

Projekt: Rowhammer

Gilian Henke
Dominik Mairhöfer
University of Lübeck

Email: gilian.henke@student.uni-luebeck.de
dominik.mairhoefer@student.uni-luebeck.de

Abstract—Das Ziel des Projekts ist es einen One-Location Rowhammer Angriff nach dem Paper [1] zu implementieren. Dieser Angriff soll dann verwendet werden, um lokal die Rechte zu erweitern. Dafür soll unter anderem auch die neue Methode des Memory chasing verwendet werden.

Beim hierbei zu Grunde liegenden Modell, kann die Software Schutzmechanismen besitzen, aber nicht die Hardware. Der Angreifer kann ein arbiträres, unprivilegiertes Programm starten. Unter diesen Voraussetzungen kann der Angriff durchgeführt werden.

I. MOTIVATION

[Know what you want to do and why that is interesting (maybe with bullet points). But do not write this section until you know what you actually have done so that the motivation fits your work. Aus diesen genannten Gründen noch nicht geschrieben.]

We will stick to the following timeline: (Zur Orientierung beibehalten)

- 12/18: Submission of motivation, background, project scope and related work: please give a description of the technical aspect of your work, i.e. detailed background description of attacks. Also describe related work and outline, in more detail, your technical steps.
- 1/15: First version of report. This should be very close to the final version, only technical parts that have not yet been finished should be missing.
- 2/1 : Final submission of complete project description.
- 2/8: Project Presentations in class: 25 minutes presentation plus questions.

II. HINTERGRUND

Die hier betrachteten Rowhammer Angriffe basieren auf folgendem Modell. Das System, auf welchem der Angriff ausgeführt werden soll, besitzt keine Maßnahmen der Hardware, um Rowhammer Angriff zu entdecken und zu unterbinden. Die verwendete Software darf jedoch versuchen, zu erkennen, ob ein Angriff stattfindet, und jenen zu verhindern. Damit solch ein Angriff überhaupt ausgeführt werden kann, muss der Angreifer in der Lage sein, ein beliebiges, nicht privilegiertes Programm auf dem System zu starten.

Im Folgendem werden dann die Methoden beschrieben, mit denen ein Rowhammer Angriff ausgeführt werden kann. Im Rahmen dieses Projekts wird dann versucht, einen Teil dieser Methoden anzuwenden und zu implementieren.

A. Überblick über den Angriffsablauf

Der in dem Paper beschriebene Angriff lässt sich in mehrere einzelne Schritte unterteilen. Diese laufen in der folgenden Reihenfolge ab:

1) One-Location Rowhammer

Zuerst wird durch einen One-Location Rowhammer Angriff versucht wahllos Bits im Speicher zu flippen. Dies dient dazu, Adressen im virtuellen Adressbereich zu finden, für die es überhaupt möglich ist Bits zu flippen.

2) Prefetch Side-Channel Attack

Anschließend werden mit Hilfe einer Prefetch Side-Channel Attacke die physikalischen Adressen zu den im ersten Schritt gefundenen virtuellen Adressen herausgefunden.

3) Memory Waylaying & Prefetch Side-Channel Attack

Um ein Bit in einer Datei zu flippen, für die es keine Schreibrechte gibt, wird diese in den Arbeitsspeicher geladen. Mit Memory Waylaying wird sie immer wieder an unterschiedliche Adressen geladen. Nach jedem neuen Laden wird mit der Prefetch Side-Channel Attacke die physikalische Adresse herausgefunden, an die die Datei geladen wurde. Wurde die Datei an eine physikalische Adresse geladen, für die in den ersten beiden Schritten herausgefunden wurde, dass sie für einen One-Location Rowhammer Angriff verwundbar ist, wird mit dem nächsten Schritt fortgefahren.

4) One-Location Rowhammer

Da die Datei nun an einer bekannten Adresse liegt, kann der One-Location Rowhammer Angriff aus dem ersten Schritt für diese Adresse erneut ausgeführt werden. Damit wird ein Bit an der physikalischen Adresse geflippt und man erhält eine veränderte Datei.

Im folgenden werden die einzelnen Schritte genauer beschrieben.

B. Memory Waylaying

In dem Paper werden zwei neue Methoden vorgestellt, um eine Seite an einer bestimmten physikalischen Adresse im Arbeitsspeicher zu platzieren. Dieser Prozess nennt sich Memory Waylaying. Hierbei wird im Gegensatz zu anderen Methoden nicht der gesamte Speicher mit Daten gefüllt, was die Entdeckung schwieriger macht. Das dies möglich ist, beruht darauf, dass, wenn Daten, wenn sie aus dem DRAM entfernt werden, beim Laden an eine zufällige

Adresse platziert werden. Durch wiederholtes Anwenden dieser Methode kann die Seite an die richtige Position im Speicher positioniert werden.

