchgezogener Linien eingezeichnet.

Tabelle 2: Durch Parameterfit der Messdaten mit Gleichung (4) ermittelte Vorfaktoren A_i und Zeitkonstanten τ_i in Tagen. Zusätzlich angegeben ist das Bestimmtheitsmaß der Regression R^2 .

	A_1 [-]	τ_1 [d]	A_2 [-]	τ_2 [d]	R^2 [-]
GRAS 40AE	0.31	46.8	0.68	9268	0.997
GRAS 40BE	0.48	23.3	0.47	3691	0.989
B&K 4189	0.29	135.9	0.72	6557	0.996
B&K 4155	0.56	117.4	0.43	6835	0.995
PCB 377B02	0.25	80.6	0.74	6188	0.986

Man erkennt, dass der erste Zerfallsprozess Zeitkonstanten von einigen 10 bis 100 Tagen besitzt, während die Zeitkonstante des zweiten Prozesses einige 1000 Tage beträgt. Häufig wird die thermisch stimulierte Entladung nur über

einen Zeitraum von wenigen Tagen durchgeführt. In diesem Zeitraum kann der langsam stattfindende Zerfallsprozess nicht ausreichend erfasst werden und eine Näherung über lediglich eine e-Funktion ist möglich. Der aus der Literatur (s. oben) für das Mikrofon B&K 4155 ermittelte Wert von $\tau_{95} = 4539$ Tagen liegt damit erwartungsgemäß zwischen den beiden hier ermittelten Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 .

Wie aus Tabelle 2 ersichtlich, unterscheiden sich die in Abbildung 1 zu erkennenden Gruppen von Mikrofonen darin, dass bei den stabileren Mikrofonen etwa 70% der Ladungen dem langsamen Zerfallsprozess zugeordnet werden können, während bei den beiden Mikrofonen mit deutlich stärker abfallender Empfindlichkeit nur etwa die Hälfte der Polarisation eine größere Zeitkonstante besitzt.

In Abbildung 2 ist beispielhaft für ein Mikrofon der Vergleich zwischen den Messdaten, der gesamten Fitfunktion aus zwei Exponentialkurven und den Teilfunktionen, die jeweils einem Zerfallsprozess zugeordnet werden können, mit logarithmischer Skalierung der Ordinate dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass nach etwa 200 Tagen der schneller stattfindende Entladungsvorgang abgeschlossen ist und das Verhalten danach vom langsam abklingenden Prozess bestimmt wird.

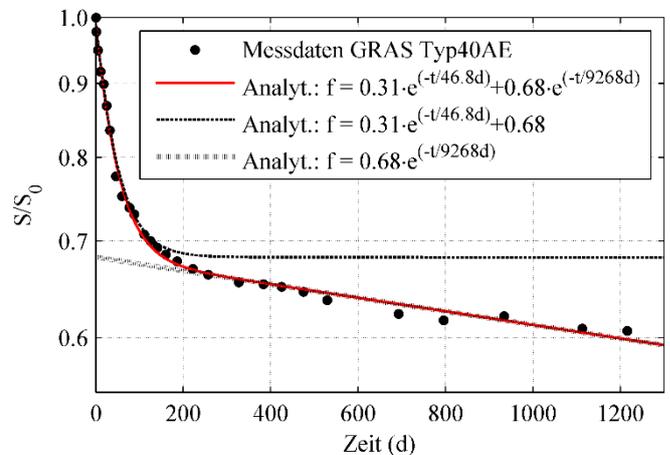


Abbildung 2: Vergleich der Messdaten für das Mikrofon GRAS Typ40AE unter Auslagerung bei 95°C mit der aus der Approximation bestimmten analytischen Funktion sowie den beiden Teilfunktionen, die zwei Zerfallsprozesse beschreiben. Nach etwa 200 Tagen ist der erste Prozess abgeklungen und das weitere Verhalten wird vom langsameren Zerfall dominiert. Logarithmische Skalierung der Ordinate.

Vergleich der Messergebnisse bei 87°C und 95°C

In Abbildung 3 sind die Messergebnisse zur thermischen Auslagerung eines baugleichen Mikrofons bei unterschiedlicher Auslagerungstemperatur dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Entladevorgang bei 87°C deutlich langsamer stattfindet als bei 95°C. Die Dauer der Mikrofonauslagerung war bei 87°C geringer als bei 95°C. Es wurde auch für die Messdaten bei 87°C Auslagerung eine Approximation nach Gl. (4) durchgeführt. Die ermittelten Parameter sind in Tabelle 3 angegeben.

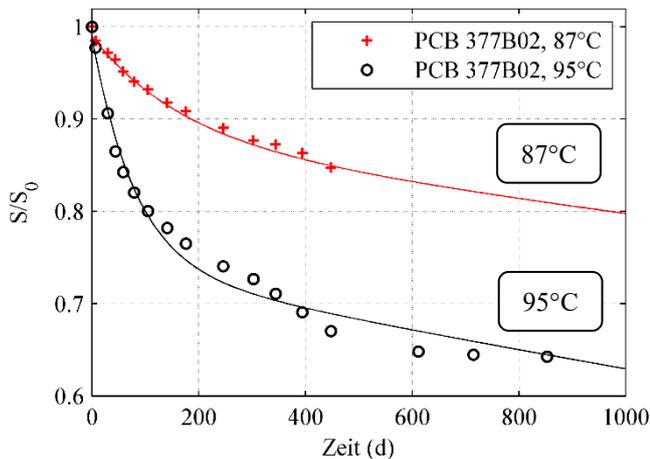


Abbildung 3: Vergleich des zeitlichen Verlaufes der Mikrofonempfindlichkeit für jeweils zwei Mikrofone gleichen Typs bei unterschiedlicher Auslagerungstemperatur. Darstellung der einzelnen Messpunkte und in Form durchgezogener Linien der Verlauf der entsprechenden Fitfunktionen. Die Fitfunktionen wurden nach Gl. (4) mit den in Tabelle 3 angegebenen Parametern berechnet.

