

Die Grenzen der Rauigkeit zur Beschreibung der Dissonanzwahrnehmung

Matthias Reffgen¹, André Fiebig²

¹ HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, Deutschland, E-Mail: matthias.reffgen@head-acoustics.de

² TU Berlin, 10587 Berlin, Deutschland, E-Mail: andre.fiebig@tu-berlin.de

Einleitung

Zur systematischen Beschreibung spezifischer auditiver Empfindungen stellt die Psychoakustik Parameter wie Lautheit, Rauigkeit, Schwankungsstärke, Schärfe oder Tonalität bereit, mit deren Hilfe Geräuschbewertungen nachvollzogen bzw. partiell vorhergesagt werden können. Dabei wird die detaillierte Betrachtung des Zusammenspiels auftretender tonaler Geräuschkomponenten bezüglich der Geräuschqualität technischer Geräte zunehmend bedeutsam.

Die (abendländische) Musiktheorie besitzt für das Zusammenwirken von mindestens zwei Tönen die Parameter Konsonanz und Dissonanz. Sie beschreiben den aufgrund der verwendeten Tonkombinationen hervorgerufenen Wohlklang bzw. die resultierende „Unstimmigkeit“, die Dissonanz. Während in der Musik eine permanente Veränderung der tonalen Komponenten in einer zeitlichen Abwechslung konsonanter und dissonanter Passagen resultiert und hier bewusst als stilistisches Mittel verwendet wird, finden insbesondere bei technischen Geräuschen häufig nur geringfügige und langsame Änderungen statt. Die überwiegende Mehrheit der vielfältigen Untersuchungen der vergangenen Jahrzehnte legt die Schlussfolgerung nahe, dass kein grundlegender psychoakustischer Unterschied zwischen Rauigkeit und Dissonanz besteht und letztere nicht mehr als eine spezielle Form der Lästigkeitsbewertung darstellt. Es existiert jedoch keine umfassende Systematik, welche die darüber hinaus auftretenden vielfältigen Erscheinungen einer Dissonanzwahrnehmung vollständig abbilden kann.

Aus diesem Grund wurde eine Gegenüberstellung und Abgrenzung der beiden Bewertungsdimensionen basierend auf aktuellen Untersuchungen durchgeführt.

Rauigkeit von Tonpaaren

Der psychoakustische Parameter der Rauigkeit wird in der Einheit *asper* angegeben und es gilt folgende Definition: *Ein Ton mit einer Frequenz von 1 kHz und einem Schalldruckpegel von 60 dB, der zu 100 % mit einer Frequenz von 70 Hz moduliert wurde, besitzt eine Rauigkeit von 1 asper.*

Abbildung 1 zeigt Rauigkeitsverläufe nach Zwicker und Fastl [1] in Abhängigkeit der Grundfrequenz und der Modulationsfrequenz.

Für die Addition zweier Sinus-Töne ergibt sich ein anderes Zeitsignal, als es sich für eine Amplitudenmodulation ergeben würde. Die hierbei auftretende Einhüllende schwingt mit der Differenz der beiden Einzeltöne, sodass gilt: $f_e = f_1 - f_2$.

In Abhängigkeit dieser Frequenz kommt es entweder zur Wahrnehmung einer Schwankungsstärke bzw. Rauigkeit oder sie wird bei ausreichendem Frequenzabstand als to-

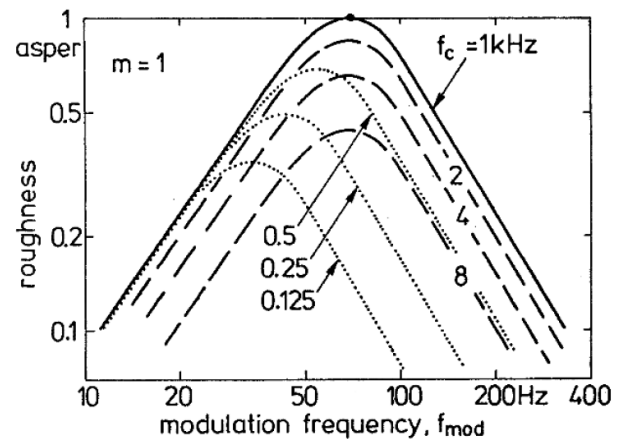


Abbildung 1: Rauigkeit von 100 % amplitudenmodulierten Tönen der angegebenen Grundfrequenz als Funktion der Modulationsfrequenz nach Zwicker und Fastl [1]

nale Komponente hörbar. Dieses Phänomen untersuchte Helmholtz [2] bereits 1877 in seinem Werk über Tonempfindungen.

