Symmetrisestä avaimesta sopiminen
Tiiviste- ja MAC –funktiot
Digitaalinen allekirjoitus

Symmetrisestä avaimesta sopimisen protokollat

Key Exchange Protocols:

RSA Exchange

DH Exchange

ECDH Exchange

Mitä ovat Key Exchange protokollat?

TLS- yhteyksissä ja salatussa sähköpostiliikenteessä data salataan nopealla symmetrisellä salauksella, joka on lähes poikkeuksetta AES.

Ennen AES - salausta pitää sopia istuntoavaimesta. Tähän on kolme vaihtoehto menetelmää:

- **RSA Exchange** on ollut yleisin viime vuosiin saakka
- **ECDHE** on korvannut RSA Exchange:n mm. verkkopankeissa
- **DH** Exchange on protokolla, jota on käytetty mm. monenkeskisissä AES:lla suojatuissa videoneuvotteluissa

RSA key exchange

- Standardi TLS – yhteyksissä vielä 2017 lopulla

Periaate:
Yhteyden jompikumpi osapuoli luo satunnaislukugeneraattorilla symmetrisen AES –avaimen ja lähettää sen toiselle osapuolelle RSA:lla salattuna

RSA – key exchange protokollaan liittyvä turvallisuusnäkökohtia

1. **Jos ”HAKKERI” onnistuu faktoroimaan palvelimen julkisen avaimen n muotoon p*q, hän voi tästä eteenpäin avata kaikki avaimen sisältävät viestit ja siten salakuunnella viestiliikennettä**

2. VIRANOMAISET voivat autoritäärisissä maissa vaatia esim. pankkia luovuttamaan serverin yksityisen avaimen valtiolle

3. SATUNNAISLUKUIHIN LIITTYVÄT RISKIT. On ilmennyt tapauksia, että satunnaislukugeneraattorissa on takaportti, sen tuottamat avaimet eivät olekaan satunnaisesti jakautuneita

Diffie – Hellman key exchange

Järjestelmäparametrit: Suuri (2048 bitin) **alkuluku p (modulus) ja ns. generoiva alkio g**

Alice luo satunnaisen yksityisen avaimen a

Bob luo satunnaisen yksityisen avaimen b

A käyttää eksponenttia a ja lähettää julkisen avaimen Ya B:lle

$y_a = g^a \bmod p$

$y_b = g^b \bmod p$

B käyttää eksponenttia b ja lähettää julkisen avaimen Yb A:lle

A laskee:

$K = Y_b^a \bmod p$

$= (g^b)^a \bmod p$

$= g^{ab} \bmod p$

B laskee:

$K = Y_a^b \bmod p$

$= (g^a)^b \bmod p$

$= g^{ab} \bmod p$

Molemmat laskevat symmetri avaimen K käyttämällä omia eksponenttejaan toiselta saa julkisiin avaimiin

Man in The Middle hyökkäyksessä kolmas osapuoli voisi esittää kumpaankin suuntaan toista osapuolta. Tätä vart sekä A:lla että B:llä on oma p ja g. Kolmikko (p_b, g_b, Y_b) muodostaa Bob:n julkisen avaimen, joka löytyy Bob:n palvelinsertifikaatista (mikäli Bob on web-palvelin ja Alice käyttäjä). Avaimesta K sopiminen tapahtuu esitetyllä ta

Generoivan alkion g etsiminen kertolaskuryhmässä Z_p^*

Matemaattisia faktoja:

1. Kaikki ryhmän $Z_p^* = \{1,2,\ldots., p-1)$ alkiot generoivat Z_p^*:n syklisen aliryhmän

2. Alkion a kertaluku Ord(a) = alkion a generoiman syklisen aliryhmän koko.

3. Ord(a) on luvun p-1 divisori kaikille Z_p^*:n alkioille a. (perustuu Lagrangen teoreemaan)

4. Alkioita g, joille Ord(g) = p-1 kutsutaan Z_p^*:n generoiviksi alkioiksi eli primitiivijuuriksi.

5. Jos p – 1:n divisorit ovat $d_1, d_2, \ldots, d_n$, missä $d_1 = 1$ ja $d_n = p-1$, generaattoreita ovat Z_p^*:n a g , joille vain viimeinen potensseista $g^{d1}, g^{d2}, \ldots, g^{dn}$ on 1 (mod p)

Esim: p = 29 on alkuluku. Etsi jokin joukon Z_{29}^* generaattori g .