Es ist zu erwähnen, dass die Bestimmung der größeren Zeitkonstante τ_2 aufgrund der für diesen Fall relativ kurzen Auslagerungsdauer, einer gewissen Unsicherheit unterliegt. Vergleicht man für das untersuchte Mikrofon Typ PCB 377B02 für den schneller abfallenden Prozess die beiden Zeitkonstanten, so führt eine um acht Grad erhöhte Auslagerungstemperatur zu einem 2,1-fach beschleunigten Entladungsvorgang.

Tabelle 3: Für die Mikrofone des Typs PCB 377B02 durch Parameterfit der Messdaten mit Gleichung (4) ermittelte Vorfaktoren A_i und Zeitkonstanten τ_i in Tagen. Zusätzlich angegeben ist das Bestimmtheitsmaß der Regression R^2 .

	A_1 [-]	τ_1 [d]	A_2 [-]	τ_2 [d]	R^2 [-]
87°C	0.11	166.7	0.88	10152	0.995
95°C	0.25	80.6	0.74	6188	0.986

Zusammenfassung

Es wurden experimentelle Untersuchungen zur thermischen Stabilität von Elektret-Messmikrofonen unter dauerhaft erhöhter Umgebungstemperatur von 87°C bzw. 95°C durchgeführt. In der Literatur finden sich kaum Vergleichsdaten, bei denen unter so hoher Temperatur über einen solch langen Zeitraum von mehreren Jahren gemessen wurde. Es konnte gezeigt werden, dass der Abfall der Mikrofonempfindlichkeit sehr gut durch zwei überlagerte Exponentialfunktionen angenähert werden kann. Dies entspricht dem Modell von zwei Zerfallsprozessen für die Elektret-Ladungen. Es wird angenommen, dass bei noch längerer Auslagerungszeit weitere Entladungsprozesse beobachtet werden könnten. Das häufig zur Extrapolation auf die Langzeitstabilität von Elektretmikrofonen verwendete Vorgehen der kurzzeitigen Untersuchung bei sehr hohen Temperaturen und Beschreibung des

Entladungsvorgangs mittels einer einzigen Exponentialfunktion konnte durch die vorliegenden Messergebnisse nicht bestätigt werden.

Literatur

- [1] Sessler, G. M. and West, J. E.: Foil-Electret Microphones. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 40 (1966), pp. 1433-1440.
- [2] Reedyk, C. W.: An Electret Transmitter for the Telephone Set. Electrochem. Technol.: Vol. 6 (1968), pp. 6-10.
- [3] Sessler, G. M. and West, J.E.: Foil Electrets and their Use in Condenser Microphones. J. Electrochem. Soc., Vol. 115 (1968) pp. 836-841.
- [4] Reedyk, C. W.: Electret Transducers Applied to the Telephone. IEEE Trans Audio Electroacoust. Vol. 19, No. 1 (1971), pp. 1-5.
- [5] van Turnhout, J.: in Adv. in Static Electricity, (1971).
- [6] Brzezinski, A ; Miller, C. R., see Sessler, G. M. and West, J. E.: J. Acoust. Soc. Amer. Vol. 53 (1973), pp.1589-1600.
- [7] Frederiksen, E. ; Eirby, N. , Mathiasen, H.: Prepolarized Condenser Microphones for Measurement Purposes. Brüel & Kjær Techn. Review, No. 4, 1979.
- [8] Brüel & Kjær: Technical Documentation, Microphone Handbook, Chapter 3.10, Stability. BE 1375-12, 1995.
- [9] Brüel & Kjær: Technical Documentation, Microphone Handbook, Vol. 1 Theory. BE 1447-11, 1996.
- [10] Miura, K. and Yasuno, Y.: Long-term sensitivity changes in electret condenser microphones. J. Acoust. Soc. Japan, Vol.18 (1997), pp. 29-35.
- [11] Yasuno, Y and Riko, Y.: Study of heat-resistance property in electret condenser microphone. Proc. 10th Internat. Sympos. on Electrets, 1999, pp.751-754.
- [12] Yasuno, Y. and Riko, Y.: Study of Degradation by Heat and Heat-Resistance Property in Electret Condenser Microphones. Electronics and Communications in Japan, Vol. 90 (2007), pp. 1-8.
- [13] Nogueira, E. ; Gil, J. S. ; Bote, J.: Lifetime of electret microphones by thermal degradation analysis via electroacoustic measurements. Microelectronics Reliability, Vol. 81 (2018), 95-100.
- [14] van Turnhout, J.: Thermally Stimulated Discharge of Polymer Electrets (Elsevier 1975), pp. 264-270.
- [15] Sessler, G. M. and West, J. E.: Electrets formed by low-energy electron injection. J. Electrostatics, Vol. 1 (1975), pp.111-123.
- [16] Malecki, J. A.: Linear decay of charge in electrets. Physical Review B, Vol. 59, Iss. 15, 1999. 9954-9960
- [17] Malecki, J. A.: A model of long time decay of space charge in polymers. 10th International Symposium on Electrets 1999, 83-86
- [18] Frederiksen, E.: Über die Langzeitstabilität von Kondensatormikrofonen. Brüel & Kjær Techn. Review, No. 2, 1969, pp. 8-14
- [19] Laidler, K. J.: The development of the Arrhenius equation. J. Chem. Educ., Vol. 61, No. 6, (1984), pp. 494-498