Sensorische und musikalische Konsonanz

Eine erste Erwähnung der Empfindungen beim Zusammenklang mehrerer tonaler Komponenten findet sich bereits im 5. Jahrhundert v. Chr. bei Pythagoras, welcher statt Konsonanz den Begriff *Harmonie* verwendete und deren größte Ausprägung er beim Erklingen zweier Töne mit möglichst ganzzahligem Verhältnis der Grundfrequenzen erwartete.

Auf dem Gebiet der Musikwissenschaften entwickelte sich in den folgenden Jahrhunderten ein immer ausgeprägteres Verständnis der Begriffe *Konsonanz* und *Dissonanz*. Eine historische Übersicht der verwendeten Begriffe findet sich bei Tenney [3] oder Sethares [4].

Die (abendländische) Musiktheorie definiert die heute allgemein bekannten musikalischen Intervalle und es herrscht Einigkeit über die durch die Kombination mehrerer Töne mit bestimmten Frequenzverhältnissen provozierten Empfindungen. Es ergibt sich somit ein diskreter Konsonanzverlauf entlang der Intervalle, dessen Interpolation nach Fingerhuth [5] in Abbildung 2 dargestellt ist.

Sethares [4] untersuchte neben der abendländischen Tonskala auch die in traditionellen afrikanischen, arabischen und asiatischen Musiken verwendeten Skalen, welche eine Oktave in andere äquidistante Frequenzverhältnisse als die verbreitete zwölfstufige Skala unterteilen und führte Hörversuche zur Bewertung des Klangeindrucks von Tonpaaren auf diesen Skalen durch.

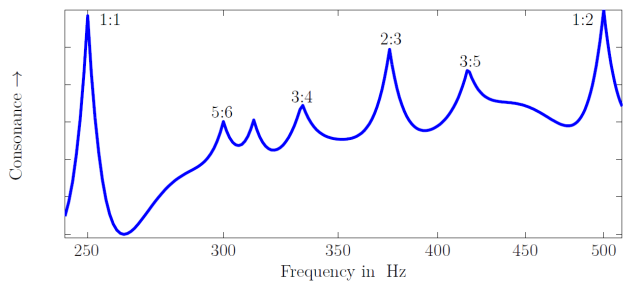


Abbildung 2: Schematischer Konsonanzverlauf über eine Oktave mit einem Grundton von 250 Hz nach Fingerhuth [5]

Die bewusste Modifikation des instrumentalen Zusammenklangs zum Erzielen eines musikalischen Spannungsaufbaus entlang der Zeitachse eines Musikstücks wird in der Musiktheorie als *funktionale Konsonanz* bezeichnet [6].

Plomp und Levelt [7] untersuchten die bei Helmholtz [2] beschriebene Dissonanzwahrnehmung anhand von Hörversuchen zur Beurteilung von Sinuspaaren. Sie leiteten einen Zusammenhang zwischen der empfundenen Dissonanz und der Frequenzgruppenbreite her, welcher noch heute die Grundlage zahlreicher Untersuchungen darstellt (s. Abbildung 3). Die hierbei verwendete Skala

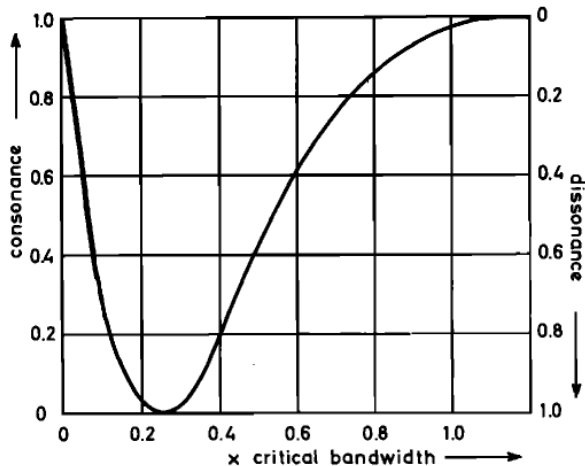


Abbildung 3: Konsonanzverlauf nach Plomp und Levelt [7] als Funktion der Frequenzgruppenbreite

lierung der Dissonanz in einem Wertebereich von 0 bis 1 und der sich aus der Darstellung ergebende mathematische Zusammenhang $Konsonanz = 1 - Dissonanz$ werden nicht näher begründet.