Ratk Luvun p – 1 (=28) divisorit ovat 1, 2,4,7, 14, 28. Testaa onko 5 tai 2 generoiva alkio.

$\{5^1,5^2,5^4,5^7,5^{14},5^{28}\}$ (mod 29) = {5, 25, 16, 28, 1, 1} => 5 ei ole generaattori, koska ykkösiä on useita.

$\{2^1,2^2,2^4,2^7,2^{14},2^{28}\}$ (mod 29) = {2, 4, 16, 12, 28, 1} => 2 on generaattori, koska vain viimeinen on 1.

”Vahvojen alkulukujen” käyttö moduluksena p helpottaa generaattorin löytö

Kun p on erittäin suuri (esim. 1000 bit) , voi olla mahdotonta löytää luvun p – 1 tekijöitä, joita tarvittaisiin generoivan alkion etsimisessä käytettävässä testissä

Esim. kun p = 265738830135992486377941683556469254997964098756853,
niin p – 1 = 265738830135992486377941683556469254997964098756852 , joka on parillinen, mut
niin suuri, että tekijän 2 lisäksi ei ole mahdollista löytää muita tekijöitä.

=> Siten divisorilistan puuttuessa ei ole mahdollisuutta testata generaattoriehdokkaita

DH protokolla käyttääkin usein ns. vahvoja alkulukuja**, joille sekä p ja (p-1)/2 ovat alkulukuja. Vahvoilla alkuluvuille p-1:n divisorilista on lyhyt: {1, 2, (p-1)/2, p-1}. Vahvat alkuluvut ovat harvinaisia.**
Esim. välillä [10000,20000] on 1033 alkulukua joista vain 75 on vahvoja alkulukuja.
Niitä löytyy ohjelmalla, joka luo satunnaisia alkulukuja ja testaa onko myös (p-1)/2 alkuluku.

Eräs vahva alkuluku p on 200087. Luvun p-1 divisorit ovat {1,2,100043,200086}. Sen testaamiseksi, onko 5 generoiva alkio, lasketaan potenssit 5^1, 5^2, 5^{100043} , 5^{200086} (mod 200087) esim. WolframAlphall
Tulos on {5,25, 200086, 1}, Koska vain viimeinen on 1 , luku 5 on generoiva alkio.

Diffie Hellman exchange :n turvallisuus

Hyökkääjä voi napata Alicen ja Bob:n toisilleen lähettämät julkiset avaimet

$$Ya = g^a \bmod p \text{ ja } Yb = g^b \bmod p$$

mutta ei kykene ratkaisemaan yksityisiä avaimia a ja b, joista ainakin toinen tarvittaisiin symmetrisen avaimen K laskemiseen.

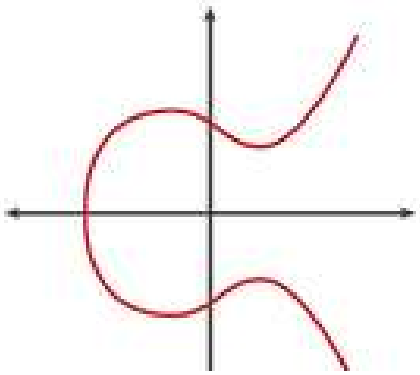
DLP = ” Discrete Logarithm Problem” (diskreetin logaritmin ongelma) on tämän matemaattisesti erittäin vaikeana pidetyn tehtävän nimitys:

DLP: Ratkaistava kokonaislukueksponentti x yhtälöstä $y = g^x \bmod p$ missä y, g ja p on annettu.

Turvallisena pidetty modulus p on suuruudeltaan vähintään 2048 bittiä

ECDHE Elliptic Curve Diffie Hellman Exchang

Mm. Verkkopankit ja monet muut palvelimet ovat siirtyneet v.2018 alussa käyttämään ECDHE avaimesta sopimisen menetelmää, joka on korvannut aiemman standardin RSA exchange



Elliptiset käyrät joita käytetään salauksessa ovat muotoa

$$y^2 = x^3 + a\,x + b$$

Käyrän pisteiden P ja Q välille on mahdollista määritellä yhteenlasku, joka antaa kolmannen käytän pisteen, jota san summaksi P + Q