Mit Hilfe eines Prefetch-based Prediction Oracle, näher beschrieben in [2], kann dann überprüft werden, ob zwei virtuelle Adressen, auf die gleiche physikalische verweisen. Damit kann dann überprüft werden, ob eine Seite an einer bestimmten Stelle im Speicher liegt. Dieses Orakel besteht aus zwei Schritten. Zunächst der prefetch und dann eine Flush and Reload Attacke.

Um das Memory Waylaying durchzuführen, müssen zunächst die Pages aus dem Cache entfernt werden, damit sie bei einem erneuten Zugriff eine neue physische Adresse erhalten. Man könnte diese Pages einfach entfernen, in dem man einfach eine genügend große Menge an Speicher allokiert. Dies kann aber zu Systemfehlern durch Mangel an Speicher erzeugen. Dementsprechend wird versucht eine bessere Möglichkeit zu finden. Man kann dies optimieren, indem man das Wissen hinzunimmt, dass nicht ausführbare Pages eher als ausführbare entfernt werden und ausführbare eher als ausführbare mit lesendem Zugriff. Außerdem muss man wissen, wann die zu entfernende Page nicht mehr im Cache ist. Dazu kann man entweder genügend Pages entfernen, sodass die Wahrscheinlichkeit groß genug ist, oder man kann überprüfen, zum Beispiel mit `mincore` unter Linux, ob die Page noch im Cache ist. Hierbei muss man abwägen, ob Geschwindigkeit oder Nichtaufdeckbarkeit wichtiger ist.

Zusammen mit dem Prefetch-based Prediction Oracle kann man dann das Memory Waylaying durchführen und überprüfen, ob die Page an der richtigen Stelle positioniert ist. Die korrekte Position ist eine, von der man weiß, dass man hier einen Bitflip erzeugen kann.

Der komplette Prozess des Memory Waylaying kann Laufzeiten von 100 Stunden benötigen. Daher gibt es eine effizientere Variante, das Memory Chasing. Beim Memory Chasing wird der copy-on-write Effekt des `fork`-Befehls ausgenutzt. Dazu nehmen wir eine Page, die wir an eine bestimmte Stelle positionieren wollen und setzen sie als `private` und `writable`. Dann verwenden wir `fork` auf den Prozess. Den dadurch entstehenden Child-Prozess erzeugen wir, damit er dadurch auch tatsächlich an eine neue physische Adresse geschrieben wird. Dies geschieht durch den copy-on-write Effekt des `fork`. Danach wird der Parent-Prozess entfernt und dann die Prozedur wiederholt bis die Page an der gewünschten Adresse ist.

C. One-Location Rowhammer

Durch die fortschreitende Entwicklung vom DRAM, werden einzelne Speicherzellen mit immer weniger Spannung betrieben. Dies führt jedoch, dazu dass schon geringe Änderungen der Spannung ein Flip eines Bits zur Folge haben können. Dieses Flippen kann man durchs gehäufte, schnelle Zugreifen auf benachbarte Speicherzellen, Hämmern genannt, bewusst auslösen. Beim double-sided Rowhammer wird auf beiden Seiten der zu flippenden Speicherreihen

gehämmert, während beim single-sided Rowhammer nur eine Seite gehämmert wird. Im Gegensatz zum Namen wird bei diesen Angriffen jedoch mehr als nur eine einzige Speicherzelle gehämmert.

Betrachten wir als nächstes den One-Location Rowhammer. Bei dieser Methode wird im Gegensatz zu den üblichen Methoden nur eine einzige Stelle im Speicher gehämmert und dann überprüft, ob im benachbarten Speicher Bitflips aufgetreten sind. Hierbei werden zwar weniger Bitflips erzeugt, aber die Entdeckung ist wesentlich schwieriger. Die Anzahl der hierbei erzeugten Bitflips ist aber immer noch ausreichend, um einen Angriff durchzuführen.