Kameoka und Kuriyagawa [8] publizierten umfangreiche Untersuchungen zur Konsonanzwahrnehmung und betrachteten darin verschiedene Teilaspekte von der perzeptiven Beurteilung von Sinuspaaren mit gleichem Pegel bis hin zur Berechnung der Dissonanz komplexer Töne. Abbildung 4 zeigt hierbei die ermittelten Dissonanzverläufe in Abhängigkeit der relativen Frequenzverschiebung für 8 Oktaven von 55-14080 Hz. Es ergibt sich der bereits bei Plomp und Levelt [7] gezeigte v-förmige Kurvenverlauf. Aufgrund der geringen Anzahl an Stützstellen könnten hierbei jedoch mögliche Abweichungen vom monotonen

Verlauf nicht dargestellt werden. Desweiteren wird auch hier keine Herleitung der verwendeten Skala angegeben.

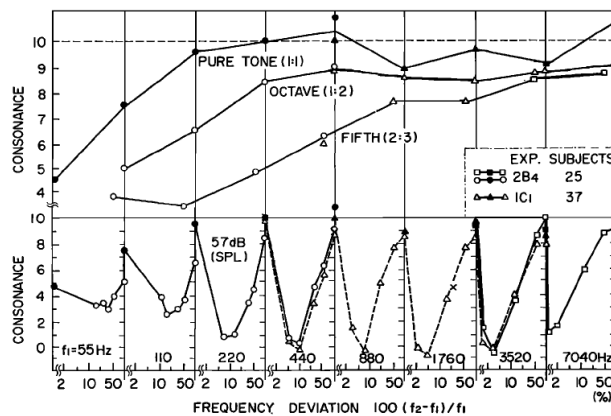


Abbildung 4: Konsonanzverlauf nach Kameoka und Kuriyagawa [8] über den relativen Frequenzabstand in % für Sinuspaare mit gleichem Schalldruckpegel über 8 Oktaven von 55-14080 Hz

Im Bereich der Psychoakustik wurde eine Abgrenzung der Begrifflichkeiten gegenüber der Musiktheorie und eine physikalische Erklärung der beobachtbaren Phänomene angestrebt. Terhardt [9] führte hierzu erstmals den Terminus der *sensorischen Konsonanz* ein, welcher jedoch im Wesentlichen eine Lästigkeitsdefinition basierend auf der Rauigkeit darstellt:

„Konsonanz ist der ungestörte gleichzeitige Klang reiner Töne. Das Element, welches die Konsonanz zerstört, ist die Rauigkeit.“

Er griff zusätzlich die von Helmholtz erstmalig systematisch untersuchten Phänomene der Wahrnehmung zusätzlicher tonaler Komponenten beim gleichzeitigen erklingen mehrerer Töne auf und formulierte ein Grundkonzept zur Beschreibung physikalisch nicht existenter, aber sensorisch wahrnehmbarer, Tonhöhen.

DeWitt und Crowder [10] verwendeten ein Verfahren zur Überprüfung der empfundenen Dissonanz, welches auf eine komplexe und abstrakte Verbalisierung des eigentlichen Untersuchungsgegenstands verzichten konnte. Hierzu wurde die Konsonanz als Grad der Fusion gleichzeitig erklingender Töne betrachtet. Der Kern der Experimente bestand in der Beantwortung der Frage, ob im Stimulus ein singulärer Ton oder zwei gleichzeitige Töne identifiziert werden können. Hierzu wurde zum einen die zur Entscheidung benötigte Zeit und zum anderen die hierbei auftretende prozentuale Fehlerrate als Kriterium für die empfundene Konsonanz verwendet. Ihre Untersuchungen zu musikalischen Intervallen zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den in der Musiktheorie sehr unterschiedlich konsonant betrachteten Intervallen. Sie verweisen in ihrem Fazit auf die historische Entstehung der heute als Standard verwendeten musikalischen Intervalle und folgern, dass ein wesentlicher Anteil der heutigen Harmoniewahrnehmung in der lebenslangen Konditionierung begründet sein kann.