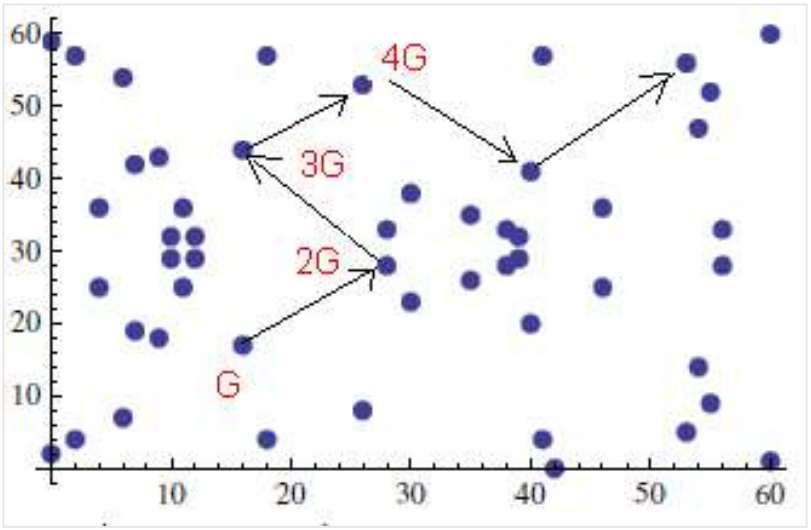
Diskreetin elliptisen käyrän muodostavat kokonaslukuparit (x,y) jotka toteuttavat yhtälön

$$y^2 = x^3 + a\,x + b \mod q$$

, missä modulus q = alkuluku

Diskreetti Elliptinen käyrä

Esim $y^2 = x^3 + 2x + 4 \mod 61$, missä $0 < x,y < 60$



Pisteet joille $y^2 = x^3 + 2x + 4 \pmod{61}$

Käyrän pisteille voidaan määritellä yhteenlasku

$$k = (y_2 - y_1) * (x_2 - x_1)^{-1} \mod q$$

$$X_{P+Q} = k^2 - x_1 - x_2 \mod q$$

$$y_{P+Q} = y_1 - k\,(x_{P+Q} - x_1) \mod q$$

Käyrän pisteiden välille voidaan määr
yhteenlasku, joka muodosta ryhmäral
Yhteenlaskun avulla voidaan määritel
pisteen monikerta.

Pisteistä osa on ns. Generoivia alkioit
monikerrat kattavat kaikki käyrän pist

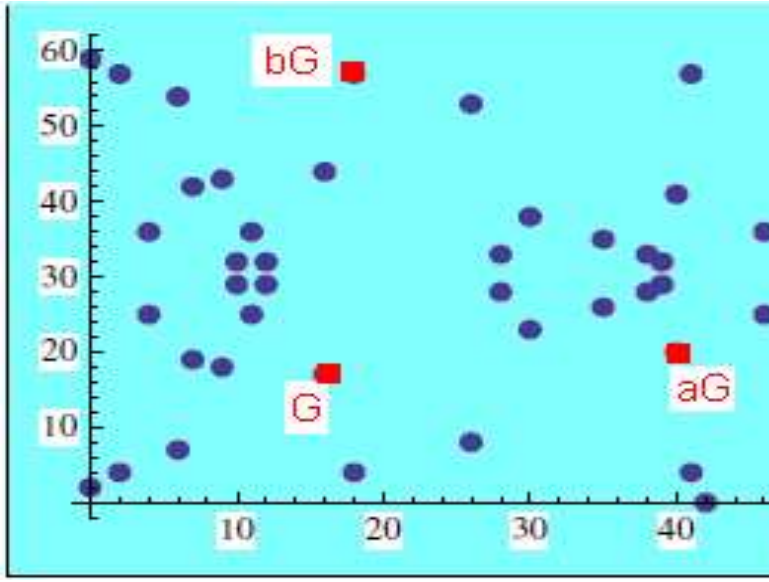
Esimerkkikäyrällä eräs generoiva pist

G = (2,4)

Generaattorin G monikerrat antavat k
ryhmän alkiot:

{G,2G, 3G,…,60G, O}

ECDHE:n periaate



Järjestelmäparametrit ovat käyrä ja generaattori G

1. Alice valitsee **yksityisen avaimen a** ja **lähettää** Bobille käyrän pisteen **aG**

2. Bob valitsee **yksityisen avaimen b** ja **lähettää** Alicelle käyrän pisteen **bG**

3. **Molemmat laskevat symmetrisen avaimen (= piste abG**)

Alice: K = a(bG) Bob: K = b(aG)

TLS:ssä käytetään standardoituja käyriä, joissa modulus q ja pisteiden määrä on n. 250 bittinen kokonaisluku

Turvallisuus: Hyökkääjä voi napata A:n ja B:n toisilleen lähettämät viestit, jotka sisältävä pisteet aG ja bG. Mikäli käyrän pisteiden määrä on riittävän suuri, hyökkääjä ei kykene laskemaan Alicen ja Bob:n yksityisiä avaimia a ja b näistä viesteistä esim. 100 vuoden ajassa.