Bei der Durchführung dieses Angriffes wird zunächst der zu testende Speicher allokiert und mit zufälligen aber wiedererkennbaren Werten gefüllt. Dann wird durch wiederholtes Hämmern versucht in diesem Speicher ein Bitflip zu erzeugen. Der Einfachheit halber wird bei diesem Angriff immer eine zufällige Adresse gehämmert. Hierbei wird eine Adresse aus dem betrachteten Speicher zufällig gewählt und dann wird auf jene Adresse wiederholt zugegriffen. Nach jedem Zugriff wird der Wert dieser Adresse jedoch immer wieder aus dem Cache entfernt, zum Beispiel mit `clflush`, sodass erneut auf den DRAM zugegriffen werden muss. Danach wird überprüft, ob das Hämmern an dieser Adresse irgendeine Veränderung erzeugt hat. Wenn dies eine Veränderung bewirkt hat, dann haben wir unsere Adresse für den Bitflip gefunden. Wenn diese keine Veränderung bewirkt hat, dann wiederholen wir das Hämmern an einer neuen Adresse.

Der Vorteil dieses Angriffes gegenüber des double-sided Rowhammer ist, dass er äußerst einfach ist und schwer von herkömmlichen Strategien zu entdecken ist. Der Nachteil hierbei ist es jedoch, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Bitflip deutlich geringer ist. Ein weiterer Nachteil ist es, dass man hiermit noch nicht die tatsächliche physikalische Adresse des zu flippenden Speichers erhält, sondern nur dessen virtuelle Adresse.

D. Prefetch Side-Channel Attacke

Die Prefetch Side-Channel Attacke aus [2] dient dazu, zu einer virtuellen Adresse die dazugehörige physikalische Adresse herauszufinden.

Der virtuellen Adressraum jedes Prozesses ist unterteilt in zwei Bereiche. Den User und Kernel Bereich. Ein laufender Prozess im User Modus kann lediglich auf den User Bereich zugreifen und im Kernel Bereich weder lesen noch schreiben. Dies ist nur möglich, wenn die CPU im Kernel-Modus läuft und somit dem Kernel vorbehalten. Trotzdem ist auch der Kernel Bereich im virtuellen Adressraum jedes Prozesses enthalten.

Bei einigen Betriebssystemen, insbesondere beim Linux Kernel [3], findet sich im Kernel Bereich eine Region in welcher der gesamte physikalische Speicher in den virtuellen Adressraum gemappt wird. Zum Beispiel befindet sich beim Linux Kernel diese Region im virtuellen Adressbereich von `0xffff880000000000` bis `0xffffc7ffffffffff`. Das bedeutet auf die physikalische Adresse `0x00` kann über

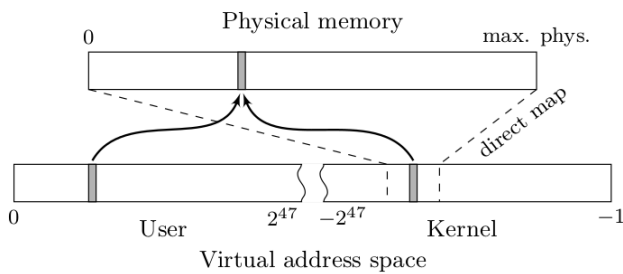


Fig. 1. Direktes Mapping des gesamten physikalischen Speichers. Jede physische Adresse ist zwei mal vorhanden, einmal im User und Kernel Bereich [2]

die virtuelle Adresse `0xffff880000000000` zugegriffen werden.

Weiter bedeutet dies auch, dass für jede physikalische Adresse, die über eine virtuelle Adresse aus dem User Bereich angesprochen werden kann, eine weitere virtuelle Adresse im Kernel Bereich existiert, die auf die gleiche physikalische Adresse zeigt. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt.

Ist für eine virtuelle Adresse aus dem User Bereich die dazugehörige virtuelle Adresse aus dem Kernel Bereich bekannt, lässt sich offensichtlich die physikalische Adresse einfach berechnen, indem von der virtuellen Adresse im Kernel Bereich der Offset `0xffff880000000000` abgezogen wird. Die Schwierigkeit liegt darin, diese Adresse zu finden.

Um die passende virtuelle Adresse im Kernel Bereich zu finden kann nun folgende Eigenschaft ausgenutzt werden:

Auf modernen Prozessoren gibt es einen `prefetch` Befehl, welche die CPU darauf hinweist, dass die Daten unter einer bestimmten Adresse bald benötigt werden. Die CPU lädt diese dann in den Cache, damit sie schneller verfügbar sind. Entscheidend dabei ist, dass man jede Adresse aus dem virtuellen Adressbereich mittels `prefetch` in den Cache laden kann, auch solche die im Kernel Bereich liegen. Der Cache der CPU beruht jedoch auf physikalischen Adressen. Das bedeutet, wenn eine Adresse in den Cache geladen wird, wird bei jedem Zugriff auf eine virtuelle Adresse die auf die physikalische zeigt, auf den Cache zugegriffen.