Im Bereich der Psychologie existieren Theorien zur Konsonanzwahrnehmung, welche diese als kognitiven und somit lernbaren Prozess auffassen, dessen wesentliches Element die Rekonstruktion eines Grundtones auf Grundlage der hörbaren Obertöne darstellt. McLachlan et al. publizierten hierzu mehrere Untersuchungen [11].

Bewertung der Dissonanz musikalischer Intervalle

Die in Abbildung 4 dargestellten V-Kurven weisen mit ihrem Verlauf und ihrer Gestalt mit nur einer Extremstelle eine deutliche Ähnlichkeit zu den in Abbildung 1 dargestellten Rauigkeitsverläufen auf. Abbildung 5

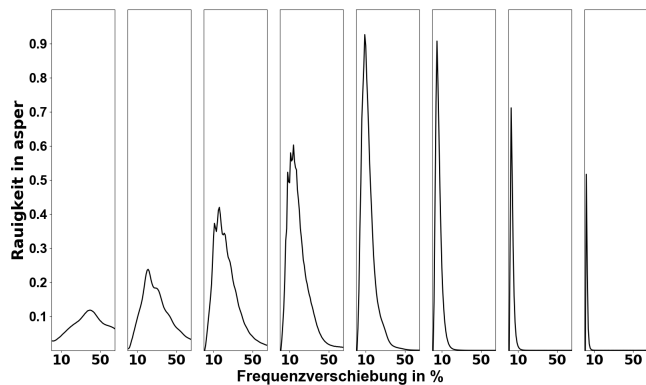


Abbildung 5: Darstellung der berechneten Rauigkeit nach dem Gehörmodell von Sottek [12] als Funktion der relativen Frequenzverschiebung über 8 Oktaven analog zu Abbildung 4

zeigt in einer analogen Darstellung zu Abbildung 4 die berechnete Rauigkeit nach dem Gehörmodell von Sottek [12]. Neben einem grundsätzlich sehr ähnlichen Verlauf liegen sämtliche Maxima der berechneten Rauigkeiten an den Positionen, für die Kameoka und Kuriyagawa [8] eine minimale Konsonanzwahrnehmung festgestellt haben. Dies legt die Vermutung nahe, dass in dieser Studie eine systematische Untersuchung der Rauigkeitswahrnehmung durchgeführt wurde, bevor diese als eigenständiger psychoakustischer Parameter etabliert war.

Da ein Großteil der bekannten psychoakustischen Veröffentlichungen zur Dissonanzwahrnehmung auf den Untersuchungen von Kameoka und Kuriyagawa beruht, wurde eine Vertiefung der damaligen Versuche durchgeführt. Zur Untersuchung des Zusammenwirkens der Wahrnehmungsdimensionen *Rauigkeit*, *Dissonanz* und *Lästigkeit* wurden 35 Sinuspaare erzeugt, welche sich aus den ersten 7 Halbtonschritten von der kleinen Sekunde bis zur reinen Quinte in insgesamt 5 Oktaven zusammensetzten.

Alle Stimuli wurden so erzeugt, dass sie eine gleiche Lautheit von 10 sone nach ISO 532-1 aufwiesen. Die Wiedergabe erfolgte diotisch durch kalibrierte und entzerrte Kopfhörer des Typs Sennheiser HD 650.

Die Untersuchung wurde als semantisches Differential mit siebenstufigen Kategorialskalen realisiert, welches sich aus den Kategorien *Rauigkeit*, *Dissonanz* und *Lästigkeit* zusammensetzte.