ECDLP = ”Elliptic curve Discrete Logarithm Problem” on yllä kuvatun matematiikan ”Hard Problem” luokkaan kuuluvan tehtävän nimitys

SANASTOA:

Protokolla eli **yhteyskäytäntö**
on käytäntö tai standardi, joka määrittelee tai mahdollistaa laitteiden tai ohjelmien väliset yhteydet. Toinen osapuoli lähettää viestin toiselle, tämä reagoi siihen ja mahdollisesti vastaa toisella viestillä protokollan mukaisesti. Abstraktimmin tämä voidaan nähdä tietokoneissa olevan tilakoneen tilan vaihtoina toisen koneen viestien perusteella.

Avaimenvaihtoprotokolla
= standardimenettely, jolla voidaan sopia symmetrisestä salausavaimesta

DLP = matemaattisesti vaikea diskreetin logaritmin ongelma, johon DH protokollan turvallisuus perustuu

ECDLP = matemaattisesti vaikea diskreetin logaritmin ongelmaa vastaava ongelma elliptisellä käyrällä , johon ECDHE protokollan turvallisuus perustuu

- Tiivisteet ja MAC:it

- Digitaalinen allekirjoitus

Tiivistefunktiot (hash -functions)

Määritelmä: Tiivistefunktiot ovat yksisuuntaisia funktioita, jotka tuottavat viestistä määrämittaisen tiivisteen (tarkistussumman)

Tiivisteiden käyttötarkoituksia:

1. Tiiviste **varmistaa tiedonsiirron eheyden** (ts. että tieto ei ole muuttunut siirron aikana).

2. Palvelimien salasanatiedostoihin ei tallenneta salasanoja vaan **salasanatiivisteitä**

3. **Digitaalisen allekirjoituksen** laskemisessa käytetään tiivisteitä.

4. **Tietoturvaohjelmien tarkistussummat** kiintolevyn kansioista ovat tiivisteitä

TIIVISTEFUNKTIOILTA vaadittavia tietoturvaominaisuuksia

Vuonna 2005 useita siihen asti käytössä olevia tiivisteitä murrettiin, voidaan jopa sanoa niiden olleen tuolloin salausohjelmistojen heikko kohta.

Hyvän tiivistefunktion vaatimukset:

Seuraavassa merkitään tiivistefunktiot h(m), missä m on viesti, josta tiiviste lasketaan,

1.h(m) on **yksisuuntainen funktio**. Tiivisteestä ei ole mahdollista laskea taaksepäin itse viestiä.

2. Kun tunnetaan yhden viestin tiiviste h(m), on siitä mahdotonta generoida toista viestiä jolla olisi sama tiiviste. (**collision resistance 1**)

3. On mahdotonta generoida kahta viestiä m1 ja m2 joilla olisi sama tiiviste. **(collision resistance 2)**

Tunnettuja tiivisteitä

”Chinese Xiaoun Wang broke in 2005 almost all hash functions in sight - and paradoxally the community of cryptographers loved it”

Kiinalaiset tutkijat osoittivat v. 2005 useiden siihen asti käytössä olevien tiivisteiden haavoittuvuuden. Käytännössä he demonstroivat miten annetulle tiivisteelle h voidaan generoida viesti m, jolla on sama tiiviste.

- **MD5** - **ei suositella, murrettu**
- **SHA-1 (160 b)** - ei suositella, murrettu

- **<u>Seuraavia tiivisteitä ei ole murrettu ja niitä pidetään turvallisina</u>**
- **SHA256**
- **SHA384**
- **SHA512**

Esimerkki TLS:ssä yleisestä SHA256 tiivisteestä.

Hash["Tämä on koeviesti, josta lasketaan tiiviste","SHA256"]
32134986657396586487192643852384396035054468584117070131813446773863278924851

Turvallisen tiivisteen bittimäärä ja ”birthday paradox”

Turvallisen tiivisteen bittimäärän tulee olla 2 x lohkosalaimen turvallinen avainpituus, eli nykyisin 2 x 128 bittiä = 256 bittiä.

Taustalla on ns. ”**syntymäpäiväparadoksi**” (birthday paradox).