Mithilfe des Prefetchings kann nun eine Cache Timing Attacke durchgeführt werden, welche wie folgt abläuft:

- 1) Auf die virtuelle Adresse im User Bereich, zu welche die dazugehörige im Kernel Bereich gefunden werden soll, wird ein `flush` ausgeführt. Dadurch wird diese aus allen Caches der CPU entfernt.
- 2) Anschließend wird eine virtuelle Adresse aus dem Kernel Bereich mittels eines `prefetch` in den Cache geladen.
- 3) Dann wird lesend auf die Adresse aus dem User Bereich zugegriffen. Erfolgt der Lesezugriff schnell, wurde die Adresse wahrscheinlich zwischendurch in den Cache geladen und die virtuellen Adressen aus User und Kernel Bereich zeigen auf die gleiche physikalische Adresse. Erfolgt der Zugriff langsam ist dies wahrscheinlich nicht der Fall.

Diese Schritte können nun für alle virtuellen Adressen von `0xffff880000000000` bis `0xffffc7ffffffffffff` wiederholt werden, bis einmal ein schneller Zugriff erfolgt und somit die passende Adresse aus dem Kernel Bereich gefunden wurde.

Um zuverlässig ein korrektes Ergebnis zu erhalten muss im dritten Schritt sehr hochauflösend die Zeit gemessen werden. Dies kann mit Hilfe des `rdtsc` Befehls erfolgen, mit dem die Anzahl an Clock-Zyklen der CPU gemessen werden können. Nach [2] liegt die Anzahl der Zyklen bei einem Zugriff auf Cache bei circa 180, und ansonsten bei circa 380. Weiter muss die Messung für jede zu prüfende Adresse aus dem Kernel Bereich sehr oft durchgeführt werden, da der `prefetch` Befehl nicht zuverlässig ist. Er weist die CPU lediglich darauf hin, die Daten in den Cache zu laden. Die Entscheidung ob dies wirklich erfolgt, liegt jedoch bei der CPU.

Wurde die passende Adresse im Kernel Bereich gefunden, lässt sich anschließend wie oben beschrieben die physikalische Adresse ableiten.

E. Privilege Escalation Attacke

Mit den beschriebenen Methoden lassen sich zwei Arten von Angriffen durchführen: Eine Privilege Escalation Attacke oder eine Denial-of-Service Attacke. In diesem Projekt verwenden wir die Methoden, um eine Privilege Escalation Attacke durchzuführen und dadurch Root-Rechte auf dem System zu erhalten.

F. Abgrenzung des Themas

Im folgenden gehen wir auf Themen ein, welche zwar im Paper angesprochen werden, wir im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht weiter betrachten werden.

1) *Intel SGX*: Intel SGX (Software Guard Extension) ist eine Erweiterung, um Speicherbereich vor anderen Prozessen, insbesondere auch privilegierten, zu schützen. Dadurch sollen Angriffe schlechter erkannt werden. Diese Erweiterung ist jedoch nicht auf jedem Rechner vorhanden. Außerdem ist sie nicht zwingend notwendig, One-Location Rowhammer Angriff durchzuführen. Daher werden wir die Verwendung dessen nicht weiter betrachten.

2) *Memory Waylaying*: Die erste der im Paper beschriebenen Methoden zum Memory Waylaying, hat zu lange Laufzeiten, als das sie im Rahmen dieses Projekts vernünftig untersucht werden kann. Dementsprechend werden wir jene nicht implementieren.

3) *Denial-of-Service Attacke*: Die hier beschriebene Denial-of-Service Attacke benötigt Intel SGX und wird dementsprechend von uns nicht weiter betrachtet.

G. Weitergehende Arbeiten

In [4] werden die Angriff in leicht verständlicher Art anschaulich dargestellt und geben einen Ansatz, um eine Implementation selbst durchzuführen.

In [5] wird eine deterministische Version des Angriffs auf Android-Systeme und eine Verallgemeinerung dieses Angriffs auf Linux-Systeme vorgestellt.

III. WORK DESCRIPTION

Im Rahmen dieser Arbeit wird versucht den Rowhammer-Angriff nachzubilden. Dafür werden die einzelnen notwendigen Schritte, One-Location Rowhammer, memory Waylaying und Prefetch Side-Channel Attack, einzeln ausgeführt und auf Durchführbarkeit, Zuverlässigkeit, Schnelligkeit und Unauffälligkeit getestet. Außerdem wird betrachtet unter welchen Voraussetzungen es überhaupt zu solch einem Angriff kommen kann.

Da unter [6] und [7] bereits Code von den Autoren der Arbeit [1] zu Verfügung gestellt wird, liegt der Schwerpunkt auf den Tests und nicht auf der Implementation.