Aufgrund der zahlreichen unterschiedlichen Definitionen des Begriffes *Dissonanz*, welche in den oben referenzierten Untersuchungen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führten, wurde hier bewusst auf die Vorgabe einer Begriffsdefinition im Rahmen der Versuchseinführung verzichtet. Somit war es möglich, die individuelle Interpretation der einzelnen Versuchsteilnehmer zu erfassen. Es wurde lediglich vor Beginn des Versuchs ein Hörbeispiel für *Rauigkeit* in Form der Referenz eines mit 70 Hz amplitudenmodulierten Sinustons bei 1 kHz gegeben, da ein ausgeprägtes Verständnis des Terminus *Lästigkeit* vorausgesetzt wurde.

Abbildung 6 zeigt die arithmetischen Mittelwerte der Bewertungen für die einzelnen Kategorien aufgetragen über die Frequenzen der einzelnen Halbtonschritte.

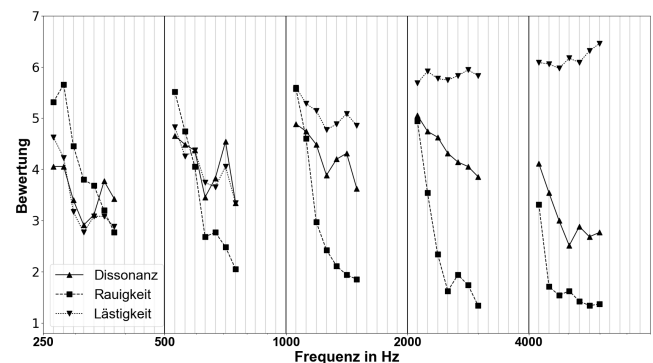


Abbildung 6: Mittelwerte der Kategorien des semantischen Differentials für 35 Probanden

Hierbei zeigen sich deutliche Unterschiede in der Bewertung der einzelnen Kategorien. Während unterhalb von 1 kHz noch ein ähnlicher Verlauf der Bewertungen für *Dissonanz*, *Lästigkeit* und *Rauigkeit* erkennbar ist, werden sämtliche Tonpaare oberhalb von 1 kHz als näherungsweise gleich lästig empfunden.

Oberhalb von 1 kHz treten keine lokalen Extremstellen bei der empfundenen *Rauigkeit* mehr auf, was sich mit den Kurven von Zwicker/Fastl (vgl. Abbildung 1) deckt, welche für fast alle musikalischen Intervalle in diesem Bereich keine Rauigkeitswerte mehr ausweisen.

Während unterhalb von 2 kHz lokale Minima der empfundenen *Dissonanz* für die Terz und die Quinte sowie lokale Maxima für den Tritonus auftreten, ergibt sich eine näherungsweise konstante Abnahme der Dissonanzwahrnehmung für die Oktaven oberhalb von 2 kHz.

Basierend auf der Schlussfolgerung Terhardts (s.o.) hätte eine starke Korrelation zwischen der Dissonanzempfindung und der Rauigkeitsempfindung antizipiert werden können. Für die beiden Frequenzbereiche unterhalb und oberhalb von 1 kHz tritt jedoch keine ausgeprägte Korrelation sämtlicher Einzelbewertungen auf ($r = 0,21$, $p < 0,05$ bzw. $r = 0,18$, $p < 0,05$).

Während für den Frequenzbereich oberhalb von 2 kHz trotz einer geringen *Rauigkeit* eine hohe *Lästigkeit* festgestellt werden konnte, steht diese in keinem statistischen Zusammenhang zur empfundenen *Dissonanz* ($r = -0,4$, $p < 0,05$).

Trotz der sehr unterschiedlichen Definitionen der ver-

schiedenen Fachrichtungen und der sehr unterschiedlichen musikalischen und kulturellen Prägung der Probanden zeigte sich in den Angaben der empfundenen *Dissonanz* eine hohe Konsistenz ($\vartheta_{max} = 0,64$).