Mikä on sellainen koululuokan vähimmäiskoko, että luokassa on yli 50% todennäköisyydellä kaksi henkilöä jolla on sama syntymäpäivä ? Vastaus: 23

Tulos perustuu todennäköisyyslaskentaan

$$P = 1 - \prod_{k=1}^{23} \frac{365 - k + 1}{365} = 0.51$$

Syntymäpäiväparadoksi voidaan yleistää tiivisteille seuraavasti:

Jos tiivisteavaruuden koko on n, noin $\sqrt{n}$ tiivisteen joukossa on yli 50% todennäköisyydellä ”törmäyksiä”
=> 256 bittisiä tiivisteitä on 2^{256} kpl. Jo 2^{128} :n tiivisteen joukossa on yli 50% todennäköisyydellä väh. 2 samaa tiivistettä.

MAC -funktiot

MAC = message authentication code

- MAC = tiiviste, jonka syötteenä on viestin m lisäksi symmetrinen salausavain

- MAC:llä voidaan taata paitsi viestin muuttumat-tomuus, myös lähettäjä (koska avain tiivistetään viestin mukana)

* MAC tiivistettä voidaan käyttää digitaalisen allekirjoituksen tapaan tiedonsiirron pakettien perässä samaan takaamaan pakettien muuttumattomuus ja lähettäjän oikeellisuus.

HMAC-SHA

= tavallisin MAC: **keyed hash message authentication code**
lasketaan viestistä m ja symmetrisesta avaimesta seuraavasti

$$HMAC(K, m) = sha(K \oplus opad || sha(K \oplus ipad || m)$$

⊕ = XOR summa (esim. 1101 + 0101 = 1000)

K = symmetrinen avain

Ipad ja Opad ovat 64 bitin mittaisia vakioita. Alla vakiot heksadesimaalimuodossa

Ipad = 5c5c5c5c , Opad = 36363636

|| liittäminen (concatenation) (esim. “auto”||”mat” = “automat”)

sha-HMAC – funktiota käytettään yleisesti pseudosatunnaisluku-generaattorina laitteissa, jotka tuottavat kertakäyttösalasanoja esim. verkkopankkisovelluksiin. Tästä lisää kurssin viimeisessä luennossa.

Digitaalinen allekirjoitus (digital signature)

- Digitaalinen allekirjoitus mahdollistaa turvallisen asioinnin verkossa. Juridisesti digitaalisesti allekirjoitettu asiakirja vastaa todistajien oikeasti todistamaa asiakirjaa.