Folgende Punkte sollen in den Tests überprüft werden, um zu evaluieren wie sich der Angriff in der Praxis verhält und an welchen Stellen Probleme für einen realistischen Einsatz auftreten:

- **Durchführbarkeit**
Zuerst ist zu testen, ob der jeweilige Teilangriff überhaupt ausgeführt werden kann und unter welchen Bedingungen die möglich ist. Es ist bekannt, dass Bitflips bei der Rowhammer Attacke je nach verwendetem Arbeitsspeicher unterschiedlich häufig auftreten. Des Weiteren können die Angriffe auch teilweise durch Patches in der Software eingeschränkt oder verhindert werden.
- **Zuverlässigkeit**
Da die Angriffe teils auf Hardware Fehlern beruhen und teils ein sehr präzises Timing benötigen, stellt sich die Frage, wie zuverlässig die Angriffe bei wiederholtem Ausführen funktionieren und welchen Einfluss die aktuelle Ausführungsumgebung auf die Zuverlässigkeit hat. So könnten sich die beispielsweise die Angriffe bei einem System unter starker Last anders verhalten als im Leerlauf.
- **Schnelligkeit**
Bereits in der original Arbeit wird beschrieben, dass die Angriffe unter Umständen lange Laufzeiten benötigen. Hierbei ist zu testen, welche Teilangriffe eine lange Laufzeit benötigen und unter welchen Umständen dies der Fall ist. Ein Angriff welcher deutlich über 100 Stunden benötigt, bietet offensichtlich in der Praxis deutlich weniger Einsatzszenarien als ein kurz laufender Angriff.
- **Unauffälligkeit**
Letztendlich ist ein weiterer entscheidender Punkt die Unauffälligkeit der Angriffe. Wird beispielsweise bei einem Angriff eine sehr hohe Arbeitsspeicher Auslastung, hohe CPU Last oder extrem viele Speicher Zugriffe verursacht, so ist es wahrscheinlich, dass der Angriff auf einem System, bei welchem solche Ressourcen überwacht werden, entdeckt wird.

Bei den Tests ist es von Vorteil, dass alle Teilangriffe voneinander unabhängig ausgeführt und getestet werden können. Dadurch wird es möglich genau festzustellen, welcher Teil des Gesamtangriffs Probleme verursacht und welcher Teil funktioniert. In dem Fall, dass alle Teile des Angriffs

einzelnen funktionieren ist offensichtlich auch der Gesamtangriff möglich.

IV. RESULTS

Hier werden die Ergebnisse der einzelnen Test für die Teilangriffe vorgestellt. Die Ergebnisse der Teile können dabei unterschiedlich betrachtet werden. Welche Auswirkungen die Ergebnisse der Teile für den Gesamtangriff haben wird im letzten Kapitel diskutiert.

A. *One-Location Rowhammer*

B. *Memory Waylaying*

C. *Prefetch Side-Channel Attack*

V. CONCLUSION

[TBD last]

REFERENCES

- [1] D. Gruss, M. Lipp, M. Schwarz, D. Genkin, J. Juffinger, S. O'Connell, W. Schoebl, and Y. Yarom, "Another flip in the wall of rowhammer defenses," *CoRR*, vol. abs/1710.00551, 2017. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1710.00551>
- [2] D. Gruss, C. Maurice, A. Fogh, M. Lipp, and S. Mangard, "Prefetch side-channel attacks: Bypassing SMAP and kernel ASLR," in *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, Vienna, Austria, October 24-28, 2016*, 2016, pp. 368–379. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2976749.2978356>
- [3] "Linux Kernel Documentation Virtual memory map," https://www.kernel.org/doc/Documentation/x86/x86_64/mm.txt, [Online; accessed 13-Januar-2018].
- [4] M. Seaborn and H. Flake, "Exploiting the dram rowhammer bug to gain kernel privileges," *Black Hat Briefings*, 2015.
- [5] V. van der Veen, Y. Fratantonio, M. Lindorfer, D. Gruss, C. Maurice, G. Vigna, H. Bos, K. Razavi, and C. Giuffrida, "Drammer: Deterministic rowhammer attacks on mobile platforms," in *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, ser. CCS '16. New York, NY, USA: ACM, 2016, pp. 1675–1689. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2976749.2978406>
- [6] "Tools for "Another Flip in the Wall,"" <https://github.com/IAIK/flipfloyd>, [Online; accessed 28-Januar-2018].
- [7] "Prefetch Side-Channel Attacks," <https://github.com/IAIK/prefetch>, [Online; accessed 28-Januar-2018].