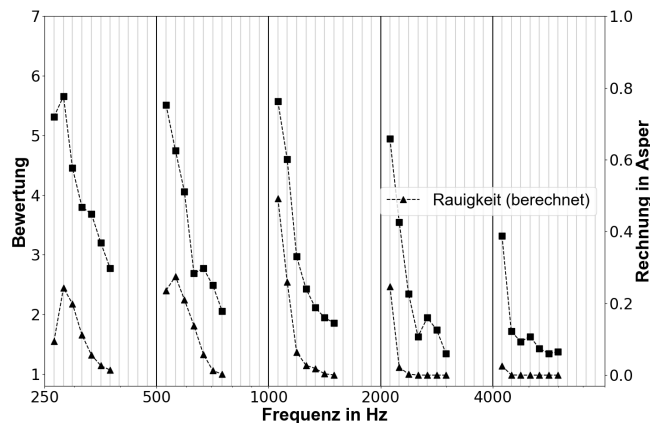


Abbildung 7: Mittelwerte der empfundenen Rauigkeit über alle Probanden und Werte der berechneten Rauigkeit für alle Stimuli

Die Beurteilung der empfundenen *Rauiigkeit* erfolgte ebenfalls mit einer hohen Konsistenz ($\vartheta_{max} = 0,67$). Abbildung 7 zeigt die relative Übereinstimmung zwischen den erfassten Rauigkeitsempfindungen und der berechneten *Rauiigkeit*.

Zusammenfassung

Für die Beurteilungen von Sinuspaaren, welche jeweils ein musikalisches Intervall abbilden, konnte im gesamten Frequenzbereich keine starke Korrelation zwischen der empfundenen *Rauiigkeit* und der empfundenen *Dissonanz* festgestellt werden. Auch konnte kein deutlich ausgeprägter Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen *Dissonanz* und der beurteilten *Lästigkeit* gezeigt werden. Trotzdem erfolgt eine konsistente Empfindung der *Dissonanz*, welche lokale Extremstellen an solchen Positionen ausprägt, die in der Musiktheorie ebenfalls mit einer vergleichbaren Empfindung verbunden werden. Diese kann jedoch auf Grundlage der Ergebnisse nicht vollständig durch die empfundene Rauigkeit erklärt werden.

Ausblick

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse, welche einen signifikanten Unterschied zwischen der empfundenen *Rauiigkeit* und der empfundenen *Dissonanz* zeigen, ergibt sich für künftige Untersuchungen die Frage, in wie weit die in der Literatur proklamierte Trennung zwischen *musikalischer* und *psychoakustischer Dissonanz* zielführend ist. Hierzu sollte jedoch zunächst die Übertragbarkeit der hier vorliegenden Ergebnisse für isolierte Sinuspaare auf die Wahrnehmung von komplexen Tönen sinusförmiger und anderer Grundsignalformen untersucht werden. In diesem Zusammenhang bietet sich besonders eine Untersuchung von für Musikinstrumente charakteristischen Tonkomplexen mit mehreren harmonischen Obertönen an. Dies scheint insbesondere für die Beurteilung der tonalen Komponenten technischer

Schalle von Bedeutung.

Literatur

- [1] Zwicker, E. and Fastl, H.: Psychoacoustics - Facts and Models. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (2007)
- [2] Helmholtz, H. L. F.: Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig (1877)
- [3] Tenney, J.: A History of Consonance. Excelsior Music Publishing Co. (1988)
- [4] Sethares, W. A.: Tuning, Timbre, Spectrum, Scale. Springer-Verlag London Limited (2005)
- [5] Fingerhuth, S. C.: Tonalness and Consonance of Technical Sounds. Diss. RWTH Aachen (2010)
- [6] Piston, W.: Harmony. Gollancz, London (1948)
- [7] Plomp, R. und Levelt, W. J. M.: Tonal Consonance and Critical Bandwidth. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 38, No. 4 (1965), 548-560
- [8] Kameoka, A. und Kuriyagawa, M.: Consonance Theory Part I: Consonance of Dyads. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 45, No. 6 (1969), 1451-1459
- [9] Terhardt, E.: Pitch, consonance and harmony. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 55, No. 5 (1974), 1061-1069
- [10] DeWitt, L. A. und Crowder, R.G.: Tonal fusion of consonant musical intervals: The oomph in Stumpf. Perception and Psychophysics, Vol. 41, No. 1 (1987), 73-84
- [11] McLachlan, N. et al.: Consonance and Pitch. Journal of Experimental Psychology, Vol. 142, No. 4 (2013), 1142-1158
- [12] Sottek, R.: Modellierung der psychoakustischen Rauigkeit. Fortschritte der Akustik - DAGA 2019 (2019)