Tarkoitus on varmistaa, että

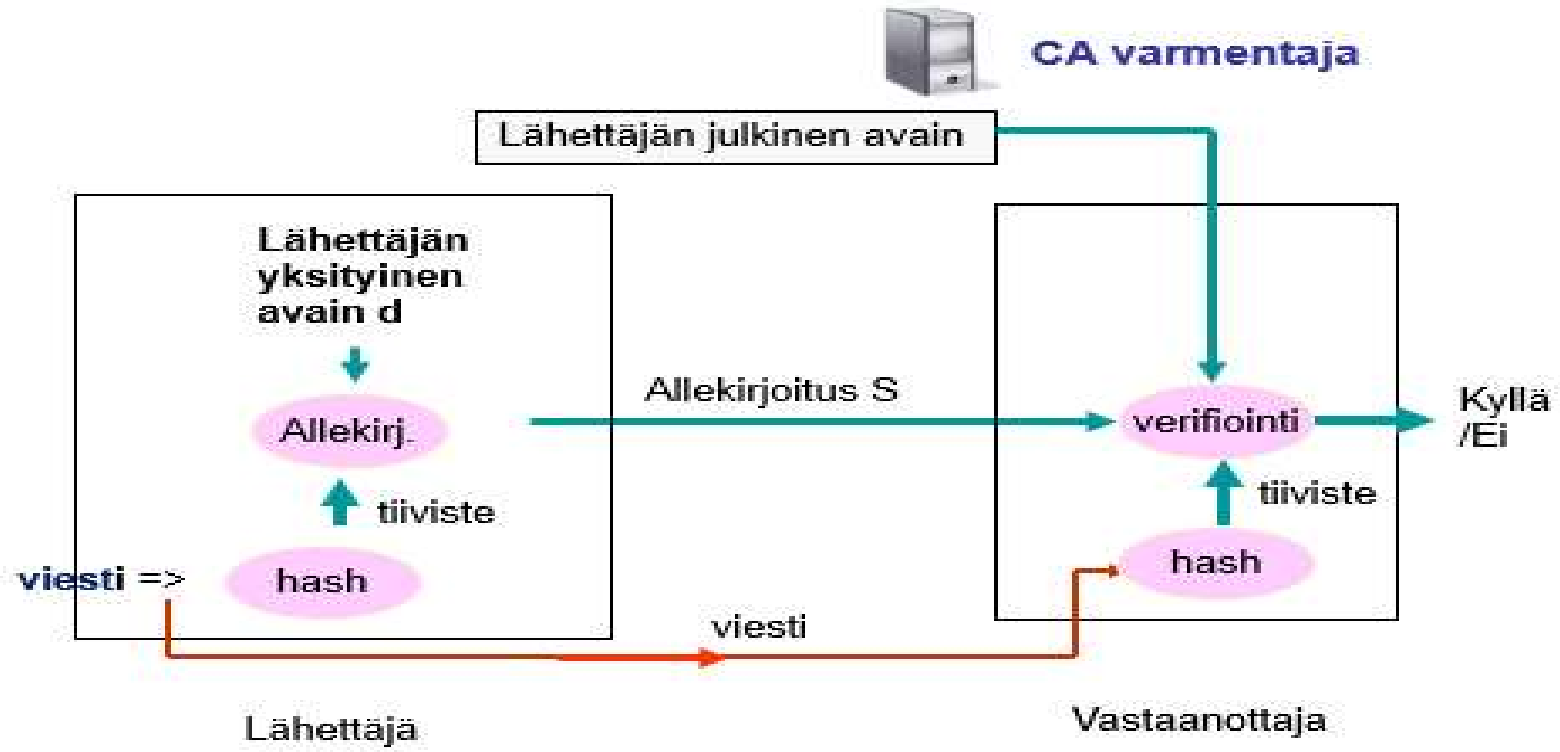
1) viesti on muuttumaton

2) lähettäjä on todennettu

Digitaalisessa allekirjoituksessa käytetään tiivistettä ja julkisen avaimen salausta

Tyypillinen yhdistelmä on RSA ja SHA –tiiviste. Tällainen digitaalinen allekirjoitus on **sha256RSA**, joka on yleinen TLS –yhteyksissä. (uudempi ECDSA on osittain korvannut sen)

Digitaalinen allekirjoitus kaaviona



Digitaalinen allekirjoitus on luku, joka lasketaan viestin tiivisteestä salaamalla se lähettäjän yksityisellä avaimella

Vastaanottaja verifioi seuraavasti:

1) purkaa digitaalisen allekirjoituksen lähettäjän julkisella avaimella ja saa näin viestin tiivisteen.
2) Hän laskee itse viestistä toisen tiivisteen. Jos tiivisteet täsmäävät, lähettäjä on varmennettu ja viesti muuttumaton

Digitaalinen allekirjoitus sha256RSA

Allekirjoituksen laskukaava:

$$\mathrm{sha256}(m)^{d} \bmod n$$

sha256(m) on viestin m SHA-tiiviste
d = viestin lähettäjän yksityinen RSA avain
n = viestin lähettäjän julkinen RSA avain

Esimerkki. **Lasketaan digitaalinen allekirjoitus shaRSA** viestille **”Tämä on koeviesti”**. Viestin lähettäjän RSA- avaimet ovat
Julkinen avain n= 308911 , Yksityinen avain d = 133073

Viesti m = ”Tämä on koeviesti”.

Käytetään SHA tiivistettä, josta kuitenkin otetaan tässä esimerkissä vain 4 numeroa

WolframAlpha: SHA "Tämä on koeviesti" antaa 9126…

Lasketaan **digitaalinen allekirjoitus** tiivisteestä lähettäjän yksityistä avainta käyttäen

$$S = sha(m)^d \bmod n = 9126^{133073} \bmod 308911 = 298954$$

Allekirjoitus on siten 298954

Näytetään, miten vastaanottaja verifioi allekirjoituksen?

Vastaanottaja purkaa allekirjoituksesta viestin tiivisteen lähettäjän julkisella avaimella n.

$$S^e \bmod n = 298954^{65537} \bmod 308911 = 9126$$

Vastaanottaja laskee viestiosasta tiivisteen.

SHA ”Tämä on koeviesti” antaa **9126**…

Vastaanottaja vertaa edellisten kohtien 1 ja 2 tuloksia

TIIVISTEET TÄSMÄÄVÄT => viesti ei ole muuttunut ja lähettäjä on varmennettu